



## De invloed van stormcondities op het bankengedrag bij Egmond en Bergen vóór en na een onderwatersuppletie

Werkdocument RIKZ/OS/2004/123 W

RIKZ

# De invloed van stormcondities op het bankengedrag bij Egmond en Bergen vóór en na een onderwatersuppletie

Project: K2005\*Suppleren  
Werkdocument: RIKZ/OS/2004/123 W  
Auteur: S. de Keijzer (RIKZ/UvA)  
Datum: April, 2004



Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ

## **Dankwoord**

Bij deze wil ik Ruud Spanhoff (RIKZ) bedanken voor de prettige samenwerking en de goede begeleiding tijdens mijn stage bij het Rijksinstituut voor Kust en Zee.  
Ook John van Boxel (UvA) wil ik bedanken voor de goedkeuring van het onderwerp en zijn professionele begeleiding van mijn Eigen Onderzoek.

## INHOUD

<b>LIJST MET FIGUREN</b> .....	<b>5</b>
<b>LIJST MET TABELLEN</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INLEIDING</b> .....	<b>7</b>
1.1. DOELSTELLING.....	8
1.2. VRAAGSTELLINGEN.....	8
<b>2. THEORETISCH KADER</b> .....	<b>11</b>
2.1. ZANDTRANSPORTPROCESSEN .....	11
2.2. HET ONTSTAAN VAN BREKERBANKEN .....	13
2.3. ONDERWATERSUPPLETIES .....	15
<b>3. GEBIEDSBESCHRIJVING</b> .....	<b>17</b>
3.1. NEDERLANDSE KUST .....	17
3.2. EGMOND EN BERGEN.....	18
<b>4. METHODEN EN TECHNIEKEN</b> .....	<b>21</b>
4.1. KUSTMETINGEN .....	21
4.1.1. <i>Bepaling Momentane Kustlijn (MKL) en Basis Kustlijn (BKL)</i> .....	21
4.1.2. <i>Bepaling bankparameters uit het kustprofiel</i> .....	22
4.1.3. <i>Bodemkaarten</i> .....	23
4.1.4. <i>Kustparallele verplaatsingen</i> .....	24
4.2. MONITORING VAN HET BANKENGEDRAG MET ARGUS.....	24
4.3. GOLFANALYSE.....	26
<b>5. RESULTATEN</b> .....	<b>29</b>
5.1. HET AUTONOME BANKENGEDRAG .....	29
5.2. HET BANKENGEDRAG NA DE AANLEG VAN DE ONDERWATERUPPLETIES .....	36
5.2.1. <i>Egmond het eerste jaar na de suppletie</i> .....	36
5.2.2. <i>Eerste winter na de onderwatersuppletie bij Bergen</i> .....	39
5.2.3. <i>Verdere ontwikkelingen bij Egmond en Bergen</i> .....	42
5.2.4. <i>Verschillen tussen de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen</i> ..	47
5.3. INVLOED GOLFCONDITIES OP BANKENGEDRAG .....	48
5.3.1. <i>Invloed van stormen op het bankengedrag na de suppleties</i> .....	48
5.3.2. <i>Invloed van stormen op het bankengedrag vóór de suppleties</i> .....	55
5.3.3. <i>Kustparallele verplaatsingen</i> .....	56
<b>6. DISCUSSIE</b> .....	<b>61</b>
<b>7. CONCLUSIES</b> .....	<b>65</b>
<b>8. LITERATUUR</b> .....	<b>67</b>



## LIJST MET FIGUREN

Figuur 2.1: De indeling van het kustprofiel.....	12
Figuur 2.2: Netto zandtransport door verschillende factoren.....	15
Figuur 3.1: Geografische ligging van het onderzoeksgebied.....	16
Figuur 3.2: De ligging van de kustlijn voor Egmond sinds 1679.....	18
Figuur 4.1: Definitie van de Momentane Kustlijn.....	21
Figuur 4.2: Het profiel voor raai 37 in 1966 (groen) ten opzichte van het minimum (blauw), maximum (rood) en gemiddelde (geel) profiel over de hele periode (1965-2002) ..	22
Figuur 4.3: Opname van het argusstation op de Jan van Speijk vuurtoren van woensdag 5 september 2001. ....	24
Figuur 4.4: Aan elkaar geplakte argusbeelden van het argusstation op de mast (rode pijl) en op de vuurtoren (groene pijl).....	24
Figuur 5.1: Drie-dimensionale bodemkaart van het gebied bij Egmond in het jaar 1986.....	28
Figuur 5.2: Bodemkaarten juni 1968 en juni 1999.....	30
Figuur 5.3: Positie van de banktop in de tijd voor raai 37.....	31
Figuur 5.4: Bodemkaart 1987.....	32
Figuur 5.5: Positie van de banktop uitgezet tegen de bankinhoud ten opzichte van het gemiddelde voor 9 raaien.....	33
Figuur 5.6: Bodemkaart van 1980 en 1981.....	34
Figuur 5.7: De ontwikkeling van de banken tussen juni 1999 en maart 2000 (a-c).....	36
Figuur 5.8: Strandbreedte in september 1999 en maart 2000 zoals dat uit de argusbeelden is bepaald.....	37
Figuur 5.9: Argusbeelden van juni 1999 – maart 2000.....	38
Figuur 5.10: Ontwikkelingen bij Bergen van maart 2000 – maart 2001.....	40
Figuur 5.11: Verschilkaart tussen maart 2001 en augustus 2000.....	41
Figuur 5.12: Bankengedrag van augustus 2000 tot april 2002.....	42
Figuur 5.13: Ligging van de banken in de periode augustus 2000 – april 2002.....	43
Figuur 5.14: Bodemkaart van mei 2003.....	45
Figuur 5.15: MKL-volume bij Egmond.....	46
Figuur 5.16: De ligging van de banken op 20 december (a, blauwe lijn in c) en 26 december (b, rode lijn in c) 1999.....	48
Figuur 5.17: De ligging van de banken op 17 mei (a, blauwe lijn in c) en 3 juni (b, rood in c) 2001.....	49
Figuur 5.18: De ligging van de banken op 10 oktober (a, blauwe lijn in c) en 24 november 2000 (b, rood in c).....	50
Figuur 5.19: Ontwikkeling van de banken van 5 (a, blauwe lijn in c) tot 11 (b, rood in c) september 2001.....	51
Figuur 5.20: Gecombineerde argusbeelden van 5 (boven) en 11 (onder) september 2001.....	52
Figuur 5.21: De ontwikkeling van de banken tussen 29 december 2001 en 28 februari 2002.....	53
Figuur 5.22: Kustlangse positie van de druppels in de tijd.....	55
Figuur 5.23: Geschatte zuidwaartse verplaatsing van de druppels uitgezet tegen het aantal uren storm uit het noorden min het aantal uren storm uit het zuiden.....	56
Figuur 5.24: Gemeten zuidwaartse verplaatsing van de druppels uitgezet tegen het aantal uren storm uit het noorden min het aantal uren storm uit het zuiden.....	57

## LIJST MET TABELLEN

Tabel 5.1: Aantal stormuren per periode.....	52
Tabel 5.2: R2-correlatietabel.....	57
Tabel 5.3: Richtingscoëfficiënt van de trendlijn voor de gemeten kustparallele verplaatsingen ..	58

# 1. Inleiding

---

In 1990 heeft de Nederlandse regering besloten dat de kustlijn zich niet verder landwaarts mocht verplaatsen. De kustlijn van het jaar 1990 is daarbij als grens gesteld (deze is gedefinieerd als de Basis KustLijn, ofwel BKL). Als een deel van de kust deze lijn dreigt te overschrijden, dan zal met behulp van zandsuppleties deze overschrijding worden tegengegaan. Sinds 1970 gebruikt men zandsuppleties voor het verstevigen van de kust. Voor die tijd werd gepoogd de afkalving van de kust te voorkomen door het plaatsen van waterhoofden en pieren, de zogenaamde 'harde maatregelen'. Echter, deze maatregelen zijn duur en zeer onderhoudsgevoelig. Bovendien wordt bij deze maatregelen niet echt rekening gehouden met de natuur en de recreatie. De zandsuppletie, een 'zachte maatregel', heeft als voordeel dat de recreatie er minder door gehinderd wordt. Een ander voordeel is dat het systeem van nature al uit zand bestaat en er dus verwacht wordt dat het systeem vanzelf weer in evenwicht komt na een suppletie.

Er zijn grofweg twee soorten zandsuppleties te onderscheiden: strand- en onderwater-suppleties. Na de overstap van 'harde' naar 'zachte' maatregelen vonden eerst voornamelijk strandsuppleties plaats. Hiervoor moet het strand afgezet worden, met buizen wordt dan zand, dat op grotere diepte wordt gewonnen, via pijpen op het strand gespoten en met bulldozers wordt dit geëgaliseerd. Deze manier van suppleren wordt vooral buiten het recreatie-seizoen gedaan.

De meest recente ontwikkeling is dat zand voor de kust op de zeebodem wordt gestort (meestal tegen de vooroever van de buitenste brekerbank). Voordeel hiervan is dat dat het hele jaar mogelijk is zonder de recreatie te schaden. Ook zijn onderwatersuppleties, door het ontbreken van de kosten voor het aanleggen van pijpleidingen en de huur van bulldozers, een stuk goedkoper dan strandsuppleties. Daarom is besloten om voortaan de kust te beschermen met behulp van onderwatersuppleties, mits mogelijk, anders zal teruggegrepen worden op strandsuppleties.

In feite fungeert een onderwatersuppletie op twee manieren, als leverancier van zand, maar ook als breker van de inkomende golven. Coast-3D, een recent, grootschalig, Europees onderzoek voor de kust van Egmond, geeft aan dat met name de brekerfunctie van de onderwatersuppletie op kortere termijn belangrijk is, aangezien deze pas op langere termijn (5 jaar) in staat is om zand aan het strand te leveren (Rijn et al., 2002).

Om de brekerfunctie te kunnen begrijpen en de locatie en grootte van een onderwatersuppletie zo goed mogelijk te plannen, is het noodzakelijk inzicht te krijgen in het gedrag van de brekerbanken voor en na de suppletie. Het is zeer waarschijnlijk dat verschillende golfcondities een belangrijke rol spelen als initiator van het bankengedrag.

Het onderzoek naar kustgedrag is in de laatste jaren, als gevolg van de voorspelde zeespiegelstijging, in belang gestegen. Als gevolg van de relatief jonge leeftijd van de suppleties is er slecht gebrekkige kennis over de gevolgen daarvan op het kuststelsel op lange en korte termijn.

Aan de Universiteit van Amsterdam is eerder onderzoek gedaan naar een onderwatersuppletie. Swart (2002) heeft het gedrag en de effectiviteit van een onderwatersuppletie voor de kust van Callantsoog bekeken. Swart (2002) heeft tevens gekeken naar de invloed van stormen op het kustprofiel ter hoogte van de onderwatersuppletie bij Callantsoog. Hij concludeert dat zowel profielen met een zeewaarts gelegen brekerbank als profielen met een landwaarts gelegen brekerbank een periode kennen van veel zware stormen

voorafgaand aan de meetperiode. Hierbij heeft hij alleen gekeken naar stormen met een golfhoogte van meer dan 4 meter. Door in dit onderzoek ook minder extreme stormen mee te nemen en tevens de richting daarvan, kan meer gezegd worden over de reactie van de brekerbanken op extreme omstandigheden. Dit onderzoek bepaalt tevens de gevolgen van een onderwatersuppletie op het bankengedrag op langere termijn. Guillén et al. (1999) en Ruessink en Jeuken (2002) hebben gekeken naar de invloed van stormen op de Nederlandse kust. Beide onderzoeken hebben daarbij het verband proberen te leggen tussen stormen en erosie of sedimentatie van de duinvoet langs de Nederlandse kust. Guillén et al. (1999) hebben ook de banken erbij betrokken, maar niet op de manier waarop ze in dit onderzoek benaderd worden.

## 1.1. Doelstelling

Aangezien uit het Coast3D-onderzoek voor de kust van Egmond blijkt dat er weinig dwarstransport van zand optreedt door de trog tussen de buitenste en binnenste bank, zal een onderwatersuppletie slechts op langere termijn (5 jaar) invloed hebben op het zandvolume op het strand (Rijn et al., 2002). Op korte termijn zal de suppletie voornamelijk als golfbreker fungeren. In dit onderzoek wordt deze functie van meer belang geacht dan de functie van de onderwatersuppletie als leverancier van zand. Door het plaatsen van een onderwatersuppletie tegen de buitenste bank wordt het golfklimaat ter plekke verstoord. En daarmee waarschijnlijk ook de cyclus van de brekerbanken.

De doelstelling van dit onderzoek luidt als volgt:

- Het verklaren van het bankengedrag bij Egmond en Bergen vóór de onderwatersuppleties aan de hand van voorafgaande golfcondities.

Met het autonome gedrag in het achterhoofd zal de tweede doelstelling worden benaderd:

- De respons van het kuststelsel op de onderwatersuppleties verklaren.

Voor en voornamelijk nadat een onderwatersuppletie is uitgevoerd, worden extra opnames gemaakt van het kustprofiel aldaar. Deze extra opnames maken het mogelijk om op kortere termijn naar de invloed van golven op het bankengedrag te kijken dan mogelijk is bij JARKUS-opnames. Ook de aanwezigheid van ARGUS-camera's in Egmond draagt bij tot een beter korte termijn inzicht in de invloed van golven op het kuststelsel. Hoofdstuk 4 bespreekt de gebruikte methoden.

## 1.2. Vraagstellingen

Om te kunnen toetsen of bankbewegingen stormafhankelijk zijn, zal een manier bedacht moeten worden om het golfklimaat tussen de opeenvolgende opnames te kwantificeren. Er zal gezocht worden naar een parameter die het belangrijkste deel van het golfklimaat omvat.

- Is het mogelijk een index te definiëren voor de golfcondities tussen de opnames?

Naast het kwantificeren van de golfcondities voorafgaand aan de opnames is het ook van belang de ontwikkelingen tussen de opnames te kunnen

bepalen. Aangezien gezocht wordt naar de relatie tussen golfcondities en bankengedrag, ligt het voor de hand een parameter die de bankverplaatsingen beschrijft te kiezen.

- Is het mogelijk een parameter te definiëren die de beweging van de brekerbanken omschrijft?

Na het definiëren van de golf- en bankparameter, zullen beide worden gebruikt om de invloed van voorafgaande golfcondities te bepalen op het bankengedrag. Belangrijk is dat het bankengedrag meer omvat dan alleen de bankbewegingen, ook de vorm van de banken zal hierbij meegenomen worden.

- Zijn de golfcondities aan de hand van deze index te koppelen aan het bankengedrag?

Naar verwachting speelt de golfrichting een grote rol. Vooral de vorm van de banken zou door de golfrichting bepaald kunnen worden. Ook zorgen schuin invallende golven voor een toename in het kustlangs transport. Aangezien de golfrichting een sterke variabiliteit vertoont in de tijd, zal het lastig worden te bepalen wat zijn invloed is tussen de JARKUS-opnames. Wellicht dat de ARGUS-beelden hierbij uitkomst kunnen bieden.

- Welke rol speelt de golfrichting?

## 2. Theoretisch kader

---

Bij het plaatsen van een suppletie is het van belang te weten hoe deze zich gedraagt. Om daar iets over te kunnen zeggen moet eerst het autonome gedrag van het kuststelsel bekend zijn. Waarom liggen er bijvoorbeeld op de ene plek geen brekerbanken terwijl een aantal kilometer verderop de kust gekenmerkt wordt door meerdere brekerbanken? Ook de processen die voor het zandtransport verantwoordelijk zijn, spelen een belangrijke rol bij de planning van een suppletie. Het is namelijk belangrijk om een beeld te hebben of, en zo ja, naar welke kant en met welke snelheid het zand zich zal verplaatsen, om zo ervoor te zorgen dat de suppletie op de juiste plek wordt aangelegd. Dit hoofdstuk bekijkt allereerst de processen die verantwoordelijk zijn voor het zandtransport, daarna neemt het de vorming van brekerbanken onder de loep, met verschillende regio's langs de Nederlandse kust. Ook wordt de theorie achter het suppleren verder uitgewerkt.

### 2.1. Zandtransportprocessen

Bijna iedereen die ooit in zee gezwommen heeft, is het wel eens overkomen. Op een stralende zomerdag snel je over het bloedhete zand om je vervolgens te ontdoen van alle overbodige kleding en met een snoekduik door de eerste brekende golf te duiken voor de broodnodige verkoeling. Na een tijdje spetteren en spatteren verlaat je het water om te ontdekken dat je je spullen niet meer kunt vinden. In de haast naar verkoeling ben je vergeten op te letten waar je je handdoek hebt achtergelaten en op de een of andere manier is de zee erin geslaagd je op ongemerkte wijze mee te sleuren, zodat je nooit op dezelfde plek in en uit het water komt.

Dezelfde krachten die een zwemmer verplaatsen zijn verantwoordelijk voor het zandtransport. Er wordt onderscheid gemaakt in twee transportrichtingen: kustdwars en kustparallel (of kustlangs).

Het zeezand wordt op twee manieren vervoerd, over de zeebodem (rollend en salterend) en in suspensie. De manier waarop zand wordt getransporteerd is afhankelijk van de diepte van de zee. In de brandingzone wordt zand vooral in suspensie vervoerd, terwijl verder op zee transport over de zeebodem relatief belangrijker is. Als golven in water komen dat ondieper is dan 3 tot 5 keer de golfamplitude breken ze. Dit breken van de golven wordt gezien als het belangrijkste proces dat zand in suspensie brengt (Voulgaris and Collins, 2000).

De mechanismen die het transport sturen zijn golven en getij. Er is een verschil tussen windgolven en deining. Deining is het restant van golven die elders ontstaan zijn. Als bijvoorbeeld op ergens op de Atlantische Oceaan een storm plaatsvindt zullen hoge golven ontstaan. Deze golven zullen zich over de oceaan verspreiden en uiteindelijk zal een restant daarvan ook op de Noordzee terecht komen. Echter, voordat deze golven daar aankomen zijn ze, door de lange afstand die ze hebben afgelegd, lager geworden en hebben een langere golflengte gekregen. De frequentie van deining ligt in het lagere gedeelte (30-100 mHz) van het golfspectrum (30-500 mHz). Het laagfrequente deel van het golfspectrum bestaat echter niet alleen uit deining, er zijn ook invloeden van andersoortige golven aanwezig, zoals een staartje van de windgolven (Wijnberg, 2002). Windgolven hebben over het algemeen een hogere frequentie en energie. Dat wil niet zeggen dat zij meer

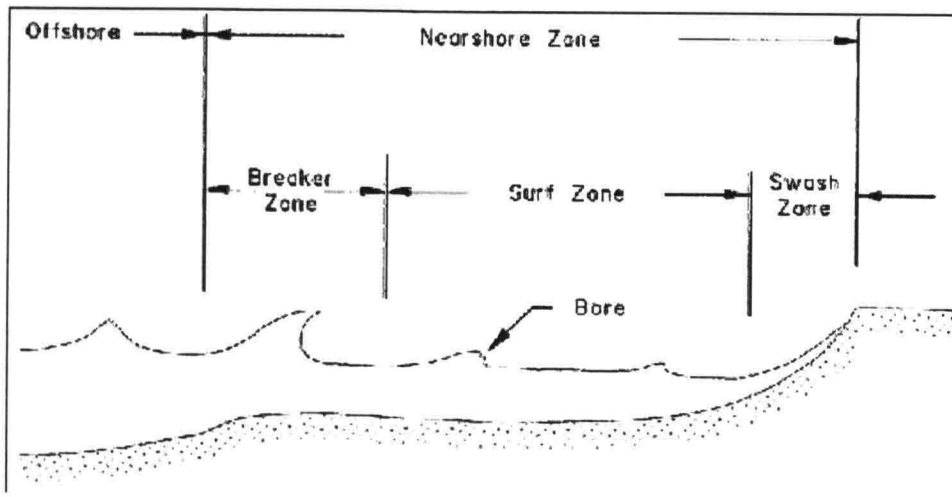
invloed op het transport hebben. Door de langere golflengte van deining dringen deininggolven beter bij de bodem door (dan windgolven met eenzelfde golfhoogte).

De kust heeft de neiging zich loodrecht op het inkomende golfveld te oriënteren (Dronkers, 2003).

In de Noordzee heeft het getij op sommige plaatsen veel invloed op het zandtransport. Windgolven beïnvloeden het transport overal, maar zijn het effectiefst in ondiepe gebieden (Molen, 2002). De belangrijkste golfgestuurde transportprocessen zijn volgens Rijn (1997):

- Netto kustwaarts gericht transport door asymmetrie van de orbitaalsnelheid van een golf. Met hoge, landwaarts gerichte snelheden onder de golftop en relatief kleine, zeewaarts gerichte snelheden onder het golfdal. Dit verschijnsel wordt ook wel golf-asymmetrie genoemd.
- Kustlangs gericht transport door het ontstaan van kustlangse stromingen als gevolg van brekende golven.
- Netto zeewaarts gericht transport door het ontstaan van een netto terugwaarts gerichte stroming (onderstroom) in een zone net boven de zeebodem. Deze vereffent de kustwaartse waterflux tussen de golftop en het golfdal van de brekende golven.
- Netto kustwaarts gericht transport door Longuet-Higgins streaming: als gevolg van turbulentie en schuif- en spankrachten op de bodem ontstaat in een dunne bodemlaag kustwaarts transport (Longuet-Higgins, 1953).
- Netto zeewaarts gericht transport door lange golven die ontstaan door variaties in 'radiation stress' van golven met ongelijke hoogte en richting.
- Zeewaarts gericht zwaartekrachttransport onder invloed van het hellende kustprofiel.

Om een beeld te krijgen van de schaal waarop deze processen plaatsvinden is het goed om de kust in te delen in een actief deel en een niet actief deel. Het niet actieve deel ligt zeewaarts van de depth-of-closure (DOC; Hallermeier, 1981). De DOC is de diepte waaronder geen waarneembare veranderingen plaatshebben gedurende bijvoorbeeld jaarlijkse waarnemingen van het kustprofiel (een dwarsdoorsnede van de kust). Deze diepte is afhankelijk van de schaal waarop gekeken wordt. Hoe langer de periode waarop gekeken wordt, hoe dieper de DOC ligt. In de Noordzee wordt er van uitgegaan dat deze grens bij ongeveer -20m ligt. Zand dat bijvoorbeeld uit de Noordzee wordt gehaald, moet op dieptes groter dan 20 meter gewonnen worden. Men heeft deze grens gekozen zodat de zandwinning het actieve deel van het kustprofiel niet beïnvloedt. Als op kortere, jaarlijkse, tijdschaal gekeken wordt, dan wordt de grens tussen het actieve en niet-actieve deel meestal op -8m gekozen.



Figuur 2.1: De indeling van het kustprofiel.

Het meest actieve gedeelte van de kust (Nearshore Zone in figuur 2.1) is onder te verdelen in drie gedeeltes. Het gedeelte waar de golven breken (Breaker Zone) ondervindt de meeste krachten die zand in transport kunnen brengen. In de brandingzone (Surf Zone) kustwaarts daarvan is de meeste energie van de golven al teniet gedaan, deze zullen relatief rustig op het strand af bewegen, om vervolgens op het strand (Swash Zone) het laatste beetje energie te verliezen. In de brandingzone halen snellere golven langzamere golven in. Deze gaan samen, waardoor hogere golven met een langere golfengte ontstaan, die de waterstand verhogen ("Bores"). Zoals eerder vermeld zijn er twee richtingen waarin het transport plaatsvindt. Het belang van kustdwars en kustlangs transport verschilt per plek. Op de Waddeneilanden speelt kustlangs bijvoorbeeld een grotere rol dan langs de Hollandse kust. Voulgaris en Collins (2000) stellen dat kustdwars transport in sommige gevallen eerder een plaatselijke reorganisatie van zand van verschillende diameter is dan een netto zandverlies. Vaak zullen kustlijnveranderingen echter veroorzaakt worden door gradiënten in kustlangs zandtransport.

## 2.2. Het ontstaan van brekerbanken

Over het ontstaan van de brekerbanken verschillen de meningen. Over het algemeen zijn er drie gangbare theorieën (Wijnberg en Kroon, 2002).

1. Breekpunt. De bank vormt zich op het punt waar de golven met een korte golfperiode breken.
2. Infragravity waves. Golven met een lange golfperiode (20-30 seconden) vormen de banken. Hierbij wordt uitgegaan van knopen en buiken. Waarbij de bank vormt bij de knoop en de trog bij de buik.
3. Zelforganiserende mechanismen. De bank vormt zich door de interactie tussen zeebodem en de golfgedreven stroming.

Elke van deze theorieën heeft zijn gebreken en daardoor kan geen enkele theorie worden aangewezen als dé theorie (Wijnberg en Kroon, 2002).

Brekerbanken zijn zeer dynamische verschijnselen. De hoogte en positie van de banken kunnen sterk veranderen op maandelijkse en zelfs wekelijkse



schaal.

Het rechtekken van banken is vaak abrupt, een storm kan daarvoor zorgen, terwijl de ontwikkeling van onregelmatigheden meestal volgt uit toenemende kustlangse variabiliteit (Enkevort en Ruessink, 2003b). Enkevort en Ruessink (2003a; uit Sallenger et al., 1985, en Gallagher et al., 1998) stellen dat de wekelijkse bankmigratie rechtstreeks gegeneerd wordt door de golfcondities. De banken bewegen snel zeewaarts tijdens hoog-energetische condities en langzaam landwaarts tijdens laag-energetische condities. Volgens Plant et al. (1999) bestaat bankmigratie uit vier fasen bij oplopende golfhoogtes. (i) landwaartse verplaatsing, (ii) een vermindering in landwaartse migratie, (iii) een verandering van landwaartse naar zeewaartse verplaatsing en (iv) een toename in zeewaartse migratie. We zien dat banken zich per saldo netto zeewaarts verplaatsen om daar vervolgens te vergaan. Op dat moment zal aan de kustlijn een nieuwe brekerbank ontstaan die weer zeewaarts zal verplaatsen tot hij vergaat. Het zand van de bank die vergaat, komt mogelijk ten goede aan de nieuwe bank die ontstaat. Volgens Wijnberg (1995) houdt deze kustdwarse herverdeling van zand de cyclus van de netto zeewaarts verschuivende banken in stand. De cyclus van het ontstaan en vergaan van de banken gaat niet overal hetzelfde langs de Hollandse kust (van Den Helder (km 0) tot Hoek van Holland (km 118)). Wijnberg (2002) deelt de Hollandse kust op in 5 morfologische eenheden. Deze eenheden hebben vrij abrupte grenzen (binnen circa 2 km) die correleren met menselijke ingrepen als pieren en havenhoofden. Omdat hydrodynamische krachten en sedimentsamenstelling van de verschillende regio's geen noemenswaardige verschillen vertonen, kunnen de abrupte overgangen tussen de regio's verklaard worden door de kennelijk belangrijke menselijke ingrepen (Wijnberg, 2002). De 5 onderstaande regio's zijn gebaseerd op metingen vanaf 1963-1990.

1. Regio 1 (km 3-8) wordt gekenmerkt door een terugschrijdende kustlijn en een steiler wordend kustprofiel. De brekerbank vertoont een kustwaartse verplaatsing in de tijd.
2. Regio 2 (km 8-23) heeft net als regio 1 een terugschrijdende kustlijn, echter het kustprofiel wordt hier juist vlakker, alhoewel het de laatste jaren erop lijkt dat het profiel steiler wordt. Er is een brekerbank met een stabiele positie.
3. Regio 3 (km 23-55) wordt gekenmerkt door langzame, tijdelijke en ruimtelijke fluctuaties van kustlijnpositie en kustprofiel. De kustlijnpositie beweegt achtereenvolgens landwaarts en zeewaarts met een periode van ongeveer 15 jaar. De kustlangse bewegingen van de kustlijn vertonen verschillen op schaal van ongeveer 2 km, over het algemeen (netto) is de kustlangse beweging zuidelijk gericht. Er zijn 2-3 brekerbanken aanwezig die zich (netto) zeewaarts verplaatsen, daar vergaan en dan wordt een nieuwe bank gevormd nabij de kustlijn. Deze cyclus duurt ongeveer 15 jaar. De helling van het kustprofiel vertoont geleidelijke fluctuaties gedurende eenzelfde tijdsperiode.
4. In regio 4 (km 56-98) zijn zowel kustlijn en kustprofiel stabiel met slechts kleine jaarlijkse fluctuaties. Er zijn meerdere (2-4) brekerbanken die eenzelfde cyclus doormaken als in regio 3, echter dit gebeurt in een periode van slechts 4 jaar.
5. Regio 5 (km 98-118) wordt gekenmerkt door slechts kleine verschuivingen in de kustlijn. Lokaal zijn er echter aanzienlijke ingrepen (pieren bij Scheveningen en Hoek van Holland en grote strandsuppleties (km 116-119)) gedaan om de kustlijn tegen erosie te beschermen. Het kustprofiel ondervindt veranderingen in



steilheid die waarschijnlijk aan deze menselijke interventies te wijten zijn. Soms zijn er lichte brekerbanken aanwezig. Egmond en Bergen liggen in Regio 3. Ze worden gekenmerkt door een meerbankensysteem met een cyclus van ongeveer 15 jaar.

Het ontstaan van meerdere brekerbanken gebeurt alleen als de buitenste bank ver genoeg van de kust ligt zodat de golven kunnen groeien en deze voor een tweede keer kunnen breken. Kusten met een steil profiel hebben een smallere surf zone en zullen dus minder geschikt zijn voor de ontwikkeling van meerdere brekerbanken (Dronkers, 2003).

Het belang van de ligging van de banken is zeer groot. Verschillende onderzoeken (Boer, 2002; Guillén et al., 1999) geven de relatie tussen banken en het strand. De vorm van de banken wordt teruggevonden in het strand.

### 2.3. Onderwatersuppleties

De theorie achter de onderwatersuppleties is feitelijk gebaseerd op Bruuns theorie (Dronkers, 2003). Zijn theorie stelt dat elk kustsysteem een evenwichtsprofiel heeft. Bij een verstoring van dit profiel door bijvoorbeeld een suppletie, zal het systeem streven naar een nieuw evenwicht. Wordt het zand van de suppletie op de vooroever van de buitenste brekerbank gestort, dan zal volgens deze theorie een deel van dat zand kustwaarts verplaatst worden om het evenwichtsprofiel te herstellen. Dit resulteert uiteindelijk in een zeewaartse verplaatsing van de kustlijn. Bij een strandsuppletie zal het omgekeerde gebeuren, een deel van het zand dat werd gebruikt voor de ophoging van het strand zal zeewaarts verplaatst worden om het profiel te herstellen.

In Nederland worden de meeste onderwatersuppleties tegen de buitenste brekerbank geplaatst aan de zeewaartse zijde. Op die manier heeft een onderwatersuppletie op twee manieren van een positief effect op de kustbescherming. Ten eerste verstevigt hij de kust door transport van zand richting strand. Ten tweede werkt de ondiepte, die door de onderwatersuppletie veroorzaakt wordt, als brekerbank. De golven breken hierop waardoor er minder energie overblijft om het strand te doen eroderen (Hoekstra et al., 1994).

Het kustsysteem reageert snel op een onderwatersuppletie. Er kunnen drie stappen worden onderscheiden. Eerst zal zich op de vlakke top van de onderwatersuppletie een bank en een trog vormen (in de orde van weken). Dan zullen de bestaande banken zich zo gaan bewegen (in kustdwarse richting) dat er een nieuwe meer stationaire situatie ontstaat (orde van maanden). In de laatste stap zullen de banken zich met snelheden verplaatsen die vergelijkbaar zijn met de autonome verplaatsingssnelheden (orde van jaren; Spanhoff et al., 2003).

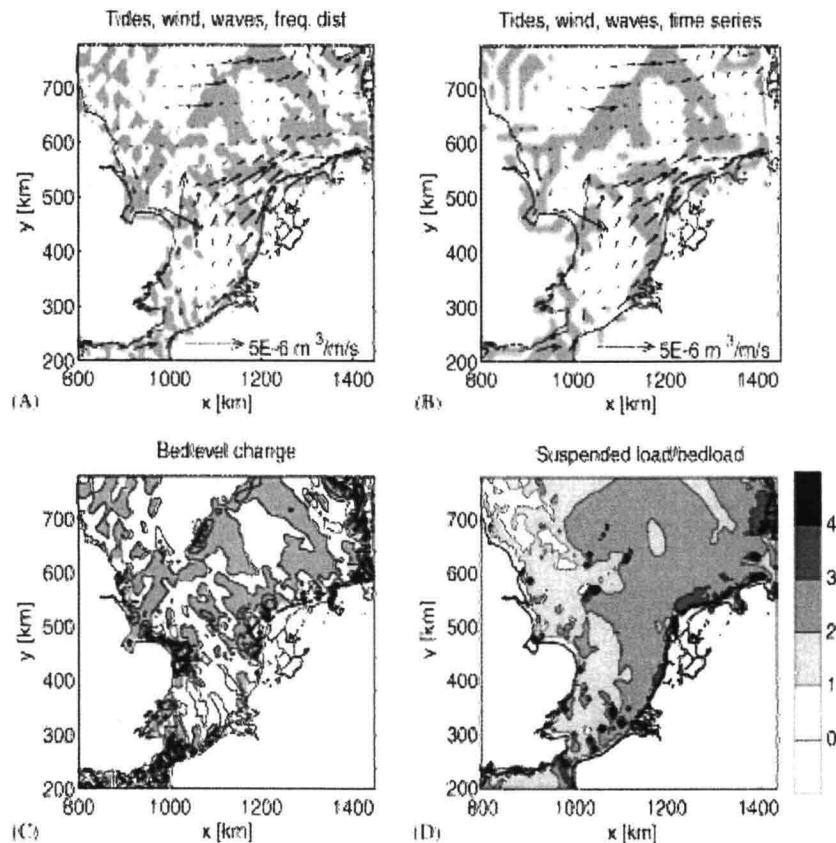
De bevindingen van een recent, grootschalig, Europees onderzoek voor de kust van Egmond (Coast-3D) wijzen erop dat het transport van zand richting strand pas op langere termijn (5 jaar) merkbaar zal zijn, aangezien er door de trog, tussen binnenste en buitenste bank, weinig zandtransport plaatsvindt (Rijn et al., 2002). De onderwatersuppletie zal dus hoofdzakelijk functioneren als golfbreker.

Hoe goed onderwatersuppleties werken is nog niet bekend. Er is slechts enkele jaren geleden begonnen met onderwatersuppleties. Wel is tot nu toe duidelijk dat de suppleties zich niet overal hetzelfde gedragen. Dit heeft te maken met het feit dat de Nederlandse kust niet geheel homogeen te

noemen is en niet overal dezelfde ligging heeft (Wadden t.o.v. Hollandse kust).

Meest opvallend is het verschil tussen de Hollandse kust en de Wadden. De onderwatersuppleties langs de Hollandse kust blijven relatief op de zelfde plek liggen als waar ze zijn gestort, terwijl de suppleties op de Waddeneilanden een sterke kustparallele verplaatsing vertonen. Dit heeft hoogstwaarschijnlijk te maken met de golven. De Nederlandse kust wordt namelijk beïnvloed door twee soorten golven. Dit zijn de windgestuurde golven en de deining van de zee. De windgolven hebben de meeste invloed vanuit zuidwestelijke richting, terwijl bij noordwestelijke golfrichtingen deining een grotere rol speelt. Een hypothese is dan ook dat van Hoek van Holland tot Den Helder de windgolven en de deining elkaar in evenwicht houden en zo de zandsuppleties redelijk op een plek houden, terwijl langs de Wadden de windgolven en de deining elkaar versterken waardoor de suppleties aan grote transporten onderhevig zijn en dus niet op hun plaats blijven (zie figuur 2.2).

Om dit te kunnen onderzoeken zijn zowel gegevens nodig over de windgolven en de deining. Aangezien de deining een laag energetisch verschijnsel is, is deze moeilijk te zeven uit de zee die door de hoog energetische windgolven wordt beïnvloed.

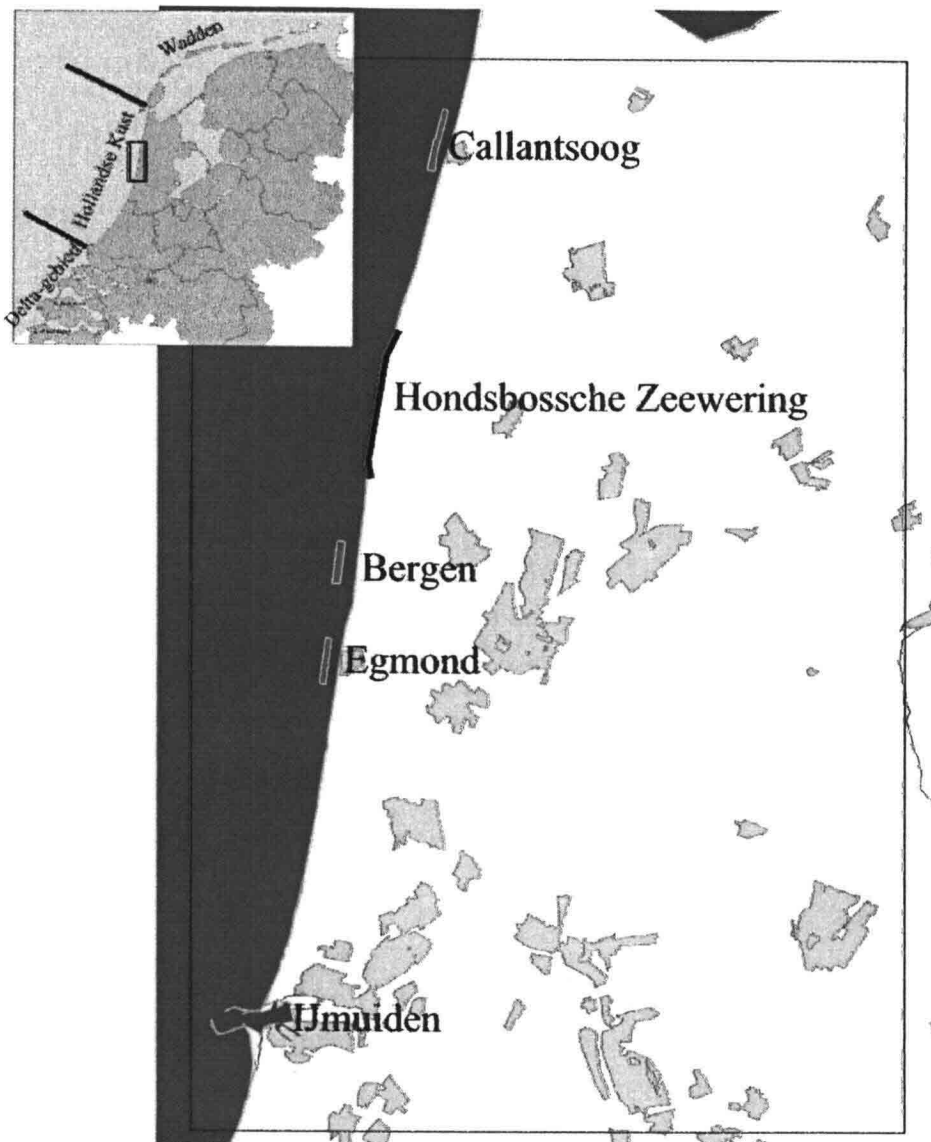


Figuur 2.2: Netto zandtransport door verschillende factoren. (A) getijde, wind en golven aan de hand van het windklimaat; (B) getijde, wind en golven aan de hand van tijdseries; (C) zeebodemveranderingen, contour interval is 1 mm/jaar; (D) ratio van gemiddelde sediment in suspensie en gemiddelde sediment over de bodem vervoerd (Molen, 2002).

## 3. Gebiedsbeschrijving

### 3.1. Nederlandse kust

De Nederlandse kust is grofweg onder te verdelen in drie gedeeltes. Van noord naar zuid zijn dat de Wadden, de Hollandse kust (Den Helder tot Hoek van Holland) en het Deltagebied ten zuiden van Hoek van Holland (figuur 3.1).



Figuur 3.1: Geografische ligging van het onderzoeksgebied. In het rood zijn de onderwatersuppleties bij, van noord naar zuid, Callantsoog, Bergen en Egmond aangegeven.

Het Waddengebied bestaat uit een aantal eilanden die de Waddenzee scheiden van de Noordzee. Tussen de eilanden liggen getijgeulen die de

Waddenzee vormen tot een ondiepe binnensee met ondiepe, uitgestrekte zandplaten.

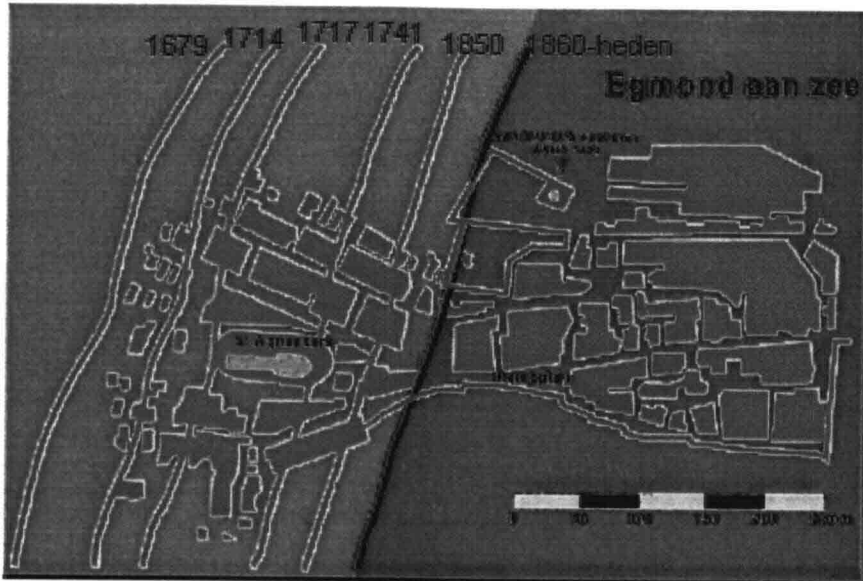
Het Deltagebied bestaat ook uit een aantal (schier)eilanden, die tot de watersnoodramp in 1953 in open verbinding stonden met de Noordzee. Door de aanleg van de Deltawerken is het Deltagebied (deels) afgesloten van de Noordzee.

De Hollandse kust is een lang gestrekte zandkust van 120 kilometer. Het strand is gedefinieerd als het gebied tussen de duinvoet (+3 NAP) en de gemiddeld laagwaterlijn en is voor dit deel van de kust ongeveer 100-200 meter breed met een gemiddelde helling tussen 1:35 en 1:60 (Rijn et al., 2002). Dit deel van de Nederlandse kust wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van een aantal brekerbanken. Niet overal langs de kust liggen evenveel brekerbanken, het aantal varieert van 1 tot 3. Voor de kust van Noordwijk ligt bijvoorbeeld slechts één brekerbank, terwijl bij Egmond en Bergen twee brekerbanken voor de kust liggen. De kust wordt enkele malen onderbroken door havenhoofden of zeeweringen. Het deel van de kust waar Egmond en Bergen in liggen wordt ten weerszijden begrensd door de Hondsbossche zeewering en de havenhoofden bij IJmuiden

Om de ontwikkeling van de kust te kunnen volgen, is deze onderverdeeld in raaien. Deze raaien liggen loodrecht op de kust en liggen ongeveer om de 250 meter. De telling voor de Hollandse kust begint bij Den Helder en loopt tot Hoek van Holland. Bergen ligt ter hoogte van km 33.00 en Egmond ligt bij km 38.00 (dus respectievelijk op 33 en 38 kilometer afstand van Den Helder, kustlangs gezien).

### **3.2. Egmond en Bergen**

Het onderzoeksgebied bij Egmond en Bergen ligt tussen de havenhoofden bij IJmuiden en de Hondsbossche zeewering bij Petten (figuur 3.1). Sinds de aanleg van de Hondsbossche zeewering zijn de duinen ongeveer 100 meter landwaarts verschoven. Dit geeft aan dat erosie een groot probleem is in dit gebied. Over de laatste 140 jaar genomen is de kustlijn met ongeveer 95 cm/jaar landwaarts verschoven in het gebied van Egmond tot Den Helder. Dit staat tegenover een zeevaartse verschuiving van circa 20 cm/jaar van de kustlijn tussen Den Haag en Egmond en landwaartse verschuiving van de kustlijn van ongeveer 35 cm/jaar tussen Hoek van Holland en Den Haag (Rijn et al., 2002). De kustlijn bij Egmond ligt dus eigenlijk op een scharnierpunt waar de laatste 140 jaar weinig is veranderd.



Figuur 3.2: De ligging van de kustlijn voor Egmond sinds 1679.

In de kuststrook voor Bergen en Egmond liggen over het algemeen 2 brekerbanken en een 'swash-bar'. Een swash-bar is een bank die in het intergetijde gebied ligt en dus niet altijd onder water staat. Deze ontstaat bij condities met lage golven en verdwijnt bij hogere golfcondities. De brekerbanken voor de kust van Egmond en Bergen bewegen jaarlijks netto zeewaarts en vergaan daar volgens een cyclus van ongeveer 15 jaar (Wijnberg, 1995). Het sediment bestaat uit fijn tot medium zand met een korrelgrootte van tussen de 250 en 300  $\mu\text{m}$ .

De duinen in de omgeving van Egmond en Bergen zijn ongeveer 2,5 tot 3 kilometer breed. De hoogste duintop ligt op ongeveer 16 meter hoogte (Rijn et al., 2002). Een deel van het dorp Egmond ligt direct aan zee. In het verleden heeft Egmond verder zeewaarts gelegen, dat deel van Egmond is echter door de zee opgeslokt (figuur 3.2). Als bescherming van het dorp tegen de zee is tussen raai 37,25 en 38 een boulevard aangelegd. Ook de kust bij Bergen wordt verdedigd door een boulevard. Om de boulevards van beide dorpen te beschermen is de Basis Kustlijn (BKL) verder zeewaarts gelegd dan hij in 1990 lag. De BKL wordt ieder jaar getoetst aan de hand van de Momentane Kustlijn (MKL) om te kijken of er maatregelen nodig zijn om de kust te beschermen. De berekening van de MKL is verder uitgewerkt in paragraaf 4.1.1.

## 4. Methoden en technieken

---

Dit hoofdstuk beschrijft de methoden en technieken die in dit onderzoek gebruikt zijn. Een groot deel van het onderzoek bestond uit het kwalitatief bekijken van bodemkaarten en argusbeelden. Daarnaast is kwantitatief gekeken naar de ontwikkelingen door de jaren heen. De eerste paragraaf van dit hoofdstuk behandelt op welke manieren de jaarlijkse kustmetingen en de speciale metingen van het kustprofiel, rond de onderwatersuppleties, zijn gebruikt voor zowel een kwalitatieve (bodemkaarten) als een kwantitatieve (bankparameters, zandhoeveelheden) benadering. Daarna zal het gebruik van de argusstations bij Egmond worden toegelicht. In de derde paragraaf komen de golfgegevens aan de orde.

### 4.1. Kustmetingen

Om de ontwikkelingen van de kust bij te kunnen houden zijn in 1840 Rijks Strandpalen (RSP) in het strand gezet als vaste ijkpunten. Deze palen zijn op 1 kilometer afstand van elkaar geplaatst. Voor de Hollandse kust begint de nummering bij Den Helder en eindigt bij Hoek van Holland. In totaal gaat het daarbij om 120 kilometer kust. In 1964 werd besloten om bij de Rijks Strandpalen dwarsraaien jaarlijks in te meten met behulp van waterpas (eerst) en GPS-metingen (later) en lodingen. Deze dwarsraaien zijn op ongeveer 250 afstand van elkaar gemeten. De waterpas, GPS-metingen en lodingen beslaan de zeereep en gaan ongeveer tot 1 kilometer uit de kust. Deze metingen behoren tot het jaarlijkse kustbestand (JARKUS). Aangezien de ontwikkelingen rond de onderwatersuppleties nauwkeurig in de gaten gehouden moeten worden, werd besloten om rond de aanleg van een onderwatersuppletie extra opnames te maken van het kustprofiel. Dit zijn de zogenaamde monitoringsopnames. Hiermee zijn ontwikkelingen op de kortere termijn zichtbaar.

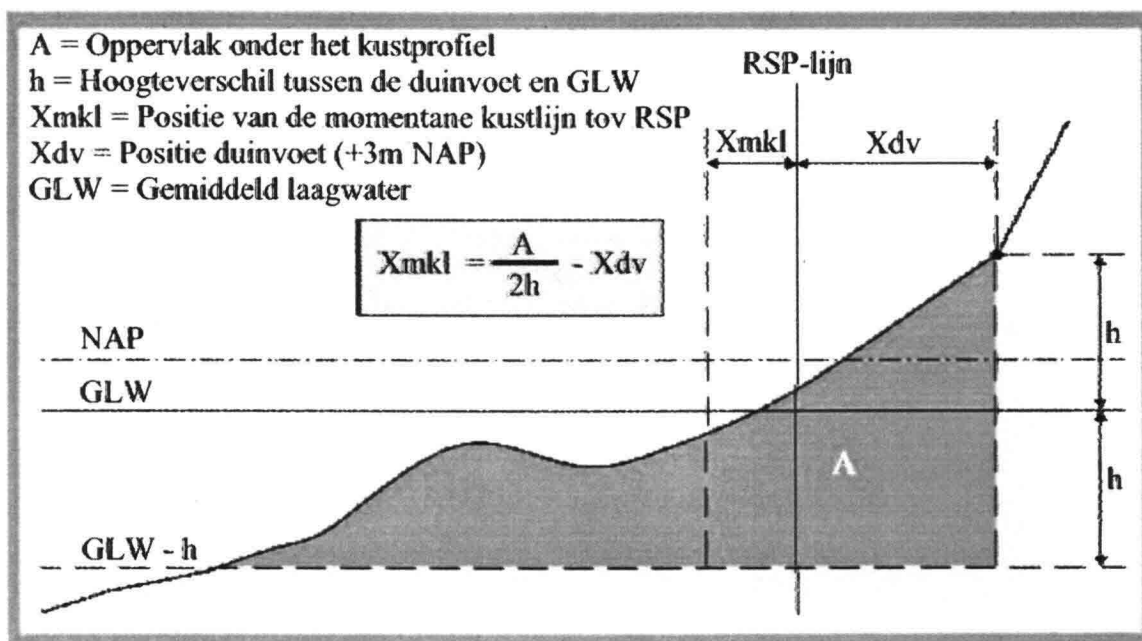
Uit de JARKUS en monitoringsopnames zijn de volgende gegevens bepaald:

- Kustprofielen (dwarsdoorsneden, figuur 4.2)
- Trendlijnen gedrag kustlijn
- Bodemkaarten, 2D en 3D (GIS)
- Erosie- en sedimentatiekaarten (verschilkaarten; GIS)
- Zandvolumes (kuberingen; GIS)

#### 4.1.1. Bepaling Momentane Kustlijn (MKL) en Basis Kustlijn (BKL)

Het kustprofiel kan rechtstreeks worden afgeleid uit de JARKUS-metingen, in feite is de combinatie van de waterpas of GPS-metingen en de lodingen een opname van het kustprofiel om de 250 meter of minder bij de speciale monitoringsopnames. Aan de hand van deze opnames wordt de ligging van de kustlijn bepaald. Dit wordt gedaan aan de hand van de Momentane Kustlijn (MKL). De positie van de Momentane Kustlijn ten opzichte van RSP wordt als volgt berekend:  $X_{mkl} = A/2h - X_{dv}$  (Figuur 4.1). Waarbij h het hoogteverschil is tussen de duinvoet (+3m NAP) en de gemiddelde laagwaterlijn (GLW). A is het oppervlak van het kustprofiel dat tussen twee

keer het hoogteverschil tussen de duinvoet en GLW ligt. De MKL wordt op raainiveau bepaald. Door de ligging van de kustlijn jaarlijks te plotten, kan een trendlijn bepaald worden. Toen in 1990 besloten werd dat de kustlijn zich niet verder landwaarts mocht verplaatsen werd de Basis Kustlijn (BKL) ingesteld. Deze is op de meeste plaatsen gedefinieerd als het punt waar de kustlijn in 1990 zou liggen als deze wordt bepaald door de trendlijn gebaseerd op de kustlijngegevens tussen 1980-1989. Elk jaar wordt de BKL getoetst aan de hand van de Momentane Kustlijn. Als de MKL volgens de trend van de voorgaande jaren landwaarts van de BKL dreigt te gaan liggen, wordt er ingegrepen. Het huidige beleid kiest ervoor om daar waar mogelijk onderwatersuppleties uit te voeren. Als dat niet mogelijk is, wordt gekozen voor een strandsuppletie. In het uiterste geval wordt gekozen voor een 'harde' maatregel. De MKL heeft dus een belangrijke beleidsmatige functie. Bij Egmond en Bergen is de BKL een stuk zeewaarts gelegd om er zeker van te zijn dat de boulevards van deze badplaatsen voldoende beschermd worden.

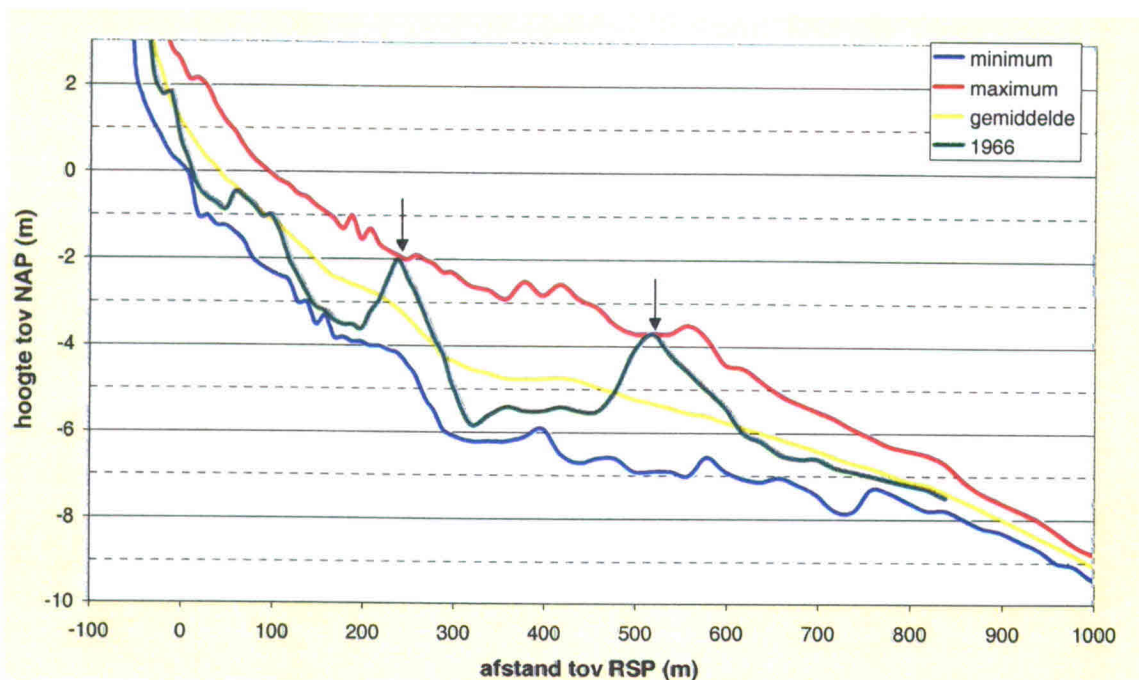


Figuur 4.1: Definitie van de Momentane Kustlijn.

#### 4.1.2. Bepaling bankparameters uit het kustprofiel

Het kustprofiel op raainiveau kan ook op een andere manier gebruikt worden voor een interpretatie van het kuststelsel. Voor een negental raaien bij Egmond (37-39,25) is een bredere studie gedaan naar de bankhoogte, -positie en -inhoud. In figuur 4.2 is te zien hoe deze parameters bepaald zijn. Voor alle raaien zijn het minimum, maximum en het gemiddelde bepaald. Alles wat boven het gemiddelde ligt, wordt gezien als bank. Waarbij de banktop het referentiepunt is voor de bankpositie en -hoogte. De top is genomen als het lokale maximum in het profiel (zwarte pijlen in figuur 4.2). De inhoud van de bank is bepaald als het oppervlak van het kustprofiel dat boven het gemiddelde profiel uitkomt.





Figuur 4.2: Het profiel voor raai 37 in 1966 (groen) ten opzichte van het minimum (blauw), maximum (rood) en gemiddelde (geel) profiel over de hele periode (1965-2002).

De bankinhoud is gedefinieerd als het gedeelte van het profiel dat boven het gemiddelde profiel ligt. Voor de positie van de banken is de top genomen (zwarte pijlen).

### 4.1.3. Bodemkaarten

Om een meer ruimtelijk beeld te kunnen krijgen van hoe het kuststelsel er bij ligt, zijn de raaien geïnterpoleerd tot een grid met een resolutie van 20 bij 20 meter. De bodemkaarten die van dit grid gemaakt zijn (bijvoorbeeld figuur 5.2), zijn in kustdwars schaal vier keer overdreven. Hierdoor worden de vormen van de banken duidelijker zichtbaar. Ook zijn de grids van verschillende opnames van elkaar afgetrokken om verschilbeelden te krijgen (figuur 5.11). Deze zijn gebruikt om plekken waar erosie en sedimentatie plaats heeft gevonden zichtbaar te kunnen maken. Rode kleuren corresponderen met sedimentatie, blauwe kleuren met erosie. Deze grids zijn gebruikt als basis voor zowel een kwalitatieve als een kwantitatieve benadering. Kwalitatief is gekeken naar de ontwikkeling, vormen en structuren van de banken. Kwantitatief zijn kuberingen gedaan en zijn kustparallele verplaatsingen (paragraaf 4.1.4) bepaald. Een aantal vakken in en rondom het suppletievak zijn gedefinieerd. Aan de hand van de hoogtegegevens wordt bepaald hoeveel zand er in deze vakken ligt, de zogenaamde kuberingen. Door deze inhouden van verschillende opnames met elkaar te vergelijken, kunnen zandverplaatsingen gekwantificeerd worden.

Er is onderscheid gemaakt tussen de ontwikkelingen in het autonome stelsel en het stelsel dat verstoord is door de onderwatersuppleties bij Bergen en Egmond. Voor de grens tussen het autonome en het verstoord stelsel is het jaar 1999 gekozen. De jaren daarvoor worden als autonoom bestempeld, de jaren daarna gelden als verstoord.



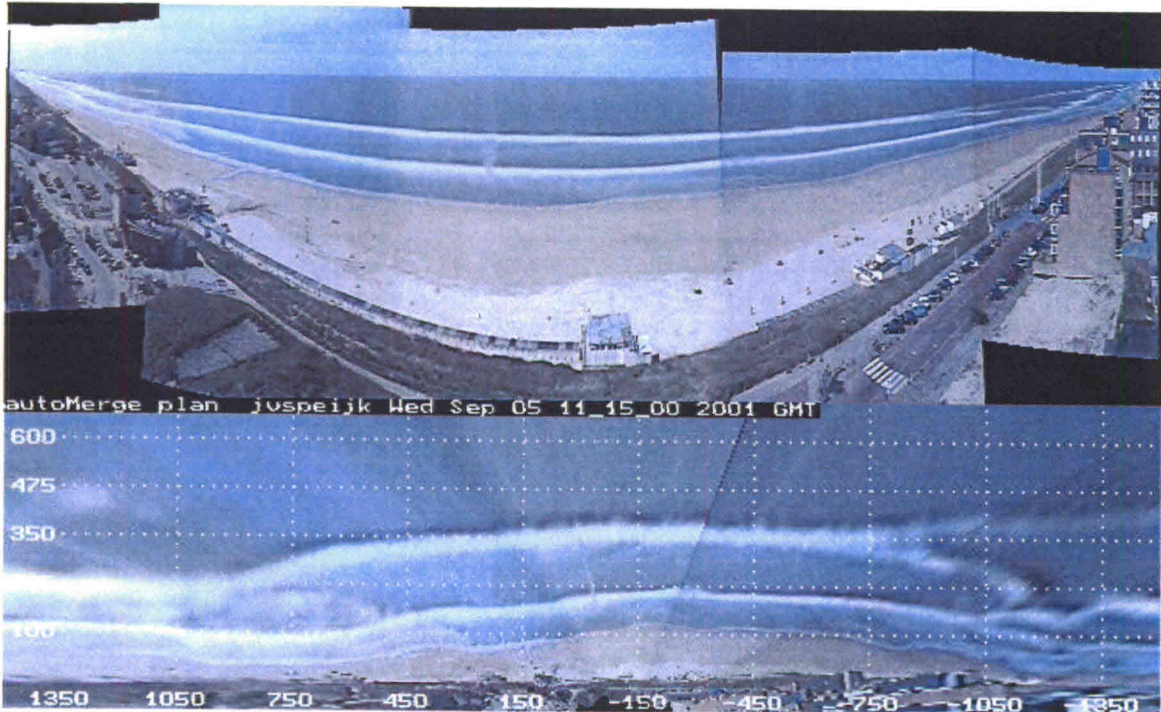
#### 4.1.4. Kustparallele verplaatsingen

Voor de kustlangse verplaatsingen zijn de zogenaamde druppels als referentiepunt gebruikt. In paragraaf 5.1 wordt verder uitgelegd wat druppels zijn. Daar de druppels door de jaren heen zowel in kustparallele als in kustdwarse richting verplaatsen en daarmee vrijwel voortdurend te vervolgen zijn, kunnen deze perfect dienen als ijkpunt om de kustparallele verplaatsingen aan te relateren. De verplaatsingen van de druppels zijn op twee manieren bepaald. De kustdwarse positie is daarbij buiten beschouwing gelaten.

De eerste methode is gedaan aan de hand van een schatting. Daarbij is de verplaatsing (en de richting daarvan) van de druppels geschat. Per opname is naar alle druppels gekeken. Daaruit is één representatieve druppel gekozen die als maat werd genomen voor de verplaatsing. Daarnaast zijn ook andere aanwijzingen (bijvoorbeeld de vorm van de druppels), die de richting van de verplaatsing zouden kunnen duiden, meegenomen. Ook is gekozen voor de gemeten verplaatsing van de druppels. Bij deze methode zijn de druppels benoemd met een letter en zijn de kustlangse coördinaten van de top van de druppel per bodemopname bepaald. Dit is gedaan met een meetlat, waarbij een nauwkeurigheid van ongeveer een halve raaiafstand (+/- 125 m) werd gehaald. Vanaf 1965 levert dit 3 generaties druppels op (resp. A-G, a-g en A'-G', zie figuur 5.21). De verplaatsing tussen 2 bodemopnames is gedefinieerd als de gemiddelde verplaatsing van alle druppels. Dit is een objectievere manier dan de geschatte verplaatsing van de druppels. Daarbij moet echter wel de opmerking gemaakt worden dat, door naar de top van de druppel te kijken, andere factoren die ook iets over de richting van verplaatsing kunnen zeggen (bijvoorbeeld vorm van de druppels, of banken), worden genegeerd. Deze factoren wegen wel mee bij de subjectievere, geschatte verplaatsing. Zowel de geschatte als gemeten verplaatsingen zijn in zuidelijke richting positief genomen.

## 4.2. Monitoring van het bankengedrag met Argus

Egmond is een unieke plek in de wereld als het gaat om de observatie van de kust met behulp van het Argussysteem. In Egmond zijn namelijk 2 Argusstations die elkaar gedeeltelijk overlappen, waardoor 6 kilometer van de kust voortdurend gemonitord kan worden. Een Argusstation bestaat uit vijf camera's die vanaf een hooggelegen positie alle op een ander gebied zijn gericht met een lichte overlap. Ieder uur maakt elke camera een momentopname en een tijdgemiddeld beeld over 10 minuten. Door het tijdgemiddelde beeld te nemen wordt de plek waar de meeste golven breken zichtbaar als een witte band. Dit is een belangrijk gegeven, want de plek waar de meeste golven breken komt overeen met de ligging van de brekerbanken. Een bijkomend voordeel van een tijdgemiddeld beeld is dat de ongelijke ligging van de waterlijn door verschillen in run-up en eventuele wandelaars, die het beeld verstoren, worden weggemiddeld. De argusbeelden worden gebruikt voor het bepalen van de strandbreedte. Daarbij is de scheidslijn water-zand erg belangrijk. Als snap-shots gebuikt zouden worden voor het bepalen van de strandbreedte, zou deze teveel afhankelijk worden van toevallige run-up van het zeewater. Door te middelen valt dit probleem weg.



Figuur 4.3: Opname van het argusstation op de Jan van Speijk vuurtoren van woensdag 5 september 2001. Boven: de aan elkaar geplakte tijdgemiddelde beelden van de vijf afzonderlijke camera's; onder: het bovenaanzicht van de aan elkaar geplakte beelden die zijn geprojecteerd op een vastgesteld grondvlak.

De camera's zijn verbonden met een computer die de opnames vastlegt en via telefoonlijnen naar de buitenwereld stuurt. Aangezien voor elke camera een aantal vaste paspunten bekend zijn, kunnen de aparte foto's van de verschillende camera's, via geometrische correctie, in een vastgesteld plat grondvlak worden geprojecteerd (figuur 4.3). De coördinaten in het grondvlak zijn zo gekozen dat het argusstation bij het nulpunt ligt, met negatieve x-waarden voor de punten ten noorden van het station en positieve x-waarden ten zuiden van het station.



Figuur 4.4: Aan elkaar geplakte argusbeelden van het argusstation op de mast (rode pijl) en op de vuurtoren (groene pijl). Bij elkaar bestrijkt het beeld ongeveer 6 kilometer kustlangs en een afstand van 700 meter kustdwars.

De twee argusstations bij Egmond zijn geïnstalleerd op de Jan van Speijk vuurtoren bij raai 38 en op een mast op het strand, 3 kilometer ten zuiden van de vuurtoren (raai 41). Het argusstation op de mast is in 1998 aangelegd in verband met het Coast3D-onderzoek. In 1999 werd besloten een tweede station op de vuurtoren te plaatsen om de kuststrook voor de boulevard in de gaten te kunnen houden. De opnames van beide stations zijn voor iedereen toegankelijk op internet: [www.wldelft.nl/argus](http://www.wldelft.nl/argus). Vanaf



2001 zijn er aan elkaar geplakte opnames van beide stations beschikbaar (figuur 4.4). De meeste bruikbare beelden zijn pas na de aanleg van de onderwatersuppletie bij Egmond beschikbaar. Hierdoor is het autonome gedrag niet met behulp van de argusstations te bepalen. Van de twee stations wordt het gebied voor de mast waarschijnlijk het minst beïnvloed door de onderwatersuppletie. Het is echter waarschijnlijk dat de suppletie in het gebied voor de mast nog enige invloed uitoefent.

Een beperking van het Argussysteem is dat alleen overdag opnames gemaakt kunnen worden, in het donker kunnen de camera's niet waarnemen. Een ander minpuntje is dat tijdens de ruigste omstandigheden de camera's nogal eens een stootje krijgen waardoor ze niet meer op het beoogde gebied gericht staan, of kapot gaan, en er gaten vallen tussen de verschillende camera's. Natuurlijk gebeurt dit meestal op de meest interessante tijdstippen (tijdens een storm). Ook vermoeide meeuwen of ander gevogelte kunnen door op de camera's uit te rusten de opnames verstoren.

Bij daglicht zijn er dus van uur tot uur gegevens over het strand en de brekerbanken. In dit onderzoek wordt vooral gekeken naar de brekerbanken. Dat de banken overdag van uur tot uur te volgen zijn is helaas niet helemaal waar. De zichtbaarheid van de banken hangt namelijk af van de golven die erop breken. Als de omstandigheden te rustig zijn breken de golven niet en zijn de brekerbanken dus ook niet zichtbaar.

Om ervoor te zorgen dat niet alle opnames bekeken hoefden te worden, is gebruik gemaakt van de golfgegevens. Hierdoor konden dagen met hoge golven genomen worden om zeker te zijn van bruikbare beelden. Op deze manier kan ook de invloed van een enkele storm op de vorm en de ligging van de banken bepaald worden.

### 4.3. Golfanalyse

Het doel van de golfanalyse is om allereerst te kijken naar het verschil tussen de ontwikkelingen in stormachtige jaren en rustige jaren. Daarnaast kunnen de golfhoogtes en golfrichtingen met elkaar gecombineerd worden om de kustparallele verplaatsingen (paragraaf 4.1.4) te kunnen verklaren.

De golfgegevens zijn afkomstig van de meetboei voor de kust van IJmuiden. Het gaat hier om uurlijkse gegevens in de periode van 1979-2002 (volgens Roskam, 1988; uitgebreid met recentere metingen). De golfgegevens in 2003 zijn afkomstig van een meetboei bij Petten. In de tijd vertonen beide golfstations vergelijkbare golfhoogtes. Naast de golfgegevens zijn ook de windgegevens in dezelfde periode beschikbaar. Voor de jaren waarvoor geen golfgegevens beschikbaar waren (1964-1979) is gebruik gemaakt van de windgegevens van het KNMI (Augustijn et al., 1990). Deze zijn echter moeilijk te koppelen aan de golfgegevens. Met name de golfrichting komt niet altijd overeen met de windrichting. Voor de reeks van Roskam bedraagt de correlatie tussen de windrichting en de golfrichting ongeveer 0,5. De correlatie tussen de windsnelheid en de golfhoogte is hoger: circa 0,8. De gegevens van het KNMI zijn zodoende het best te gebruiken als een indicatie voor het aantal stormen per periode, waarbij de richting niet altijd even betrouwbaar is.

De stormcondities zullen bepaald worden aan de hand van een cumulatieve methode die in analogie is met die van Guillén et al. (1999). Guillén et al. (1999) hebben naar duinerosie gekeken en achtten daarbij drie variabelen van belang: significante golfhoogte, wateropzet en windsnelheid. Als één van deze 3 variabelen de waarde overtreft die 5% van de tijd wordt overschreden, is er sprake van een storm. In het huidige onderzoek

voornamelijk gaat om het verklaren van het bankengedrag, daarom zal alleen gekeken worden naar de golfparameter van Guillén et al. (1999). Deze golfparameter is als volgt gedefinieerd:

$$A_1 = H_{mo} t^{1/2} \quad [m \cdot s^{1/2}] \quad (1)$$

Met  $H_{mo}$  gemiddelde significante golfhoogte en  $t$  de duur.

In (1) wordt gesteld dat de golfparameter evenredig is met de wortel van de tijd, omdat de intensiteit van duinerosie afneemt naarmate een storm langer duurt. Wat het bankengedrag betreft neemt de verplaatsing niet af als de storm langer duurt, zodat we een nieuwe golfparameter definiëren die evenredig is met de duur van de storm:

$$A_2 = H_{mo} t \quad \{\text{als } H_{mo} > 5\% \text{-percentiel}\} \quad [m \cdot \text{uur}] \quad (2)$$

Omdat er uurlijkse gegevens worden gebruikt, is ook de tijd in uren genomen.

$$A_3 = t \quad \{\text{als } H_{mo} > 5\% \text{-percentiel}\} \quad [\text{uur}] \quad (3)$$

Er is ook voor gekozen om alleen te kijken naar het aantal uur dat de golven boven het 5%-percentiel komen (2 en 3). Zodra de golven boven deze grens komen wordt de parameter berekend. Daarbij is bijvoorbeeld geen verschil gemaakt tussen golven die de grens met 1 centimeter overschrijden en golven die 2 meter boven deze grens komen.

Over de hele reeks van IJmuiden genomen (1979-2002) overschrijden de golven 5 procent van de tijd een hoogte van 297 cm, dit is het 5%-percentiel. Daar de meetboei bij Petten ongeveer dezelfde golfhoogtes vertoont als die bij IJmuiden, is deze waarde ook gebruikt voor de golfdata die afkomstig zijn van Petten.

Om ook de golfrichting te kunnen gebruiken voor de kustparallele verplaatsingen (paragraaf 4.1.4) is er verschil gemaakt tussen golven uit het noorden en uit het zuiden en het westen. Zo kan per periode het aantal stormuur uit de verschillende richtingen vergeleken worden. De definitie van noord en zuid is ruim genomen, noord is van 292,5-22,5 graden gekozen en zuid van 180-247,5. De grotere hoek voor het noorden is zo gedefinieerd, omdat de kust van ZZW tot NNO onder een hoek loopt (8 graden ten opzichte van het noorden) en dus ook de golven uit NNO kunnen voorkomen. Golven uit deze richting komen echter niet vaak voor. Voor de golfreeks bij IJmuiden komen de meeste golven uit noordnoordwestelijke richting voor de gekozen noordelijke sector en uit zuidwestelijke richting voor de zuidelijke sector. De aanname is gedaan dat golven uit het westen (247,5-292,5 graden) niet verantwoordelijk zijn voor kustlangs transport. Een andere methode voor het bepalen van de golfcondities, die tevens gebruik maakt van de golfrichting, is onderstaande formule voor de golfenergie (Ruessink et al., 2000). Deze is tevens gebruikt om de golfenergie te koppelen aan de kustparallele verplaatsingen (paragraaf 4.1.4).

$$P = \sum \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \sin \theta \cos \theta \quad [kgm/s^3] \quad (4)$$

waarbij,

$\rho$  = dichtheid van zeewater = 1025 [kg/m<sup>3</sup>],

$g$  = gravitatieconstante = 9,81 [m/s<sup>2</sup>],

$H$  = golfhoogte [m],

$T$  = golfperiode [s],

$\theta$  = golfvoortplantingsrichting ten opzichte van de kustlijn [rad].

Bij een hoek  $\theta$  van 90 graden ten opzichte van de kustlijn is de golfenergie het hoogst (sinus), maar heeft deze geen invloed op de kustlangse verplaatsingen (cosinus). Een hoek van nul graden staat gelijk aan kustparallele golven uit het noorden, een hoek van 180 graden staat gelijk aan kustparallele golven uit het zuiden.

In deze benadering zijn alleen golven uit de westelijke helft van de windroos, gecorrigeerd voor de ligging van de kustlijn, meegenomen. De westelijke helft van de windroos is in twee delen gesplitst, een noordelijk deel 270-360 graden, en een zuidelijk deel 180-270 graden. Golven uit het oostelijke richting zijn verwaarloosd, aangezien deze naar verwachting geen tot zeer weinig effect zullen hebben op de transporten.

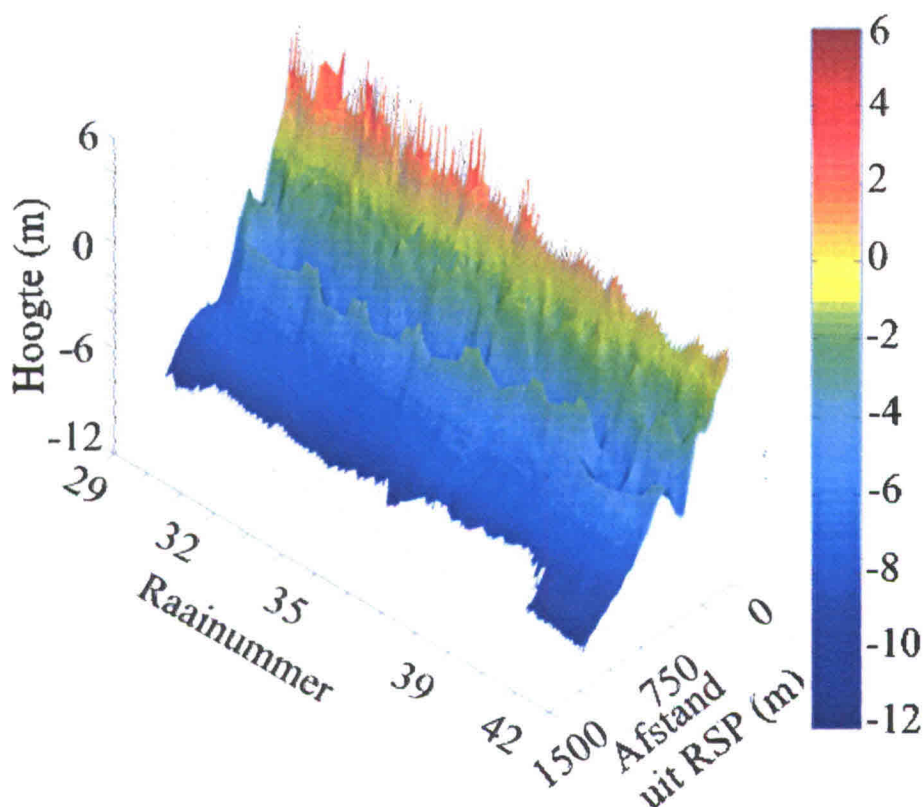


## 5. Resultaten

De resultaten van dit onderzoek zijn onderverdeeld over drie paragrafen. Allereerst wordt gekeken naar het autonome bankengedrag in het gebied rond Egmond en Bergen. Dit dient als basis voor de tweede paragraaf, waarin het verklaren van wat de invloed is geweest van de onderwatersuppleties op het kuststelsel centraal staat. De derde paragraaf koppelt de ontwikkelingen in zowel het autonome als het verstoorde stelsel aan de golfcondities. Daarnaast behandelt hij de relatie tussen de golfcondities en kustparallele verplaatsingen.

### 5.1. Het autonome bankengedrag

Uit de analyse van de bodemkaarten van 1964-1999 blijkt dat de brekerbanken voor de kust bij Bergen en Egmond bestaan uit kustparallele structuren van ongeveer 2 kilometer lang. Op de plek waar de structuren met elkaar verbonden zijn, vertoont de bank vaak een verhoging (figuur 5.1).

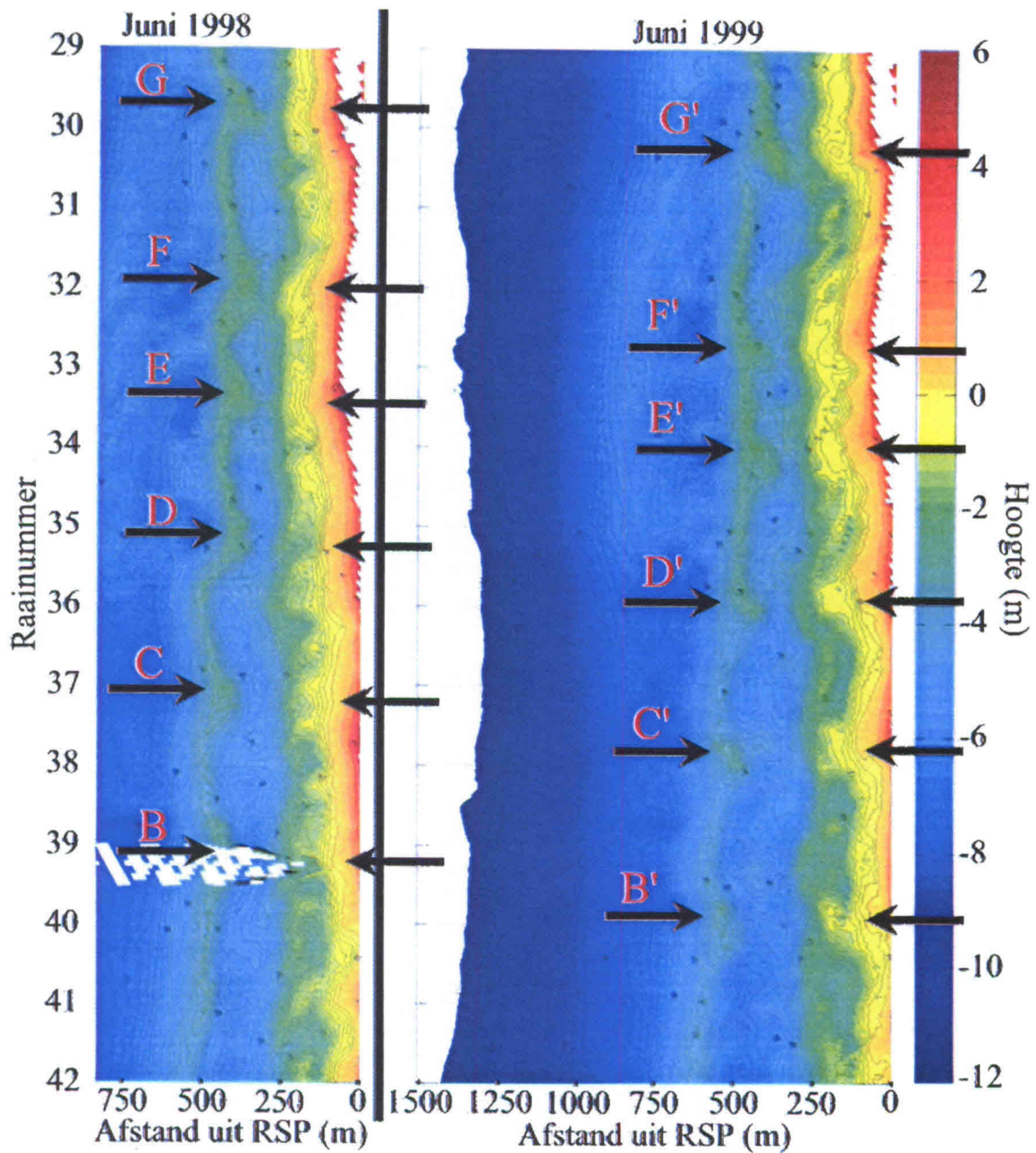


Figuur 5.1: Drie-dimensionale bodemkaart van het gebied bij Egmond in het jaar 1986.

De verhogingen liggen op het meest landwaartse deel van de structuren en zullen in het vervolg 'druppels' worden genoemd. Door de jaren heen zijn

de structuren met de druppels goed te vervolgen. Ze verplaatsen zich en veranderen van vorm, maar blijven herkenbaar. Dat de structuren zo consequent te vervolgen zijn, is een aanwijzing dat ze inherent zijn aan het systeem en niet het gevolg van een toevallige gebeurtenis, als bijvoorbeeld een storm, voorafgaand aan de bodemopname. De meest waarschijnlijke verklaring voor het ontstaan van de structuren en druppels ligt in de waterbalans. Globaal gezien kan het watertransport onderverdeeld worden in een landwaarts en een zeewaarts deel. Het getij dat kustlangs beweegt laten we daarbij even buiten beschouwing. Het wateroverschot dat ontstaat door het naderen van golven op de kust, moet worden gecompenseerd met een zeewaarts gericht watertransport. Wanneer dit gebeurt in een geconcentreerde terugstroom, ontstaan muien en wordt de brekerbank mee richting zee genomen. Op de grens van de muien blijft de bank liggen en ontstaat een verhoging, ofwel druppel. De druppels vormen volgens deze benadering de grenzen tussen de muien. Of de verhoging van de bank bij de druppel enkel het gevolg is van de helling van het kustprofiel en de meer landwaartse positie van de bank of dat er nog andere factoren zijn die het hoogteverschil tussen de druppel en de rest van de bank kunnen verklaren is vooralsnog onduidelijk.

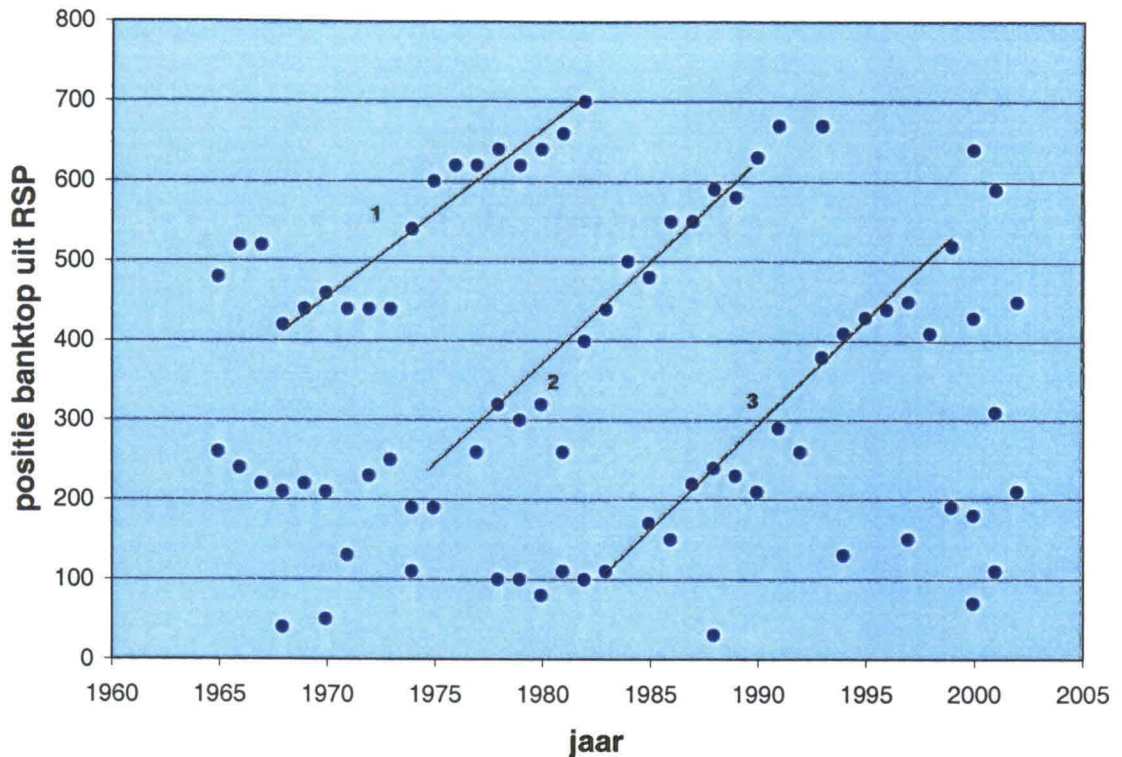
De hoogte van de brekerbank lijkt een belangrijke factor voor de bescherming van de kust. Op de plek waar de buitenste bank hoger is dan zijn omgeving, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een druppel, absorbeert deze meer golfenergie dan de omliggende gedeeltes. Waardoor kustwaarts van dit gedeelte een luwte ontstaat waar de golfenergie minder is en dus minder erosie plaatsvindt. Hierdoor valt te verklaren dat druppels corresponderen met bredere stranden, zoals in figuur 5.2 te zien is. Het gedeelte van de bank tussen de druppels is lager, absorbeert minder golfenergie en leidt zodoende tot een smaller strand. Dit concept komt overeen met dat van Boer (2000), die een relatie vond tussen de diepte van de binnenbank en de breedte van het strand. In sommige jaren liggen de druppels en de brede stranden niet loodrecht tegenover elkaar. Dat heeft waarschijnlijk te maken met de golfrichting. Als de golven de kust onder een hoek benaderen, komt het deel van de kust dat door de druppel beschermd wordt, schuin achter de druppel te liggen.



Figuur 5.2: Bodemkaarten juni 1968 en juni 1999. De pijlen geven de druppels weer met de daaraan gerelateerde bredere stranden. In de gebieden tussen de pijlen, met name in het gebied ten zuiden van raai 36, is te zien dat een nieuwe bank los lijkt te komen van het strand. De rode letters corresponderen met de druppels. De accenten achter de letters in 1999 geven aan dat het hier om een andere generatie druppels gaat dan in 1968, waar de druppels alleen met hoofdletters aangegeven worden.

Als gekeken wordt naar de 9 raaien (37-39,25) voor de kust van Egmond, wordt de 15-jarige cyclus duidelijk (figuur 5.3). In de figuur is de netto zeewaartse verplaatsing van de banktop bij raai 37 te zien. In de periode tussen 1965 en 2002 zijn 3 generaties banken zichtbaar. Deze zijn met de genummerde lijnen aangeduid. Na 1999 wordt de cyclus verstoord door de aanleg van de onderwatersuppletie bij Egmond (paragraaf 5.2).



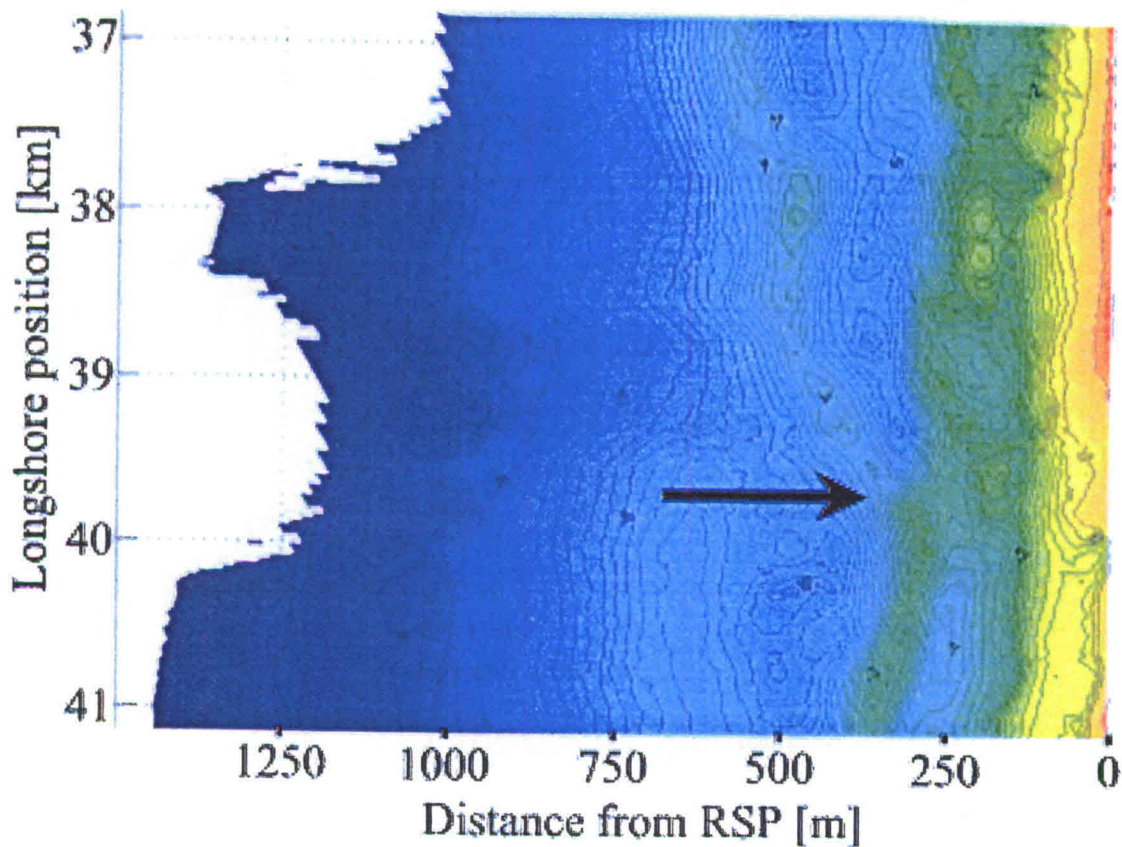


Figuur 5.3: Positie van de banktop in de tijd voor raai 37. Met de zwarte lijnen en de corresponderende nummers zijn de verschillende generaties banken aangegeven.

Op de bodemkaarten valt op dat de bank schuin georiënteerd ligt ten opzichte van de kust. Dit is met name te zien in figuur 5.2. Het lijkt erop dat de cyclus in het zuidelijk deel van deze kuststrook in een verder gevorderd stadium is dan in het noorden. Daarbij ligt de bank verder zeewaarts in het zuiden dan in het noorden (zie figuur 5.2, in 1968 en 1999). In het zuiden is de buitenste bank al verdwenen en ligt de nieuwe bank verder zeewaarts dan in het noorden, waar de buitenste bank de nieuwe bank nog tegenhoudt in haar zeewaartse beweging.

Door het faseverschil tussen het noordelijke en zuidelijke deel van het kustgebied kan het voorkomen dat banken van verschillende generaties zich met elkaar verbinden. In de literatuur (bijv. Shand et al., 2001) wordt deze verbinding ook wel een 'bar-switch' genoemd. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 5.4 (1987). De buitenste bank ten zuiden van raai 39 heeft zich losgemaakt van het deel ten noorden van deze raai. De bank ligt in het zuiden meer zeewaarts en dieper. Daardoor is een nieuwe bank losgekomen van de kust, die aansluiting vindt bij de oude buitenste bank ten noorden ervan. Waardoor twee banken van verschillende generaties met elkaar verbonden zijn. De nieuwe bank blijft echter ook verbonden (bifurcatie) met het noordelijke deel van de nieuwe bank. In feite is het punt waarop de bar-switch plaatsgevonden heeft een verbinding tussen een nieuwe en een oude generatie. In 1991 is de bar-switch verdwenen en vormt de nieuwe bank één geheel, waarbij het zuidelijke deel van de bank verder zeewaarts ligt dan het noordelijke deel. De oude bank is ter hoogte van de bar-switch vergaan en lijkt in de daarop volgende jaren vanuit het zuiden verder te vergaan. Resumerend lijkt het er op dat in het autonome systeem tussen raai 29 en 42 een bar-switch ontstaat door onder andere het faseverschil van de

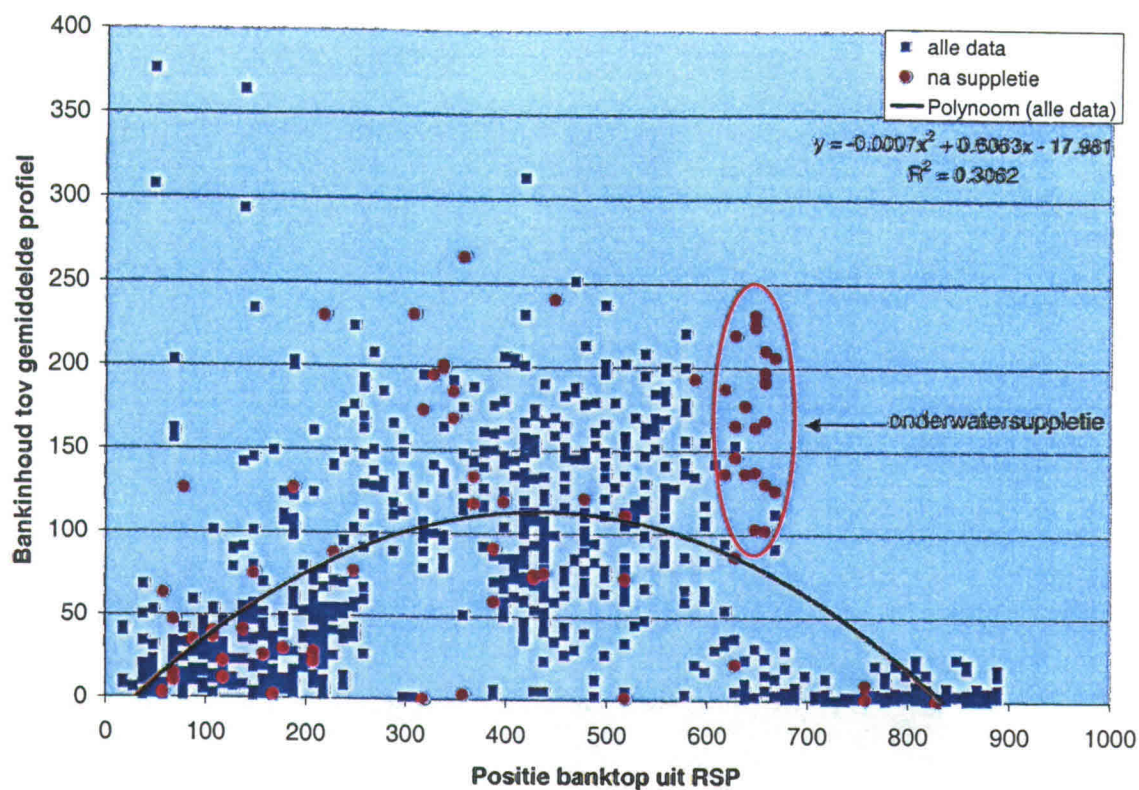
bankencyclus tussen het noordelijk en zuidelijk deel. De bar-switch is tijdelijk en verdwijnt na een paar jaar, als de nieuwe bank in het noordelijk deel ver genoeg ontwikkeld is om zich met het zuidelijk deel te herenigen.



Figuur 5.4: Bodemkaart 1987.

Ter hoogte van raai 39,5 is sprake van een 'bar-switch' (zwarte pijl). De buitenste bank ten zuiden van dat punt ligt te ver zeewaarts voor de bank ten noorden van dat punt, waardoor deze zich verbindt met een nieuwe bank.





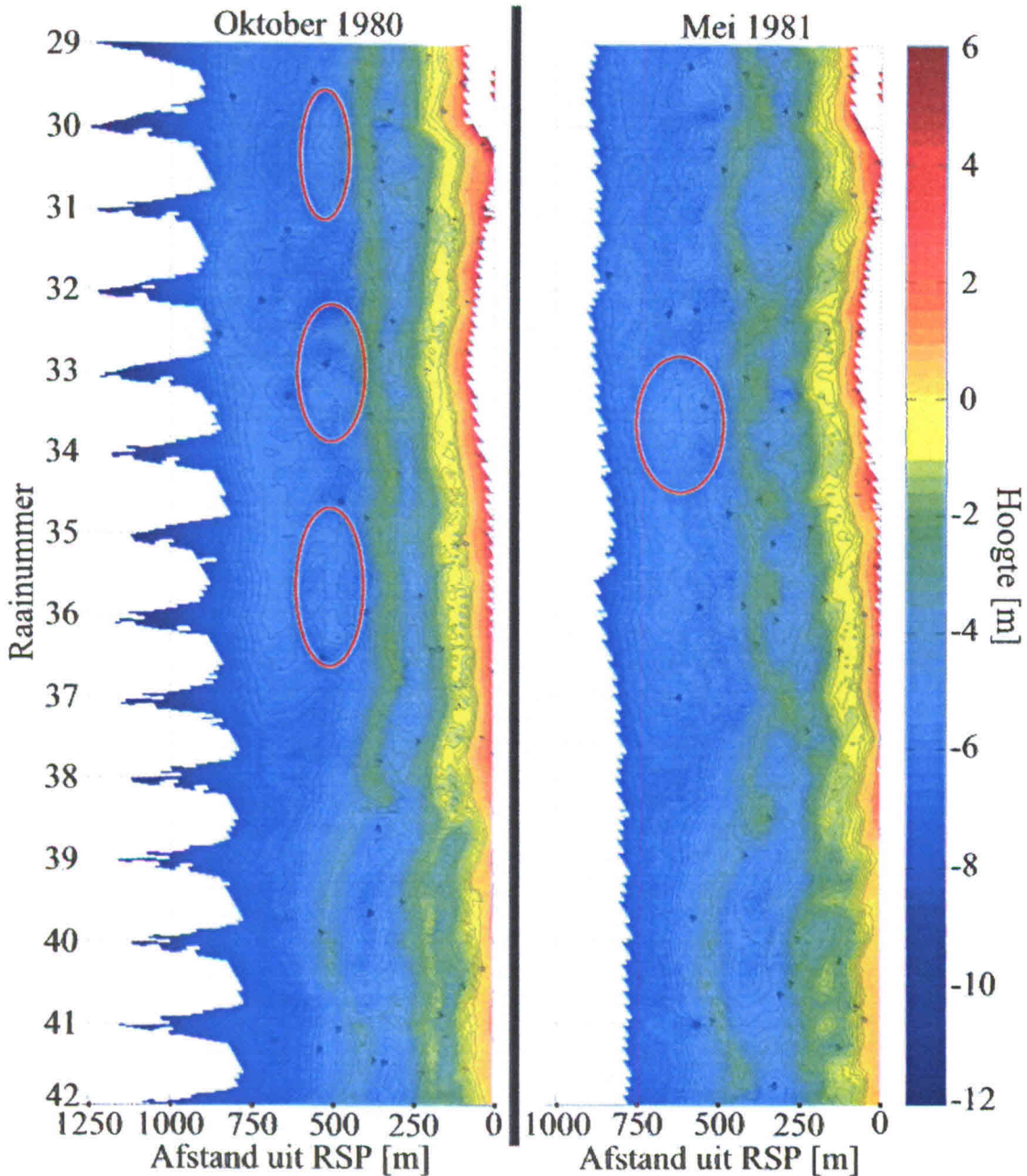
Figuur 5.5: Positie van de banktop uitgezet tegen de bankinhoud ten opzichte van het gemiddelde voor 9 raaien. Dit is gedaan voor zowel alle data (1965-2002) en de data na de onderwatersuppletie (2000-2002).

In figuur 5.5 is duidelijk te zien dat naarmate de bank zich zeewaarts verplaatst, de bankinhoud toeneemt. Deze toename geldt tot ongeveer 400-500 meter uit de kust. Verder uit de kust vertoont de bankinhoud een aflopende lijn. Rond 600 meter uit RSP neemt het bankvolume snel af tot nagenoeg nul. In deze regionen ligt de 'begraafplaats' van de banken. Andere onderzoeken spreken van een vergelijkbare situatie voor de bankhoogte. Deze neemt eerst zeewaarts toe en na een bepaalde afstand uit de kust neemt die weer af in een systeem met meerdere banken (Wijnberg en Kroon, 2002).

Na de aanleg van de onderwatersuppletie is te zien dat op meer dan 600 meter vanaf RSP (punten in het rode ovaal; figuur 5.5) bankvolumes voorkomen die vergelijkbaar zijn met het volume van een normale bank. In de natuurlijke situatie komen deze volumes niet op die plek voor. Hieruit blijkt dat de onderwatersuppletie bij Egmond qua volume ongeveer overeenkomt met het volume van een bank en dat de suppletie buiten het natuurlijke systeem is geplaatst. Paragraaf 5.2 gaat verder in op de ontwikkelingen na de aanleg van de onderwatersuppletie.

Met de afname van het bankvolume verder zeewaarts, zoals zichtbaar in figuur 5.5, begint waarschijnlijk de redistributie van het zand. Volgens Wijnberg (1995) houdt deze kustdwarse herverdeling van zand de cyclus van de netto zeewaarts verschuivende banken in stand. In figuur 5.6 lijkt de overdracht van zand van de oude naar een nieuwe generatie niet uniform over de hele lengte van de bank, maar via enkele verbindingen te gaan. De oude bank is in 1980 breder dan normaal en heeft zijn bankvorm al

enigszins verloren. De nieuwe bank heeft zich al losgemaakt van de kust en is op een aantal plekken verbonden met de oude bank. In het jaar daarna (1981) is de oude bank zo goed als verdwenen en heeft de nieuwe bank alle vrijheid om te bewegen. Het lijkt er dus op dat het zand van de oude bank via de verbindingen aan de nieuwe bank is doorgegeven. Temeer daar in 1981 het laatste beetje zand van de oude bank nog zichtbaar is en aan de nieuwe bank vastligt. Het feit dat de bank na de overdracht van het zand zeewaarts is verschoven, bevestigt het vermoeden dat door de overdracht de nieuwe generatie een impuls heeft gekregen.



Figuur 5.6: Bodemkaart van 1980 en 1981. Ten zuiden van raai 38 is te zien dat de bank meer zeewaarts ligt. Het restant van de oude bank lijkt verbindingen (rood omcirkeld) te maken met de nieuwe generatie om zo waarschijnlijk zand over te hevelen.



## 5.2. Het bankgedrag na de aanleg van de onderwatersuppleties

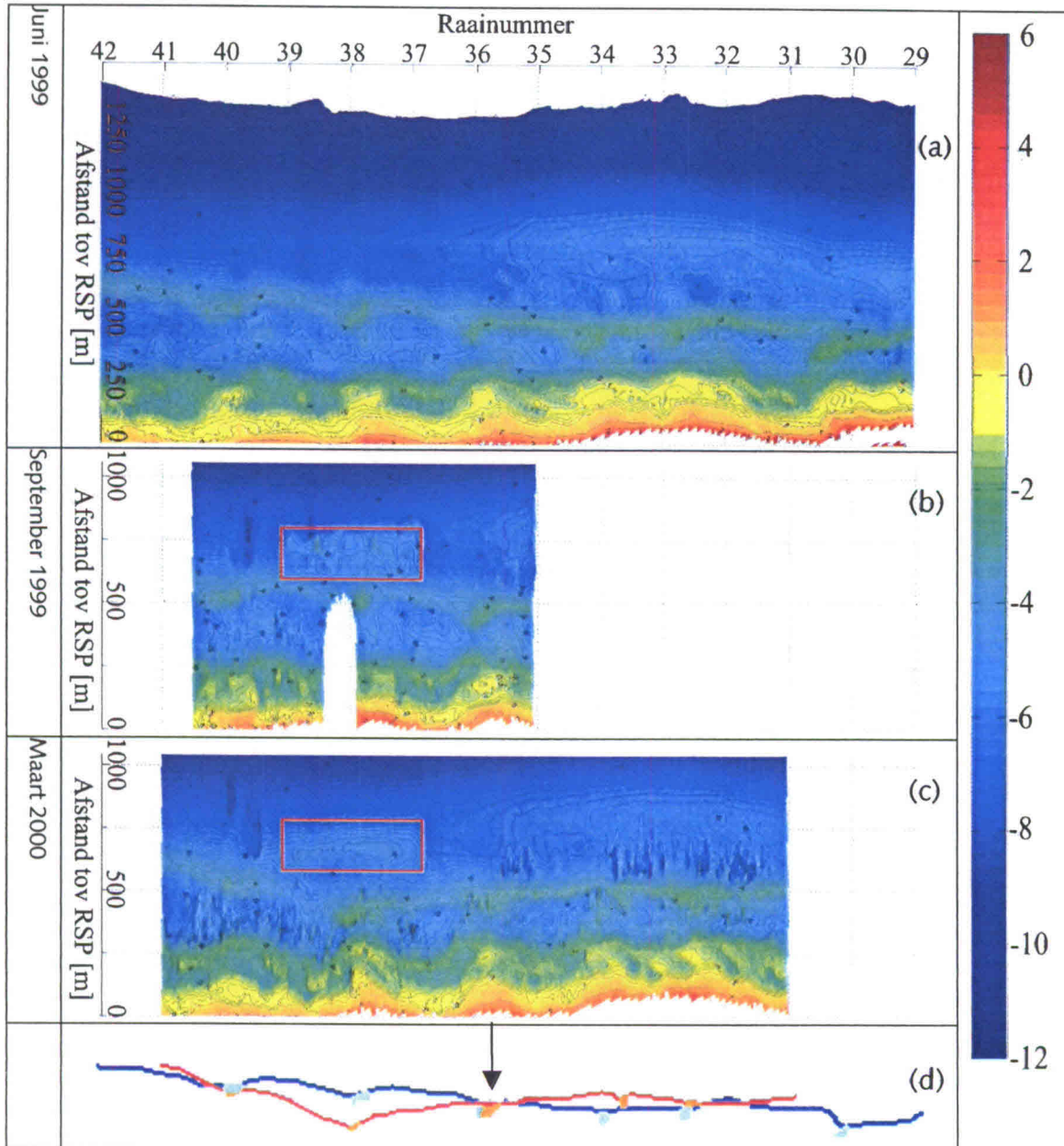
De onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen zijn op verschillende tijdstippen aangelegd. In 1999 werd begonnen met de onderwatersuppletie bij Egmond. Een jaar later werd de onderwatersuppletie bij Bergen aangelegd. Deze paragraaf behandelt eerst de ontwikkelingen in het eerste jaar na de suppletie bij Egmond. Daarna worden de ontwikkelingen in het eerste jaar bij Bergen besproken. De derde subparagraaf bespreekt de verdere ontwikkelingen bij Egmond en Bergen. In de vierde subparagraaf wordt ingegaan op de verschillen tussen de reactie van het kuststelsel op beide onderwatersuppleties.

### 5.2.1. Egmond het eerste jaar na de suppletie

Vóór de aanleg van de (strand-) en onderwatersuppletie bij Egmond ligt de bank scheef georiënteerd, zoals in het autonome systeem lijkt te horen (paragraaf 5.1). In het zuiden is de brekerbank verder ontwikkeld en begint zelfs al een nieuwe bank te ontstaan aan de kust (figuur 5.7a). In het noorden is nog het restant van een oude brekerbank zichtbaar en is de ontwikkeling van de bank in een minder ver gevorderd stadium. Figuur 5.7b toont dat de onderwatersuppletie (rood omlijnd) tegen de buitenste bank is aangelegd tussen kilometer 36,9 en 39,1. Ongeveer ter hoogte van het midden ( $\pm$  km 38) van het suppletievak ligt een druppel in de bank. Het volume van de suppletie bedraagt ongeveer  $400 \text{ m}^3$  per strekkende meter, in totaal dus  $880.000 \text{ m}^3$ . Zoals al in paragraaf 5.1 duidelijk werd, is de suppletie buiten het natuurlijke systeem aangebracht (figuur 5.5).

In maart 2000, één winter na de aanleg van de suppletie, is de bank waartegen de suppletie is gelegd landwaarts verschoven (figuur 5.7c en d). Hierbij is een trog ontstaan tussen de suppletie en de bank waartegen deze is aangelegd. Blijkbaar heeft een bank een maximale breedte. Als een bank deze breedte overschrijdt, in dit geval door de aanleg van een suppletie, breken de golven op de bank in plaats van na de bank. Hierdoor vormt zich een trog. Door het ontstaan van de trog wordt het deel landwaarts van de trog richting het strand gedrukt. Het suppletielichaam is breder (circa 260m) dan een natuurlijke bank ( $\pm$  100m). Waardoor de trog ontstaat tussen het suppletielichaam en de bank. Omdat er ruimte moet zijn voor de trog, de natuurlijke afstand tussen 2 banken bedraagt ongeveer 300-350 meter (zie bijvoorbeeld figuur 5.4), wordt de bank richting de kust gedrukt. Ter hoogte van het midden van de suppletie heeft de bank (inclusief druppel) zich het meest richting het strand verplaatst. Aan weerskanten van de druppel, die ter hoogte van het midden van de suppletie ligt, is de bank ook landwaarts verschoven, maar in mindere mate. Waarbij de landwaartse verplaatsing afneemt naarmate de afstand tot het midden van de suppletie toeneemt. Het effect is dus in het midden van de suppletie het grootst. Aan de randen van de suppletie vermindert de invloed van de suppletie en wordt die van de bank zelf groter. De bank wordt namelijk aan beide kanten van de suppletie niet geremd en kan zich dus zeewaarts verschuiven. Het punt ten noorden van de suppletie waarop de invloed van de suppletie niet meer merkbaar is, is in figuur 5.7d aangegeven met de zwarte pijl. Ten noorden van dit punt beweegt de bank zich zeewaarts, ten zuiden van dit punt drukt de suppletie de bank landwaarts. De suppletie neemt daarbij de rol aan van extra brekerbank.

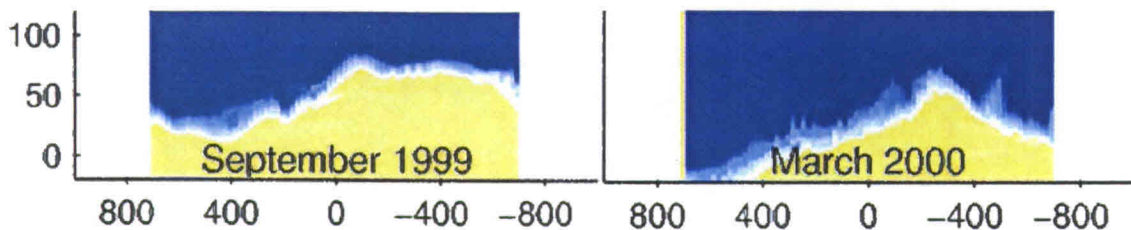
Dat is ook het geval bij Camperduin. Bij de onderwatersuppleties bij Katwijk en Noordwijk nam de suppletie de plaats in van de bank ter plekke die ten tijde van de suppleties bijna was vergaan. Voor de kust van Terschelling, waar de onderwatersuppletie tussen de trog van de binnenste en buitenste bank werd aangelegd, vormde zich ook geen extra bank, maar verdeelde het zand zich over beide banken (Spanhoff et al., 2003). Het is dus niet eenduidig hoe de kust reageert op een onderwatersuppletie.



Figuur 5.7: De ontwikkeling van de banken tussen juni 1999 en maart 2000 (a-c). In de tussentijd zijn voor de kust van Egmond (km 38) een strand- en onderwatersuppletie aangelegd. De onderwatersuppletie is in figuur b en c rood omlijnd. Figuur d toont de ligging van de buitenste bank vóór (figuur a, blauw) en na (figuur c, rood) de aanleg van de suppletie. De groene onderbrekingen in de blauwe bank representeren de druppels zoals ze vóór de aanleg van de suppletie lagen en de oranje onderbrekingen in de rode bank representeren de druppels na de suppletie.



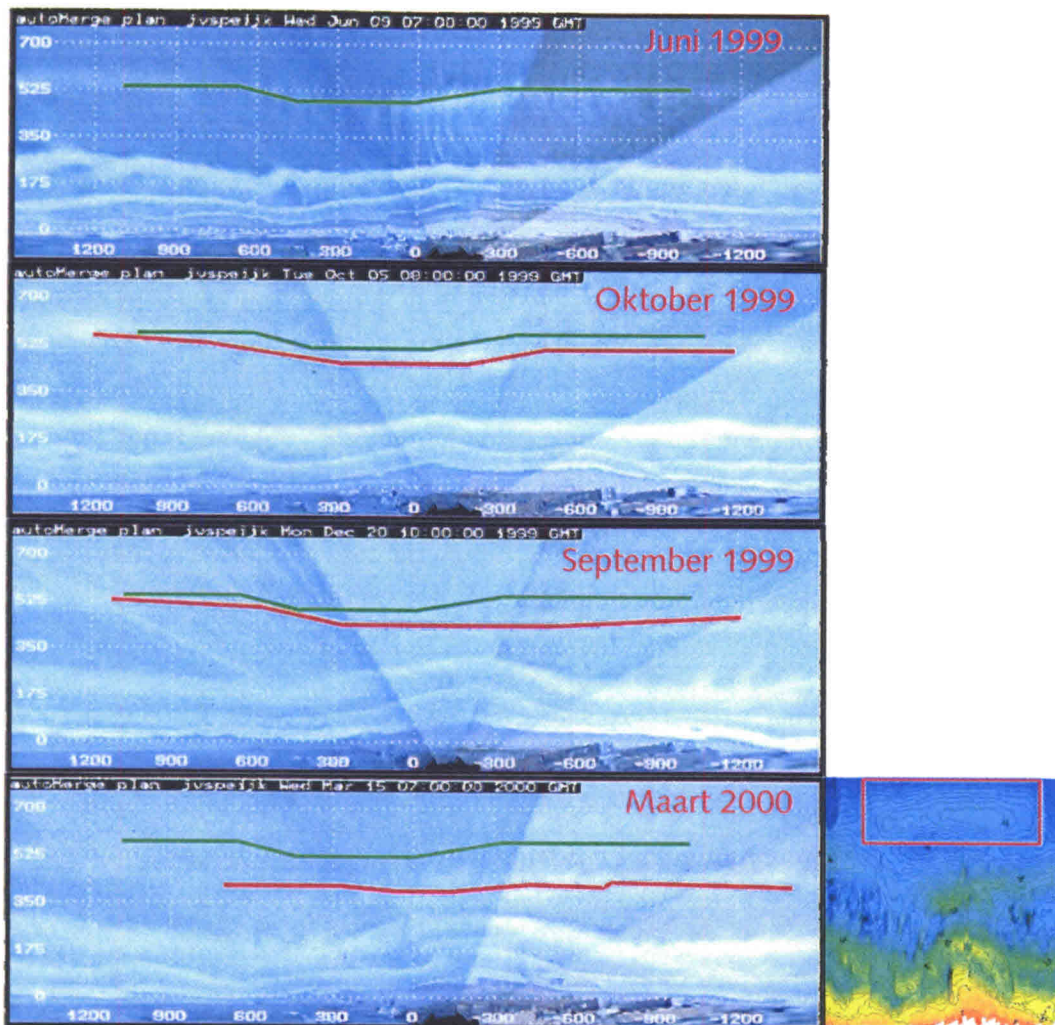
Aan de zuidkant van de suppletie is de bank opgebroken (figuur 5.7c). De bank is aldaar zowel met het suppletielichaam als met rest de bank verbonden. Het deel van de bank tussen raai 38 en 40, is door de breuk, erg laag geworden. Daarmee is op die plek de beschermende functie van de bank op de kust ook minder geworden. In 2000 was het strand ter hoogte van het zuidelijk deel van de onderwatersuppletie, waarschijnlijk door het opbreken van de bank, zo ver achteruit gegaan dat een noodsuppletie op het strand moest worden uitgevoerd om de strandhuisjes daar te beschermen. In figuur 5.8 is deze achteruitgang van het strand duidelijk te zien. Ook toont figuur 5.8 dat de strandsuppletie, die in september 1999 nog prominent aanwezig was, in maart 2000 grotendeels is verdwenen. Wat in maart 2000 nog te zien is, is een uitstulping (rond 300 meter ten noorden van het nulpunt) die correspondeert met de kromming in het argusbeeld van december 1999 en maart 2000 in figuur 5.9.



Figuur 5.8: Strandbreedte in september 1999 en maart 2000 zoals dat uit de argusbeelden is bepaald.

Geel geeft de waarden boven 1m NAP aan, blauw alle waarden van onder 0 NAP. Het midden van de beelden correspondeert ongeveer met de positie van de Jan van Speijk vuurtoren (raai 38). In september ligt het strand er, vlak na de strandsuppletie, nog goed bij. In maart 2000 is een uitstulping overgebleven en in het zuiden is het strand zeer smal geworden. Op zowel de x-as als de y-as staan de afstanden in meters. Negatieve waarden op de x-as liggen ten noorden van het nulpunt. Bron: Wijnberg en Aarninkhof (2003).

Ook in de argusbeelden is de landwaartse verplaatsing tussen juni 1999 en maart 2000 goed te zien (figuur 5.9). De bank zoals die ten tijde van de aanleg van de onderwatersuppletie lag, is groen aangegeven. In het rood wordt telkens de bankpositie van het moment van de opname weergegeven. Al vrij snel na de voltooiing van de suppletie, in oktober 1999, is de bank richting het strand verschoven. Van oktober naar december 1999 valt op dat de binnenbank (de eerste witte streep onder de rode lijn) krom is tussen 300 en -600 meter. Ook heeft de buitenbank een stapje richting strand gezet. De grootste verplaatsing van de bank heeft plaatsgevonden tussen december 1999 en maart 2000. De grootste verplaatsing heeft dus gedurende het stormseizoen plaatsgevonden. Hieruit lijkt het waarschijnlijk dat stormcondities zeer belangrijk zijn voor het initiëren van verplaatsingen van de banken. In maart 2000 ligt de bank ongeveer 100 meter dicht bij de kust dan vóór de aanleg van de suppletie. De kromming in de binnenbank, die in december voor het eerst zichtbaar was, is in maart 2000 iets van vorm veranderd en wat verschoven, maar is nog steeds aanwezig.



Figuur 5.9: Argusbeelden van juni 1999 – maart 2000. De groene lijn komt overeen met de locatie van de bank bij aanleg van de suppletie, de rode lijn correspondeert met de positie van de bank ten tijde van de opname. Naast de opname van maart 2000 is het deel uit de bodemkaart gezet dat overeenkomt met het gebied dat argus beslaat. De schaal is ongelijk, want de schaal van de bodemkaart is loodrecht op de kust 4x vertrokken, terwijl de argusbeelden niet vertrokken zijn. Zo kan het dat de bank in de bodemkaart erg schuin lijkt te lopen en dat in het argusbeeld minder zichtbaar is.

### 5.2.2. Eerste winter na de onderwatersuppletie bij Bergen

Figuur 5.10a toont de situatie zoals die was vóór de aanleg van de onderwatersuppletie bij Bergen. Het deel van de bank waartegen de suppletie wordt aangelegd is relatief recht. Het zuidelijk deel van deze bank is door de suppletie bij Egmond naar de kust gedrukt. Zeewaarts van deze bank ligt nog het restant van een oude bank die nog niet is vergaan. Op deze oude bank wordt in juni 2000 de suppletie aangelegd (figuur 5.10b). Daarmee komt meteen al een eerste verschil tussen de suppletie bij Bergen en die bij Egmond naar voren. De suppletie bij Bergen is binnen het natuurlijke systeem aangelegd, terwijl die bij Egmond buiten het natuurlijke systeem is geplaatst. In paragraaf 5.2.4 zal verder ingegaan worden op de



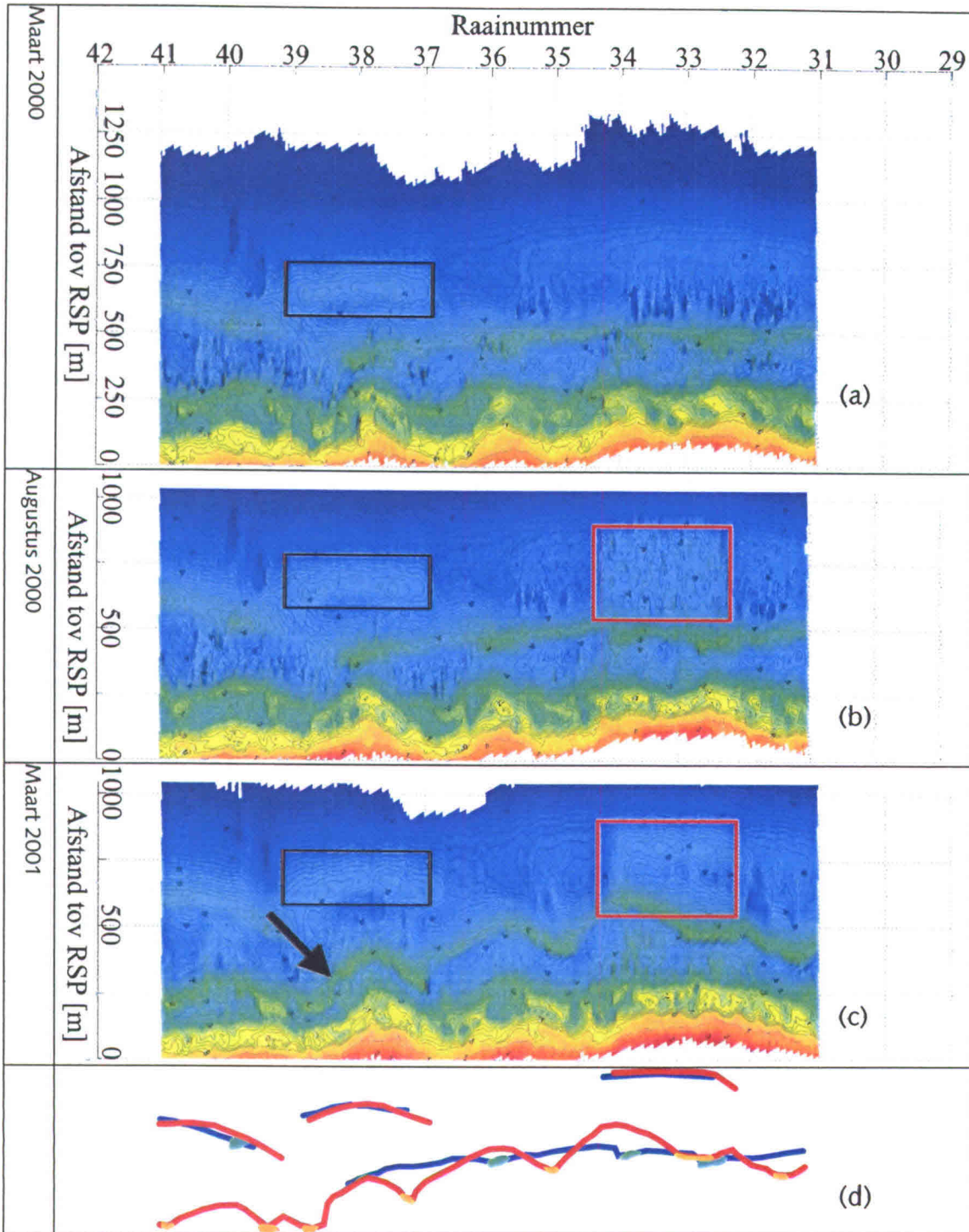
verschillen tussen de suppletie bij Bergen en Egmond.

De onderwatersuppletie bij Bergen is aangelegd tussen raai 32,25 en 34,25 en heeft een totaal volume van 994.000 m<sup>3</sup>, wat neerkomt op ongeveer 500 m<sup>3</sup> per strekkende meter.

Eén winter na de aanleg van de suppletie bij Bergen (figuur 5.10c en d) scheidt een trog het suppletielichaam van de bank, waardoor de suppletie als extra bank functioneert, net als in de eerste winter bij Egmond gebeurde. Dit bevestigt de theorie dat een bank een maximale breedte heeft en wanneer deze overschreden wordt, zich een trog vormt. Echter, de trog is in dit geval op het suppletielichaam gevormd in plaats van tussen de suppletie en de bank zoals bij Egmond. Waarschijnlijk komt dit doordat de suppletie bij Bergen in aanleg verschilt van die van Egmond. Het zand is voor de kust van Bergen in een breder lichaam gestort, ongeveer 375 meter breed, kustdwars gezien. De suppletie bij Egmond is ongeveer 260 meter breed. De natuurlijke afstand tussen twee banken bedraagt ongeveer 300-350 meter. Het suppletielichaam bij Bergen is dus breder dan de natuurlijke afstand tussen twee banken. Waardoor het niet noodzakelijk is de bank, waartegen de suppletie is aangelegd, richting de kust te drukken. Zodat de trog zich, zonder de bank al te veel te beïnvloeden, in het suppletielichaam kon vormen.

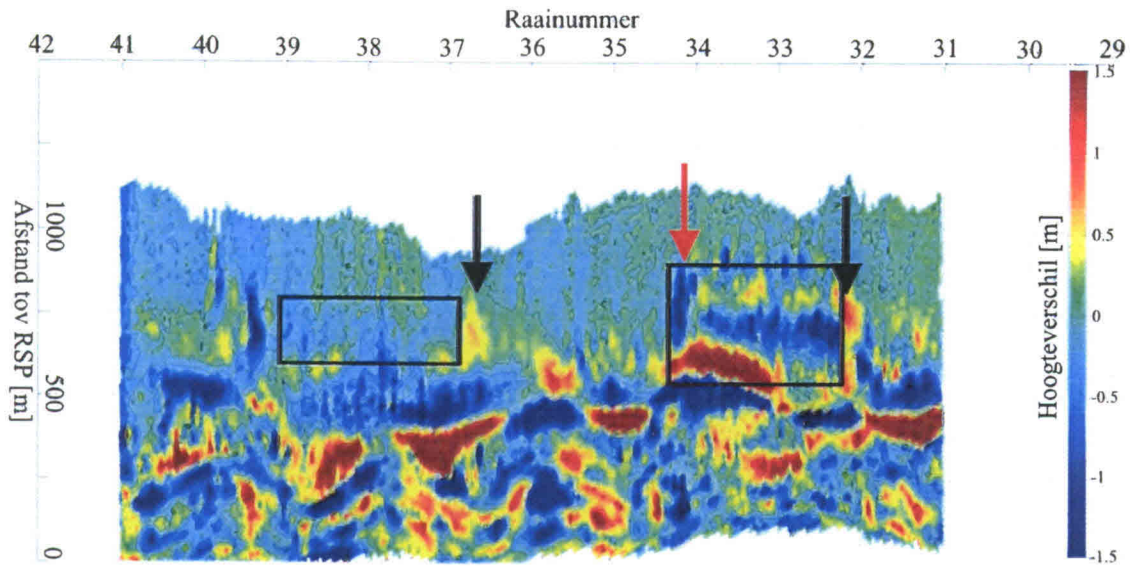
In maart 2001 heeft de bank, waartegen de suppleties bij Bergen is aangelegd, een opvallende gedaantewisseling ondergaan en is van een rechte naar een kromme bank getransformeerd (figuur 5.10c). Hierdoor is een deel van de bank aan de zuidkant in het suppletievak bij Bergen zeewaarts geschoven. Ter hoogte van het noordelijke deel van de suppletie is de bank recht gebleven en nauwelijks verplaatst.

In het verschilbeeld van augustus 2000 en maart 2001 is ook te zien dat een deel van de bank in het zuidelijk deel van het suppletievak komt te liggen (figuur 5.11). Blijkbaar is het proces dat voor de kromming van de bank zorgt sterker dan het proces dat de bank richting het strand zou moeten drukken. Er lijkt een zekere mate van hiërarchie in de processen te zitten. Wat ook zichtbaar wordt (figuur 5.11) in het verschilbeeld is dat beide suppleties zand lijken te lekken aan de noordkant van de suppletievakken (zwarte pijlen). De blauwe vlek (rode pijl) aan de zuidkant van de suppletie bij Bergen komt qua volume (-36.000 m<sup>3</sup>) ongeveer overeen met de rode vlek (zwarte pijl) aan de noordkant (+43.000 m<sup>3</sup>) van de suppletie. Dit is een indicatie voor de verschuiving richting het noorden van de gehele suppletie. In de tussenliggende periode zijn er overwegend stormen uit zuidelijk richting gekomen (zie tabel 5.1). Dit verklaart het lekken van suppletiezand aan de noordkant van de vakken en verklaart ook dat de bank achter het noordelijk deel van de suppletie beter beschermd wordt en daardoor minder beïnvloed wordt door de storm en op zijn plek blijft. In paragraaf 5.3 zal verder worden ingegaan op de invloed van golfcondities op het bankengedrag.



Figuur 5.10: Ontwikkelingen bij Bergen van maart 2000 – maart 2001. De situatie vóór de aanleg van de suppletie (a), direct na de aanleg (b), een winter na de aanleg (c) en de ligging van de banken (d) in augustus 2000 (blauw, met groene druppels) en maart 2001 (rood, met oranje druppels). De onderwatersuppletie bij Egmond is zwart omlijnd, die bij Bergensuppletie is rood. In figuur c is de bar-switch met een zwarte pijl aangegeven.

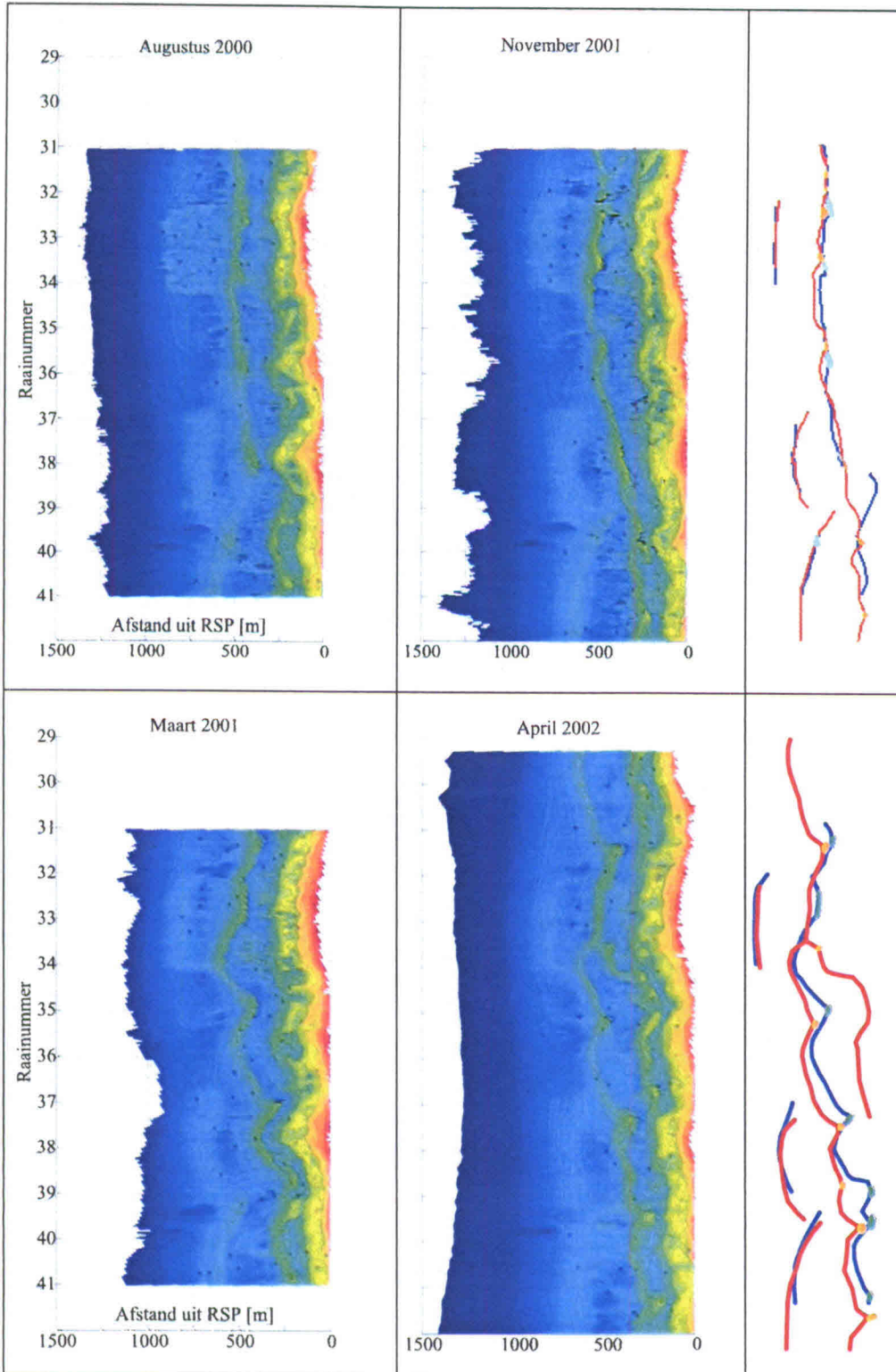




Figuur 5.11: Verschilkaart tussen maart 2001 en augustus 2000. De rode kleuren geven sedimentatie aan, de blauwe kleuren erosie. Ten noorden (rechts in de figuur) van beide suppletievakken (zwart omlijnd) is zand uit het suppletievak gelekt, dit is te zien aan de geel-rode vlekken naast de suppletievakken.

### 5.2.3. Verdere ontwikkelingen bij Egmond en Bergen

In maart 2001 is bij Egmond een bar-switch ontstaan tussen de nieuwe bank ten zuiden van de suppletie en de oude bank die door de suppletie richting de kust is gedrukt (zwarte pijl in figuur 5.10c). Deze bar-switch is het gevolg van het losbreken van het zuidelijke deel van de oorspronkelijke bank ten zuiden van de suppletie bij Egmond. Dit deel van de bank is enkel nog verbonden met het suppletielichaam. Daardoor heeft de nieuwe bank zich vrij zeewaarts kunnen verplaatsen, zodat de bar-switch kon ontstaan. Daarbij is kustwaarts van de suppletie de oorspronkelijke buitenste bank samengegaan met de binnenste bank. Door de bar-switch wordt de invloed van de breuk van de bank, die vlak na de aanleg van de onderwatersuppletie bij Egmond ontstond, waarschijnlijk verminderd. De nieuwe bank neemt de rol over van de oude, opgebroken bank. Waardoor het strand terplekke weer bescherming ondervindt van een bank. De kromming om het strand (figuur 5.9), die al in de binnenste bank aanwezig was, is blijven bestaan. De druppel die ter hoogte van raai 38 aanwezig was in de oorspronkelijke bank, lijkt te zijn uitgesmeerd over de kromming. Ook de druppels in de bank achter de suppletie bij Bergen lijken uitgesmeerd te zijn over de hele lengte van de suppletie. Hierdoor is de bank achter beide suppleties hoger dan in de gebieden tussen de suppleties. Een verklaring voor deze hogere banken zou kunnen zijn dat er zand uit het suppletievak in de bank is gelekt. Een andere mogelijke uitleg voor dit extra zand in de bank, is dat dit zand door het schaduw effect van de suppletie wordt ingevangen uit het kustlans zandtransport (Spanhoff et al., 1997). Aangezien de suppletie functioneert als extra brekerbank, is er kustwaarts van de suppletie minder golfenergie beschikbaar voor het in stand houden van het kustlans zandtransport. Waardoor terplekke accumulatie van zand plaatsvindt.



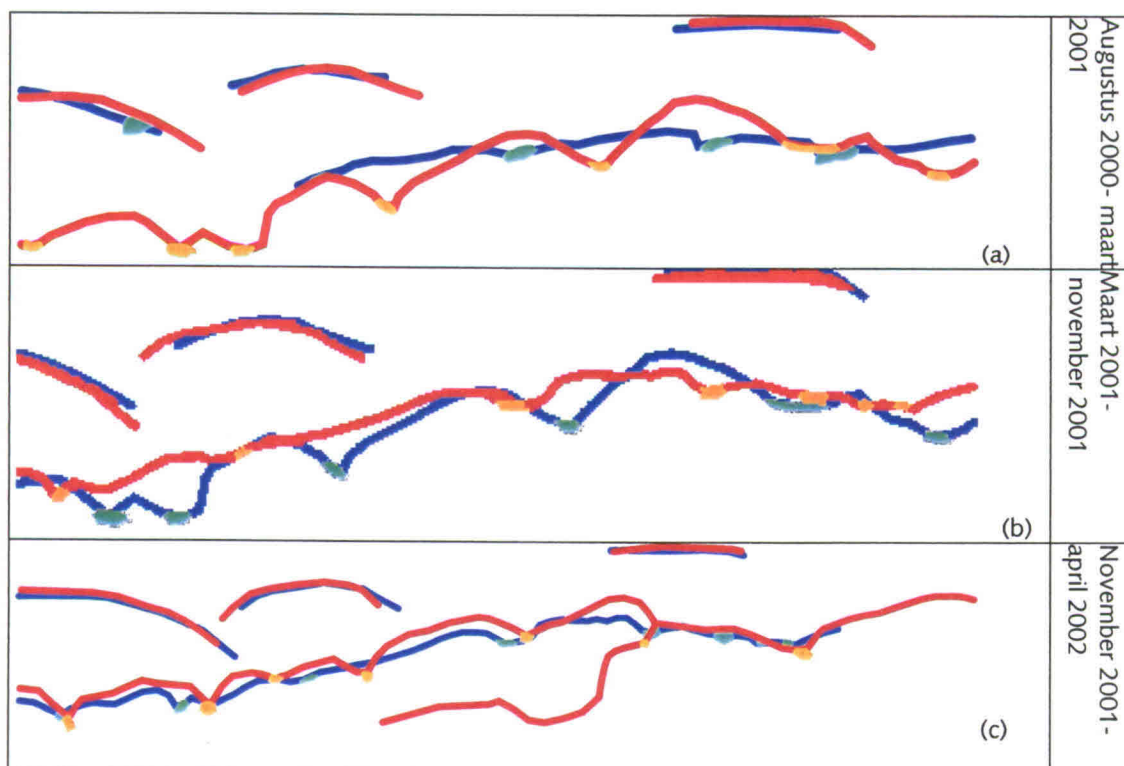
Figuur 5.12: Bankengedrag van augustus 2000 tot april 2002.

Figuur 5.12 toont dat de kromme bank van maart 2001 in november van datzelfde jaar is veranderd in een rechte bank. In april 2002 is de bank weer van recht naar krom veranderd. In figuur 5.12 wordt ook zichtbaar dat de



rechte banken in augustus 2000 en november 2001, en de kromme banken van maart 2001 en april 2002, qua vorm overeenkomen en hooguit enkel in positie zijn verschoven. De verschillende overgangen van recht naar krom en vice versa zijn weergegeven in figuur 5.13. In deze figuur is te zien dat het noordelijk deel van de suppletie bij Bergen ervoor zorgt dat de bank weinig verandert achter de suppletie. In de overgang van recht naar krom van augustus 2000 naar maart 2001 bewegen er delen van de bank landwaarts (druppels) en zeewaarts (bogen). Van november 2001 naar april 2002 verschuift de hele bank, behalve de druppels, zeewaarts. De druppels blijven daarbij op hun plek liggen. Op de oorzaken van het recht en krom trekken van de banken wordt ingegaan in paragraaf 5.3.

Tussen november 2001 en april 2002 verliezen beide suppleties heel veel zand (figuur 5.12). Ook de bank ten zuiden van de suppletie bij Egmond, die inmiddels bijna op dezelfde lijn (kustdwars gezien) ligt als de suppletie, lijkt een flinke dosis zand te hebben verloren. Het is moeilijk te zeggen of dit het gevolg is van een stormachtige winter, want zo extreem was deze winter niet in vergelijking met de voorgaande jaren, of dat beide suppleties gewoon in afbouw zijn. Wat mogelijk invloed heeft, zijn de verbindingen die beide suppleties met de banken hebben. In het autonome gedrag werd al gezien dat de herverdeling van het zand, bij het vergaan van de banken, via enkele verbindingen lijkt te gaan. De suppletie bij Egmond is aan zowel de noord- als de zuidkant verbonden met de bank, waardoor deze zand zou kunnen overdragen. Die bij Bergen heeft ook een verbinding aan de zuidkant van de suppletie.



Figuur 5.13: Ligging van de banken in de periode augustus 2000 – april 2002. Bestaande uit augustus 2000 (a: blauwe lijn, met groene druppels), maart 2001 (a: rode lijn met oranje druppels; b, blauwe lijn, met groene druppels), november 2001 (b: rode lijn met oranje druppels; c, blauwe lijn, met groene druppels) en april 2002 (c: rode lijn, met oranje druppels).

In april 2002 vindt er wederom een bar-switch plaats (figuur 5.12). Deze verbinding ligt bij raai 33,5 en is het gevolg van het vrijer kunnen bewegen van de bank in het onbeschermd deel tussen de suppleties, waardoor aan de kust ruimte ontstaat voor de ontwikkeling van een nieuwe bank. Ook ten noorden van de suppletie bij Bergen is te zien dat een nieuwe bank zich ontwikkelt. Deze is echter nog niet verbonden met de oude bank.

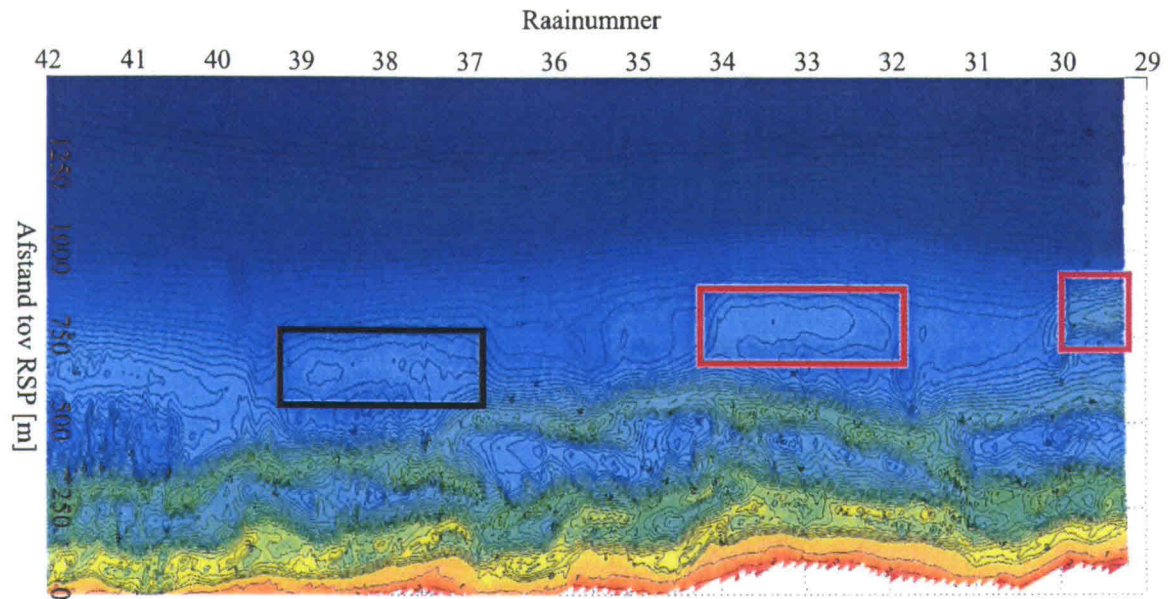
In mei 2003 heeft de switch wel plaatsgevonden (figuur 5.14). De switch bij raai 33,5 lijkt te zijn verdwenen en er is nu een bar-switch bij raai 37 ontstaan. Bij raai 31,5 lijkt ook een bar-switch te ontstaan.

Uit het veelvoud aan bar-switches na de aanleg van de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen, blijkt dat de bankencyclus door de suppleties verstoord is. De stukken bank die bescherming genieten van de suppletie, worden in hun jaarlijkse netto zeewaartse beweging geremd of zelfs netto landwaarts gedrukt. Hierdoor ontstaat een faseverschil tussen het deel van de bank dat door de suppletie beschermd wordt en de delen aan weerskanten van de suppletie, die zich vrijelijk kunnen bewegen. Als gevolg hiervan ontstaan de verscheidene bar-switches. In hoeverre deze ontwikkelingen van (positieve of negatieve) invloed zijn op de kust is nog onduidelijk. Als niet alleen sprake is van kustdwars transport van zand, maar ook van kustparallel transport, dan zou de uniformiteit van de banken een belangrijke rol kunnen spelen. Indien alleen sprake is van kustdwars zandtransport, dan maken de faseverschillen tussen de verschillende gebieden weinig uit. Het zand blijft dan toch voor hetzelfde gebied behouden en een kuststrook is dus niet afhankelijk van naastgelegen kuststroken. Echter, wanneer voor de bankencyclus ook zand uit het langstransport belangrijk is, zou de ligging van de banken wel een grotere rol kunnen spelen. Door de ligging van de banken dicht bij de kust (en dus meer bescherming tegen golven) ter hoogte van de suppleties ten opzichte van de gebieden rond de suppleties, wordt meer zand ingevangen. Dit is het schaduweffect dat Spanhoff et al. (1997) ook al beschreven voor de onderwatersuppletie bij Terschelling.

Door het invangen van het zand, resteert er minder voor de gebieden aan de lijszijde van de zandvangst. Hier zal dan erosie plaatsvinden. Thomalla en Vincent (2003) onderschrijven dergelijke problemen aan de zijkanten van 'break-waters' voor de kust van Engeland.

In het noordelijk deel (bij paal 29-30) van figuur 5.14 is nog net te zien dat een nieuwe suppletie is geplaatst. Dit is de suppletie bij Camperduin, die tussen juni en oktober 2002 is aangelegd. In mei 2003 heeft zich een trog gevormd tussen suppletie en de bank. Hierdoor is de bank richting de kust gedrukt. De suppletie bij Camperduin is ongeveer over dezelfde, kustdwarse, breedte als die van Egmond (ongeveer 260 meter) aangelegd. Qua volume komt deze suppletie meer overeen met die van Bergen (circa 560 m<sup>3</sup> per strekkende meter). Aangezien de suppletie bij Camperduin de bank, net als die bij Egmond, naar binnen drukt, lijkt de kustdwarse breedte van het suppletielichaam belangrijker te zijn voor de reactie van de banken op de suppletie dan het volume van het suppletielichaam.



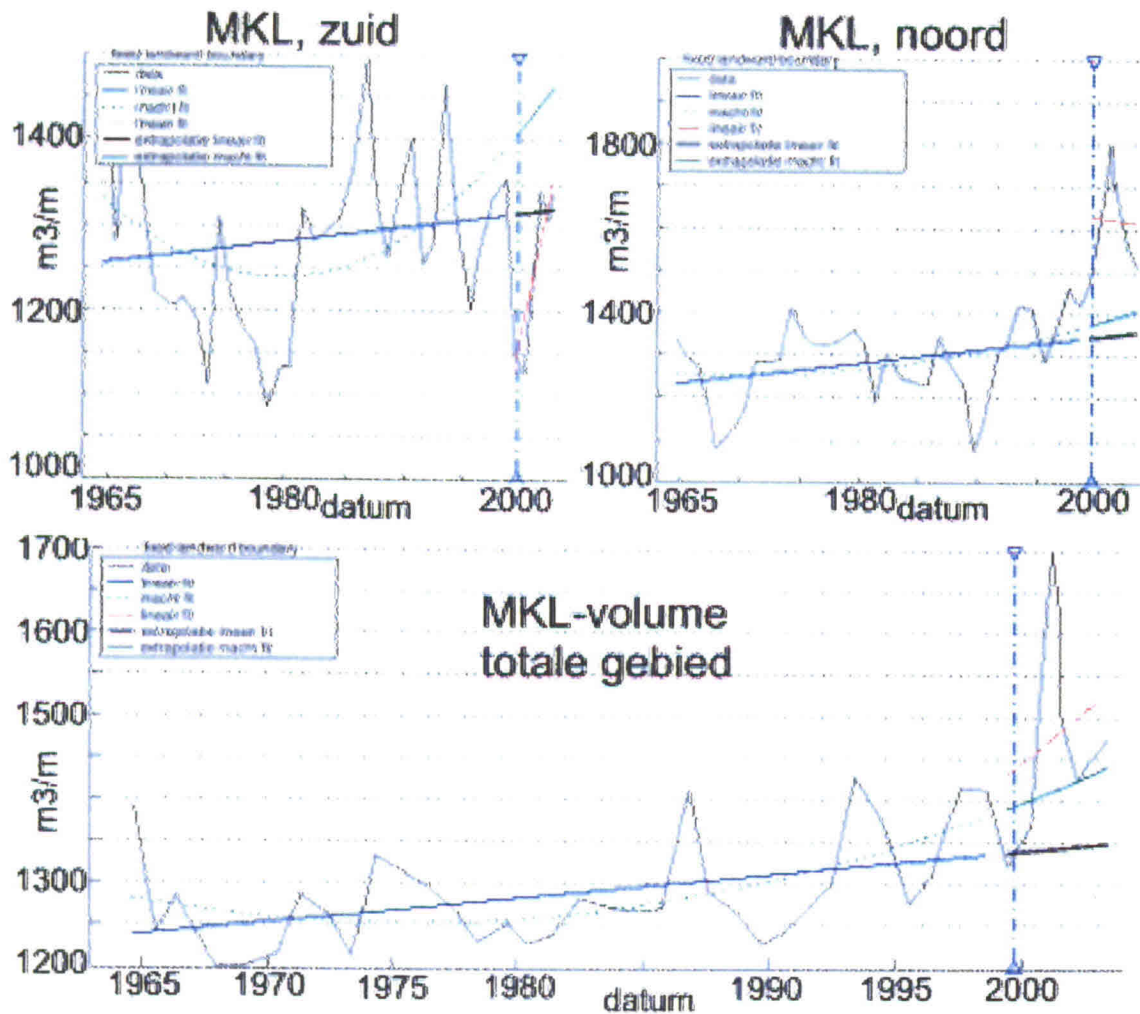


Figuur 5.14: Bodemkaart van mei 2003.

Er zijn drie onderwatersuppleties zichtbaar. De onderwatersuppletie bij Egmond (zwart), Bergen (rood) en een deel van die bij Camperduin (paars). Er zijn twee bar-switches zichtbaar, ter hoogte van raai 37 en 31,5. Beide zijn het gevolg van de snellere zeewaartse verplaatsing van de banken tussen de suppleties.

Als gekeken wordt naar de Momentane Kustlijn (MKL; zie paragraaf 4.1) bij Egmond, is te zien dat voor de zuidelijke helft van de suppletie het MKL-volume na aanleg erg achteruit is gegaan en zich daarna heeft hersteld (figuur 5.16). De noordelijke helft vertoont een stijging van het MKL-volume. Over het totale suppletiegebied genomen is het MKL-volume na de aanleg van de suppletie erg vooruit gegaan. Daarmee is dus aan de beleidsdoelstelling voldaan. De afname van het MKL-volume is waarschijnlijk het gevolg van de breuk in de bank en de extra erosie van het strand die daar het gevolg van was. Het herstel werd waarschijnlijk geïnitieerd door de noodsuppletie in 2000 en de bar-switch in 2001. Bij Bergen is het MKL-volume voor zowel de zuidelijke als noordelijke helft toegenomen na de aanleg van de suppletie. Daar is dus ook aan de doelstelling voldaan.





Figuur 5.15: MKL-volume bij Egmond.

Het volume is uitgezet tegen de tijd voor de zuidelijke helft (linksboven) en noordelijke helft (rechtsboven) van het suppletievak en het totale suppletiegebied (onder). De blauwe, getrokken lijn in alle grafieken is de trendlijn. De blauwe, verticale, gestippelde lijn is het tijdstip van aanleg van de onderwatersuppletie.

#### 5.2.4. Verschillen tussen de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen

Het eerste grote verschil tussen de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen zit in het suppletielichaam zelf. Bij Bergen is meer zand gestort ( $994.000 \text{ m}^3$ ) dan bij Egmond ( $880.100 \text{ m}^3$ ). Dit zand is bij Bergen over een kleiner, kustparallel gezien, aantal strekkende kilometer (2,0) gelegd dan bij Egmond (2,2). Waardoor het suppletielichaam bij Bergen breder is dan bij Egmond en meer zand bevat per strekkende meter. In kustdwarse richting is de suppletie bij Bergen ongeveer 375 meter breed, die bij Egmond (en Camperduin) is ongeveer 260 meter breed. De natuurlijke afstand van de binnenste tot de buitenste bank, in ongeveer dezelfde kustdwarse positie als de suppletie en de bank, bedraagt ongeveer 300-350 meter. Dit kan misschien verklaren waardoor de suppleties bij Egmond en Camperduin de bank naar binnen drukken en dit niet gebeurt bij de suppletie bij Bergen. De

afstand van het meest zeewaartse deel van de suppletie tot de bank is bij Egmond en Camperduin namelijk kleiner dan de natuurlijke afstand tussen twee banken in die positie. Aangezien de natuur streeft naar een grotere afstand tussen twee banken, zal de afstand tussen de suppletie (deze wordt door het systeem als een bank gezien) en de bank vergroot moet worden, wat leidt tot het naar binnen drukken van de bank waartegen de suppletie is aangelegd. Bij Bergen is deze afstand groter dan de natuurlijke afstand, waardoor het niet nodig is om de bank richting het land te drukken. Een ander verschil zit in de plek in het systeem waar de suppletie is geplaatst. De onderwatersuppletie bij Egmond is buiten het natuurlijke systeem gelegd. De suppletie bij Bergen is bovenop het restant van een oude bank gelegd en ligt zodoende binnen het systeem.

Ook zit er een verschil in de ligging van druppels bij beide suppleties. Bij Egmond ligt er een druppel ter hoogte van het midden van de suppletie. Terwijl bij Bergen de uiteinden van de suppletie juist ter hoogte van een druppel liggen.

Nog een detail dat niet over het hoofd moet worden gezien is dat de suppletie bij Bergen in twee delen is aangelegd (bij Egmond was dit niet zichtbaar het geval). Het noordelijk deel is het eerst aangelegd, daarna het zuidelijk deel. Of het toeval is of niet, de bank is in het noordelijk deel lichtjes landwaarts verschoven in de tussenliggende periode, terwijl dit bij het zuidelijk deel niet het geval is.

Het is zeer waarschijnlijk dat de verschillen in gedrag na de suppletie voor een deel te wijten zijn aan de verschillen in aanleg van de suppleties. Er moet echter ook rekening gehouden worden met de omstandigheden, die in de eerste winter na de aanleg van de suppleties zeer verschillend waren. Paragraaf 5.3 gaat verder in op deze verschillen.

### **5.3. Invloed golfcondities op bankengedrag**

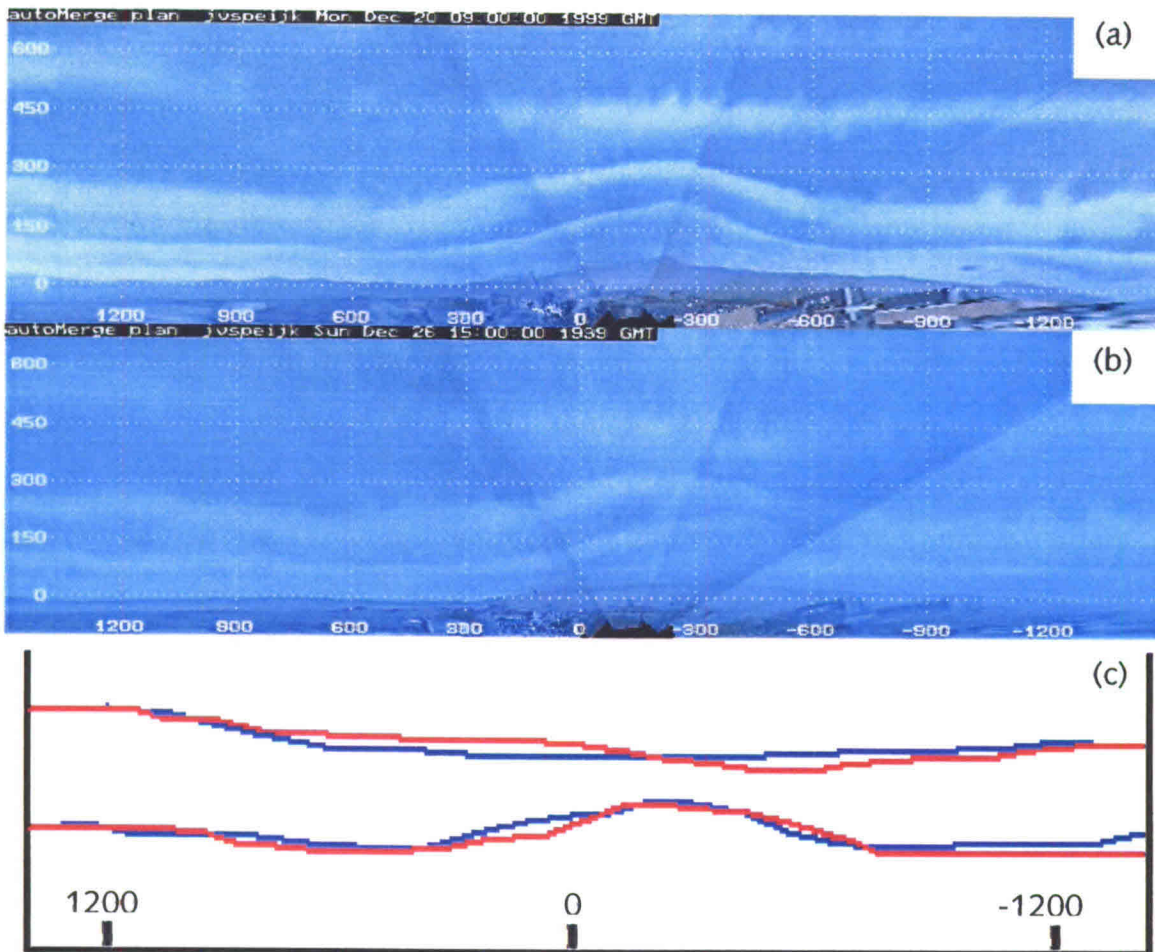
Na de aanleg van de onderwatersuppleties zijn meer data met kortere tussenpozen (extra bodemopnames en argusstations) beschikbaar dan in de periode ervoor. Daardoor is het logisch eerst te kijken naar de invloed van stormen in de periode na de suppleties. Daarna worden deze bevindingen, voor zover mogelijk, teruggekoppeld naar het autonome systeem. In de laatste subparagraaf komen de kustparallele verplaatsingen onder invloed van stormen aan de orde. Een storm is daarbij gedefinieerd als golven hoger dan 297 cm (paragraaf 4.3).

#### *5.3.1. Invloed van stormen op het bankengedrag na de suppleties*

Figuur 5.16 toont de veranderingen van de brekerbanken tussen 20 en 26 december 1999 onder invloed van een storm uit zuidelijke richting, die 27 uur duurde. In figuur 5.16c is de ligging van de banken van beide opnames weergegeven. De blauwe lijnen komen overeen met de banken zoals die op 20 december lagen. De rode lijnen corresponderen met de ligging van de banken op 26 december. De kromming die tussen 300 en -600 meter in de binnenbank zichtbaar is, lijkt van 20 naar 26 december richting het noorden te verschuiven. De buitenste bank is ten noorden van de top van de kromming wat richting de kust verschoven en in het zuiden wat verder zeewaarts te komen liggen en heeft daarmee een wat minder recht karakter gekregen. In hoeverre dit de invloed is van de storm of van de suppletie is

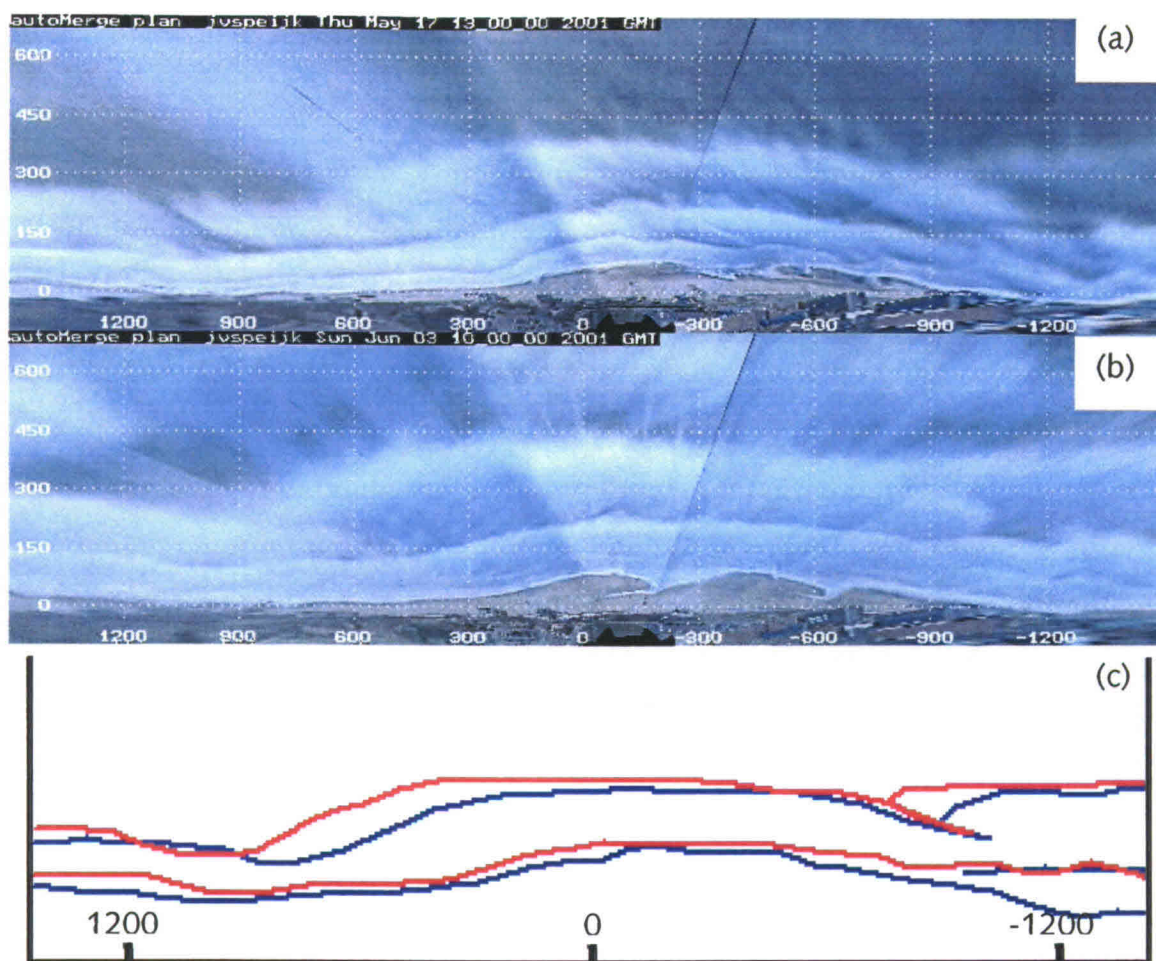


moelijk te zeggen. In ieder geval lijkt de noordwaartse verplaatsing van de kromming rechtstreeks het gevolg te zijn van de storm uit het zuiden.



Figuur 5.16: De ligging van de banken op 20 december (a, blauwe lijn in c) en 26 december (b, rode lijn in c) 1999. Tussen beide opnames heeft een storm (27 uur) uit het zuiden plaatsgehad. Door de storm zijn verschuivingen in noordelijke richting te zien.

In figuur 5.17 zijn de argusbeelden van 17 mei en 3 juni 2001 te zien. Tussen beide opnames heeft een storm uit noordelijke richting gewoed, die 27 uur duurde. In figuur 5.17c is de ligging van de banken vóór (blauwe lijnen) en na (rode lijnen) weergegeven. Deze figuur toont dat na de storm de banken verder zeewaarts liggen en richting het zuiden lijken te zijn verschoven. Ook lijken de banken wat rechter te zijn geworden onder invloed van de storm.



Figuur 5.17: De ligging van de banken op 17 mei (a, blauwe lijn in c) en 3 juni (b, rood in c) 2001.

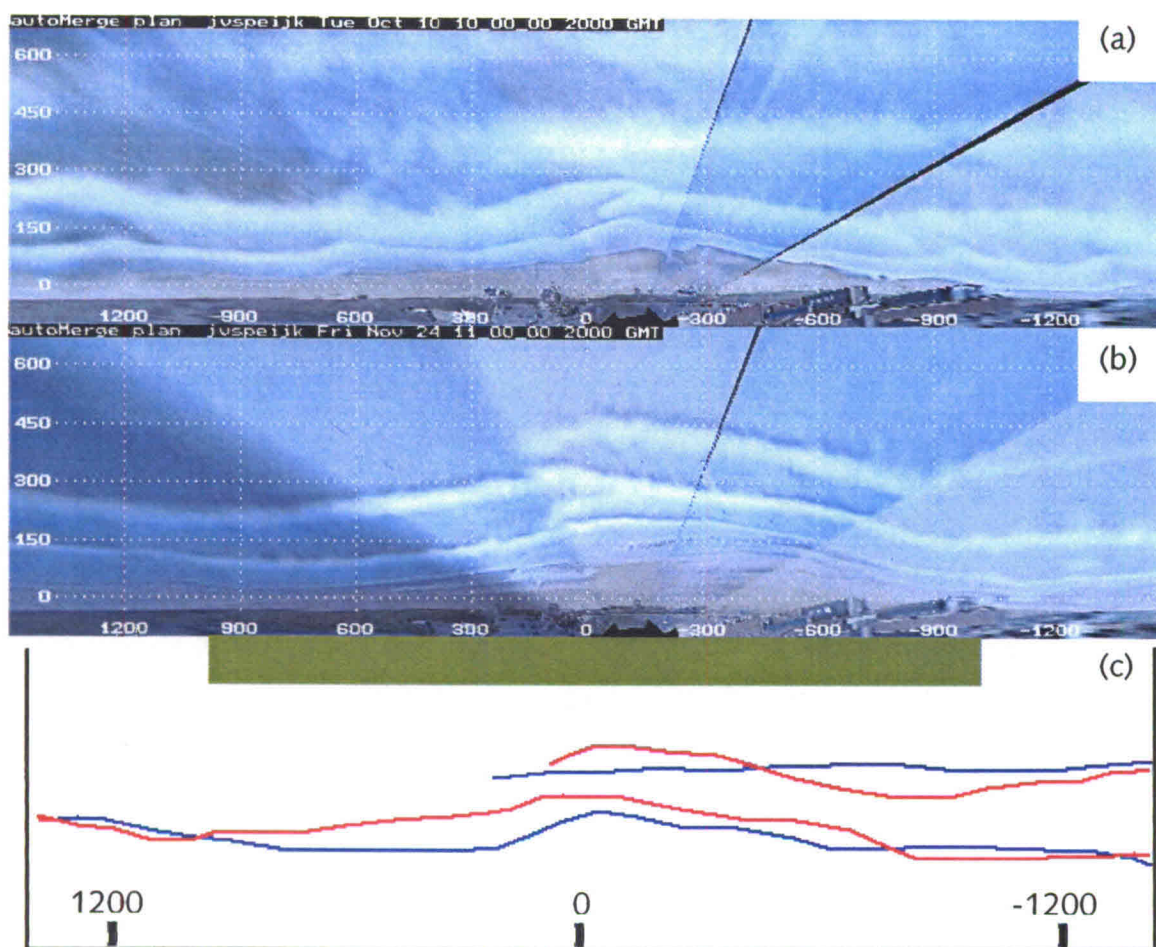
Tussen beide opnames heeft een storm (27 uur) uit het noorden gewoed. Met als resultaat dat de banken zich in zee- en zuidwaartse richting hebben verplaatst en wat rechter zijn geworden.

Uit figuur 5.16 en 5.17 kan worden opgemaakt dat de veranderingen, zoals die al jaarlijks in de bodemkaarten zichtbaar werden, waarschijnlijk het gevolg zijn van stapsgewijze veranderingen onder invloed van enkele stormen. Ook de kustparallele verplaatsingen lijken de optelsom te zijn van de opeenvolgende stormen uit verschillende richtingen. Paragraaf 5.3.3 gaat verder in op deze kustparallele verplaatsingen en de relatie daarvan met de golfcondities.

In de literatuur (bijv. Enckevort en Ruessink, 2003b) wordt vaak beweerd dat de banken zeewaarts bewegen en recht trekken na een storm. Uit figuren 5.18 en 5.19 blijkt echter dat deze bewering niet in alle gevallen opgaat. In ieder geval na de aanleg van de suppleties lijkt er een verschil te zitten tussen de reactie van de banken op een storm uit het zuiden (figuur 5.16) en een storm uit het noorden (figuur 5.17). Na de zuiderstorm in december 1999 lijken de banken krommer te zijn geworden. Terwijl na de storm uit het noorden in juni 2001 de bank er juist wat rechter bij lijkt te liggen. Dit effect wordt duidelijker te zien als de veranderingen na een langere storm met een duur van 60 uur uit het zuiden op 29 oktober 2000 (figuur 5.18) en de veranderingen na een lange storm (64 uur) uit het



noorden op 8 september 2001 (figuur 5.19) met elkaar worden vergeleken. In figuur 5.18 zijn de argusbeelden te zien die de veranderingen als gevolg van de eerstgenoemde storm laten zien. Deze stammen van 10 oktober (5.18a) en 24 november (5.18b). In de tussenliggende periode zijn, door het haperen van het argussysteem, geen bruikbare argusbeelden beschikbaar. Door de storm verandert de vorm van met name de buitenste bank van recht naar krom. Hierbij is een deel van de bank zeewaarts verplaatst en een deel richting het land verschoven. De binnenste bank is in het midden van het argusbeeld zeewaarts verschoven en toont een grote kromming. Aan de zijken van het argusbeeld is de binnenste bank licht landwaarts verplaatst. Er valt echter niet met zekerheid te zeggen of het die enkele storm was van 29 oktober of dat het een som was van alle stormen in de tussenliggende periode die deze verandering teweeg hebben gebracht. Dat de verandering onder invloed van een zuidelijke storm heeft plaatsgevonden staat vast. In de periode van 10 oktober tot 24 november komen namelijk alle stormen uit zuidelijke richting.

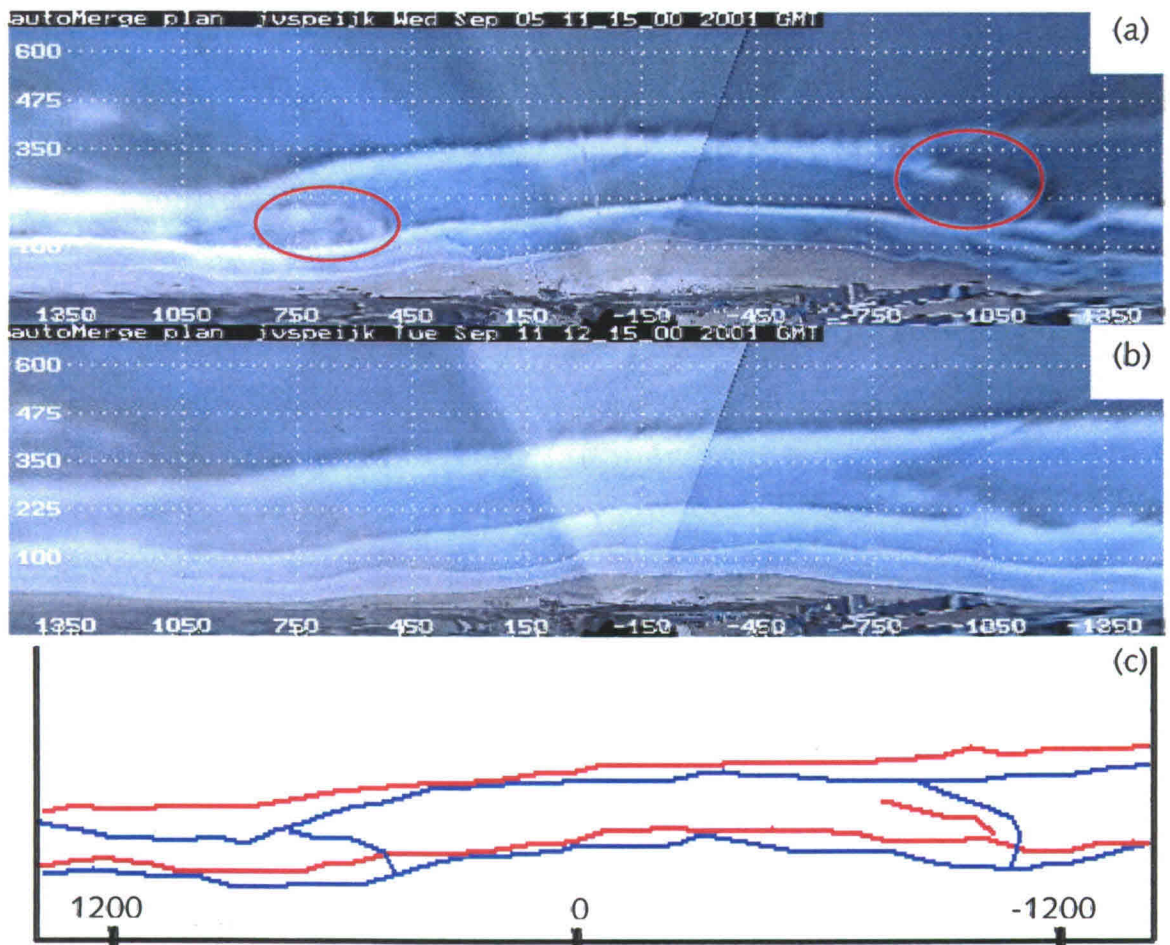


Figuur 5.18: De ligging van de banken op 10 oktober (a, blauwe lijn in c) en 24 november 2000 (b, rood in c). Tussen de opnames, op 29 oktober, woedde een zware storm uit het zuiden. De onderwatersuppletie ligt ongeveer ter hoogte van de groene balk.

De zware storm (64 uur) uit het noorden van 8 september 2001 heeft een ander effect (figuur 5.19). In een relatief korte periode verandert de vorm van de banken van krom naar recht onder invloed van een zware storm uit

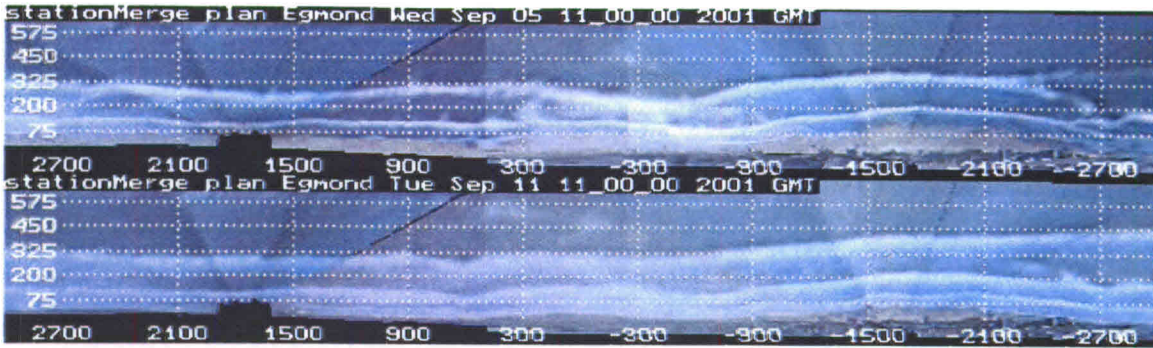
het noorden. De banken verplaatsen zich hierbij richting zee. De verbindingen tussen de binnen- en buitenbank (rood omcirkeld in figuur 5.19a) zijn na de storm verdwenen. Dit geeft aan dat bar-switches op korte termijn teniet gedaan kunnen worden. In dit geval is de verandering van de banken wel duidelijk het gevolg van één enkele storm, aangezien de beelden van vlak voor en vlak na de storm stammen. Het rechte trekken van de banken is zowel in het niet/minder-verstoorde systeem (mast) als in het verstoorde systeem (vuurtoren) te zien op de aan elkaar geplakte beelden van de mast en de vuurtoren (figuur 5.20). De suppletie kan zodoende niet aangewezen worden als oorzaak van deze gebeurtenis.

In figuur 5.19 en 5.20 wordt duidelijk dat de vorm van de banken binnen een paar dagen drastisch kan veranderen. De bodem zoals die op de bodemkaarten te zien is, kan dus op de schaal van één enkele storm grote veranderingen vertonen. Het blijft een optelsom van de stormen tussen de opnames, echter de laatste storm zal de vorm van de banken voor het grootste deel bepalen. Hier zal rekening mee gehouden moeten worden bij het maken van beleid aan de hand van de JARKUS en monitoringsopnames. Het zou namelijk kunnen uitmaken of die storm net voor of net na de opname plaatsvindt.



Figuur 5.19: Ontwikkeling van de banken van 5 (a, blauwe lijn in c) tot 11 (b, rood in c) september 2001. Onder invloed van een zware storm uit het noorden op 8 september 2001. De banken zijn zeewaarts verschoven en hebben een rechter karakter na de storm. Ook lijken de 'bar-switches' (rood omcirkeld in a) losgelaten te hebben.





Figuur 5.20: Gecombineerde argusbeelden van 5 (boven) en 11 (onder) september 2001.

In vergelijking met het beeld van 5 september zijn de banken, onder invloed van een zware storm uit het noorden, recht getrokken op 11 september en zeewaarts verschoven. Dit gebeurt zowel bij het gebied dat onder de invloed staat van de onderwatersuppletie (vuurtoren) als bij het gebied dat ten zuiden van de onderwatersuppletie ligt (mast).

Waarom het systeem anders reageert op een storm uit het noorden dan op een storm uit het zuiden is niet duidelijk. Mogelijk dat de golfperiode hierbij van invloed is. Deze is langer voor golven uit het noorden dan uit het zuiden. Door de langere golfen zouden de golven een indringender effect op de bodem hebben en een homogener, rechtere bank tot gevolg hebben. Met meer zeewaartse verplaatsing.

In paragraaf 5.2.3 werd al geconstateerd dat in de jaren na de plaatsing van de onderwatersuppleties bij Bergen en Egmond de banken rechte met kromme vormen afwisselen (figuur 5.12). Als wordt gekeken naar de stormgegevens tussen de verschillende opnames die in figuur 5.12 te zien zijn, valt op dat van augustus 2000 naar maart 2001, als de bank van recht krom wordt, stormen uit zuidelijke richting overheersen (tabel 5.1). In feite werd in figuur 5.18 de gebeurtenis al vast gelegd die verantwoordelijk is voor deze verandering. Door het ontbreken van bruikbare argusbeelden vlak vóór en vlak na de zware storm uit het zuiden (60 uur) is het onduidelijk of dit krom trekken alleen komt door de zware storm, of dat ook de minder zware stormen die eveneens uit zuidelijke richting kwamen in de periode tussen de argusbeelden uit figuur 5.18, medeverantwoordelijk zijn voor de verandering.

De verandering van krom naar recht tussen maart 2001 en november 2001 is te wijten aan het overheersend aantal stormuren uit het noorden (tabel 5.1). In figuur 5.19 is de grootste verandering van krom naar recht al te zien. Binnen een paar dagen is, onder invloed van de zware storm uit het noorden, de bank van krom naar recht veranderd. Uit deze overgang wordt dus wel duidelijk dat een enkele storm een grote verandering teweeg kan brengen.

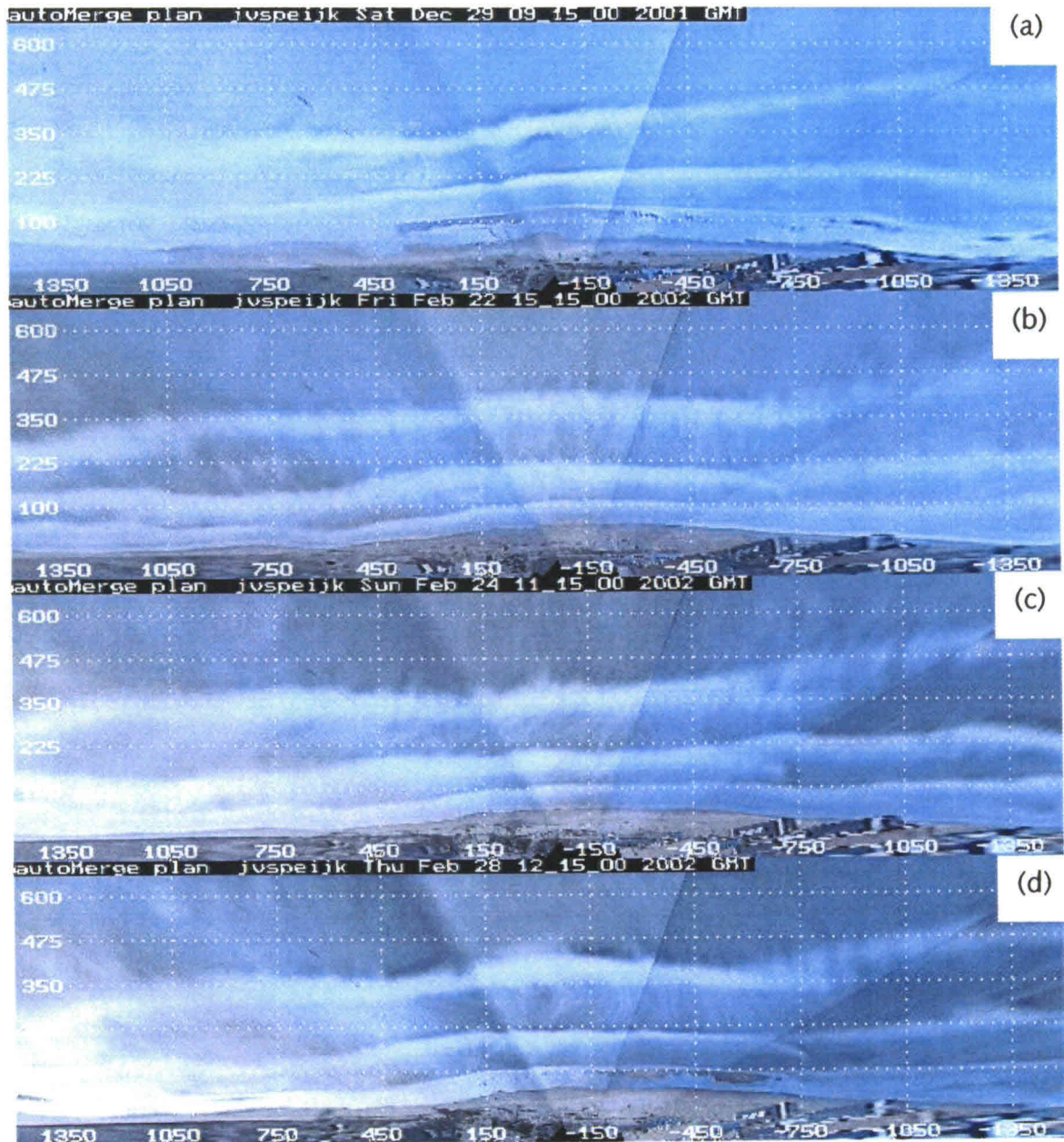
Tabel 5.1: Aantal stormuren per periode.

	zuid	west	noord
augustus 2000 – maart 2001	175	6	37
maart 2001 – november 2001	36	16	172
november 2001 – april 2002	153	101	149

De overgang van recht naar krom tussen november 2001 en april 2002 (figuur 5.12) is niet in één oogopslag te relateren aan een overheersend



aantal stormuur uit een bepaalde richting. Uit tabel 5.1 blijkt dat het aantal uren uit het noorden en zuiden (en westen) in deze periode elkaar niet veel ontloopt. Als echter gekeken wordt naar de laatste maanden (vanaf januari) voor de opname blijkt dat in deze periode vooral veel kleinere stormen uit zuidelijke richting (totaal: 129 uur) komen en slechts enkele, wel lange, stormen uit het noorden (51 uur) en een paar stormen uit het westen (37 uur). Waarbij van de stormen uit het westen gezegd kan worden dat ze uit het zuidelijke deel van het westsegment komen en dus eerder bij de stormen uit het zuiden meetellen dan bij de stormen uit het noorden.



Figuur 5.21: De ontwikkeling van de banken tussen 29 december 2001 en 28 februari 2002.  
 a) 29 februari 2001, b) 22 februari 2002, c) 24 februari 2002 en d) 28 februari 2002.

In figuur 5.21 is meer in detail gekeken naar de ontwikkeling van de banken tussen 29 december 2001 en 28 februari 2002. Na een groter aantal stormuren uit het noorden ligt de bank er op 29 december 2001 (5.21a) recht bij. Tussen 29 december 2001 en 22 februari 2002 (5.21b) overheerst het aantal stormuur uit het zuiden (96 uur versus 13 uur uit het noorden) en is de bank krommer geworden. Tussen 22 en 24 februari 2002 woedt een lange (38 uur) storm uit het noorden. Dit resulteert in een rechttere bank in figuur 5.20c. Drie stormen uit het zuiden (25 uur) en een uit het westen (19 uur) zorgen ervoor dat de banken van 24 tot 28 februari 2002 (5.21d) weer krom worden. Deze krommingen komen ongeveer overeen met de situatie zoals die tijdens de monitoringsopname in april 2002 werd waargenomen. Hoewel de veranderingen van de banken tussen de verschillende opnames een stapsgewijs proces lijken te zijn, lijkt ook de chronologie van de tussenliggende golfcondities van belang. De laatste storm(en) voor de opname is (zijn) volgens deze benadering van belang voor de vorm en in mindere mate voor de positie van de bank. In een jaar waarin bijvoorbeeld zuiderstormen overheersen, zou een noorderstorm vlak voor de opname de bank wat rechter kunnen maken. De (kustdwarse en kustlangse) positie van de bank zal in dit geval echter voornamelijk door de stormen uit zuidelijke richting zijn bepaald.

### 5.3.2. *Invloed van stormen op het bankengedrag vóór de suppleties*

Helaas zijn voor de aanleg van de onderwatersuppleties geen argusbeelden beschikbaar. Hierdoor kan weinig gezegd worden over de invloed van individuele stormen op het autonome bankengedrag. De golfcondities zullen dus gekoppeld moeten worden aan de Jarkus-opnames. Aangezien in de vorige paragraaf al geconcludeerd werd dat de ligging van de banken, zoals die jaarlijks worden waargenomen in de Jarkus-metingen, het gevolg zijn van het cumulatieve effect van verschillende golfcondities, is het erg moeilijk te achterhalen in hoeverre de golfcondities verantwoordelijk zijn voor de veranderingen van de banken. Daarbij komt ook nog dat de chronologie van de gebeurtenissen tussen de opnames van belang is. Een periode met alleen maar noorderstormen afgewisseld met een periode met enkel zuiderstormen geeft een ander resultaat dan een periode waarin stormen uit het noorden en zuiden elkaar afwisselen.

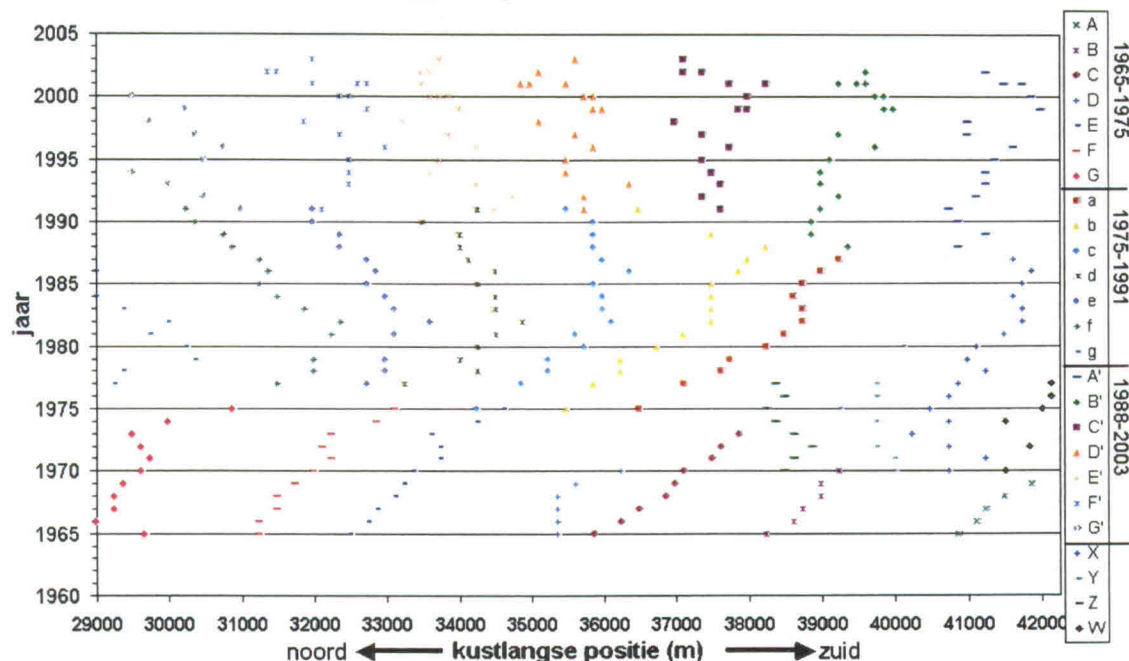
Stormcondities lijken van belang voor het in stand houden van de 15-jarige cyclus van de banken. De banken bewegen onder invloed van een storm zeewaarts. Gedurende periodes zonder stormen bewegen de banken landwaarts. Dit landwaarts bewegen gaat langzamer dan de zeewaartse verplaatsing onder invloed van een storm. Waardoor sprake is van een jaarlijkse netto zeewaartse beweging van de banken. Tussen 1976 en 1977 verplaatsen de banken zich landwaarts. In die periode kwamen weinig stormen voor, in vergelijking met andere jaren.

Of het recht en krom trekken van de banken, zoals dat in de jaren na de aanleg van de onderwatersuppletie zichtbaar werd, ook al vóór de onderwatersuppleties zo extreem gebeurde is moeilijk te zeggen. De bodemopnames van 1965-1999 vertonen wel jaren met rechttere en krommere banken, maar het is niet makkelijk om dit direct te relateren aan de voorafgaande golfcondities. Om daar meer over te kunnen zeggen, zal waarschijnlijk dieper op de chronologie van de golfcondities moeten worden ingegaan.



### 5.3.3. Kustparallele verplaatsingen

Zoals in paragraaf 5.3.1 al duidelijk werd, zijn via de argusbeelden kustparallele verplaatsingen te zien die zijn te koppelen aan de voorafgaande stormcondities. Ook werd het vermoeden al besproken dat de ontwikkelingen die te zien zijn tussen de verschillende Jarkus- en monitoringsopnames het gevolg zijn van een optelsom van de tussenliggende golfcondities.



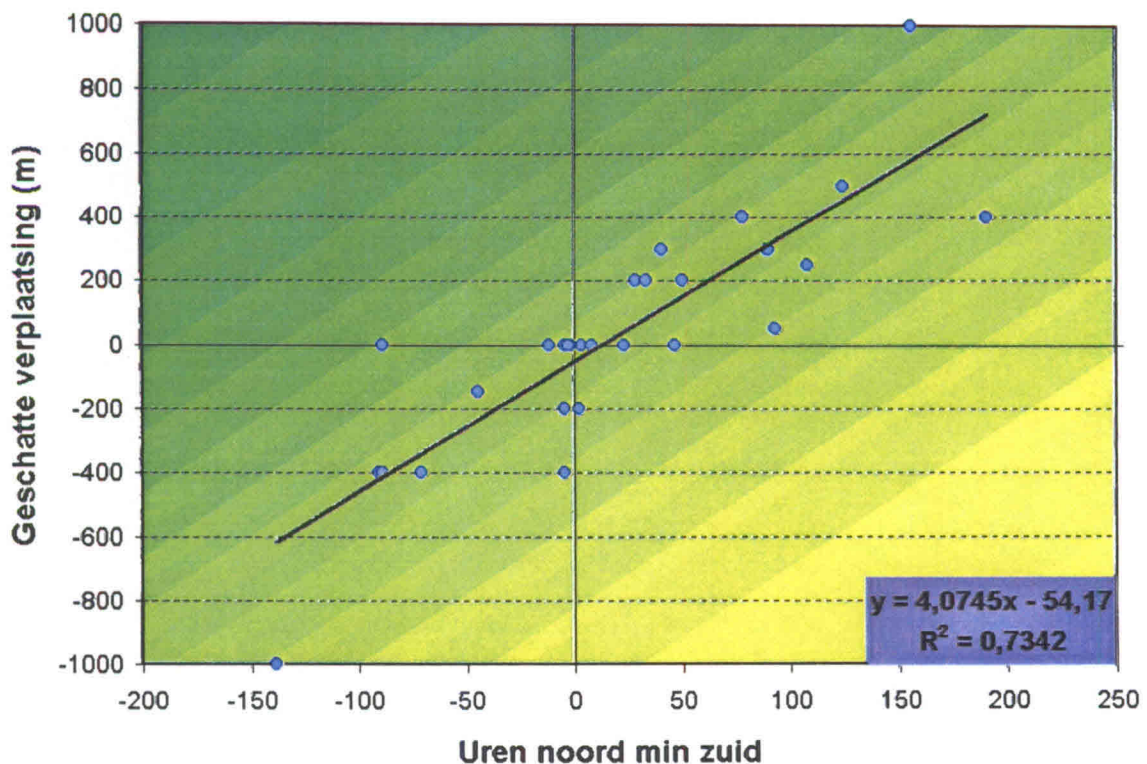
Figuur 5.22: Kustlangse positie van de druppels in de tijd.

Omdat de druppels met de banken vergaan, is er onderscheid gemaakt tussen de verschillende generatie druppels. De hoofdletters A-G staan voor de generatie druppels die tussen 1965-1975 zichtbaar waren. Kleine letters a-g staan voor de generatie in de periode 1975-1991 en hoofdletters met accenten A'-G' voor de generatie in de periode 1988-2003. X, Y, Z en W behoren tot de eerste periode. Dit zijn druppels in het zuidelijke deel van het gebied waar de ontwikkeling van de bank voorloopt op het noordelijke deel. De kustlangse positie is gedefinieerd als de afstand, in meters, vanaf Den Helder. Dit komt overeen met de raainummers.

In figuur 5.22 is de kustlangse positie van de verschillende generaties druppels uitgezet tegen de tijd. De verschillende generaties druppels zijn met verschillende letters benoemd en corresponderen met verschillende generaties banken. De hoofdletters A-G staan voor de generatie druppels die tussen 1965-1975 zichtbaar waren. Kleine letters a-g staan voor de generatie in de periode 1975-1991 en hoofdletters met accenten A'-G' voor de generatie in de periode 1988-2003. Met name in de beginjaren van de opnames lijkt er een zuidwaartse trend te zitten in de verplaatsingen van de druppels. Deze zuidwaartse trend is niet over het hele gebied hetzelfde. Tussen 1965 en 1990 is deze zuidwaartse trend ten zuiden (rechts in de figuur) van kilometer 35 zichtbaar. Terwijl deze trend voor de raaien ten noorden van kilometer 35 al rond 1983 lijkt om te slaan naar een meer noordwaarts gerichte trend. De generatie druppels die rond 1990 ontstaat (A'-G') lijkt een minder zichtbare trend te vertonen qua verplaatsingen. Dit heeft misschien te maken met het begin van de suppletieperiode in dit



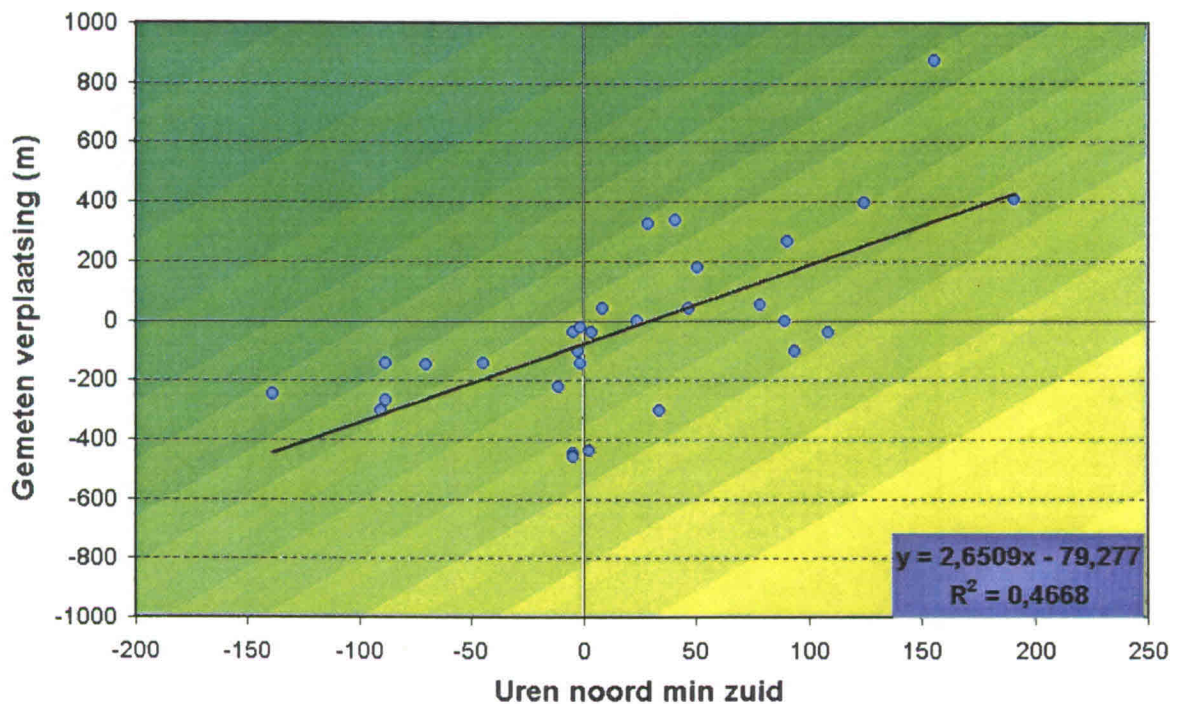
gebied in 1990. Wat wel opvallend is aan de generatie die in 1990 ontstaat, is dat de druppels uit de voorgaande generatie, a-g, naadloos lijken aan te sluiten op deze nieuwe generatie druppels. Dit is een aanwijzing voor het overdragen van de positie van de oude aan de nieuwe druppels. De overgang van generatie A-G naar generatie a-g is echter minder duidelijk. Uit de drie noordelijke druppels van de A-G-generatie lijken elk steeds 2 druppels in de a-g-generatie te ontstaan rond 1975. Door de relatie tussen de druppels en de strandbreedte, is het logisch om aan te nemen dat met de verplaatsing van de druppels ook het bredere gedeelte van het strand verplaatst. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor de zandgolven (bijv. Verhagen (1988) of Ruessink en Jeuken (2002)) die zich langs de Nederlandse kust verplaatsen.



Figuur 5.23: Geschatte zuidwaartse verplaatsing van de druppels uitgezet tegen het aantal uren storm uit het noorden min het aantal uren storm uit het zuiden. Dit is gedaan voor de periode 1979-2002.

De verplaatsing van de druppels (paragraaf 4.1.4) is gecorreleerd aan de golfparameters van paragraaf 4.3 voor de periode 1979-2002. Uit de helling van de trendlijn voor de geschatte verplaatsing in figuur 5.23 is te zien dat de druppels per uur storm ongeveer 4,1 meter kustlangs verplaatsen. De trendlijn voor de gemeten verplaatsing in figuur 5.24 toont een kustparallele verplaatsing van ongeveer 2,7 m/uur storm. Uit tabel 5.2, figuur 5.23 en 5.24 blijkt dat de geschatte verplaatsing van de druppels beter correleert met het aantal uren noord min zuid dan de gemeten verplaatsing. In paragraaf 4.1.4 wordt het verschil tussen geschatte en gemeten verplaatsingen uitgelegd. Ook als naar de golfenergie van golven hoger dan 297 cm wordt gekeken, valt op dat de geschatte verplaatsing beter correleert dan de gemeten verplaatsing. Waarschijnlijk heeft dat te maken met de objectieve benadering van de gemeten waarden. Deze benadering laat geen ruimte voor andere factoren dan de verplaatsing van

de top van de druppel. De vorm van de druppel wordt hierbij volledig genegeerd. Dit terwijl bij de geschatte waarden deze vorm juist wel meetelt. Daar staat tegenover dat bij de geschatte waarden de verplaatsing vaak gebaseerd is op één enkele, representatieve, druppel, in plaats van het gemiddelde van alle zichtbare druppels dat wordt genomen bij de gemeten verplaatsing. Misschien dat ook in het gebruik van alle druppels een fout schuilt, aangezien er daarbij geen onderscheid gemaakt wordt tussen druppels die dichtbij de kust liggen en de verder zeewaarts gelegen druppels. In figuur 5.22 is ook te zien dat de zuidwaartse trend die tot ongeveer 1980 voor alle druppels zichtbaar is, na 1980 niet meer zo eenduidig is. Voor de druppels in het noordelijke deel van het gebied lijkt de trend richting het noorden te verschuiven. De zuidelijke druppels blijven een zuidwaartse trend vertonen.



Figuur 5.24: Gemeten zuidwaartse verplaatsing van de druppels uitgezet tegen het aantal uren storm uit het noorden min het aantal uren storm uit het zuiden. Dit is gedaan voor de periode 1979-2002.

Tabel 5.2: R<sup>2</sup>-correlatietabel.

Tussen haakjes wordt verwezen naar de vergelijking uit paragraaf 4.3 die is gebruikt. De correlaties zijn significant binnen het 99%-betrouwbaarheidsinterval. Alles van 1979-2002.

	Geschatte verplaatsing	Gemeten verplaatsing
Hoogte*uur noord-zuid (2)	0.742	0.468
Uur noord-zuid (3)	0.734	0.467
Golfenergie (4)	0.533	0.332
Golfenergie >297cm (4)	0.640	0.433

Uit tabel 5.2 blijkt dat het niet veel uitmaakt of vergelijking 2 of 3 uit paragraaf 4.3 gebruikt wordt voor de correlatie met de verplaatsingen. Vergelijking 4, voor de golfenergie met golven hoger dan 297 cm, geeft lagere correlaties dan 2 en 3. Waar het verschil door komt is onduidelijk. Vergelijking 4 lijkt de meest exacte benadering van de werkelijkheid, omdat

deze naast de golfhoogte ook de precieze richting en de golfperiode meeneemt. Dit blijkt echter niet uit de correlaties. Aangezien er weinig verschil zit tussen het gebruik van vergelijking 2 en 3, lijkt het weinig uit te maken hoe ver de golfhoogte boven het 5%-percentiel uitkomt. Het feit dat het gebruik van alle golfhoogtes bij de golfenergie (4) een lagere correlatie oplevert dan het stellen van een grens van 297 cm voor de golfenergie, geeft aan dat er waarschijnlijk een grens is waaronder de golven weinig of geen invloed hebben op de verplaatsingen van de banken.

Er is ook gekeken of de invloed van extreme stormen te relateren valt aan de verplaatsingen van druppels. De definitie van een extreme storm is gekozen als een aaneengesloten periode van meer dan 20 uur met golven die het 5%-percentiel overschrijden. Voor de richting van zo'n extreme storm wordt de gemiddelde richting genomen. Hierbij geldt dezelfde aanname dat bij meer stormen uit het noorden zuidelijke verplaatsingen gegenereerd worden en andersom. Er blijkt geen duidelijk verband te zijn. Aangezien het aantal extreme stormen per jaar gering is, komt het voor dat er in een jaar evenveel stormen uit het noorden als uit het zuiden komen. Er zou dan volgens de aanname geen verplaatsing van de druppels moeten optreden, terwijl deze dan wel wordt waargenomen.

Hiermee wordt de gedachte bevestigd dat de kustlangse verplaatsingen (van de druppels) de resultante zijn van het cumulatieve effect van verschillende stormcondities uit verschillende richtingen, meer dan het gevolg van een aantal extreme stormen op zich.

De helling van de trendlijn (vergelijk figuur 5.23 en 5.24) is over het algemeen steiler bij de geschatte dan bij de gemeten verplaatsingen. Dit komt doordat de extreme waarden weggemiddeld zijn bij de gemeten waarden. Waardoor deze waarden dichter bij elkaar liggen en zodoende resulteren in een vlakkere trendlijn.

Door de gemeten verplaatsingen op te splitsen in een deel van vóór en na de suppleties is gekeken of er veranderingen plaatsvinden in de verplaatsingen. Aangezien na 1999 de metingen ook dichter op elkaar liggen kon ook worden gekeken of de verplaatsingen op kortere termijn zich anders gedragen dan op langere termijn. Dit is niet het geval. Vóór de suppletie komen ongeveer dezelfde waarden voor als na de suppletie en ook zijn de richtingscoëfficiënten van de trendlijnen bijna hetzelfde (tabel 5.3). Dit geeft aan dat de verplaatsingen voor en na de aanleg van de onderwatersuppletie ongeveer dezelfde orde van grootte hebben. Er is zodoende geen reden om aan te nemen dat het proces achter de kustparallele verplaatsingen verstoord is door de aanleg van de onderwatersuppleties.

Tabel 5.3: Richtingscoëfficiënt van de trendlijn voor de gemeten kustparallele verplaatsingen. Voor en na de aanleg van de onderwatersuppleties. Tussen haakjes staat de vergelijking uit paragraaf 4.3 die is gebruikt.

	Voor suppletie	Na suppletie
Gemeten met $H_{mo} \cdot t$ (2)	$7.38 \cdot 10^{-1}$ [m/muur]	$6.23 \cdot 10^{-1}$ [m/muur]
Gemeten met aantal uur (3)	2.71 [m/uur]	2.51 [m/uur]
Gemeten met energie (>297 cm) (4)	$1.01 \cdot 10^{-4}$ [m/kgms <sup>-3</sup> ]	$1.01 \cdot 10^{-4}$ [m/kgms <sup>-3</sup> ]



## 6. Discussie

---

In dit onderzoek is de grens voor het autonoom systeem gelegd op het moment dat de onderwatersuppletie bij Egmond werd aangelegd, 1999 dus. In 1990 werd het autonome systeem echter al verstoord door de eerste strandsuppleties die bij Egmond en Bergen werden aangelegd. Vanaf 1990 werden de strandsuppleties in dit gebied ongeveer om de 2 jaar uitgevoerd. Omdat in dit onderzoek voornamelijk gekeken werd naar veranderingen van het bankengedrag als gevolg van de onderwatersuppletie, werden de strandsuppleties daarbij als minder verstorend geacht dan de onderwatersuppleties. Aangezien de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen direct tegen de brekerbank werden aangelegd, mag verwacht worden dat deze suppleties meer invloed op het bankengedrag hebben dan de aanleg van een strandsuppletie. Temeer daar de onderwatersuppletie, met name op kortere termijn, voornamelijk als golfbreker fungeert (Rijn et al., 2002). Ook de langere levensduur van een onderwatersuppletie impliceert dat deze meer invloed heeft op het kuststelsel dan een vergelijkbare strandsuppletie. Na ongeveer een half jaar na de strandsuppletie in 2000 bij Egmond heeft het strand zijn oude vorm terug (Wijnberg en Aarninkhof, 2003). Terwijl in mei 2003 (figuur 5.14), 4 jaar na aanleg, de onderwatersuppletie nog altijd herkenbaar aanwezig is.

Door de aanname dat de brekerbanken in de kustzone bij Egmond en Bergen zich stapsgewijs verplaatsen, is de keuze voor een cumulatieve golfparameter het meest logisch. De twee gebruikte, cumulatieve parameters (paragraaf 4.3) blijken een aardig beeld te geven van de golfcondities voorafgaand aan de Jarkusopnames.

Voor het bepalen van de bewegingen van de brekerbanken is als focuspunt de kustlangse verplaatsing gekozen. Omdat tijdens de analyse van de bodemkaarten al gauw duidelijk werd dat de 2 kilometer lange structuren en druppels in de bank van jaar tot jaar te vervolgen waren en deze zich in de tijd zichtbaar kustlangs verplaatsten, ging de eerste aandacht hier naar uit. De zeewaartse verplaatsing van de banken was ook wel zichtbaar, maar minder opvallend dan de kustparallele verplaatsingen. Uitgaande van een cyclus van zeewaarts migrerende banken van ongeveer 15 jaar (Wijnberg, 1995) en het vergaan van de banken op ongeveer 700 meter uit de kust, verplaatsen de banken zich gemiddeld met circa 50 meter per jaar. Wijnberg (1995) heeft gekeken naar de netto jaarlijkse zeewaartse verplaatsing van de banken en de relatie met stormen. Zij concludeerde dat het exacte aantal stormen minder belangrijk is voor de duur van de cyclus dan het feit dat een aantal stormen elk jaar plaats vindt. In kustparallele richting zijn de verplaatsingen veel groter, tussen 0 en 900 meter per jaar, en dus duidelijker zichtbaar. Ook zijn de druppels op de banken handige referentiepunten voor de kustlangse verplaatsingen. Met het oog op het tijdsbestek van dit onderzoek is ervoor gekozen om alleen de kustparallele verplaatsingen te bepalen. Aan het bepalen van de verplaatsingen zit nog een aantal haken en ogen. Door bij de gemeten verplaatsing alleen naar de top van de druppel te kijken, worden belangrijke aanwijzingen als de vorm van de druppel genegeerd. De geschatte verplaatsing hield daar wel rekening mee, maar dit is een subjectieve, minder wetenschappelijke methode. De ideale methode zal een kruising zijn tussen de twee gebruikte methoden. Waarbij een maat voor de vorm en ligging van de druppel toegevoegd zal moeten worden aan de objectieve methode van de gemeten verplaatsingen. Ook de kustdwarse



ligging van de druppels is bij beide methoden buiten beschouwing gelaten. Er werd geen onderscheid gemaakt in druppels die in de binnenste of buitenste bank aanwezig waren. Daarmee is dus ook de diepte van de druppels en de afstand tot de kust niet meegenomen. Dit laatste is wellicht belangrijk bij de relatie die gevonden is tussen de hoge golven uit de verschillende richtingen en de kustparallele verplaatsing van de druppels. Deze relatie zou waarschijnlijk geoptimaliseerd kunnen worden als rekening gehouden zou worden met de diepte van de druppels. Voor hoger in het kustprofiel gelegen druppels zullen namelijk minder hoge golven nodig zijn om verplaatsingen teweeg te brengen. Terwijl voor dieper gelegen druppels hogere golven nodig zijn om deze te verplaatsen. Door de definitie van hoge golven afhankelijk te stellen van de ligging van de bank zou de relatie tussen golven en verplaatsingen waarschijnlijk verbeterd kunnen worden. Verder zullen andere invloeden (getij?) dan alleen de golfgegevens ook van toepassing zijn op de verplaatsingen van de banken (en druppels).

De druppels blijken een belangrijke factor als het gaat om de bescherming van de kust door de extra golfbreking die door de hogere ligging gecreëerd wordt. Al eerder werd door Boer (2000), voor een stuk strand met een strekking van ongeveer 600 meter, een relatie gevonden tussen de binnenbank en de strandbreedte. Stive et al. (2002) schrijven kustnabije banken een belangrijke rol toe in de kustlijnontwikkelingen op de schaal van decennia. Aangezien de druppels aan bredere stranden zijn gekoppeld en deze laatste met de verplaatsingen van de druppels meebewegen, zou de koppeling gemaakt kunnen worden tussen de verplaatsingen van de druppels en de verplaatsingen van de zandgolven die onder andere door Verhagen (1988) en Ruessink en Jeuken (2002) beschreven werden.

Het is niet duidelijk of het verschil tussen de ontwikkelingen van de onderwatersuppleties bij Egmond en Bergen komt door het verschil dat al bij de aanleg ontstond, of door de verschillende omstandigheden in de eerste winter na de suppletie. Het feit dat de bank waartegen de suppletie werd aangelegd bij Egmond landwaarts werd gedrukt, terwijl dit bij Bergen niet het geval was, heeft waarschijnlijk te maken met het verschil in aanleg. In kustdwarse richting is de suppletie bij Bergen ongeveer 375 meter breed, die bij Egmond (en Camperduin) is ongeveer 260 meter breed. De natuurlijke afstand van de binnenste tot de buitenste bank bedraagt ongeveer 300-350 meter. Omdat de suppletie bij Bergen breder is dan de natuurlijke afstand, is het waarschijnlijk niet meer nodig om de bank waartegen deze is aangelegd te verplaatsen. Bij Egmond (en Camperduin) is de suppletie smaller dan de natuurlijke afstand en dat zorgt er vermoedelijk voor dat de bank richting land wordt gedrukt. Het volume zand dat gestort wordt, is van minder groot belang dan de breedte waarover het zand verspreid wordt. Qua volume komen de onderwatersuppleties bij Bergen en Camperduin namelijk ongeveer overeen.

De kromming van de bank, die na de eerste winter in het suppletievak bij Bergen is geschoven, is waarschijnlijk het gevolg van de golfcondities. Bij andere golfcondities, dominantie uit het noorden in plaats van uit het zuiden, zou de reactie in het eerste jaar na de suppletie anders zijn geweest (vergelijk bijvoorbeeld de opnames van maart en november 2001 in figuur 5.12).

Golfrichting lijkt niet alleen een belangrijke parameter te zijn voor de kustparallele verplaatsingen, maar ook voor de vorm van de banken. Dat de bank anders reageert op stormen uit het noorden dan uit het zuiden is opmerkelijk te noemen. In de literatuur (bijv. Enckevort en Ruessink, 2003b)

wordt namelijk vaak beweerd dat banken recht trekken en zeewaarts verplaatsen na een storm. Er is geen echte sluitende verklaring te vinden voor het verschil in invloed van een noordelijke en een zuidelijke storm. Mogelijk dat de langere golfperiode van golven uit noordelijke richtingen een andere invloed uitoefenen op de banken dan de golven uit het zuiden die korter zijn qua periode. Dat het verschil alleen echt wordt gezien na de aanleg van de onderwatersuppleties geeft te denken dat ook deze enige invloed hebben gehad op de ontwikkelingen van het kustsysteem. Echter, door extra monitoringsopnames en de argusbeelden, die na de aanleg beschikbaar zijn, is het mogelijk geworden om op kortere termijn de invloed van stormen te bepalen. Vermoedelijk was het verschil tussen noordelijke en zuidelijke stormen ook al in het autonome systeem aanwezig. Daarvoor zal in meer detail naar de golfgegevens gekeken moeten worden.

## 7. Conclusies

---

Het is gelukt om het autonome kuststelsysteem bij Egmond en Bergen beter te begrijpen. Daarbij is het belangrijk om op een grotere schaal te kijken om goed overzicht te kunnen houden over de problemen die er spelen en waaraan deze gerelateerd zouden kunnen zijn. Zo is het onmogelijk om de invloed van de onderwatersuppleties te bepalen zonder het gebied ten noorden en zuiden van de suppleties daarbij mee te nemen.

Over het algemeen kunnen de jaarlijkse ontwikkelingen goed verklaard worden. De brekerbanken voor de kust van Egmond en Bergen bestaan uit structuren van ongeveer 2 kilometer. Een belangrijk fenomeen zijn de druppels op de brekerbanken op de aanknooppunten van de 2 kilometer structuren. Deze lijken een belangrijke rol te spelen in de bescherming van de kust, aangezien deze door de hogere ligging op de bank meer golven breken dan de lager gelegen, omliggende delen van de bank. Door het breken van de golven blijft minder energie over om het strand te eroderen. Van jaar tot jaar zijn de structuren en druppels goed te vervolgen en ze verschuiven zeewaarts en kustparallel. Dit geeft aan dat ook op langere termijn het bankensysteem zich 3-dimensionaal gedraagt. Deze kustparallele verplaatsingen kunnen gekoppeld worden aan de voorafgaande golfcondities. Er blijkt een relatie te bestaan tussen de golfcondities en de verplaatsingen. Waarbij hoge golven uit het noorden de druppels richting het zuiden verplaatsen en hoge golven uit het zuiden de druppels naar het noorden verplaatsen.

De kustparallele verplaatsingen zijn de resultante van het cumulatieve effect van verschillende stormcondities uit verschillende richtingen, meer dan het gevolg van een aantal extreme stormen op zich.

Wat in de kustzone bij Egmond en Bergen ook opvalt, is dat de brekerbank in het autonome systeem scheef georiënteerd is. In het zuiden loopt de ontwikkeling van de bank voor op de ontwikkeling in het noorden. Waardoor de bank in het zuiden over het algemeen verder zeewaarts ligt. Door dit verschil in ontwikkeling ontstaat er af en toe een (tijdelijke) verbinding (bar-switch) tussen banken van een verschillende generatie.

Als puur naar de doelstelling (het op niveau houden van het MKL-volume) van de onderwatersuppletie gekeken wordt, werken beide goed. Bij Egmond waren er in het begin problemen bij de zuidhelft van de suppletie. Over de gehele suppletie is het MKL-volume gestegen. Bij Bergen is het MKL-volume eveneens gestegen na aanleg van de onderwatersuppletie. Dankzij de onderwatersuppleties zijn er nu vier jaar zonder suppleties verstreken in tegenstelling tot de twee jaar die noodzakelijk was bij het uitvoeren van strandsuppleties.

Het kuststelsysteem reageert anders op de onderwatersuppletie bij Egmond dan op die bij Bergen. Bij Egmond wordt de bank waartegen de suppletie is aangelegd richting de kust gedrukt. Terwijl bij Bergen deze bank op zijn plek blijft of zelfs richting zee verschuift. Dit verschil in reactie ligt waarschijnlijk in de aanleg. De breedte van de bank lijkt een bepalende factor als het gaat om het landwaarts drukken van de bank. Er valt echter niet helemaal uit te sluiten dat ook de verschillende golfcondities invloed hebben gehad op het verschil in ontwikkelingen bij beide onderwatersuppleties. Dat de banken echter beïnvloed worden door de suppletie is duidelijk. De oriëntatie van de bank is na de aanleg veranderd. Na de aanleg van de suppleties ligt de bank in het noorden het meest zeewaarts en in het zuiden het meest landwaarts.



Terwijl dit vóór 1999 andersom was. Dit leidt tot een bar-switch in maart 2001. Deze speelt bij de onderwatersuppletie van Egmond een belangrijke rol. De bar-switch zorgt er namelijk voor dat er weer een hele bank voor de kust van Egmond ligt. Hierdoor werd de breuk in de bank, die ontstond na de aanleg van de onderwatersuppletie en tot een noodsuppletie leidde, gecompenseerd.

Golfrichting speelt niet alleen een rol in de kustparallele verplaatsingen. In ieder geval na de onderwatersuppleties is de vorm van de banken afhankelijk van de richting van de voorafgaande stormen. Stormen uit het zuidelijke segment geven de banken een krom karakter. Stormen uit het noordelijke segment zorgen voor rechte banken. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het verschil in golfperiode. Golven uit het noorden hebben over het algemeen een langere golfperiode dan golven uit het zuiden.

## 8. Literatuur

- Augustijn, B., H. Daan, B. van Mourik, D. Messerschmidt, B. Zwart, 1990, Stormenkalender: chronologisch overzicht van alle stormen (windkracht 8 en hoger) langs de Nederlandse kust voor het tijdvak 1964-1990, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), De Bilt, pp. 138
- Boer, A. de, 2000, Beach volume changes on a meso-tidal sandy coast, *In: Proceedings of 27<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE: New York, 3076-3087
- Dronkers, J., 2003, Chapter 1 Wave-topography interaction, RIKZ, Den Haag, *in Press*
- Enkevort, I.M.J. van, B.G. Ruessink, 2003a, Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: alongshore uniform variability, *Continental Shelf Research*, 23, 501-512
- Enkevort, I.M.J. van, B.G. Ruessink, 2003b, Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: alongshore non-uniform variability, *Continental Shelf Research*, 23, 513-532
- Gallagher, E.L., S. Elgar, R.T. Guza, 1998, Observations of sand bar evolution on a natural beach, *Journal of Geophysical Research*, 103, 3203-3215
- Guillén, J., M.J.F. Stive, M. Capobianco, 1999, Shoreline evolution of the Holland coast on a decadal scale, *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 517-536
- Hallermeier, R.J., 1981, A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, *Journal of Coastal Engineering*, 4, 253-277
- Hoekstra, P., K.T. Houwman, A. Kroon, P. van Vessem, B.G. Ruessink, 1994, The NOURTEC experiment of Terschelling: process-oriented monitoring of a shoreface nourishment (1993-1996), *Proceedings of Coastal Dynamics '94*, ASCE, New York, 402-416
- Longuet-Higgins, M.S., 1953, Mass transport in water waves, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A245, 535-581
- Molen, J. van der, 2002, The influence of tides, wind and waves on the net sand transport in the North Sea, *Continental Shelf Research*, 22, 2739-2762
- Plant, N.G., R.A. Holman, M.H. Freilich, W.A. Birkemeier, 1999, A simple model for interannual sandbar behavior, *Journal of Geophysical Research*, 104, 15755 – 15776
- Rijn, L.C. van, 1997, Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland, *Coastal Engineering*, 32, 61-90
- Rijn, L.C. van, B.G. Ruessink, J. Mulder, 2002, The behaviour of a straight sandy coast on the time scale of storms and seasons, COAST3D – EGMOND, EC MAST Project No. MAS3-CT97-0086, ISBN 90 – 800356-5-3, Aqua Publications, The Netherlands
- Roskam, A.P., 1988, Golfklimaten voor de Nederlandse kust, Rijkswaterstaat, Rep., GWAO-88.046, pp. 21
- Ruessink, B.G., I.M.J. van Enkevort, K.S. Kingston, M.A. Davidson, 2000, Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour, *Marine Geology*, 169, 161-183
- Ruessink, B.G., M.C.J.L. Jeuken, 2002, Dunefoot dynamics along the Dutch coast, *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1043-1056
- Sallenger, A.H., R.A. Holman, W.A. Birkemeier, 1985, Storm induced response of a nearshore bar system, *Marine Geology*, 64, 237-257
- Shand, R.D., D.G. Bailey, M.J. Shepherd, 2001, Longshore realignment of

- shore-parallel sand-bars at Wanganui, New Zealand, *Marine Geology*, 179, 147-161
- Spanhoff, R., E.J. Biegel, M. Burger, D.W. Dunsbergen, 2003, Shoreface nourishments in The Netherlands, *In: Coastal Sediments '03*, pp. 14
- Spanhoff, R., E.J. Biegel, J. van der Graaff, P. Hoekstra, 1997, Shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands: Feeder berm or breaker berm?, *Coastal Dynamics '97*, 863-872
- Stive, M.J.F., S.G.J. Aarninkhof, L. Hamm, H. Hanson, M. Larson, K.M. Wijnberg, R.J. Nicholls, M. Capobianco, 2002, Variability of shore and shoreline evolution, *Coastal Engineering*, 47, 211-235
- Stive, M.J.F., H.J. de Vriend, 1995, Modelling shoreface profile evolution, *Marine Geology*, 126, 235-248
- Swart, J.L., 2002, Morfologische onderwater dynamiek van een vooroeversuppletie voor de kust van Callantsoog, Universiteit van Amsterdam, Afdeling Aardwetenschappen, pp. 36
- Thomalla, F., C.E. Vincent, 2003, Beach response to shore-parallel breakwaters at Sea Palling, Norfolk, UK, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 203-212
- Verhagen, H.J., 1988, Zandgolven en strandhoofden, *OTAR*, 5, 162-168
- Voulgaris, G., M.B. Collins, 2000, Sediment resuspension on beaches: response to breaking waves, *Marine Geology*, 167, 167-187
- Wijnberg, K.M., 1995, Morphological behaviour of a Barred Coast over a Period of Decades, Proefschrift Universiteit Utrecht, Faculteit der Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht, ISBN 90-6266-125-4, pp. 245
- Wijnberg, K.M., 2002, Environmental controls on decadal morphologic behaviour of the Holland coast, *Marine Geology*, 189, 227-247
- Wijnberg, K.M., S.G.J. Aarninkhof, 2003, Monthly evolution of a nourished beach, WL I Delft Hydraulics: project Z3290, Research cluster Data Model Integration, pp. 49
- Wijnberg, K.M., A. Kroon, 2002, Barred beaches, *Geomorphology*, 48, 103-120







