



Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland

Onderzoek naar de bijdrage van kustbeheer op de kustveiligheid

Alterra-rapport 2152
ISSN 1566-7197

B. de Jong, P.A. Slim, M. Riksen en J. Krol

Ontwikkeling van de zeereep
onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van IPOP Kust en Zee (KB-01-011), Zachte Kustverdediging
Projectcode KB-01-011-012

Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland

Onderzoek naar de bijdrage van kustbeheer op de kustveiligheid

B. de Jong¹, P. A. Slim², M. Riksen¹ en J. Krol³

1 Land Degradation & Development Group, Wageningen UR

2 Alterra, Wageningen UR

3 Natuurcentrum Ameland

Alterra-rapport 2152

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2011



Referaat

De Jong, B., P.A. Slim, M. Riksen en J. Krol, 2011. *Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland; onderzoek naar de bijdrage van duinbeheer op de kustveiligheid*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2152. 78 blz.; 65 fig.; 10 tab.; 35 ref.

Dynamisch kustbeheer is na 1990 (1^e Kustnota) ingevoerd als meer natuurlijk alternatief voor regulier kustbeheer. In deze studie is de ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland onderzocht. Het onderzochte kustvak heeft tussen 1995 en 1999 gediend voor een experiment met het invoeren van dynamisch kustbeheer. Met behulp van hoogtebestanden (JARKUS en laseraltimetriedata) is de ontwikkeling van het volume van de zeereep geanalyseerd. Hoogwatergebeurtenissen zijn bekeken om hun invloed op de ontwikkeling van de zeereep te bepalen. Tenslotte is ook de ontwikkeling van vegetatiebedekking onderzocht door luchtfoto's van 2003 en 2009 te analyseren en met elkaar te vergelijken.

Trefwoorden: Dynamisch kustbeheer, kustveiligheid, zeereep, Ameland, JARKUS, laseraltimetrie, luchtfoto's, duinen, helm, kustverdediging, stormen

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2011 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2152

Wageningen, maart 2011

Inhoud

Voorwoord	7
Summary	9
1 Inleiding	11
1.1 Achtergrond	11
1.1.1 Historie kustbeheer	11
1.1.2 Dynamisch kustbeheer	12
1.2 Onderzoekkader	13
1.3 Leeswijzer	14
2 Theoretisch Kader Duinontwikkeling	15
3 Casestudie Zeereep Oost-Ameland	23
3.1 Materiaal en methoden	23
3.2 Resultaten	35
3.2.1 Hoogtebestanden (JARKUS-data)	35
3.2.1 Laseraltimetrie	54
3.2.2 Hoogwater	62
3.2.3 Luchtfotoanalyse	63
4 Discussie	73
5 Conclusies en aanbevelingen	75
Literatuur	77

Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd voor de studie Internationaal Land & Water Management tijdens een stage bij Alterra, onderdeel van Wageningen UR, in het kader van het project 'Zachte kustverdediging'. Dit onderzoek vond plaats in samenwerking met Natuurcentrum Ameland en Rijkswaterstaat. Tijdens dit onderzoek is de ontwikkeling van de zeereep op Oost-Ameland onderzocht, om de invloed van het duinbeheer en andere factoren na te gaan. Het onderzochte deel van de zeereep kan dienen als referentiegebied voor andere delen van de Nederlandse kust.

Voor dit onderzoek is dank verschuldigd aan verscheidene instanties en personen die het onderzoek hebben ondersteund. Dank voor de logistieke steun en input van Natuurcentrum Ameland, en voor de toestemming van Richard Kiewiet (Ameland) van gebiedsbeheerder It Fryske Gea om in het onderzoekgebied te mogen werken. Dank ook voor de ondersteuning en informatie van Tonnie Overdiep van Rijkswaterstaat (Ameland). Verder danken wij de Helpdesk Data en Helpdesk Water van Rijkswaterstaat voor het aanleveren van de JARKUS- en laseraltimetriedata, en voor de verdere ondersteuning bij vragen.

Summary

In 1990 the Dutch government accepted the '1^e Kustnota', introducing a new policy for the coastal management. The main feature was the defining of a 'basiskustlijn' (basic coast line) which had to be maintained by sand nourishments. Another feature was the introduction of 'dynamic coastal management'. At suitable locations, regular management can be abandoned and space given to natural processes in the dune areas. At Ameland (one of the barrier islands in the north of The Netherlands) an experiment was conducted to examine the influence of this dynamic management on the beach ridge.

This research investigates the influence of dynamic coastal management on the dune formation at eastern Ameland from 1964 till 2010, and the expectations for future development. For this purpose a case study is conducted in the beach ridge. The development of the dune ridge is investigated using elevation data (both historical transect data and more recent laser altimetry data). Further high water events are analysed, and the development of vegetation cover between 2003 and 2009 using aerial photographs.

Over the years, the dune ridge expands in both height and volume. The development in volume shows a linear trend, which is interrupted at certain moments by a sudden decline. These moments can be connected to high water events, supposing erosion of the dune ridge by storms. Vegetation becomes more dynamic and natural; the variation in soil cover is higher for 2009 than it was for 2003.

Overall this study shows dynamic coastal management leads to a more natural and varied coastal ridge. Sand volumes are higher since the new management was introduced, and the developments in relation to coastal safety are positive. However, no direct relation between the management and sand volumes was found, indicating other processes have more impact in determining the development of the coastal ridge.

The future development of the coastal ridge is unclear, but at the moment all developments direct in a continuing expansion of sand volume. Additional research is recommended to investigate the different processes influencing coastal development.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

1.1.1 Historie kustbeheer

Eeuwenlang is verstuing langs de Nederlandse kust tegengegaan door helm¹ te planten en windschermen van rijshout of riet te plaatsen (Reitsma, 1984). Vanaf 1800 zijn ingrepen uitgevoerd op Ameland om de vorm van het eiland te beïnvloeden (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000), terwijl al vanaf de Middeleeuwen dijken zijn aangelegd op de Waddeneilanden (Löffler, 2008). Vanaf ongeveer 1800 heeft men op Ameland geprobeerd om door middel van het aanleggen van stuifdijken en moldijken² de vorm van het eiland te beïnvloeden. In de jaren 60 van de 20^e eeuw is de laatste stuifdijk aangelegd (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000). In deze periode heeft stabilisatie de overhand gekregen over destabilisatie en zijn veel mobiele duinen gefixeerd. Vanaf de tweede helft van de 19e eeuw zijn mobiele duinen structureel vastgelegd in pogingen om duinen vruchtbaarder te maken, en vanaf de tweede helft van de 20e eeuw is een extreem intensief vastleggings-beheer gehandhaafd door middel van helmaanplant en het verwerken van organisch materiaal in nieuwe stuifkuilen (Arens, 2009).

Zo plaatste Rijkswaterstaat in de jaren 80 van de vorige eeuw meer dan 35 km windscherm per jaar op Ameland, en plantte men per jaar meer dan een miljoen helmplanten (figuur 1, links). Kale zandplekken in het duin werden namelijk als alarmerend gezien en moesten onmiddellijk met takken of ander plantaardig materiaal worden bedekt. Soms werd hiervoor op Ameland zelfs stalmeest gebruikt. Op verschillende plaatsen werd het duin met bulldozers landinwaarts geschoven om zandverlies aan de zee te verminderen (Nikkels, 2010).

Km 20.2 naar west jul. 1995



km 20.2 naar west jan. 2006



Figuur 1

Opnamen zeereep bij raai 20.2 in juli 1995 en januari 2006 (foto's J. Krol, 2006).

1 Helm (*Ammophila arenaria*); in het 'kielzog' daarvan werd ook wel noordse helm (x *Calamophila baltica*) en zandhaver (*Leymus arenarius*) aangeplant.

2 Bij een moldijk wordt het zand met 'molborden' aangeschoven tot een duinregel.

Door deze maatregelen zijn de duinen op de Waddeneilanden die tot in het begin van de 20e eeuw veelal mobiel waren (met veel verstuiwing, onder andere door intensieve beweiding) met het oog op kustverdediging vastgelegd (Oost en Lammerts, 2007).

Tot 1990 had het onderhoud als doel om een hoge en brede zandbuffer te creëren. Door het planten van helm wordt zand goed vastgelegd en is dit minder gevoelig voor erosie door golven en wind (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

1.1.2 Dynamisch kustbeheer

In de jaren 80 van de 20e eeuw vond er een omslag in het denken over duinbeheer plaats. Het besef kwam op dat stuivend zand nodig is voor het behoud van het kustlandschap. Inmiddels was echter de trend van stabilisatie vergevorderd. Het totale oppervlak kaal zand was afgenomen tot minder dan één procent (Arens, 2009). De duinvalleien verdroogden en veel dynamiek was uit de duinen verdwenen. Door de successie van een pionier- naar een climaxvegetatie verouderde het duinsysteem; een proces dat versterkt werd door een toename van de atmosferische stikstofdepositie in de voorbije decennia (Oost en Lammerts, 2007).

In het Nederlandse kustverdedigingsbeleid dat gericht was op het vasthouden van zand in de zeereep, werd verstuiwing van zand vanuit de zeereep naar het binnenduin gezien als een verlies. Dit zand leverde geen bijdrage meer aan het grensprofiel, en het stuivende zand vormde een bedreiging voor de bewoners. Er was namelijk risico op overstuiving van landbouwgrond of van de bebouwing (Arens en Mulder, 2008).

In 1990 werd de 1^e Kustnota (VWS, 1990) ingevoerd, met nieuw beleid voor het kustbeheer. De voornaamste reden was een aantal stormen aan het einde van de jaren 80. De aanname dat de totale som van erosie en sedimentatie op de Nederlandse kust gelijk is aan nul, bleek onjuist. De Nederlandse kust was op verschillende plaatsen onderhevig aan structurele erosie. Er verdween meer zand door kustafslag dan dat er werd aangevoerd. Hierop werd besloten tot het vaststellen van de Basiskustlijn (BKL), die op zijn plaats moet worden gehouden met zandsuppleties. Verlies van duingebieden werd niet langer geaccepteerd. Verdere redenen voor de invoer van dynamisch kustbeheer waren een afname van de onderhoudskosten en een einde aan het verlies van natuurgebieden (Nikkels, 2010).

De definitie voor 'dynamisch kustbeheer' die in dit onderzoek wordt gebruikt, is "het zodanig beheren van de kust dat natuurlijke processen, al dan niet gestimuleerd, zoveel mogelijk ongestoord kunnen verlopen, waarbij de processen zodanig worden beheerd dat de veiligheid van het achterliggende gebied gewaarborgd blijft" (TAW, 2002). Hieruit kan als doel van dynamisch kustbeheer worden afgeleid om "natuurlijke processen in zeereep en bijbehorende habitats te herstellen, met behoud van veiligheid" (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003). Of zoals geformuleerd in het streefbeeld dynamisch kustbeheer voor de Friese Waddeneilanden: "een duingebied waar natuurlijke processen vrij spel hebben, binnen bepaalde randvoorwaarden" (figuur 1, rechterfoto). Voorbeelden van natuurlijke processen in de zeereep zijn afslag, de vorming van embryonale duinen vóór de duinvoet, de verstuiwing van zand en het (incidenteel) binnenstromen van de zee (Arens et al., 2007).

Omdat in de huidige periode kustafslag de overhand heeft over aangroei zijn zandsuppleties essentieel voor de aanvoer van voldoende zand. Natuurlijk kustherstel is namelijk alleen mogelijk als er voldoende zand aanwezig is. Er zijn echter ook tijden met een overvloed van zand in de kustzone (Slim en Löffler, 2007).

In het algemeen heeft de natuur van de duinenkust baat bij zandsuppleties; het duinareaal neemt daardoor niet meer af, en men krijgt de mogelijkheid om de natuur zijn gang te laten gaan. Zo is in brede duingebieden de noodzaak om een gesloten, zeewerende zeereep in stand te houden afgenomen. Daarom planten de beheerders op veel plaatsen minder helm en laten ze de verstuiwing van zand toe (Slim en Löffler, 2007).

Bij dynamisch kustbeheer is het vastleggen van zand voor de duinvoet als buffer voor slechtere tijden - zoals vroeger gebeurde - niet meer nodig. Door het suppleren wordt structurele erosie aan de zeezijde tegengegaan. Het bij verstuiwing bewegende zand blijft binnen de waterkeringszone behouden, en draagt daardoor bij aan de waterkeringsfunctie (Arens et al., 2007; Slim en Löffler, 2007).

In een groot aantal gebieden waar dynamisch duinbeheer is toegepast, is er sprake van een herstel van de natuurlijke dynamiek van de duinen. De zeereep is natuurlijker geworden, de helmaanplant is gestopt en de aanwezige helm is vitaler geworden. In 2000 heeft het ministerie van Verkeer en Waterstaat in de '3^e Kustnota' besloten dat het beleid van dynamisch handhaven in de toekomst wordt voortgezet. Vanaf 2001 zouden de zandverliezen in dieper water worden gecompenseerd, en het dynamisch beheer van de duinen verder worden uitgebreid (VWS, 2000).

1.2 Onderzoekkader

Over de effecten van het dynamisch kustbeheer en ook van de in 1990 ingevoerde '1^e Kustnota' met daaruit voortkomende zandsuppleties op de processen in de zeereep is nog veel onbekend. Vooral over de relatie tussen de dode en levende natuur in de zeereep (zoals hoe helm en zandinvang elkaar beïnvloeden) en de gebeurtenissen voor en achter het duin (die niet door Rijkswaterstaat worden gemonitord) is weinig bekend. Verder dient de invloed van het dynamisch kustbeheer en de zandsuppleties op de opbouw van de duinen beter te worden onderzocht. En uiteindelijk wat de invloed van deze vormen van beheer is op de kustveiligheid van Nederland. Om een beter beeld te krijgen van deze processen en hun effecten is in het onderhavige onderzoek nagegaan hoe een deel van de zeereep van de Noordzeekust van Oost-Ameland zich heeft ontwikkeld onder zowel regulier als dynamisch kustbeheer, terwijl er ook zandsuppleties zijn uitgevoerd. Figuur 2 toont twee luchtfoto's met de onderzochte zeereep in 1993 respectievelijk 2007.



Figuur 2

Zeereep op Oost-Ameland in de jaren 1993 en 2007 (VWS, 2008).

Het onderzoekdoel is om inzicht te krijgen in de invloed van de wijze van beheer op duinvorming (qua vorm en zandbudget). Om dit doel te bereiken is een antwoord gezocht op de volgende onderzoeksvraag: "Wat is het effect van dynamisch kustbeheer op duinvorming in de zeereep (op Oost-Ameland) tot nu toe en wat zijn de verwachtingen voor duinontwikkeling in de komende decennia?"

Deze hoofdvraag is onderverdeeld in vijf afzonderlijke deelvragen, te weten:

1. Welke informatie kan er in de beschikbare literatuur worden gevonden over de effecten van dynamisch kustbeheer op duinvorming in de zeereep?
2. Hoe heeft het duin zich gedragen voor het invoeren van dynamisch kustbeheer (qua vorm en zandbudget)?
3. Wat is het effect van het invoeren van dynamisch kustbeheer op duinvorming?
4. Welke effecten van dynamisch kustbeheer zijn er af te leiden van beschikbare luchtfoto's (bijvoorbeeld in oppervlakten helm en kale plekken)?
5. Hoe zal de zeereep zich verder ontwikkelen met het continueren van het huidige (dynamische) kustbeheer?

1.3 Leeswijzer

Om deze vragen te beantwoorden wordt in hoofdstuk 2 een theoretisch kader gegeven van duinontwikkeling en dynamisch kustbeheer. In hoofdstuk 3 wordt eerst het studiegebied beschreven, met een bijzondere focus op de twee vergeleken kustvakken. Vervolgens worden het onderzoek en resultaten besproken voor de casestudie op Oost-Ameland. Dit onderzoek bestaat uit analyses van de hoogtebestanden (JARKUS), laseraltimetrie, hoogwatergebeurtenissen en van de ontwikkeling van het gebied met behulp van luchtfoto's. In de hoofdstuk 4 worden de resultaten besproken. Ten slotte worden in het hoofdstuk Conclusie en aanbevelingen de hoofd- en deelvragen beantwoord, en suggesties gedaan voor verder onderzoek (hoofdstuk 5).

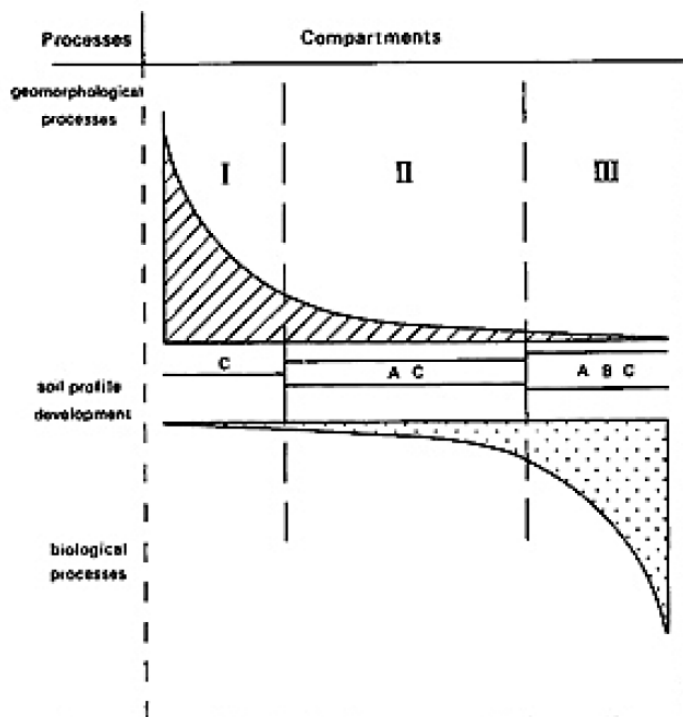
2 Theoretisch Kader Duinontwikkeling

In dit hoofdstuk wordt ter inleiding op de volgende hoofdstukken een theoretisch kader over duinontwikkeling gegeven. Aan de hand van literatuur worden relevante processen en begrippen behandeld, om een kader te creëren waar vanuit dit rapport gelezen kan worden. De beschreven onderwerpen zijn 'geomorfologische processen', 'verstuiving, duinvorming en mobiliteit', 'invloed grootschalig kustbeheer', 'dynamisch handhaven kustlijn' en 'kustveiligheid'.

Geomorfologische processen

In de zeereep zijn er sturende processen op macroschaal te onderscheiden. Los van menselijke invloed zijn er afwisselende fasen van stabiliteit en mobiliteit in het duingebied. Dit heeft een samenhang met klimaatverandering, maar vooral ook met een verandering in sedimentaanbod. In veel duingebieden in de wereld zijn er pulsen van sedimentaanvoer die zorgen voor een hernieuwde mobiliteit (Arens, 2009).

Bakker et al. (1981) beschrijven een hiërarchie in geomorfologische processen. In een dynamisch kustlandschap is de geomorfologie sturend voor de ecologie, en is er een duidelijke terugkoppeling tussen ecologie en geomorfologie. Dit model is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3

Weergave conceptueel model van fysieke en ecologische processen die gezamenlijk de habitattypen vormen (Arens, 2009).

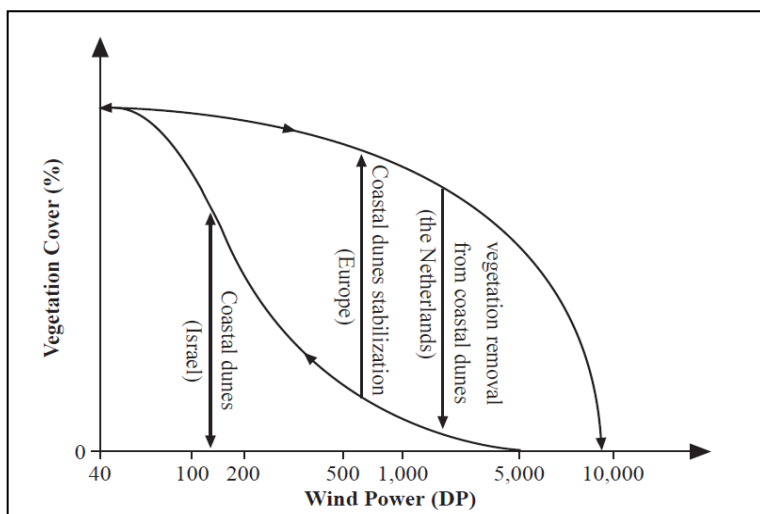
Bodemvorming is een maat voor de progressie van successie. In de nulsituatie zijn er alleen geomorfologische processen actief, en vestigen er zich alleen pioniersoorten zoals biestarwegras (*Elytrigia juncea*) en helm. Naarmate de successie vordert, remmen biologische processen de geomorfologische processen af,

bijvoorbeeld in de 'grijze duinen' waarin zich een humeuze A-horizon ontwikkelt. Tenslotte is de bodem geheel door vegetatie bedekt en zijn de geomorfologische processen uitgespeeld (Bakker et al., 1981).

Mobiele duinen zijn zelfversterkende mechanismen, hetgeen betekent dat een groot mobiel duin zichzelf in beweging houdt. De aanwezigheid van het duin vergroot de lokale windsnelheid waardoor een groter zandtransport wordt gegenereerd (Arens, 2009). Tegen de hellingen van een duin of in gaten tussen duinen versnelt de wind. Verder vangen hogere duinen meer wind, waardoor op de top en de bovenkant van de helling de windsnelheid hoger is. Bij een gelijke windsnelheid, heeft een hoger duin een grotere transportcapaciteit (Arens, 2007). Dit heeft een negatieve invloed op de omringende vegetatie, en door een afname in vegetatie kan de mobiliteit in het duingebied in de loop van de tijd steeds groter worden (Arens, 2009).

Omgekeerd kan door wijzigende omstandigheden een mobiel duin ook tot stilstand komen, en dit proces van stabilisatie - dat ook zelfversterkend is - kan doorslaan naar een volledig begroeid duingebied. Zonder verstoringende mechanismen is het zelfs zo dat in gematigde vochtige klimaten het vastleggen van kaal zandoppervlak door begroeiing een natuurlijk gegeven is. De fixatie van landschapsvormende processen leidt tot de veroudering van landschap en ecosystemen. Gebieden worden homogener, gradiënten vervlakken en de biodiversiteit neemt af (Arens, 2009).

In figuur 4 is weergegeven hoe de verhouding tussen windkracht en vegetatiebedekking verloopt, en wat de invloed hiervan is op de stabilisatie van duinen. Duidelijk blijkt het hysteresis-effect; er is meer energie nodig om een begroeid duin in beweging te krijgen dan een kaal duin. De bovenste lijn geeft de situatie weer voor een stabiel duin, de onderste voor een mobiel duin. De pijlen geven een overgang van mobiel naar stabiel - of andersom - weer. Deze veranderingen treden op door ingrepen of veranderende condities, of door extreem hoge windkracht (Arens et al., 2007).



Figuur 4

Hysteresis curve met mobiliteit gerelateerd aan verandering in vegetatiebedekking en windenergie (Tsoar, 2005).

Deze twee situaties - een mobiel duin met kaal zandoppervlak en een gestabiliseerd mobiel duingebied - kunnen als twee 'alternative stable states' worden gezien. Beide situaties houden zichzelf door positieve feedback mechanismen in stand, maar kunnen bij een verandering in omstandigheden doorschieten naar een andere staat (Adema et al., 2002; Adema et al., 2005; Arens, 2007; Arens, 2009).

Verstuiving, duinvorming en mobiliteit

Verstuiving is een complex samenspel van meteorologische, fysische, hydrologisch en biologische variabelen. Hierbij is de interactie tussen en de onderlinge afhankelijkheid van de variabelen bepalend voor de duinvorming.

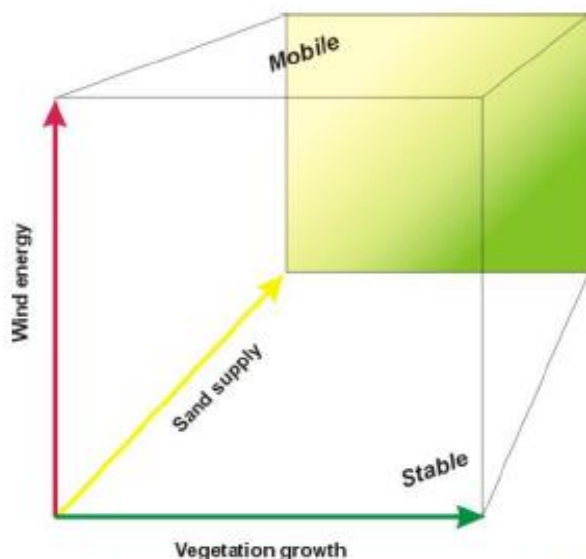
De relatie tussen zandtransport en windsnelheid kan beschreven worden met de volgende formule:

$$q = C * (U - U_t)^3$$

waarbij q is zandtransport, C is een constante, U is windsnelheid en U_t is kritische windsnelheid (Arens, 2007).

Vegetatie (helm) kan slechts verdrongen worden door overstuiving bij enorme zandhoeveelheden (depositie van minimaal een meter per jaar), die langere tijd aanhouden. In eerste instantie vindt hierbij overstuiving langs de randen plaats. In kustduinen wordt depositie vrijwel altijd voor het grootste deel bepaald door de aanwezige begroeiing (naast een aantal andere variabelen). Op het strand kunnen (sikkel)duinen voorkomen die zonder interactie met begroeiing (dus geheel fysisch) zijn ontstaan, maar deze worden bij stormvloed weer weggespoeld en zijn niet permanent (Arens, 2007).

De factoren die invloed hebben op - of eigenlijk de drijvende krachten zijn achter - duinmobiliteit zijn onder te verdelen in drie groepen. Ten eerste de beschikbaarheid van zand, ten tweede de hoeveelheid windenergie en tenslotte de aanwezige vegetatie (in de duinen). De relatie van deze drijvende krachten tot de staat van het duin is weergegeven in figuur 5 (Arens, 2007).



Figuur 5

Staat van het duingebied in relatie tot activiteit van de drijvende krachten (Arens, 2007).

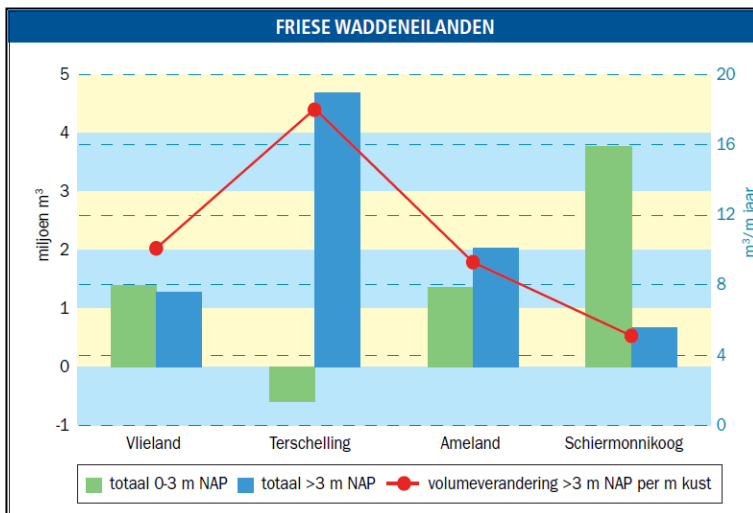
Invloed grootschalig kustbeheer

Grootschalig kustbeheer zoals toegepast op de Nederlandse kust kan een aantal effecten hebben. Door (een overmaat aan) suppleren is het karakter van een groot deel van de kust overgegaan van een erosieve of een stabiele kust naar een aangroei-kust. Suppleren geeft aanleiding tot vorming op grote schaal van embryonale duinen. Maar de ontwikkeling van deze 'milde' dynamiek leidt tot het einde van de dynamiek door duurzame verstuivingen. De winterstormen hebben hierdoor namelijk geen toegang meer tot de eigenlijke zeereep. Op

plekken waar niet door afslag vanzelf enige schade ontstaat, kan deze verstarring alleen doorbroken worden door actief ingrijpen (Arens, 2007). Hierbij moet bepaald worden wat een wenselijke situatie is, en vervolgens kan er juist wel of niet in het systeem worden ingegrepen.

Dynamisch handhaven kustlijn

Sinds het beleid van dynamisch handhaven is langs de verschillende delen van de kust duinvorming tot ontwikkeling gekomen. Op veel plaatsen zijn embryonale duinen gevormd, en soms zijn er zelfs hele nieuwe duinenrijen voor de voormalige zeereep ontstaan. Op andere plaatsen is de zeereep meters opgehoogd. Dit wordt geïllustreerd in figuur 6 (Arens en Mulder, 2008).



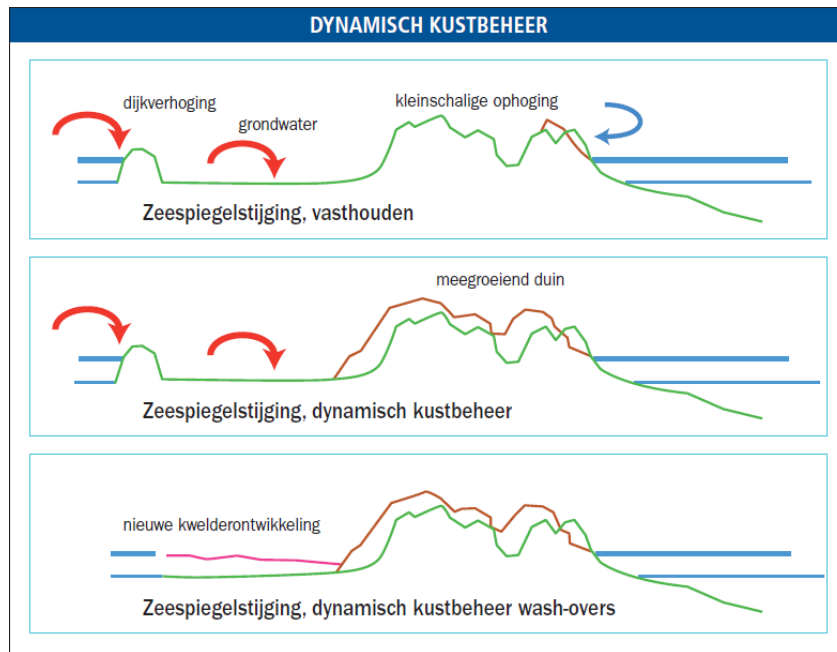
Figuur 6

Netto volumeverandering voor de Friese Waddeneilanden per laag en totaal (Arens en Mulder, 2008).

Voor de veiligheid op de langere termijn is de verstarring van de duinen een probleem. Het huidige beleid is erop gericht het hele actieve kuststelsel te laten meegroeien met de zeespiegel. Dit beleid veronderstelt dat in het gehele kustfundament (vanaf -20 m NAP tot aan de binnenduintrand) de natuurlijke zandtransportprocessen hun werk kunnen doen. Voor de duinen betekent dit dat verstuingen in de zeereep nodig zijn om het zandtransport naar het binnenduin mogelijk te maken en het hele duinmassief mee te laten groeien met de zeespiegel (figuur 7) (Arens en Mulder, 2008).

De achteruitgang van de kustlijn wordt tot staan gebracht, maar wel op zo'n manier dat de dynamiek van de kust zoveel mogelijk ruimte krijgt. Deze dynamiek bestaat uit de invloed van water en wind op de zandbodem. Er is een fundament gedefinieerd, dat gehandhaafd moet worden, bij voorkeur in de vorm van zandsuppleties (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

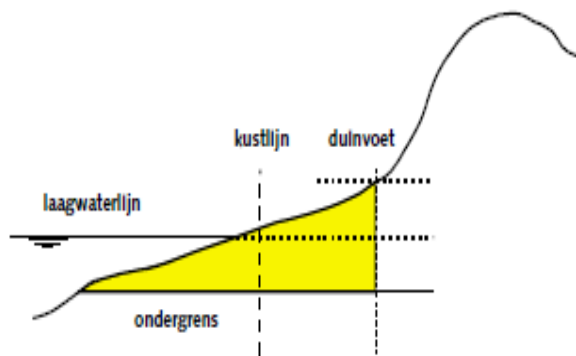
In de Nota Ruimte (VROM, 2006 in Slim en Löffler, 2007) is dit begrip (kustfundament) geïntroduceerd. Dit kustfundament vervult een belangrijke rol in de waterkering, maar draagt ook de natuur- en recreatiefunctie van duingebieden en kustplaatsen. De waarborging van een dynamisch zandig kuststelsel als drager van alle functies staat echter voorop. De prioriteit ligt op het behoud en de ontwikkeling van veerkracht en natuurlijke dynamiek. Het streven is om de bestaande zandvoorraden in de kustzone en het dynamisch karakter daarvan te waarborgen, en om de morfologische processen binnen het kuststelsel zoveel mogelijk ongemoeid te laten. Het uitgangspunt van het beheer is: 'zand als ordenend principe'. Daarom worden ontwikkelingen die de natuurlijke dynamiek van het kustfundament versterken ondersteund (Slim en Löffler, 2007).



Figuur 7

Verskillende scenario's voor kustbeheer bij zeespiegelstijging (Arens en Mulder, 2008).

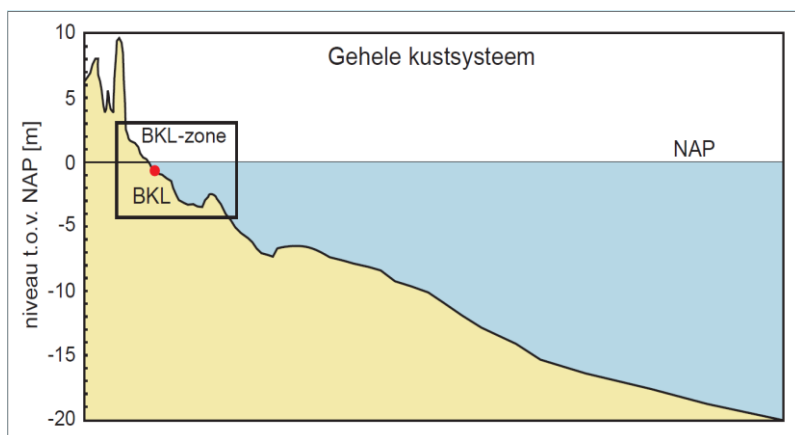
De basiskustlijn (BKL) is de kustlijn die conform het beleid 'dynamisch handhaven' gehandhaafd moet worden. Deze BKL komt ongeveer overeen met de gemiddelde laagwaterlijn in 1990 (figuur 8) (VWS, 2000). Sinds 1995 is Rijkswaterstaat in het kader van 'dynamisch kustbeheer' flexibeler geworden met het handhaven van de BKL. Als er geen belangrijk maatschappelijk risico is, wordt er niet standaard gesuppleerd bij elke overschrijding van de basiskustlijn (BKL). Een onmiddellijke suppletie bij elke overschrijding onderdrukt de natuurlijke afwisseling tussen erosie en sedimentatie die spontaan plaatsvindt. Deze processen dragen bij aan de ecologische verjonging en een 'natuurlijke' ontwikkeling van de kust. De ervaring na tien jaar dynamisch kustbeheer is dat de kustachteruitgang in grote lijnen onder controle is (Löffler, 2008).



Figuur 8
Basiskustlijn (VWS, 2000).

Bij het handhaven van de kust wordt het kustsysteem op twee niveaus beschouwd:

1. Het kustsysteem als geheel: het gebied tussen ruwweg de lijn van -20 m NAP en de eerste duinenrij
2. De BKL-zone: het gebied tussen ruwweg de lijn van -5 m NAP en de duinvoet (3 m +NAP) (figuur 9)

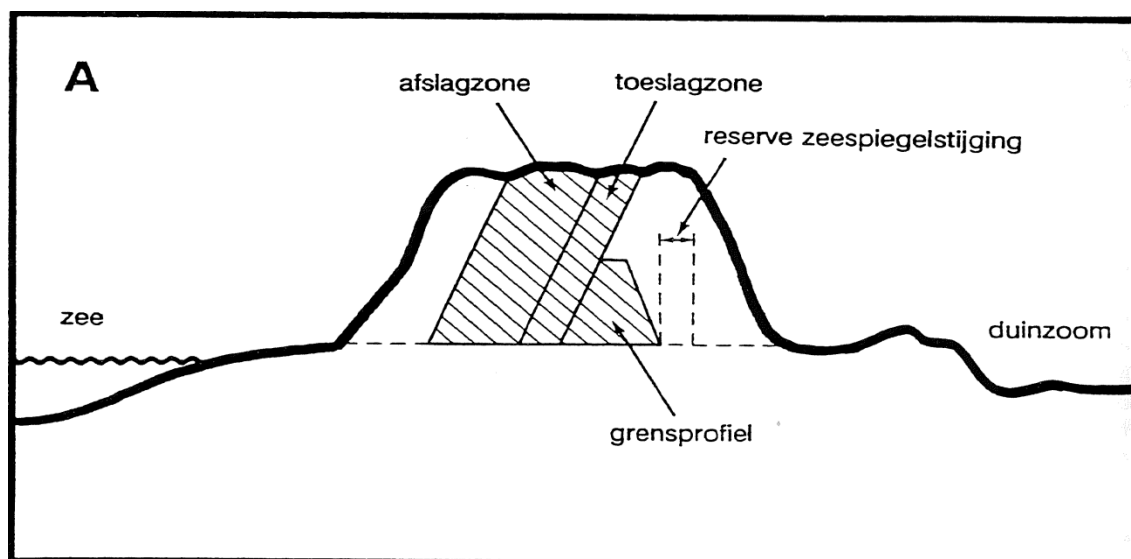


Figuur 9
BKL-zone als onderdeel van het hele kustsysteem (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003).

Jaarlijks wordt de actuele kustlijn getoetst aan de BKL, waarna bepaald wordt waar en hoeveel zand er gesuppleerd moet worden om de kustlijn dynamisch te handhaven.

Vanaf 2001 wordt er extra zand gesuppleerd om de totale zandvoorraad van het kustsysteem op peil te houden. Dit is nodig om ook op de langere termijn het gehele kustsysteem voor achttuitgang te behouden. Hiervoor wordt eens in de vijf jaar de zandbalans geëvalueerd (Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003).

Bij de kustverdediging wordt gerekend met waterstanden van 5 tot 6 m +NAP. Gemiddeld komt het zee-waterniveau weliswaar niet boven de 1 m +NAP, maar bij superstormen kan dit stijgen tot 5 m +NAP. Het minimaal benodigde zandvolume voor de kustverdediging is onderverdeeld in een afslagzone, een toeslagzone en een grensprofiel (figuur 10). Het grensprofiel is de zanddijk die nog over moet blijven na een zeer extreme storm langs de Nederlandse kust. Voor de Waddenzee is deze hoogte 7,5 m. Daarnaast is er in verband met mogelijke zeespiegelstijgingen aan de landzijde nog een extra marge of reserve opgenomen (Janssen en Van Gelderen, 1993).



Figuur 10

Duinprofiel met minimaal zandvolume dat nodig is voor de kustverdediging, bestaande uit een afslagzone, een toeslagzone en een grensprofiel (Janssen en Van Gelderen, 1993).

Kustveiligheid

Vanuit het oogpunt van kustveiligheid is het verplaatsen of doorstuiven van zand van het strand en uit de zeereep in meer landwaartse richting een positieve ontwikkeling. Het meer naar binnen gelegen zand is minder kwetsbaar voor afslag dan zand aan de duinvoet. Zo blijft het ook op langere termijn bijdragen aan de waterkering, wat ook in het bijzonder van belang is met het oog op toekomstige zeespiegelrijzing (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

In het duin is vanaf de zeezijde van het grensprofiel tot aan het strand ruimte voor natuurlijke dynamiek. Voor de kustveiligheid is namelijk van belang dat er een bepaalde minimumhoeveelheid zand aanwezig is in de afslagzone. De verdeling van dit zand is echter minder belangrijk, waarom vormverandering van het duin geen probleem hoeft te zijn. Een breed en lager duingebied kan minstens zo veilig zijn als een smalle en hoge zeereep (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

Om veiligheidsredenen is een ander beheer van de zeereep mogelijk en zelfs gewenst. In het algemeen zal een meer extensief onderhoud van de zeereep na verloop van tijd leiden tot meer doorstuiving van zand. Dit leidt tot een anders gevormde - meer grillige - zeereep, met vrijwel hetzelfde zandvolume als bij regulier beheer (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

3 Casestudie Zeereep Oost-Ameland

Dit hoofdstuk beschrijft de casestudie die is uitgevoerd op de zeereep van Oost-Ameland. In paragraaf 3.1 worden het onderzoekgebied - met extra nadruk op de gemonitorde kustvakken - en de verschillende analysemethoden besproken. In de andere paragrafen volgt een beschrijving van deze verschillende methoden. Dit zijn analyses van achtereenvolgens de hoogtebestanden (JARKUS-data), laseraltimetrie, hoogwater en luchtfoto's. En tenslotte volgt nog een korte opmerking over het veldwerk.

3.1 Materiaal en methoden

Onderzoekgebied

Het onderzoekgebied is gelegen op Ameland, één van de Nederlandse Waddeneilanden (figuur 11). De positie van het onderzochte kustvak op Ameland is rood omkaderd.



Figuur 11

Locatie van onderzoekgebied op Ameland (www.maps.google.com).

Wat betreft het vastleggen van de kustlijn geldt dat de Waddeneilanden een statisch geheel vormen in een omgeving die nog wel geheel dynamisch is. Meegroeien met de zee - zoals in het verleden plaatsvond - is bijna onmogelijk geworden (Löffler, 2008).

Volgens Provinciaal Overlegorgaan Kust (2000) is het streefbeeld van de zeereep op Oost-Ameland (tussen strandpaal 17.0 en 23.0) “een zeereep waar natuurlijke processen (door wind en water) vrij spel hebben. Er worden geen initiërende maatregelen genomen om de natuurlijke processen een handje te helpen.”

De BKL wordt (dynamisch) gehandhaafd; bij een structurele overschrijving ervan zal zandsuppletie plaatsvinden. Bij een tijdelijke overschrijding van de BKL kan een dergelijke ingreep achterwege blijven. In het kustvak tussen de Kooioerdstuifdijk en De Hon (figuur 12) spelen geen veiligheidsbelangen (uitgezonderd de gaswinninglocatie van de NAM), maar alleen natuur- en landschapsbelangen. Daarom hoeft de BKL hier om veiligheidsredenen niet strikt te worden gehandhaafd, maar kan dit op een meer flexibele wijze gebeuren (Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000).

Volgens Arens et al. (2010) is het zandbudget op Oost-Ameland licht positief; ca. 5 m³/jaar (gemeten vanaf 1975). Dit betekent dat er voor een duinreep van 1 m breed per jaar gemiddeld 5 m³ aan zand meer wordt aangevoerd dan afgevoerd. Tussen strandpaal 15 en 23 is dit sterk positief, door een opstuivende zeereep.

In het seizoen 2006-2007 was er sprake van afslag veroorzaakt door stormen. Er zijn verscheidene suppleties uitgevoerd; zowel strandsuppleties en duinverzwaringen als vooroeversuppleties (tot strandpaal 21). In totaal is er tussen 1997 en 2006 7,7 miljoen m³ gesuppleerd, waarvan 70% op de vooroever. En in 1980 en 1992 zijn er duinverzwaringen geweest. Uit onderzoek is gebleken dat de verhouding tussen aanzanding ten opzichte van de suppletiehoeveelheid 17% is.

Waar het zandbudget positief is, wordt de zeereep hoger en breder. Dynamisch duinbeheer lijkt niet tot verandering in het patroon van de duinen te leiden (Arens et al., 2010).

Op Ameland is er - na het invoeren van dynamisch handhaven van de kustlijn door zandsuppleties - een geleidelijke afname van het duinonderhoud geweest. Naar het oosten van het eiland toe, vanaf rijksstrandpaal (RSP) 17.0 (Kooioerdstuifdijk) werd het minste onderhoud gedaan, omdat hier vrijwel alleen natuurbelangen in het geding zijn.

In 2002 zijn de geomorfologische ontwikkelingen onder invloed van dynamisch kustbeheer geëvalueerd (Arens et al., 2007). De dynamiek in dit gebied is toegenomen, en dan met name de aanzanding. Dit laatste lijkt echter geen effect van dynamisch zeereepbeheer, maar van een toegenomen zandaanvoer. Wel een effect van dynamisch zeereepbeheer is dat het zand niet meer wordt ingevangen in stuifschermen of aanplant, maar op natuurlijke wijze tegen of over de zeereep wordt afgezet. Ook zijn erosieve vormen als stuifkuilen en kerven toegenomen, en is de morfologie van de zeereep natuurlijker geworden (Arens et al., 2007).

Geconcludeerd wordt dat het stoppen van het onderhoud tussen strandpaal 17 en 23 heeft geleid tot een toename van de dynamiek. Dit is bijvoorbeeld zichtbaar in de vorming van stuifkuilen en de doorstuiving van zand. Het volume van de zeereep is toegenomen, maar de ontwikkeling van kerven en stuifkuilen gaat erg langzaam. En tenslotte heeft de toename van de dynamiek vooral betrekking op de voorkant en de top van de zeereep. Het gebied achter de zeereep profiteert hier weinig van (Arens et al., 2007).

De geomorfologische ontwikkeling op Oost-Ameland tussen 1990 en 2006 is niet los te zien van de relatief rustige omstandigheden in deze periode. Het aantal stormen en stormvloeden was aanzienlijk minder dan in de periode voor 1990. Na oktober 2006 zijn er echter drie hoge stormvloeden geweest, waardoor er ook een beeld is ontstaan van de respons van een dynamisch beheerde kust op zeer hoog water. Duidelijk is dat de aanvoer van zand naar de stranden ongekend groot is; hetzij door suppleties, hetzij door natuurlijke aanzanding. Dit fenomeen speelt in geheel Nederland. Het zou echter kunnen dat na een aantal jaren met grote stormen en hoge stormvloeden de situatie geheel veranderd is. De effecten van dynamisch kustbeheer zouden daardoor geheel anders kunnen zijn. Het is wel duidelijk dat de stormvloeden tussen oktober 2006 en maart 2007 slechts een beperkt effect hebben gehad op de zeereep, met hier en daar wat afslag (Arens et al., 2007).

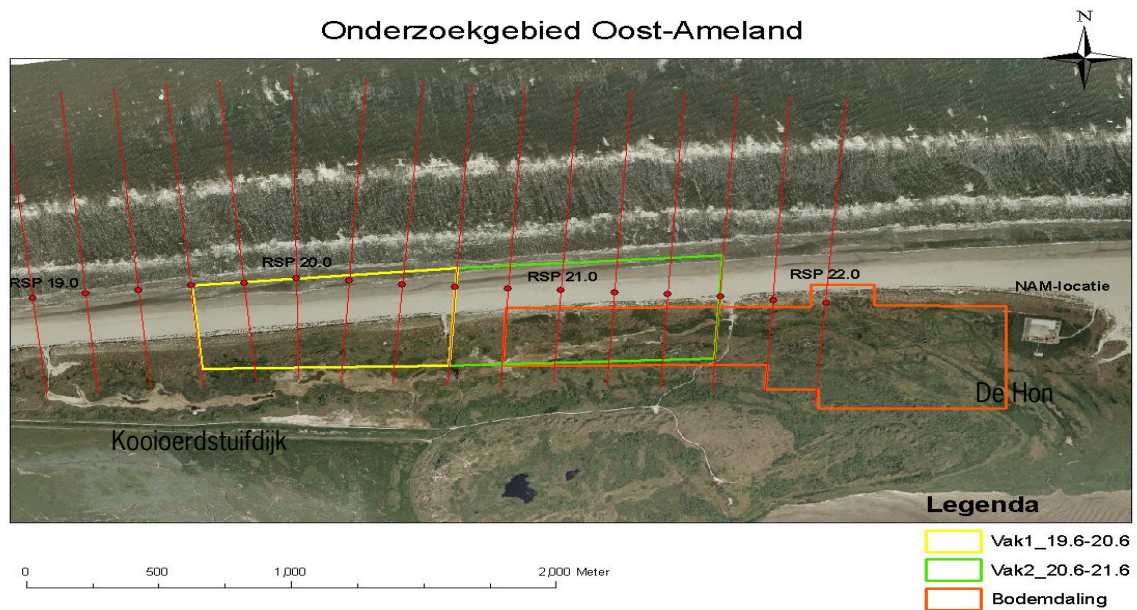
Er is afgesproken dat vanaf het jaar 2000 tussen rijksstrandpaal (RSP) 17.0 en 23.0 het onderhoud achterwege wordt gelaten. Uit de evaluatie van het dynamisch kustbeheer (Arens et al., 2007) blijkt dat door deze vorm van dynamisch kustbeheer de dynamiek toeneemt. Hier en daar is een stuifkuil ontstaan, en er is meer doorstuiving van zand naar achteren in de zeereep. Tussen kilometer 17 en 19 zijn er meer kerfjes in de duinen dan tussen kilometer 19 en 21. De dynamiek beperkt zich vooral tot de voorzijde van de zeereep, hoewel ze hier en daar ook aan de top zichtbaar is. En tijdens een (sterke) noordenwind verstuift er wel zand naar de zone achter de zeereep. In dit gebied op Oost-Ameland ligt een hoog strand met veel droog zand (afkomstig van de suppletie in 1992). Tijdens de storm van november 2006 is ca. 2 tot 3 m van de duinvoet afgeslagen. Volgens het evaluatierapport biedt dit mogelijk nieuwe aangrijpingspunten voor de wind en zijn er aanknopingspunten voor kerfvorming ontstaan. De afslag was echter beperkt tot de duintjes die in de jaren vóór de storm tegen de zeereep aan waren gevormd, en het oude zeereepfront was niet aangetast (Arens et al., 2007).

Het onderzoekgebied bestaat uit het kustvak tussen RSP 19.0 en 22.0 op Oost-Ameland (figuur 12). Binnen dit gebied is er bijzondere aandacht voor de twee vakken die gebruikt zijn voor het monitoren van de effecten van dynamisch kustbeheer.

Vak 1 ligt tussen RSP 19.6 en 20.6, en heeft tussen 1995 en 1999 als referentiegebied gediend voor Vak 2.

Vak 2 sluit hierop aan (RSP 20.6 - 21.6) en is de locatie waar in deze zelfde periode een experiment met

dynamisch kustbeheer plaatsvond. In 1995 is het regulier kustbeheer hier stopgezet, waarbij de effecten zijn gemonitord door het Natuurcentrum Ameland (NCA) (Krol, 2006). Tot en met het jaar 1999 is het referentiegebied (Vak 1: RSP 19.6 - 20.6) onderzocht, waar toen nog het normale onderhoud werd uitgevoerd. Vanaf het jaar 1999 is ook hier het reguliere onderhoud achterwege gebleven, en is het gehele gebied tussen de strandpalen 19.6 en 21.6 gelijk behandeld door Rijkswaterstaat. Tussen 1995 en 2002 zijn deze gebieden jaarlijks gemonitord door het NCA (Krol, 2006). Verderop volgt een meer gedetailleerde beschrijving van deze twee kustvakken.



Figuur 12

Onderzoekgebied Oost-Ameland. Weergegeven zijn de rijkstrandpalen (RSP) 19.0 tot en met 22.0 (rode stippen om de 200 m), de JARKUS-raaien (rode lijnen), de twee vakken en het gebied dat gemonitord wordt in het kader van het project 'Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost'.

Het vak 'Bodemdaling' geeft het vak aan dat gekarteerd wordt in het kader van de 'Monitoring effecten bodemdaling op Ameland-Oost' (Slim et al., 2005). Op Ameland-Oost wordt sinds 1986 aardgas gewonnen door de Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM). De locatie van deze aardgaswinning is aangegeven met 'NAM-locatie' op de kaart. Door deze aardgaswinning treedt bodemdaling op in het gebied, waarvan de effecten sinds 1988 gemonitord worden (BCA, 2008; Eysink, 2005; NAM, 2010). De zeereep die in dit onderzoek geanalyseerd wordt sluit aan op het gebied van onderzoek naar de ecologische effecten van de bodemdaling (Slim et al., 2005).

Om een overzicht te krijgen van gebeurtenissen die van invloed zijn geweest op de vorming van de zeereep op Oost-Ameland, is in tabel 1 een chronologie gegeven met een aantal van deze gebeurtenissen. Hierbij zijn naast de geschiedenis van de zeereep ook de beheermaatregelen (en veranderingen hierin), zandsuppleties en een enkele doorbraak vermeld.

Tabel 1*Chronologie kustbeheer Ameland.*

Jaar	Gebeurtenis	Omschrijving
1882-1888	Opstuiven Kooioerdstuifdijk	Verbinding Kooi- en Oerderduinen stormvloedvast opgestoven ¹
1960-1970	Zeereep rechtgetrokken	Zeereep tussen Buurderduinen en Oerd rechtgetrokken door aanleg twee nieuwe stuifdijken ten noorden van bovenstaande Kooioerdstuifdijk ¹
1965	Aanleg stuifdijk paal 21-23	Stuifdijk door middel van pionierduintjes tussen strandpalen 21.0 en 23.0 ²
1965-1999	Regulier onderhoud stuifdijk	Aanleg (jaarlijks) van zandvangschermen (windschermen) aan de strandzijde en helmaanplant in de duinen ²
1980	Duinverzwarend West-Ameland	Duinsuppletie tussen strandpaal 10.0 en 16.0 ³
1990	1 ^e Kustnota	Beleidskeuze voor 'dynamisch handhaven van de kustlijn' door middel van zandsuppleties ⁴
1990	Vaststellen basiskustlijn (BKL)	⁴
1990	Duinverzwarend West-Ameland	Duinsuppletie tussen strandpaal 12.4 en 17.0 ³
1992	Zandsuppletie	Zandsuppletie tot en met strandpaal 19.6 ³
1994	Doorbraak zeereep	'Washover' rond strandpaal 21.4 ²
1995	2 ^e Kustnota	Optimalisatie lopende beleid. Voornemen tot compensatie van zandverliezen op dieper water in verband met zeespiegelstijging ⁴
1995	Start pilot dynamisch kustbeheer	Regulier kustbeheer stopgezet in Vak 2 tussen strandpaal 20.6 en 21.6 ²
1998	Zandsuppletie	Onderwatersuppletie van 2.000.000 m ³ in het kustvak tussen strandpaal 13.0 en 21.0 ⁵
1999	Einde pilot dynamisch kustbeheer	Stop experiment in Vak 2 (20.6-21.6) ²
1999	Invoer dynamisch kustbeheer	Stopzetten regulier onderhoud in gehele kustvak tussen strandpaal 17.0 en 23.0 ⁵
2000	3 ^e Kustnota	Verdere optimalisatie lopende beleid. Extra budget voor compensatie zandverliezen op dieper water ⁴

1. Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000

2. Krol, 2006

3. Arens et al., 2010

4. DHV, 2005

5. Arens et al., 2007

Beschrijving gemonitorde kustvakken Oost-Ameland

Vak 1 (19.6 - 20.6)

Het Natuurcentrum Ameland heeft in een evaluatieverslag een aantal conclusies getrokken over de periode tussen 1995 en 2002. De rijkdom aan plantensoorten neemt iets af tot 1999, maar maakt een grote sprong voorwaarts in 2002. De helm vitaliteit is duidelijk toegenomen van 1995 tot 2002. Dit voorkomt het doorstuiven van zand. Het zandvolume is toegenomen, en de top van de zeereep is verhoogd van 10 m +NAP in 1995 naar 13 m +NAP in 2003. En de totale vegetatiebedekking van de bodem schommelt rond de 30 procent. Deze lijkt van 1995 tot 2002 nauwelijks veranderd, maar de schattingen zijn weinig nauwkeurig (Krol, 2006).

Rond RSP 20.0 wordt geen helm meer verwijderd, wat een nadelige invloed heeft op de dynamiek. Omdat er overall helm groeit, wordt met name de verstuing belemmerd. In de zeereep tussen paal 19.6 en 20.6 bestaat het zeewaartse deel uit uitsluitend steile hellingen die met (vitale) helm zijn begroeid. Onderaan maakt de helling een hoek met een minder steil deel dat uit kaal zand bestaat, dat in oude windschermen gevangen is. Ook het landwaartse deel bestaat uit een steil aflopende helling die begroeid is met (vitale) helm, eveneens gevolgd door een vlakke deel. Dit kan als duingebied in een overstuivingsfase gekenmerkt worden (Arens et al., 2007).

Volgens de evaluatie heeft het niet meer planten van takkenschermen niet geleid tot erosie en afslag. Er is zelfs met enige moeite een begin van een associatie van biestarwegras ontstaan. Ook op andere plaatsen lijkt biestarwegras zich te ontwikkelen, en er verschijnen helmpollen op de duinvoet. Geconcludeerd wordt dat er weliswaar input van stuifzand is, maar dat er betere omstandigheden zijn voor zowel meerjarige als eenjarige plantensoorten (Krol, 2006). De bovenrand van de zeereep bestaat grotendeels uit zand; de helmpollen zijn ontstaan aan het begin van het groeiseizoen bijna ondergestoven. Aan de binnenzijde van de zeereep is - met name buiten het groeiseizoen - goed te zien dat er veel stuifzand binnenwaait. De top van de zeereep is erg dynamisch met hier en daar kale plekken, maar desondanks weet de helm zich nog steeds te handhaven. Er wordt een forse hoeveelheid stuifzand vastgelegd, en aan de lizijde is er sprake van instuiving van zand. Al met al was er tussen 1995 en 2002 sprake van een versterking van de natuurlijke kwaliteit (Arens et al., 2007).

Uit de vergelijking van fotoseries blijkt dat de top van zeereep is opgehoogd. De vegetatie is vrij open door het stuifzand, maar handhaaft zich ten opzichte van 1995. In het centrale deel van de zeereep is vitale helm zichtbaar; herkenbaar aan de donkergroene kleur. Er is in de loop van de monitoring een meer natuurlijke zeereep ontstaan met een grote mate van afwisseling tussen open erosieplekken en vitale helmpollen en heuvels. Ook is er veel meer reliëf ontstaan. Een voorbeeld is te zien in figuur 13 (Krol, 2006).



Figuur 13

Fotoserie bij RSP 20.4 vanuit het duin in zeewaartse richting voor de jaren 1995, 1999 en 2002 (foto's J. Krol, 2006).

De vorming van een natuurlijk duinvoet op het strand heeft zich voorgezet, zodat in 2002 zowel breedte als volume behoorlijk groot zijn. De vegetatieloze takkenschermen aan de duinvoet zijn vervangen door een grotere hoeveelheid zand waarop zich een associatie van biestarwegras ontwikkelt. Verder is er sprake van een ontwikkeling van de zeereep in de natuurlijke richting, zonder dat er sprake is van erosie (Krol, 2006).

Vak 2 (20.6 - 21.6)

Voor het tweede kustvak (waarin al vanaf 1995 geëxperimenteerd is met dynamisch kustbeheer) is de vitaliteit van de helm in het centrale deel van de zeereep gedurende de hele periode tussen 1995 en 2002 optimaal. Dit heeft geleid tot forse ophoging van dit centrale deel - de top - van de zeereep. De stijging van het profiel is 2,5 tot 3 m. Ook hier zijn er nauwelijks veranderingen in de vegetatiebedekking aan te geven, omdat de schatting hiervan erg ruw is (Krol, 2006).

Uit het vergelijken van de fotoseries blijkt dat op meerdere plaatsen de zeereep het standpunt van waaruit de foto werd gemaakt nadert, en de zeereep dus fors zuidwaarts uitbreidt. Over het algemeen handhaaft de zeereep zich, en er is een grote mate van afwisseling tussen erosieplekken en sedimentatie door vitale helmpollen zichtbaar. Dit zorgt voor een natuurlijker aanblik van de duinreep dan voorheen. Door de groei in zowel hoogte als breedte is het zandvolume gegroeid (Krol, 2006).

Rond strandpaal 21.4 is er in 1994 tijdens een storm een grote opening ('washover') in de zeereep ontstaan, waardoor zeewater naar binnen spoelde. Deze opening is daarna weer dichtgestoven, en 30 m landinwaarts is een nieuwe zeereep ontstaan. Deze had in 2002 inmiddels weer een hoogte van 7 m +NAP bereikt (figuur 14). Dit gedeelte (tussen 21.3 en 21.6) kende wel een forse achteruitgang in het aantal aanwezige plantensoorten. Deze achteruitgang houdt verband met het verdwijnen van de zeereep en het opkomen van soorten uit de biestarwegras-associatie. De zeereep met helm is hier vervangen door een natuurlijke duinvoet. Dit is een verschil met het aangrenzende Vak 1 (19.6-20.6) waar vier jaar langer onderhoud met takkenschermen is gepleegd (Arens et al., 2007).



Figuur 14

Fotoserie bij RSP 21.4 vanaf het strand in landwaartse richting voor de jaren 1995, 1999 en 2002 (foto's J. Krol, 2006).

Hoogtebestanden (JARKUS-data)

Rijkswaterstaat (RWS) voert jaarlijks kustmetingen uit aan de Nederlandse kust. De resultaten hiervan zijn de zogeheten jaarlijkse kustmetingen of JARKUS-data. Vanaf 1964 worden ieder jaar langs raaien loodrecht op de kust kustprofielen vastgesteld. Deze raaien liggen op een afstand van 200 tot 250 m (200 m voor het Waddengebied) en lopen over een afstand van ca. 800 m zeewaarts tot ca. 200 m landwaarts van de eerste duinenrij. De afstand tussen twee meetpunten op een raai (transect) is 5 m. De resultaten worden opgeslagen in het DONAR-systeem van RWS (Arens et al., 2010; Van Heuvel et al., 1996).

In 1964 werd dit gedaan door middel van hoogtemetingen met waterpassing, en in 1975 is men overgestapt op stereofotogrammetrie. Sinds 1996 worden de gegevens digitaal beschikbaar gesteld en gegeorefereerd. Vanaf 1997 worden de JARKUS-profielen vastgesteld aan de hand van gebiedsdekkende metingen met laseraltimetrie (LiDAR: Light Detecting And Ranging) (Arens et al., 2010). Rijkswaterstaat hanteert als kwaliteitseisen een gemiddelde afwijking van kleiner dan 5 cm en een standaardafwijking van kleiner dan 15 cm voor harde topografie. En een gemiddelde afwijking van kleiner dan 10 cm en een standaardafwijking van kleiner dan 20 cm voor zachte topografie (De Graaf et al., 2003). Volgens Arens et al. (2010) is de betrouwbaarheid van de JARKUS-data in een orde van 10 cm. Hierom en vanwege aanwezige meetfouten zijn de data niet goed bruikbaar voor een jaar-tot-jaar-analyse, maar wel voor trendberekeningen. In een ander onderzoek wordt geconcludeerd dat JARKUS-data voldoende betrouwbare informatie is voor het bepalen van volumeverschillen over het gehele gebied (Arens et al., 2005). Volgens Van der Wal (1996) is de verticale nauwkeurigheid van de JARKUS-data ongeveer 20 cm.

Rijkswaterstaat heeft zelf richtlijnen opgesteld voor hoogtecontrole, controle van de frequentie, punt dichtheidscontrole en andere mogelijke fouten. Volgens DID (2010) waren de fouten voor bijvoorbeeld de hoogtemetingen voor Nes op Ameland in 2010 als volgt: een gemiddelde afwijking van -0,040 m, een standaard afwijking van 0,020 m en een RMS-fout van 0,044 m. De punt dichtheid voor Ameland was gemiddeld 2,56 punten/m². Geconcludeerd wordt dat alle fouten binnen de opgestelde eisen vallen (DID,

2010). Hieruit blijkt dat een gemiddelde afwijking van (-)4 cm normaal is, wat een jaar-op-jaar-vergelijking inderdaad onnauwkeurig kan maken.

De JARKUS-data zijn geanalyseerd in Microsoft Excel. Van elke raai in het onderzoekgebied (RSP 19.0-22.0) is in een grafiek een hoogteprofiel voor een aantal jaren (1964/1970/1980/1990/2000/2008/2010) weergegeven. 1964 is het eerste jaar waarvoor de data beschikbaar zijn, en vanaf 1970 is gekozen voor een interval van tien jaar om zo een overzicht van de ontwikkeling van de zeereep in de tijd te hebben. Omdat een te kort interval een vertekend beeld kan geven vanwege meetfouten, en voor de leesbaarheid van de grafieken is gekozen voor deze periode. Het jaar 2008 is later toegevoegd omdat in een aantal gevallen de data van 2010 (en 2009) niet volledig zijn, zodat 2008 het meest recente jaar is met complete data. Omdat dit niet in alle gevallen zo is, en om zo toch een beeld te hebben van de ontwikkelingen tussen 2008 en 2010, is gekozen om zowel 2008 als 2010 in de grafieken weer te geven.

Vervolgens is hieruit de zeereep (het buitenste duin) geselecteerd (visueel), en is hier verder op ingezoomd. Ook hiervoor zijn grafieken over de verschillende jaren samengesteld, waarbij ook de duinvoet is weergegeven. Deze duinvoet is in navolging van de theorie vastgesteld op 3 m +NAP. Voor deze zeereep is per jaar de maximum duinhoogte vastgesteld, en weergegeven in een grafiek.

Tenslotte is het gedeelte van deze zeereep boven de duinvoet geselecteerd, en hiervan het volume bepaald. Hiervoor is de volgende formule gehanteerd:

$$V = (Gem(H_1, H_2) - 3) * D_{1,2}$$

Waarbij V is het volume van de zeereep, $Gem(H_1, H_2)$ is het gemiddelde van de hoogte op punt 1 en de hoogte op punt 2 en $D_{1,2}$ is de afstand tussen punt 1 en punt 2. De uitkomst is het volume van de zeereep voor een strook van een breedte van 1 m.

Deze berekende volumes zijn voor elke raai per jaar in een grafiek gezet, waarna met behulp van Excel een trendlijn door de punten is getrokken. Omdat de beschikbaarheid van data per jaar verschillend is, zijn voor een aantal jaren niet genoeg gegevens beschikbaar om het volume voor de gehele zeereep te berekenen. Deze jaren zijn waar nodig handmatig uit het overzicht verwijderd ('geschoond').

Voor drie raaien is een uitgebreidere analyse gedaan. Hiervoor zijn raaien gekozen die alle drie karakteristiek zijn voor hun deel van de zeereep. In de zeereep zijn namelijk drie delen te onderscheiden.

Ten eerste tussen kilometer 19.0 en kilometer 20.6. Een structureel aangroeiende zeereep met de vorming van een voorduin. Tussen 20.6 en 21.0 is een overgangsgebied, waarna tussen kilometer 21.0 en kilometer 21.8 het volgende vak onderscheiden kan worden. Dit gebied is sterk beïnvloed door de doorbraak in 1994, waardoor de zeereep een stuk landinwaarts is verplaatst. Tenslotte begint bij kilometer 22.0 het derde deel, dat gekarakteriseerd wordt door een steil hoog duin (zonder voorduin) met zichtbare overstuiving. Vanwege deze observatie is gekozen voor de eerder genoemde raaien **19.8 (uitbreidend duin)**, **21.4 (doorbraak: 'wash over')** en **22.0 (ophogende duin)** (figuur 15). De raaien 19.8 en 21.4 zijn ook karakteristiek voor de kustvakken 1 en 2.



Figuur 15

Strandpaal en vooraanzicht zeereep vanaf het strand bij de raaien 19.8, 21.4 en 22.0.

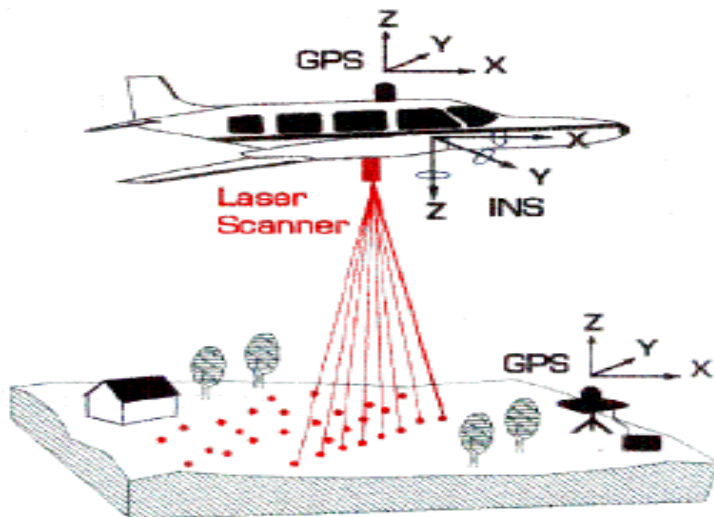
Voor deze specifieke raaien is ook een overzicht gemaakt van de ontwikkeling van het strand met eventuele primaire duintjes (tussen de duinvoet bij 3 m +NAP en 1,5 m +NAP). Verder is voor de trendanalyse van de volumeontwikkeling waar nodig een onderscheid in verschillende perioden aangebracht, met elk hun eigen trendanalyse. Het is namelijk gebleken de ontwikkeling van volume van de zeereep meestal het beste wordt weergegeven door een serie van opeenvolgende lineaire ontwikkelingen, met onderbrekingen. En als laatste is er voor één van deze karakteristieke raaien (19.8) extra gekeken naar de ontwikkeling van het volume per segment van de zeereep. In dat deel van het kustvak is het namelijk mogelijk een onderscheid te maken tussen de zeereep zelf en het voorduin, met elk een eigen ontwikkeling in volume. Op deze manier is geanalyseerd op welk moment volumegroei plaatsvindt in welk deel van de zeereep, en of de verhouding tussen de groei van deze aparte delen verandert.

Naast deze analyse per raai is ook een analyse gemaakt van het totale volume van de onderzochte zeereep, en voor de twee geselecteerde onderzoekvakken (in het kader van dynamisch kustbeheer). De gegevens van de zestien afzonderlijke raaien zijn in één overzicht geplaatst, waarna allereerst de maximum raaihoogte over een aantal jaren met elkaar is vergeleken. Vervolgens is het totale volume van de zeereep berekend door de afzonderlijke volumes te sommeren. Voor de berekening van dit volume zijn de raaien geëxtrapoleerd naar de gehele breedte van 200 m van de strook die zij vertegenwoordigen. Dit komt erop neer dat het berekende volume (voor een strook van 1 m breed) met 200 is vermenigvuldigd. Een uitzondering is uiteraard gemaakt voor de raaien die de grens vormen van een gebied. Deze zijn slechts met 100 vermenigvuldigd. Ook deze data zijn vervolgens geschoond, omdat niet elke raai genoeg data had om voor elk jaar het correcte volume te bepalen. Vervolgens zijn deze data in grafieken gepresenteerd en zijn er trendlijnen toegevoegd.

Verder is gepoogd de invloed van het dynamisch kustbeheer te kwantificeren. Voor Vak 1 (19.6-20.6) en voor Vak 2 (20.6-21.6) zijn de zandvolumes van de raaien binnen deze vakken bij elkaar opgeteld om per jaar een totale waarde voor de vakken te verkrijgen. Ook voor deze analyse is de 'werkelijke' waarde gebruikt. De raai-volumes zijn met 200 vermenigvuldigd, of met 100 voor de grensraaien. Op deze waarden is opnieuw een trendanalyse uitgevoerd, en de verschillende kustvakken zijn voor de periode tussen 1994 en 1999 (periode van het experiment) en voor de periode na 1999 (voor de effecten op langere termijn) met elkaar vergeleken. Uiteindelijk is voor het totale volume per kustvak ook nog een trendanalyse voor de totale periode (tussen 1964 en 2010) gedaan, om deze kustvakken ook op de langere termijn met elkaar te kunnen vergelijken.

Laseraltimetrie

Zoals hierboven beschreven worden de JARKUS-data vanaf 1997 vastgesteld door middel van laseraltimetrie. Bij laseraltimetrie worden vanuit een vliegtuig of helikopter hoogtemetingen van het aardoppervlak verricht. Vanuit het toestel worden de locatie en stand van het vliegtuig, en de afstand tot het aardoppervlak gemeten (met behulp van respectievelijk GPS, INS³ en laserscanner). Tegelijkertijd worden ook metingen verricht met GPS-grondstations (figuur 16).



Figuur 16

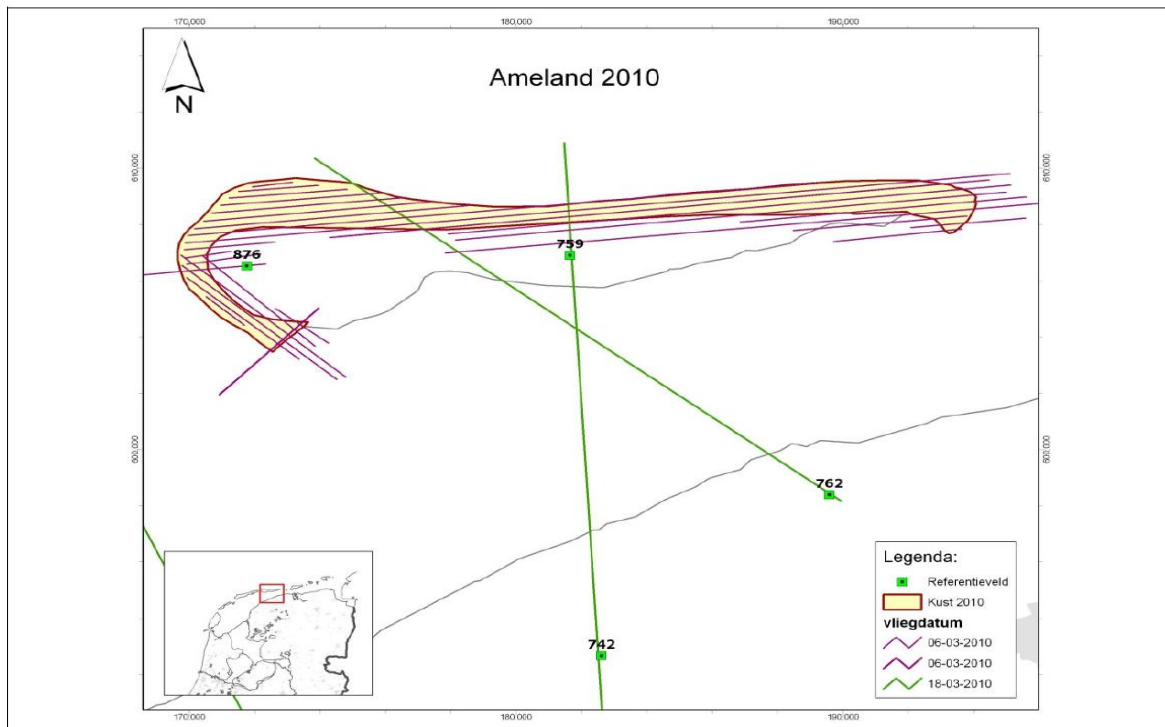
Principe van laseraltimetrie (DID, 2010).

Door het tijdsverschil tussen het uitgezonden en ontvangen laserpuls te meten, kan - wanneer de stand en positie van het toestel nauwkeurig bekend zijn - de terreinhoogte worden bepaald (DID, 2010).

Na deze metingen worden de resultaten gefilterd en gecontroleerd. Metingen op vegetatie, huizen en andere objecten worden meestal verwijderd. De hoogtemetingen worden gecontroleerd met behulp gedetailleerde veldmetingen met GPS (referentievelden) en strookvereffening (gebruik maken van overlap van metingen in de randen van de meetstroken) (DID, 2010).

In figuur 17 is weergegeven wat de vlieglijnen (op verschillende data) en de referentievelden zijn die voor de laseraltimetriemetingen van 2010 op Ameland zijn gebruikt.

3 INS: Inertial Navigation System. Toestel dat de stand van het vliegtuig (in x,y,z-richting) bepaalt (figuur 16)



Figuur 17

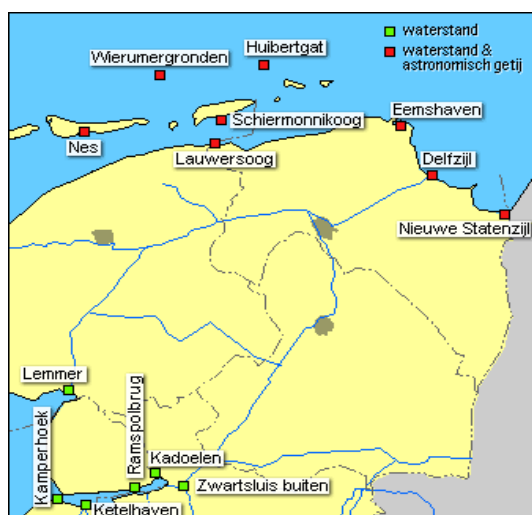
Overzicht vluchlijnen Ameland 2010 (DID, 2010).

Voor de metingen van de kuststrook waaruit de JARKUS-data worden geëxtraheerd, wordt gebruik gemaakt van een digitaal hoogtemodel (DHM) met een celgrootte van 5 bij 5 m. Deze data zijn beschikbaar voor de gehele periode van laseraltimetriemetingen, dus vanaf 1997 tot en met 2010.

Bij dit onderzoek zijn de DHM's ingevoerd in een Geografisch Informatiesysteem (GIS), waarmee de twee vakken (1 en 2) uitgesneden zijn. Aan de zeezijde zijn deze vakken begrensd door de lijn van 3 m +NAP om ook het volume van de eventueel aanwezige primaire duintjes mee te nemen. Aan de landzijde is de grens bepaald door de grens zoals deze is vastgesteld bij het analyseren van de hoogtebestanden. Vervolgens is de DHM van 1997 afgetrokken van de DHM van 2010, om zo de verandering in hoogte per gridcel te krijgen. Dit is ook gedaan voor de waarden van 1997 en 1999, omdat deze jaren nog binnen de proefperiode van het dynamisch kustbeheer vallen. Dit levert een aantal kaarten met veranderingen in hoogte op, en statistische gegevens van de nieuw gecreëerde verschil-DHM's. Met behulp van deze gegevens zijn tenslotte de veranderingen in volume van de verschillende kustvakken berekend, welke uiteindelijk gebruikt worden om de ontwikkelingen van de twee kustvakken al dan niet onder dynamisch kustbeheer met elkaar te vergelijken.

Hoogwater

Hoogwatergebeurtenissen zijn een indicatie voor stormen die hebben plaatsgevonden, en die mogelijk voor afslag aan de zeereep hebben gezorgd. Er is sprake van een indicatie, omdat er voor het bepalen van stormgebeurtenissen meerdere factoren van invloed zijn. En voor de mate van afslag is niet alleen de waterhoogte en de kracht van de storm (windkracht) van invloed, maar ook in grote mate de richting van de wind. Voor dit onderzoek is er gekozen voor een relatief beperkte analyse van hoogwatergebeurtenissen.



Figuur 18

Meetstations Rijkswaterstaat Waterhoogte (VWS, 2010b).



Figuur 19

Meetstations Rijkswaterstaat Golfhoogte (VWS, 2010a).

Voor deze analyse is gebruik gemaakt van de waterhoogtemetingen en metingen van de golfhoogte van Rijkswaterstaat. Deze data zijn beschikbaar via Waterbase (www.waterbase.nl). Voor de hoogwaterdata is het station Wierumergronden (in de Waddenzee ten noordoosten van Ameland, figuur 18) gebruikt. Ameland heeft weliswaar een eigen meetstation op Nes, maar dat is gelegen aan de Waddenzee en minder representatief voor de Noordzeekust van Oost-Ameland. Daarom is gekozen voor Wierumergronden, dat het meest representatief is voor het onderzoekgebied (mond. med. J. Krol). De specificaties zijn opgenomen in tabel 2.

Tabel 2

Meetstation Wierumergronden (RWS, 2010).

Locatie	Wierumergronden
Waarnemingssoort	Waterhoogte in cm t.o.v. NAP in oppervlaktewater
Eenheid	Cm t.o.v. NAP
Analysemethode	Rek. gem. waterhoogte over vorige tien minuten Vlotterniveaumeter
Breedtegraad	53,5167° N
Lengtegraad	5,9667° O

Voor de waarden van de golfhoogte is gekozen voor het station 'Schiermonnikoog noord', wat in de Noordzee het meest dichtbijgelegen meetstation is ten opzichte van Ameland (figuur 19). Voor dit station zijn de specificaties opgenomen in tabel 3.

Tabel 3*Meetstation Schiermonnikoog noord (RWS, 2010).*

Locatie	Schiermonnikoog noord (Wadden Schiermonnikoog)
Waarnemingssoort	Significante golfhoogte uit energiespectrum van 30-500 mhz in cm in oppervlaktewater
Eenheid	Cm
Analysemethode	Tijdreeks en frequentie analyse, methode GOLVEN Golfmeetboei - type waverider
Breedtegraad	53,5917° N
Lengtegraad	6,1694° O

Bij de analyse is per jaar de hoogste waterstand respectievelijk de hoogste golfhoogte geselecteerd, en in een tabel weergegeven. Vervolgens is hier een grafiek van gemaakt, waarbij het jaar tegen de hoogste waterstand danwel grootste golfhoogte is afgezet. In deze grafiek is een ondergrens gekozen (250 cm +NAP voor waterhoogte, 600 cm voor golfhoogte) om duidelijker weer te geven wanneer daadwerkelijk sprake was van een hoogwatergebeurtenis.

Er is gekozen om slechts de maximale waarde te gebruiken voor de analyse, en niet de frequentie of duur van een hoogwatersituatie in één jaar. De maximale waarde heeft namelijk de meeste zeggingskracht over de impact van een dergelijke gebeurtenis, hoewel bij meerdere hoogwatergebeurtenissen (stormen) binnen één jaar in dit geval slechts de meest extreme situatie wordt meegenomen. Een ander nadeel voor het gebruik van de frequentie is dat in het begin van de meetreeksen de waarnemingen per uur waren, en er op een gegeven moment is overgeschakeld op metingen per tien minuten. Om deze reden is het niet goed mogelijk om de frequentie van waarnemingen uit het begin en einde van de meetreeks met elkaar te vergelijken.

Luchtfotoanalyse

Voor de luchtfotoanalyse is er de beschikking over geogerefereerde luchtfoto's van Oost-Ameland voor de jaren 2000, 2003, 2006 en 2008 afkomstig van © Eurosense, en voor de jaren 2006, 2008 en 2009 afkomstig van het kadaster. De resolutie van de luchtfoto's varieert van 4x4 m voor de foto uit 2000, via 0,67x0,67 m voor de overige foto's van © Eurosense (2003, 2006 en 2008) tot 0,4x0,4 m voor de foto's van het kadaster (2006, 2008 en 2009). Uit visuele controle blijkt dat de foto van 2000 niet geschikt is voor luchtfoto-interpretatie en daarom is gekozen om de foto's van 2003 en 2009 met elkaar te vergelijken.

In het GIS zijn uit deze foto's de onderzoeksgebieden uitgesneden. Deze zijn vervolgens uit het GIS geëxporteerd en daarna in het programma Definiens Developer⁴ geïmporteerd. Met behulp van dit programma is de bodembedekking in drie klassen geclassificeerd. Deze klassen zijn 1) helm, 2) overstoven helm en 3) kaal zand. Voor Vak 1 en Vak 2 zijn de oppervlakten van elke klasse voor elk jaar bepaald, zodat de waarden per vak kunnen worden vergeleken. Ook is de bodembedekking in 2003 ten opzichte van 2009 vergeleken, om zo een beeld van de ontwikkeling van (helm)vegetatie en kaal zand te krijgen (zij het over een relatief korte periode).

Veldwerk

In oktober 2010 is er beperkt veldwerk verricht in de zeereep. Doel was om een beeld van de situatie ter plaatse te verkrijgen en geschikte locaties voor nader onderzoek te bepalen. Verder zijn er enkele DGPS-metingen verricht om deze waarden te kunnen vergelijken met de JARKUS-metingen. En tenslotte zijn er zes sedimentvangers in een transect achter het duin bij RSP 22.0 geplaatst, om inzicht te krijgen in de mate van

4 Definiens © Developer 5.0. Beeldverwerkingsoftware van eCognition (www.definiens.com)

overstuiving. Deze konden echter (mede vanwege de weersomstandigheden) niet meer in het kader van dit onderzoek worden betrokken.

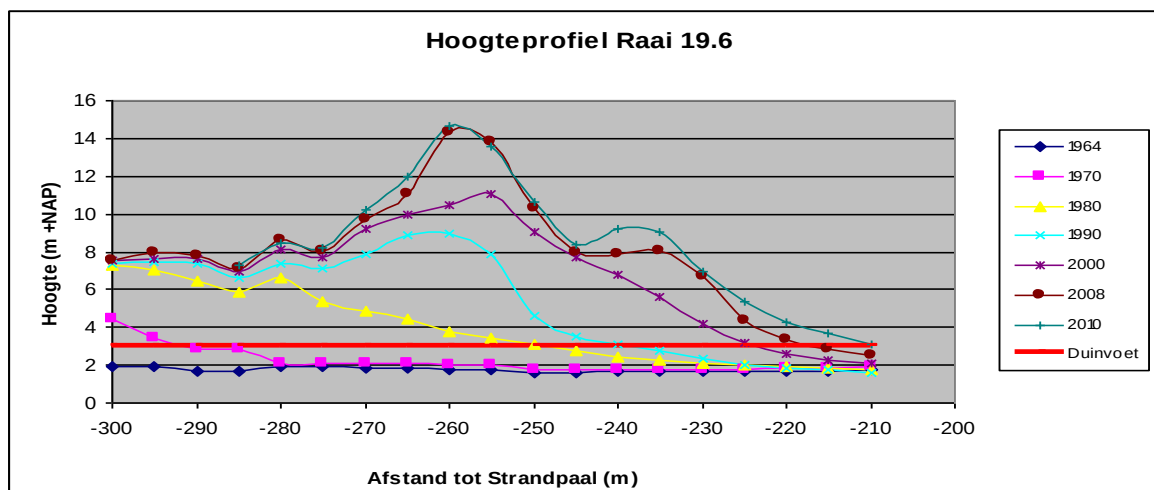
3.2 Resultaten

3.2.1 Hoogtebestanden (JARKUS-data)

In deze paragraaf zijn de resultaten van de analyse van de hoogtebestanden (JARKUS-data) beschreven. Allereerst wordt een overzicht van de algemene beschouwing van de hoogteprofielen gegeven, en daarna wordt ingezoomd op de drie karakteristieke profielen. Vervolgens worden eerst de hoogte en daarna het volume van de zeereep geanalyseerd. Dan wordt de invloed van het dynamisch kustbeheer beschreven, en tenslotte worden in de analyse enkele opvallende zaken besproken.

Overzicht profielen

In figuur 20 is een dwarsdoorsnede van de zeereep gemaakt ter hoogte van raai 19.6. Dit hoogteprofiel is gebaseerd op de JARKUS-data van Rijkswaterstaat. Raai 19.6 is uit alle raaien als voorbeeld gekozen en wordt hier verder besproken.



Figuur 20

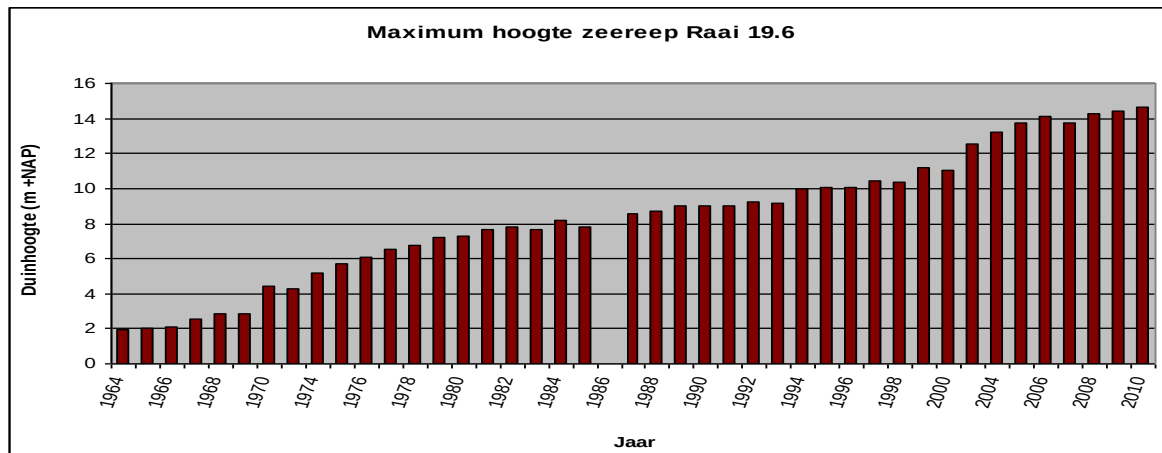
Hoogteprofiel zeereep bij raai 19.6. Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (negatieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal). De duinvoet ligt op 3m +NAP.

Het profiel laat zien dat de zeereep zich gedurende de afgelopen ruim 45 jaar in zeewaartse en opwaartse richting ontwikkelt. Waar in 1964 de zeereep in dit gebied nog nergens boven de duinvoet (gedefinieerd op 3 m +NAP) uitkomt, heeft zich in 2010 een forse zeereep ontwikkeld van ruim 14 m hoogte. En ook qua breedte is er een significante toename.

In deze figuur is door middel van de rode lijn (duinvoet) aangegeven welk deel van de zeereep voor de volumebepaling wordt gebruikt. De duinvoet geldt als zeewaartse grens, en het einde van het eerste duin als landwaartse grens. Hierbij is zichtbaar dat de zeewaartse grens van de zeereep tussen 1980 en 2010 zo'n 40 m richting de zee is opgeschoven. De positie van de top van de zeereep heeft zich sinds 1990 weinig ontwikkeld. Wel is er voor de top na 2000 een voorduin gevormd.

Hoogte zeereep

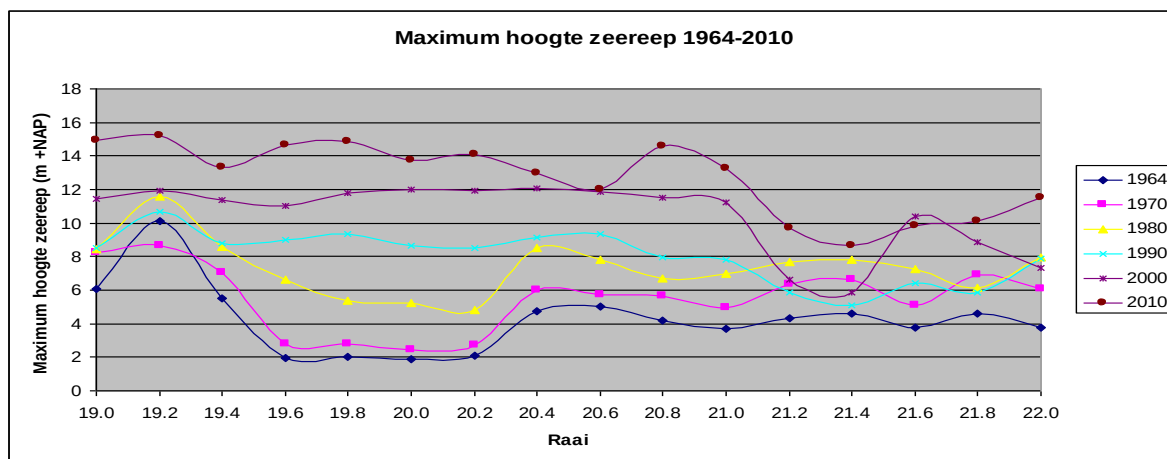
Voor een analyse van de ontwikkeling van de zeereep is weer het profiel bij raai 19.6 als voorbeeld gekozen (figuur 21). Duidelijk is hierin de gestage toename van de hoogte te zien. In 1964 was er zelfs nog geen sprake van een zeereep en bedroeg de hoogte slechts 2 m. In de jaren 70 was er een forse en continue stijging, die zich in de jaren 80 en 90 (zij het in mindere mate) heeft voortgezet. Na 2000 is de stijging weer versneld, maar vanaf 2006 lijkt er een stabilisatie op te treden. Dit valt echter nog moeilijk vast te stellen, omdat er de meeste jaren na 2006 toch wel sprake is van enige toename, en de periode te kort is om te zien of er echt sprake is van een trend. En er is te zien dat er ook in de jaren 80 en 90 perioden waren van schijnbare stabilisatie, waarna er toch weer een (sterke) toename in hoogte optrad.



Figuur 21

Maximum hoogte buitenste zeereep bij raai 19.6. 1986 ontbreekt wegens gebrek aan data.

In figuur 22 is de ontwikkeling van de zeereep voor de hele onderzochte kuststrook voor een aantal jaren weergegeven. De algehele trend is een gestage toename van de hoogte. Van 1964 tot 1980 neemt de hoogte redelijk gelijk toe over het gehele kustvak. In deze periode is er nog een relatief groot hoogteverschil, met een duidelijke piek rond 19.2. In 1990 is er een nivellering opgetreden. De piek rond 19.2 is iets afgevlakt en het lage gedeelte tussen 19.6 en 20.2 is 'opgevuld'. Rond 21.4 is de achteruitgang in de zeereep al waarneembaar. Na 1990 blijkt duidelijk het effect van de doorbraak bij 21.4. Terwijl het westelijke deel van het kustvak (verder) in hoogte is gegroeid, is er rond dit gedeelte een plotselinge afname waarneembaar. Dit is nog steeds zichtbaar in 2010, hoewel er dan al wel een sterk herstel is opgetreden.



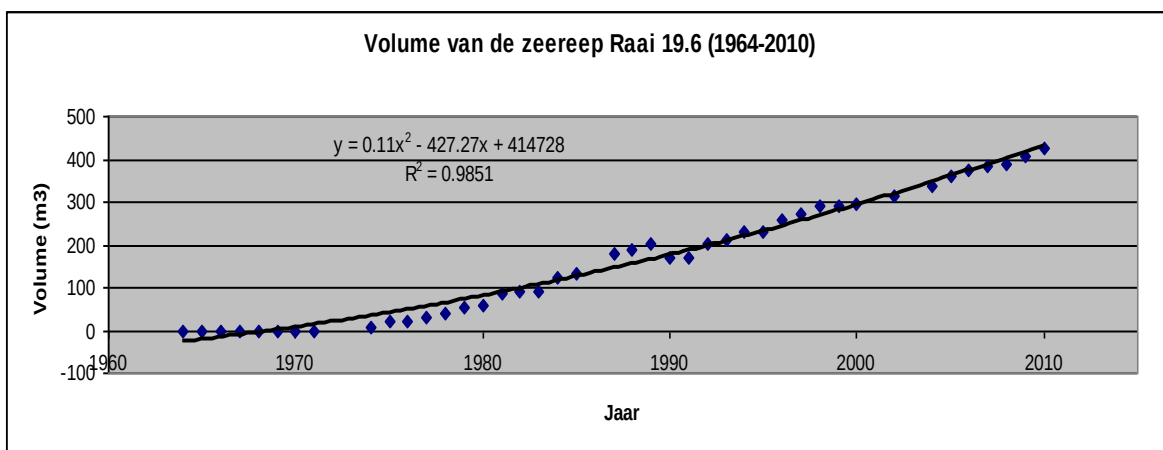
Figuur 22

Maximum hoogte buitenste zeereep voor totale kustvak (19.0-22.0). Ontwikkeling voor aantal jaren tussen 1964 en 2010.

Over het algemeen kan (zelfs met de gevolgen van de doorbraak) gesteld worden dat vanaf 1964 de zeereep sterk in hoogte is toegenomen. Van een gemiddelde hoogte van zo'n 4 m in 1964 met een redelijk constante groei (met name voor het middendeel) naar een hoogte van 12 tot 14 m 46 jaar later (2010).

Volume van de zeereep

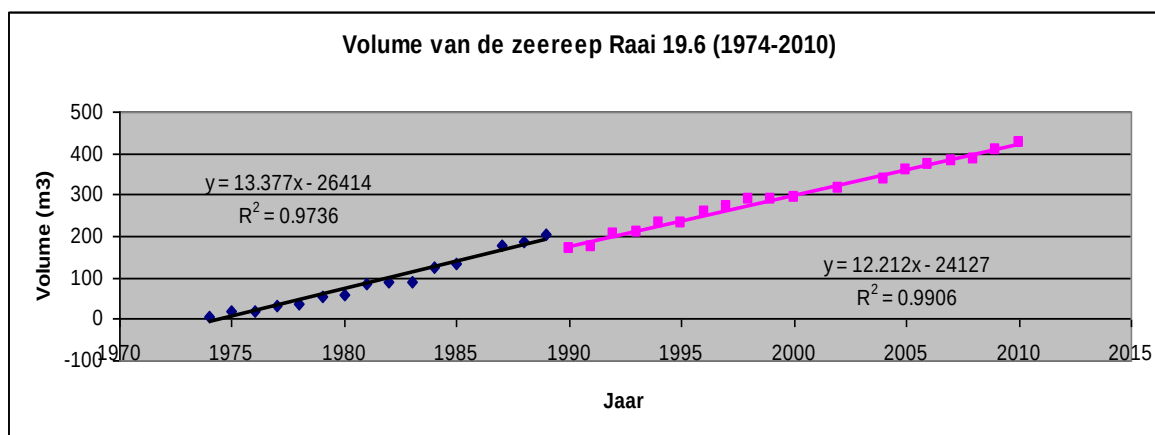
Net als de hoogte is het volume van de zeereep een maat voor de ontwikkeling. Daarom is ook het volume geanalyseerd, zoals is weergegeven voor raai 19.6 (figuur 23). De grafiek laat een vrijwel constante toename van het volume van de zeereep zien, beginnend in de jaren 70 wanneer de eerste zeereep op deze locatie opstuift.



Figuur 23

Volume zeereep bij raai 19.6 van 1964 tot 2010.

Bij 1990 is een soort van 'breuk' in de trendlijn te zien. In plaats van constant verder te groeien is hier het volume in één jaar opeens kleiner geworden. Door deze trendbreuk kan er gesproken worden over twee verschillende trendlijnen (figuur 24).

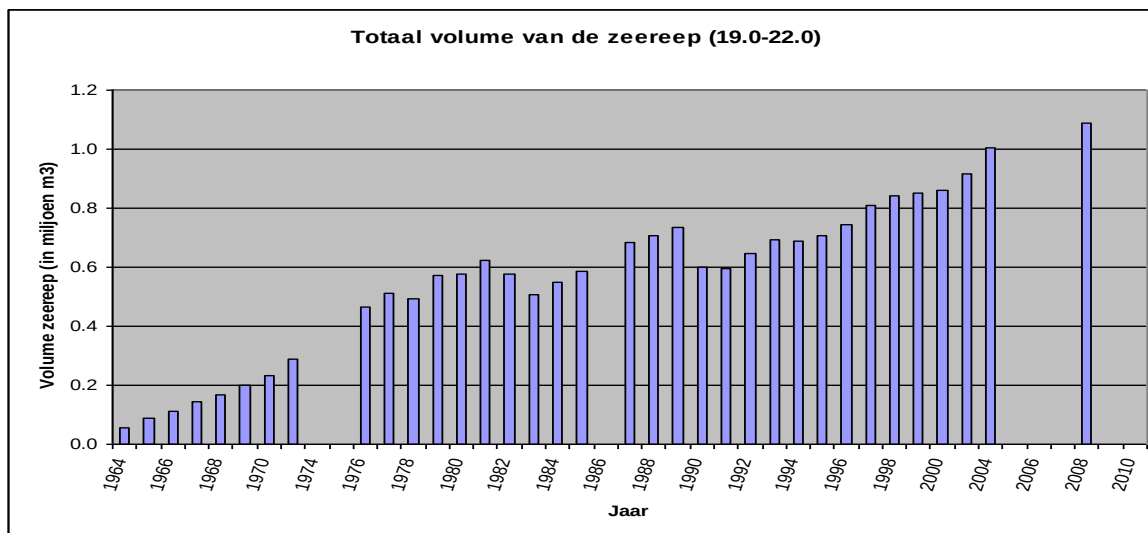


Figuur 24

Volume zeereep bij raai 19.6 van 1964 tot 2010. Twee lineaire trendlijnen met een trendbreuk in 1990.

Er is dus sprake van twee trendlijnen op de langere termijn, waarvan met name de tweede een hoge R^2 -waarde heeft. Na de terugval in 1990 is het volume van de zeereep weer vrijwel constant toegenomen.

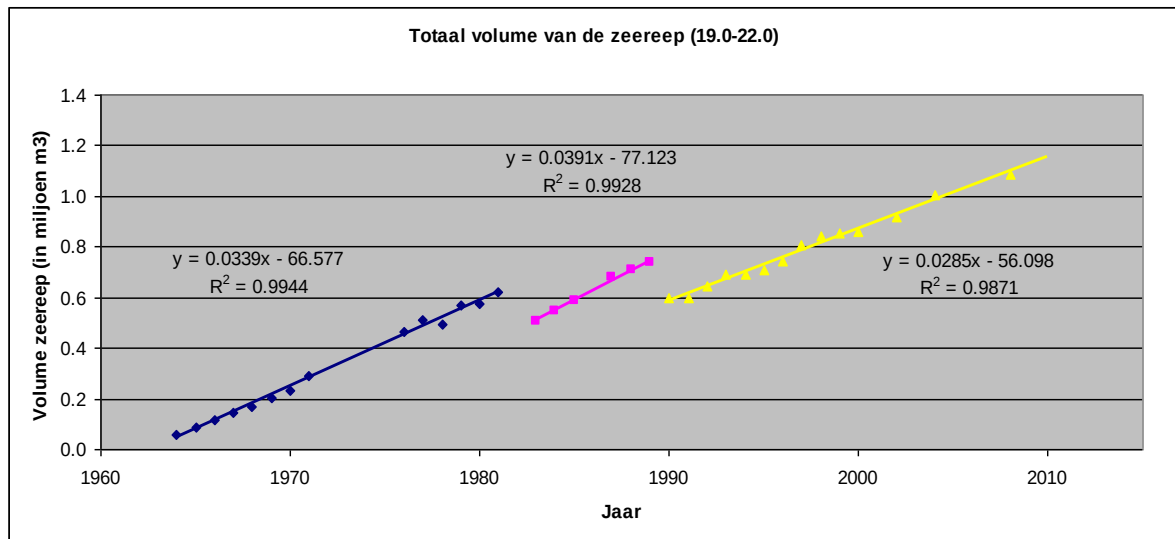
De grafiek in figuur 25 geeft de ontwikkeling weer als de waarden van alle raai-volumes bij elkaar op worden geteld. Ook hier is een redelijk constante ontwikkeling zichtbaar, maar nu ook met een onderbreking in de jaren 1982/1983 die niet eerder tot uiting kwam.



Figuur 25

Totaal volume zeereep van 1964 tot 2010.

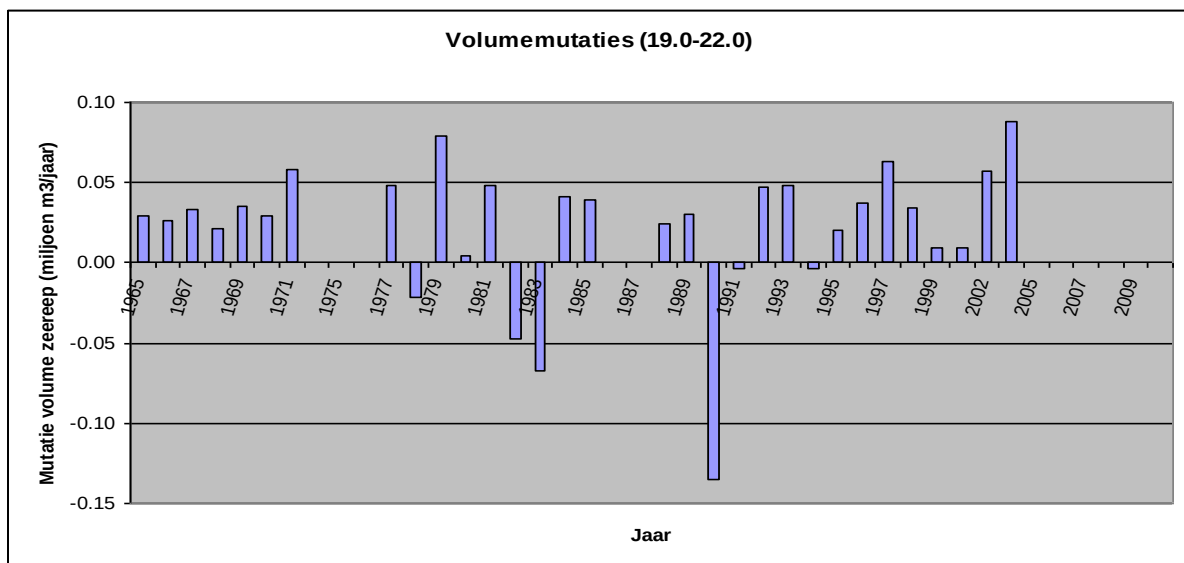
Ook voor het totaalvolume zijn de trendlijnen - met breuken - zichtbaar gemaakt. In figuur 26 is te zien dat ook hier lineaire trends aanwezig zijn (met hoge R^2 -waarden), die onderbroken worden door een aantal trendbreuken. Ondanks deze trendbreuken - met een teruggang in volume - blijft het totaal volume van de zeereep redelijk constant doorgroeien. Wel is het zo dat voor de laatste jaren weinig data beschikbaar zijn, zodat de trendlijn hier minder betrouwbaar wordt.



Figuur 26

Drie lineaire trendlijnen met trendbreuken voor het totale volume zeereep van 1964 tot 2010.

Tenslotte is ook de verandering in volume van elk jaar ten opzichte van het jaar daarvoor in een grafiek weergegeven (figuur 27). Hoewel ook hier redelijk veel data ontbreken, is toch zichtbaar dat in de meeste jaren het volume toeneemt. Deze toename lijkt redelijk constant, hoewel minder constant dan bovenstaande grafiek suggereert. Duidelijk zichtbaar zijn de breukjaren, met een afname in volume. Dit vindt de eerste maal plaats in 1982/1983 en voor de tweede maal (het meest) in 1990.



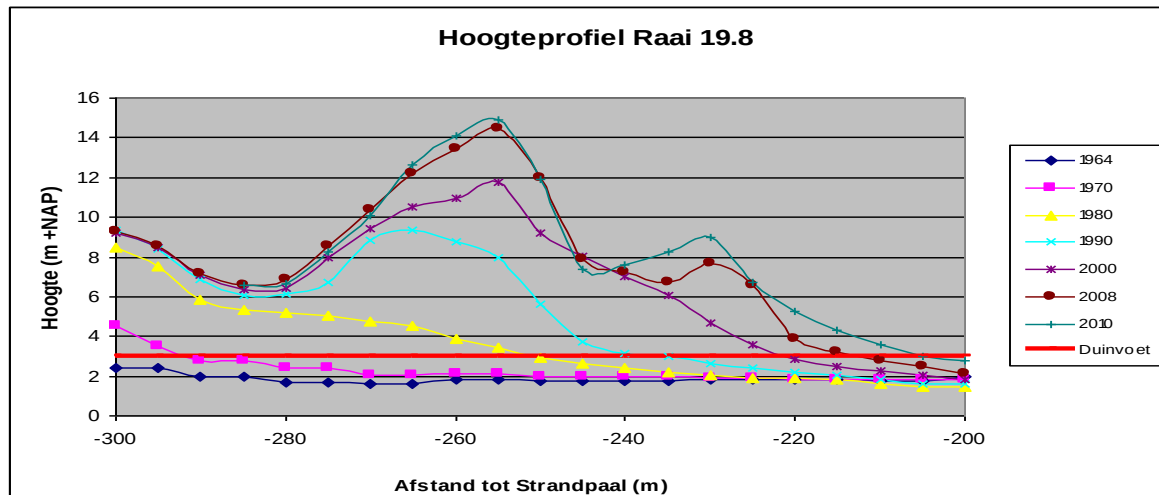
Figuur 27

Mutaties in totaalvolume zeereep van 1964 tot 2010. Geschoond (onjuiste data handmatig verwijderd).

Karakteristieke profielen

Raai 19.8 (Vak 1)

Het profiel bij raai 19.8 (figuur 28) is karakteristiek voor het eerste (westelijke) deel van de zeereep. Het is het profiel dat naast raai 19.6 ligt, en vertoont daarmee ook sterke overeenkomsten. Na 1980 bouwt zich een vrijwel nieuwe zeereep op, in zeewaartse richting. De positie van de duintop stabiliseert zich, en neemt snel toe in hoogte. Na 2000 vormt zich voor de top van de zeereep een voorduin, dat in hoogte en volume toeneemt.

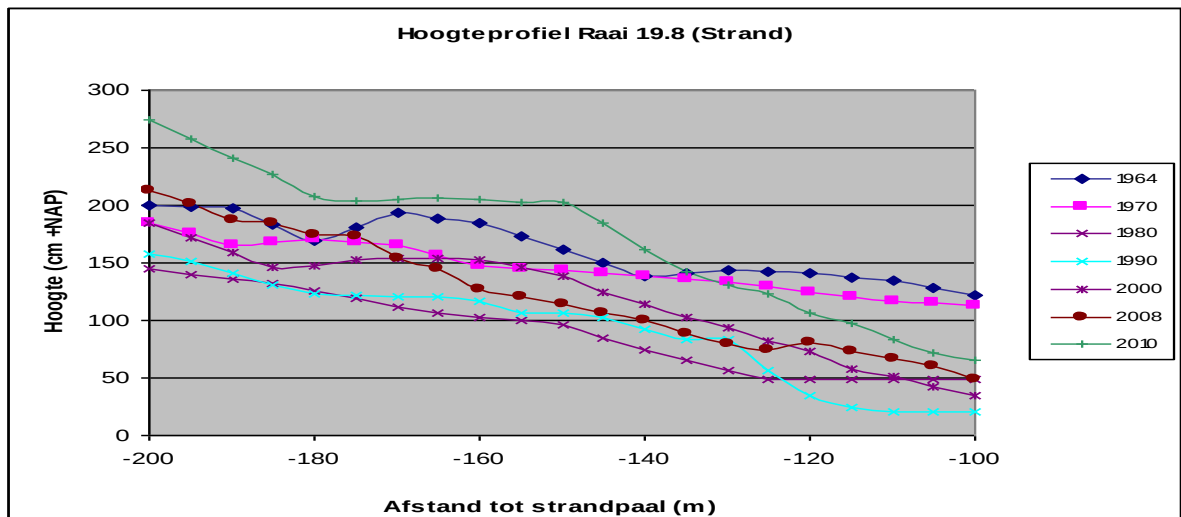


Figuur 28

Hoogteprofiel zeereep bij raai 19.8. Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (negatieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal).

Als de jaren 2008 en 2010 met elkaar vergeleken worden, is te zien dat de 'oude' zeereep zich lijkt te stabiliseren, terwijl het voorduin ter hoogte van -230 m in hoog tempo toeneemt in hoogte en volume. Ook lijkt het voorduin zich in strandwaartse richting uit te breiden. Verderop in deze paragraaf worden de ontwikkelingen van de oude zeereep en het voorduin nader met elkaar vergeleken.

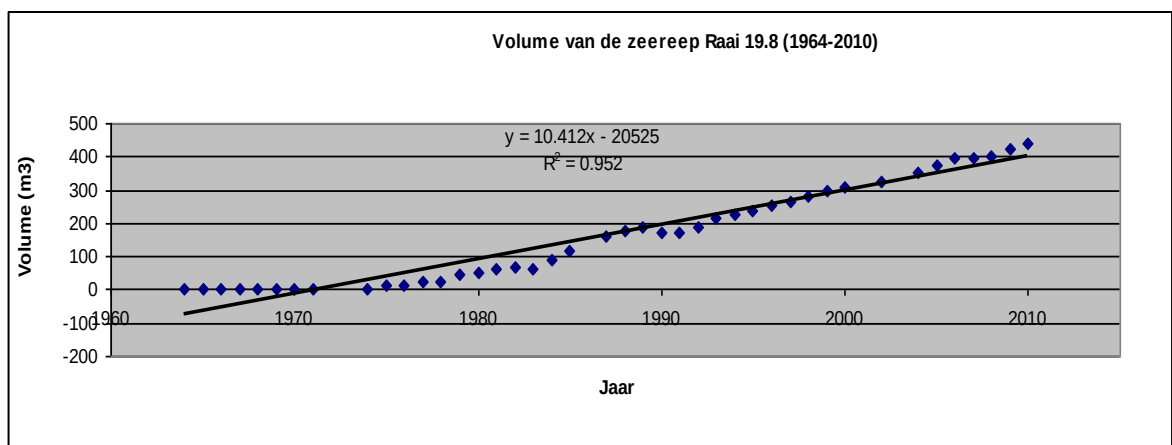
De ontwikkeling van het strand (onder de 3 m +NAP) is zeer dynamisch (figuur 29). In een tien- of zelfs tweetal jaren kan de hoogte 50 cm toe- of afgenomen zijn. In 1964 lijken er primaire (embryonale) duintjes aanwezig te zijn, die daarna verdwijnen. Na 1990 neemt de hoogte van het strand weer toe, met als grote uitschieter 2010. Hierbij dient te worden opgemerkt dat in dit gedeelte van de kust in 1990 is begonnen met het suppleren van zand, waaronder een strandsuppletie in 1992. De toename in 2010 in vergelijking tot 2008 is ongeveer 50 cm, wat duidt op een plotselinge en zeer sterke toename van de zandhoeveelheid.



Figuur 29

Hoogteprofiel bij raai 19.8 (strand) Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (negatieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal).

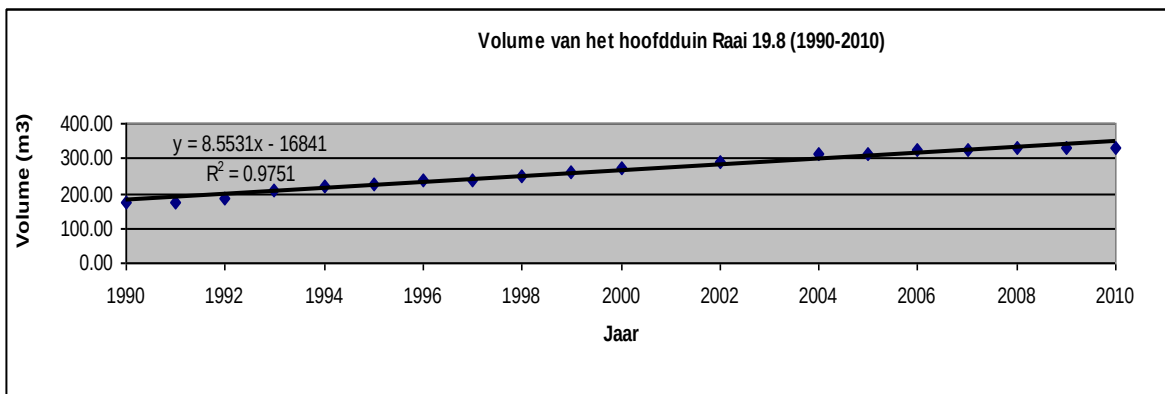
Ook wat betreft de ontwikkeling van het volume van de zeereep lijkt raai 19.8 in sterke mate op de naastgelegen raai 19.6 (figuur 30). Hier is eveneens een vrijwel lineaire ontwikkeling in het volume zichtbaar, en in dit geval zelfs zonder een echt duidelijke trendbreuk in 1990. Het volume is hier wel een paar jaar constant en loopt zelfs iets terug, maar van een grote afname in het volume is geen sprake. Ook de laatste jaren blijft de ontwikkeling lineair, en van een stabilisering of afname lijkt vooralsnog geen sprake te zijn.



Figuur 30

Volume zeereep bij raai 19.8 van 1964 tot 2010.

Omdat bij raai 19.8 sprake is van de ontwikkeling van een voorduin na 1990, kan er onderscheid worden gemaakt tussen dit voorduin en de oorspronkelijk zeereep (hier verder 'hoofdduin' genoemd). Hiervoor is bij -240 m (figuur 28) een grens getrokken en voor beide delen ter weerszijden ervan afzonderlijk het volume berekend. Dit levert het volgende resultaat op voor het hoofdduin (figuur 31).

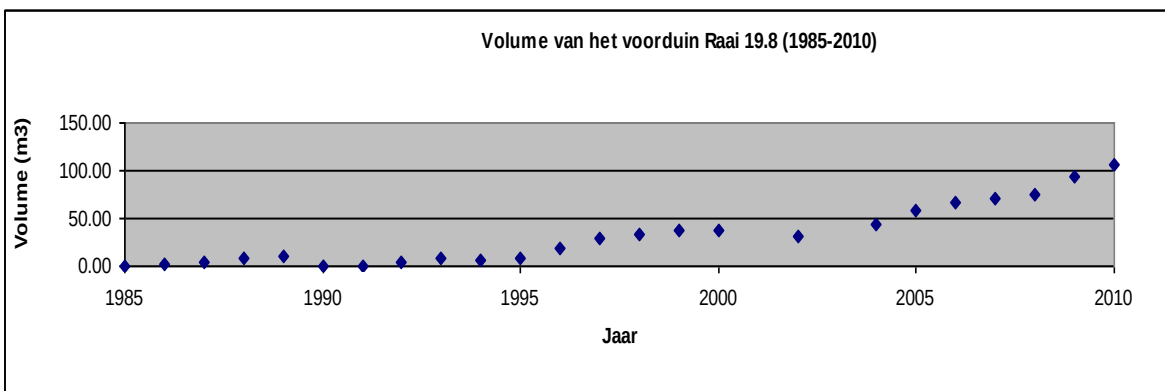


Figuur 31

Volume hoofdduin bij raai 19.8 van 1990 tot 2010.

Hier is (opnieuw) een lineair stijgende trend zichtbaar, die echter de laatste jaren losgelaten lijkt te worden. Opgenschijnlijk stopt de toename van het volume voor dit deel van de zeereep. Hieronder zal daar op worden teruggekomen.

Voor het voorduin is de ontwikkeling van het volume weergegeven in figuur 32.



Figuur 32

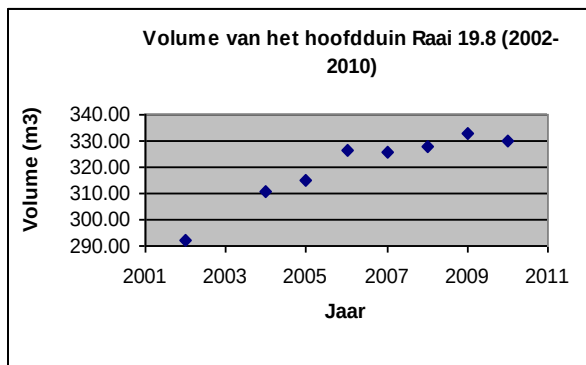
Volume voorduin bij raai 19.8 van 1985 tot 2010.

Voor het eerst in 1995 is er sprake van dat het voorduin zich daadwerkelijk gaat ontwikkelen. Er is een redelijk constante toename in de eerste jaren, maar daarna is er stabilisatie en zelfs enige teruggang. Pas na 2004 is er weer sprake van significante groei.

Om het volume (en de toename in volume) goed te kunnen vergelijken, is in de figuren 33 en 34 ingezoomd op de jaren 2002 tot 2010.

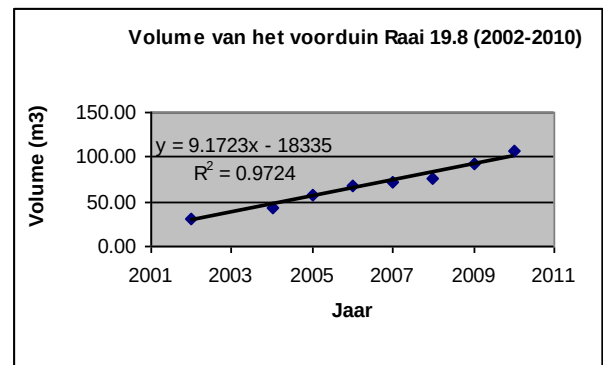
Voor het hoofdduin geldt dat vanaf 2006 de groei in volume stagneert rond de waarde van 330 m³ (voor een profiel van 1 m breed). De groei lijkt gestopt en is zeker niet lineair meer. Voor het voorduin is juist wel een

lineaire groei zichtbaar. Vanaf 2002 groeit het volume redelijk constant, en zeker vanaf 2008 is er een sterke groei.



Figuur 33

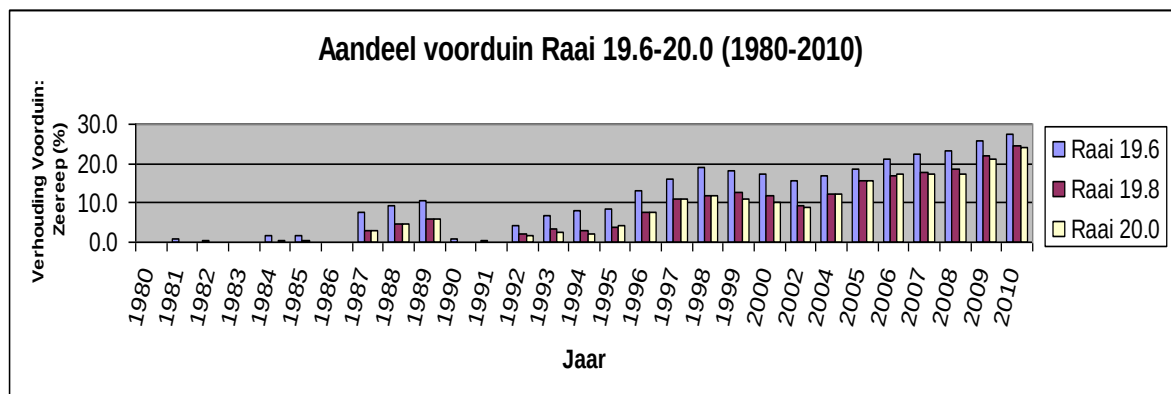
Volume hoofdduin raai 19.8 van 2002 tot 2010.



Figuur 34

Volume voorduin raai 19.8 van 2002 tot 2010.

De groei van het voorduin met tegelijkertijd een stagnatie van het hoofdduin wordt ook zichtbaar in figuur 35. De raaien 19.6, 19.8 en 20.0 vertonen een vergelijkbaar gedrag, wat vooralsnog gekarakteriseerd is door het voorbeeld van raai 19.8. Maar in deze figuur zijn de andere raaien ook weergegeven om te laten zien dat het beeld niet alleen voor de specifieke raai 19.8 geldt. Het diagram toont het volume van het voorduin als percentage van het volume van de totale zeereep.



Figuur 35

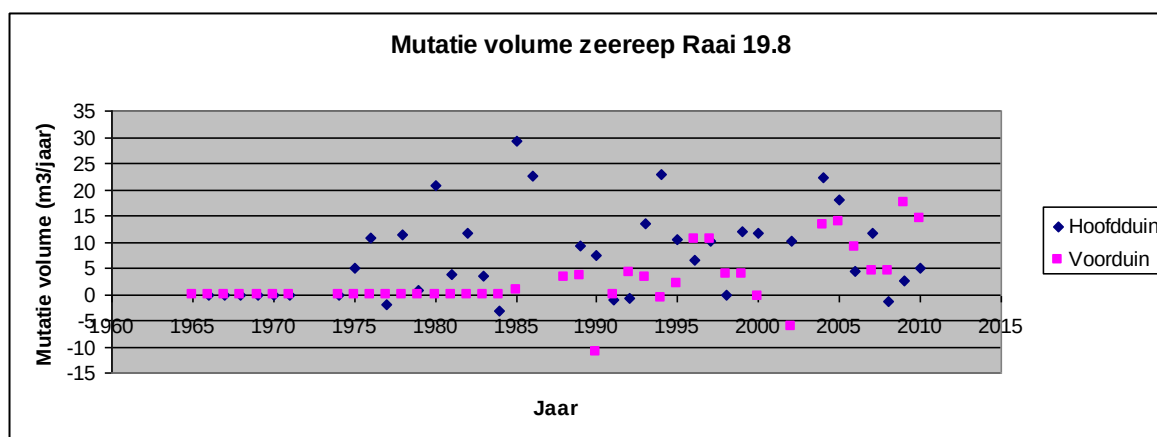
Volume voorduin als percentage van volume van gehele zeereep voor de raaien 19.6, 19.8, en 20.0. Ontwikkelingen tussen 1980 en 2010.

In de jaren 1988-1990 was er al sprake van de aanwezigheid van een voorduin, maar deze is in 1990 verdwenen. In 1992 is er voor het eerst weer een voorduin meetbaar, en sindsdien groeit het aandeel gestaag. In 2010 geldt voor alle drie de raaien dat het voorduin al ongeveer een vierde deel van de zeereep uitmaakt.

Als laatste methode om de ontwikkeling van het voorduin met die van het hoofdduin te vergelijken is de mutatie in volume voor beide delen met elkaar vergeleken. Het resultaat is te zien in figuur 36.

Vanaf 1975 is er vrijwel elk jaar sprake van een toename in volume voor het hoofdduin, afgewisseld door een enkel jaar met afname. Deze toename is niet geheel constant, maar schommelt rond de 10 m³ per jaar. De laatste jaren (2008-2010) lijkt er sprake te zijn van een verminderde toename, maar uit dit figuur is niet op te maken of dit een trend is of bij de normale variatie behoort.

Pas vanaf 1985 begint het voorduin (voorzichtig) in volume toe te nemen. In 1990 wordt dit weer tenietgedaan door een grote afname, waarna vanaf 1992 het volume weer bijna ieder jaar toeneemt. De snelheid hiervan varieert. Al in 1995 en 1996 is de 10 m³ per jaar bereikt, maar het duurt tot 2004 voordat dit opnieuw gebeurt. Opvallend is dat in de laatste drie jaar (2007-2010) de volumetoename voor het voorduin groter is dan voor het hoofdduin. In de laatste jaren vindt de groei van de zeereep voornamelijk in het voorduin plaats.



Figuur 36

Mutaties in volume zeereep bij raai 19.8 van 1964 tot 2010.

Raai 21.4 (Vak 2)

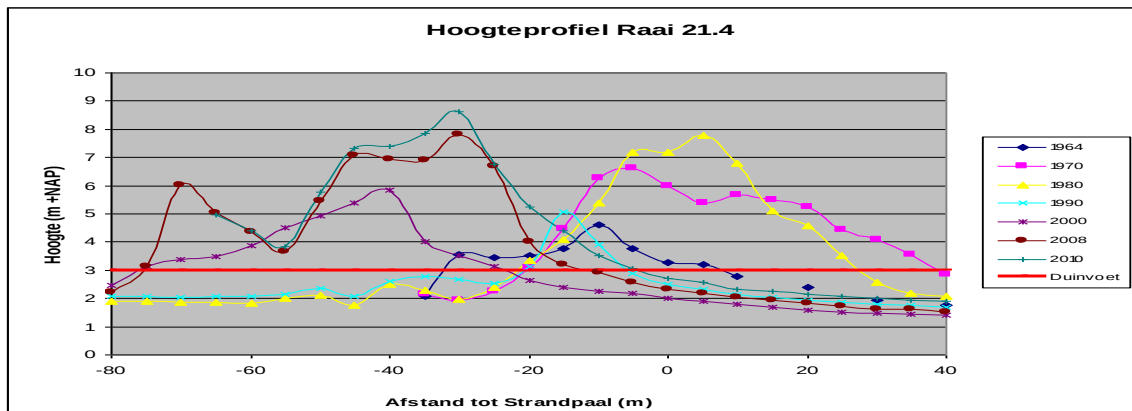
Dit profiel bevindt zich op de locatie waar zich in 1994 een doorbraak ('wash over') heeft voorgedaan (figuur 37).



Figuur 37

Doorbraak zeereep bij raai 21.4 op 28 januari 1994 (foto J. Krol, 2006).

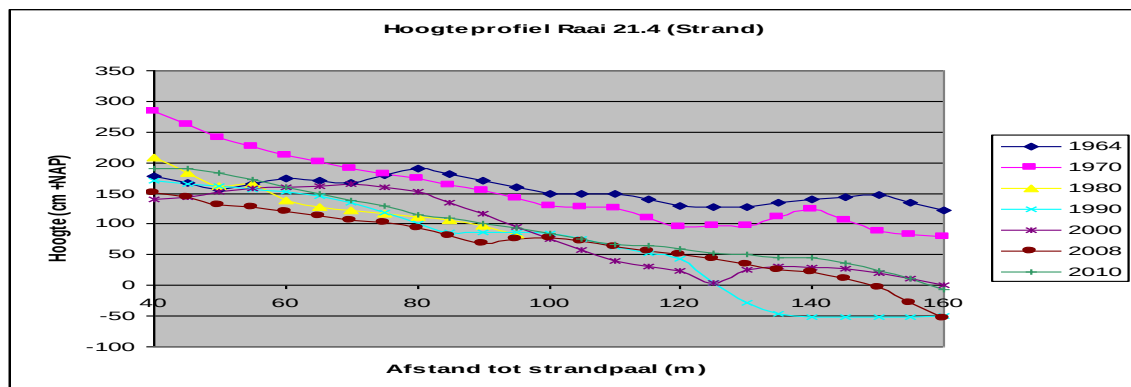
Tot en met de jaren 80 heeft zich een zeereep opgebouwd rond de locatie van de strandpaal (0 m). In 1990 is deze zeereep vrijwel geheel door de zee afgebroken, waarna er zich in 2000 landinwaarts een nieuwe zeereep vormde (-40 m) (figuur 38).



Figuur 38

Hoogteprofiel zeereep bij raai 21.4. Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (negatieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal).

In 2008 en 2010 heeft deze zeereep zich verder ontwikkeld in zeewaartse richting. Zo is de top van deze nieuwe zeereep in tien jaar tijd verplaatst van -40 m naar -30 m. En ook de voet van de zeereep verplaatst zich weer langzaam zeewaarts. In tegenstelling tot het meer westelijk gelegen Vak 1 (beschreven bij raai 19.8) vindt hier vooralsnog geen ontwikkeling van een voorduin plaats.

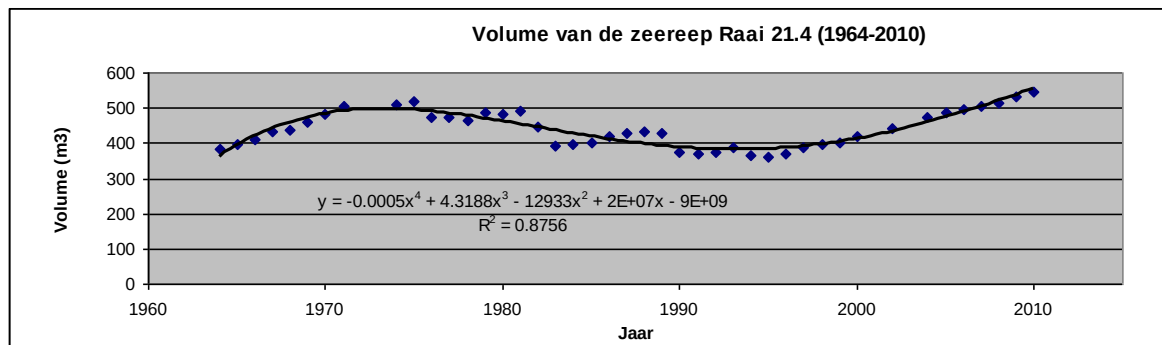


Figuur 39

Hoogteprofiel bij raai 21.4 (strand). Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (positieve waarden zijn zeewaarts van de strandpaal).

De ontwikkeling van het strand is wel vergelijkbaar met dat van profiel 19.8 (figuur 39). In 1964 en 1970 is er sprake van een hoog strand, met mogelijk primaire duintjes. Later neemt de hoogte af en wordt het strand ook vlakker. In 2010 lijkt het strand vrijwel vlak en is het niveau vergelijkbaar met de voorgaande 20 jaren.

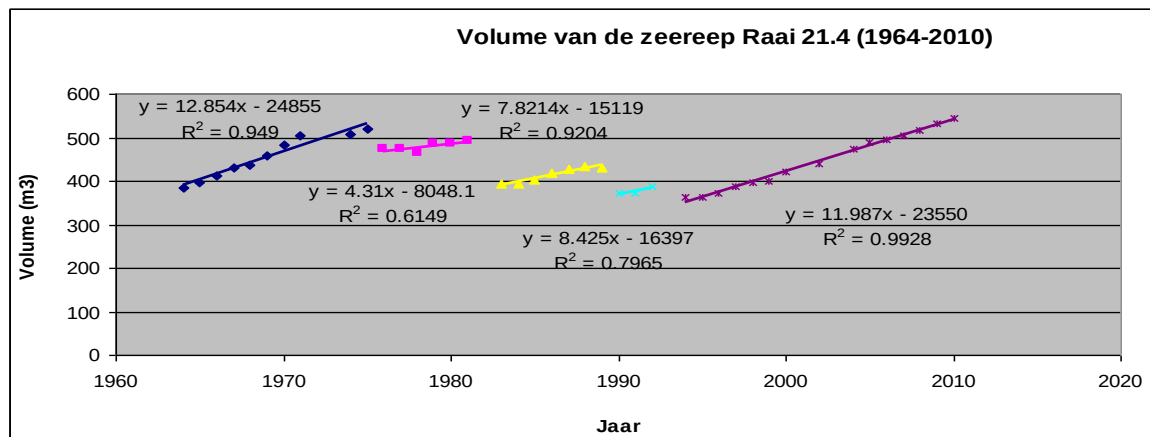
De ontwikkeling van het volume van de zeereep voor raai 21.4 is weergegeven in figuur 40. In de tijd is er geen sprake van een lineaire ontwikkeling. De polynome trendlijn in figuur 34 is een geforceerde weergave van de werkelijkheid, hetgeen tot uitdrukking komt in de lage waarde voor de R^2 . Daarom kan ook hier beter een model met meerdere perioden met een lineaire ontwikkeling en trendbreuken worden gehanteerd.



Figuur 40

Volume zeereep bij raai 21.4 van 1964 tot 2010.

Dit model is gegeven in figuur 41. Nu kunnen vijf lineaire perioden onderscheiden worden. Behalve de al eerder waargenomen trendbreuken begin jaren 80 en rond 1990 is er ook een trendbreuk halverwege de jaren 70 en een tweede breuk begin jaren 90. Na de laatste trendbreuk is er echter net als in de overige gevallen sprake van een lineaire groei, die ook hier zijn eind nog niet lijkt te hebben bereikt.

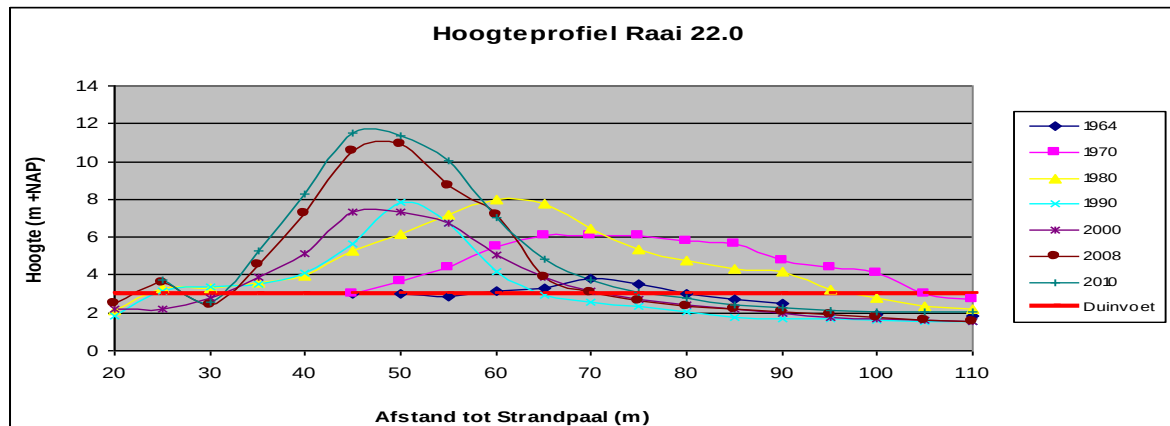


Figuur 41

Volume zeereep bij raai 21.4 van 1964 tot 2010. Vijf lineaire trendlijnen met trendbreuken.

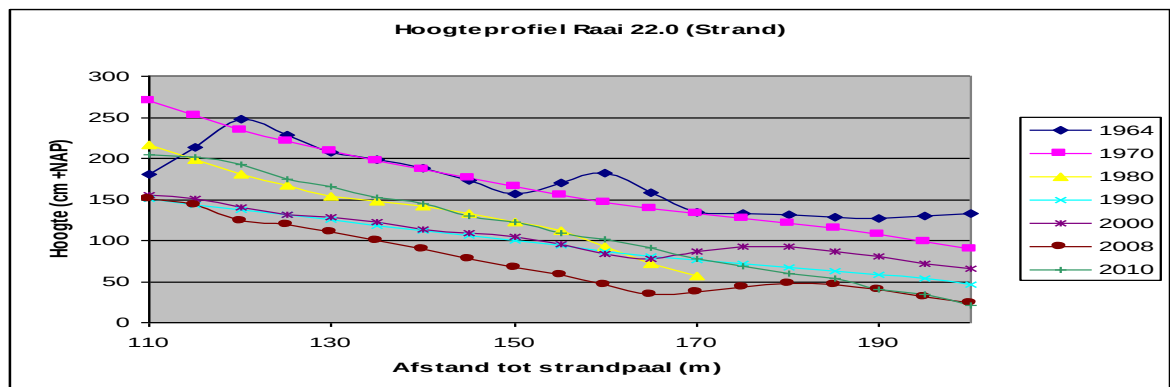
Raai 22.0 (monitoring effect bodemdaling)

Tenslotte het vak dat gekarakteriseerd wordt door de raai bij 22.0. In figuur 42 is te zien dat er in 1964 vrijwel geen zeereep aanwezig was. In eerste instantie heeft zich toen een zeereep ontwikkeld in relatief zeewaartse positie, maar in de tijd is deze landinwaarts verschoven. Na een aanvankelijk grote en hoge zeereep in 1980 is er in de twintig jaar daaropvolgend een teruggang of ten minste een stilstand geweest. Uiteindelijk heeft de zeereep zich sinds 1990 gestabiliseerd rond de 50 m en zich na 2000 ook fors in de hoogte ontwikkeld. In tien jaar tijd is de zeereep hier zo'n 4 m hoger geworden. Doordat er geen voorduin is gevormd, is er een steile duinvoet.



Figuur 42

Hoogteprofiel zeereep bij 22.0. Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (positieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal).

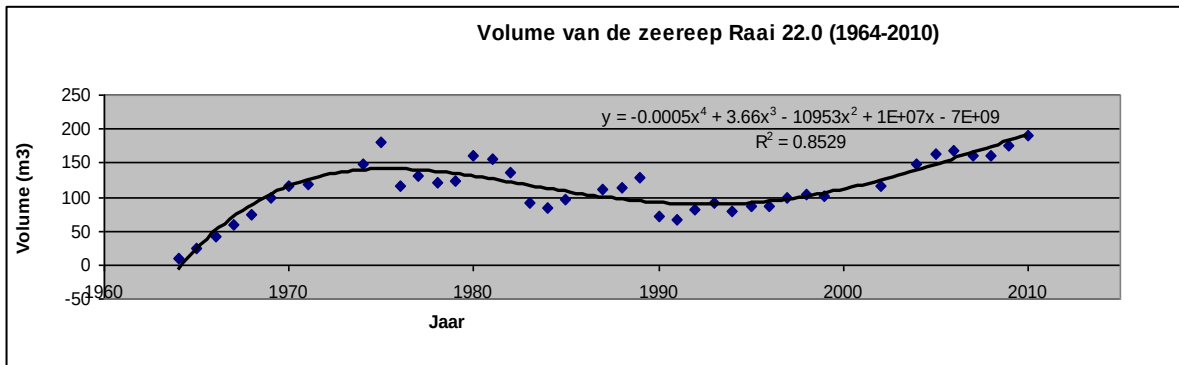


Figuur 43

Hoogteprofiel bij 22.0 (strand) Afstand gemeten ten opzichte van strandpaal (positieve waarden zijn landwaarts van de strandpaal).

Het strand (figuur 43) volgt weer hetzelfde patroon als bij raai 21.4 (Vak 2): relatief veel reliëf (primaire duintjes) in 1964 en nog steeds een hoog strand in 1970. Hierna volgt een geleidelijk afname in hoogte met als dieptepunt 2008. Tenslotte is er ook weer (net als bij 19.8 - Vak 1) een plotselinge en sterke toename geweest tussen 2008 en 2010. In dit laatste jaar is het strand weer op het niveau van 1980, maar nog steeds vrijwel zonder (zichtbaar) reliëf.

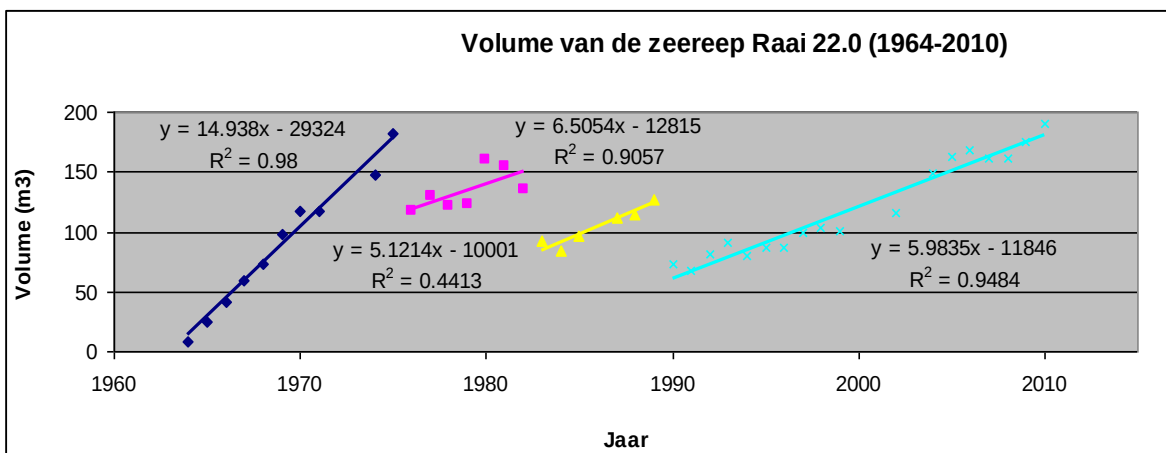
De volumeontwikkeling van de zeereep voor raai 22.0 (figuur 44) vertoont een redelijk grote gelijkenis met het beeld voor raai 21.4. Ook hier is voor de gehele periode geen sprake van een lineaire ontwikkeling, maar van verschillende lineaire ontwikkelingen onderbroken door momenten met afname van het volume.



Figuur 44

Volume zeereep bij raai 22.0 van 1964 tot 2010.

Daarom is de ontwikkeling weer opgesplitst in verschillende perioden (figuur 45). Ook hier blijkt dat er duidelijk een lineaire ontwikkeling plaatsvindt in deze afzonderlijke perioden, behalve in de periode halverwege jaren 70 tot begin jaren 80 waar de R^2 zeer laag is (0,44). Ook voor de laatste periode (vanaf 1990) is de trend niet zo sterk als voor andere profielen, maar desondanks is er sprake van een redelijk robuuste ontwikkeling, die ook hier niet af lijkt te zwakken.



Figuur 45

Volume zeereep bij raai 22.0 van 1964 tot 2010. Vier lineaire trendlijnen met breuken.

Invloed beheer

Voor de analyse van de invloed van het (dynamisch) kustbeheer op de zeereep is er een vergelijking gemaakt tussen Vak 1 en Vak 2 tijdens de referentieperiode (1995-1999). Tijdens de referentieperiode werd in Vak 1 (19.6-20.6) nog regulier kustbeheer toegepast, terwijl in Vak 2 (20.6-21.6) geëxperimenteerd werd met het stopzetten van het reguliere beheer. In tabel 4 zijn de volumes van deze twee kustvakken vóór en na de

referentieperiode weergegeven (1995 en 1999), en de veranderingen in deze tijd (zowel absoluut als procentueel). Verder is ook de ontwikkeling na 1999 weergegeven, om het effect op de langere termijn te kunnen analyseren. Hierbij is gekozen voor 2008, omdat dit het laatste jaar is waarvoor volledige data beschikbaar is.

Tabel 4

Toename zandvolume Vak 1 (regulier beheer tot 1999) en Vak 2 (regulier beheer tot 1995).

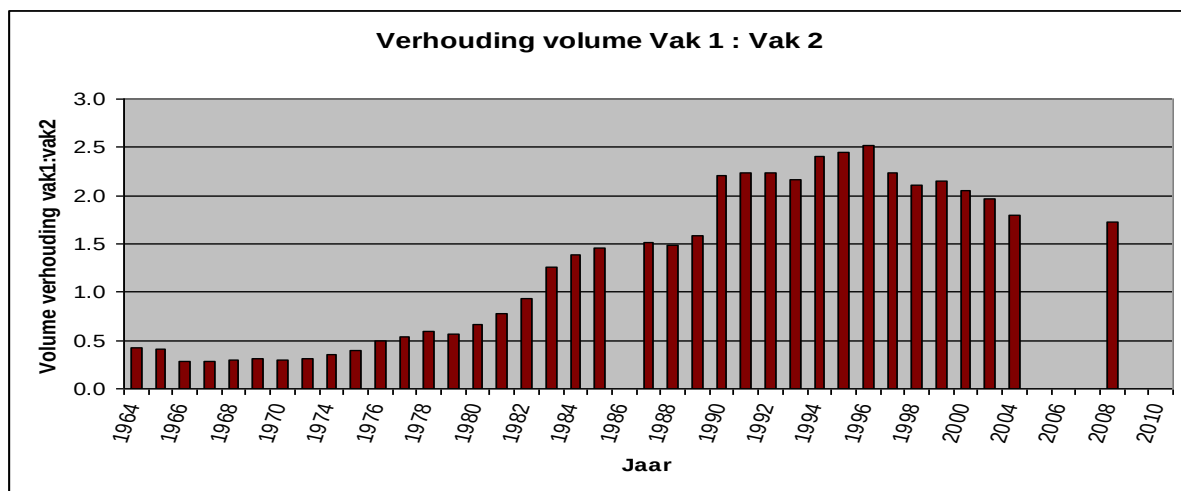
Jaar	Vak 1 (19.6-20.6)	Vak 2 (20.6-21.6)
Zandvolume 1995 (m ³)	237.313	97.143
Zandvolume 1999 (m ³)	293.905	136.415
<i>Toename 1995-1999 (m³) periode I</i>	<i>56.593</i>	<i>39.273</i>
<i>Toename 1995-1999 (%) periode I</i>	23,8	40,4
Zandvolume 2008 (m ³)	378.800	218.660
<i>Toename 1999-2008 (m³) periode II</i>	<i>84.900</i>	<i>82.240</i>
<i>Toename 1999-2008 (%) periode II</i>	28,9	60,3
Verhouding toename periode I : II (%)	66,7	47,8

Uit de tabel blijkt dat bij aanvang van het experiment in 1995 Vak 1 een fors groter duinvolume had dan Vak 2. Het verschil is meer dan een factor twee. Tijdens het experiment (1995-1999) is voor beide vakken het volume fors toegenomen. In absolute zin het meest voor Vak 1, maar in relatieve zin (procentueel) het meest voor Vak 2.

Dit patroon zet zich door na afloop van het experiment, wanneer ook voor Vak 1 het reguliere beheer wordt gestopt. Vak 1 kent nog steeds de grootste absolute toename, maar omdat het startvolume voor Vak 2 fors kleiner was, is de relatieve toename daar groter (60 versus 29 procent). Dus ook onder gelijke (beheer)omstandigheden kent Vak 2 een grotere toename van het duinvolume.

Uit de laatste regel van de tabel blijkt voor Vak 1 dat een relatief groot deel van de groei plaatsvond in periode I (1995-1999; het experiment), vergeleken met periode II (1999-2008). Voor Vak 2 is dit minder het geval, wat tot uiting komt in het lagere quotiënt.

In figuur 46 is de verhouding tussen het volume van Vak 1 en Vak 2 in de loop der tijd weergegeven.



Figuur 46

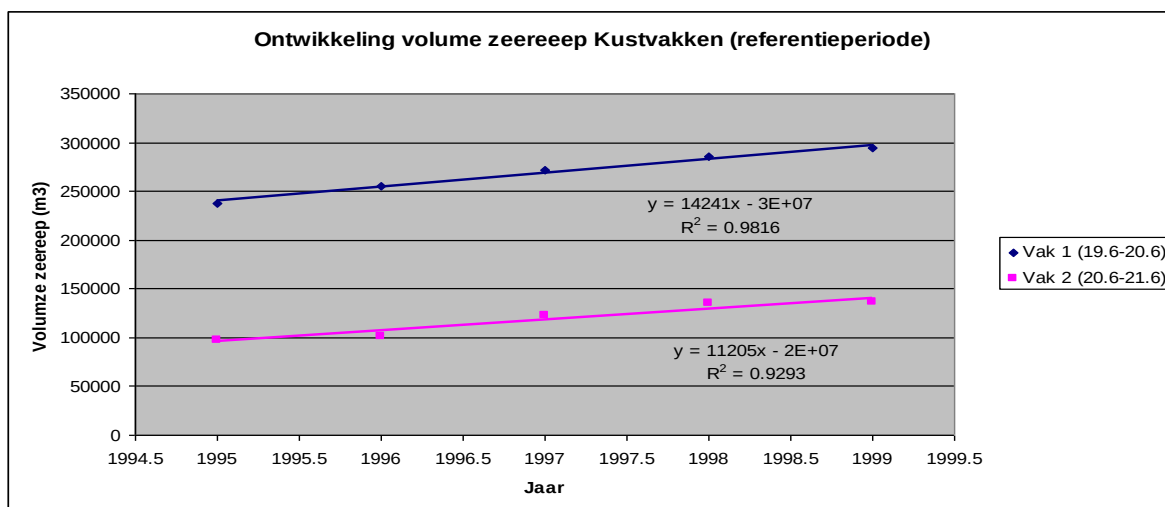
Volumeverhouding zeereep (volume Vak 1 gedeeld door volume Vak 2).

Duidelijk is dat deze verhouding langzaam fluctueert, en dat Vak 1 in de jaren 90 geruime tijd meer dan twee keer zo veel volume had als Vak 2. Na 1995 daalt deze verhouding, en neemt af tot 1,7 in 2010. Vanwege het ontbreken van veel data in de meest recente jaren, is het niet te zeggen of de dalende trend doorzet (volume Vak 2 haalt volume Vak 1 in), of tot stilstand is gekomen (volume Vak 1 blijft groter dan volume Vak 2).

Voor een vergelijking tussen de ontwikkeling van het volume van de zeereep in de kustvakken tijdens de referentieperiode (1995-1999) is deze ontwikkeling in figuur 47 weergegeven.

Opnieuw blijkt het grotere aanvangsvolume voor Vak 1, en dat deze 'voorsprong' in stand is gebleven en zelfs is toegenomen.

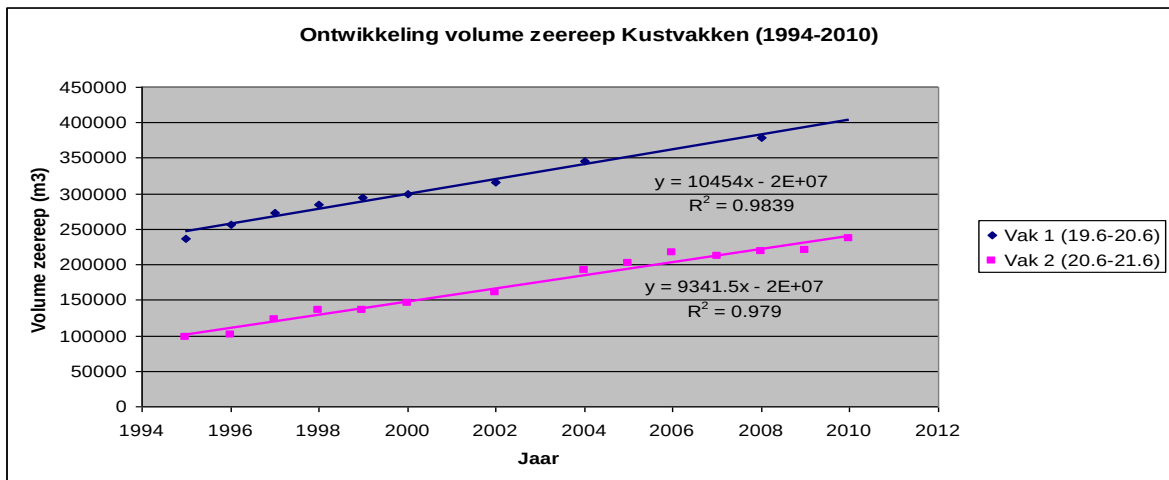
Bij de grafieken is de formule van de trendlijn weergegeven, volgens de vorm: $y = a.x + b$ waarbij a de helling van deze lineaire lijn aangeeft. Deze helling heeft een waarde van 14241 voor Vak 1, en van 11205 voor Vak 2. Dus de trendlijn geeft een grotere groei aan voor Vak 1 dan voor Vak 2. Waarbij wel dient te worden opgemerkt dat de periode zeer kort is, en de trendlijn dus op weinig data is gebaseerd.



Figuur 47

Volume zeereep voor Vak 1 (regulier beheer) en Vak 2 (regulier beheer stopgezet) tussen 1995 en 1999 (referentieperiode) met trendlijn.

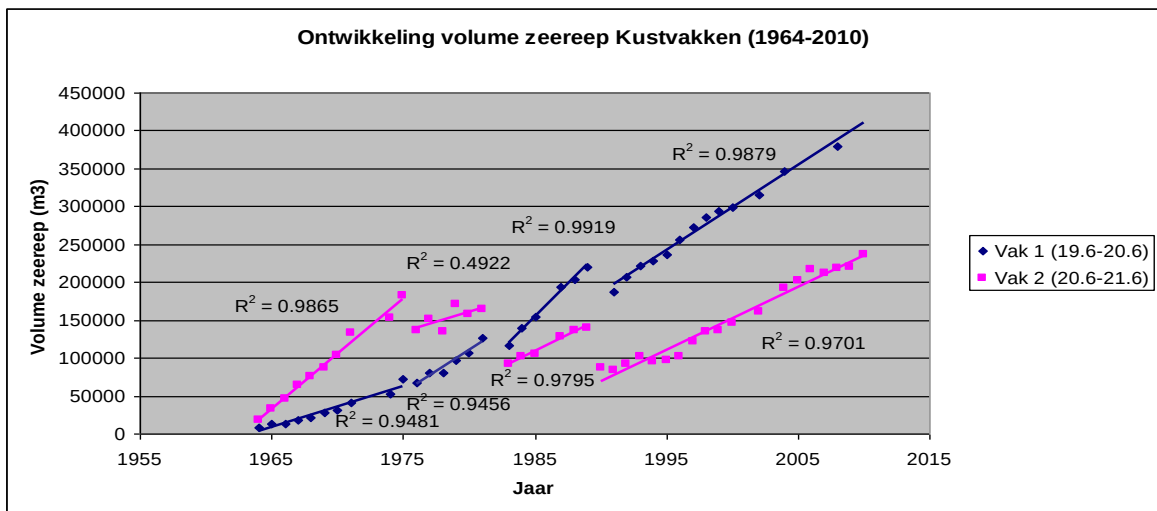
Als we kijken naar een langere periode (vanaf de start van het experiment tot 2010) krijgen we het beeld als weergegeven in figuur 48. In deze figuur lopen de trendlijnen vrijwel evenwijdig, met een helling van 10545 voor Vak 1 tegenover een helling van 9341,5 voor Vak 2. Ook hier is de hoeveelheid data echter nog beperkt, met name voor Vak 1 waarvoor na 2004 alleen nog in 2008 een volume van de zeereep kon worden berekend. Voor Vak 2 is een teruggang in volume te zien voor 2007, die een negatieve invloed heeft gehad op de totale groei en op de helling van de trendlijn.



Figuur 48

Volume zeereep voor Vak 1 en Vak 2 tussen 1995 en 2010 met trendlijnen.

Tenslotte is de ontwikkeling van het volume van de zeereep voor beide vakken ook geanalyseerd voor de langere termijn, voor de gehele onderzoeksperiode van 1964 tot 2010 (figuur 49).



Figuur 49

Ontwikkeling volume zeereep voor Vak 1 en Vak 2 tussen 1964 en 2010. Vier lineaire trendlijnen met bijbehorende trendbreuken.

Hieruit blijkt dat beide vakken een grote mate van variatie in de ontwikkeling kennen, met een groot verschil in volumegroei. Voor beide vakken is een verdeling in vier perioden gemaakt, waarvoor de helling van de trendlijn is weergegeven in tabel 5.

Tabel 5

Helling trendlijn volumegroei Vak 1 en Vak 2.

Periode	Helling Vak 1 (19.6-20.6)	Helling Vak 2 (20.6-21.6)
1 (1964-1975)	5413,1	14490,0
2 (1976-1981)	11188,0	5489,4 *
3 (1983-1989)	17043,0	8334,5
4 (1991-2010)	11182,0	8254,9

* Waarde van R^2 zeer laag

In periode 1 was de volumetoename veel groter voor Vak 2 dan voor Vak 1. Maar waar voor Vak 1 de groei toenam in periode 2, trad er voor Vak 2 verval in. Vanaf periode 3 is het volume dan ook groter voor Vak 1 dan voor Vak 2, en de helling blijft ook groter. Hoewel dat verschil wel weer kleiner is geworden voor de laatste periode (4).

Uit figuur 49 en tabel 5 blijkt dat de twee vakken zich gedurende hun historie op verschillende wijze hebben ontwikkeld. Het algemene patroon van perioden met lineaire ontwikkeling onderbroken door trendbreuken is gelijk voor beide vakken, maar de mate van reactie kent een verschil, en lijkt weinig van doen te hebben met het verschil in beheer tussen 1995 en 1999.

Analyse

Er kunnen een aantal vragen worden gesteld over de geldigheid van de gevonden resultaten. Allereerst is er de positie van de raaien, en de invloed die deze positie op de resultaten heeft. Gemiddeld zullen de raaien een representatief beeld geven van de zeereep, maar op kleine schaal en in kleine aantallen (zoals in dit onderzoek het geval is) kan een raai een afwijkend gebied tonen, of juist een karakteristiek gebied missen.

Verder is het de vraag of de afbakening van de zeereep goed is gekozen. Aan strandzijde is de afbakening helder, en voor de verschillende raaien vergelijkbaar. Maar aan landzijde ligt de grens voor verschillende raaien op een verschillende afstand. De lengte van het onderzochte profiel is daarom verschillend. Dit komt door een verschillende vorm van het profiel (en de wellicht arbitraire selectie van de grens), maar hierdoor is het gedeelte van de zeereep dat onderzocht is niet overal gelijk.

Tenslotte is het de vraag of de verschillende kustvakken wel zo direct met elkaar vergeleken kunnen worden. Allereerst is er de invloed van de doorbraak in kustvak 2, die een grote invloed heeft gehad en nog steeds heeft op de ontwikkeling van de aanwezige zeereep. En verder kan het van invloed zijn dat Vak 1 westelijker is gelegen dan Vak 2. De zandaanvoer verloopt van west naar oost, en het meeste zand wordt eerst westwaarts gesuppleerd. Hierom zou de zandaanvoer bij kustvak 1 groter kunnen zijn. En verder kan het uitmaken welke positie een kustvak inneemt in de grotere 'vorm' van het eiland. Het maakt uit of een kustvak zich in een afslaggebied bevindt, of in een gebied waarin het eiland groeit.

Voor vrijwel alle profielen geldt dat er in de onderzoeksperiode een toename in zowel de hoogte als de breedte is geweest. De toename in de breedte is vrijwel altijd (zeker in de laatste jaren) in zeewaartse richting. Voor de hoogte van de zeereep valt op dat de mate van toename erg variabel is. In het voorbeeldprofiel (raai 19.6) was er een sterke stijging in de jaren 70, een geringe stijging in de jaren 80 en 90 en weer een versnelde stijging na 2000. Vanaf 2006 lijkt een stabilisatie op te treden. Op basis van de gevonden informatie kan hier niet een duidelijke verklaring voor worden gegeven. Het is wel duidelijk dat de hoogte van de zeereep zich niet volgens

exact hetzelfde patroon ontwikkelt als het volume van de zeereep. De groei is minder constant (lineair), maar er is vrijwel nooit sprake van een afname in hoogte (behalve in het geval van een doorbraak). Dus blijkbaar wordt de hoogte van de zeereep op meer indirecte wijze beïnvloed (door hoogwatergebeurtenissen).

Voor het volume van de zeereep is voor alle profielen een over het algemeen lineaire trend vast te stellen, die verscheidene malen onderbroken wordt door een trendbreuk. Het aantal en de grootte van deze trendbreuken verschilt per raai. Voor alle raaien blijft de trend echter (lineair) oplopend, waarbij gezegd dient te worden dat voor de meest recente jaren (na 2004) de hoeveelheid bruikbare data in veel gevallen beperkt is. Hierdoor is de trendlijn voor het meest recente verleden relatief onbetrouwbaar. En wordt daarmee het doortrekken van een trendlijn naar de toekomst ook onzeker.

Voor raai 19.8 is het duidelijk dat zich na 1995 een voorduin ontwikkelt. Het hoofdduin stabiliseert zich na 2006, terwijl het voorduin vanaf 2004 groei laat zien. Voor 21.4 is een duidelijk effect van de 'wash-over' zichtbaar. Er is echter wel een continu lineaire groei. Pas recentelijk is het (tot dan toe maximale) volume van 1974 bereikt, maar de zeereep lijkt ditmaal wel verder in volume toe te nemen. Bij raai 22.0 is er tussen 1980 en 2000 een opvallende teruggang in volume en positie van de zeereep te zien. De reden hiervoor is onduidelijk. Dus is het de vraag waarom er tot 2000 nauwelijks sprake was van groei, en daarna juist weer wel (terwijl dit in andere profielen niet het geval is). Dit kan verband houden met het feit dat zich bij raai 22.0 vooralsnog geen voorduin heeft ontwikkeld. Een verklaring hiervoor kan de relatieve positie van de zeereep in de gehele kuststrook zijn. Het lijkt erop dat de kuststrook zich opbouwt onder een bepaalde hoek in de lengterichting van het eiland. Dit proces op grotere schaal kan invloed hebben op de ontwikkeling van de zeereep op kleinere schaal.

De gevonden gegevens lijken geen grote invloed van het beheer van de zeereep te suggereren. Zowel voor de periode 1995-1999 als de periode 1995-2010 vond in absolute zin de grootste groei plaats in Vak 1. En ook de helling van de grafiek van het duinvolume is in beide perioden groter voor Vak 1. Een analyse voor de langere termijn laat echter zien dat dit patroon al voor langere tijd zichtbaar was. Al voor de invoer van het dynamisch kustbeheer liet Vak 1 een sterke groei zien. Terwijl dit in het verleden anders is geweest: rond 1975 heeft er een omslag plaatsgevonden, waarna Vak 1 zich sterker is gaan ontwikkelen, en Vak 2 juist minder sterk.

Gekeken naar relatieve groei (hoeveelheid toename ten opzichte van het 'startvolume') laat Vak 2 echter wel een sterkere groei zien. En de mate van groei (weergegeven door de helling van de trendlijn) van de twee duinvakken lijkt steeds dichterbij elkaar te komen liggen. Voor de periode 1995-2010 is het verschil redelijk klein, waarbij wel gezegd dient te worden dat ook hier niet alle data benodigd voor een robuuste trendlijn beschikbaar zijn.

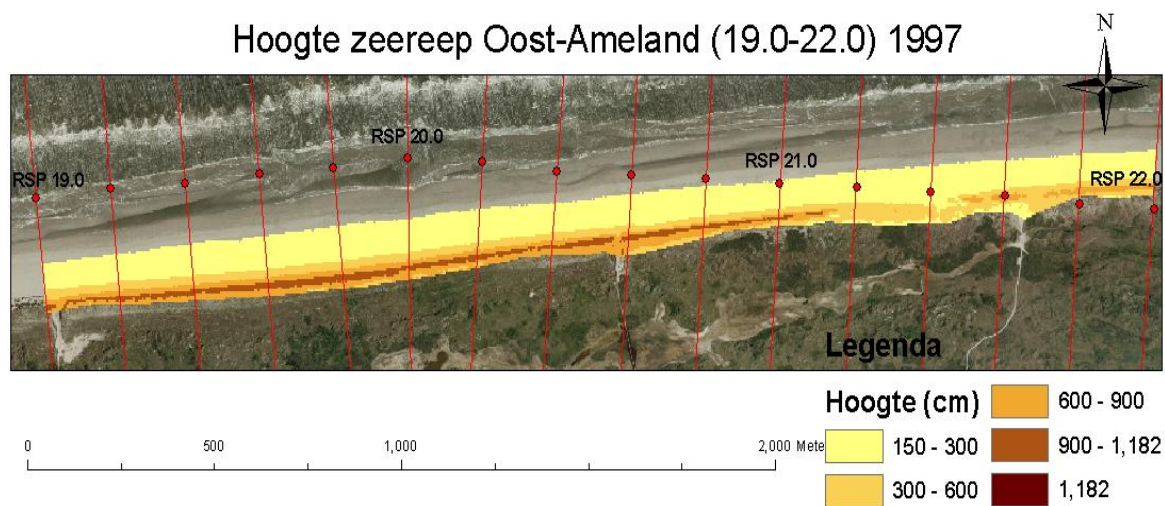
3.2.1 Laseraltimetrie

Naast de data uit de JARKUS-raaien is er ook gebruik gemaakt van laseraltimetriedata voor een analyse van volumeveranderingen van de zeereep. Waar de JARKUS-raaien een beperkt aantal dwarsprofielen geven, levert de laseraltimetrie nu een vlakdekkend beeld van de gehele zeereep zodat de variatie binnen de zeereep beter in de analyse wordt betrokken.

In de eerste paragraaf worden de resultaten getoond van de analyse van veranderingen in hoogte (en volume) van de gehele zeereep. Dit is gedaan voor de periode tussen 1997 en 2010 (de maximumperiode waarvoor data beschikbaar zijn). Vervolgens wordt in de tweede paragraaf ingezoomd op de twee vakken, om opnieuw te analyseren wat de invloed van het beheer is geweest op de hoogte en het volume van de zeereep. Dit is naast de periode 1997-2010 ook gedaan voor de periode van 1997 tot 1999: binnen de referentieperiode van het beheerexperiment.

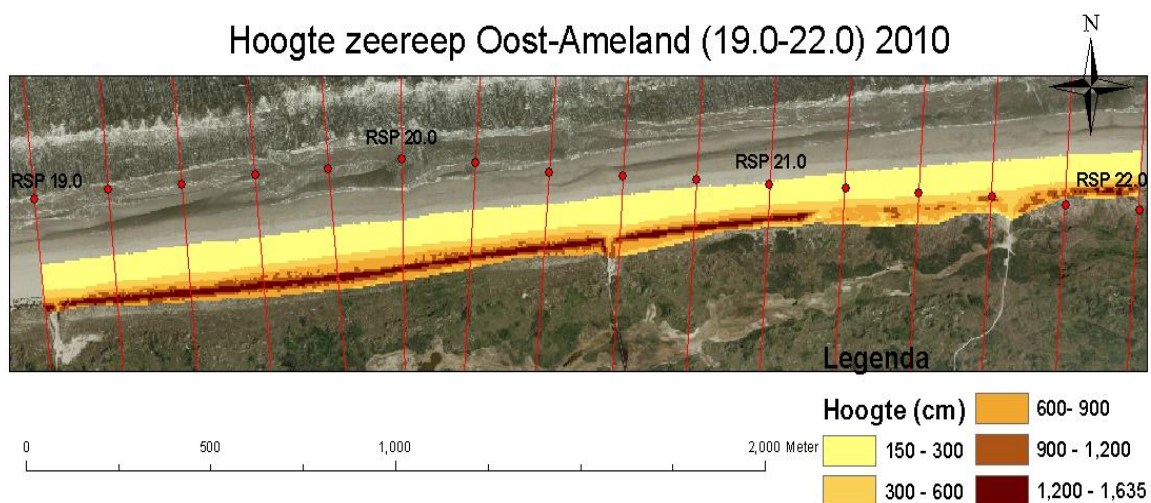
Hoogteveranderingen zeereep

In de figuren 50 en 51 is een hoogtekaart van het onderzoekgebied voor respectievelijk 1997 en 2010 weergegeven.



Figuur 50

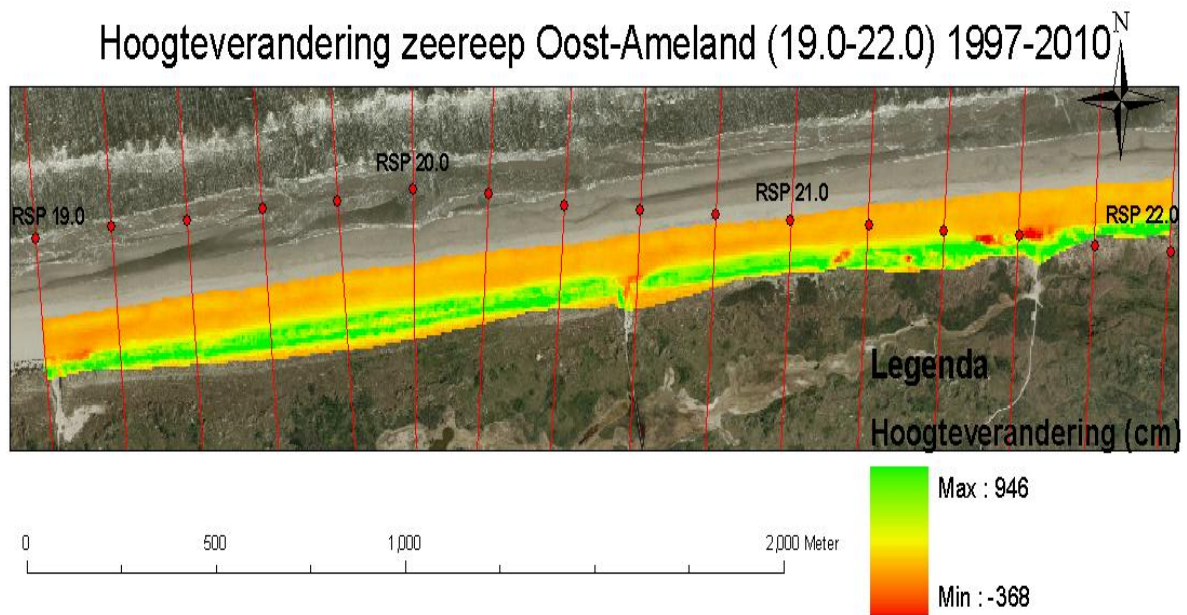
Hoogte zeereep tussen 19.0 en 22.0 in 1997.



Figuur 51

Hoogte zeereep tussen 19.0 en 22.0 in 2010.

Met behulp van deze twee hoogtekarten is de verandering in hoogte berekend. Dit leidt tot het volgende resultaat (figuur 52).



Figuur 52

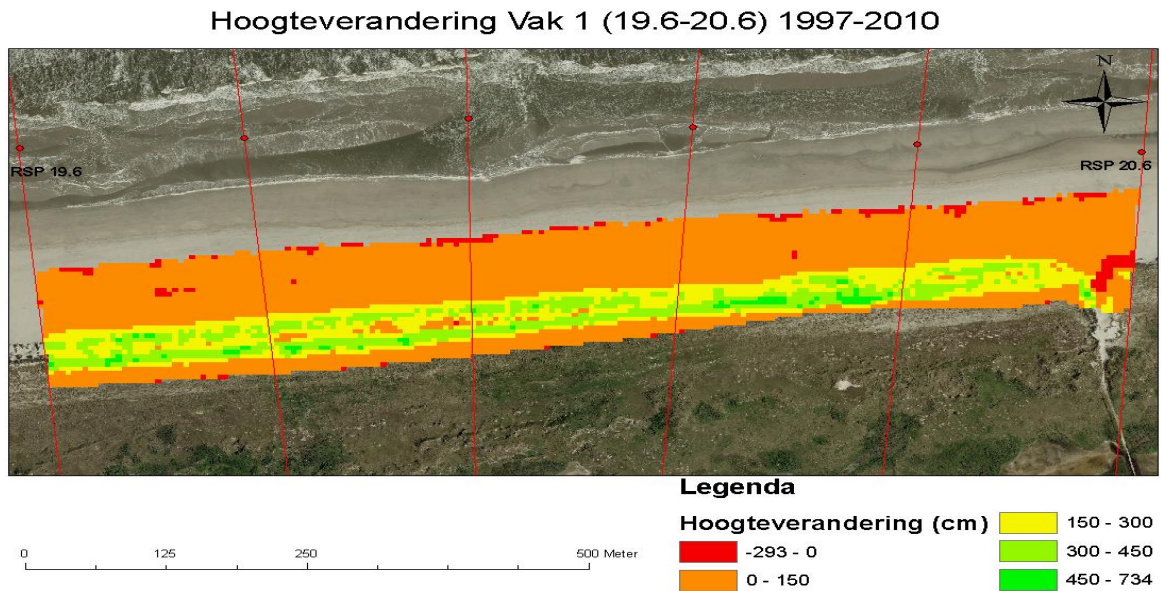
Hoogteverandering zeereep (19.0-22.0) tussen 1997 en 2010.

Dit resultaat laat zien dat over de gehele lengte van de zeereep deze in hoogte is toegenomen. Uitzondering hierop zijn enkele plaatsen waar afname in hoogte is opgetreden, met name op de plaatsen van een strandovergang. Ook het strand lijkt in hoogte toegenomen, maar de toename heeft zich voornamelijk op en voor de voorste zeereep voorgedaan.

In figuur 50 is nog duidelijk de invloed van de doorbraak van de zeereep rond 21.4 zichtbaar. In 1997 was de duinhoogte in het oostelijk deel duidelijk kleiner dan in het westelijk deel. Sindsdien heeft in beide delen een redelijk gelijke groei plaatsgevonden, waardoor in 2010 nog steeds een lagere zeereep aanwezig is ten oosten van strandpaal 21.0. Pas na strandpaal 21.8 worden weer vergelijkbare hoogten als op het westen bereikt.

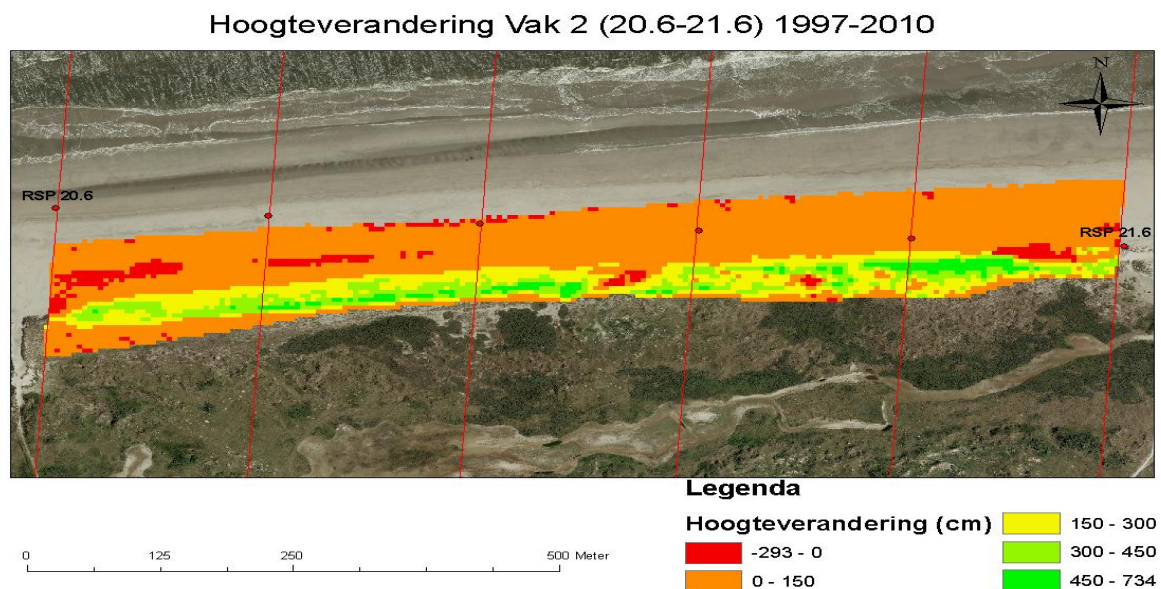
Invloed beheer

Om met behulp van deze vlakdekkende data de invloed van het beheer (regulier versus dynamisch) te analyseren is een zelfde bewerking uitgevoerd voor de beide Vakken 1 en 2 afzonderlijk. Allereerst is voor beide vakken de verandering in hoogte tussen 1997 en 2010 berekend. Dit leidt tot de volgende resultaten (figuren 53 en 54).



Figuur 53

Hoogteverandering Vak 1 tussen 1997 en 2010.



Figuur 54

Hoogteverandering Vak 2 tussen 1997 en 2010.

Voor Vak 1 (figuur 53) is opvallend dat (vooral in het westelijke deel; tot strandpaal 20.2) de toename in hoogte op twee locaties in de zeereep optreedt. Allereerst op de top van de zeereep, maar daarnaast ook aan de voet van de zeereep. Deze twee gebieden worden gescheiden door een strook waar aanzienlijk minder ophoging optreedt. Voor de ophoging aan de top van de zeereep geldt dat deze vrijwel continue is over de gehele lengte. Bij de ophoging aan de duinvoet is er afwisseling zichtbaar in de mate van ophoging; over de lengte gezien worden gebieden met veel ophoging (groen) afgewisseld door gebieden met minder ophoging (geel). Tenslotte is er aan de oostelijke rand duidelijk een gebied met uitstuiving te zien; zoals eerder benoemd betreft het hier de plaats waar een pad vanuit de duinen aansluit op het strand.

In Vak 2 (figuur 54) vindt de toename in hoogte voornamelijk plaats op de top van de zeereep, en niet zozeer aan de voet van het duin. Het patroon hier is minder regelmatig dan in het eerste vak, hoewel de toename wel redelijk constant is over de gehele breedte. Opvallend zijn de uitstuivingen die op een aantal plaatsen waarneembaar zijn in de oostelijke helft. Op drie locaties zijn duidelijke rode gebieden (dus met een afname in hoogte) waarneembaar, zonder dat hier sprake is van een strandovergang. De ontwikkeling van de oostelijke helft is in ieder geval minder regelmatig, en natuurlijker dan in het westen van dit kustvak. Dit is overigens ook het gebied dat het meest is beïnvloed door de doorbraak in 1994.

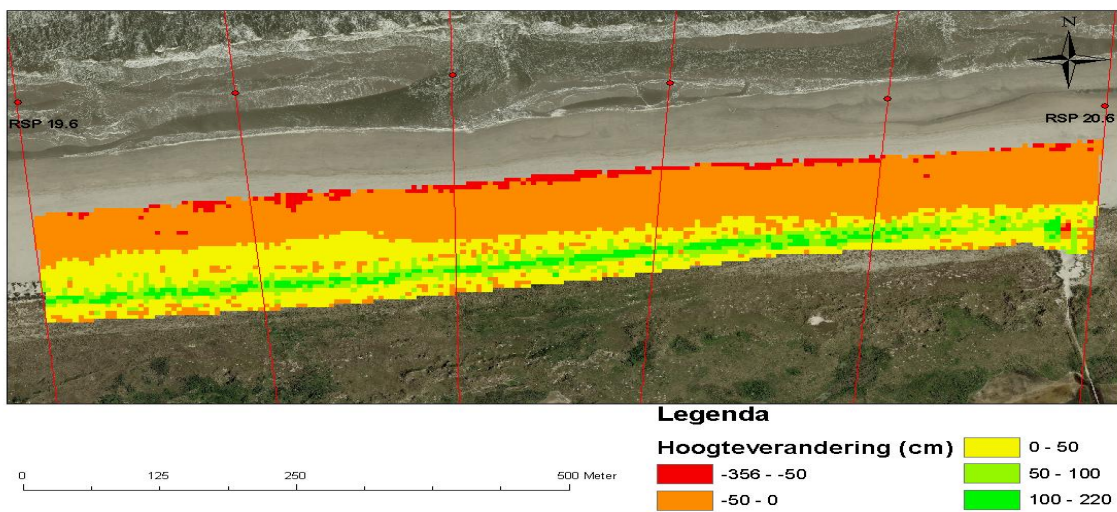
In de figuren 55 en 56 zijn de hoogteveranderingen gedurende de laatste twee jaar van het experiment met dynamisch kustbeheer voor respectievelijk Vak 1 en Vak 2 getoond. In Vak 1 werd toen nog het reguliere beheer uitgevoerd, terwijl in Vak 2 al geëxperimenteerd werd met dynamisch kustbeheer. Hoewel de betrouwbaarheid van de laseraltimetrie volgens de literatuur (o.a. Arens et al., 2010) niet echt geschikt is voor een jaar-op-jaar-vergelijking, geeft het toch een beeld van de ontwikkeling van beide kustvakken.

In beide kustvakken vindt de groei vooral plaats bovenop de zeereep. Verder geldt ook voor beide vakken dat volgens deze metingen de hoogte van het strand is afgenomen in deze twee jaar. Tenslotte zijn er in beide vakken gebieden waar de ophoging een brede strook beslaat, en niet alleen de zeereep zelf. Dit geldt voor het westelijke deel van Vak 1, en rond strandpaal 21.4 in Vak 2.

In Vak 1 is de toename redelijk gelijkmatig (uitgezonderd de brede strook die hierboven al genoemd is). De top van de zeereep neemt toe in hoogte, en het gebied voor en achter de zeereep ook, maar in mindere mate. Opvallend zijn de gebieden met een afname in hoogte voor het duin, wat kan duiden op uitstuiving.

Voor Vak 2 is het beeld opnieuw minder uniform. Ook hier is op de top van de zeereep voornamelijk sprake van een toename in hoogte, maar het beeld is grillig. Het gebied met ophoging is smaller dan in Vak 1 (behalve rond strandpaal 21.4), en er zijn relatief grote gebieden met een duidelijk afname in hoogte zichtbaar. De rode vlakken oostelijk van strandpaal 21.2 en tussen strandpaal 21.4 en 21.6 wijzen op een afname in hoogte van minstens 0,5 m. Het gebied waarin deze afname optreedt komt overeen met dat deel van de zeereep waarin ook op langere termijn afname waarneembaar was (figuur 54).

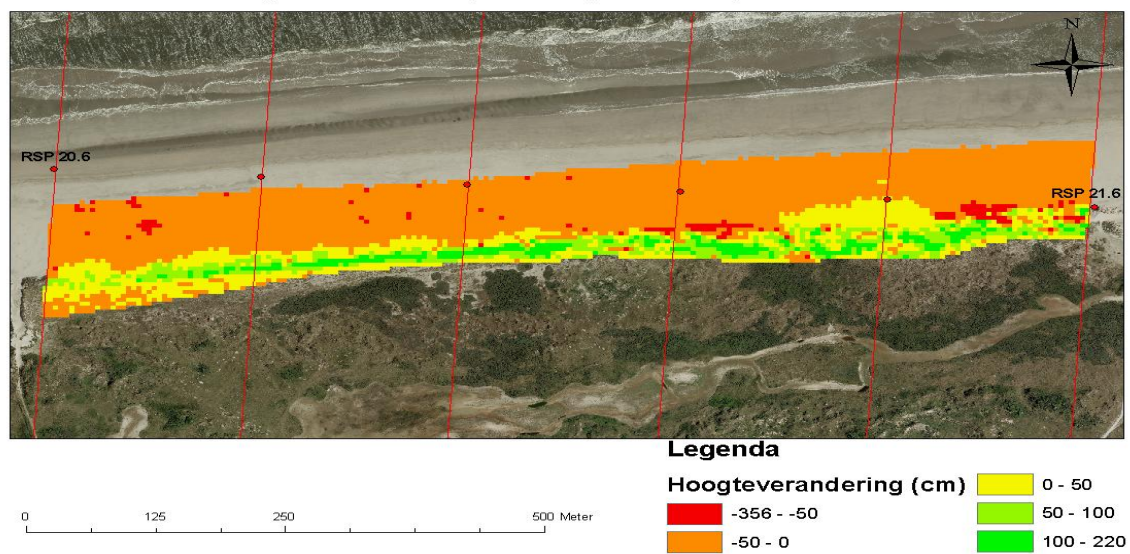
Hoogteverandering Vak 1 (19.6-20.6) 1997-1999



Figuur 55

Hoogteverandering vak 1 tussen 1997 en 1999.

Hoogteverandering Vak 2 (20.6-21.6) 1997-1999



Figuur 56

Hoogteverandering vak 2 tussen 1997 en 1999.

Volume van de zeereep

Aan de hand van de berekende veranderingen in hoogte per gridcel (zoals hierboven beschreven) kunnen de veranderingen in volume voor de verschillende vakken worden berekend. Om deze vakken voor de verschillende perioden met elkaar te vergelijken is in tabel 6 een overzicht gemaakt.

Tabel 6

Overzicht oppervlakte, veranderingen in hoogte en volumeveranderingen voor de verschillende vakken in de perioden 1997-1999 en 1997-2010.

Gebied	Periode	Oppervlakte (m ²)	Gemiddeld hoogteverschil (m/m ²)	Volumeverandering (m ³)
Vak 1 (19.6-20.6)	1997-1999	134.675	0,04	4.929
Vak 2 (20.6-21.6)	1997-1999	124.800	-0,02	-2.241
Vak 1 (19.6-20.6)	1997-2010	134.675	1,18	158.625
Vak 2 (20.6-21.6)	1997-2010	124.800	1,09	136.603
Zeereep (19.0-22.0)	1997-1999	380.850	0,01	4.058
Zeereep (19.0-22.0)	1997-2010	380.850	1,11	422.716

Voor de paar jaren in de vergelijkingsperiode (1997-1999) is een verschillend beeld te zien voor de twee vakken. In Vak 1 is een kleine toename in hoogte en volume waarneembaar, terwijl in Vak 2 een kleine afname zichtbaar is. Deze geringe toename of afname komt overeen met het beeld in de paragraaf 'Invloed beheer'. Blijkbaar compenseert de afname op het strand voor de toename in de zeereep. Dit is ook zichtbaar in de cijfers voor de totale zeereep, die bijna gelijk aan nul zijn. De verschillen tussen de vakken zijn te klein om op basis van deze periode een verschil in ontwikkeling tussen de vakken aan te kunnen wijzen.

Voor de langere termijn (tussen 1997 en 2010) is de hoogte van de zeereep gemiddeld ruim 1 m toegenomen. Tussen Vak 1 en Vak 2 is het verschil 9 cm, waarbij de grootste toename in Vak 1 was. Hier is de gemiddelde hoogte (en daarmee ook het volume) 7,6% meer toegenomen dan in Vak 2. De waarde van de hoogtestijging voor de gehele zeereep ligt tussen die van de beide vakken in.

Voor de verandering in volume is de verhouding tussen de vakken hetzelfde als bij de gemiddelde verandering in hoogte. In Vak 2 is 22.000 m³ zand meer achtergebleven dan in Vak 1. In de zeereep van 3 km lengte is bijna 423.000 m³ aan volume gewonnen in de dertien jaar van de onderzochte periode. Dat is ruim 32.500 m³ per jaar.

Analyse

De gevonden resultaten laten een redelijk gelijke toename in hoogte zien over de gehele breedte van de zeereep, met uitzondering van locaties van de strandovergangen en enkele stuifkuilen in het oosten van de zeereep. Bij de 'wash-over' (rond raai 21.4) is de toename in hoogte meer landinwaarts dan in de rest van de zeereep.

In Vak 1 heeft de toename in hoogte zowel op de top van de zeereep als aan de voet (bij het voorduin) plaatsgevonden. Met name in het westelijke deel van dit kustvak. Dus ook aan de hand van de laseraltimetriedata kan de ontwikkeling van een voorduin worden gevonden.

In Vak 2 is de toename vooral op de top, en over het algemeen minder regelmatig dan in Vak 1. In dit kustvak zijn ook stuifkuilen waar te nemen; ronde gebieden in de zeereep waar de hoogte is afgenomen terwijl in het omliggende gebied de hoogte juist is toegenomen. Dit kan een effect zijn van een grotere natuurlijke dynamiek ten gevolge van het dynamisch kustbeheer (dat hier eerder is ingevoerd en meer effect zou kunnen hebben). Anderzijds kan het ook een gevolg zijn van een andere dynamiek ten gevolge van de doorbraak die nog duidelijk effect heeft in Vak 2.

Gekeken naar het volume heeft Vak 1 een sterkere toename dan Vak 2. Dit komt overeen met de resultaten gevonden in de vorige paragraaf (3.1.1).

In dit onderzoek zijn twee methoden gebruikt om de ontwikkeling van het volume van de zeereep te kwantificeren. Allereerst de JARKUS-data (paragraaf 3.1.1) waarbij het volume van één strook berekend is, die uiteindelijk geëxtrapoleerd is naar de gehele lengte van een kustvak. Hierbij is het volume van de zeereep boven een duinvoet van 3 m +NAP berekend. Met de tweede methode (in deze paragraaf) hebben wij de laseraltimetriedata gebruikt om een vlakdekkend beeld van de ontwikkelingen in hoogte en volume van de zeereep te verkrijgen. Hiervoor is aan landzijde dezelfde grens gehanteerd als bij de methode van de JARKUS-data, maar aan zeezijde is een grens van 1,5 m +NAP gebruikt om ook de ontwikkelingen op het eerste deel van het strand te analyseren.

Voor de eerste methode (JARKUS) waren gegevens vanaf 1964 beschikbaar, maar ontbraken in een aantal jaren data om de volledige zeereep te beschrijven. De gegevens van de tweede methode (laseraltimetrie) worden sinds 1997 verzameld, en zijn sindsdien voor (vrijwel) elk jaar beschikbaar. Om beide methoden met elkaar te vergelijken zijn de uitkomsten van beide methoden hieronder bij elkaar in gezet (tabel 7).

Tabel 7

Toename volume zeereep zoals berekend met behulp van JARKUS- en laseraltimetriedata voor respectievelijk de periode 1997-2008 en 1997-2010.

Methode	Gebied	Toename volume (m ³)
JARKUS ('97-'08)	Vak 1 (19.6-20.6)	106.528
JARKUS ('97-'08)	Vak 2 (20.6-21.6)	96.610
Laseraltimetrie ('97-'10)	Vak 1 (19.6-20.6)	158.625
Laseraltimetrie ('97-'10)	Vak 2 (20.6-21.6)	136.603
JARKUS ('97-'08)	Zeereep (19.0-22.0)	280.495
Laseraltimetrie ('97-'10)	Zeereep (19.0-22.0)	422.716

Vanwege het ontbreken van volledige data voor 2009 en 2010 is voor de JARKUS-methode de periode tussen 1997 en 2008 gebruikt. Voor laseraltimetrie was de periode 1997-2010, zodat er een verschil van twee jaar bestaat voor de periode die voor deze gegevens is gebruikt. Dus de periode van methode twee is zo'n 18% langer, wat bijdraagt aan de hogere waarden voor deze methode. Uit de tabel blijkt dat de waarden voor de laseraltimetrie-methode hoger liggen dan voor de JARKUS-methode. De verschillen variëren van 40.000 m³ voor Vak 2 tot 142.000 m³ voor de gehele zeereep. Dit is een verschil van ruim 30%.

Naast het al eerder besproken verschil in meetperiode dragen ook de verschillen in de methode hieraan bij. De JARKUS-methode gebruikt transecten die geëxtrapoleerd worden. Deze transecten zijn niet geselecteerd op representativiteit, en vanwege de variatie in de zeereep is het zeer onwaarschijnlijk dat een transect een goede weergave is van de gehele 200 m die gerepresenteerd wordt. Methode twee (laseraltimetrie) is vlakdekkend en heeft dit probleem minder. Maar omdat de gridcellen 5x5 m zijn, geeft ook deze methode een versimpeld beeld van de werkelijkheid. Verder is bij de laseraltimetrie ook het strand in de analyse meegenomen, wat alleen al een reden is dat beide methoden niet één op één met elkaar vergeleken kunnen worden. En aan de landzijde is voor de laseraltimetrie een rechte lijn getrokken als begrenzing van de zeereep. Omdat de zeereep grillig van vorm is, zal deze lijn niet altijd het werkelijke verloop van de zeereep volgen. Omdat ook de JARKUS-data vanaf 1997 op laseraltimetrie-data gebaseerd zijn, zullen meetfouten niet bijdragen aan verschillende uitkomsten voor de twee methoden. Deze zijn waarschijnlijk wel aanwezig, maar voor beide methoden even groot. Tenzij er een groot verschil in meetfouten bestaat tussen de jaren 2008 en 2010. In dat geval kunnen meetfouten wel een rol hebben gespeeld.

Vanwege de verschillen is het interessanter om naast de absolute getallen ook naar de relatieve verschillen tussen de zeerepen te kijken. Daarom is in tabel 8 de verhouding tussen de uitkomst van methode één en de uitkomst van methode twee berekend. Het blijkt dat deze verhouding vrijwel constant is; de waarden variëren tussen 0,66 en 0,71. Beide methoden geven dus een overeenkomstig beeld voor de ontwikkelingen van de verschillende kustvakken. En dan met name voor de verhouding tussen deze vakken.

Tabel 8

Verhouding toename volume zeereep tussen JARKUS- en laseraltimetriedata (eerste drie rijen) en tussen de vakken en de gehele zeereep (onderste vier rijen).

		Volume één : Volume twee
Vak 1 (JARKUS)	Vak 1 (Laseraltimetrie)	0,67
Vak 2 (JARKUS)	Vak 2 (Laseraltimetrie)	0,71
Zeereep (JARKUS)	Zeereep (Laseraltimetrie)	0,66
		Volume één : Volume twee
Vak 1 (JARKUS)	Zeereep (JARKUS)	0,38
Vak 2 (JARKUS)	Zeereep (JARKUS)	0,34
Vak 1 (Laseraltimetrie)	Zeereep (Laseraltimetrie)	0,38
Vak 2 (Laseraltimetrie)	Zeereep (Laseraltimetrie)	0,32

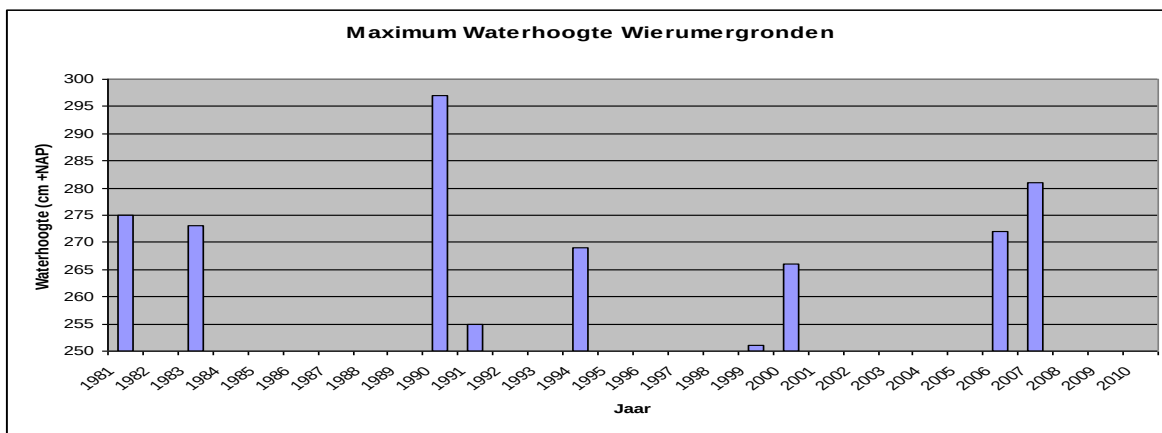
Verder is voor beide methoden de verhouding tussen zowel Vak 1 (19.6-20.6) en de zeereep (19.0-22.0) als ook Vak 2 (20.6-21.6) en de zeereep berekend. Deze verhouding is exact hetzelfde voor Vak 1, en vrijwel gelijk voor Vak 2. Ook hieruit valt te concluderen dat beide methoden de verhoudingen tussen de vakken (vrijwel) gelijk berekenen.

3.2.2 Hoogwater

Op basis van zowel de waterhoogte als de golfhoogte is een aantal jaren met hoogwatergebeurtenissen ('events') geselecteerd.

Waterhoogte Wierumergronden

Figuur 57 geeft de extreme waterstanden aan voor het meetstation Wierumergronden. Voor elk jaar is de maximale waterhoogte vastgesteld, zodat alleen de meest extreme gebeurtenis in een jaar is weergegeven. Gekozen is om alleen de waterhoogten van meer dan 250 cm +NAP weer te geven. De reden hiervoor is dat daarmee de jaren met echt hoge waterstanden direct te herkennen zijn en er geen ruis is van de andere jaren. Data van voor 1981 ontbreken, dus de geanalyseerde periode komt niet geheel overeen met de periode die gehanteerd is voor de analyse van de databestanden van de zeereep.



Figuur 57

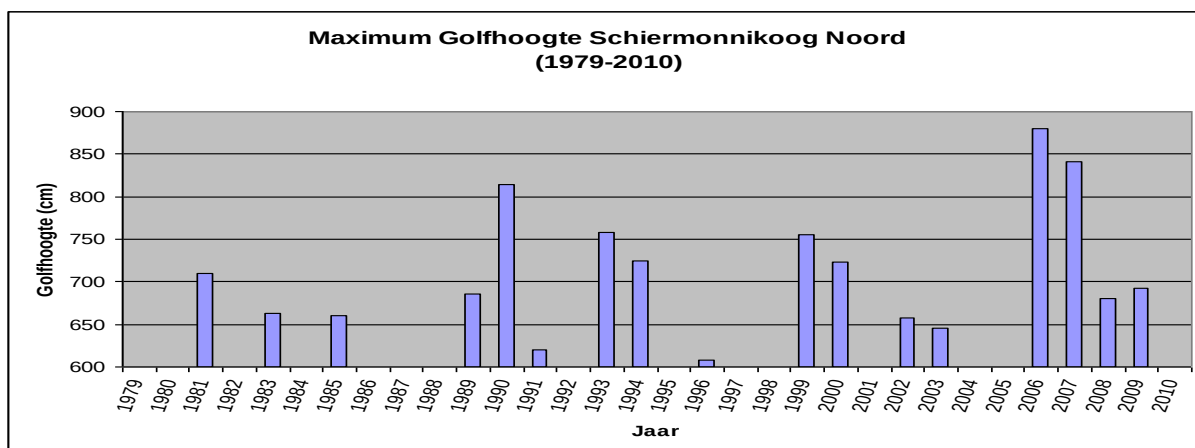
Maximum waterhoogte Wierumergronden (1981- augustus 2010) (RWS, 2010).

De meest duidelijke piek is die van 1990. De waterhoogte van bijna 3 m +NAP is zeer extreem, ook vergeleken met de andere maximale waarden. Andere jaren met 'events' zijn 1981, 1983, 1994, 2006 en 2007. Deze jaren hebben een duidelijke hoogwatergebeurtenis, wat een indicatie is voor een storm bij Ameland. Dus de mogelijkheid bestaat dat het effect hiervan zichtbaar is op de ontwikkeling van de zeereep.

Golfhoogte Schiermonnikoog Noord

In figuur 58 is de andere geanalyseerde grootte weergegeven: de maximale golfhoogte. Ook hier zijn alleen de maximumwaarden getoond, en is er een ondergrens (600 cm) gekozen om het beeld overzichtelijk te houden. De periode is vrijwel gelijk aan die van de waterhoogte hierboven; vanaf 1979 (in plaats van 1981) tot 2010.

Ook voor de golfhoogte is 1990 een piekjaar, maar voor deze grootte zijn de pieken in 2006 en 2007 hoger. 2006 heeft de hoogste waarde van bijna 9 m, gevolgd door 2007 en pas op de derde plaats 1990. Overige 'piek jaren' zijn 1981, 1989, 1993, 1994, 2000 en 2001.



Figuur 58

Maximum golfhoogte Schiermonnikoog Noord (1979 - augustus 2010) (RWS, 2010).

Analyse

Als de twee indicatoren water- en golfhoogte met elkaar worden gecombineerd, kan een indicatie worden verkregen in welke jaren de zeereep op Ameland getroffen is door een belangrijke storm. Waarbij nogmaals gezegd dient te worden dat dit slechts een indicatie betreft, omdat andere factoren als windrichting ook van grote invloed zijn.

Het naast elkaar leggen van de beschreven 'piekjaren' leidt tot de volgende serie: 1981, 1990, 1994, 2006 en 2007. Waarbij 1990 voor beide indicatoren een zeer extreme waarde is. Jaren die slechts voor één van de indicatoren een piekjaar vormen zijn 1983, 1989, 1993, 2000 en 2001.

3.2.3 Luchtfotoanalyse

In deze paragraaf worden de resultaten van de luchtfotoanalyse gegeven. Aan de hand van luchtfoto's is voor de kustvakken 1 en 2 voor twee verschillende jaren (2003 en 2009) de bodembedekking geïnclassificeerd. De onderscheiden klassen zijn 'helm', 'overstoven vegetatie (helm)' en 'kaal zand'. Eerst wordt de situatie voor 2003 beschreven, vervolgens die voor 2009 en ten slotte worden de ontwikkelingen geanalyseerd.

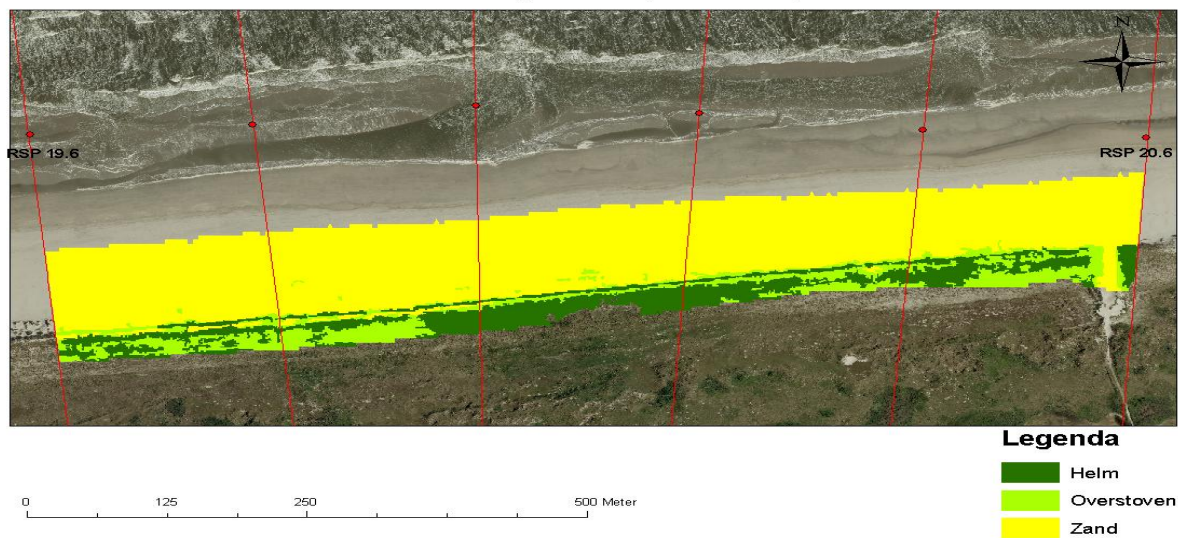
Bodembedekking 2003

In 2003 is het gebied achter de zeereep in Vak 1 grotendeels bedekt met vegetatie (figuur 59). Helm en overstoven helm wisselen elkaar af. Op de top groeit een strook met helm, terwijl de helling van de zeereep (zowel aan de voor- als de achterzijde) uit kaal zand bestaat. Voor de zeereep is vrijwel geen vegetatie aanwezig: het strand is onbegroeid.

In Vak 2 (figuur 60) is nog duidelijk het effect van de doorbraak zichtbaar. Ook bij de bodembedekking is de zeereep duidelijk onderbroken. Waar in het westelijk deel (ongeveer tot kilometer 21.1) de top van de zeereep en het achterliggende terrein begroeid is met helm of overstoven helm, is de bodem in het oosten voornamelijk bedekt met kaal zand. Dit kale zand strekt zich ver uit in het gebied achter de zeereep, en reikt zelfs bijna tot aan de achterliggende duinvallei. Hier en daar zijn nog wel plekken met enige vegetatie aanwezig.

Het patroon op het westelijke deel van de zeereep in Vak 2 is grotendeels gelijk aan dat in Vak 1. Achter de zeereep is veel vegetatie, net als op de top van de zeereep. De hellingen van de zeereep zijn kaal, net als het gebied voor de zeereep. En ook het strand is in dit vak vrij van vegetatie.

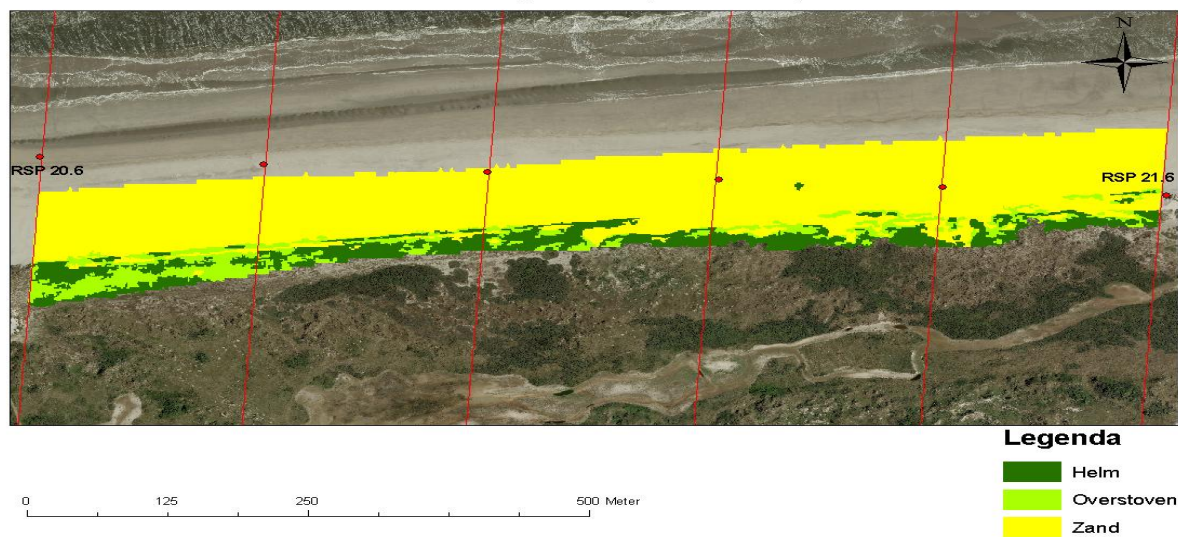
Bodembedekking Vak 1 (19.6-20.6) 2003



Figuur 59

Bodembedekking Vak 1 (19.6-20.6) in 2003. Achtergrond: luchtfoto 2009.

Bodembedekking Vak 2 (20.6-21.6) 2003

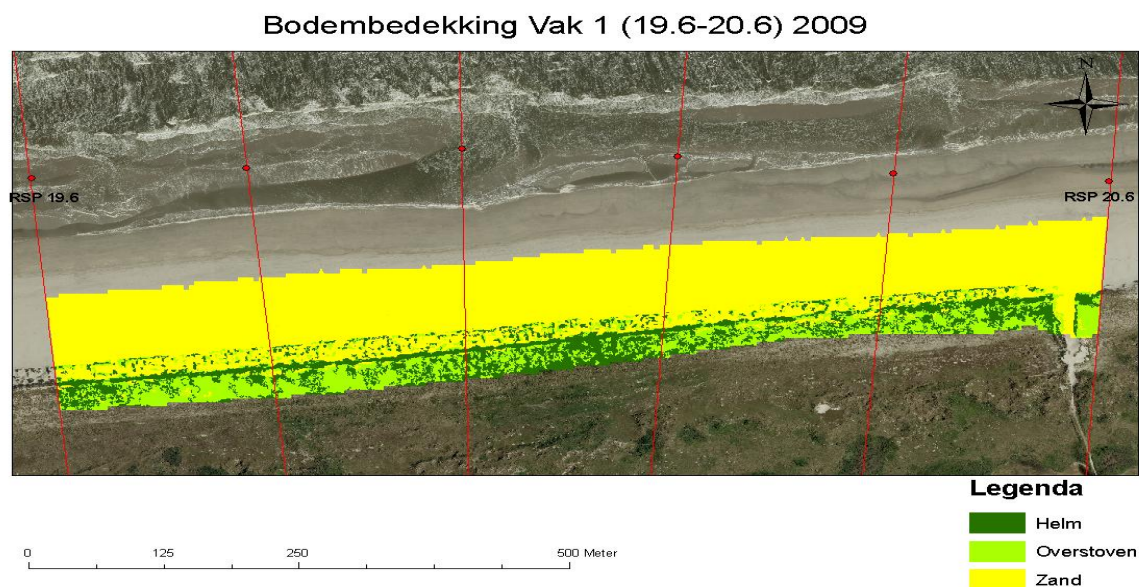


Figuur 60

Bodembedekking Vak 2 (20.6-21.6) in 2003. Achtergrond: luchtfoto 2009.

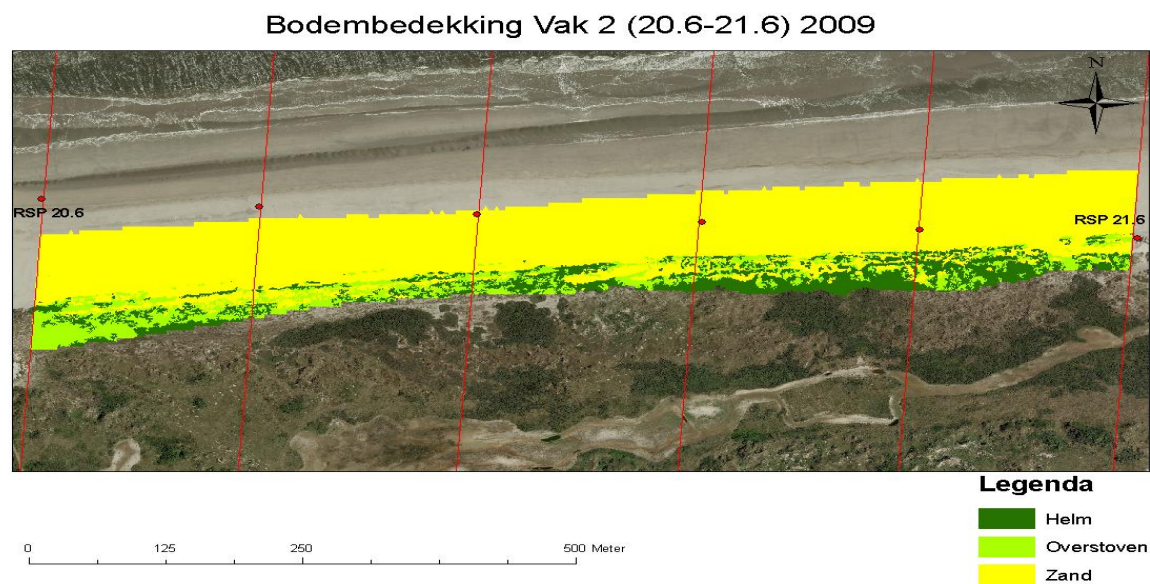
Bodembedekking 2009

In 2009 is het beeld van de zeereep voor Vak 1 minder uniform. In de analyse van de bodembedekking (figuur 61) is te zien dat het gebied achter de zeereep nog steeds vrijwel geheel begroeid is. Wel is de begroeiing meer gevarieerd dan in 2003; helm en overstoven helm wisselen elkaar af.



Figuur 61

Bodembedekking Vak 1 (19.6-20.6) in 2009.



Figuur 62

Bodembedekking Vak 2 (20.6-21.6) in 2009.

De top van de zeereep is nog steeds begroeid met helm, en de helling aan de achterzijde van de zeereep is nu ook vrijwel geheel begroeid. De helling aan de voorzijde bestaat nog steeds vrijwel geheel uit onbedekt zand. Aan de voorzijde (strandzijde) van de zeereep is echter de grootste verandering waar te nemen. Een strook van ca. 50 m is bedekt met vlekken van helm en overstoven helm. Opvallend hierbij is dat de grens hiervan een rechte lijn vormt aan de zeezijde. Waar de zeereep zelf nog enige bochten kent, is de grens van deze vegetatie voor de zeereep vrijwel geheel recht.

Ook Vak 2 kent grote verschillen in bodembedekking bij vergelijking van 2009 (figuur 62) met 2003. In 2009 is het beeld voor de zeereep in Vak 2 meer uniform geworden. Het gebied van de doorbraak rond 21.4 is nu ook grotendeels bedekt met vegetatie. Grote delen van het voorheen kale zand zijn nu bedekt. In het westelijk deel is de vegetatie echter juist afgenomen. Hier is nu meer kaal zand dan voorheen. De top van de zeereep is grotendeels begroeid, maar vormt geen doorgetrokken lijn van vegetatie. Op meerdere plaatsen wordt deze onderbroken. De hellingen van de zeereep zijn vrijwel vegetatieloos, en ook op het strand is bijna geen vegetatie te vinden. Alleen in het meest westelijke deel van Vak 2 (net ten oosten van raai 20.6) is ook enige begroeiing in het gebied net voor de zeereep waar te nemen.

Analyse

Om een analyse te maken van de veranderingen in bodembedekking (vegetatie) zijn er verschilkaarten gemaakt voor de bodembedekking in beide geanalyseerde vakken. In deze kaarten is de ontwikkeling in 2009 ten opzichte van 2003 inzichtelijk gemaakt aan de hand van een kleurenschema. Figuur 63 geeft het resultaat voor Vak 1.

Met donkergroen (helm), lichtgroen (overstoven helm) en geel (zand) zijn de gebieden weergegeven waarin geen verandering is opgetreden tussen 2003 en 2009. Ook de gebieden waarvoor in 2003 geen data beschikbaar waren maar in 2009 wel, zijn in deze categorieën ingedeeld. Met de overige kleuren zijn de gebieden aangeduid waarin wel veranderingen in bodembedekking zijn opgetreden in deze periode. De betekenis hiervan is weergegeven in de legenda.

In het gebied achter de zeereep overheersen de kleuren rood, donkergroen, lichtgroen en lichtblauw. Dit duidt erop dat de bodembedekking zowel in 2003 als 2009 voornamelijk bestond uit helm en overstoven helm, maar dat er tussen deze categorieën wel uitwisseling is geweest.

Bij de zuidelijke (landwaartse) helling van de zeereep is veel roze, paars en lichtblauw te zien. Hier is kaal zand bedekt geraakt met (overstoven helm), of overstoven helm vervangen door helm.

Voor de top van de zeereep is de ontwikkeling niet eenvoudig weer te geven, maar de kleuren donkergroen en rood overheersen. De aanwezige helm is dus in stand gebleven, of overstoven geraakt.

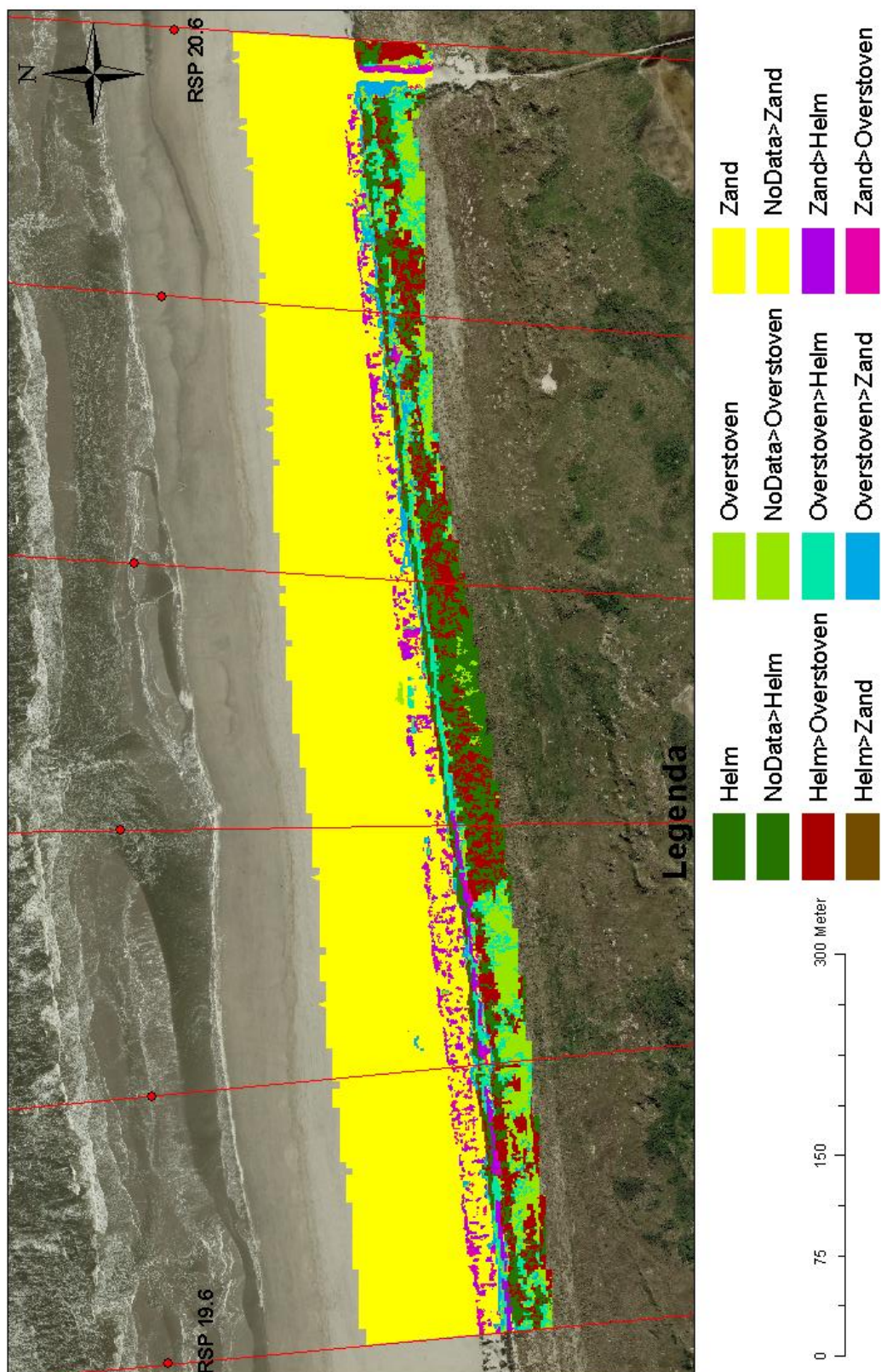
Vóór de zeereep (zeezijde) zijn meerdere ontwikkelingen zichtbaar, waarbij de overgang van zand naar (overstoven) helm domineert. Daarnaast zijn er (in mindere) mate ook gebieden waar (overstoven) helm vervangen is door zand, met name in het oostelijke deel van dit vak.

Interessant is tenslotte de ontwikkeling rond de doorgang naast raai 20.6. Deze doorgang lijkt naar het westen opgeschoven. Het oostelijk deel is bedekt geraakt (paars en roze), terwijl dit gecompenseerd is door 'nieuw' zand in het westelijke deel (donkerblauw).

Ook voor Vak 2 is volgens hetzelfde principe een kaart gemaakt met de veranderingen in bodembedekking tussen 2003 en 2009 (fig. 64). Ook op deze kaart is weer een duidelijk onderscheid zichtbaar tussen het westelijke en oostelijke deel. Daarom zullen deze twee delen afzonderlijk worden beschreven.

In het westen is achter de zeereep een deel van de helm overstoven tussen 2003 en 2009. Daarnaast is een deel van helm in stand gebleven, en ook een deel van de overstoven helm overgegaan naar de klasse van niet overstoven helm. Tenslotte is ook op een aantal plaatsen kaal zand zichtbaar geworden (donkerblauw). Op de hellingen van de zeereep is relatief weinig veranderd; deze zijn nog grotendeels onbedekt (kaal zand), hoewel hier er dan wel vegetatie is ontwikkeld of juist verdwenen. Op de top van de zeereep is juist wel een en ander veranderd. Op verscheidene plaatsen is overstoven helm vervangen door zand, terwijl op enkele andere plaatsen het tegenovergestelde is gebeurd. Vóór de zeereep heeft op enkele plaatsen overstoven helm zich ontwikkeld. Met name tussen strandpaal 20.6 en 20.8, maar ook nog op enkele plaatsen tot voorbij 21.0. In het oostelijke deel (tussen 21.1 en 21.6) heeft de aanwezige helm achter de zeereep zich grotendeels in stand gehouden. Op enkele plaatsen is deze overstoven, maar dit is gecompenseerd door overstoven helm die zich ontwikkeld heeft tot helm. Vooral rond 21.4 is de helm hierdoor in noordwaartse richting opgeschoven. Hierdoor is het 'gat' (van kaal zand) in de zeereep kleiner geworden tussen 2003 en 2009. Hieraan heeft ook een andere ontwikkeling bijgedragen. Op de lijn van de zeereep en in een gedeelte daarachter heeft (overstoven) helm zich ontwikkeld op het kale zand dat hier aanwezig was. Door deze ontwikkelingen is het areaal kaal zand in de zeereep rond het gebied van de doorbraak sterk afgenomen. De bodembedekking in dit gebied gaat meer overeenkomsten vertonen met het westelijke deel van Vak 2. En daarmee ook met de bodembedekking in Vak 1. Vóór de zeereep en op het strand heeft zich op het oostelijk deel van Vak 2 geen vegetatie ontwikkeld.

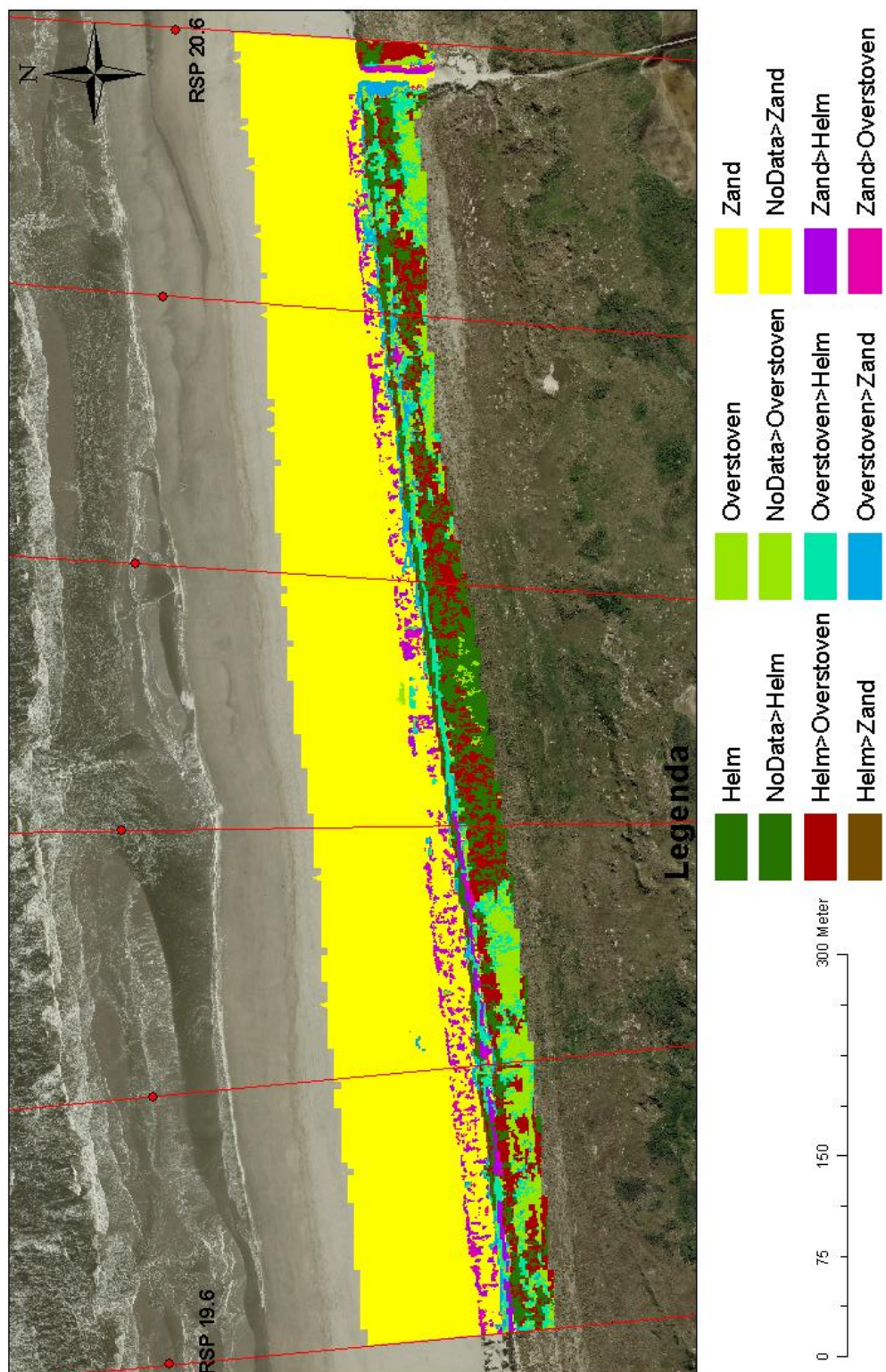
Verandering in Bodembedekking Vak 1 (19.6-20.6) 2003-2009



Figuur 63

Verandering in bodembedekking vak 1 (20.6-21.6) tussen 2003 en 2009. 'Helm>Zand' staat voor 'helm in 2003 verandert naar zand in 2009'.

Verandering in Bodembedekking Vak 1 (19.6-20.6) 2003-2009



Figuur 64

Verandering in bodembedekking vak 1 (20.6-21.6) tussen 2003 en 2009. 'Helm>Zand' staat voor 'helm in 2003 verandert naar zand in 2009'.

Om de verandering in bodembedekking te kwantificeren is per kustvak per periode de oppervlakte van elke klasse berekend. De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in tabel 9. Cellen zonder waarde ('no data') die voorkomen bij de analyse zijn voor deze berekening uitgesloten.

Tabel 9

Bodembedekking van de vakken uitgedrukt per klasse als percentage van het totale oppervlakte in de jaren 2003 en 2009. 'No data' waarden buiten beschouwing gelaten.

Klasse	Vak 1 (2003)	Vak 1 (2009)	Vak 2 (2003)	Vak 2 (2009)
Helm	15,4 %	15,1 %	14,1 %	13,6 %
Overstoven helm	12,0 %	14,9 %	9,7 %	11,8 %
Zand	72,6 %	70,0 %	76,3 %	74,6 %

Voor deze analyse van de bodembedekking is in geen van de gevallen een validatie uitgevoerd. Daarom kunnen er geen gegevens worden gegeven over de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van deze resultaten. Vak 1 (tussen de strandpalen 19.6 en 20.6) heeft een groter begroeid oppervlak dan Vak 2 (20.6-21.6). Zowel de klasse 'helm' als de klasse 'overstoven helm' is groter voor Vak 1, in beide geanalyseerde jaren. Dit leidt er vanzelfsprekend toe dat in Vak 2 het oppervlak 'kaal zand' groter is. In beide vakken is tussen 2003 en 2009 zowel de hoeveelheid 'helm' als de hoeveelheid 'kaal zand' afgenomen. Dit kwam ten goede aan de oppervlakte in 'overstoven helm'. Hierdoor zijn de verschillen tussen de twee vakken groter geworden in de geanalyseerde periode. De afname bij 'helm' is het grootst in Vak 2, en bij 'zand' het grootst in Vak 1.

Ook voor de kaart met de verandering in bodembedekking kan de oppervlakte van de verschillende klassen worden berekend. De relatieve oppervlakten zijn te zien in tabel 10. Ook hier zijn de 'no data' waarden buiten beschouwing gelaten. Hierom is deze tabel niet één op één te vergelijken met bovenstaande tabel.

Tabel 10

Verandering in bodembedekking van de vakken. De klasse geeft het gelijk blijven ('Helm') of de verandering ('Helm>Zand') tussen 2003 en 2009 weer. Uitgedrukt in percentage van totale oppervlakte. 'No data' waarden zijn buiten beschouwing gelaten.

Klasse	Vak 1	Vak 2
Helm	7,6%	7,0%
Helm>Overstoven	6,9%	5,1%
Helm>Zand	0,9%	1,9%
Overstoven	5,9%	4,2%
Overstoven>Helm	4,3%	3,2%
Overstoven>Zand	2,0%	2,3%
Zand	67,8%	71,3%
Zand>Helm	2,7%	2,5%
Zand>Overstoven	2,1%	2,6%

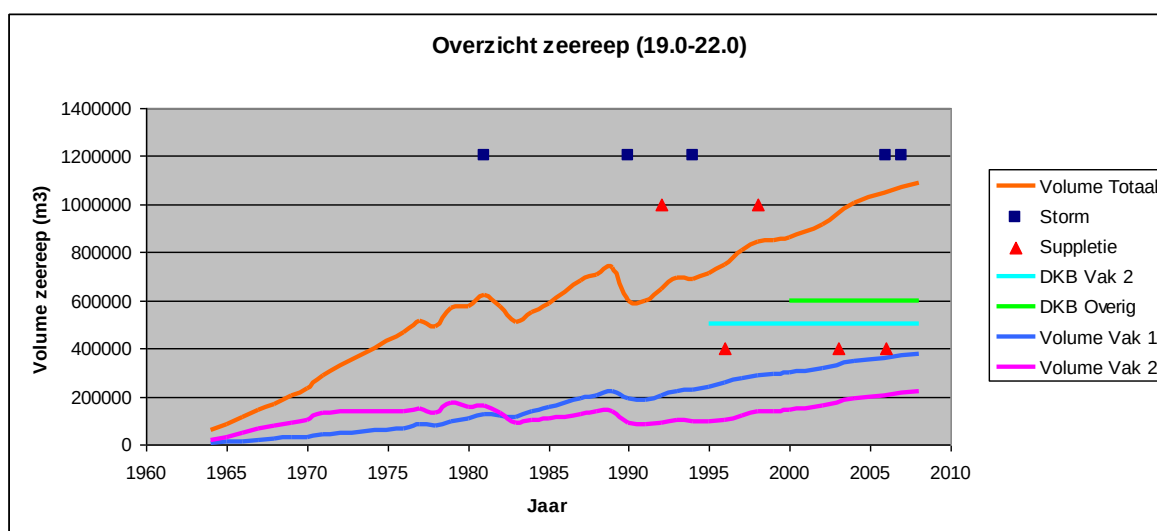
De twee klassen met vegetatie blijken het meest dynamisch te zijn. Zowel voor 'helm' als voor 'overstoven helm' geldt dit voor beide vakken. Zo is er van de klasse 'helm' een gebied van 7,6% van het totaal oppervlak 'helm' gebleven, terwijl er een groter gebied ($6,9\% + 0,9\% = 7,8\%$) overgegaan is naar een andere klasse. Voor Vak 2 is deze oppervlakte gelijk. Voor 'overstoven helm' is er zelfs nog meer dynamiek. Hier is de verhouding 5,9%:6,3% in Vak 1 en 4,2%:5,5% in Vak 2. Voor beide typen bodembedekking geldt dat het

grootste deel overgaat naar de andere vegetatieklasse, en niet naar 'zand'. Dit is meer het geval voor 'helm' dan voor 'overstoven helm'.

De klasse 'zand' is de meest stabiele klasse; het overgrote deel van deze klasse blijft 'zand' in de periode tussen 2003 en 2009. Dit is te verklaren door het grote oppervlak aan strand, dat in deze analyse meegenomen is. In dat gebied verandert weinig tot niets, zoals uit bovenstaande analyses gebleken is. Voor Vak 2 is ook hier de totale oppervlakte met 'zand' groter. Voor beide vakken is het gebied dat overgaat naar een vegetatieklasse ongeveer even groot, hoewel voor Vak 2 het gebied dat verandert naar 'overstoven helm' groter is.

4 Discussie

Voor een beschrijving van de verwachte ontwikkeling van de zeereep op Oost-Ameland zijn gevonden ontwikkelingen en gebeurtenissen met betrekking tot de zeereep in een overzicht geplaatst (figuur 65). Het betreft hier het volume van de zeereep, de hoogwatergebeurtenissen, de zandsuppleties, de periode van het dynamisch kustbeheer en de volumes van de twee vakken. Met behulp van deze gegevens is getracht een trend te omschrijven die een aanwijzing geeft in welke richting de zeereep zich in de toekomst zal ontwikkelen. Omdat in dit onderzoek geen correlatie tussen ontwikkeling van het volume van de zeereep en de vegetatie vast is gesteld, is de bodembedekking in deze paragraaf buiten beschouwing gelaten. Ook mede omdat de bodembedekking slechts voor een beperkte periode (zes jaar) en een minimale frequentie (twee maal) is geanalyseerd. Dit geeft te weinig informatie voor een betekenisvolle trendanalyse.



Figuur 65

Ontwikkeling volume zeereep (19.0-22.0) met hoogwatergebeurtenissen (storm), zandsuppleties, het beheer (DKB = uitvoering dynamisch kustbeheer), en volumes van Vak 1 en Vak 2. Voor suppleties is er onderscheid tussen suppleties binnen de onderzochte zeereep (bovenste symbolen) en suppleties ten westen hiervan (onderste symbolen).

De figuur toont de al eerder beschreven gestage toename van het volume van de zeereep. Deze toename is over het algemeen lineair, maar wordt onderbroken door trendbreuken. Een combinatie van deze resultaten met de gevonden hoogwatergebeurtenissen ('events') laat zien dat de belangrijkste van deze trendbreuken (in 1981, 1990, en in minder mate 1994) samenvallen met een hoogwatergebeurtenis. Dat dit geen noodzakelijk verband is, tonen de hoogwatergebeurtenissen in 2006 en 2007. Hier is geen afname in het volume van de zeereep waarneembaar. Dit kan niet verklaard worden door een verschil in grootte van deze gebeurtenissen (deze zijn vergelijkbaar voor de verschillende jaren). Mogelijke verklaringen zijn de aanwezigheid van een hogere vooroever of een hoger strand in 2006 en 2007, of een grotere buffer voor de zeereep die relatief snel weer aangevuld is. Op dit laatste wijzen ook de observaties ter plaatse; in 2006 was er bijvoorbeeld sprake van een klif veroorzaakt door beperkte erosie van de buffer, die echter snel weer opgestoven was (mond. med. J. Krol).

Voor 1990 lijkt de afname in volume al eerder in te zetten dan dat de hoogwatergebeurtenis plaatsvindt. Omdat dit onwaarschijnlijk is, moet de oorzaak voor deze discrepantie ergens anders gezocht worden. Aannemelijk is dat dit komt doordat er op jaarbasis naar de gebeurtenissen gekeken wordt. De JARKUS-raaien zijn een momentopname voor een heel jaar. De hoogwatergebeurtenissen vinden plaats gedurende een kleine periode in het jaar (enkele uren of dagen), maar worden ook per jaar getoond. Hierdoor is het niet duidelijk te zien of een hoogwatergebeurtenis voor, tijdens of na de JARKUS-opname plaatsvindt. Vanwege de verschillende schalen waarop gemeten is, kan er een lichte verschuiving zijn opgetreden.

Een effect van de suppleties is niet direct meetbaar. Zichtbaar is dat sinds de start van de suppleties (in 1992 voor Oost-Ameland) het volume redelijk constant en zonder trendbreuken toeneemt. En daarbij waarden bereikt die hoger zijn dan in het (bekende) verleden. Een periode van dergelijke constante toename is echter ook al waargenomen tussen 1964 en 1990, toen er nog niet gesuppleerd werd.

In respectievelijk 1995 en 1999 is het dynamisch kustbeheer ingevoerd. Ook hiervoor is geen direct effect meetbaar. Sinds het loslaten van het reguliere beheer is er wel een vrijwel constante toename in het volume van de zeereep geweest, maar deze periode was al eerder (respectievelijk vijf en negen jaar) ingezet (in 1990).

En tenslotte de ontwikkeling van de twee kustvakken, die (extra) gemonitord zijn met betrekking tot het invoeren van het dynamisch kustbeheer. Uit deze figuur blijkt dat de kustvakken over het algemeen eenzelfde beeld vertonen als het totaal van de zeereep. Tot 1980 geldt dit met name voor Vak 2, en tussen 1980 en 1985 juist vooral voor Vak 1. Ook voor deze kustvakken is in dit beeld geen direct effect van het dynamisch kustbeheer waar te nemen.

Op basis van de geanalyseerde (beschikbare) gegevens is de verwachting dat toename van het volume van de zeereep doorzet. Hoogstwaarschijnlijk zullen er wel perioden van afname zijn, wanneer bij een storm (hoogwatergebeurtenis) een deel van de zeereep zal worden weggeslagen. Het effect van de suppleties is voor deze situatie nog onduidelijk, maar de extra aanvoer van zand zal waarschijnlijk een positieve invloed hebben op het zandvolume. Of garanderen dat er voldoende zand in de zeereep aanwezig is om deze op te bouwen. Waarschijnlijk is er wel een bepaald maximum (hoogte en volume) waardoor de groei van de zeereep op den duur gestuit zal worden. Dit is in het verleden op dit deel van de kust echter nog niet voorgekomen, zodat er over deze mogelijke situatie niets uit het verleden afgeleid kan worden.

Een mogelijkheid is dat de zeereep in zeewaartse richting opschuift door het vormen van een nieuwe duin voor het bestaande duin en/of op het strand. Een dergelijk voorduin is al aanwezig tussen 19.6 en 20.0, en kan zich mogelijk ook op andere locaties ontwikkelen.

Wellicht kan ook het gebied achter de voorste zeereep worden opgehoogd, doordat zand over deze zeereep heen wordt geblazen en daarachter afgezet. Deze ontwikkeling is echter niet meegenomen in dit onderzoek, en de verwachting is dat deze hoeveelheden relatief klein zullen zijn. Dit omdat het meeste zand vóór of in de zeereep wordt opgevangen.

Rond de doorbraak (bij 21.4) is er *sowieso* nog ruimte voor de zeereep om zich te ontwikkelen. De zeereep is hier pas sinds korte tijd terug op het volume van vóór de doorbraak (op het oude maximum van 1975), maar bevindt zich nog wel landwaarts ten opzichte van die oude positie. De zeereep kan zich hier daarom waarschijnlijk nog zeewaarts bewegen, en zo op horizontale wijze in volume toenemen. En omdat op andere locaties in de zeereep het oude maximum in deze periode van groei ruim overschreden is, ligt het voor de hand dat het potentiële volume in ieder geval hoger is dan het oude maximum van 1975.

Omdat de gevonden resultaten erop wijzen dat de ontwikkeling van de zeereep voornamelijk afhankelijk is van fysische processen op macroniveau (zoals afslag door stormen, zandaanvoer langs de kust, de ontwikkeling van de vorm van de kustlijn als geheel), moeten de gevonden trends met voorzichtigheid worden behandeld. Vanwege de veranderlijkheid van deze processen is het niet mogelijk om gevonden ontwikkelingen lineair de toekomst in te extrapoleren.

5 Conclusies en aanbevelingen

Het formuleren van de conclusies is gebaseerd op de hoofdvraag en de daarvan afgeleide deelvragen uit de Inleiding: Wat is het effect van dynamisch kustbeheer op duinvorming in de zeereep (op Oost-Ameland) tot nu toe en wat zijn de verwachtingen ten aanzien van duinontwikkeling in de komende decennia?

1. Uit de beschikbare literatuur blijkt dat dynamisch kustbeheer leidt tot een meer natuurlijke en gevarieerde zeereep, dat na invoering van dynamisch kustbeheer het volume van de zeereep is gegroeid, en dat dynamisch kustbeheer geen bedreiging vormt voor de kustveiligheid.

2. Verschillende delen van de zeereep (kustvakken) die in de casestudie op Oost-Ameland zijn onderzocht, hebben zich in de loop van de geschiedenis verschillend gedragen. Het algemene beeld is dat de zeereep zich gedurende de tijd in een lineaire trend opbouwt, maar dat deze trend (meestal) meerdere malen onderbroken wordt door een trendbreuk. Deze trendbreuk hangt samen met een hoogwatergebeurtenis (storm), en leidt tot een (tijdelijke) afname in het duinvolume. Vervolgens neemt het volume zand in de zeereep weer verder toe.

3. In de periode sinds de invoer van het dynamisch kustbeheer, is er vooralsnog sprake geweest van een redelijk continue toename in zandvolume zonder trendbreuk. Deze periode loopt echter al vanaf 1990, en er is geen direct verband gevonden tussen het zandvolume en het ingevoerde dynamisch kustbeheer. De verschillen in kustvakken laten zich eerder verklaren door andere factoren als de 'wash over' in het ene kustvak, en externe factoren als suppleties en stormen.

De invoering van het dynamisch kustbeheer (wat het achterwege laten van het reguliere kustbeheer impliceert) lijkt wel te hebben geleid tot de vorming van een meer natuurlijke duinvoet. In delen van de zeereep vormt zich een voorduin en is er sprake van het ontstaan van primaire duintjes.

4. Analyse van de luchtfoto's bevestigt de observaties die eerder aan de hand van de hoogtebestanden (zowel JARKUS als laseraltimetrie) zijn gemaakt. Er is sprake van de vorming van een voorduin, er ontwikkelt zich vegetatie op bepaalde delen van het strand voor de zeereep, en de opening in de zeereep bij 21.4 herstelt zich. Verder kan uit de ontwikkeling van de vegetatie worden afgeleid dat de dynamiek in de zeereep is toegenomen. Oude helm wordt overstoven en op andere plaatsen ontwikkelt zich nieuwe vegetatie. Ook is de vegetatie op bepaalde punten (zoals stuifkuilen) vervangen door zand. Over het algemeen wordt de afwisseling tussen de verschillende typen bodembedekking groter. Er is meer variatie.

5. De toekomstige ontwikkeling van de zeereep is onzeker. De huidige trend is onveranderd positief - het zandvolume in de zeereep neemt toe. De geschiedenis laat echter zien dat deze toename op een bepaald moment onderbroken wordt, waarna er een ander patroon kan optreden. De huidige toename lijkt (grotendeels) verklaard te worden door de beschikbaarheid van extra zand en de afwezigheid van invloedrijke hoogwatergebeurtenissen ('events'). Daarnaast lijkt het onvermijdelijk dat een zeereep een maximumvolume heeft, waar op dit moment echter niets over valt te zeggen. Een mogelijke gebeurtenis is het verschuiven van de activiteit richting strand, zoals waargenomen is bij de ontwikkeling van een voorduin bij de raaien 19.6, 19.8 en 20.0.

6. Over de overstuiving van de zeereep en depositie van vers zand achter de zeereep is aan de hand van ons onderzoek nog niets te zeggen. De metingen op dit vlak lopen nog, zodat er in de toekomst mogelijk informatie over beschikbaar komt.

Op basis van deze conclusies wordt aanbevolen om nader onderzoek te verrichten naar de invloed van de verschillende factoren op de zeereep. Door middel van een multivariate analyse waarbij meerdere factoren (zoals beheer, suppleties en stormen) worden geanalyseerd, kan de mate van invloed per factor worden berekend. Dit zal leiden tot een verdere statistische onderbouwing van een analyse van de ontwikkelingen in de zeereep.

Ook wordt aanbevolen om de mate van overstuiving achter de voorste zeereep te monitoren, wat in eerste instantie ook al in dit onderzoek plaats zou vinden. Met deze gegevens kan immers worden bepaald in hoeverre de (dynamisch beheerde) zeereep bijdraagt aan een dynamisch en natuurlijk gebied achter de zeereep. Relaties tussen overstuiving en ontwikkeling van de vegetatie kunnen hiermee worden onderzocht. En in dit specifieke gebied kan de bijdrage aan het tegengaan van bodemdaling worden gekwantificeerd. Deze kennis kan vervolgens weer dienen als model voor compensatie bij zeespiegelstijging. Op deze wijze draagt het onderzoek ook bij aan onze kustveiligheid.

Verder bevelen wij aan om de ontwikkelingen van de voorduinen nader te onderzoeken. Een analyse over langere tijd of een eventuele vergelijking met de ontwikkeling van voorduinen in andere duingebieden kan uitwijzen of het voorduin inderdaad de ontwikkeling van de oorspronkelijke zeereep overneemt.

Tenslotte zou het goed zijn de monitoring van deze zeereep te continueren. Alleen het volgen van de toekomstige gebeurtenissen kan uitwijzen in welke richting de zeereep zich ontwikkelt. Dus of de zeereep zich sinds het invoeren van het nieuwe kustbeleid (met suppleties en dynamisch duinbeheer) daadwerkelijk op een andere wijze ontwikkelt, of dat de oude patronen in plaats zijn gebleven en de ontwikkeling zullen blijven sturen.

Literatuur

Adema, E.B., A.P. Grootjans, J. Petersen en J. Grijpstra, 2002. Alternative stable states in a wet calcareous dune slack in The Netherlands. *Journal of Vegetation Science* 13(1): 107-114.

Adema, E.B., J. van de Koppel, H.A.J. Meijer en A.P. Grootjans, 2005. Enhanced nitrogen loss may explain alternative stable states in dune slack succession. *Oikos* 109(2): 374-386.

Arens, B., 2007. *Duurzame verstuiwing in de Hollandse duinen: kans, droom of nachtmerrie: eindrapport fase 1*. Arens Bureau voor Strand en Duinonderzoek, [S.l.].

Arens, S.M., 2009. *Preadvies duin- en kustlandschap*. Rapport DK nr. 2009/dk113-O. Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Ede.

Arens, S.M., T.W.M. Bakker en C. Ten Haaf, 2005. *Natuurontwikkeling Ameland*. Arens Bureau voor Strand en Duinonderzoek, Amsterdam.

Arens, S.M., M.A.M. Löffler en E.M. Nuijen, 2007. *Evaluatie Dynamisch Kustbeheer Friese Waddeneilanden*.

Arens, S.M. en J.P.M. Mulder, 2008. Dynamisch kustbeheer goed voor veiligheid en natuur. *Land + Water* 48 (9): 33-35.

Arens, S.M., S.P. van Puijvelde en C. Brière, 2010. *Effecten van suppleties op duinontwikkeling: Rapportage geomorfologie*. Bosschap, bedrijfsschap voor bos en natuur.

Bakker, T.W.M., J.A. Klijn en F.J. Van Zadelhoff, 1981. *Nederlandse kustduinen; Landschapsecologie*. Wageningen.

BCA, 2008. *Bodemdaling Ameland*. www.waddenzee.nl/Home.bodemdaling.0.html. Bodemdalingscommissie Ameland.

Graaf, H.J.C. de, S.J. Oude Elberink, A.E. Bollweg, R. Brügelmann en L.R.A. Richardson, 2003. *Inwinning 'droge' JARKUS profielen langs Nederlandse kust*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

DHV, 2005. *Beleidsvaluatie 'Dynamisch handhaven'*. DHV, [S.l.].

DID, 2010. *Kwaliteitsdocument laseraltimetrie*. Data en ICT Dienst Rijkswaterstaat.

Eysink, W.D., 2005. *Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost*. WL I Delft Hydraulics.

Janssen, M. en N. van Gelderen, 1993. *Dynamisch kustbeheer: een verkennende studie naar de mogelijkheden voor herstel van natuurlijke processen in de zeereep*. Duinbehoud, Leiden.

Krol, J., 2006. *Monitoring Dynamisch Kustbeheer Ameland-Oost*. Natuurcentrum Ameland.

Löffler, M.A.M., 2008. *Eilanden natuurlijk: natuurlijke ontwikkeling en veerkracht op de Waddeneilanden*. Het Tij Geleerd, [S.l.].

NAM, 2010. *Gaswinning Waddenzee*. Nederlandse Aardolie Maatschappij. www.nam.nl/home/Framework?siteId=nam-nl&FC2=/nam-nl/html/iwgen/leftnavs/zzz_lhn11_2_0.html&FC3=/nam-nl/html/iwgen/waddenzee/locaties/wad_locaties.html.

Nikkels, M., 2010. *Changes in Coastal Defense Visions and Policies at the Dutch Wadden Islands over the Last 60 Years*. Wageningen University, Wageningen.

Oost, A. en E.J. Lammerts, 2007. *Het tij geleerd: achtergrondrapport*. Alterra [etc.], Wageningen.

Provinciaal Overlegorgaan Kust, 2000. *Dynamisch kustbeheer: kustzone midden en oost Ameland: een advies over het beheer van de zandige kustzone op Ameland van km 7 tot km 23*. Provinciaal Overlegorgaan Kust Fryslân, Projectgroep midden en oost Ameland, [S.I.].

Reitsma, D.T., 1984. *Waterstaatkundige historie Ameland*. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat. In: Nikkels (2010).

Rijksinstituut voor Kust en Zee, 2003. *Traditie, trends en toekomst: het vervolg: tweede voortgangsrapportage over de uitvoering en ontwikkeling van het kustbeleid*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water, [Den Haag]. Rijksinstituut voor Kust en Zee.

RWS, 2010. *Waterbase*. http://live.waterbase.nl/waterbase_wns.cfm?taal=nl. Rijkswaterstaat.

Slim, P.A., G.B.M. Heuvelink, H. Kuipers, G.M. Dirkse en H.F. van Dobben, H.F., 2005. *Vegetatiemonitoring en geostatistische vegetatiekartering duinvalleien Ameland-Oost*.

Slim, P.A. en M.A.M. Löffler, 2007. *Kustveiligheid en natuur: een overzicht van kennis en kansen*. Alterra-rapport 1485. Alterra, Wageningen.

TAW, 2002. *Leidraad Zandige Kust*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

Tsoar, H., 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications* 357(1): 50-56. In: Arens (2007).

Wal, D. van der, 1996. The development of a digital terrain model for the geomorphological engineering of the 'rolling' foredune of Terschelling, The Netherlands. *Journal of Coastal Conservation* 2(1): 55-62.

Heuvel, T.A.J. van, H. de Kruik en H. Ebbing, 1996. *Dynamisch handhaven van de kustlijn: van kustmeting tot zandsuppletie*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, RIKZ, Den Haag.

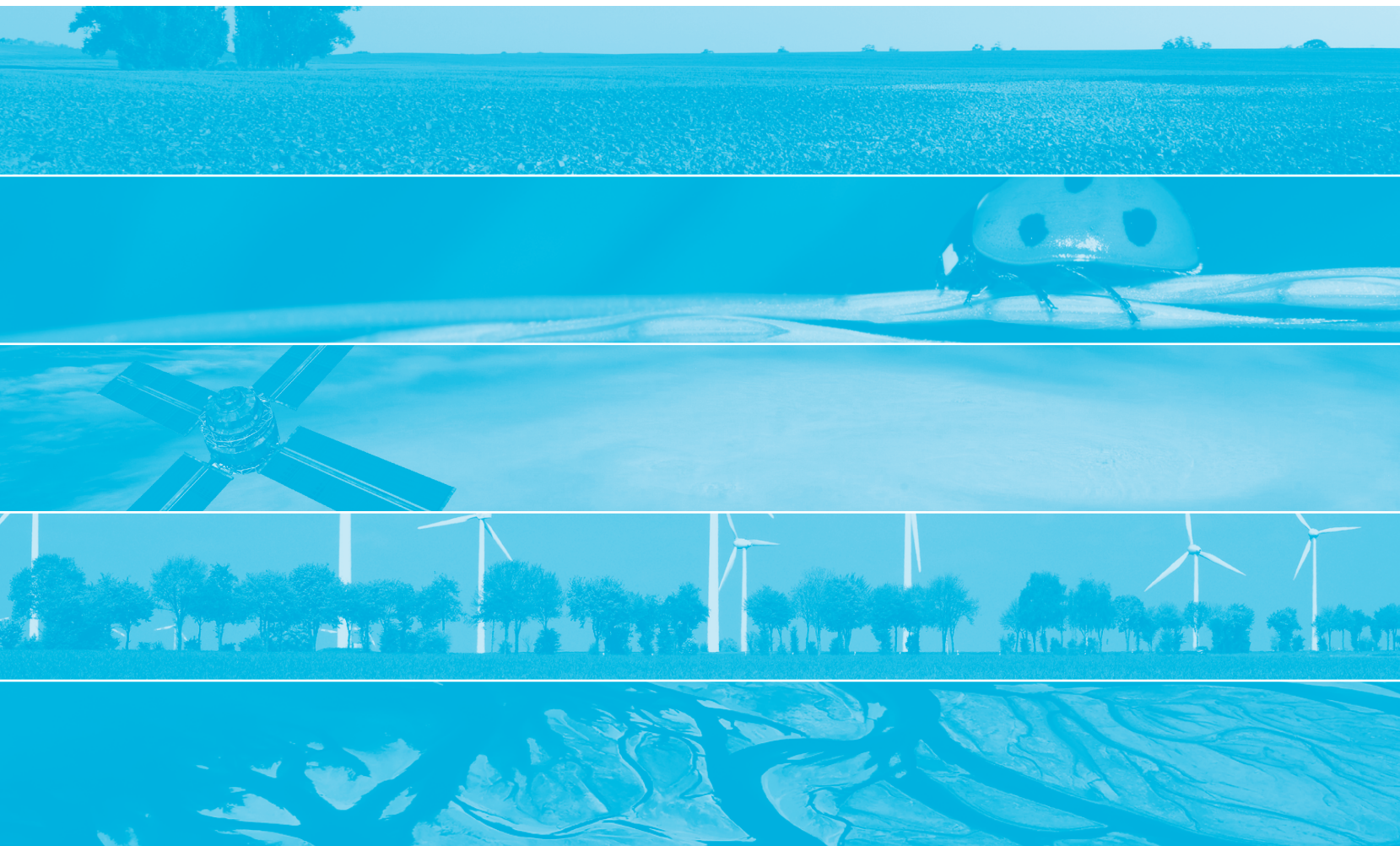
WWS, 1990. *1e Kustnota: Kustverdediging na 1990*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

WWS, 2000. *3e Kustnota: Traditie, trends en toekomst*. [S.I.]. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

WWS, 2008. *Kustfoto's van de Nederlandse kust*. www.kustfoto.nl/. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

WWS, 2010a. *Golfgegevens Noordzee*. <http://live.actuelewaterdata.nl/golfgegevens/>. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

WWS, 2010b. *Waterstand Noord Oost Nederland*. <http://live.actuelewaterdata.nl/waterstandNAP/>. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl