



ALTEERRA

WAGENINGEN UR



Analyse bruikbaarheid gecombineerde hoogtedata Hollandse kust

Pilotstudie naar het combineren van hoogtedata uit verschillende bronnen

Alterra-rapport 2378
ISSN 1566-7197

T. Vermaas

Analyse bruikbaarheid gecombineerde
hoogtedata Hollandse kust

Analyse bruikbaarheid gecombineerde hoogtedata Hollandse kust

Pilotstudie naar het combineren van hoogtedata uit verschillende bronnen

Tommer Vermaas

Alterra-rapport 2378

Alterra Wageningen UR
Wageningen, 2012

Referaat

Vermaas, Tommer, 2012. Analyse bruikbaarheid gecombineerde hoogtedata Hollandse kust; Pilotstudie naar het combineren van hoogtedata uit verschillende bronnen. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2378. 36 blz.; 20 fig.; 1 tab.; 12 ref.

In Nederland ligt ongeveer 27% van het landoppervlak onder zeeniveau. Ons economische hart - (het westen van) de randstad - is erg kwetsbaar voor overstromingen vanuit zee. Sinds 1990 wordt de kust beschermt door zandsuppleties, ook wel 'zachte bescherming' genoemd. In 2001 is besloten om het totale zandvolume van het actieve kuststelsel - het gebied tussen de landwaartse grens van de duinen en de NAP -20 m diepte - te handhaven.

Om deze doelstelling - het zandvolume in ons kuststelsel - te toetsen zijn verschillende bronnen van hoogtedata van de zeebodem beschikbaar: JARKUS-raaien (jaarlijkse transecten langs de kust gemeten), vaklodingen (digitale hoogtemodellen van de zeebodem) en LIDAR (digitale hoogtemodellen van de duinen). De drie bronnen vullen elkaar in ruimte en tijd aan, maar zijn door verschillen in format nog niet eerder tezamen gebruikt.

In dit onderzoek zijn de drie bronnen gecombineerd tot één hoogtemodel per jaar voor de Noord-Hollandse kust. Met deze nieuwe hoogtemodellen zijn verschilkaarten gemaakt en trendberekeningen voor deelgebieden uitgevoerd.

De nieuwe hoogtemodellen geven een goed overzicht van de beschikbaarheid van data en zijn geschikt voor morfologische analyse van de ontwikkeling van de kust. De combinatie van meerdere bronnen geeft betere resultaten bij het bepalen van volumetrends in de deelgebieden en geeft beter inzicht in het gedrag buiten deze gebieden.

Trefwoorden: kust, hoogtedata, DEM, volume analyse, JARKUS, vaklodingen, LIDAR.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.wageningenUR.nl/alterra (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.

© 2012 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 2378

Wageningen, november, 2012

Inhoud

1	Introductie	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doel van het onderzoek	8
1.3	Leeswijzer	8
2	Methoden	9
2.1	Verkennen en voorbereiden databestanden	9
2.1.1	JARKUS-raaien	9
2.1.2	Vaklodingen	10
2.1.3	Kust LiDAR	11
2.2	Preprocessen van de data	12
2.2.1	JARKUS-raaien	12
2.2.2	Vaklodingen	12
2.2.3	Kust LiDAR	12
2.3	Combineren data	12
2.3.1	Interpoleren van JARKUS-punten	12
2.3.2	Samenvoegen hoogtemodellen	14
2.4	Erosiekaarten en volumetrends	14
2.4.1	Verschilkaarten	14
2.4.2	Volumetrends in gebieden van eerdere studies	14
3	Resultaten	17
3.1	Gecombineerde data	17
3.1.1	Nieuwe hoogtemodellen	17
3.1.2	Verschillen tussen de databronnen	17
3.2	Erosiekaarten en volumetrends	20
3.2.1	Erosiekaarten	20
3.2.2	Volumetrends in gebieden van eerdere studies	25
4	Discussie en conclusies	31
5	Aanbevelingen	33
	Literatuur	35

1 Introductie

1.1 Achtergrond

In Nederland ligt ongeveer 27% van het landoppervlak onder zeeniveau. Ons economische hart - (het westen van) de randstad - is erg kwetsbaar voor overstromingen vanuit zee. Het kustbeleid is altijd al gericht op het voorkomen van overstromingen vanuit zee en is in de loop der jaren veranderd. In 1953 leidde de watersnoodramp tot de implementatie van het Delta-programma, dat kustverdediging realiseerde door de zogenaamde 'harde bescherming': vastgelegde dijken, dammen en betonnen constructies.

In 1990 is er in de 1e Kustnota (Ministerie van V&W, 1990) gekozen voor 'Dynamisch Handhaven' van de kust: bescherming door zandsuppleties, ook wel 'zachte bescherming' genoemd. Tot strategisch doel was gesteld 'het garanderen van een duurzaam veiligheidsniveau en duurzaam behouden van waarden en functies in de duinen' met als operationeel doel 'het handhaven van de kustlijn op de positie van 1990'. De implementatie hiervan is succesvol geworden door 1) een kwantitatief concept van de huidige staat van het systeem, 2) een referentie en toetsingsprocedure, 3) de interventie procedure en 4) een evaluatie (Van Koningsveld en Mulder, 2004). Voor de referentie, de huidige staat van het systeem en de toetsingsprocedure zijn duidelijke definities opgesteld, gebaseerd op hoogteprofielen dwars op de kust gemeten; de zogenaamde JARKUS-raaien. Interventie is gedaan door zand te suppleren, waarvoor 6 miljoen m³ (Mm³) zand per jaar beschikbaar is gesteld.

Verschillende studies naar het effect van de zandsuppleties (De Ruig, 1995; Stam, 1999) toonden aan dat de kustlijn succesvol werd onderhouden, maar dat er tussen NAP -8 en -12 m nog steeds erosie optrad. Hoewel de suppleties in ieder geval op de korte termijn (decennia) voldoende bleken te zijn, zal de erosie in dieper water op langere termijn (eeuwen) te kort schieten (Mulder, 2000). Mulder stelt dat op een grotere tijdschaal een groter morfologisch systeem actief is. Voor een tijdschaal van 100-200 jaar definieert Mulder het 'actieve systeem' als het gebied tussen de landwaartse grens van de duinen en de NAP -20 m diepte. Voor dit gebied - het 'kustfundament' - wordt in de 3e Kustnota (Ministerie van V&W, 2000) gezegd dat de zandverliezen vanaf 2001 gecompenseerd moeten worden. Het suppletievolume is verhoogd van 6 naar 12 Mm³ zand per jaar.

Hoewel tot doel was gesteld zandverlies in het kustfundament te compenseren, ontbreekt een kwantitatief concept van de huidige staat, een referentie of toetsingsprocedure. Om deze reden is er tijdens de evaluatie van de 3e Kustnota geen conclusie getrokken of dit doel is gehaald (Twynstra Gudde en Alkyon, 2007). Onderzoeken naar zandvolume-veranderingen en zandtransporten (e.g. Van Rijn, 1997; Arens et al., 2010) zijn uitgevoerd voor slechts een klein gebied en niet naar het kustfundament in het geheel. Het niet toetsen van het doel hangt niet alleen af van het ontbreken van een toetsingsprocedure, maar ook het beschikbaar zijn van geschikte informatie, zoals de JARKUS-raaien voor het toetsen van de positie van de kustlijn. Voor het kustfundament zijn er verschillende data-bronnen met hoogte-data beschikbaar: de JARKUS-raaien, vaklodingen (single-beam soundings van de Noordzee bathymetrie) en LIDAR-data van het 'droge' deel. Hoewel deze datasets een schat aan informatie bevatten, zijn ze moeilijk toegankelijk en lastig te combineren door verschillen in resolutie, beschikbaarheid in de tijd en data-formaat.

1.2 Doel van het onderzoek

Dit onderzoek heeft tot doel de mogelijkheden te verkennen voor het combineren van de verschillende databronnen, i.e. JARKUS-raaien, vaklodingen en LIDAR-data. Dit onderzoek wordt uitgevoerd voor een deelgebied, de Noord-Hollandse kust (tussen IJmuiden en Den Helder). Het resultaat hiervan moet leiden tot één nieuwe jaarlijkse dataset, waarin de informatie uit de drie bronnen in één bestand aanwezig is.

Met de gecombineerde, nieuwe datasets worden de volgende aspecten bekeken:

- erosie/sedimentatie-kaarten;
- kwalitatieve analyse van de kaartbeelden;
- mogelijkheden voor kwantificatie van erosie/sedimentatie-trends;
- vergelijking trends volgens deze aanpak met trends uit eerder gedaan onderzoek.

Deze verkennende studie is in de eerste plaats bedoeld als pilot en zal dus ook kijken naar de bruikbaarheid van de resultaten en aanbevelingen doen over mogelijkheden tot verbetering en uitbreiding van het onderzoek.

1.3 Leeswijzer

De methoden die zijn gebruikt om de databronnen te combineren worden beschreven in hoofdstuk 2. Hierin wordt eerst beschreven welke databronnen er zijn en in welk format (paragraaf 2.1). De voorbewerking die op de data is gedaan wordt vervolgens in paragraaf 2.2 omschreven. Daarna worden twee methoden beschreven die getest zijn voor het combineren van de data (paragraaf 2.3). Het maken van erosie-/sedimentatie-kaarten en het berekenen en vergelijken van trends is beschreven in paragraaf 2.4.

De resulterende gecombineerde datasets worden gepresenteerd in de eerste paragraaf van hoofdstuk 3. In paragraaf 3.2 staan vervolgens de erosie-/sedimentatie-kaarten en worden de berekende trends getoond.

De discussie en resulterende conclusies worden beschreven voor 1) de voor- en nadelen van de gecombineerde datasets (paragraaf 4.1), 2) de bruikbaarheid voor kwalitatieve analyses (paragraaf 4.2) en 3) de bruikbaarheid voor kwantitatieve bepaling van volumeveranderingen (paragraaf 4.3).

Tot slot worden er aanbevelingen gedaan over mogelijkheden tot verbeteren van de methoden en de nieuwe datasets en over mogelijke vervolgstappen en uitbreiding van de analyse.

2 Methoden

Voor dit onderzoek is data gebruikt die beschikbaar is gesteld via de OpenEarth repositories (<http://openearth.nl/>). Voor een deel van deze data gelden specifieke gebruikersvoorwaarden, die dus ook in acht moeten worden genomen bij de resulterende producten van deze studie. Voor het bewerken en analyseren van de data is in hoofdzaak gebruik gemaakt van de programmeertaal python (<http://python.org/>) en de GIS-software van ESRI, ArcMap (<http://www.esri.com/>).

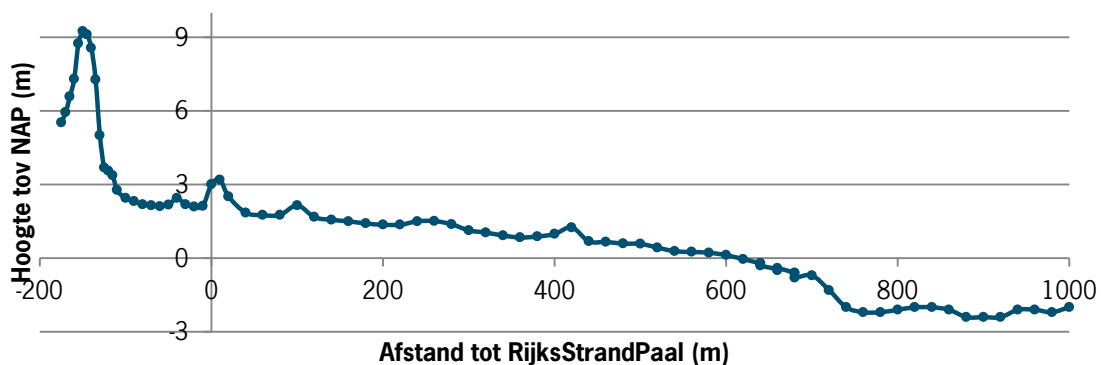
2.1 Verkennen en voorbereiden databestanden

Voordat de data werkelijk is bewerkt zijn de eigenschappen ervan geïnventariseerd. Hierbij is gekeken naar de manier waarop de data beschikbaar is, de ruimtelijke resolutie, de gebruikte eenheden en de ruimtelijke indeling.

2.1.1 JARKUS-raaien

De JARKUS-raaien zijn transecten die jaarlijks, sinds 1965, worden gemeten voor de hele Noordzee kust. De transecten worden dwars op de kustlijn gemeten vanaf het begin van de duinen tot een variërende afstand uit de kust. De resolutie in dwarsrichting (afstand tussen de meetpunten) was in oudere metingen ca. 5 m op het strand en in de duinen en verder uit de kust 20 m en nog verder zeewaarts 40 m. Recentere metingen hebben over het gehele transect een resolutie van 5 m. In kustlangse richting zijn de transecten elke ca. 250 m ingemeten. De transecten zijn ca. 800 m zeewaarts gemeten, en in '65, '70, '75, '80, '85, '90 en '93 is elke 5e transect tot ca. 3000 m zeewaarts gemeten - de zogenaamde 'doorlodingen'. De genoemde afstanden en jaren gelden ruwweg voor de data, er is echter grote variatie in zowel ruimte als tijd.

De JARKUS-raaien zijn allemaal beschikbaar in één bestand in het netCDF format (<http://www.opengeospatial.org/standards/netcdf>), dat beschikbaar is op de OpenEarth repository. Hierin zijn alle meetpunten van alle raaien en alle jaren aanwezig. Alle punten bevatten coördinaten (in Rijksdriehoek-projectie en ten opzichte van de RijksStrandPalen) en hoogte (in meters ten opzichte van NAP). De data is ingedeeld in de vijftien 'kustvakken': Ameland, Delfland, Goeree, Maasvlakte, Noord-Beveland, Noord-Holland, Rijnland, Schiermonnikoog, Schouwen, Terschelling, Texel, Vlieland, Voorne, Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen.

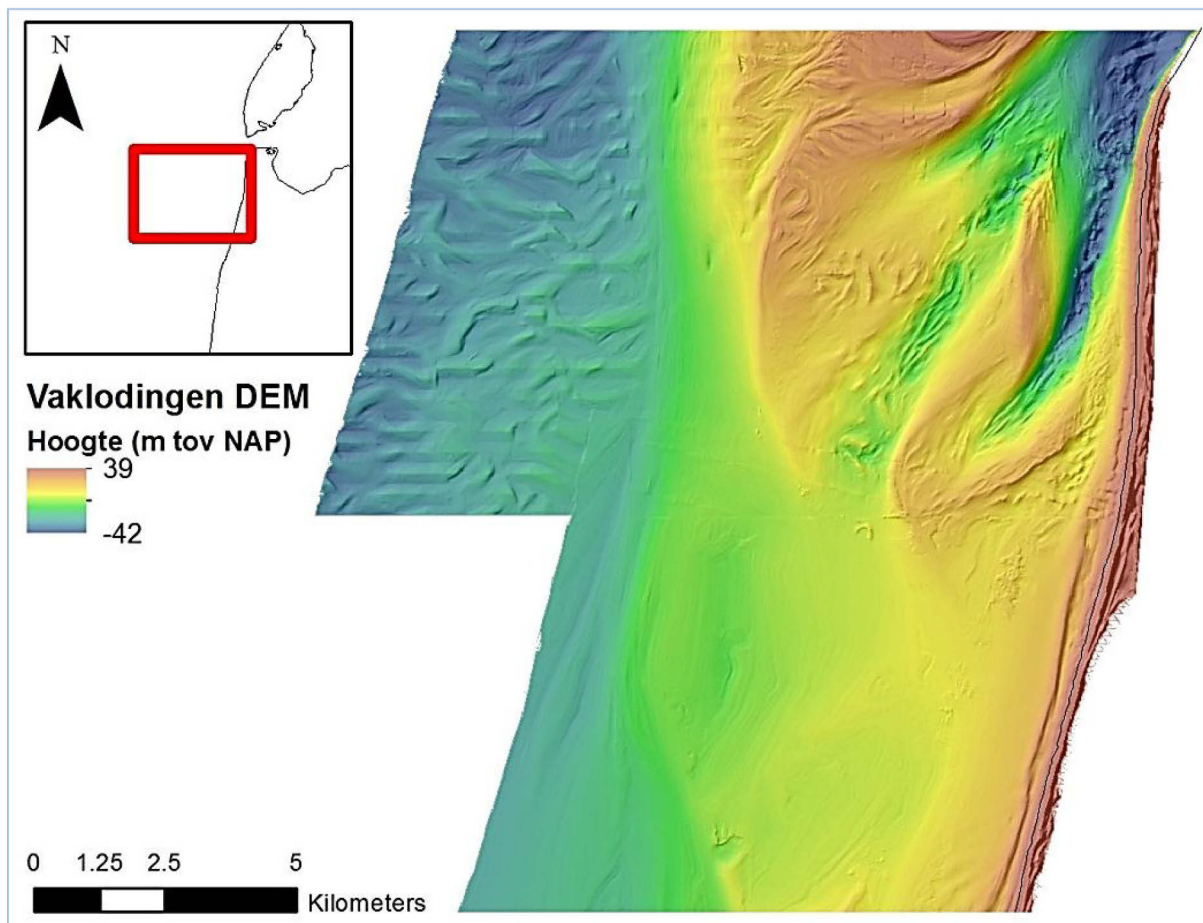


Figuur 1
Voorbeeld JARKUS-raai.

2.1.2 Vaklodingen

De vaklodingen zijn grids met hoogtedata (DEM's) van grote delen van de kust en dekken een groot oppervlak. Voor het waddengebied zijn er al grids beschikbaar van begin 20e eeuw en van de Zeeuwse delta zijn vanaf de 2e helft van de 20^e eeuw grids beschikbaar. Voor de Hollandse kust, waaronder het onderzoeksgebied, zijn pas vanaf 1990 deze grids beschikbaar. Ze zijn ongeveer elke drie jaar ingemeten door middel van single-beam echo soundings, met een wisselende ruimtelijke dekking. Een voorbeeld van een vaklodingen-hoogtemodel (DEM) is te zien in figuur 2.

Voor de vaklodingen is gebruik gemaakt van bestanden op de OpenEarthRawData Repository. Hierop zijn de vaklodingen-grids beschikbaar als ASCII grid, die zijn gebruikt bij verdere bewerkingen met ArcMap. De vaklodingen zijn 20x20m grid-bestanden in Rijksdriehoekprojectie en geven de hoogte weer in cm ten opzichte van NAP. De data is ingedeeld in kaartbladen van 10x12,5 km en voor elk jaar zijn alle kaartbladen, die zijn ingemeten als bestand, beschikbaar. Alle beschikbare kaartbladen zijn opgeslagen en ingedeeld naar jaar.

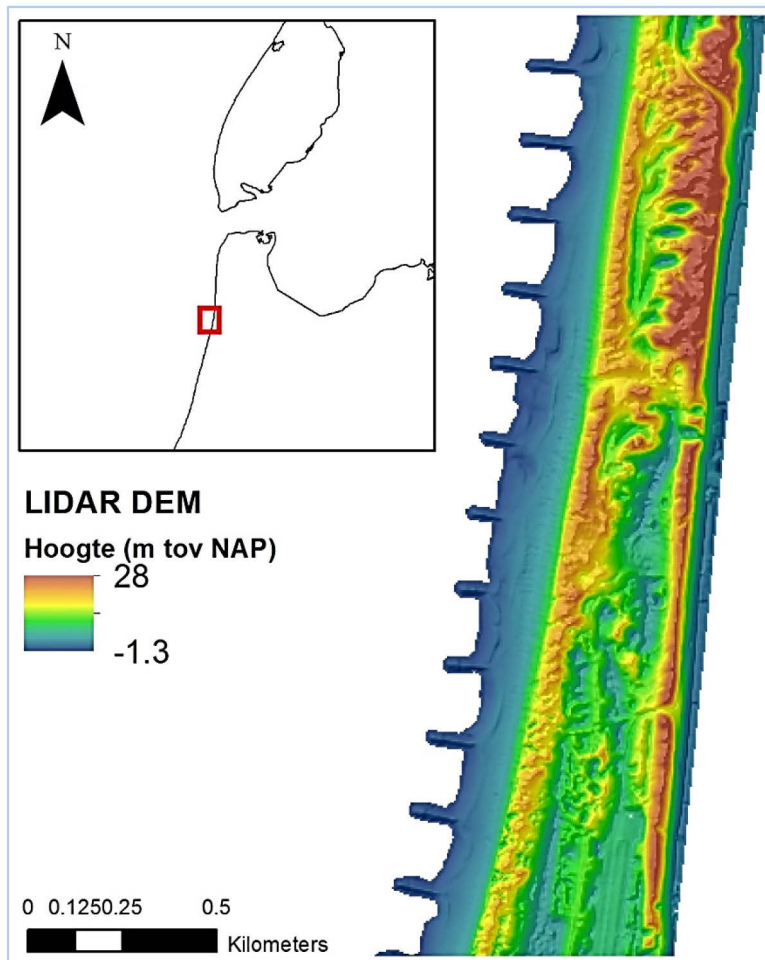


Figuur 2
Voorbeeld hoogtedata vaklodingen uit 1999.

2.1.3 Kust LiDAR

De LiDAR-data is verkregen door hoogte-laseraltimetrie en is alleen beschikbaar voor het duingebied en het strand. De data is vanaf 1996 verzameld, maar de dekking varieert en beslaat niet altijd het volledige duingebied.

De data is ingedeeld in kaartbladen van 5x6.5 km en heeft een grid-grootte van 5x5 m. De hoogte is in m ten opzichte van NAP en in Rijksdriehoek-projectie opgeslagen. Voor elk kaartblad zijn de beschikbare jaren in één netCDF-bestand beschikbaar op de OpenEarth repository, die gebruikt zijn voor dit onderzoek.



Figuur 3
Voorbeeld hoogtedata kust Lidar uit 1999.

2.2 Preprocessen van de data

Bij het preprocessen van de data is gebruik gemaakt van een vooraf gemaakt polygoon dat het onderzoeksgebied afbakt. Hiervoor is een vierkant polygoon gemaakt met linksonderhoek coördinaat (70.000 ; 497.800), en de rechtsbovenhoek coördinaat (115.000 ; 553.000) - beide in Rijksdriehoekprojectie.

2.2.1 JARKUS-raaien

Voor het gebruik van de JARKUS-raaien zijn alle meetpunten uit het netCDF-bestand per jaar omgezet naar ASCII-grids. Per jaar zijn van alle punten de x- en y-coördinaat (Rijksdriehoekprojectie) en de hoogte (z-waarde) in één bestand opgeslagen.

De xyz-tekstbestanden zijn vervolgens omgezet naar puntbestanden in het shapefile format, die door ArcMap te gebruiken zijn. Van deze shapefiles is een uitsnede gemaakt van het onderzoeksgebied met de vooraf geproduceerde polygoon.

2.2.2 Vaklodingen

Voor de vaklodingen zijn eerst alle losse kaartbladen per jaar samengevoegd, zodat per jaar alle informatie in één grid-bestand beschikbaar is. Deze grids zijn omgerekend van hoogte in centimeter t.o.v. NAP naar meter t.o.v. NAP. Vervolgens is een uitsnede gemaakt van het onderzoeksgebied met de daarvoor gemaakte polygoon.

2.2.3 Kust LiDAR

De kaartbladen van LiDAR data zijn omgezet van het netCDF-formaat naar het door ArcMap te gebruiken GRID-formaat. De grid-bestanden van alle kaartbladen zijn ingedeeld per jaar. Hoewel de LiDAR een kleinere oppervlakte beslaat dan de vaklodingen is er door de hogere resolutie veel meer informatie in aanwezig (zestien maal zoveel data voor eenzelfde oppervlak). Hierom zijn de LiDAR-grids niet per jaar samengevoegd tot één grid-bestand per jaar. Om de juiste kaartbladen te kunnen gebruiken bij het combineren van de data is een lijst gemaakt van alle kaartbladen die geheel of gedeeltelijk in het onderzoeksgebied liggen (binnen de gemaakte polygoon).

2.3 Combineren data

Om de puntdata van de JARKUS-raaien te kunnen combineren met de grid-data van de vaklodingen en LiDAR zijn eerst de JARKUS-punten (liggend in het onderzoeksgebied) geïnterpoleerd naar een grid. Vervolgens zijn de grids van de verschillende bronnen met elkaar samengevoegd.

2.3.1 Interpoleren van JARKUS-punten

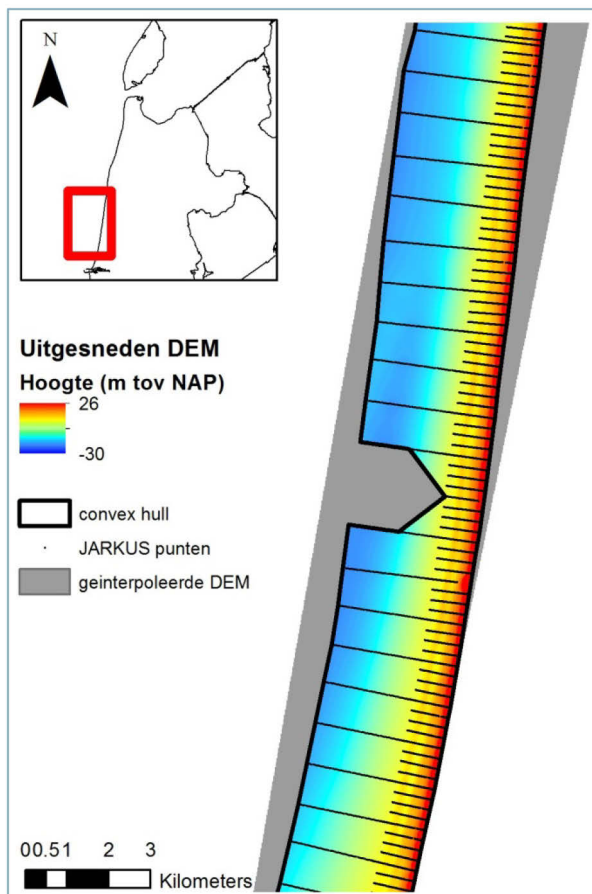
Voor het interpoleren van puntdata zijn verschillende methoden beschikbaar, waaronder kriging, natural neighbor, spline en inverse distance weighting. Het grondig analyseren van de beste interpolatiemethode voor dit specifieke gebied en type data ligt buiten de scope van dit onderzoek. Er is hierom slechts een

oppervlakkige analyse gedaan van een aantal methoden. De resulterende DEM's toonden geen sterke verschillen met elkaar en is er gekozen voor de snelle natural neighbor methode.

Hiermee zijn voor elk jaar de meetpunten binnen het onderzoeksgebied geïnterpoleerd naar een grid-bestand met 20x20 m grid-grootte. De resulterende DEM is door de interpolatiemethode ook bepaald op plekken waar grote 'gaten' in de oorspronkelijke data aanwezig waren. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij missende (door-)lodingen en door de hoeken die de kustlijn maakt. Omdat de nauwkeurigheid van de DEM op deze plekken aanzienlijk lager is, zijn deze gebieden uit de data weggelaten door gebruik te maken van *convex hulls*.

Een convex hull is een polygoon om het gebied met meetpunten heen, waarbij het gebied waar geen metingen beschikbaar zijn niet wordt meegenomen. De parameters voor het maken van de convex hulls zijn zo gekozen dat twee opeenvolgende doorlodingen die licht uit elkaar lopen nog worden verbonden, maar wanneer een doorloding mist dit gebied niet wordt meegenomen.

Met de opensource software 'lastools' (<http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/>) zijn voor alle jaren convex hulls gemaakt rondom de meetpunten. Van de geïnterpoleerde DEM's is een uitsnede gemaakt met de convex hulls (figuur 4), resulterend in de uiteindelijke DEM's van de JARKUS-punten.



Figuur 4
JARKUS-raaien, geïnterpoleerde DEM en convex hull (data uit 1990).

2.3.2 Samenvoegen hoogtemodellen

Het samenvoegen van de DEM's van de verschillende databronnen is in twee stappen gedaan.

In de eerste stap zijn - per jaar - de DEM van de vaklodingen en de DEM van de JARKUS-punten samengevoegd. Hierbij is de JARKUS-DEM aangevuld met de vaklodingen-DEM: bij overlappende gebieden is de data uit de JARKUS-DEM gebruikt.

Als tweede stap zijn de verschillende kaartbladen van de LiDAR data - per jaar - aan de al gecombineerde JARKUS-vaklodingen DEM's toegevoegd. Bij overlappende gebieden heeft de LiDAR data de data uit de gecombineerde DEM vervangen. De resulterende DEM heeft hierna de resolutie van de LiDAR data gekregen (5x5m).

Deze uiteindelijke DEM's - één voor elk jaar - zijn gebruikt in de rest van dit onderzoek.

2.4 Erosiekaarten en volumetrends

De nieuwe DEM's zijn gebruikt voor het maken van erosie-/sedimentatiekaarten en voor het verkennen van kwantitatieve (volume-)analyses.

2.4.1 Verschilkaarten

Door het verschil te nemen tussen DEM's van verschillende jaren wordt de toename of afname in hoogte tussen de twee jaren per gridcell berekend. Er zijn erosiekaarten op drie manieren gemaakt:

1. Ten opzichte van een referentiejaar:

Voor elk jaar, met uitzondering van het referentiejaar zelf, is het verschil berekend met het referentiejaar: $verandering = jaar - referentiejaar$. Door de verschillen in ruimtelijke dekking per jaar zijn de erosiekaarten berekend ten opzichte van een jaar met grote dekking. De resulterende verschilkaarten zullen voor de jaren ná het referentiejaar negatieve waarden geven voor erosieve gridcellen en positieve waarden voor sedimenterende gridcellen. Voor de jaren vóór het referentiejaar zal dit precies andersom zijn. Er zijn verschilkaarten gemaakt ten opzichte van 1965, 1990, 1993 en 2001.

2. Met een vaste tijdsperiode tussen de twee DEM's:

De verschilkaarten ten opzichte van een referentiejaar laten de accumulatieve verandering in de tijd zien. Door verschilkaarten te maken met een vaste tijdsperiode wordt de verandering in die specifieke periode getoond. Er zijn verschilkaarten gemaakt met één jaar en vijf jaar tijdsperiodes - dus (1966 - 1965), (1967 - 1966), etc. en (1970 - 1965), (1975 - 1970), etc.

3. Kaarten van de gemiddelde (jaarlijkse) verandering in een bepaalde periode:

Met de verschilkaarten die met een vaste tijdsperiode zijn gemaakt zijn voor de drie beleidsperioden (tot 1990, 1990-2001, 2001-nu) de verschilkaarten met elkaar gemiddeld. De gemiddelde verschilkaarten beslaan het gebied waar voor elke verschilkaart informatie aanwezig was. Voor de periode 1965-1990 is gebruik gemaakt van de verschilkaarten met vijf jaar interval, met uitzondering van de verschilkaarten 1970-1965 en 1975-1970, vanwege de grotere ruimtelijke dekking. Voor de laatste twee perioden van de verschilkaarten met één jaar interval.

2.4.2 Volumetrends in gebieden van eerdere studies

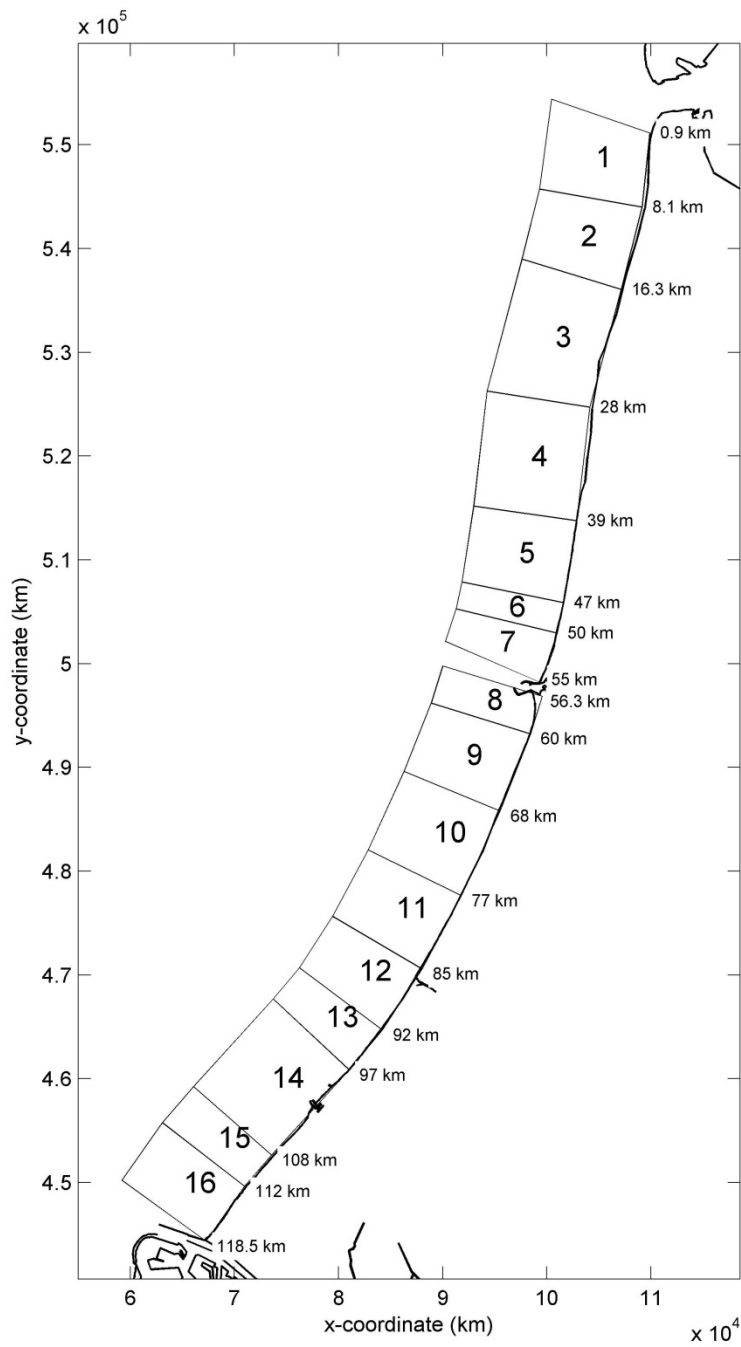
Om de geschiktheid van de nieuwe DEM's voor het bepalen van kwantitatieve volumeveranderingen te analyseren zijn volumetrends bepaald. Dit is gedaan voor zeven gebieden, waarvoor door Van Rijn (1995) de begrenzing langs de kust (gebieden 1 t/m 7 in figuur 5) is vastgesteld. Deze grenzen zijn gebaseerd op uniforme sedimentatie- / erosie patronen binnen elk gebied, bepaald met de JARKUS-raaien. In dwarsrichting

op de kust is de positie van dieptelijnen (in referentiejaar 1990) als begrenzing gebruikt. Verschillende studies hebben deze gebieden gebruikt voor het bepalen van volumetrends (Kalf en Walburg, 1999 (in: Stam, 2010); DHV, 1998 (in: Stam, 2010); Van Rijn, 1995; Van Rijn, 2010; Vermaas, 2010), die met elkaar zijn vergeleken door Vermaas (2010).

Voor de trendanalyse met de nieuwe DEM's is dezelfde aanpak toegepast als door Vermaas (2010) en zijn dezelfde dieptelijnen als begrenzing dwars op de kust gebruikt (NAP -1m t/m NAP -8m en NAP -8m t/m NAP -12m).

Als eerste zijn hiervoor de coördinaten die de begrenzing vormen per gebied uit de JARKUS-raaien gehaald, om ze precies overeen te laten komen met de door Vermaas (2010) gebruikte begrenzing. Met deze coördinaten zijn polygonen in shapefile formaat gemaakt.

Per gebied is de gemiddelde hoogteverandering ten opzichte van het referentiejaar 1990 met de gemaakte verschilkaarten berekend. Voor elk gebied is dit gemiddelde hoogteverschil met de oppervlakte van dat gebied vermenigvuldigd, resulterend in de gemiddelde volumeverandering in m³ ten opzichte van het referentiejaar. Per gebied is er daarna een trend bepaald in de gemiddelde volumeverandering tegen de tijd. Voor de drie perioden (1965 t/m 1990, 1990 t/m 2001 en 2001 t/m 2008) is een aparte trend bepaald.



Figuur 5

Schematische weergave van de gebieden langs de Hollandse kust naar Van Rijn (1995), gebieden 1 t/m 7 zijn in deze studie gebruikt.

3 Resultaten

3.1 Gecombineerde data

3.1.1 Nieuwe hoogtemodellen

Met de nieuwe hoogtemodellen kan voor elk jaar een kaart gemaakt worden. De kaarten geven direct inzicht in de dekking van alle data, dus zowel JARKUS, vaklodingen als LiDAR. Duidelijk is te zien welke jaren een slechtere dekking hebben en welke een betere. Daarnaast is de morfologie van de kust te zien, voor een zo volledig mogelijk gebied. Door een andere kleurschaal en een kleiner gebied te gebruiken zijn verschillende delen van de kust makkelijk te bekijken. Een aantal hoogtemodellen is te zien in figuur 6.

3.1.2 Verschillen tussen de databronnen

De verschillen tussen vaklodingen en JARKUS DEM's zijn gekwantificeerd door het gemiddelde verschil te bepalen en met een visuele analyse. De gemiddelde verschillen liggen in de orde grootte van centimeters en tonen geen systematische afwijking. De standaard deviaties liggen in de orde grootte van decimeters. Voor volume veranderingen in een gebied is vooral de gemiddelde afwijking van belang, doordat binnen dit gebied de random afwijkingen elkaar uitmiddelen.

Tabel 1

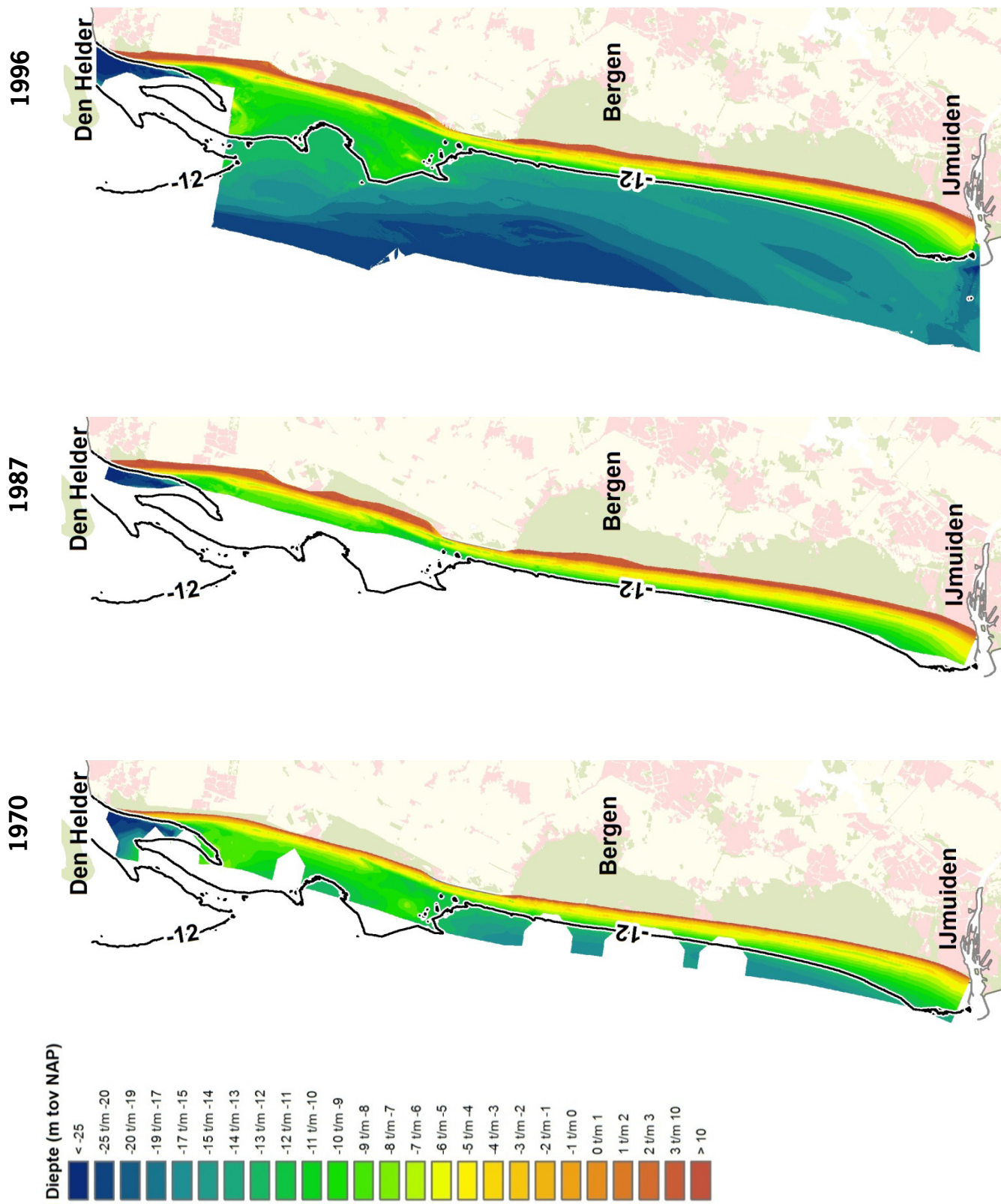
Gemiddelde verschil en standaard deviatie (in m) tussen vaklodingen en JARKUS DEM's.

	1990	1993	1996	1999	2001	2005	2008	2009
Gemiddelde	0.067	0.034	0.038	-0.017	-0.068	0.097	0.039	-0.007
Standaard deviatie	0.805	0.628	0.843	0.928	1.070	0.998	0.304	0.571

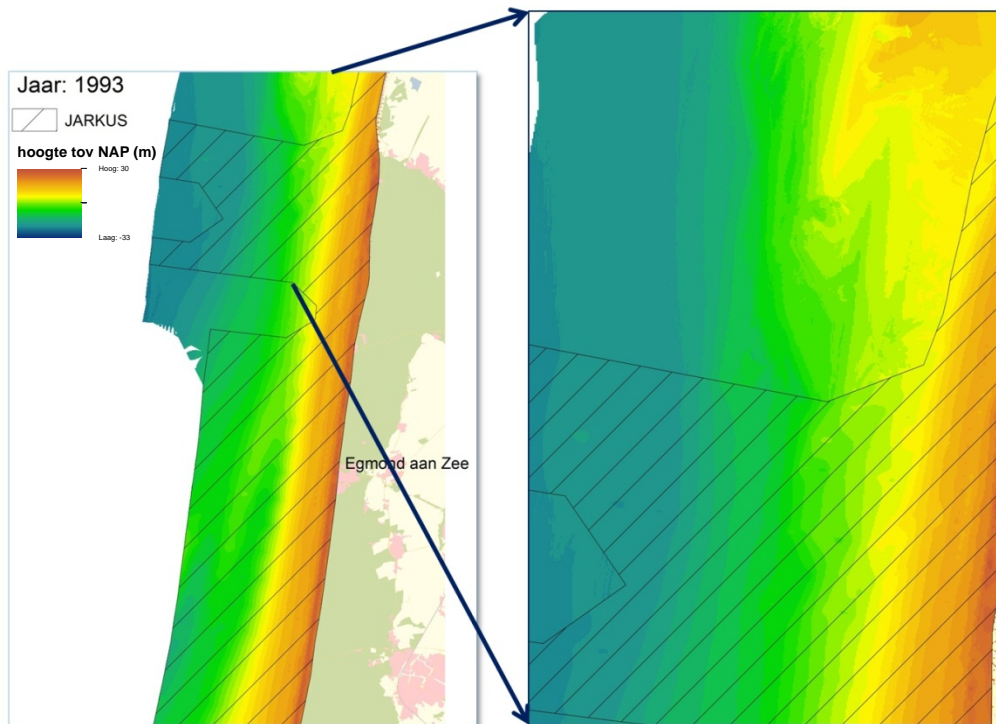
Voor de visuele analyse zijn van de gecombineerde DEM's de overgang tussen de geïnterpoleerde JARKUS-data en de vaklodingen bekeken. Over het algemeen is er een erg goede overgang tussen de twee databronnen en hebben beide bronnen dezelfde waarden nabij de overgang (figuur 7).

Door de overgang te bekijken in verschilkaarten wordt zichtbaar of twee verschillende databronnen uit verschillende jaren met elkaar vergeleken kunnen worden. De verschilkaart tussen 2008 en 1993 is in figuur 8 weergegeven. Het niet-gearceerde gebied bevat in beide jaren vaklodingen. Het enkel gearceerde gebied bevatte in 2008 vaklodingen en in 1993 JARKUS-data. Het geruite gebied bevatte zowel in 1993 als in 2008 JARKUS-data.

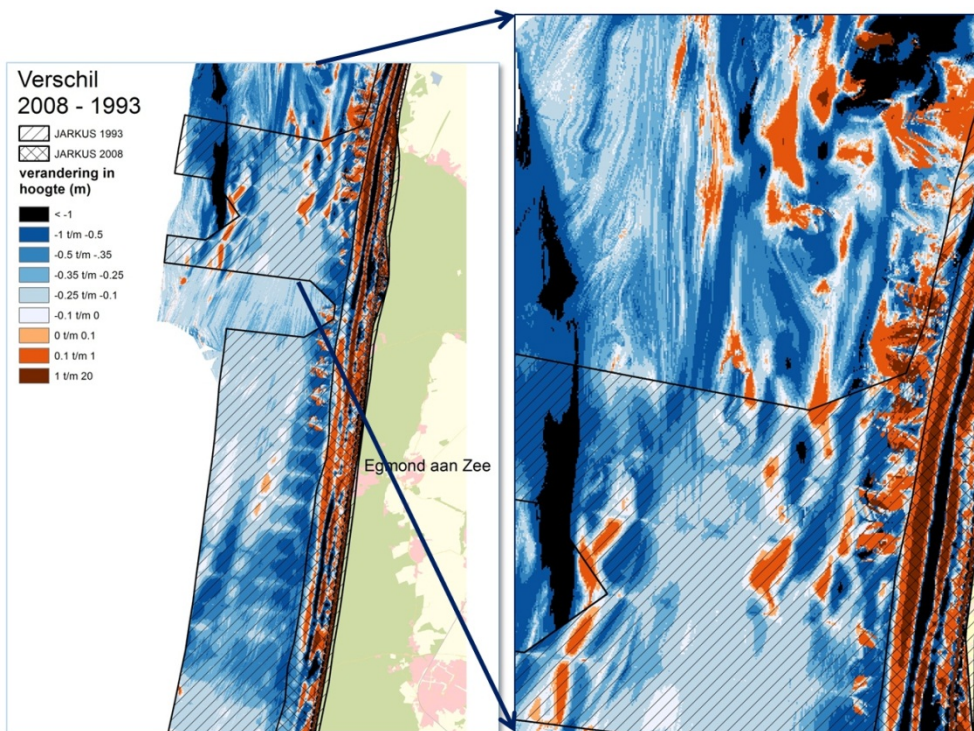
In het niet-gearceerde gebied zijn fijnere patronen te zien dan in het enkel gearceerde gebied, de overgang van de patronen is echter in hoofdlijnen erg goed. Ook het geruite gebied en het enkel gearceerde gebied sluiten goed op elkaar aan.



Figuur 6
Nieuwe hoogtemodellen voor drie jaren.



Figuur 7
 Overgang van JARKUS- naar vaklodingen-data in DEM van 1993.



Figuur 8
 Overgang van JARKUS- naar vaklodingen-data in verschilkaart 2008-1993.

3.2 Erosiekaarten en volumetrends

3.2.1 Erosiekaarten

Per type erosiekaart zijn er voor- en nadelen en zijn er verschillende geschikte doeleinden. Hieronder wordt dit per type erosiekaarten besproken.

De verschilkaarten met vaste tijdsperiode van één jaar laten alleen het overlappende gedeelte tussen de twee jaren zien, waardoor ze voor veel jaren een klein gebied beslaan. Met name de verschilkaarten 1966-1965 t/m 1985-1984 hebben een beperkte ruimtelijke dekking.

In de verschilkaarten zijn variaties zichtbaar van morfologische processen die zich op korte termijn afspelen. Mogelijk zijn twee opeenvolgende jaren niet op het zelfde moment in het jaar gemeten waardoor de verschilkaarten ook seizoen-effecten laten zien. Duidelijke erosie of sedimentatie patronen die op lange (decades) termijn spelen komen slecht naar voren in deze verschilkaarten.

De kaarten kunnen goed gebruikt worden voor visuele analyse van korte termijn-effecten. De kaarten 1992-1991 en 1993-1992 (figuur 9) laten een opmerkelijke verandering zien in de kust tussen Bergen en IJmuiden. Het gebied dat tussen 1991 en 1992 sedimentatie en tussen 1992 en 1993 erosie vertoont heeft een begrenzing die - zowel aan de noord- als zuidzijde - loodrecht op de kust loopt. De veranderingen met deze begrenzing lijken niet een natuurlijke oorsprong te hebben, maar kunnen ook niet worden verklaard door suppleties. Mogelijk is de oorzaak te vinden in de JARKUS-data van 1992. Ook andere verschilkaarten tonen opmerkelijke patronen, deze worden echter niet verder besproken in dit rapport.

De verschilkaarten ten opzichte van een referentiejaar laten accumulatief zien hoe de kust zich ontwikkelt. Hier zijn morfologische processen die op langere termijn spelen, zoals de ontwikkeling van de Marsdiep-ebdelta, in te zien. De kaarten geven ook al een beeld hoe de trend in volume er langs de kust uit zal zien, door het zichtbaar maken van gebieden met erosie of juist sedimentatie over langere tijd. Een selectie van verschilkaarten met referentiejaar 1990 is te zien in figuur 10.

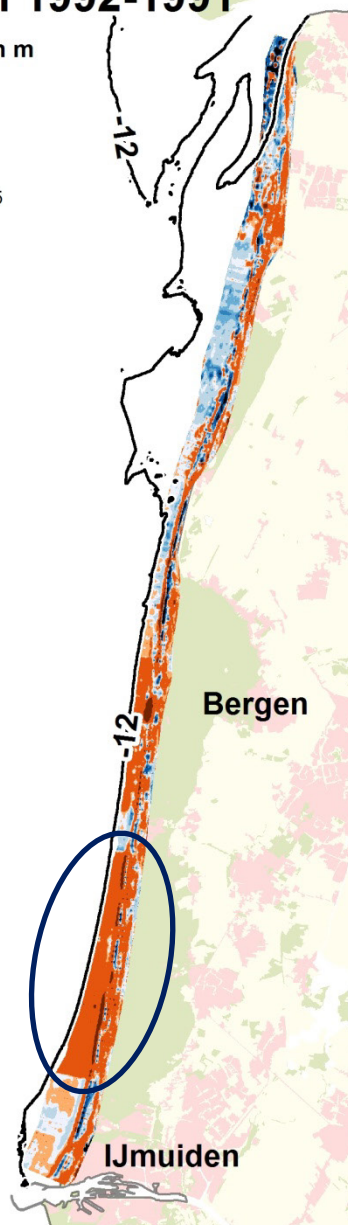
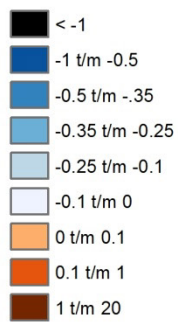
De laatste soort verschilkaarten is de gemiddelde verandering berekend aan de hand van de verschilkaarten met vaste tijdsperiode. In deze verschilkaarten zijn variaties die op kleine termijn spelen eruit gemiddeld, waardoor de langere termijn verandering wordt weergegeven. Ze laten een vergelijkbaar beeld zien als de verschilkaarten ten opzichte van een referentiejaar met een grote tijdspanne (bijvoorbeeld verschil 1965 met 1990). De eenheid van de gemiddelde verschilkaarten is echter het (gemiddelde) verschil per jaar, in plaats van de totale verandering in de bepaalde periode.

De gemiddelde verschilkaarten voor de drie beleidsperioden zijn te zien in figuur 11. Hoewel voor de perioden 1990-2001 en 2001-heden de ruimtelijke dekking kleiner is dan voor 1965-1990, is duidelijk te zien dat de zone tot NAP -12m van zand-verliezend naar zand-winnend is veranderd.

Met een 3D visualisatie is zichtbaar waar erosie en waar sedimentatie optreed. In figuur 12 is de verschil tussen 1965 en 1990 weergegeven op de DEM van 1990, met 40x verticale overdrijving.

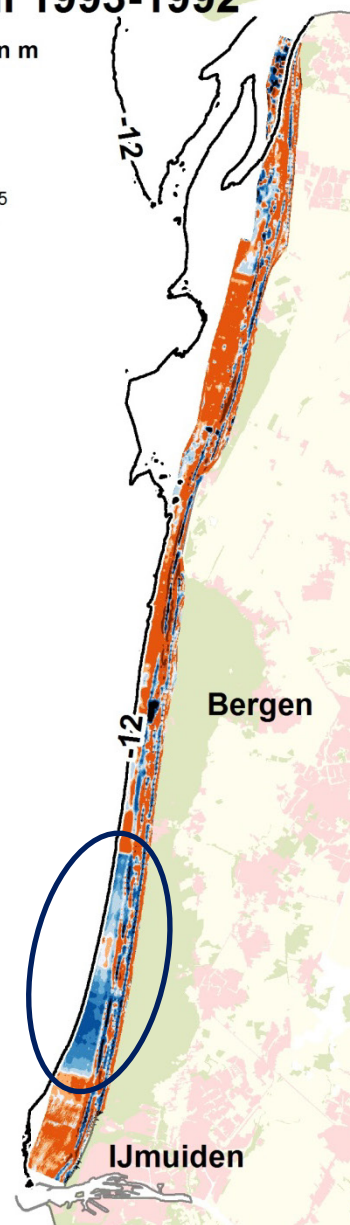
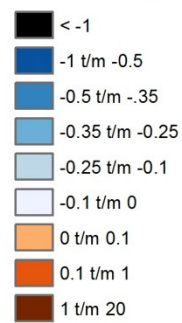
Verschil 1992-1991

Verandering in m



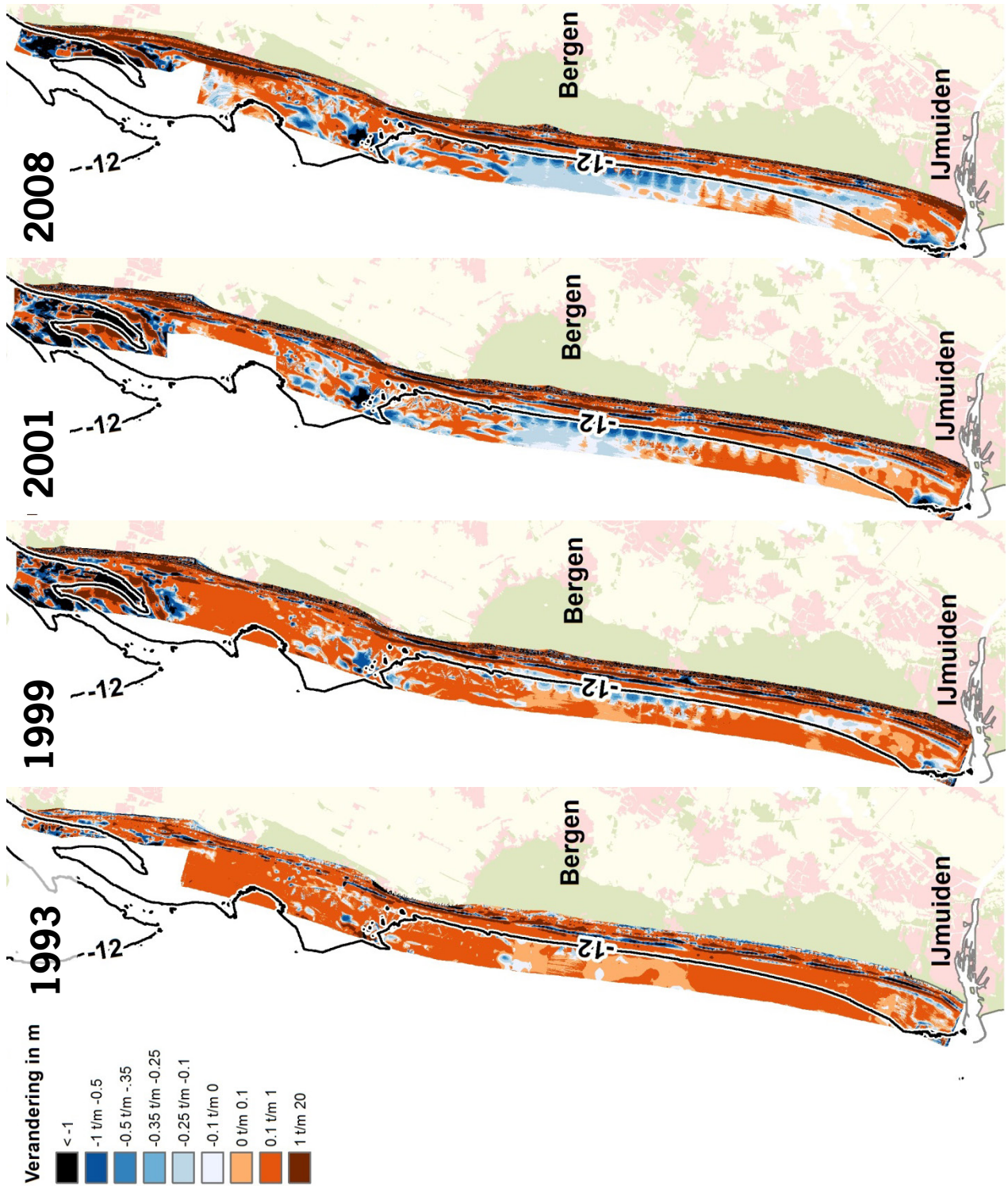
Verschil 1993-1992

Verandering in m

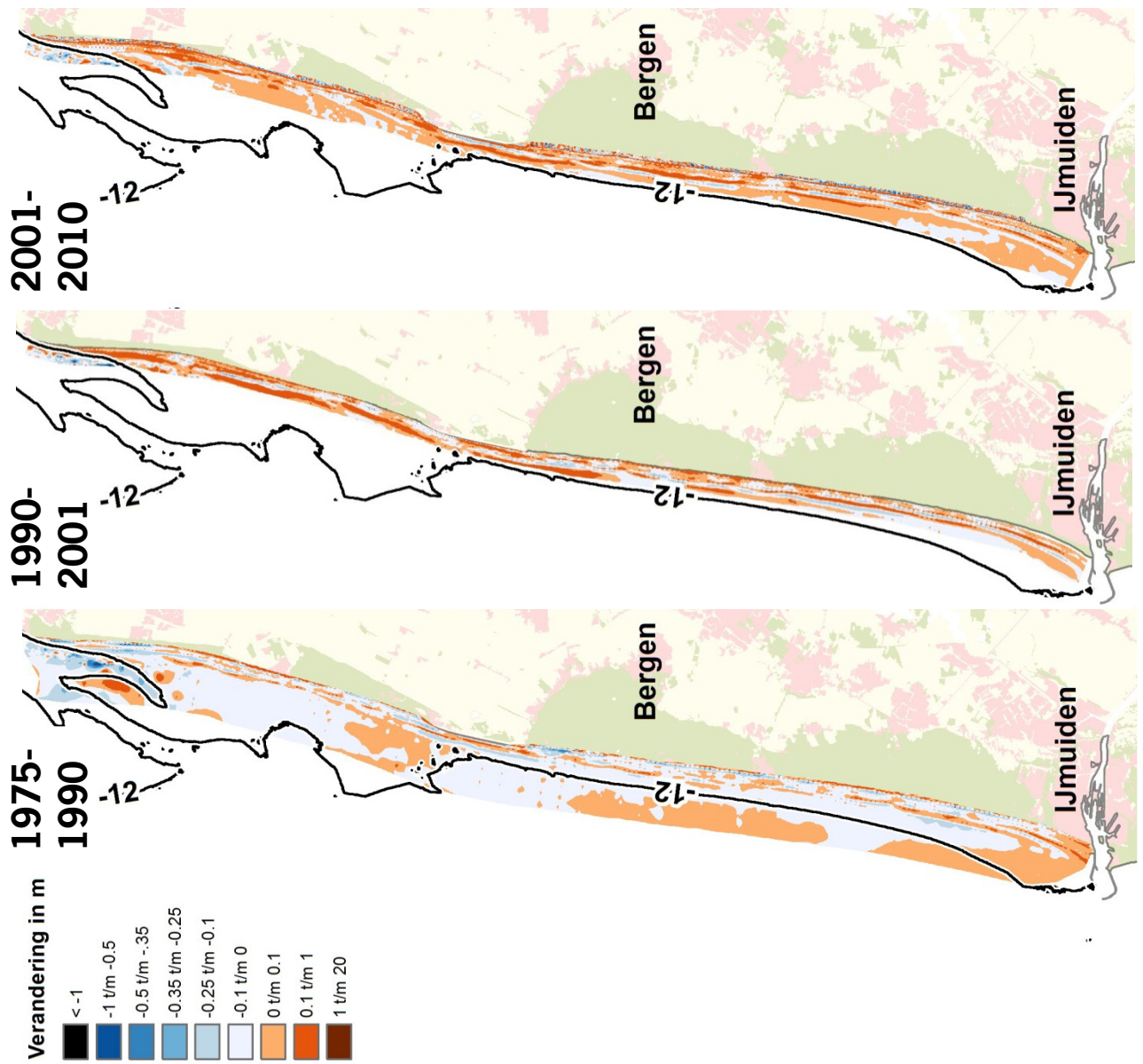


Figuur 9

Visuele analyse van verschilkaarten, met opmerkelijke patronen in het aangegeven gebied.



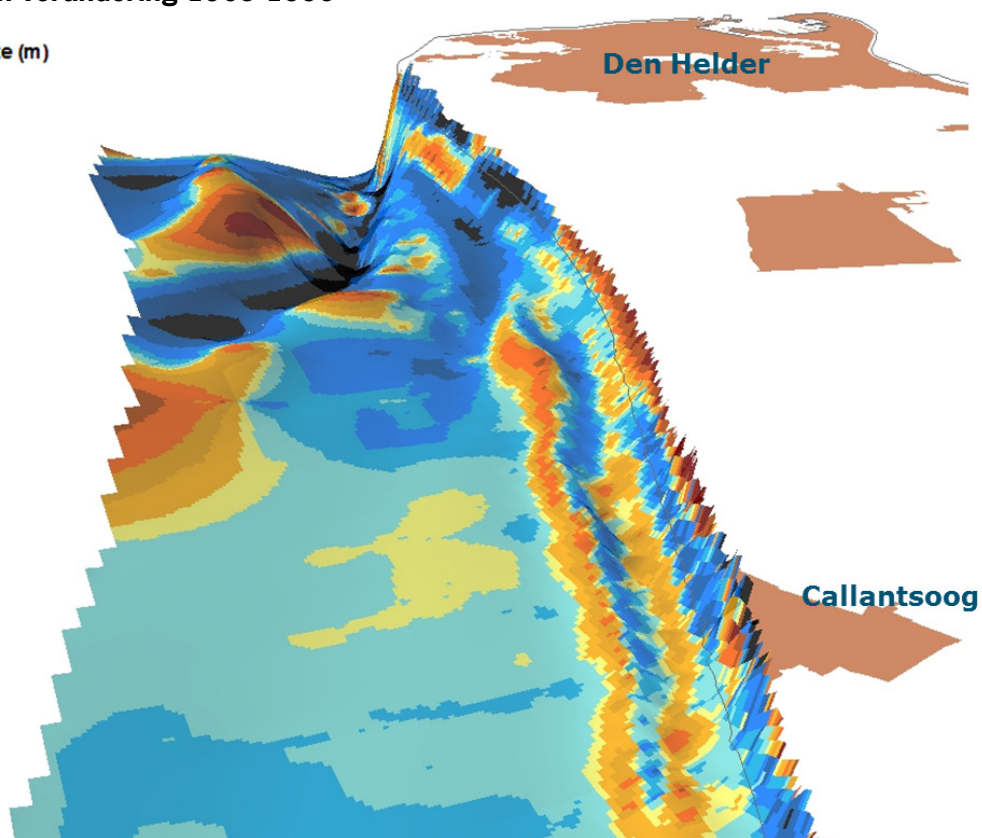
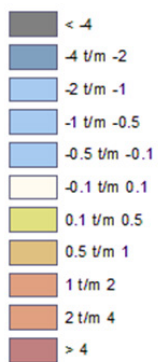
Figuur 10
 Verschilkaarten ten opzichte van referentiejaar 1990.



Figuur 11
 Gemiddelde jaarlijkse verschilkaarten voor de drie beleidsperioden.

Hoogte 1990 en verandering 1965-1990

verandering in hoogte (m)
tov 1965



Figuur 12

3D visualisatie van hoogteverandering tussen 1965 en 1990, geprojecteerd op DEM van 1990 (40x verticale overdrijving).

3.2.2 Volumetrends in gebieden van eerdere studies

Naast de kwantitatieve berekeningen zijn de gemaakte polygonen van de gebieden samen met de eerder gemaakte verschilkaarten geplot (figuur 13). Hierop is de werkelijke ligging van de gebieden zichtbaar, die op de schematische weergave (figuur 5) niet weergegeven werd. Ook is zichtbaar in hoeverre de DEM de gebieden dekt, bijvoorbeeld het niet compleet dekken van gebied 5 tussen NAP -8 en -12m (figuur 13). De achterliggende verschilkaart laat de erosie- en sedimentatie patronen binnen én buiten de gebieden zien.

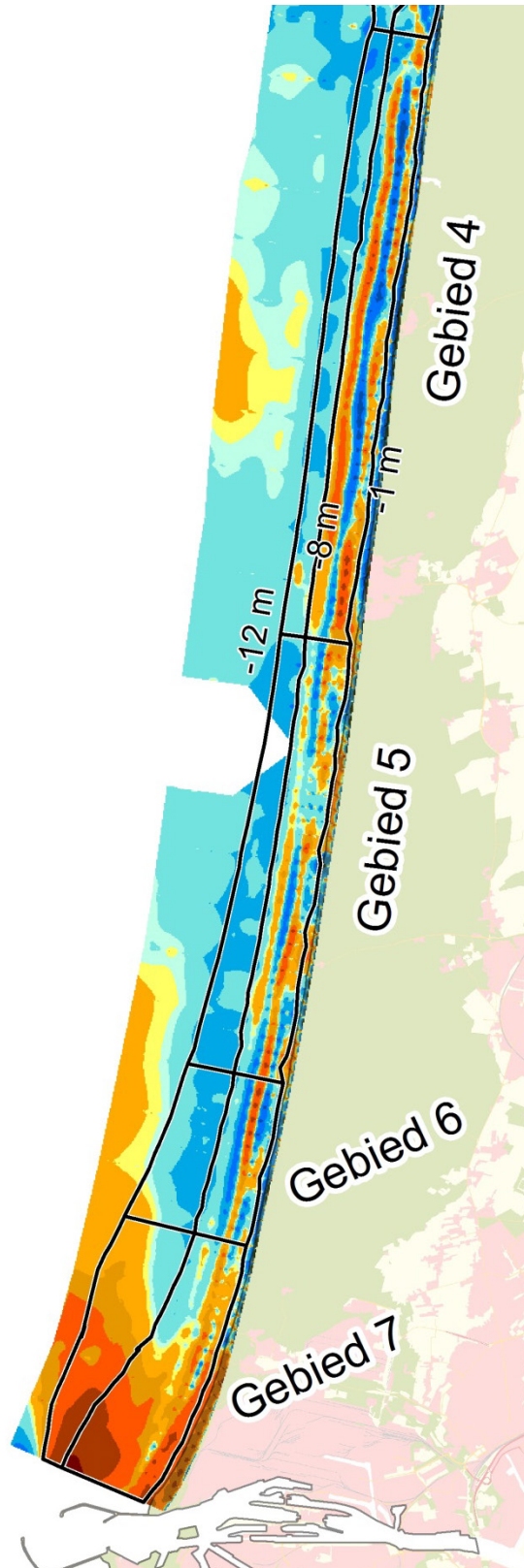
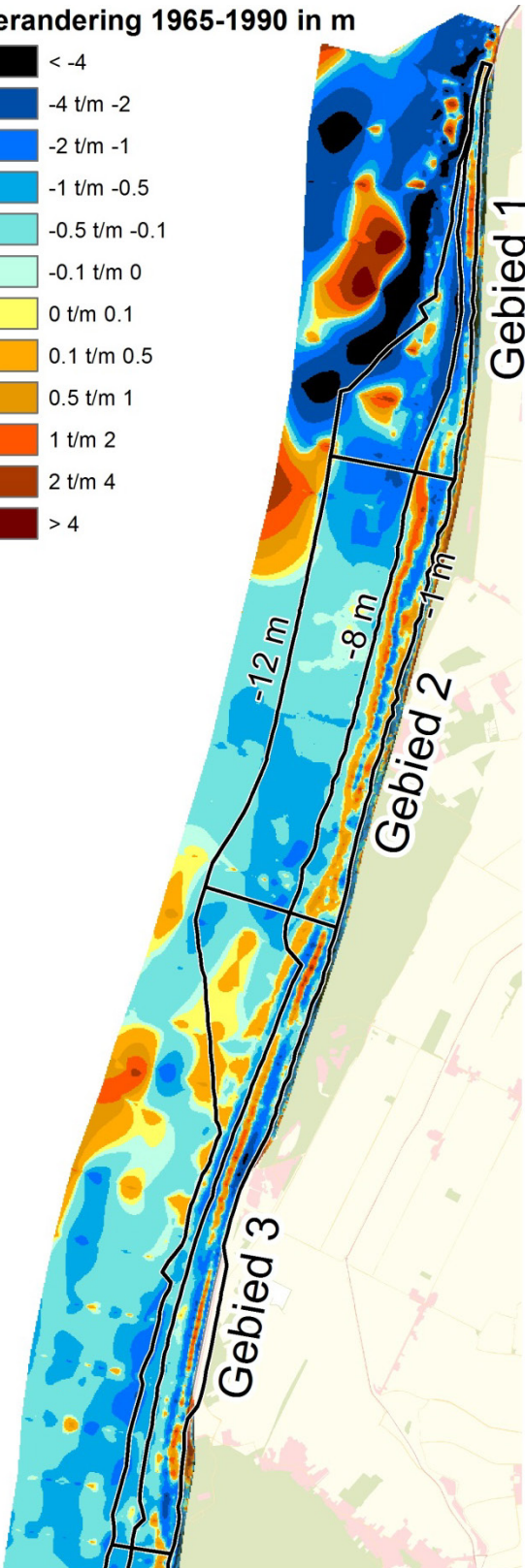
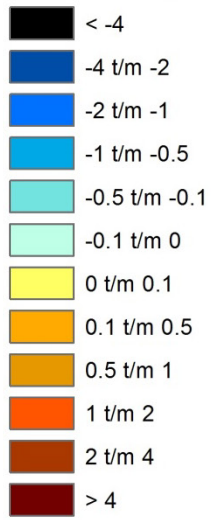
Hoewel de kwantitatieve informatie van de trends mist, zijn de patronen en globale volumeveranderingen per gebied een goede aanvulling daarop. Zowel de berekende relatieve volumes per gebied in een grafiek, als de verschilkaart zijn daarom samen weergegeven (figuur 14). De grafiek geeft inzicht in de trend en de gemiddelde verandering van de gebieden, terwijl de verschilkaart laat zien wat de trend veroorzaakt en of er buiten het gebied andere processen spelen.

De trends berekend op basis van de geïnterpoleerde DEM's zijn per dieptezone en per periode weergegeven voor alle gebieden langs de Noord-Hollandse kust (figuur 15 en figuur 16). De trends uit Vermaas (2010), die alleen gebaseerd zijn op de JARKUS-raaien, zijn in dezelfde grafiek weergegeven. Zowel voor de diepe zone (NAP -8/-12m) als de ondiepe zone (NAP -1/-8m) komen de trends goed overeen. Ook voor de perioden 1990-2001 en 2001-2008 (niet in dit rapport weergegeven) komen de trends goed overeen, met uitzondering van de trends voor 2001-2008 voor de diepe zone (figuur 18).

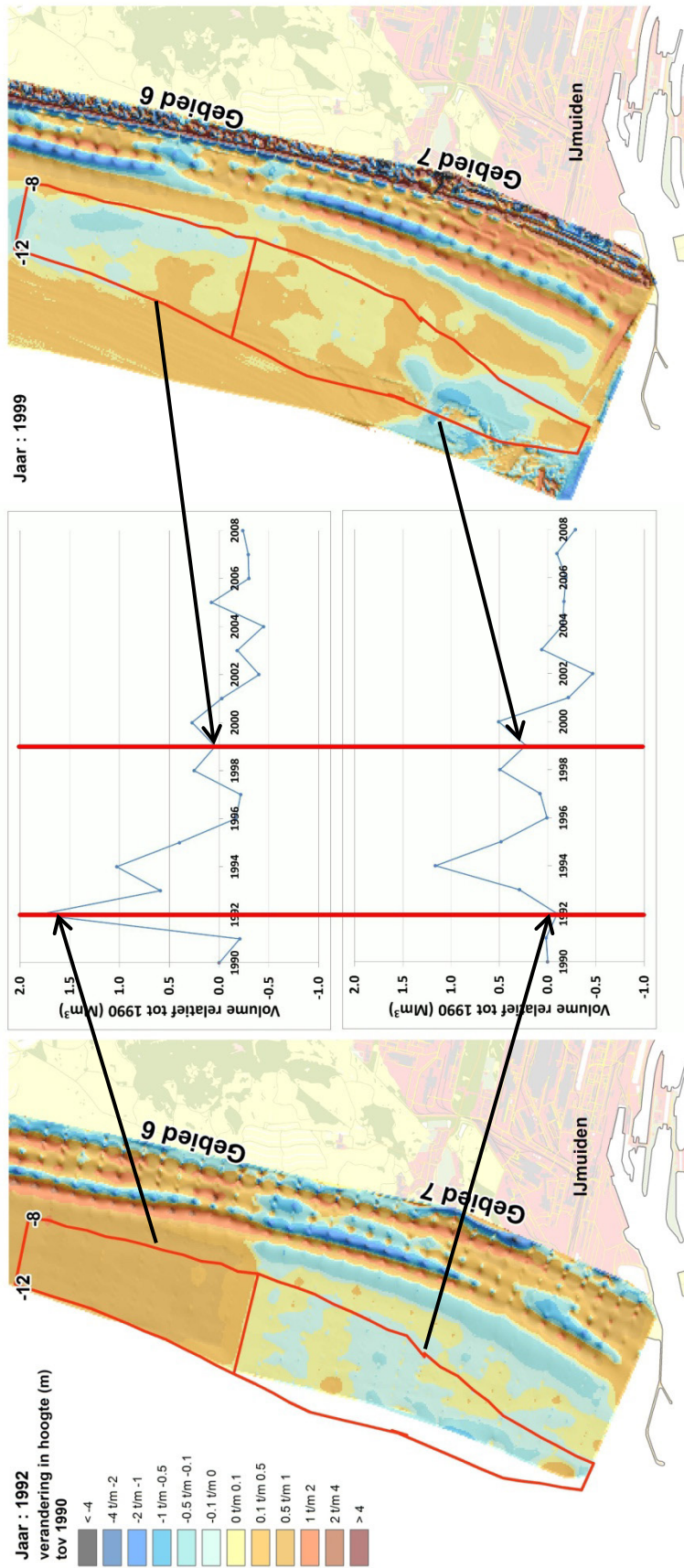
Met name de gebieden 3, 4 en 5 laten voor de diepe zone in de periode 2001-2008 afwijkende trend zien ten opzichte van de trends uit Vermaas (2010). Figuur 19 laat de ontwikkeling van het volume in gebied 4 voor deze zone en periode zien. Hierin is te zien dat voornamelijk het relatieve volume in 2008 verschillend is tussen deze studie en Vermaas (2010). Gebieden 3 en 5 laten een zelfde beeld zien: het relatieve volume in deze studie ligt in 2008 lager dan dat volgens Vermaas (2010), terwijl de overige jaren vergelijkbare volumes tonen.

In figuur 20 is de verschilkaart 1990-2008 weergegeven voor gebied 4, NAP -8/-12m zone. Op de kaart is de dekking door JARKUS-data weergegeven in het gearceerde gebied. Het kaartgedeelte buiten dit gearceerde gebied is toegevoegd vanuit de vaklodingen, en dus slechts meegenomen in de berekeningen in deze studie en niet door Vermaas (2010). Het deel van het onderzochte gebied 4 waarvoor JARKUS-data beschikbaar is toont voornamelijk sedimentatie, terwijl het aangevulde deel erosie laat zien. Het hogere relatieve volume op basis van alleen JARKUS-data is dus veroorzaakt door het ontbreken van het erosieve gedeelte van gebied 4. De andere twee uitschieters in figuur 19, in 2004 en 2007, worden ook veroorzaakt door het ontbreken van data van het erosieve gedeelte van het gebied. Voor deze jaren waren geen vaklodingen beschikbaar die dat gedeelte aanvulden, waardoor ook de huidige berekeningen een overschatting van het volume maken. Voor de overige jaren dekte de JARKUS-data wel een groot genoeg deel van gebied 4, NAP -8/-12m zone.

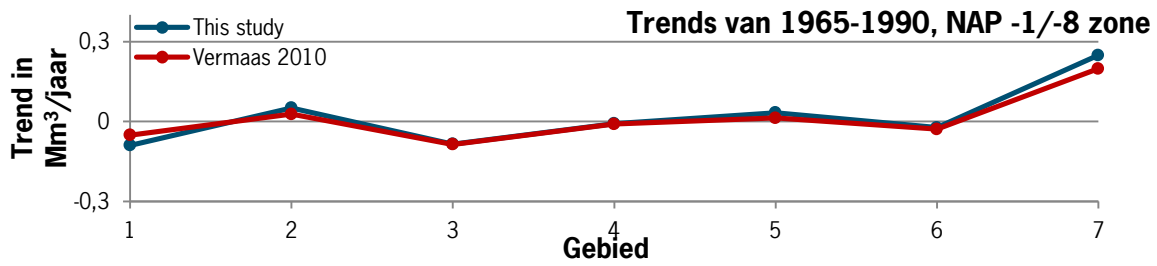
Verandering 1965-1990 in m



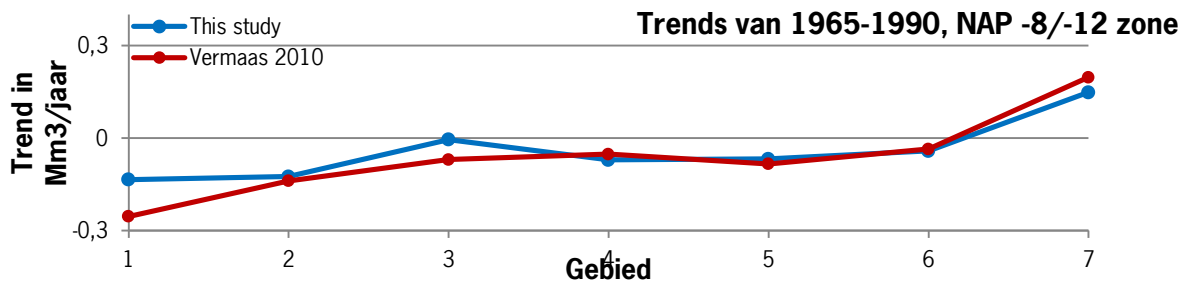
Figuur 13
Overzicht ligging gebieden zoals gebruikt in volumetrend analyses.



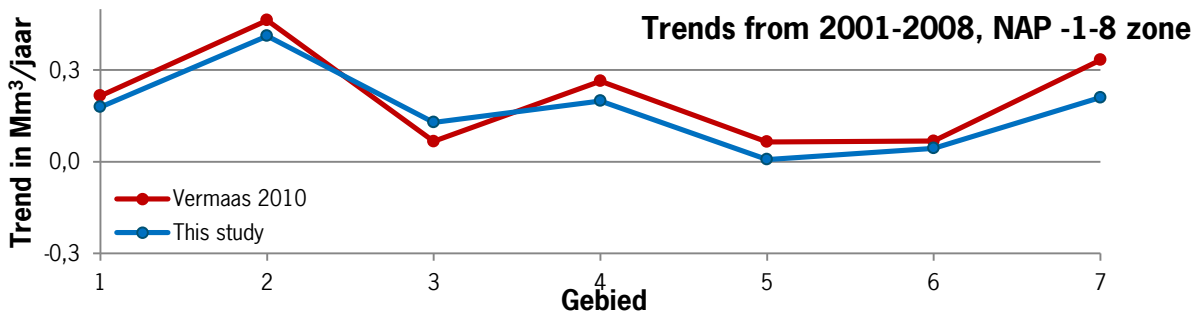
Figuur 14
Verschilkaarten en berekende volumes in 1992 en 1999 ten opzichte van 1990, voor de gebieden 6 en 7, tussen NAP -8 en -12m



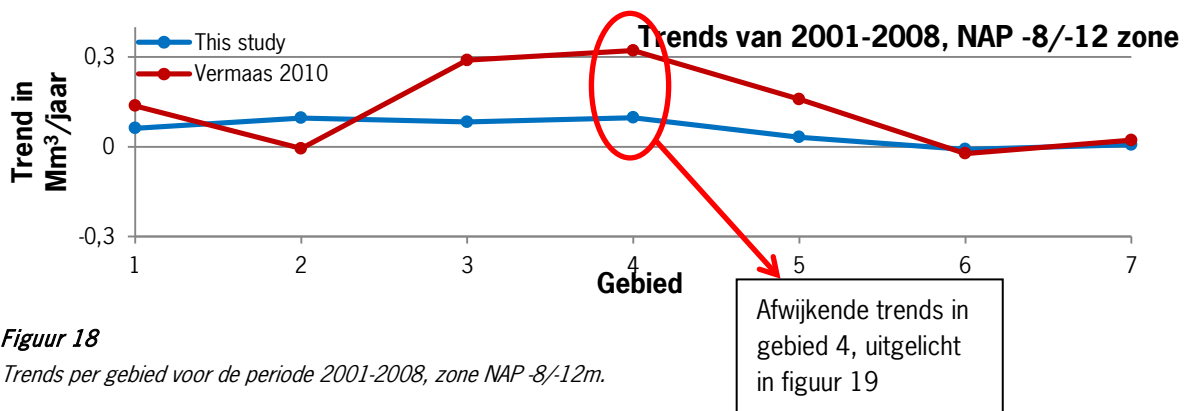
Figuur 15
Trends per gebied voor de periode 1965-1990, zone NAP -1/-8m.



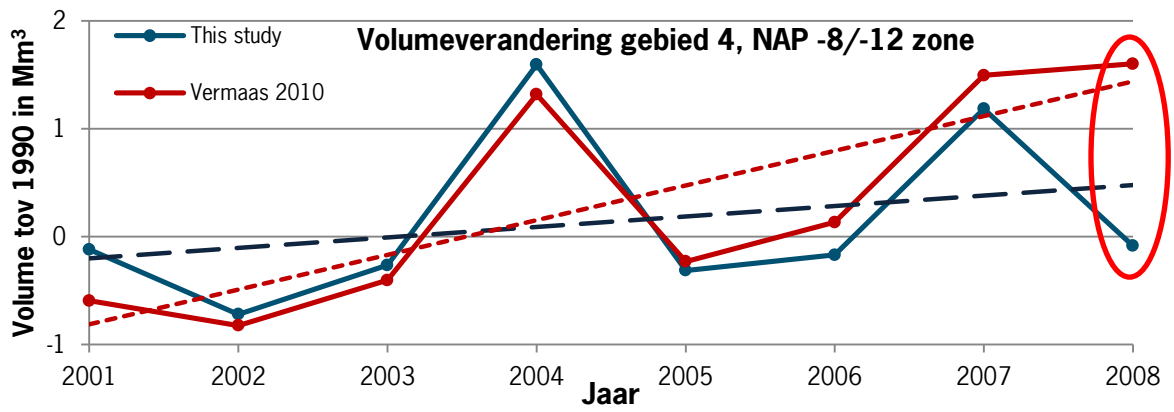
Figuur 16
Trends per gebied voor de periode 1965-1990, zone NAP -8/-12m.



Figuur 17
Trends per gebied voor de periode 2001-2008, zone NAP -1/-8m.

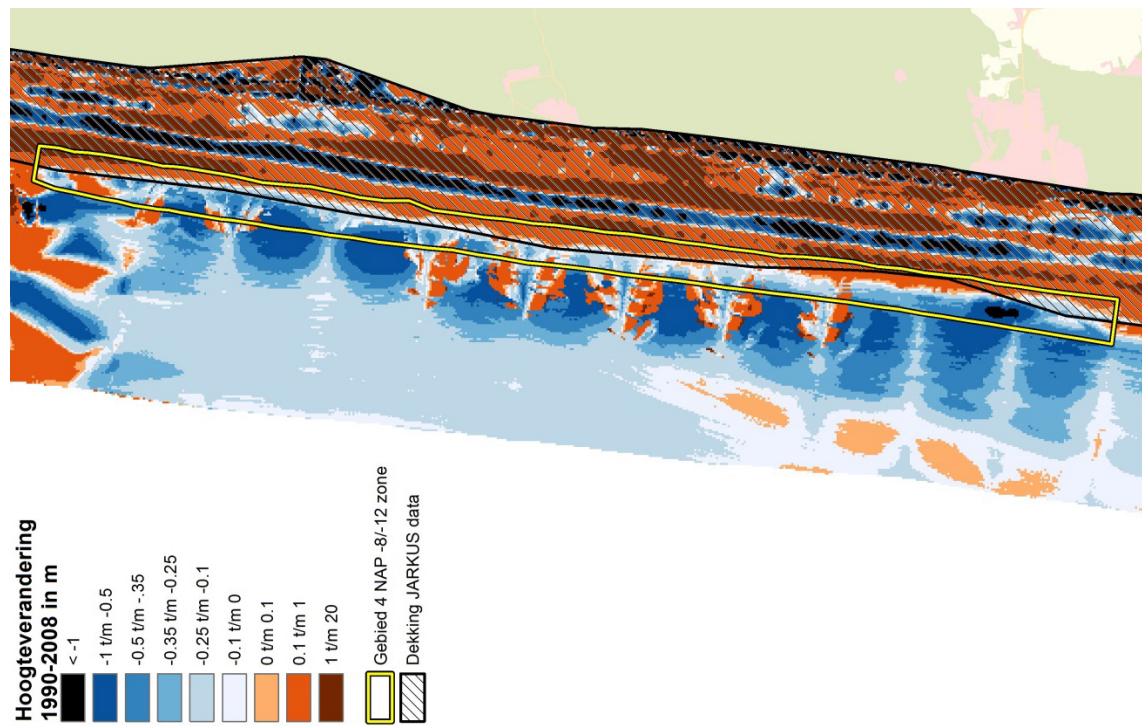


Figuur 18
Trends per gebied voor de periode 2001-2008, zone NAP -8/-12m.



Figuur 19

Volumeveranderingen in gebied 4 voor de periode 2001-2008, zone NAP -8/-12m. Rode ovaal geeft de afwijkende waarde aan waardoor het verschil in trend wordt veroorzaakt.



Figuur 20

Hoogteverandering in gebied 4 tussen 1990 en 2008, met dekking JARKUS-data aangegeven in gearceerde gebied.

4 Discussie en conclusies

In deze studie is het mogelijk gebleken om drie verschillende databronnen te combineren tot één nieuwe dataset per jaar. Zowel JARKUS-data, vaklodingen als LiDAR-data zijn opgenomen in de nieuwe DEM's. Deze datasets hebben verschillende voor- en nadelen en zijn geschikt voor verschillende toepassingen. De DEM's geven een consistent beeld en direct zicht op de ruimtelijke dekking. Hierbij is niet direct zichtbaar wat de bron is van de delen van de data, dit is echter wel met de convex hulls mogelijk voor het JARKUS-deel van de data.

De DEM's en daarmee berekende verschilkaarten bieden zicht op de morfologische processen en ruimtelijke variatie. Voor kwalitatieve analyse van de kust en het verkrijgen van een globaal beeld van de ontwikkeling van de kust zijn deze nieuwe datasets goed bruikbaar. De verschilkaarten met één jaar tijdsverschil zijn met name geschikt voor jaarlijkse variaties en de verschilkaarten ten opzichte van een referentiejaar voor de ontwikkeling op een langere tijdschaal.

Een grondige analyse van de kwaliteit van de DEM's is nog niet uitgevoerd en er is visueel zichtbaar dat interpolatie van punten uit transecten (en niet random verdeelde punten) bijeffecten heeft. De sterke overeenkomst tussen de gevonden trends op basis van deze DEM's en de trends gevonden in eerdere studies geeft echter aan dat voor grote gebieden en meerjarige trends de DEM's goed bruikbaar zijn. De toevoeging van de vaklodingen vult voor sommige gebieden de data aan, waardoor de trends beter kunnen worden bepaald.

De DEM's bieden meer inzicht door deze trends te combineren met de verschilkaarten en visuele, kwalitatieve analyse. De ligging van de geanalyseerde gebieden langs de Hollandse kust, weergegeven op een verschilkaart, geeft zicht op de ontwikkelingen binnen én buiten de gebieden. Hierdoor wordt zichtbaar of sterk erosieve of sedimentatieve delen niet worden meegenomen in de analyse van de gebieden.

Ook de ruimtelijke dekking van de data binnen de gebieden wordt zichtbaar, waarbij jaren met complete dekking laten zien of in het missende gedeelte erosie of sedimentatie optreedt. De aanname dat per gebied de hoogteveranderingen min of meer uniform is, die aan de grondslag ligt van de gebruikte volume-berekeningen, blijkt hieruit voor de meeste gebieden niet te kloppen. Daardoor is de methode slechts geldig voor gebieden met complete ruimtelijke dekking.

5 Aanbevelingen

Deze studie was een eerste verkenning naar de mogelijkheden om de beschikbare data te combineren. De nieuwe datasets blijken zeker een meerwaarde te bieden voor verschillende toepassingen. Aanbevelingen voor vervolgstappen met betrekking tot deze datasets zijn tweeledig:

Verbeteren kwaliteit van de nieuwe datasets:

- Ruwe data gebruiken voor interpolatie: de JARKUS-raaien en vaklodingen zelf zijn al geïnterpoleerd op basis van hoogtemetingen. Het direct gebruiken van de oorspronkelijke metingen kan de foutmarge verkleinen.
- Valideren DEM's: het kwantificeerbaar maken van de kwaliteit van de nieuwe datasets. Dit kan mogelijk door cross-validatie met de oorspronkelijke data. Hierbij kan dan ook gekeken worden naar andere of betere interpolatiemethoden, zoals anisotropic kriging.
- Vergelijken JARKUS met vaklodingen: voor sommige jaren overlappen de JARKUS-metingen de vaklodingen. In deze studie is pragmatisch gekozen om op die plekken de JARKUS-data te gebruiken. Door de verschillen tussen de twee datasets te analyseren kan mogelijk beter worden bepaald of hier een beter methode voor gebruikt kan worden.

Uitbreiding onderzoek:

- Nauwkeuriger analyseren van de gebieden langs de kust, zowel morfologisch als de trends in volumes, met behulp van de nieuwe datasets. Per gebied kan bijvoorbeeld bekeken worden of er fouten in de data zitten, of het gebied volledig wordt gedekt door de data en wat de morfologische oorzaak is van de volumeveranderingen. Ook de processen die (net) buiten het gebied vallen kunnen hier worden meegenomen.
- Berekenen van DEM's voor geheel Nederland, en deze ook ontsluiten voor gebruik.
- Uitgebreidere statische analyses, zoals bijvoorbeeld raster-based (per gridcell) trend analyse.
- Beschouwen gebruikte gebiedsindeling, in zowel kust-longs als kust-dwars en mogelijk vaststellen van nieuwe gebieden. Door de aanvulling van data kunnen mogelijk gebieden tot grotere diepte worden bestudeerd.

Literatuur

- Arens, S.M., S.P. van Puijvelde en C. Brière, 2010. Effecten van suppleties op duinontwikkeling. Rapportage geomorfologie. Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek, RAP 2010.03 in opdracht van LNV Directie Kennis (OBN) en Rijkswaterstaat Waterdienst.
- De Ruig, J., 1995. De kust in breder perspectief - Basisrapport kustnota 1995. Rapport RIKZ/95-005. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Ministerie van V&W, 1990. 1e Kustnota: Kustverdediging na 1990; beleidskeuze voor de kustlijnzorg, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Ministerie van V&W, 2000. 3e Kustnota: Traditie, Trends en Toekomst, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat.
- Mulder, J.P.M., 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel - advies voor dynamisch handhaven in de 21e eeuw. Rapport RIKZ/2000.36. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Stam, J.M.T., 1999. Zandverlies op diep water aan de Hollandse kust. Rapport RIKZ/99.006. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.
- Twynstra Gudde & Alkyon, 2007. Evaluatie Derde Kustnota.
- Van Koningsveld, M. and J.P.M. Mulder, 2004. Sustainable coastal policy developments in the Netherlands. A systematic approach revealed. *Journal of Coastal Research* 20(2): pp. 375-385.
- Van Rijn, L.C., 1995. Sand budget and coastline changes of the central coast of Holland between Den Helder and Hoek van Holland: period 1964-2040. WL rapport H2129- project Kustgenese, WLIDelft Hydraulics.
- Van Rijn, L.C., 1997. Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. *Coastal Engineering* 32(1): pp. 61-90.
- Van Rijn, L.C., 2010. Coastal erosion control based on the concept of sediment cells, EU-Project CONSCIENCE. Deltares, Delft, The Netherlands.
- Vermaas, T., 2010. Morphological behavior of the deeper part of the Holland coast. Report. Deltares, Delft, The Netherlands.



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