



departement
*Mobiliteit en
Openbare Werken*

Morfologische trends op middellange termijn van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust

DEELRAPPORT IN HET KADER VAN HET QUEST4D-PROJECT



814_02

WL Rapporten

Morfologische trends op middellange termijn van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust

Deelrapport in het kader van het Quest4D-project

Janssens, J.; Delgado, R.; Verwaest, T.; Mostaert, F.

April 2013

WL2013R814_02_2rev2_0

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Janssens, J.; Delgado, R.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2013). Morfologische trends op middellange termijn van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust: Deelrapport in het kader van het Quest4D-project. Versie 2_0. WL Rapporten, 814_02. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be



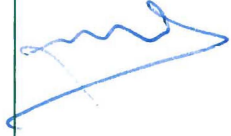


www.watlab.be

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welk andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming van de uitgever.

Documentidentificatie

| | | | |
|-----------------|--|---|--|
| Titel: | Morfologische trends op middellange termijn van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust: Deelrapport in het kader van het Quest4D-project | | |
| Opdrachtgever: | BELSPO | Ref.: | WL2013R814_02_2rev2_0 |
| Keywords (3-5): | morfologie, evolutie, strand, vooroever, ArcGIS | | |
| Tekst (p.): | 70 | Bijlagen (p.): | 8 |
| Vertrouwelijk: | <input checked="" type="checkbox"/> Ja | Uitzondering: | <input checked="" type="checkbox"/> Opdrachtgever |
| | | | <input checked="" type="checkbox"/> Intern |
| | | | <input checked="" type="checkbox"/> Vlaamse overheid |
| | <input type="checkbox"/> Nee | <input type="checkbox"/> Online beschikbaar | |

Goedkeuring

| | | | | |
|---|---|--|---|---|
| Auteur Janssens, J.  | Revisor Delgado, R.  | Projectleider Verwaest, T.  | S&A Directeur Verwaest, T.  | Afdelingshoofd Mostaert, F.  |
|---|---|--|---|---|

Revisies

| Nr. | Datum | Omschrijving | Auteur(s) |
|-----|------------|----------------------|---------------------------|
| 1_0 | 20/12/2011 | Conceptversie | Janssens, J. |
| 1_1 | 12/01/2012 | Inhoudelijke revisie | Delgado, R.; Verwaest, T. |
| 2_0 | 23/04/2013 | Definitieve versie | Janssens, J. |

Abstract

In het kader van het BELSPO gefinancierd project Quest4D is aan het WL een studie uitgevoerd naar de morfologische evolutie van strand, vooroever en kustnabije zone van de Belgische kust op middellange termijn (gedurende de laatste 13 jaar, dit is de periode voor dewelke digitale datasets beschikbaar zijn). De gebruikte methodologie is de morfologische trendanalyse (waarbij voor de hele kustzone de evolutie van strand en zeebodem lokaal bekeken wordt, resulterend in erosie/sedimentatie-kaarten) en de volumetrische trendanalyse (waarbij de evolutie van volumes sediment binnen enkele afgebakende gebieden met een eenduidige morfologische trend bekeken wordt).

Dit rapport presenteert de resultaten van deze analyses, waarbij een belangrijk eindproduct gevormd wordt door de hoger vernoemde erosie/sedimentatie-kaarten. Deze resultaten worden in dit rapport bondig besproken, daar waar mogelijk wordt gewezen op een mogelijke oorzaak van de waargenomen trend (baggeren, storten, invloed van harde structuren zoals strandhoofden). Een van de opvallendste resultaten is de waarneming van een erosietrend van de vooroevervoet (waar de steilere vooroever overgaat in de vlakkere zeebodem) op verschillende locaties langsheen de Belgische kust.

Naast de resultaten wordt in dit rapport ook uitvoerig aandacht besteed aan de technische kant van de uitgevoerde analyses: niet alleen wordt de methodologie toegelicht (kort geformuleerd komt de trendanalyse neer op een enkelvoudige lineaire regressie met kleinste-kwadratenbenadering van de dieptewaarden (morfologische trendanalyse) of volumes (volumetrische trendanalyse)), maar eveneens wordt aangegeven hoe de methodologie geïmplementeerd kan worden in ArcGIS software. Als dusdanig zijn delen van het rapport op te vatten als mogelijke leidraad voor het uitvoeren van morfologische trendanalyse m.b.v. ArcMap.

Inhoudstafel

| | |
|--|-----|
| Inhoudstafel | I |
| Lijst van de tabellen | III |
| Lijst van de figuren | IV |
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Overzicht gebruikte topografische en bathymetrische gegevens | 2 |
| 3 Verwerken ruwe gegevens | 6 |
| 4 Interpolatie tot ArcMap rasters | 9 |
| 5 Morfologische trendanalyse..... | 12 |
| 5.1 Methodologie..... | 12 |
| 5.2 Implementatie in ArcMap: theorie | 13 |
| 5.3 Cave@: praktische implementatie in ArcMap | 14 |
| 5.4 Morfologische trendanalyse van strand en vooroever: resultaten en bespreking | 17 |
| 5.4.1 Algemeen | 17 |
| 5.4.2 Secties 2-34 | 17 |
| 5.4.3 Secties 32-62 | 20 |
| 5.4.4 Secties 60-85 | 22 |
| 5.4.5 Secties 84-108 | 24 |
| 5.4.6 Secties 105-131 | 26 |
| 5.4.7 Secties 129-164 | 28 |
| 5.4.8 Secties 153-188 | 30 |
| 5.4.9 Secties 179-216 | 32 |
| 5.4.10 Secties 217-243 | 34 |
| 5.4.11 Secties 232-255 en verder | 36 |
| 5.4.12 Besluit | 38 |
| 5.5 Morfologische trendanalyse van de kustnabije zone: resultaten en bespreking | 39 |
| 5.5.1 Zuydcoote-Westende | 39 |
| 5.5.2 Westende-De Haan..... | 40 |
| 5.5.3 Westende-De Haan..... | 41 |
| 6 Volumetrische trendanalyse | 43 |
| 6.1 Inleiding | 43 |
| 6.2 Cave@: kuberingen in ArcMap | 44 |
| 6.3 Overzicht van de afgebakende zones | 45 |
| 6.4 Volumetrische trendanalyse: resultaten en bespreking | 48 |
| 6.4.1 Invloedssfeer strandhoofden Koksijde: vooroever, intertidaal strand, droog strand 48 | |
| 6.4.2 Den Oever | 50 |
| 6.4.3 Oostduinkerke-Nieuwpoort: duin/dijkvoet..... | 51 |
| 6.4.4 Westende: vooroevervoet | 52 |
| 6.4.5 Lombardsijde: duinvoet..... | 53 |
| 6.4.6 Westende-Oostende: droog strand | 54 |
| 6.4.7 Middelkerke-Oostende: vooroevervoet | 55 |
| 6.4.8 Oostende: noodstrand..... | 56 |
| 6.4.9 Oostende-De Haan: vooroevervoet | 58 |
| 6.4.10 Oostende-De Haan: duinvoet | 59 |
| 6.4.11 De Haan-Wenduine: duinvoet..... | 60 |

| | | |
|--|---|----|
| 6.4.12 | Blankenberge: sedimentatiezone..... | 61 |
| 6.4.13 | Blankenberge: stortplaats | 63 |
| 6.4.14 | Heist: zandbank | 64 |
| 6.4.15 | Heist-Zwin: dijk/duinvoet | 65 |
| 6.4.16 | Besluit | 66 |
| 6.5 | Volumetrische trendanalyse voor nat strand en vooroever langsheen de Belgische kust | 67 |
| 7 | Besluit..... | 68 |
| 8 | Referentielijst..... | 70 |
| Appendix A: verband tussen erosietrends en determinatiecoëfficiënten bij morfologische en volumetrische trendanalyse | | A1 |
| Veband tussen morfologische trendanalyse en volumetrische trendanalyse | | A1 |
| Veband tussen de uitgemiddelde R ² -waarde van de morfologische trendanalyse en de R ² -waarde van de volumetrische trendanalyse | | A3 |

Lijst van de tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1 – Overzicht van de digitaal beschikbare strandopmetingen, vooroeverlodingen en echolodingen van de kustnabije zone..... | 4 |
| Tabel 2 – Metadata voor de strandopmetingen..... | 7 |
| Tabel 3 – Metadata voor de vooroeverlodingen. | 8 |
| Tabel 4 – Metadata voor de kustnabije peilingszones..... | 8 |
| Tabel 5 – Volumetrische trends voor nat strand en vooroever langsheen de Belgische kust. | 67 |

Lijst van de figuren

| | |
|--|----|
| Figuur 1 – De BEASAC IV hovercraft van Eurosense..... | 3 |
| Figuur 2 – De BEASAC VI catamaran van Eurosense..... | 3 |
| Figuur 3 – Overzicht van de peilingszones op het BCP, met aanduiding van de Drie kustnabije zones die in deze studie behandeld worden..... | 5 |
| Figuur 4 – Opgemeten dataset (strandopmeting najaar 2001 gebied 5, zwart) en domein van het uit deze dataset geïnterpoleerde raster (groen). Waar dataset en raster niet overlappen geeft het raster geen correct beeld van het terreinmodel..... | 10 |
| Figuur 5 – Detail van het raster resulterend uit de interpolatie van de dataset van de strandop-meting najaar 2001 gebied 5. Hieruit blijkt duidelijk dat een deel van de zeespiegel mee opgemeten is (de geel-groene band bovenaan, zie ook vaargeul Blankenberge)..... | 11 |
| Figuur 6 – Illustratie van de trendanalyse voor twee rastercellen in de baai van Heist (uit [4])..... | 12 |
| Figuur 7 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 2-34..... | 19 |
| Figuur 8 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 32-62..... | 21 |
| Figuur 9 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 60-85..... | 23 |
| Figuur 10 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 84-108..... | 25 |
| Figuur 11 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 105-131..... | 27 |
| Figuur 12 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 129-164..... | 29 |
| Figuur 13 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 153-188..... | 31 |
| Figuur 14 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 179-216..... | 33 |
| Figuur 15 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 217-243..... | 35 |
| Figuur 16 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 232-255 en verder..... | 37 |
| Figuur 17 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Zuydcoote-Westende”..... | 40 |
| Figuur 18 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Westende-De Haan”..... | 41 |
| Figuur 19 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Wielingen-Scheur”..... | 42 |
| Figuur 20 – Tijdreeks van volumes voor het gebied “droog strand en duinaanzet tussen Heist en het Zwin”. De grafiek toont zowel de rechtstreeks in ArcMap gekubeerde volumes (lichtgroen) als de via de gemiddelde diepte berekende volumes (lichtrood)..... | 45 |
| Figuur 21 – Afbakening van de trendgebieden voor strand en vooroever langsheen de Belgische kust..... | 46 |
| Figuur 22 – Afbakening van de trendgebieden voor strand en vooroever langsheen de Belgische kust (vervolg)..... | 47 |
| Figuur 23 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde invloedssfeer strandhoofden: vooroever”..... | 48 |
| Figuur 24 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde: intertidaal strand”..... | 49 |
| Figuur 25 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde: droog strand”..... | 49 |
| Figuur 26 – Volumetrische evolutie van de zone “Den Oever”..... | 50 |
| Figuur 27 – Volumetrische evolutie van de zone “Oostduinkerke-Nieuwpoort: duin/dijkvoet”..... | 51 |
| Figuur 28 – Volumetrische evolutie van de zone “Westende: vooroevervoet”..... | 52 |
| Figuur 29 – Volumetrische evolutie van de zone “Lombardsijde: duinvoet”..... | 53 |
| Figuur 30 – Volumetrische evolutie van de zone “Westende-Oostende: droog strand”..... | 54 |
| Figuur 31 – Volumetrische evolutie van de zone “Middelkerke-Oostende: vooroevervoet”..... | 55 |
| Figuur 32 – Volumetrische evolutie van de deelzone “Oostende: noodstrand (strand)”..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figuur 33 – Volumetrische evolutie van de deelzone “Oostende: noodstrand (vooroever)” | 57 |
| Figuur 34 – Volumetrische evolutie van de zone “Oostende-De Haan: vooroevervoet” | 58 |
| Figuur 35 – Volumetrische evolutie van de zone “Oostende-De Haan: duinvoet” | 59 |
| Figuur 36 – Volumetrische evolutie van de zone “De Haan-Wenduine: duinvoet” | 60 |
| Figuur 37 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: sedimentatiezone (strand)” | 62 |
| Figuur 38 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: sedimentatiezone (vooroever)” | 62 |
| Figuur 39 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: stortplaats” | 63 |
| Figuur 40 – Volumetrische evolutie van de zone “Heist: zandbank” | 64 |
| Figuur 41 – Volumetrische evolutie van de zone “Heist-Zwin: dijk/duinvoet” | 65 |

1 Inleiding

In het kader van het Quest4D-project (QUantification of Erosion and Sedimentation patterns to Trace the natural versus anthropogenic sediment dynamics, een BELSPO gefinancierd project, zie [1], [2]) is door het WL een studie uitgevoerd naar de morfologische evolutie van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust. De studie omvat ruwweg de laatste 13 jaar (exacte tijdsspanne hangt af van de locatie), dit is de periode sinds dewelke digitale opmetingen en lodingen beschikbaar zijn.

De in deze studie gebruikte methodologie is een trendanalyse, waarbij de grootte en de significantie van evoluties worden afgeschat op basis van de beschikbare datasets en volgens een enkelvoudige lineaire regressie volgens de kleinste-kwadratenmethode. Er wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds een morfologische trendanalyse, waarbij lokaal wordt gekeken naar de evolutie van de topo-bathymetrie van het strand of de zeebodem en wat resulteert in zogenaamde erosie/sedimentatie-kaarten (en die bijgevolg een beschrijving geven van de verandering van de morfologie), en anderzijds een volumetrische trendanalyse, waarbij bepaalde gebieden afgebakend worden en gekeken wordt naar de evolutie van de het totale sedimentvolume binnen dat gebied. Alle analyses zijn uitgevoerd m.b.v. ArcGIS/ArcMap software. Zowel basisgegevens als de belangrijkste ArcMap rasters die resulteren uit de analyses kunnen teruggevonden worden op bijgevoegde DVD's.

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de beschikbare digitale datasets voor zowel strand als vooroever en kustnabije zone.

Hoofdstukken 3 en 4 beschrijven de eerste verwerking van de ruwe gegevens: hoofdstuk 3 geeft de metadata van de ruwe gegevens, die in de vorm van xyz-tekstbestanden op DVD 1 zijn bijgevoegd, terwijl hoofdstuk 4 kort beschrijft hoe deze ruwe gegevens geïnterpoleerd zijn tot ArcMap rasters, een noodzakelijke stap voor het uitvoeren van de verschillende analyses.

De morfologische trendanalyse wordt uitvoerig besproken in hoofdstuk 5. Een belangrijk deel van dit hoofdstuk behandelt de gebruikte methodologie en de wijze waarop deze geïmplementeerd kan worden in ArcMap. Dit stuk is vrij technisch van aard en is opgevat als een handleiding voor de ArcMap gebruiker die de voorgestelde methodologie zelf wenst toe te passen op andere datasets, en bevat dan ook de nodige tips en caveats. Daarnaast worden in dit hoofdstuk uiteraard ook de resultaten van de morfologische trendanalyse gepresenteerd, samen met een bondige bespreking ervan. Het is geenszins de bedoeling een gedetailleerde studie te presenteren van elke waargenomen morfologische verandering, de belangrijkste resultaten worden immers gevormd door de erosie/sedimentatie-kaarten op zich. Uiteraard wordt er wel gewezen op enkele globaal optredende trends langsheen de Belgische kust.

In hoofdstuk 6 wordt de volumetrische trendanalyse uit de doeken gedaan. Ook hier wordt eerst de methodologie toegelicht, samen met de gevolgde implementatie in ArcMap. Vervolgens worden op basis van de in hoofdstuk 5 gepresenteerde erosie/sedimentatie-kaarten gebieden afgebakend die een bepaalde morfologische eenheid vormen of waarin een min of meer eenduidige trend optreedt. Van deze gebieden wordt de volumetrische trend berekend, grafisch weergegeven en bondig besproken.

Hoofdstuk 7 bevat ten slotte de belangrijkste conclusies.

In de appendix wordt voor de geïnteresseerde lezer wat dieper ingegaan op het verband tussen morfologische en volumetrische trendanalyse, deze appendix is zeer theoretisch van aard.

2 Overzicht gebruikte topografische en bathymetrische gegevens

Voor deze studie is gebruik gemaakt van de peilingsdata en opmetingen die reeds in digitale vorm beschikbaar zijn. Deze gegevens zijn ter beschikking gesteld door MDK | Afdeling Kust – Dienst Hydrografie te Oostende, de vroegste digitaal beschikbare gegevens dateren van 1997.

Er zijn gegevens verzameld voor de hele Belgische kust, voor verschillende opmetingsdatums en voor 3 zones:

- **Strand:** De strandopmetingen beslaan ruwweg de zone tussen de duinenvoet en de laagwater-lijn. Strandopmetingen worden voornamelijk (vanaf najaar 1998) bekomen door middel van een laserscan gemonteerd op een vliegtuig. De opmeting gebeurt dan tijdens één vlucht langsheen de Belgische kustlijn gedurende een laagwaterstand, om een zo groot mogelijk gebied te kunnen opmeten. Deze methode van opmeten resulteert in hoge dichtheid van data (veel punten per oppervlakte-eenheid). Opmetingen van vegetatie, gebouwen of andere structuren worden verwijderd. Verschillende van de strandopmetingen bestrijken ook geheel of deels het duingebied (indien aanwezig). Recentere opmetingen hebben doorgaans een grotere punt dichtheid. Ook werden sommige datasets aangeleverd in een of andere verwerkte vorm (bijvoorbeeld als een in een raster geschikte set van punten). De nauwkeurigheid op de hoogtemetingen ligt in de grootteorde ~10 cm (afhankelijk van de aanwezigheid van begroeiing), recentere metingen zijn doorgaans nauwkeuriger dan oudere opmetingen.

De beschikbare strandopmetingen van de periode voor najaar 1998 werden bekomen via luchtfotografie en stereofotogrammetrie, de nauwkeurigheid hiervan is moeilijker te achterhalen maar is naar alle waarschijnlijkheid kleiner dan die van de laserscan-opmetingen.

- **Vooroever:** De vooroeverlodingen bestrijken grosso modo het gebied tussen laagwaterlijn tot 1,5 km in zee. Het merendeel van deze opmetingen zijn echolodingen en zijn typisch uitgevoerd met vaartuigen zoals de BEASAC¹ IV hovercraft (zie Figuur 1) of de BEASAC VI catamaran (zie Figuur 2) van Eurosense. Door het gebruik van zulke vaartuigen stellen er zich geen problemen aangaande diepgang en kan er een goede aansluiting tussen de vooroeverlodingen en de strandopmetingen gerealiseerd worden. De vooroeverlodingen zijn opgemeten in raaien, typisch op een afstand van 100m van elkaar. De nauwkeurigheid van echolodingen mag eveneens op 10 cm geschat worden.

- **Kustnabije zone:** Deze lopen ruwweg vanaf 1,5 km tot 10 km in zee, het betreft hier singlebeam echolodingen uitgevoerd vanop een schip. Deze gegevens bestaan eveneens uit raaien, typisch 200m van elkaar gescheiden.

¹ BEASAC = Belfotop Eurosense Acoustic Sounding Air Cushion platform



Figuur 1 – De BEASAC IV hovercraft van Eurosense.



Figuur 2 – De BEASAC VI catamaran van Eurosense.

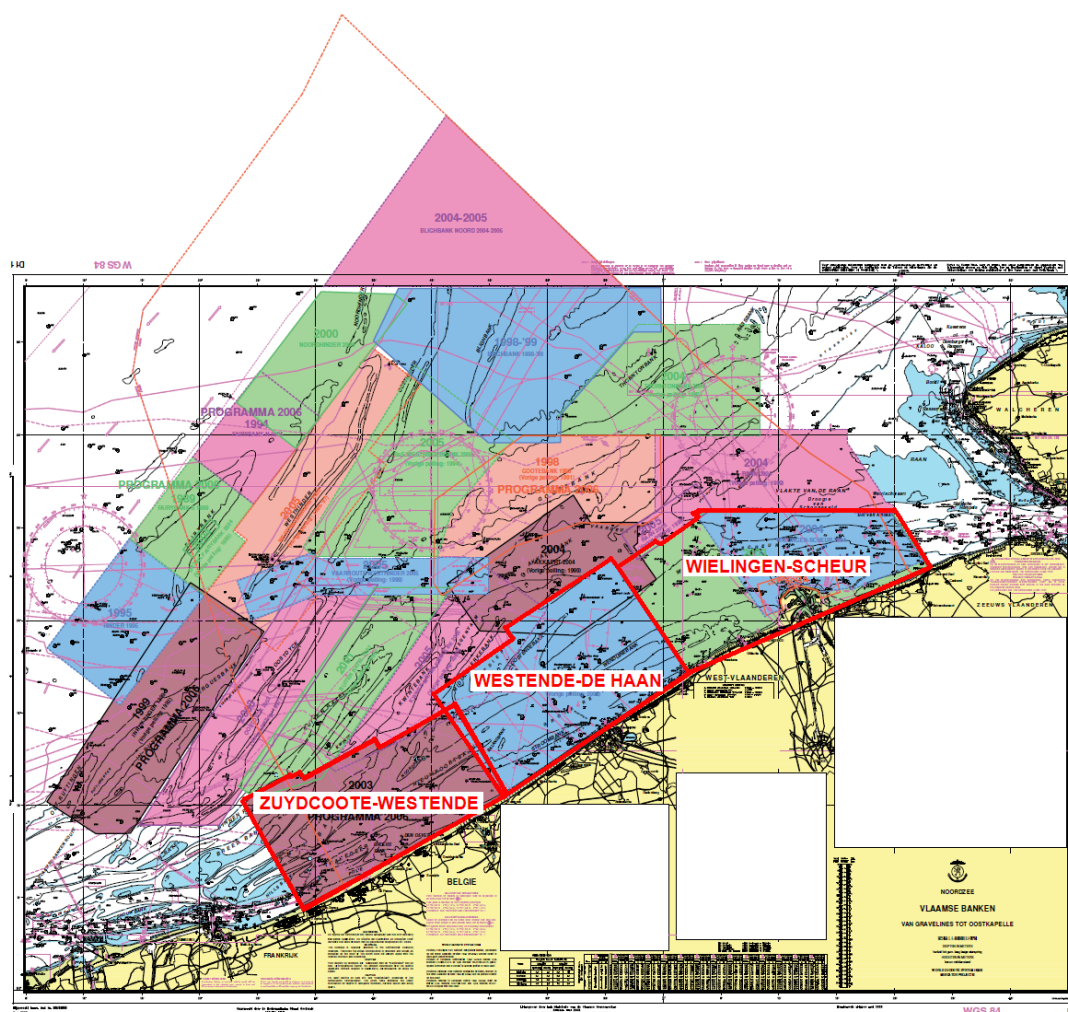
Tabel 1 – Overzicht van de digitaal beschikbare strandopmetingen, vooroeverlodingen en echolodingen van de kustnabije zone.

| periode opname | | gebied | | |
|----------------|----------|--|--|--|
| | | strand | vooroever | kustnabije zone |
| 1997 | voorjaar | 1-277 | 1-277 | Zuydcoote - Westende Westende - De Haan |
| | najaar | 60-78; 106-277 | 60-78; 106-277 | |
| 1998 | voorjaar | 1-277 | 1-277 | Wielingen - Scheur |
| | najaar | 67-78; 106-277 | 60-78; 106-277 | |
| 1999 | voorjaar | 1-34; 40-87; 98-259; 267-277 | 1-277 | - |
| | najaar | 1-6; 60-65; 113-117; 122-138; 146-156; 185-194; 217-249; 260-277 | 1-12; 60-78; 106-277 | |
| 2000 | voorjaar | 1-277 | 1-277 | Wielingen - Scheur |
| | najaar | 1-267 | - | |
| 2001 | voorjaar | 1-277 | - | Westende - De haan |
| | najaar | 1-277 | - | |
| 2002 | voorjaar | - | - | Zuydcoote - Westende Wielingen - Scheur |
| | najaar | 1-259 | - | |
| 2003 | voorjaar | 1-269 | 1-269 | Zuydcoote - Westende |
| | najaar | - | - | |
| 2004 | voorjaar | - | 60-65; 72-88; 99-124; 151-155; 170-175; 233-255 | Wielingen - Scheur |
| | zomer | 1-259 | - | |
| 2005 | voorjaar | - | - | Westende - De Haan |
| | zomer | 2-259 | - | |
| 2006 | voorjaar | 2-259 | - | Zuydcoote - Westende |
| | najaar | - | - | |
| 2007 | voorjaar | 2-259 | 1-267 | Wielingen - Scheur |
| | najaar | - | - | |
| 2008 | voorjaar | 2-251, 253-259 | 1-181 | Westende - De Haan |
| | najaar | - | - | |
| 2009 | voorjaar | - | 1-267 | Zuydcoote - Westende Westende - De Haan |
| | najaar | - | - | |
| 2010 | voorjaar | 1-277 | - | - |
| | najaar | - | - | |

Tabel 1 geeft een overzicht van de digitaal beschikbare bodemopmetingen.

Voor strand en vooroever geeft de tabel aan voor welke kustsecties er metingen voorhanden zijn. De kustlijn is onderverdeeld in verschillende secties, elk typisch een 250-tal m breed. Deze secties lopen van de laagwaterlijn tot aan de dijk of duinvoet, daar waar strandkribben of -hoofden aanwezig zijn vallen de laterale begrenzingen samen met deze strandkribben of -hoofden. In totaal onderscheidt men 277 kustsecties, genummerd van west naar oost. De secties 2 tot en met 254 liggen op Belgisch grondgebied, de overige secties liggen op Frans (sectie 1) of Nederlands (vanaf 256 tot en met 277) grondgebied, waarbij sectie 255 deels op Belgisch en deels op Nederlands grondgebied ligt. Hoewel de secties in principe dus niet verder reiken dan de laagwaterlijn worden ze in Tabel 1 ook gebruikt om aan te duiden in welke zones vooroeverlodingen beschikbaar zijn. De tabel geeft eveneens aan in welke periode de opmetingen plaatsgevonden hebben: voor strand en vooroever zijn de meeste opmetingen in het voorjaar uitgevoerd, enkele zijn uitgevoerd in het najaar of in de zomer. Voor sommige jaartallen beschikt men voor bepaalde zones over zowel een voor- als een najaarsmeting. In het vet gedrukte getallen geven aan waar de gegevens de volledige Belgische kust beslaan: voor strand beschikken we over 13 volledige datasets (14 indien we de metingen van voorjaar 2008 meetellen, waar enkel sectie 254 ontbreekt), voor vooroever over 7.

De echolodingen uitgevoerd in de kustnabije zone zijn opgesplitst in drie zones: vanaf Zuydcoote tot aan Westende, van Westende tot De Haan en vanaf De Haan tot aan de Nederlandse grens (deze laatste zone wordt Wielingen-Scheur genoemd). Jaarlijks worden door Afdeling Kust echolodingen uitgevoerd in verschillende peilingszones (zie Figuur 3 voor een overzichtskaart van de verschillende peilingszones op het BCP). Niet alle zones worden elk jaar bemeten, maar elke zone komt wel regelmatig aan beurt. Figuur 3 duidt eveneens de drie kustnabije zones aan die in deze studie behandeld zullen worden. Merk op dat de zone Wielingen-Scheur soms slechts ten dele wordt bemeten (enkel het blauwe deel in Figuur 3).



Figuur 3 – Overzicht van de peilingszones op het BCP, met aanduiding van de Drie kustnabije zones die in deze studie behandeld worden.

3 Verwerken ruwe gegevens

De datasets waarvan in vorig hoofdstuk een overzicht werd geboden bestaan uit tekstbestanden met XYZ-gegevens. Deze tekstbestanden zijn in verscheidene formaten aangeleverd: zo zijn er verschillen wat betreft hoofdingen, wat betreft scheidingstekens tussen de kolommen met de XYZ-gegevens, in sommige gevallen zijn er extra kolommen toegevoegd met informatie omtrent de datum en het precieze tijdstip van de opmeting, enz.

De verschillende datasets zijn geüniformiseerd tot tekstbestanden in een formaat dat in ArcMap ingelezen kunnen worden. Deze geüniformiseerde tekstbestanden kunnen teruggevonden worden op bijgevoegde DVD (DVD 1, in de folder “XYZ tekstbestanden”) en hebben de volgende kenmerken:

- **Indeling in verschillende zones**

Om de grootte van de tekstbestanden te beperken en ze werkzaam te houden, is de Belgische kust opgedeeld in 6 min of meer even grote zones. De indeling in deze zones is van louter praktische aard en heeft geen fysische interpretatie. De indeling is als volgt:

- zone 1: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 2 t.e.m. 47
- zone 2: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 48 t.e.m. 87
- zone 3: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 88 t.e.m. 117
- zone 4: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 118 t.e.m. 155
- zone 5: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 156 t.e.m. 216
- zone 6: bevat minstens de beschikbare gegevens van de kustsecties 217 t.e.m. 255.

Voor elke opnameperiode is per zone een tekstbestand met de dieptegegevens voorzien. Zo bevat bijvoorbeeld het bestand met de naam “vo1997vj_3” de gegevens van de vooroever-lodgingen uit het voorjaar van 1997 voor zone 3. In sommige gevallen bevatten tekstbestanden gegevens die uitgebreider zijn dan de hierboven aangegeven begrenzingen, dit is dan het gevolg van het samenvoegen van de oorspronkelijke bestanden van diepte- of hoogte-gegevens, waarvan de grenzen niet samenvielen met de hierboven gegeven begrenzingen van de 6 zones. Deze indeling geldt uiteraard enkel voor strand en vooroever, voor de kustnabije zone houden we ons aan de bestaande indeling volgens de drie peilingszones Zuydcoote - Westende, Westende - De Haan en Wielingen - Scheur.

- **Formaat van de tekstbestanden**

Elk tekstbestand bevat drie door tabs van mekaar gescheiden kolommen die per regel respectievelijk de X-, Y- en Z-coördinaten van een dieptemeting bevatten. De allereerste regel van het bestand bevat de hoofding en bestaat uit de letters X, Y en Z, eveneens gescheiden door tabs.

- **Coördinatensysteem en referentieniveau**

Het coördinatensysteem in hetwelke de X- en Y-coördinaten zijn uitgedrukt kan voor elk tekstbestand teruggevonden worden in Tabel 2 (strand), Tabel 3 (vooroever) en Tabel 4 (kustnabije zone). Ook het referentieniveau voor de Z-coördinaat, de eenheid waarin deze is uitgedrukt en of dieptes dan wel hoogtes positief worden uitgedrukt, wordt in deze tabellen weergegeven.

- **Opnamedatum**

De tabellen geven ook de gereduceerde datum van de opnames. Deze gereduceerde datums komen overeen met het aantal dagen tellend vanaf 1/1/1995 (1/1/1995 is hierbij dag 0). Deze startdatum is enigszins arbitrair gekozen, maar wel zodanig dat hij nog voor de uitvoering van de eerste metingen (voorjaar 1997) gelegen is, zodat alle gereduceerde datums positief zijn. De omzetting naar een gereduceerde datum is louter om berekeningen waarin de datum als parameter optreedt te vergemakkelijken.

Merk op dat bijna alle strandopmetingen voor de hele Belgische kust in een enkele dag uitgevoerd werden, dit dankzij de specifieke meettechniek (laserscan gemonteerd op een vliegtuig). Uitzonderingen hierop zijn de metingen van het voorjaar 1999, die over twee dagen gespreid werden, en de metingen van het voorjaar 2003, die niet vanuit de lucht maar te land (met jeep en meetwiel) zijn uitgevoerd.

Voor de vooroever zijn de lodingen telkens over meerdere dagen uitgevoerd, uiteraard omdat de gebruikte meettechniek (echolodgingen vanop een hovercraft) niet toelaat de metingen in een enkele dag uit te voeren. Bij enkele campagnes van vooroeverlodingen zijn evenwel ook de datum (en soms ook het precieze tijdstip) van elk meetpunt opgeslagen. Bij deze vooroe-verlodingen is in het tekstbestand een extra kolom toegevoegd die voor elk meetpunt de gereduceerde opnamedatum weergeeft. Indien aanwezig is deze kolom in de tekstbestanden vooraan geplaatst, de hoofding bestaat dan uit de letters D, X, Y en Z, gescheiden door tabs. Bij de overige vooroeverlodingen zijn de exacte opnamedatums niet voor elk afzonderlijk meetpunt gekend, wel zijn voor elk van deze vooroeverlodingen door Afdeling Kust de verschillende peilingsgebieden met hun opnameperiode meegedeeld. Merk op dat deze informatie niet altijd precies is: de grenzen van de verschillende peilingsgebieden zijn niet altijd even duidelijk afgebakend, en als opnamedatum wordt vaak een periode van meerdere dagen gegeven. De hieromtrent bij Afdeling Kust verkregen informatie is samengevat in het excelbestand "opnamedatums" op bijgevoegde DVD 1. Voor zulke peilingsgebieden is dan een gemiddelde opnamedatum of een beste schatting voor de opnamedatum gebruikt.

Ook voor de kustnabije zone geldt dat elk van de datasets samengesteld is uit opmetingen uitgevoerd op verschillende tijdstippen. Tabel 4 geeft voor elke dataset aan in welke periode de verschillende meetcampagnes die bijdroegen tot een welbepaalde dataset plaatsvonden. Meer precieze kennis omtrent de exacte uitvoeringsdatum van de verschillende meetcampagnes zou wel aanwezig zijn bij Afdeling Kust, maar kon helaas niet in werkbaar formaat aangeleverd worden.

Tot slot wijzen we er nog op dat de strandopmetingen en vooroeverlodingen van het voorjaar 2003 om praktische redenen voor elk van de 6 zones samengevoegd zijn in eenzelfde tekstbestand.

Tabel 2 – Metadata voor de strandopmetingen.

| periode opname | coördinaten-systeem | referentieniveau (eenheid) voor diepte | positieve (+) of negatieve (-) hoogtes | gereduceerde opnamedatum (dagen na 1/1/1995) |
|----------------|---------------------|--|--|--|
| 1997 voorjaar | Lambert72 | Z (m) | + | 875 |
| 1997 najaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1021 |
| 1998 voorjaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1214 |
| 1998 najaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1469 |
| 1999 voorjaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1597 (gebieden 1-5) 1637 (gebied 6) |
| 1999 najaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1836 |
| 2000 voorjaar | Lambert72 | Z (m) | + | 1993 |
| 2000 najaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 2080 |
| 2001 voorjaar | Lambert72 | Z (m) | + | 2321 |
| 2001 najaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 2462 |
| 2002 najaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 2908 |
| 2003 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | + | extra datumkolom in tekstbestand |
| 2004 zomer | Lambert72 | TAW (m) | + | 3532 |
| 2005 zomer | Lambert72 | TAW (m) | + | 3887 |
| 2006 voorjaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 4125 |
| 2007 voorjaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 4536 |
| 2008 voorjaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 4918 |
| 2010 voorjaar | Lambert72 | TAW (m) | + | 5626 |

Tabel 3 – Metadata voor de vooroeverlodingen.

| periode opname | coördinaten-systeem | referentieniveau (eenheid) voor diepte | positieve (+) of negatieve (-) hoogtes | gereduceerde opnamedatum (dagen na 1/1/1995) |
|----------------|---------------------|--|--|--|
| 1997 voorjaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 1997 najaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 1998 voorjaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 1998 najaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 1999 voorjaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 1999 najaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 2000 voorjaar | ED50 UTM31N | Z (dm) | - | zie excelbestand op DVD 1 |
| 2003 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | - | extra datumkolom in tekstbestand |
| 2004 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | + | extra datumkolom in tekstbestand |
| 2007 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | + | extra datumkolom in tekstbestand |
| 2008 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | + | extra datumkolom in tekstbestand |
| 2009 voorjaar | WGS84 UTM31N | TAW (m) | + | zie excelbestand op DVD 1 |

Tabel 4 – Metadata voor de kustnabije peilingszones.

| periode opname | peilingszone | coördinaten-systeem | referentieniveau (eenheid) voor diepte | positieve (+) of negatieve (-) hoogtes | gereduceerde opnamedatum (dagen na 1/1/1995) |
|----------------|----------------------|---------------------|--|--|--|
| 1997 | Zuydcoote - Westende | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 760-1019 |
| | Westende - De Haan | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 992-1195 |
| 1998 | Wielingen - Scheur | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 1104-1134 |
| 2000 | Wielingen - Scheur | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 1831-2144 |
| 2001 | Westende - De Haan | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 2321-2893 |
| 2002 | Zuydcoote - Westende | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 2427-3029 |
| | Wielingen - Scheur | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 2367-2999 |
| 2003 | Zuydcoote - Westende | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 3082-3224 |
| 2004 | Wielingen - Scheur | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 3396-3594 |
| 2005 | Westende - De Haan | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 3679-4026 |
| 2006 | Zuydcoote - Westende | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 4022-4202 |
| 2007 | Wielingen - Scheur | WGS84 UTM31N | GLLWS (m) | - | 4397-4575 |
| 2008 | Westende - De Haan | WGS84 UTM31N | LAT (m) | - | 4807-5044 |
| 2009 | Zuydcoote - Westende | WGS84 UTM31N | LAT (m) | - | 5143-5209 |
| | Westende - De Haan | WGS84 UTM31N | LAT (m) | - | 5016-5143 |

4 Interpolatie tot ArcMap rasters

Alle in Tabel 1 opgelijste datasets zijn in ArcMap (onderdeel van het ArcGIS softwarepakket) geïnterpoleerd tot gebiedsdekkende rasters. Hierbij wordt het gebied opgedeeld in een rooster van vierkante cellen, elke cel krijgt een dieptewaarde toegewezen die geschat wordt op basis van de dieptewaarden van nabijgelegen opgemeten punten. Deze rasters kunnen teruggevonden worden op bijgevoegde DVD (DVD 2, in de folder "ArcMap topobathymetrische rasters - niet bijgeknipt"). De rasters hebben de volgende kenmerken:

- **Gebruikte interpolatiemethode**

ArcMap biedt standaard vier verschillende interpolatiealgoritmes aan: *inverse distance weighted (IDW)*, *kriging*, *natural neighbor* en *spline*. Deze algoritmes verschillen in de manier waarop gewicht wordt toegekend aan de dieptewaarden van de opgemeten punten bij het berekenen van de dieptewaarde van een rastercel hieruit. Meer uitleg over deze algoritmes kan gevonden worden in [2], in het ArcGIS hulpmenu of in de literatuur. Alle datasets uit Tabel 1 zijn geïnterpoleerd met de *natural neighbor* techniek: dit algoritme kent immers minder gewicht aan geclusterde punten, wat het beter geschikt maakt voor het interpoleren van de in raaien opgemeten vooroeverlodingen dan het *IDW* algoritme (zie [3] voor enkele bedenkingen hierover). Het *spline* algoritme wordt beschouwd als minder geschikt voor het interpoleren tot digitale terreinmodellen, en ook *kriging* biedt voor de gegeven datasets geen voordelen ten opzichte van *natural neighbor*.

- **Coördinatensysteem en referentieniveau**

Alle rasters zijn omgezet naar het Lambert72 coördinatenstelsel. De door de rasters weergegeven dieptes zijn gerefereerd ten opzichte van het TAW-niveau voor strand en vooroever en ten opzichte van GLLWS voor de kustnabije zone. Dieptes (onder het referentieniveau) worden positief en in meter uitgedrukt.

- **Resolutie**

Strand- en vooroeverrasters zijn geïnterpoleerd met een rasterresolutie van 2m x 2m, voor de kustnabije zone is gekozen voor een rasterresolutie van 5m x 5m.

- **"Domein" van de rasters**

Lezers van dit rapport die de rasters in het kader van andere studies voor eigen gebruik willen aanwenden, moeten er zich bewust van zijn dat de rasters in de "ArcMap topobathymetrische rasters → niet bijgeknipt" zoals de naam doet vermoeden niet bijgeknipt zijn: het door een raster bedekte gebied is zoals bekomen als resultaat van het interpoleren van de datasets. Dit betekent dat soms over lege gebieden (waar geen meetgegevens aanwezig waren) heen geïnterpoleerd werd (bijvoorbeeld wanneer de puntenwolk van meetgegevens enigszins boogvormig is, zie Figuur 4). Het spreekt voor zich dat in deze gebieden geen betekenis gehecht kan worden aan het terreinmodel zoals weergegeven door de rasters. Daarnaast valt het bij veel strandopmetingen voor dat behalve strand en eventueel duinen ook een deel van de waterspiegel mee wordt opgemeten (bijna alle strandopmetingen gebeuren door middel van laserscan vanuit het vliegtuig, hierbij kan tijdens de opmeting geen onderscheid gemaakt worden tussen land en water). Ook dit deel is na interpoleren niet uit de strandrasters verwijderd en geeft uiteraard geen bruikbare informatie over de bodemligging van het strand (zie Figuur 5).

In principe geeft een raster dus enkel een betrouwbare topo-bathymetrie in het gebied waar de overeenkomstige originele dataset relevante gegevens bevat en wordt in het ideale geval elk raster afzonderlijk bijgeknipt zodat waardeloze delen verwijderd worden. Gezien het werk dat hiermee gepaard gaat en het vrij grote aantal rasters is dit bijknippen van elk raster afzonderlijk niet gebeurd. In de plaats daarvan zijn de rasters per zone bijgeknipt tot een gebied waarvan de grenzen bepaald worden door de doorsnede van de datasets uit die zone (voor de latere trendanalyse zijn immers enkel locaties van belang waar geen enkele raster een valse waarde vertoont). Enerzijds bevatten deze bijgeknipte rasters dus geen valse waarden meer, anderzijds verliest elk raster omwille van deze "grootste gemene deler aanpak" een deel waar de topo-bathymetrie wel correct weergegeven werd.

De bijgeknipte topo-bathymetrische rasters kunnen gevonden worden in de folder "ArcMap topobathymetrische rasters - bijgeknipt" op bijgevoegde DVD 2.

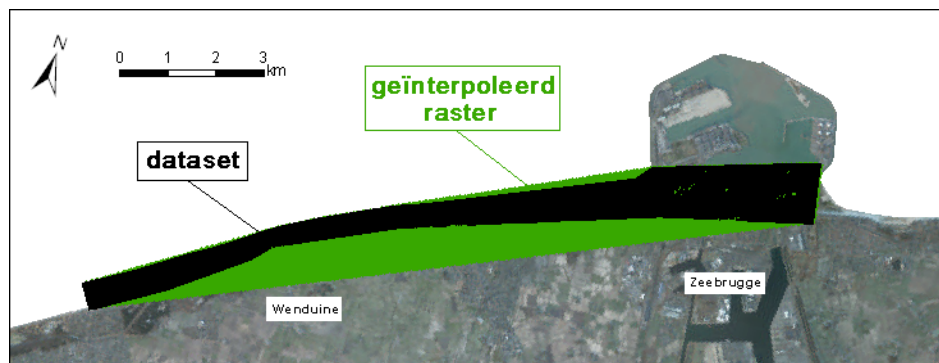
- **Naamgeving**

De naamgeving van de rasters wordt geïllustreerd aan de hand van volgende voorbeelden:

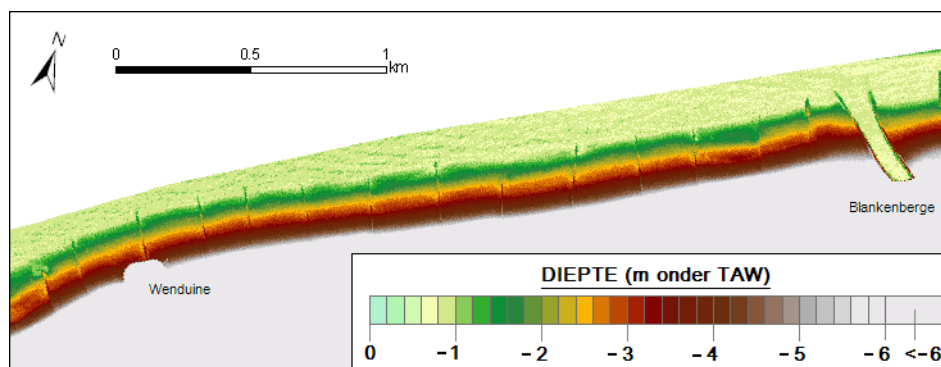
- vo1999nj_3: ArcGIS raster dat de bathymetrie weergeeft van zone 3 van de vooroever voor het najaar van 1999.
- str2001vj_1_c: bijgeknipt ArcGIS raster dat de topologie weergeeft van zone 1 van het strand voor het voorjaar van 2001.
- s_v_2003vj_6: ArcGIS raster dat de topobathymetrie weergeeft van zone 6 van strand en vooroever voor het voorjaar van 2003. Enkel bij de niet-bijgeknipte rasters van voorjaar 2003 zijn strand en vooroever samengevoegd in één raster.
- zuwe2002_c: bijgeknipt ArcGIS raster dat de bathymetrie weergeeft van de kustnabije zone Zuydcoote-Westende voor het jaar 2002. Voor de kustnabije zone zijn alle bathymetrieën apart bijgesneden, op basis van een omhullende aan de originele dataset. De niet-bijgesneden bathymetrieën zijn dan ook niet bijgevoegd.

- **Hulprasters**

Bij datasets waarbij de opnamedatum gekend is voor elk afzonderlijk lodingspunt (dit zijn de datasets waarbij het tekstbestand een extra kolom met de opnamedatum bevat, zie Tabel 2 en Tabel 3) zijn ook rasters aangemaakt die de opnamedatum als celwaarde hebben. Deze rasters zijn voor de volledigheid bijgevoegd in de folder "ArcMap hulprasters" op bijgevoegde DVD 1. Deze folder bevat eveneens de rasters die voor elke cel aangeven hoeveel datapunten gebruikt zijn bij de morfologische trendanalyse.



Figuur 4 – Opgemeten dataset (strandopmeting najaar 2001 gebied 5, zwart) en domein van het uit deze dataset geïnterpoleerde raster (groen). Waar dataset en raster niet overlappen geeft het raster geen correct beeld van het terreinmodel.



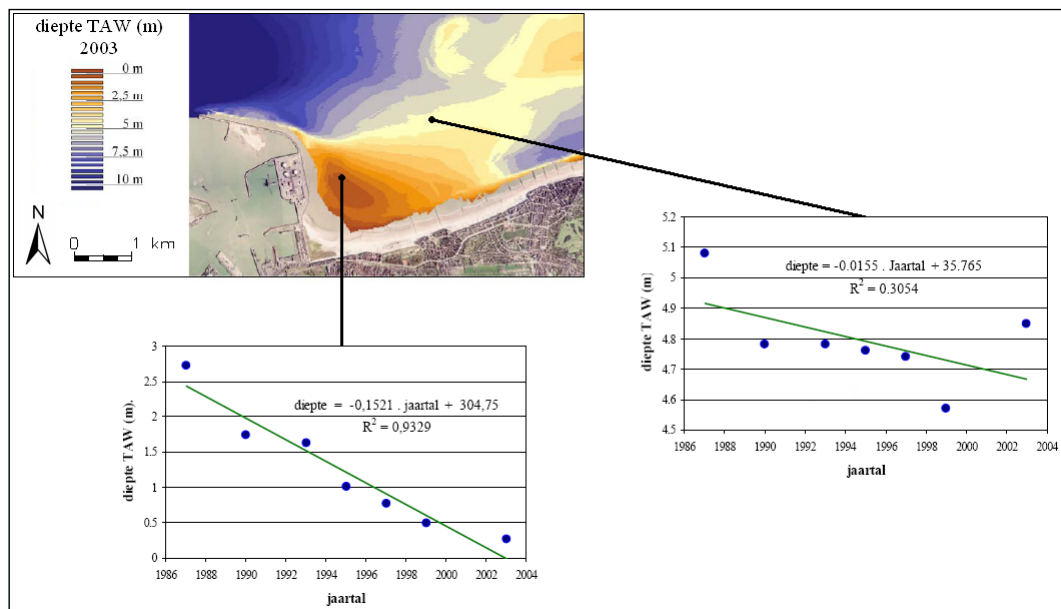
Figuur 5 – Detail van het raster resulterend uit de interpolatie van de dataset van de strandop-meting najaar 2001 gebied 5. Hieruit blijkt duidelijk dat een deel van de zeespiegel mee opgemeten is (de geel-groene band bovenaan, zie ook vaargeul Blankenberge).

5 Morfologische trendanalyse

5.1 Methodologie

Bij de morfologische trendanalyse wordt op basis van een tijdreeks van (bijgeknipte) topo-bathymetrische rasters voor elke rastercel apart een enkelvoudige lineaire regressie met kleinste-kwadratenmethode uitgevoerd: per rastercel worden de beschikbare dieptegegevens in functie van de tijd uitgezet en benaderd door een best passende rechte. De richtingscoëfficiënt van deze rechte geeft dan de erosietrend weer over de beschouwde tijdsperiode voor die rastercel. Tevens kan voor elke cel de zogenaamde determinatiecoëfficiënt (of R^2 -waarde) bepaald worden. Deze R^2 -waarde is een getal tussen 0 en 1 en geeft aan hoe goed de best passende rechte de tijdreeks van dieptegegevens in de beschouwde rastercel benadert. Een hoge waarde (dicht bij 1) betekent dat de dieptegegevens slechts weinig afwijken van de best passende rechte en er bijgevolg van een (lineaire) trend in de evolutie van de diepte gesproken kan worden, bij een lage waarde wijken de dieptegegevens te veel af van de rechte om van een significante trend gewag te kunnen maken (dit is de enigszins gevoelsmatige interpretatie van de determinatiecoëfficiënt, zie de appendix voor een meer correct geformuleerde interpretatie van R^2).

De werkwijze wordt geïllustreerd in Figuur 6 (figuur afkomstig uit een eerdere studie). De figuur toont de baai van Heist, waarvoor een tijdreeks van bathymetriërasters voor de periode 1997-2003 beschikbaar is (de kaart toont de bathymetrie van 2003). Op twee locaties is op de tijdreeks van dieptegegevens een lineaire regressie toegepast. Voor de locatie op de zandbank volgen de dieptewaarde zeer duidelijk een dalende trend, wat zich uit in een hoge waarde voor R^2 (0,93). De grootte van de erosietrend wordt gegeven door de helling van de rechte en bedraagt $-0,15$ m/jaar (of, vermits de erosietrend negatief is: een sedimentatietrend van 15 cm/jaar). Op tweede locatie lijken de verschillende dieptewaarden willekeurig te fluctueren en is er geen uitgesproken trend, wat ook blijkt uit de lage R^2 -waarde (0,31). Een erosietrend kan berekend worden ($-0,016$ m/jaar) maar heeft omwille van de lage R^2 geen of weinig betekenis.



Figuur 6 – Illustratie van de trendanalyse voor twee rastercellen in de baai van Heist (uit [4]).

Bij de in deze studie uitgevoerde morfologische trendanalyse worden de topo-bathymetrische rasters gebruikt om een ArcMap raster te berekenen waarvan elke rastercel de erosietrend geeft en een raster met voor elke cel de R^2 -waarde. Visualisatie van deze rasters zal een handig hulpmiddel blijken om de ruimtelijke verdeling van erosie- en sedimentatiezones van strand, vooroever en zeebodem van de kustnabije zone af te bakenen, evenals de omvang van deze trends. Alvorens deze resultaten te presenteren (zie 5.4) wordt in paragrafen 5.2 en 5.3 –die technisch van aard zijn– toegelicht hoe in ArcMap de rasters voor erosietrend en voor R^2 aangemaakt kunnen worden.

Merken we tot slot nog op dat ervoor gekozen is van dieptes positief en hoogtes negatief uit te drukken, zodat een positieve richtingscoëfficiënt correspondeert met een erosietrend en een negatieve met een sedimentatietrend. Verder worden in hetgeen volgt termen erosie- en sedimentatietrend gebruikt daar waar het meer algemeen gaat over respectievelijk een verdiepings- of ophogingstrend. We spreken van een sterke (zwakke) trend wanneer de richtingscoëfficiënt een relatief grote (kleine) absolute waarde heeft, een trend wordt dan weer significant (niet significant) genoemd indien de waarde van de determinatiecoëfficiënt R^2 hoog (laag) is.

5.2 Implementatie in ArcMap: theorie

De formules voor een enkelvoudige lineaire regressie met kleinste-kwadratenmethode zijn genoegzaam bekend. Het toepassen van deze formules op een tijdreeks van topo-bathymetrische rasters levert het erosietrend-raster (indien dieptes positief en hoogtes negatief zijn uitgedrukt in de bathymetrie, in het omgekeerde geval bekomt men een sedimentatietrend) en kan vrij eenvoudig uitgevoerd worden met behulp van de ArcMap raster calculator:

$$[\text{erosietrend}] = \sum_{i=1}^n [a_i] \cdot [\text{bathymetrisch raster } i] \quad (1)$$

Vierkante haken symboliseren een ArcMap raster. Volgens deze formules kan het erosietrend-raster berekend worden als een lineaire combinatie van de tijdreeks van n bathymetrische rasters, waarbij de coëfficiënten $[a_i]$ enkel afhangen van de onafhankelijke grootte, zijnde de tijd of dus de opnamedatum van de opmetingen of lodingen:

$$[a_i] = \frac{n \cdot [\text{datumraster } i] - \sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i]}{n \cdot \sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i]^2 - (\sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i])^2} \quad (2)$$

Hierbij is $[\text{datumraster } i]$ het raster dat de (eventueel plaatsafhankelijke) opnamedatum geeft voor $[\text{bathymetrisch raster } i]$.

De berekening van het raster met voor elke cel de R^2 -waarde is iets omslachtiger en kan in de ArcMap calculator uitgevoerd worden via onderstaande reeks van bewerkingen:

$$[SS_{xx}] = \sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i]^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i] \right)^2 \quad (3)$$

$$[SS_{yy}] = \sum_{i=1}^n [\text{bathymetrisch raster } i]^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n [\text{bathymetrisch raster } i] \right)^2 \quad (4)$$

$$[SS_{xy}] = \sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i] \cdot [\text{bathymetrisch raster } i] \quad (5)$$
$$-\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i] \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n [\text{bathymetrisch raster } i] \right)$$

$$[R^2] = \frac{[SS_{xy}]^2}{[SS_{xx}] \cdot [SS_{yy}]} \quad (6)$$

De notatie van de hier gegeven formules is toegespitst op gebruik in de ArcMap calculator, maar de wiskunde achter de formules is uiteraard algemeen geldig. Mits de juiste interpretatie kunnen ze dan ook toegepast worden in andere numerieke programma's, zoals bijvoorbeeld MatLab. In de formules dienen dan de rasters vervangen te worden door matrices die de tijdreeks van topo-bathymetrische gegevens bevatten.

5.3 Cave@: praktische implementatie in ArcMap

De hierboven opgelijste formules kunnen in principe rechtstreeks in ArcMap gebruikt worden voor de morfologische trendanalyse. In de praktijk zijn de berekeningen echter op een andere manier uitgevoerd. Immers, de ArcMap calculator maakt om onduidelijke redenen soms fouten in elementaire bewerkingen, deze fouten zijn weliswaar klein (minder dan 0,5%) maar kunnen desondanks bij bepaalde berekeningen grote invloed uitoefenen op het eindresultaat. Meerbepaald wordt in formules (4) en (5) en tevens in de noemer van formule (2) het verschil gemaakt tussen twee grote en relatief weinig verschillende getallen, waardoor de relatieve fout op de respectievelijke uitkomsten. Hierdoor kunnen op de berekende erosietrend afwijkingen tot 10% optreden en op de R^2 -waarde tot maar liefst 30% ten opzichte van de werkelijke waarden.

Om deze afwijkingen enigszins in te perken is een alternatieve werkwijze gevolgd, met formules die mathematisch tot identieke resultaten voor de erosietrend en de R^2 -waarden leiden, maar die robuuster zijn dan de formules hierboven. De afwijkingen met deze alternatieve werkwijze zijn doorgaans een factor 4 tot 6 kleiner, zodat gesteld kan worden dat de afwijkingen maximaal 2,5% bedragen op de erosietrend en 5% op de R^2 -waarde. Er dient benadrukt te worden dat deze afwijkingen niets te maken hebben met de kwaliteit of nauwkeurigheid van de oorspronkelijke meetgegevens, en evenmin gaat het om fouten die geïntroduceerd worden bij het interpolatieproces, wel betreft het hier een reële fout die bij elementaire bewerkingen gemaakt wordt door de ArcMap calculator. De alternatieve werkwijze –die overigens een pak omslachtiger is dan bovenstaande formules maar dus wel robuuster is met betrekking tot de door de calculator geïntroduceerde afwijkingen– bestaat uit onderstaande in volgorde in de ArcMap calculator in te voeren formules.

- 1) Berekening van de som van alle opnamedatums:

$$[\text{som datum}] = \sum_{i=1}^n [\text{datumraster } i] \quad (7)$$

- 2) Berekening van de kwadraatsom van alle opnamedatums:

$$[\text{kwadraatsom datum}] = \sum_{i=1}^n [\text{bathymetrisch raster } i]^2 \quad (8)$$

- 3) Berekening van het hulpraster [noemer]:

$$[\text{noemer}] = n \cdot [\text{kwadraatsom datum}] \cdot [\text{som datum}]^2 \quad (9)$$

- 4) Berekening van de gemiddelde diepte:

$$[\text{gemiddelde diepte}] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [\text{bathymetrisch raster } i] \quad (10)$$

- 5) Berekening van de coëfficiënten $[a_i]$ voor de richtingscoëfficiënt en $[b_i]$ voor het snijpunt met de y-as van de lineaire regressielijn:

$$[a_i] = \frac{n \cdot [\text{datumraster } i] - [\text{som datum}]}{[\text{noemer}]} \quad (11)$$

$$[b_i] = \frac{[\text{kwadraatsom datum}] - [\text{datumraster } i]}{[\text{noemer}]} \quad (12)$$

- 6) Berekening van de richtingscoëfficiënt (=erosietrend) en het snijpunt met de y-as van de lineaire regressielijn:

$$[\text{erosietrend}] = \sum_{i=1}^n [a_i] \cdot [\text{bathymetrisch raster } i] \quad (1)$$

$$[\text{snijpunt y-as}] = \sum_{i=1}^n [b_i] \cdot [\text{bathymetrisch raster } i] \quad (13)$$

- 7) Berekening van diepte zoals voorspeld door de lineaire regressielijn, op het ogenblik van de verschillende opnamedatums (voor $i=1, \dots, n$):

$$[\text{trend } i] = [\text{erosietrend}] \cdot [\text{datumraster } i] + [\text{snijpunt y-as}] \quad (14)$$

- 8) Berekening van de totale en de verklaarde som van kwadraten $[SS_{\text{tot}}]$ en $[SS_{\text{reg}}]$:

$$[SS_{\text{tot}}] = \sum_{i=1}^n ([\text{bathymetrisch raster } i] - [\text{gemiddelde diepte}])^2 \quad (15)$$

$$[SS_{\text{reg}}] = \sum_{i=1}^n ([\text{trend } i] - [\text{gemiddelde diepte}])^2 \quad (16)$$

9) Berekening van de R²-waarde:

$$[R^2] = \frac{[SS_{\text{reg}}]}{[SS_{\text{tot}}]} \quad (17)$$

Formules (1) en (17) geven de gewenste finale resultaten, nl. respectievelijk de erosietrend en de R²-waarden. Indien ervoor gekozen is dieptes positief en in meter uit te drukken, en te werken met in dagen uitgedrukte gereduceerde opnamedatum, dan is de eenheid van de erosietrend m/dag. Een negatieve waarde voor de erosietrend correspondeert dan met een sedimentatietrend.

Merk op dat bij de strandopmetingen bijna elk van de opmetingen in één enkele dag is uitgevoerd, zodat [datumraster i] vervangen kan worden door een scalar. Indien bij een morfologische trendanalyse in een bepaald gebied alle datumrasters scalars zijn, kunnen alle rasters in de formules (7), (8), (9), (11) en (12) vervangen worden door scalars. Het is dan ook aanbevolen deze bewerkingen niet met de ArcMap calculator uit te voeren, maar bijvoorbeeld in Excel. Niet alleen komt dit de nauwkeurigheid van de resultaten ten goede, het is tevens sneller (mogelijkheid om formules te kopiëren voor meerdere cellen).

Voor elk van de 6 strandzones, 6 vooroeverzones en 3 kustnabije zones is een morfologische trendanalyse uitgevoerd. De resulterende erosietrend- en R²-rasters kunnen teruggevonden worden op bijgevoegde DVD (DVD 1, in de folder "ArcMap rasters morfologische trendanalyse"). Hieronder volgen nog enkele bijkomende details over de uitgevoerde analyses.

- Voor de 6 strandzones zijn de opmetingen van voorjaar 2003 niet gebruikt in de trendanalyse. Deze opmetingen vertoonden een te grote afwijking met de waargenomen trends, en gezien de afwijkende opnamemethode (jeep en meetwiel in plaats van de gebruikelijke laserscan) wordt vermoed dat een te grote onnauwkeurigheid op deze opmetingen zit.
- De erosietrend-rasters op bijgevoegde DVD 1 zijn omgezet naar m/jaar door de oorspronkelijke resultaten (formule (1)) te vermenigvuldigen met een factor 365.
- Als gereduceerde opnamedatum voor de bathymetrische rasters van de kustnabije zones is gekozen voor het gemiddelde van de opnameperiode zoals aangegeven in Tabel 4. Dit betekent dat er voor de kustnabije zone een grote onzekerheid zit op de opnamedatum, die kan oplopen tot een half jaar. Bij het interpreteren van de erosietrends voor kustnabije zone is het nuttig dit in het achterhoofd te houden. De resultaten voor kustnabije zone moeten sowieso met de nodige marge geïnterpreteerd worden, gezien het beperkte tijdreeks van dieptegegevens waarop de trendanalyse is uitgevoerd.
- Voor sommige zones zijn verschillende deelgebieden te onderscheiden al naargelang het aantal beschikbare dieptegegevens. Zo zijn voor de strandopmetingen in zone 1 geen gegevens beschikbaar van het voorjaar 1999 voor de secties 35-39, en in het najaar 1999 zijn voor deze zone enkel de secties 2-6 opgemeten. In zo'n geval is voor elk deelgebied dan ook een aparte trendanalyse uitgevoerd, waarbij in elk deelgebied gebruik gemaakt werd van het maximum aantal dieptegegevens, nadien zijn de resulterende rasters van elk deelgebied samengevoegd tot erosietrend- en R²-raster voor de hele zone.

5.4 Morfologische trendanalyse van strand en vooroever: resultaten en bespreking

5.4.1 Algemeen

In deze sectie worden de resultaten van de morfologische trendanalyse voor strand en vooroever getoond aan de hand van Figuur 7 t.e.m. Figuur 16. Elk van deze figuren toont de morfologische trend voor een deel van de kust (telkens ruwweg 30 secties) en is opgebouwd uit 4 panelen:

- Het bovenste paneel toont voor elke rastercel en voor zowel vooroever als strand de erosietrend zoals berekend volgens de methodologie uitgelegd in paragraaf 5.1. Blauwe kleuren komen overeen met een positieve erosietrend (en dus netto erosie), bruine kleuren met een negatieve erosietrend (en dus netto sedimentatie). Eveneens aangeduid zijn de hoogwaterlijn (conventioneel wordt deze op 4,50m boven Z genomen, of dus +4,39m TAW, zie bijvoorbeeld [5]), de laagwaterlijn (1,50m boven Z of +1,39m TAW) en de zeewaartse vooroevergrens (4m onder Z of -4,108m TAW). Merk op dat deze laatste grens slechts een indicatie geeft van de werkelijke vooroevergrens: de vooroever wordt immers gedefinieerd als de morfologische verderzetting van het strand onder water, en de steilere vooroever eindigt bijgevolg daar waar de vlakke zeebodem begint. Hoewel de vooroevergrens in principe dus gedefinieerd wordt via de bodemmorfologie valt hij op de meeste plaatsen langs de Belgische kust ruwweg samen met de -4m Z isobath. Merk op dat voor de stranddata enerzijds en de vooroevergegevens anderzijds telkens een aparte trendanalyse is uitgevoerd, de op de figuren getoonde laagwaterlijn valt dan ook ruwweg samen met de scheidinglijn tussen de trendanalyse voor het strand en de trendanalyse voor de vooroever.
- Het paneel daaronder toont voor zowel vooroever als strand de R^2 -waarde van de lineaire kleinste-kwadratenbenadering uitgevoerd op de tijdreeks van topobathymetrische gegevens in elke rastercel (zie methodologie in paragraaf 5.1). Hoogwaterlijn, laagwaterlijn en zeewaartse vooroevergrens zijn eveneens aangeduid.
- Het derde paneel is een combinatie van de twee voorgaande en toont de uitgefilterde erosietrend: dit is de erosietrend uit het eerste paneel maar enkel voor die rastercellen waar effectief sprake is van een significante (lineaire) trend. De grenswaarde hiervoor is enigszins arbitrair op $R^2 = 0,5$ gekozen, cellen met $R^2 < 0,5$ zijn in dit paneel wit gemaakt. Eveneens zijn in dit paneel enkele isobathen aangeduid, zodat waar relevant gekeken kan worden naar een verband tussen de lokale bathymetrie en de erosietrend.
- Het onderste paneel toont de bathymetrie, samen met de contour die de grens tussen erosieve en sedimenterende zones aangeeft (dus waar de erosietrend nul is). Door middel van gekleurde balken onderaan deze figuur wordt daarnaast ook aangeduid waar badstrandophogingen en strandsuppleties zijn uitgevoerd. Deze informatie is gebaseerd op [5], waarbij enkel ophogingen en suppleties uitgevoerd in 1997 of later (dus de periode waarover de trendanalyse is uitgevoerd) worden getoond. Een groene balk duidt secties aan waar na 1997 geen werken zijn uitgevoerd, de lichtpaarse kleur duidt op het uitvoeren van badstrandophogingen (typisch tot maximaal een paar 1000m³ per sectie en per keer, aangebracht op het droog strand en meestal meerdere keren uitgevoerd in de bestudeerde periode), donkerpaars duidt op strandsuppleties (typisch enkele 10000-en m³ per sectie, aangebracht over het volledige strandprofiel en meestal eenmalig). De blauwe kleur correspondeert met secties waar grootschalige afgravingen uitgevoerd zijn. Dit laatste is in de praktijk enkel in Zeebrugge-strand gebeurd. Merk op dat deze balken enkel aanduiden of er al dan niet ophogingen of suppleties uitgevoerd zijn, voor meer details per sectie omtrent de datum en de omvang van de uitgevoerde werken verwijzen we naar [5].

De grijze vierkantjes naast elke legenda geven aan op welke panelen de legenda van toepassing is. Noteer ook dat we in hetgeen volgt gemeenzaam spreken van een erosie- of sedimentatietrend, ook indien de waargenomen trend een menselijke oorzaak kent.

De onderliggende satellietfoto is afkomstig van de Mercator databank van de Vlaamse overheid, te vinden op <http://mercator2.vlaanderen.be/>.

5.4.2 Secties 2-34

Figuur 7 toont de erosietrend voor strand en vooroever van de secties 2 t.e.m. 34.

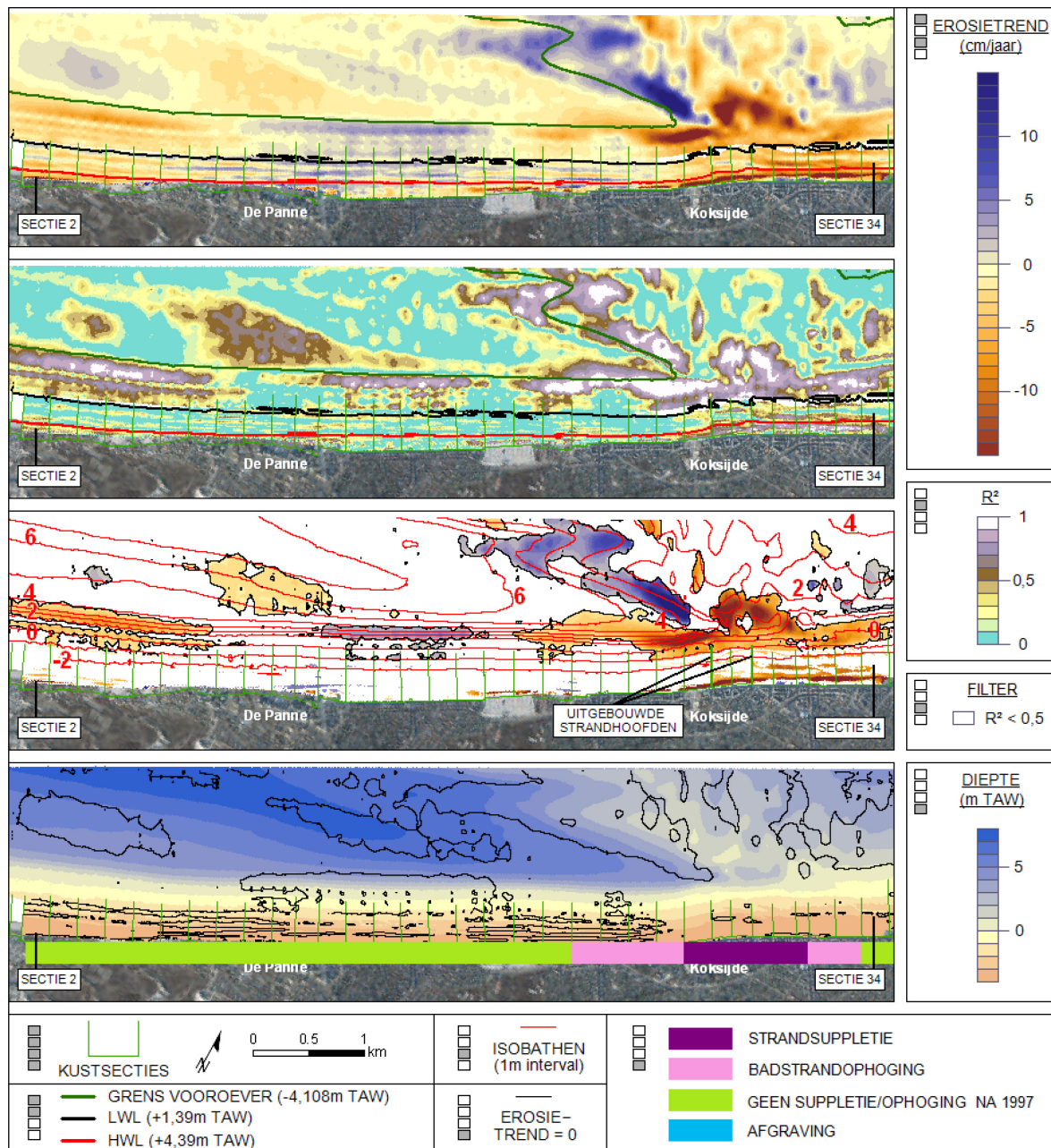
Wat opvalt bij de uitgefilterde erosietrend (paneel 3) is de sterke en aanhoudende sedimentatietrend op de vooroever ter hoogte van Koksijde. Deze sedimentatiezone kan gelinkt worden aan de aanwezigheid van de twee 400m lange strandhoofden, die in de periode 1986-1988 werden aangelegd. Opvallend is dat zelfs 10 tot 20 jaar na aanleg nog steeds een sterke sedimentatietrend kan waargenomen worden, die op sommige plaatsen 20 cm/jaar bedraagt.

De strandhoofden zijn overigens aangelegd net om de aanhoudende erosie voor de kust van Koksijde tegen te gaan. Inderdaad is er ten noordwesten van de sedimentatiezone een gebied waar een significante erosietrend optreedt (tot meer dan 15 cm/jaar). Deze erosiezone valt samen met het uiteinde van de geul Potje (zie bathymetrie in paneel 4 voor de ligging van de geul). In de rest van deze geul is geen significante trend waarneembaar (paneel 2: lage R^2).

Verder worden nog significante trends gevonden in het gebied dat morfologisch samenvalt met de zeewaartse grens van de vooroeverzone, met name daar waar de steile helling van de vooroever ophoudt en overgaat in de vlakkere zeebodem (zie de isobathen op paneel 3 of de bathymetrie op paneel 4). Voor het bebouwde centrum van De Panne is dit een erosietrend, ter hoogte van het natuurreservaat de Westhoek is dit een sedimentatietrend.

Wat betreft het strand is enkel op het droog strand ter hoogte van Koksijde (secties 26-34) een significante sedimentatietrend waar te nemen, die waarschijnlijk voor het grootste deel verklaard kan worden door de jaarlijkse badstrandophogingen in die secties en door enkele suppleties, uitgevoerd in de secties 29-31 in 2006, 2008 en 2009. Voor het overige zijn er zo goed als geen significante trends waar te nemen op het strand. Voor de secties 22-25 is de ontstentenis van een trend eerder opmerkelijk te noemen, gezien de jaarlijks uitgevoerde strandophogingen.

Tot slot wijzen we er nog op dat de besproken kustzone –met de verder in zee gelegen banken Broersbank en Trapegeer, niet zichtbaar in Figuur 7– tot de meest dynamische van de Belgische kustzone behoren. De erosie- en sedimentatiepatronen waargenomen op de vooroever zijn dan ook waarschijnlijk gekoppeld aan het morfologisch gedrag van het verder in zee gelegen bank- en geulcomplex.



Figuur 7 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 2-34.

5.4.3 Secties 32-62

In Figuur 8 wordt de erosietrend van strand en vooroever voor de secties 32 t.e.m. 62 getoond.

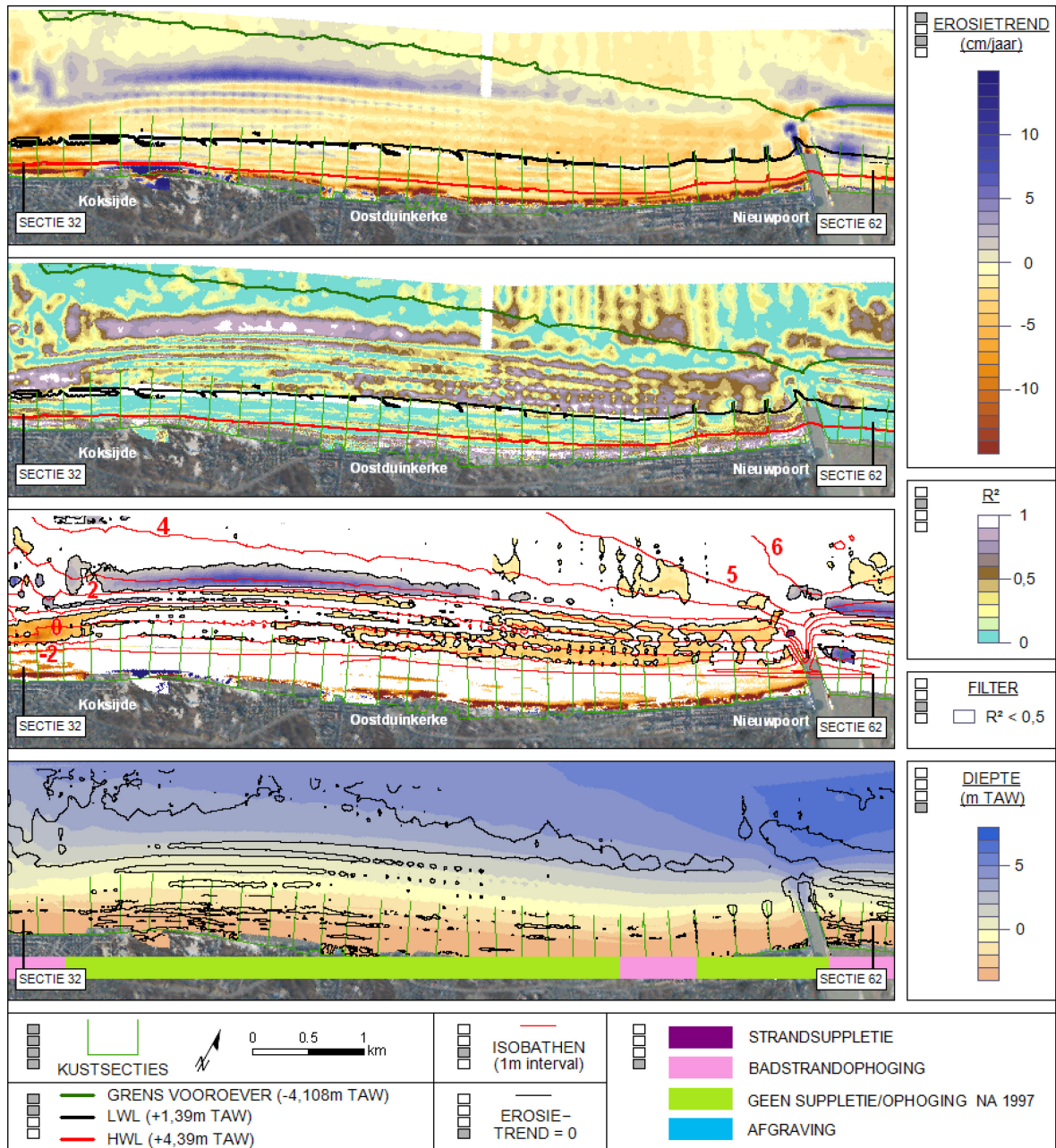
Bij de uitgefilterde erosietrend (paneel 3) valt onmiddellijk de langgerekte erosiezone langsheen de vooroevervoet op: de meest significante en sterkste erosie op aan de zeewaartse begrenzing van de vooroever (de groene lijn die de -4,108m TAW contour aanduidt valt hier minder goed samen met de vooroevergrens, die duidelijk dichterbij de kust ligt, zie hiervoor de rode isobathen in paneel 3). De erosieve strook lijkt bovendien nauw aan te sluiten bij de lokale bathymetrie: de grootste erosiesnelheden worden consequent langsheen de -3m TAW contour gevonden. Deze erosieve trend is het meest uitgesproken tussen Koksijde en Oostduinkerke, tussen Oostduinkerke en Nieuwpoort is de erosieve trend minder sterk en is de significantie ook zeer laag ($R^2 < 0,5$).

Vanaf Koksijde en tot voorbij Oostduinkerke is over de ganse breedte van de vooroever tussen +1m en -2m TAW een bandenstructuur van afwisselend erosieve en sedimenterende stroken waar te nemen, zie paneel 1. Hoewel het hier voor het grootste deel niet om een significante trend gaat ($R^2 < 0,5$), kunnen deze banden gelinkt worden aan de lokale morfologie, met name aan het voorkomen van brekerbanken in die zone. De bandenstructuur van afwisselend erosie en sedimentatie is dan mogelijk het gevolg van een kustdwarse verplaatsing van deze brekerbanken, wat meteen ook de lage R^2 voor dit gebied verklaart: een verplaatsing van een bestaande morfologische structuur (zonder dat daarbij noodzakelijk netto sedimentatie of erosie optreedt) geeft in de morfologische trendanalyse typisch een lage R^2 , terwijl deze verschuiving wel waargenomen wordt in het erosie/sedimentatie-patroon als langs mekaar gelegen zones van erosie en sedimentatie. Hoe deze brekerbanken precies evolueren in de tijd is evenwel moeilijk af te leiden uit het hier voorgestelde erosie/sedimentatie-patroon, daartoe bekijkt men best de evolutie in de tijd van meerdere vooroeverprofielen.

Voor de strandzone toont Figuur 8 bijna overal tussen Koksijde en Nieuwpoort een sterke en significante sedimentatietrend. Vergelijking van dit sedimentatiepatroon met de satellietfoto leert dat de sedimentatie optreedt hoog in het strandprofiel: accretie treedt op hetzij tegen de duinvoet of op de eerste duinenrij, hetzij tegen de dijk aan indien er een aanwezig is. Een groot deel van deze strandzone is, om zandverstuiving tegen te gaan, beplant met rijshouthagen, wat ten dele de grote sedimentatiesnelheden verklaart, maar ook op plaatsen zonder deze hagen vindt een sterke sedimentatietrend plaats. De sedimentatie wordt veroorzaakt door landwaarts gericht eolisch transport: de wind blaast het zand van op het strand landinwaarts tot waar het zand een hindernis tegenkomt (dijk, duinvoet, beplanting), waar het zand dan blijft het liggen. Uitzonderingen op deze sedimentatietrend zijn de secties 36-37, waar erosie lijkt op te treden. De satellietfoto leert echter dat zich aan die secties een stuifgat bevindt waar de wind het zand ongehinderd verder landinwaarts kan blazen dan op andere plaatsen.

Op het nat strand bijna geen enkele plaats een significante trend waar te nemen.

Merk op dat de zone tussen Koksijde en de havengeul van Nieuwpoort slechts een beperkte hoeveelheid badstrandophogingen heeft gekend: enkel in de secties 54-56 worden jaarlijks ophogingen uitgevoerd.



Figuur 8 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 32-62.

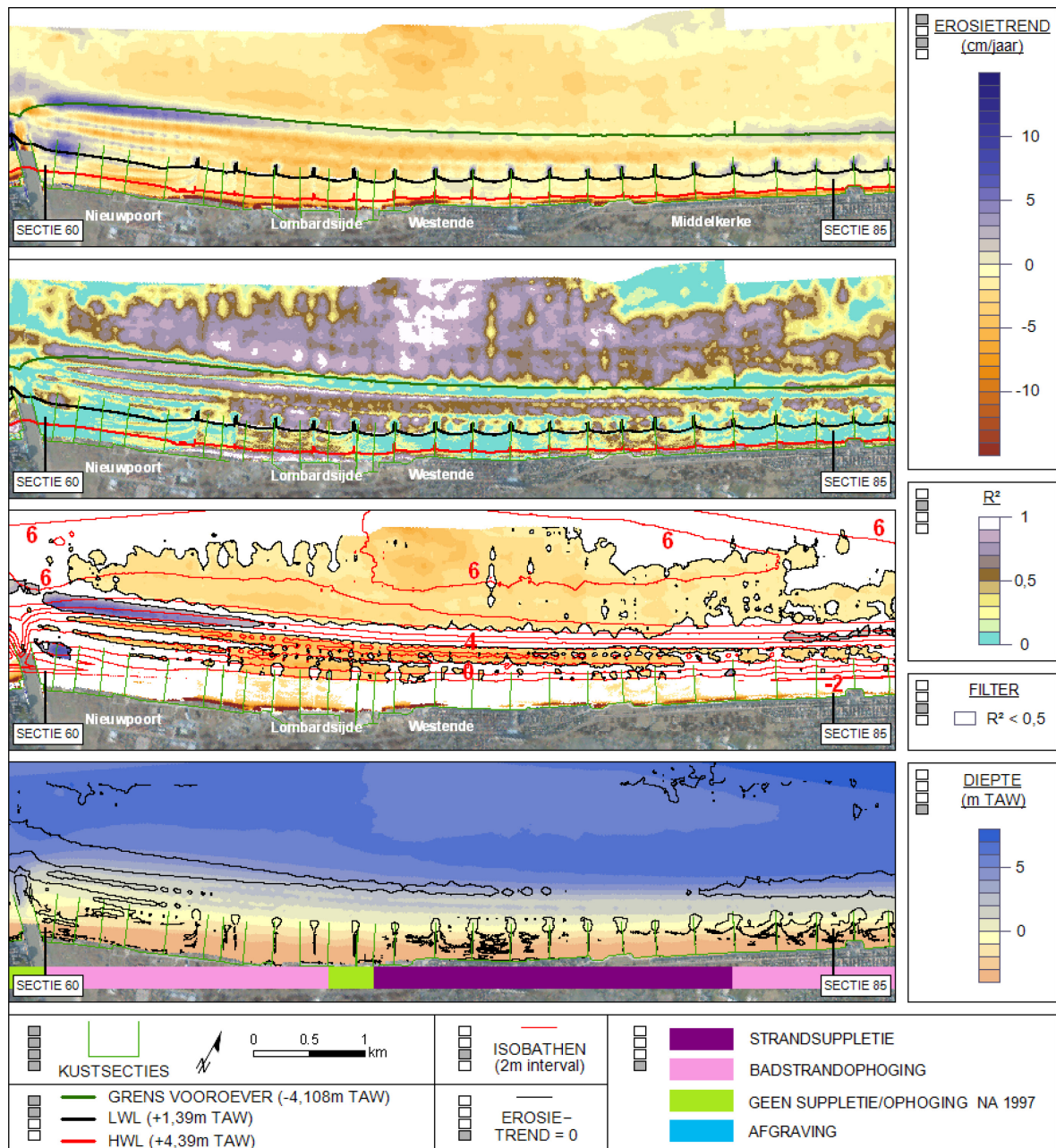
5.4.4 Secties 60-85

De erosietrend van strand en vooroever voor de secties 60 t.e.m. 85 kan teruggevonden worden in Figuur 9.

Voor de vooroever merken we weer een langgerekte erosieve strook aan de zeewaartse vooroevergrens. De trend is evenwel niet zo sterk als bij de voorgaande secties (lagere sedimentatiesnelheden) en is enkel significant tussen Nieuwpoort en Lombardsijde. Ten oosten van Lombardsijde daalt voor deze strook de R^2 -waarde en is er van een "trend" nauwelijks sprake, het is pas vanaf Middelkerke dat de erosieve trend terug min of meer significant wordt. Verder kan voornamelijk ten oosten van de havengeul van Nieuwpoort weer de bandenstructuur van afwisselend erosie en sedimentatie teruggevonden worden, die ook hier geassocieerd kan worden met de aanwezigheid van brekerbanken in dit gebied. Nog meer naar het oosten toe lijkt de bandenstructuur wat te vervagen en tevens vermindert het aantal banden. Dit laatste komt echter nog steeds overeen met het aantal brekerbanken, dat eveneens vermindert van Nieuwpoort naar Middelkerke toe. Verder is er een opvallend grote zone van significante sedimentatie van de zeebodem over de volledige breedte van de hier besproken zone. De sterkste en meest significante sedimentatietrend lijkt geassocieerd te kunnen worden met een lokale ondiepte (zie paneel 4). Het is echter niet duidelijk of deze ondiepte het gevolg is van deze sedimentatietrend of dat deze ondiepte net de oorzaak is van de sedimentatietrend.

Ter hoogte van de secties 60-62 werd vroeger (tot 2001) baggerspecie afkomstig uit de IJzermondung opgespoten, het merendeel hiervan op de vooroever, maar nu en dan ook een deel op het strand. Op de overgang van nat strand naar vooroever (zwarte lijn in panelen 1 en 2) zien we net ten oosten van de haventoeegang dan ook een kleine significante erosievlek. Aangezien de geanalyseerde periode start vanaf 1997 en opspuitingen opgehouden zijn in 2001 (dus min of meer aan het begin van de geanalyseerde periode), moet deze erosievlek waarschijnlijk gezien worden als een terugkeer naar een natuurlijk evenwicht, nadat dit gebied het jarenlang kunstmatig opgehoogd werd.

Voor het strand beperken de significante trends zich opnieuw tot het droog strand. Meerbepaald treden er enkel significante en sterke sedimentatietrends op hoog in het strandprofiel, dus tegen de duinvoet aan of – indien een dijk aanwezig is – in een strook net voor de dijk van enkele tientallen meter breed. In de secties 65-70 worden wel quasi jaarlijks ophogingen uitgevoerd, doch deze zijn te beperkt van omvang om de waargenomen sedimentatietrend (die ook optreedt in secties 71-72, waar geen ophogingen plaatsvinden) volledig in rekening te brengen. Vanaf sectie 73 t.e.m. 82 zijn vanaf 2006 enkele kleine suppleties uitgevoerd, maar daarnaast ook vrij omvangrijke jaarlijkse ophogingen. In deze secties kunnen deze werken wel verantwoordelijk geacht worden voor de waargenomen sedimentatietrend.



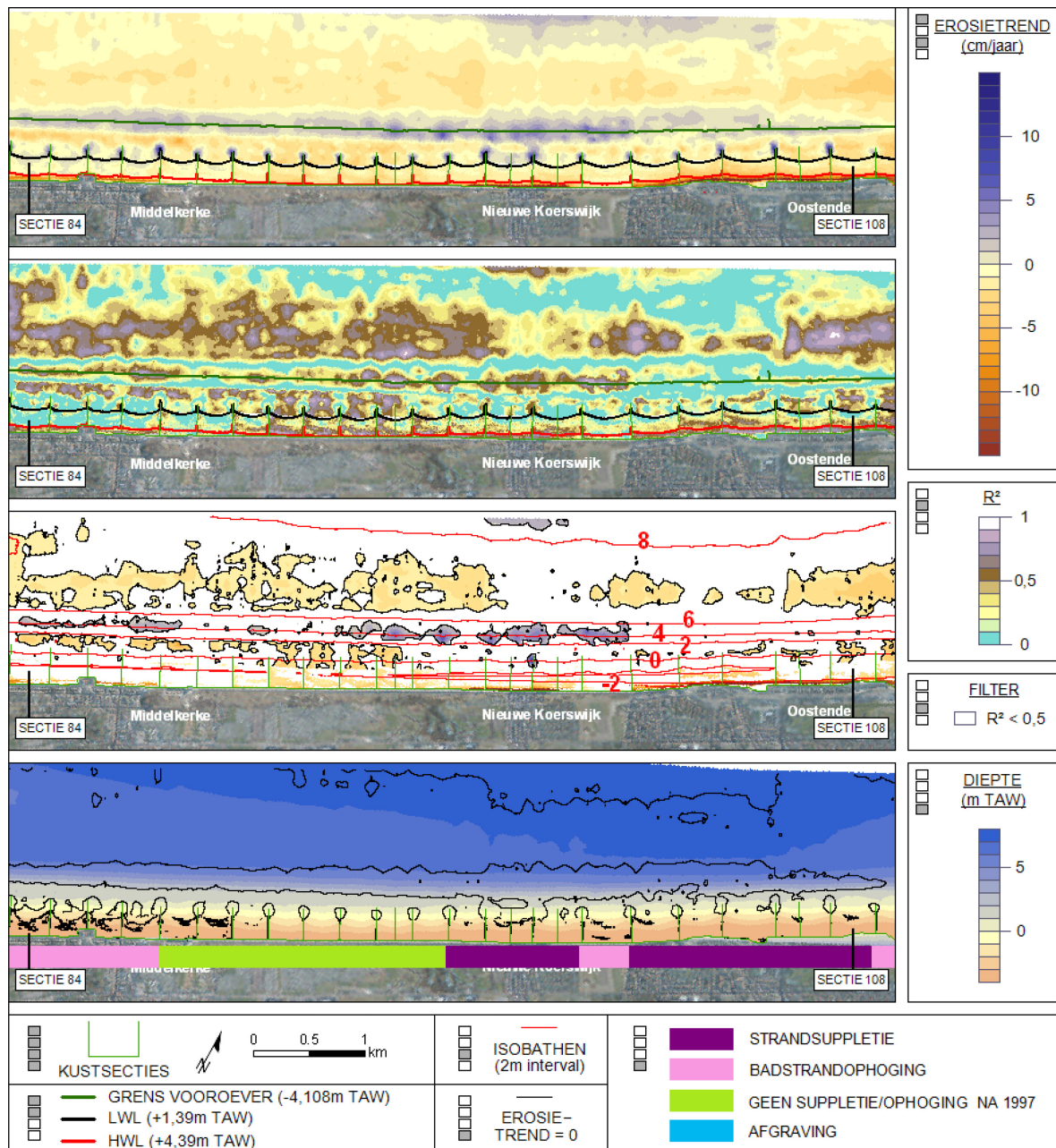
Figuur 9 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 60-85.

5.4.5 Secties 84-108

Figuur 10 geeft de erosietrend van strand en vooroever voor de secties 84-108.

In de vooroeverzone treedt opnieuw een erosietrend in de smalle zone langsheen de voet van de vooroever. Ook hier is deze trend slechts op een beperkt aantal locaties significant. De zeebodem net ten noorden van deze erosiestrook heeft net als in de hierboven besproken secties 60-85 een sedimentarend karakter, maar ook hier is de sedimentatietrend slechts in enkele beperkte zones significant. In die zin is het erosie/sedimentatie-patroon van het hier besproken gebied een verderzetting van het patroon waargenomen in het in de vorige paragraaf besproken gebied, zij het dat het patroon hier iets minder uitgesproken is.

Wat betreft het strand valt het op dat de sterkste sedimentatietrends zijn waar te nemen in de zones waar strandsuppleties zijn uitgevoerd. Zo zijn in de secties 97 t.e.m. 101 en in de secties 103 t.e.m. 108 verschillende keren grote hoeveelheden zand aangevoerd (zie [5] voor exacte cijfers), deze suppleties zijn dan ook de hoofdoorzaak van de waargenomen "sedimentatie". Verder zijn er vrij omvangrijke jaarlijkse badstrandophogingen in de secties 83 t.e.m. 87, met een gemiddelde aanvoer van $20 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Ondanks deze continue aanvoer van sediment is er evenwel slechts een vrij zwakke sedimentatietrend waar te nemen in deze secties. Ook in de secties 98 t.e.m. 102 lijken de jaarlijkse ophogingen weinig invloed uit te oefenen op het sedimentatiepatroon, hierbij dient wel vermeld te worden dat de zandaanvoer in deze secties met een gemiddelde van $3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ eerder beperkt is. In de secties waar geen zand aangevoerd wordt (88 t.e.m. 96) is een zwakke sedimentatietrend waar te nemen, hierbij is het wel markant dat deze zwakke trend op vrij veel locaties toch nog significant is. Immers is er veelal een positief verband waar te nemen tussen enerzijds de absolute waarde van de grootte van een trend en anderzijds de R^2 -waarde van die trend (hier wordt later nog op teruggekomen), de in deze secties waargenomen sedimentatietrend is hierop blijkbaar een uitzondering. Tot slot wijzen we ook nog op het optreden van lokale erosie rond de koppen van de strandkribben.



Figuur 10 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 84-108.

5.4.6 Secties 105-131

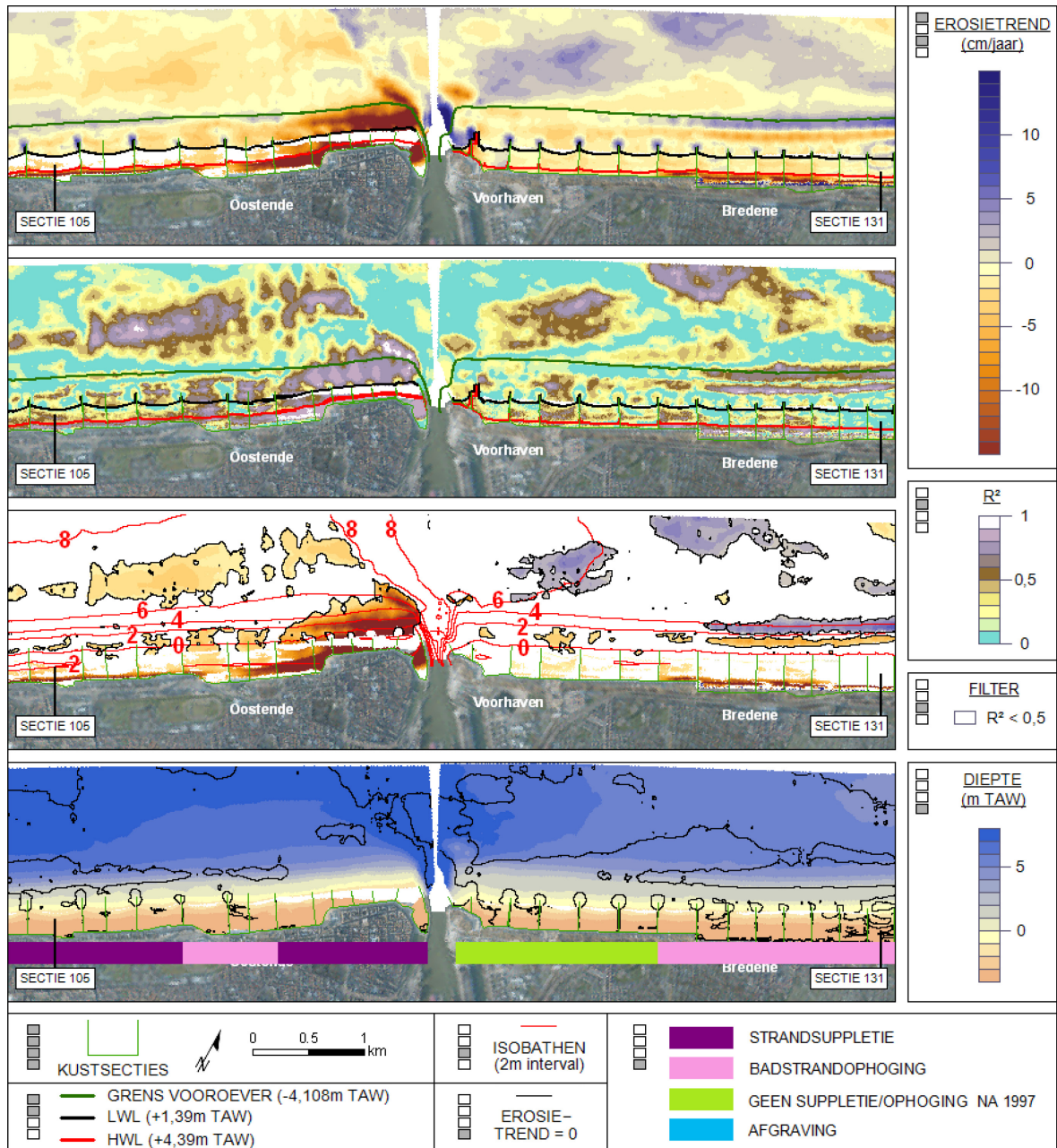
Figuur 11 geeft de erosietrend van strand en vooroever voor de secties 105 t.e.m. 131.

Op de vooroever zijn ten westen van de haveningang van Oostende enkele vlekken van met lichte sedimentatietrend waar te nemen, die een verderzetting zijn van de sedimentatievlekken reeds vermeld in de vorige paragraaf. Deze reeks sedimentatievlekken eindigt bij de vaargeul naar de haven van Oostende, ten oosten van de vaargeul vinden we dan weer enkele erosievlekken. Het is niet duidelijk wat deze sedimentatie- en erosievlekken veroorzaakt, er lijkt op de plaats van deze vlekken in elk geval geen opvallende of afwijkende bodemmorfologie voor te komen.

Merk op dat ter hoogte van Bredene langsheen de vooroevervoet zich opnieuw een langgerekte erosiestrook manifesteert. Opvallend is dat hier deze strook aan de kustwaartse zijde begrensd wordt door een langgerekte sedimentatiestrook, die in zekere zin het spiegelbeeld lijkt te zijn van de erosiestrook. Beide stroken zetten zich nog een stuk verder oostwaarts door, en zullen verder besproken worden in de volgende sectie.

Wat betreft het strand valt onmiddellijk de significante en sterke "sedimentatie"-trend onmiddellijk ten westen van de haventoeegang op, die volledig kan toegeschreven worden aan de aanleg van het noodstrand in 2004, waarbij meer dan $700 \times 10^3 \text{ m}^3$ werd aangebracht in de secties 112-117. Een deel hiervan is overigens op de vooroever aangebracht, wat ook duidelijk mag blijken uit Figuur 11. Ook de jaren nadien zijn in verschillende van deze secties op het strand nog aanvullende suppleties aangebracht met een totaal van om en bij de $350 \times 10^3 \text{ m}^3$, voor preciezere gegevens over deze suppleties verwijzen we opnieuw naar [5]).

Voor het overige treedt over grote delen op het droog strand opnieuw de bij voorgaande secties reeds vernoemde trend op: sedimentatie tegen de duinvoet of in een smalle strook langsheen de dijk, telkens is dit te wijten. Voor de secties 105-111 is dit te wijten aan de jaarlijkse ophogingen en de suppleties (secties 105-108, vanaf 2006). Ook voor de secties ten oosten van Oostende valt het deel van het droog strand waar sedimentatie optreedt samen met de secties waar jaarlijkse ophogingen uitgevoerd worden (secties 124-131). De morfologische evolutie van het strand van het deel van de kust uit Figuur 11 wordt bijgevolg volledig gestuurd door menselijk ingrijpen.



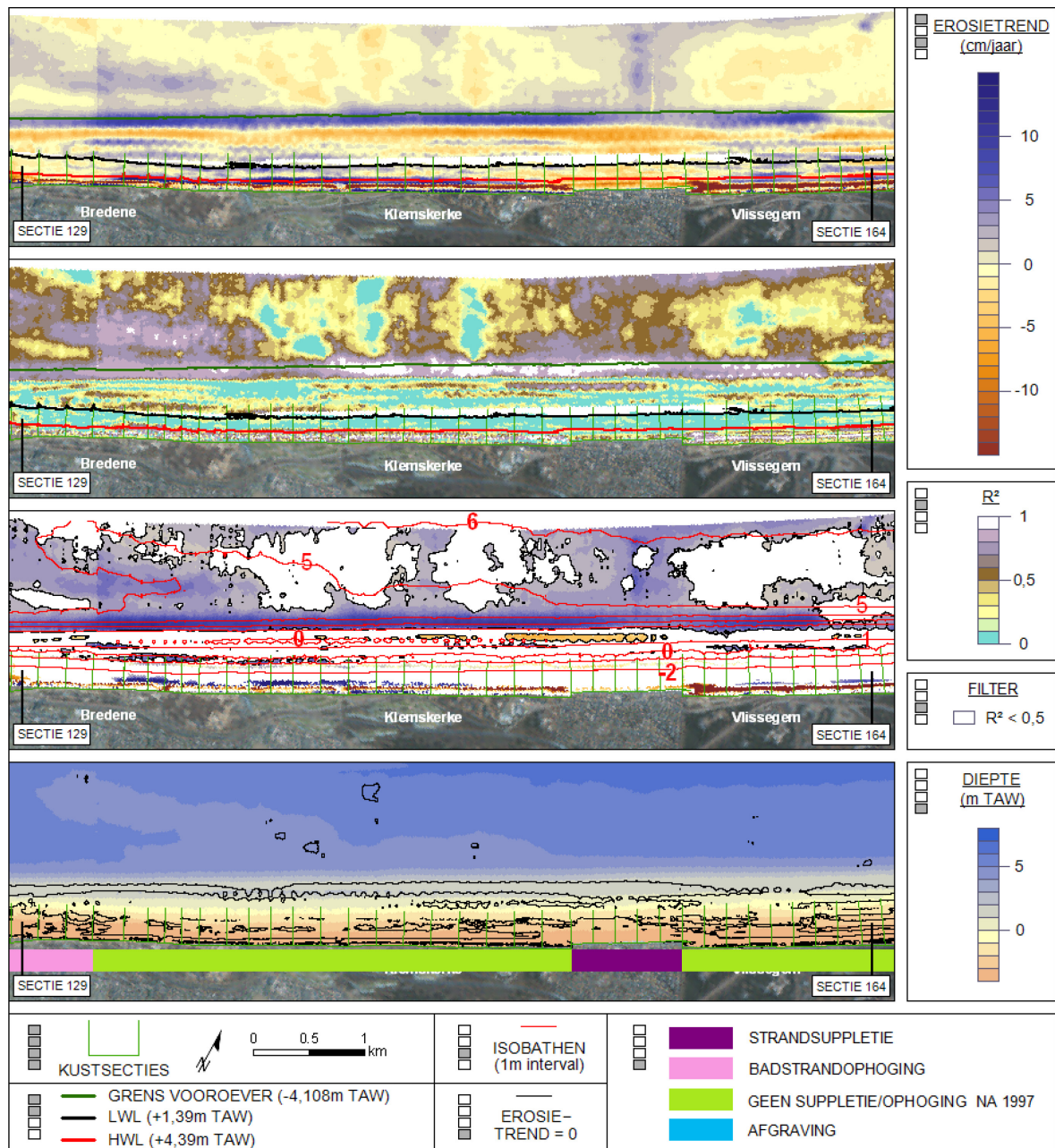
Figuur 11 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 105-131.

5.4.7 Secties 129-164

Figuur 12 laat de erosietrend van strand en vooroever voor de secties 129 t.e.m. 164 zien.

Op de vooroever treedt opnieuw een significante en sterke erosietrend langsheen de zeewaartse vooroevergrens op, en dit over de volledige breedte van het hier besproken gebied. Ook opmerkelijk is dat de vooroever ter hoogte van Klemskerke en tussen de 0m en -1m TAW een smalle strook van significante sedimentatietrend vertoont. Deze strook is zeer waarschijnlijk te associëren met de voedingsberm die in 1991 is aangelegd, en die in de jaren daarna is aangevuld tot hij zich uitstrekte van sectie 132 tot 169. De waargenomen sedimentatietrend is waarschijnlijk een uiting van de kustwaartse verschuiving van deze vooroeverberm in de periode 1997-2010. De erosiestrook lijkt ook omvangrijker dan de sedimentatiestrook, wat er op wijst dat de voedingsberm sinds de aanleg zich niet alleen verplaatst heeft maar ook deels weggeërodeerd is (wat uiteraard niet verwonderlijk is). Om meer gedetailleerde uitspraken over de morfologische evolutie van de berm te doen zijn echter meer gegevens (kennis van de aangebrachte hoeveelheden en de precieze oorspronkelijke locatie van de berm) en verder onderzoek (bijvoorbeeld het analyseren van de tijdsevolutie van verschillende dwarsprofielen) vereist, en dit valt buiten de opzet van deze studie.

Wat het droog strand betreft zijn er ook enkele opvallende vaststellingen. Zo is er opnieuw de significante sedimentatietrend langsheen de voet van de duinen, die zicht over de hele breedte van de figuur aanwezig zijn, behalve ter hoogte van De Haan (secties 151-155). De sedimentatiesnelheden liggen nu opvallend hoog en bedragen maar liefst 40-50 cm/jaar. Deze hoge snelheden zijn het gevolg van de aanwezigheid van rijshouthagen, die –zoals uit het satellietbeeld blijkt– ruimtelijk samenvallen met de sedimentatiestrook. Daarnaast kan op het strand op vele plaatsen langs de hoogwaterlijn (secties 133-146 en secties 158 en verder oostwaarts) een significante erosietrend waargenomen worden, wat opmerkelijk is daar dit bijna nergens langs de kust optreedt. Een verklaring kan mogelijk gezocht worden in de grootschalige strandsuppleties die uitgevoerd zijn in de secties 132-172 in de periode 1992-1996, waarbij in totaal bijna 3 miljoen m³ is aangevoerd. De hier berekende erosietrend –die geldig is voor de periode 1997-2010, dus net na de suppleties– kan dan gezien worden als een natuurlijke respons op de grote kunstmatig toegevoegde hoeveelheden, waarbij de natuur deels tracht terug te keren naar de oorspronkelijke toestand.



Figuur 12 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 129-164.

5.4.8 Secties 153-188

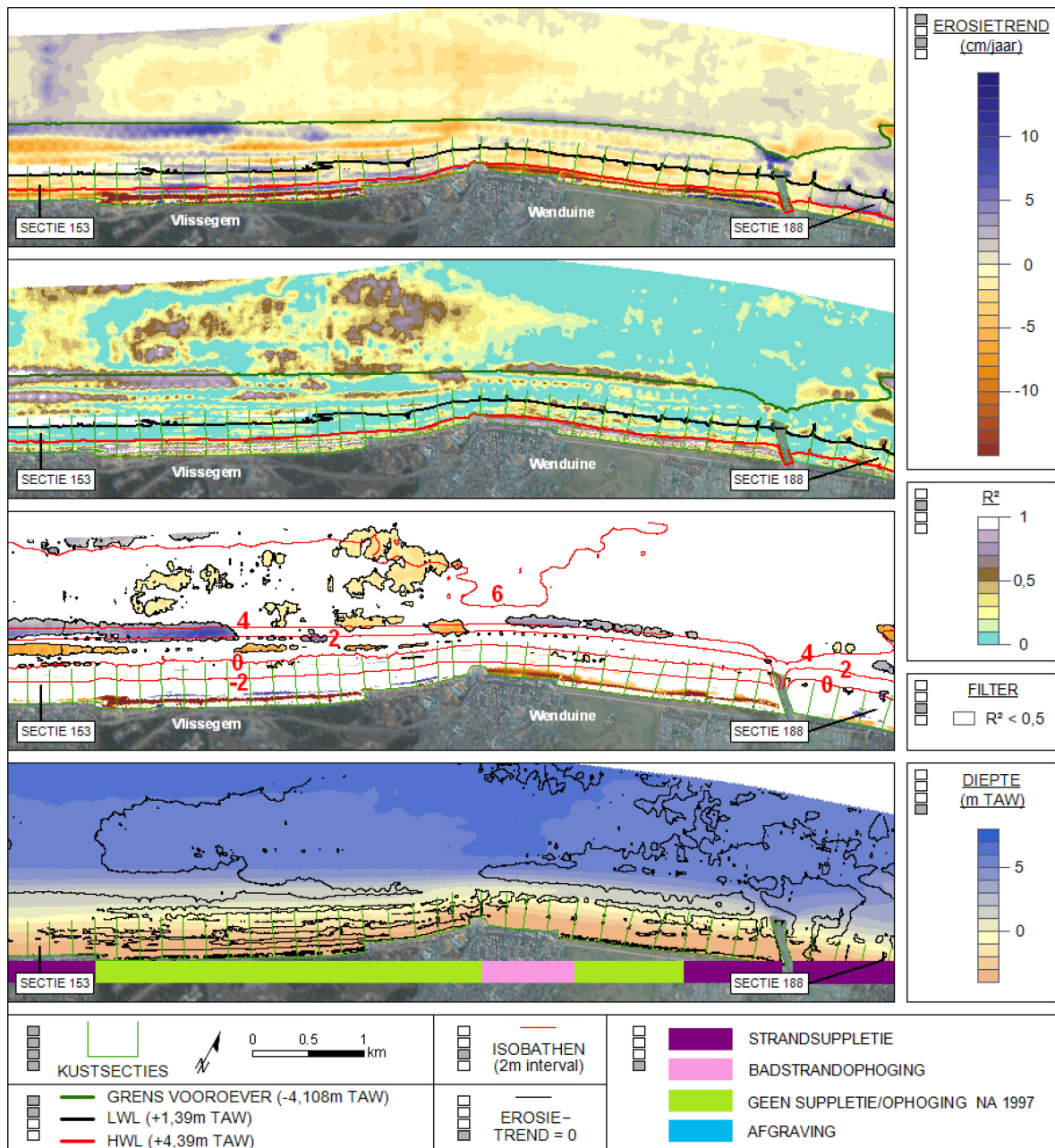
De erosietrend van strand en vooroever voor de secties 153-188 wordt getoond in Figuur 13.

Het westelijke deel van deze figuur (secties 153-164) is een herhaling van de voorgaande paragraaf en toont opnieuw een gedeelte van de eerder vermelde smalle strook met sterke en significante erosietrend langs de vooroevervoet. Deze trend lijkt beide onderbroken te worden door de knik in de kustlijn ter hoogte van de rotonde van Wenduine, ten oosten van de knik lijkt de erosietrend langsheen de vooroevervoet zich verder te zetten, doch in zwakkere vorm (zowel wat betreft significantie als erosiesnelheid). De trend wordt dan opnieuw onderbroken, ditmaal door de aanwezigheid van de havengeul van Blankenberge. Mogelijks is het gebied tussen de knik in de kustlijn en de havengeul te kort voor de erosietrend om opnieuw tot volle ontwikkeling te komen.

Ook kan men op de vooroever ten westen van Wenduine bij de niet-significante trend (paneel 1) opnieuw de bandenstructuur waarnemen, die ook hier wijst op het dynamische karakter van de aanwezige brekerbanken.

Wat betreft het droog strand zien we dat de in vorige paragraaf vermelde significante en zeer sterke sedimentatietrend (tot 50 cm/jaar) aanhoudt tot en met sectie 167 en ook hier exact samenvalt met de aanwezigheid van rijshouthagen. Vanaf sectie 168 tot aan de rotonde zijn geen rijshouthagen meer en treedt een zwakkere en minder significante sedimentatietrend op tegen de duinvoet. Ook de eerder vermelde significante erosietrend rond de hoogwaterlijn treedt sporadisch op in de secties ten westen van de rotonde en is zeer waarschijnlijk een respons op de hoger vernoemde grootschalige suppletiewerken die net voor de geanalyseerde periode plaatsvond.

Voor het droog strand tussen Wenduine en de havengeul van Blankenberge treedt een significante sedimentatietrend op in een strook van enkele tientallen meter net voor de dijk (secties 173 tot halverwege 176) of aan de duinvoet (vanaf halverwege sectie 176 tot aan de havengeul). Voor de strook waar een dijk aanwezig is, is de sedimentatietrend het gevolg van de jaarlijkse badstrandophogingen, die vanaf 2005 vrij omvangrijk geworden zijn (tot ~10 000m³ per keer per sectie). Voor de strook met duinen is de sedimentatietrend voor secties 176-180 van louter natuurlijke oorsprong en veroorzaakt door eolisch zandtransport. Voor de secties 181-184 wordt de trend mede veroorzaakt door de jaarlijkse ophogingen in sectie 182 en de in 2008 uitgevoerde kleine strandsuppletie in de secties 181-184. Gezien de beperkte omvang van de jaarlijkse ophogingen en het feit dat de suppletie plaatsvond op het einde van de geanalyseerde periode, kan gesteld worden dat de waargenomen sedimentatietrend in deze secties op zijn minst deels van natuurlijke oorsprong is.



Figuur 13 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 153-188.

5.4.9 Secties 179-216

De erosietrend van strand en vooroever voor de secties 179-216 wordt getoond in Figuur 14. Dit gebied is ook al eerder besproken in [6].

De erosie- en sedimentatiepatronen in het gebied tussen de havengeul van Blankenberge en Zeebrugge worden zeer sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de westelijke strekdam van de buitenhaven van Zeebrugge. Een grote zone met significante sedimentatietrend bevindt zich in de vooroeverzone tussen de pier van Blankenberge en de strekdam. Deze trend wordt waarschijnlijk voor een groot deel veroorzaakt door het onderbreken van de kustdrift door de strekdam, maar ook de lage stroomsnelheden in de luwte van de strekdam zijn bevorderlijk voor neerslag van sediment. In het grootste deel van de zone is de sedimentatiesnelheid eerder gematigd (enkele cm/jaar), hoewel lokaal ook sterke sedimentatietrends optreden (tot 15 cm/jaar). Ook is opnieuw een bandenstructuur waar te nemen in het sedimentatiepatroon, ditmaal niet van afwisselend erosieve en sedimenterende stroken, maar eerder van afwisselend sterk en zwak sedimenterende stroken. Dit effect is toe te schrijven aan de superpositie van een algemene sedimentatietrend en de dynamiek van de aanwezige brekerbanken.

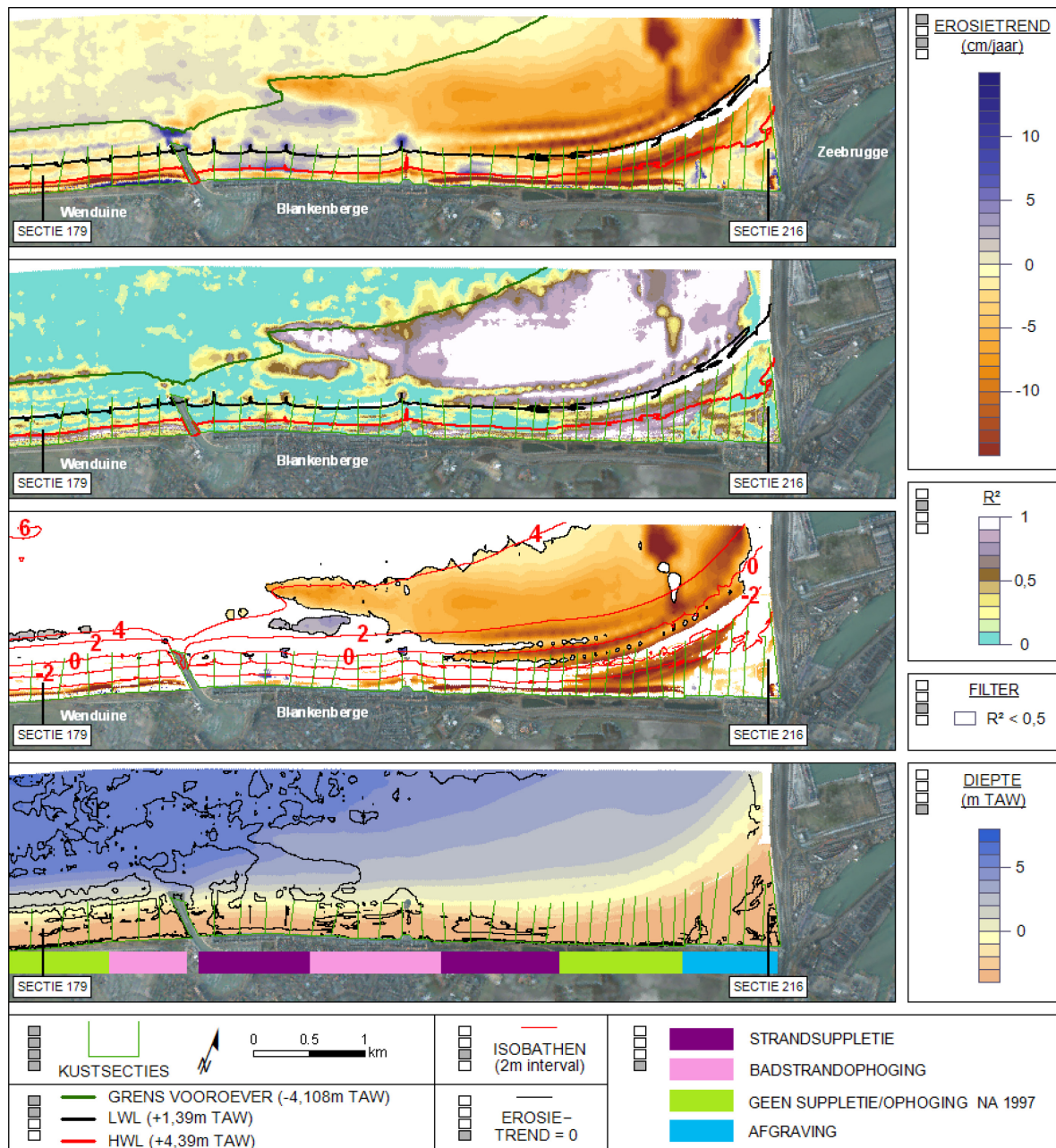
De meest westelijke tip van de hierboven besproken sedimentatiezone, voor de kust van Blankenberge, (zie paneel 3) valt samen met de stortzone Blankenberge (de ruimtelijke overlap tussen beide is echter niet exact: de stortzone ligt een 150-tal meter noordelijker dan deze tip), en wordt er minstens deels door veroorzaakt. Merk wel op dat jaarlijks gemiddeld $135 \times 10^3 \text{ m}^3$ gestort wordt in baggerzone Blankenberge [6], wat veel meer is dan kan waargenomen worden uit de sedimentatietrend (5-10 cm/jaar, wat voor deze zone overeenkomt met een jaarlijkse toename van slechts $\sim 15 \times 10^3 \text{ m}^3$). Hieruit kan men besluiten dat een groot deel van de baggerspecie na storting wegspoelt.

Onder deze met de stortzone geassocieerde sedimentatiezone bevindt zich een erosiezone, die de voortzetting van de meer westwaarts gelegen en door de havengeul onderbroken erosiezone lijkt. Mogelijk gaat het hier om de verderzetting van de erosiestrook langsheen de vooroevervoet, die lokaal onderbroken wordt door de havengeul van Blankenberge en die doodloopt op de sedimentatiezone in de luwte van de westelijke strekdam.

Wat betreft het strand valt vooral de strook met significante en sterke sedimentatietrend op (typisch 25-30 cm/jaar) in de secties 195-210, die ook hier gelinkt kan worden aan de aanwezigheid van rijshouthagen. In de secties 196-201 is in de periode 1998-1999 een duinvoetsuppletie uitgevoerd (dus op een locatie iets meer landwaarts gelegen dan de sedimentatiestrook), nadien zijn hier geen werken meer uitgevoerd.

In de secties 201-210 vindt ook sedimentatie plaats van het (naar Zeebrugge toe steeds breder wordende) droog en nat strand. De trend eindigt abrupt vanaf sectie 211, de verklaring van deze onderbreking dient gezocht te worden in de grootschalige afgravingen in de secties 211-214 ($450 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 1999 en $250 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2006).

Tot slot vestigen we nog de aandacht op de invloed van de pier van Blankenberge op het lokale sedimentatiepatroon, waarbij aan weerszijden van de pier sedimentatie op het droog strand optreedt.



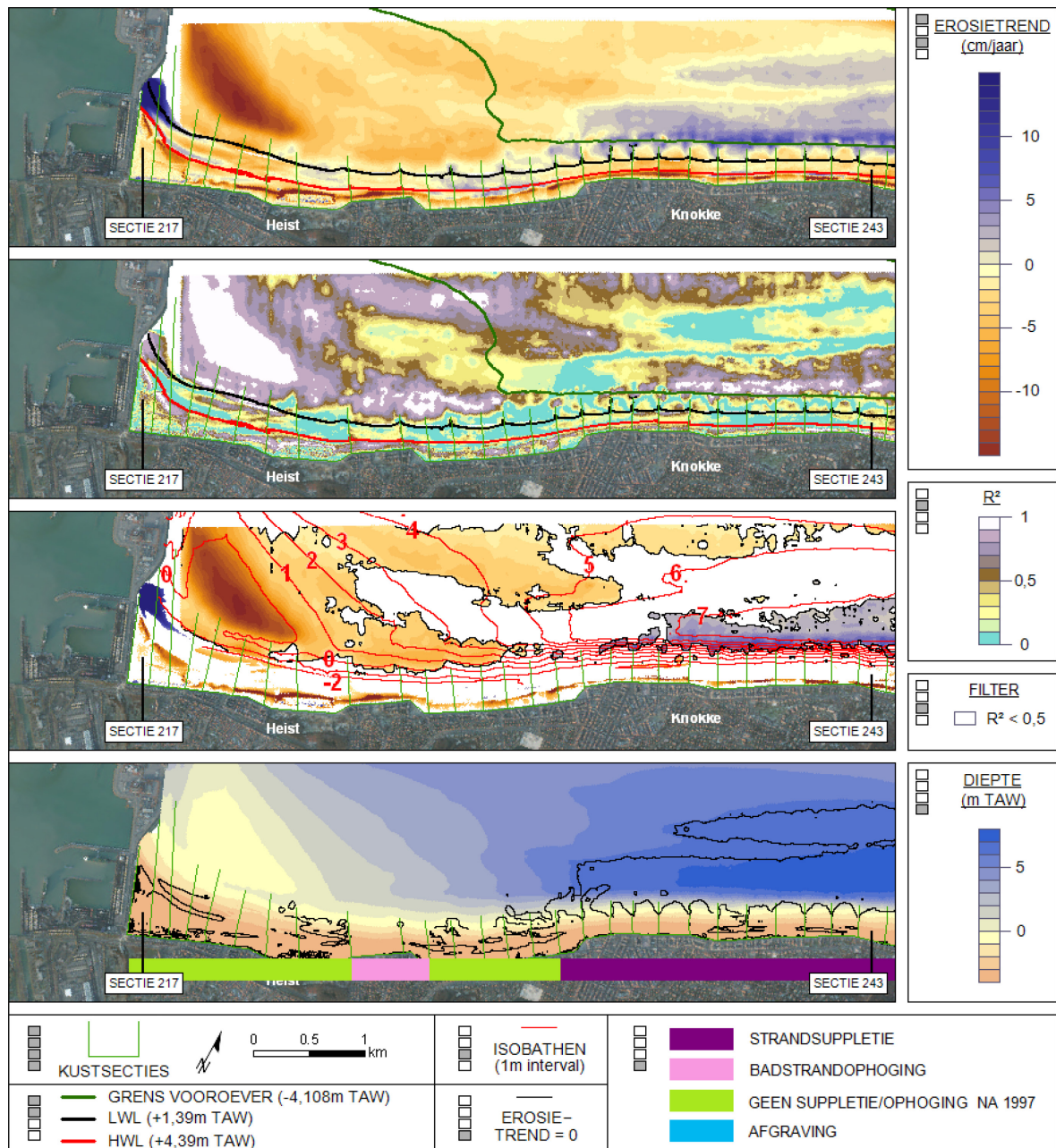
Figuur 14 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 179-216.

5.4.10 Secties 217-243

De erosietrend van strand en vooroever voor de secties 217-243 vindt men terug in Figuur 15. De morfologische evolutie van dit gebied is ook reeds eerder uitvoerig aan bod gekomen in [4] en [7].

Na de uitbouw van de buitenhaven van Zeebrugge heeft zich in de luwte van de oostelijke strekdam in de loop der jaren een bank ontwikkeld. Ook in de periode 1997-2010 is de bank blijven aangroeien, met sedimentatiesnelheden tot 15 cm/jaar op de kruin van de bank. De hoge R^2 -waarden –op een groot deel van de bank meer dan 90%, zie paneel 2– tonen aan dat de aangroeisnelheid in de laatste 10-15 jaar zo goed als constant gebleven is (constant in de tijd, maar wel verschillend van locatie tot locatie), en er kan dan ook verwacht worden dat de bank de komende jaren aan dezelfde snelheid zal blijven groeien. Merk op dat de strekdammen aangelegd zijn in de periode 1980-1986, en bijgevolg 20 tot 30 jaar later nog steeds het sedimentatiepatroon bepalen en een evenwichtsmorfologie nog steeds niet bereikt is. De sedimentatietrend tegen de oostelijke strekdam slaat halverwege het Albertstrand, in de omgeving van sectie 230, om in een erosietrend, die geassocieerd kan worden met de aanwezigheid van de Appelzak, een ebeul van de Westerschelde. Merk op dat het eerder vermelde en steeds weerkerende fenomeen waarbij de vooroevervoet aan erosie onderhevig is hier niet relevant is omdat een feitelijke overgang tussen vooroever en zeebodem ontbreekt omwille van de aanwezigheid van andere morfologische structuren: in de luwte van de oostelijke strekdam is dit de aanwezigheid van de bank, meer oostelijk is dit de aanwezigheid van de zeer dicht bij de kust gelegen Appelzak, die resulteert in een zeer steile vooroever.

Voor het droog strand treedt sedimentatie op in een strook nabij de dijk. Waar begroeiing aanwezig is (secties 223-224, 241, 243 en verder), resulteert dit in verhoogde sedimentatiesnelheden. Voor andere locaties zijn de plaatselijk sterke sedimentatietrends evenwel raadselachtiger. Zo kan de sedimentatie in secties 225-226 nog toegewezen worden aan de jaarlijkse ophogingen, maar in secties 227-231 komen plaatselijk hoge sedimentatiesnelheden voor op locaties waar geen afwijkende morfologie aanwezig is en ook geen ophogingen uitgevoerd zijn. Vanaf sectie 231 kan de sedimentatie dan weer wel gelinkt worden aan de verscheidene uitgevoerde suppleties (in 1997, 1999, 2006, 2007 en 2009, waarbij in totaal ruwweg $500 \times 10^3 \text{ m}^3$ zand aangevoerd is), hoewel de waargenomen ruimtelijke verdeling van de sedimentatiezones enigszins enigmatisch blijft.



Figuur 15 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 217-243.

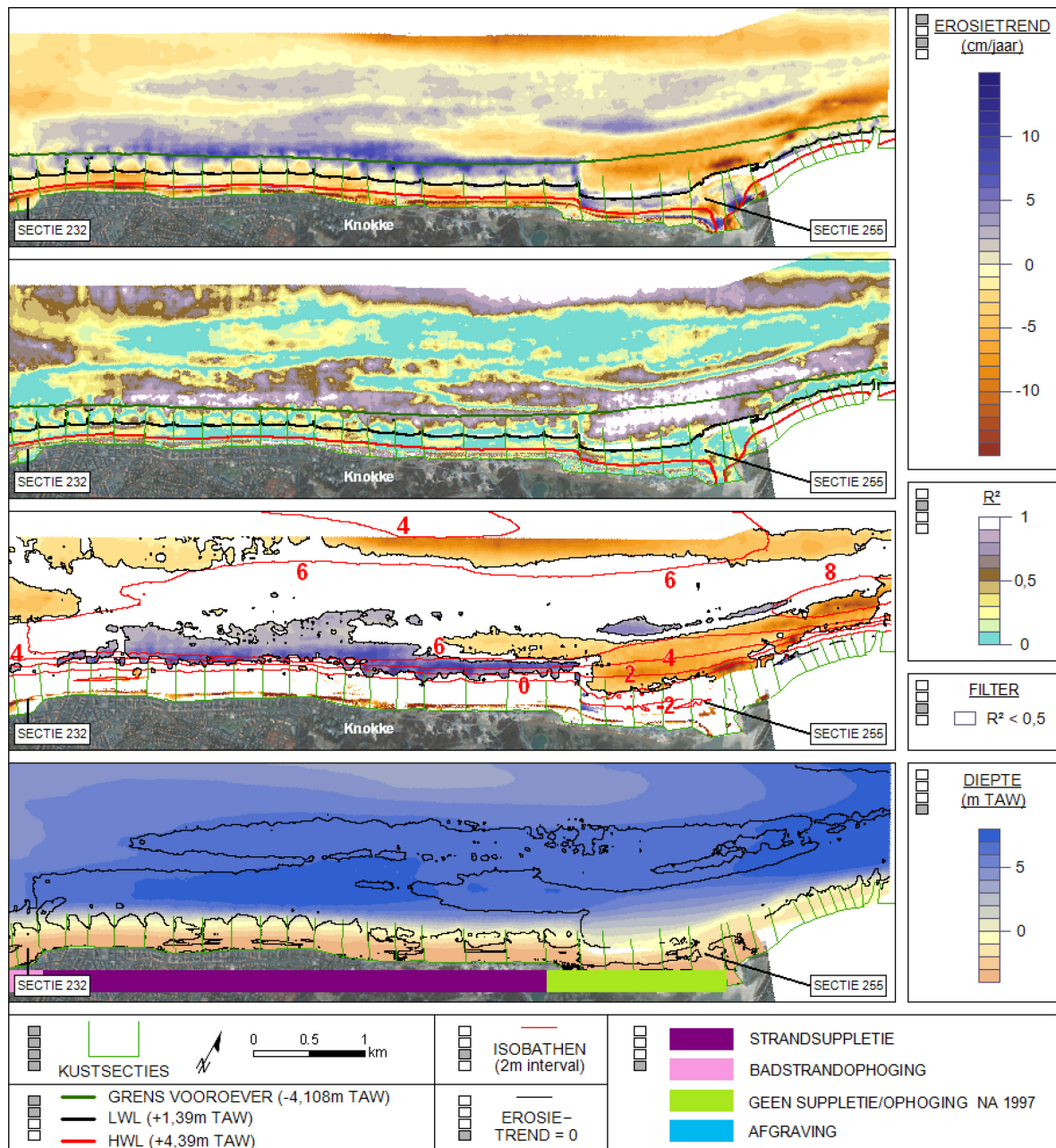
5.4.11 Secties 232-255 en verder

In Figuur 16 wordt de erosietrend getoond van strand en vooroever voor secties 232 t.e.m. 255 (België) en nog enkele meer oostwaarts gelegen secties (Nederland).

Er is een grote overlap tussen Figuur 15 en Figuur 16, en de hier getoonde erosietrend is dan ook een voortzetting van de in de vorige paragraaf besproken trends: erosie van de Appelzak ebgeul en sedimentatie van delen van het droog strand, die ditmaal minder raadselachtig is aangezien vanaf sectie 241 overal langs het strand begroeiing aanwezig is en de hoge sedimentatiesnelheden ruimtelijk perfect samenvallen met de begroeiing.

Wat nog wel opvalt is de significante sedimentatietrend voor de kust in het grensgebied tussen België en Nederland, en die de aan de Appelzak geassocieerde erosiezone wat noordwaarts lijkt te duwen. De bron van deze plaatselijke ophogingstrend is waarschijnlijk te zoeken in de aanwezigheid van de strandgeul van het Zwin, die op de Nederlands-Belgische grens uitmondt in de Noordzee. Mogelijk voert deze geul sediment vanuit het land naar zee.

Tot slot kan in paneel 3 van Figuur 16 nog net de rand waargenomen worden van wat een ruimer gebied met sedimentatietrend lijkt. Morfologisch valt dit gebied samen met de Paardenmarkt, een voor de kust van Knokke gelegen bank. Bij de bespreking van de erosietrend van de kustnabije zone (zie verder) zal inderdaad blijken dat deze bank aan sedimentatie onderhevig is en verder aangroeit.



Figuur 16 – Erosietrend voor strand en vooroever: secties 232-255 en verder.

5.4.12 Besluit

Bij het overlopen van de erosie- en sedimentatiepatronen van strand en vooroever langs de Belgische kust zijn er enkele opvallende en steeds terugkerende trends, die hieronder worden opgelijst.

Vooroever

- Langs de kust treedt een significante erosietrend op aan de overgang tussen vooroever en zeebodem (=aan de vooroevervoet).
- Grootschalige structuren hebben tot vele jaren na hun aanleg een invloed op de sedimentatiepatronen (strandhoofden Koksijde, strekdammen Zeebrugge).
- Een bandenstructuur van afwisselend erosieve en sedimenterende stroken (met al dan niet significante trend) wijst op de aanwezigheid van brekerbanken en weerspiegelt het dynamische karakter ervan.

Strand

- Significante trends worden bijna uitsluitend op het droog strand waargenomen, op het nat strand treden zo goed als geen significante trends op.
- De meest voorkomende significante trend is een sedimentatietrend hoog in het strandprofiel. Waar een dijk aanwezig is, is dit in een strook van enkele tientallen meter breed tegen de dijk aan, waar duinen aanwezig zijn is dit aan de duinvoet en eventueel op de eerste duinenrij.
- Zeer sterke sedimentatietrends treden op op locaties waar rijshouthagen zijn aangelegd of waar begroeiing aanwezig is.
- Strandophogingen en/of suppleties beïnvloeden de erosie- en sedimentatiepatronen.
- Opvallend is dat de waargenomen trends op het strand bijna uitsluitend sedimentatietrends zijn, erosietrends treden zo goed als niet op. In deze context is het nuttig op te merken dat in de bestudeerde periode (1997-2010) geen zware stormen voorgekomen zijn. Een mogelijke hypothese is dat in kalme periodes het (droog) strand dus op natuurlijke wijze zou ophogen, terwijl tijdens stormgebeurtenissen het strand zand zou verliezen. Met dit mechanisme zou de afwezigheid van zware stormen in de geanalyseerde periode een netto sedimenttoename op het strand kunnen verklaren.

5.5 Morfologische trendanalyse van de kustnabije zone: resultaten en bespreking

Voor de kustnabije zone is een morfologische trendanalyse uitgevoerd voor drie deelgebieden: Zuydcoote-Westende, Westende-De Haan en Wielingen-Scheur. De methodologie is identiek hetzelfde als deze gebruikt voor strand en vooroever. De resulterende ArcMap rasters (met voor elke rastercel de erosietrend en de R^2 -waarde) kunnen teruggevonden worden op bijgevoegde DVD (DVD 1, in de folder "ArcMap rasters morfologische trendanalyse"). De hierna getoonde figuren bevatten telkens 4 panelen, met respectievelijk de erosietrend voor elke cel (paneel linksboven), de R^2 -waarde voor elke cel (paneel rechtsboven), de erosietrend enkel voor cellen met $R^2 > 0,5$ (paneel linksonder), en de bathymetrie (paneel rechtsonder, dieptes t.o.v. GLLWS!). Tevens is de ligging van enkele banken aangeduid op de kaartjes.

Het is belangrijk op te merken dat de resultaten van de morfologische trendanalyse minder betrouwbaar zijn dan deze van strand en vooroever. De reden hiervan is enerzijds dat voor elk van de drie deelgebieden slechts een beperkte tijdreeks beschikbaar was (voor elke zone slechts 5 bathymetrieën). Bovendien is elk bathymetrisch raster opgesteld uit lodingen uitgevoerd op verschillende datums, en was het niet mogelijk te achterhalen welke deelzone op welke datum bemeten is geweest. In plaats daarvan is voor de morfologische trendanalyse voor elke bathymetrie een gemiddelde opnamedatum gebruikt, afgeleid uit begin- en einddatum van de meetperiode van die bathymetrie (die wel gekend waren). Merk wel dat de meetperiode in sommige gevallen tot wel een jaar kan duren, wat maakt dat op deze manier een groot stuk onzekerheid op de eindresultaten wordt geïntroduceerd.

Voor de kustnabije zone tussen De Haan en Blankenberge waren niet voldoende data voorhanden om een trendanalyse uit te voeren.

5.5.1 Zuydcoote-Westende

Figuur 17 geeft de resultaten van de morfologische trendanalyse voor de kustnabije zone "Zuydcoote-Westende" (voor continuïteit zijn ook de morfologische trends van strand en vooroever afgebeeld op deze figuur).

Er zijn slechts weinig zones waar te nemen waar een eenduidige en significante trend optreedt. Een van de meest opvallende gebieden met significante trends is de omgeving van het Potje (de nabij de kust en tegen de Franse grens gelegen geul die zich westwaarts splitst in een noordelijke en zuidelijke arm, zie het paneel met de bathymetrie in Figuur 17), en de Broersbank (de bank gelegen net onder de noordelijke arm van het Potje). Nauwkeurig vergelijken van de trendkaart met de bathymetrie geeft het volgende aan:

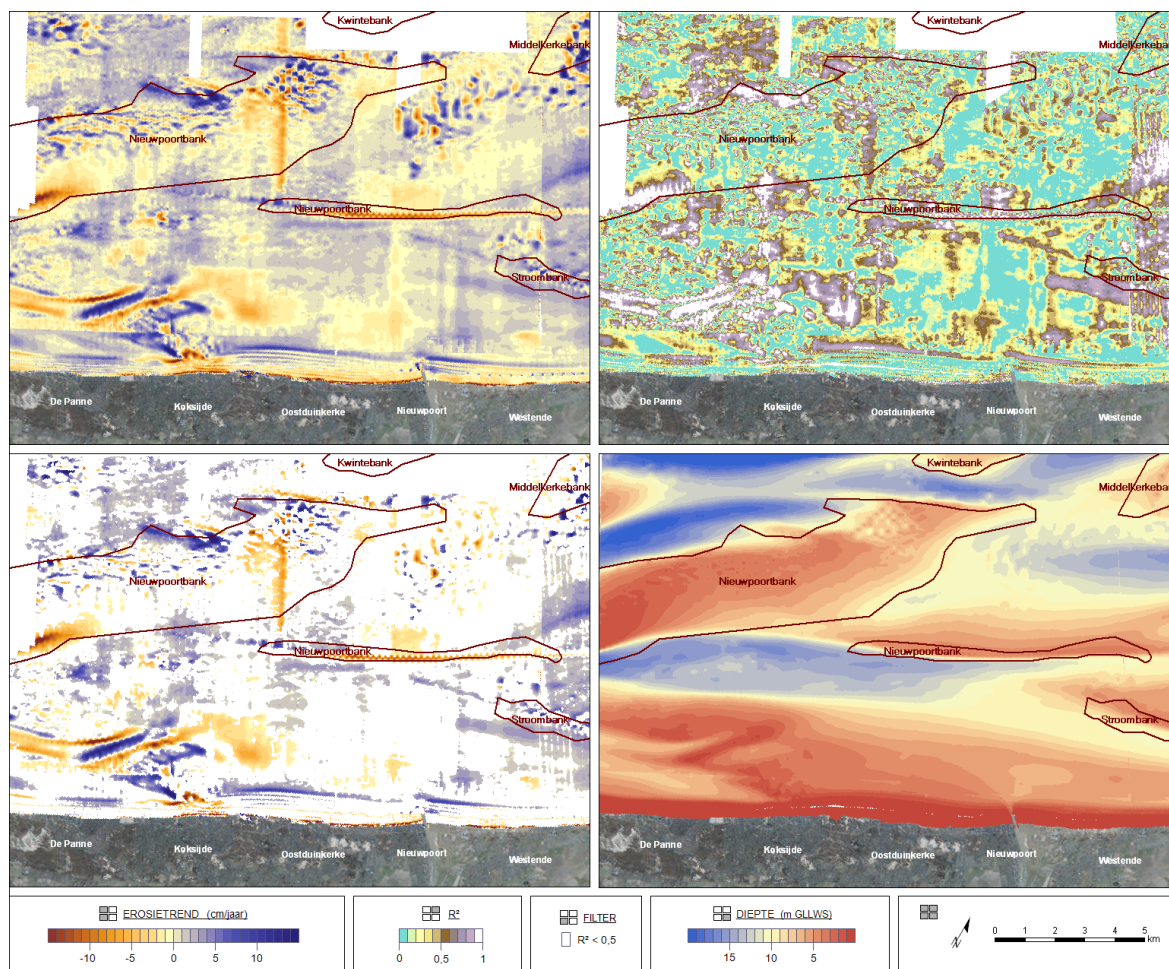
- De oostelijke punt van de noordelijke arm van het Potje sedimenteert aan zeevaartse zijde en erodeert aan kustzijde, wat er op zou kunnen wijzen dat deze arm zich in de richting van de kust verplaatst.
- De Broersbank lijkt aan zeezijde aan erosie onderhevig en aan kustzijde aan sedimentatie, wat eveneens op een kustvaartse verplaatsing wijst.
- Meer westwaarts (tegen de Franse grens aan) lijkt de hele noordelijke arm te sedimenteren.
- De diepte ten oosten van de Broersbank lijkt verder te eroderen.
- De zuidelijke arm van het Potje is reeds eerder besproken (paragraaf 5.4.2).

Verder valt op dat de kruin van de Nieuwpoortbank verder lijkt aan te groeien. Merk op dat de Nieuwpoortbank aan kustzijde een steile flank heeft en aan zeezijde een veel minder steile flank, zodat de kruin zich aan de zuidkant van de in de figuren getoonde afbakening bevindt. Deze sedimentatietrend lijkt te bevestigen wat werd waargenomen bij de studie van de evolutie van het BCP op lange termijn (zie [3]), nl. dat de toppen van de kustnabije banken lijken aan te groeien en de geulen tussen de banken te verdiepen.

Verder kunnen aan de noordzijde van de Ratelbank, de zuidelijke tip van de Middelkerkebank en in het gebied daartussen lokale ruggen en geulen (met typisch een hoogteverschil tot enkele meter) waargenomen worden, die –zo mag blijken uit de trendkaart– een vrij dynamisch karakter hebben en zich voortdurend verplaatsen.

Aan de zuidkant van de Ratelbank, net tegen de Franse grens, bevindt zich nog een beperkte zone met weliswaar een significante en zeer sterke sedimentatietrend, die vooralsnog niet te verklaren valt.

De sedimentatiestrook vertikaal in het midden van de bovenste helft van het getoonde gebied doet dan weer zeer vreemd aan en is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van een anomalie in een van de bathymetrieën (een foutief verwerkte raai?).



Figuur 17 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Zuydcoote-Westende”.

5.5.2 Westende-De Haan

Figuur 18 geeft de resultaten van de morfologische trendanalyse voor de kustnabije zone “Westende-De Haan”.

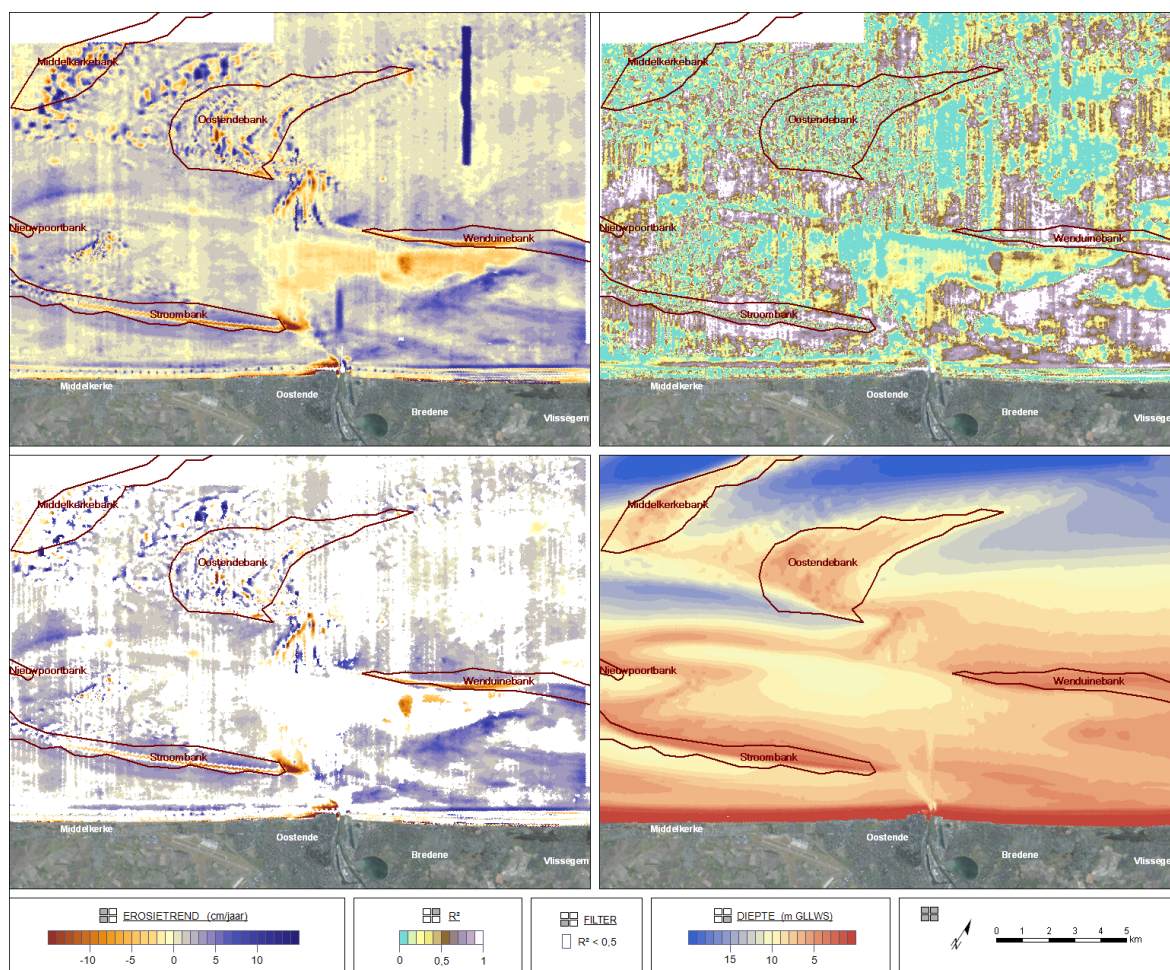
Kijken we enkel naar de significante trends (paneel linksonder), dan valt op dat vooral erosie optreedt. Sedimentatie treedt zo goed als uitsluitend op op de kruin van de Stroombank en van de Wenduinebank, wat de zonet vernoemde waargenomen evolutie op lange termijn opnieuw lijkt te ondersteunen. Mogelijk kan deze sedimentatietrend ook geassocieerd worden met een kustwaartse verplaatsing van (de kruin van) deze banken.

Erosie treedt op aan de zeewaartse en kustwaartse kant van de Stroombank (respectievelijk in de geulen Grote Rede en Kleine Rede) en in de diepere zones tussen Wenduinebank en kust. De kleine sedimentatiezone onder de westelijke tip van de Wenduinebank valt samen met de locatie van de stortplaats Br&W Oostende. Merk op dat op de erosiekaart (paneel linksboven) de wijde omgeving van deze stortplaats aan sedimentatie onderhevig lijkt, deze trend heeft echter een zeer beperkte significantie. Hoewel het zeer verleidelijk is op basis van deze sedimentatiezone uitspraken te doen over de invloedzone van de stortplaats, is gezien de lage significantie toch enige voorzichtigheid geboden.

Op de Middelerkebank en Oostendebank (en ook in de zone ertussen) is opnieuw een structuur van ruggen en geulen met een dynamisch karakter waar te nemen.

Merk ook op dat de nieuwe vaargeul naar de haven van Oostende (loodrecht op de kustlijn ter hoogte van Oostende) reeds waar te nemen is in zowel de recente bathymetrie (paneel rechtsonder) als op de erosiekaart (linksboven). Deze “erosie” vormt echter geen significante trend, wat niet te verwonderlijk is gezien het relatief recente karakter van deze vaargeul.

De verticale erosiestroom in de rechterbovenhoek van de erosiekaart (paneel linksboven) is ook hier te wijten aan een anomalie in een van de bathymetrieën.



Figuur 18 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Westende-De Haan”.

5.5.3 Westende-De Haan

In Figuur 19 worden de resultaten van de morfologische trendanalyse voor de kustnabije zone “Wielingen-Scheur”.

De menselijke invloed in deze zone is groot: baggerwerken in de vaargeulen Scheur en Pas van ’t Zand, storten van baggerspecie in de stortzones S2 en Br&W ZBO, en de uitbouw van de buitenhaven van Zeebrugge dmv twee strekdammen met een lengte van elk 4,5 km.

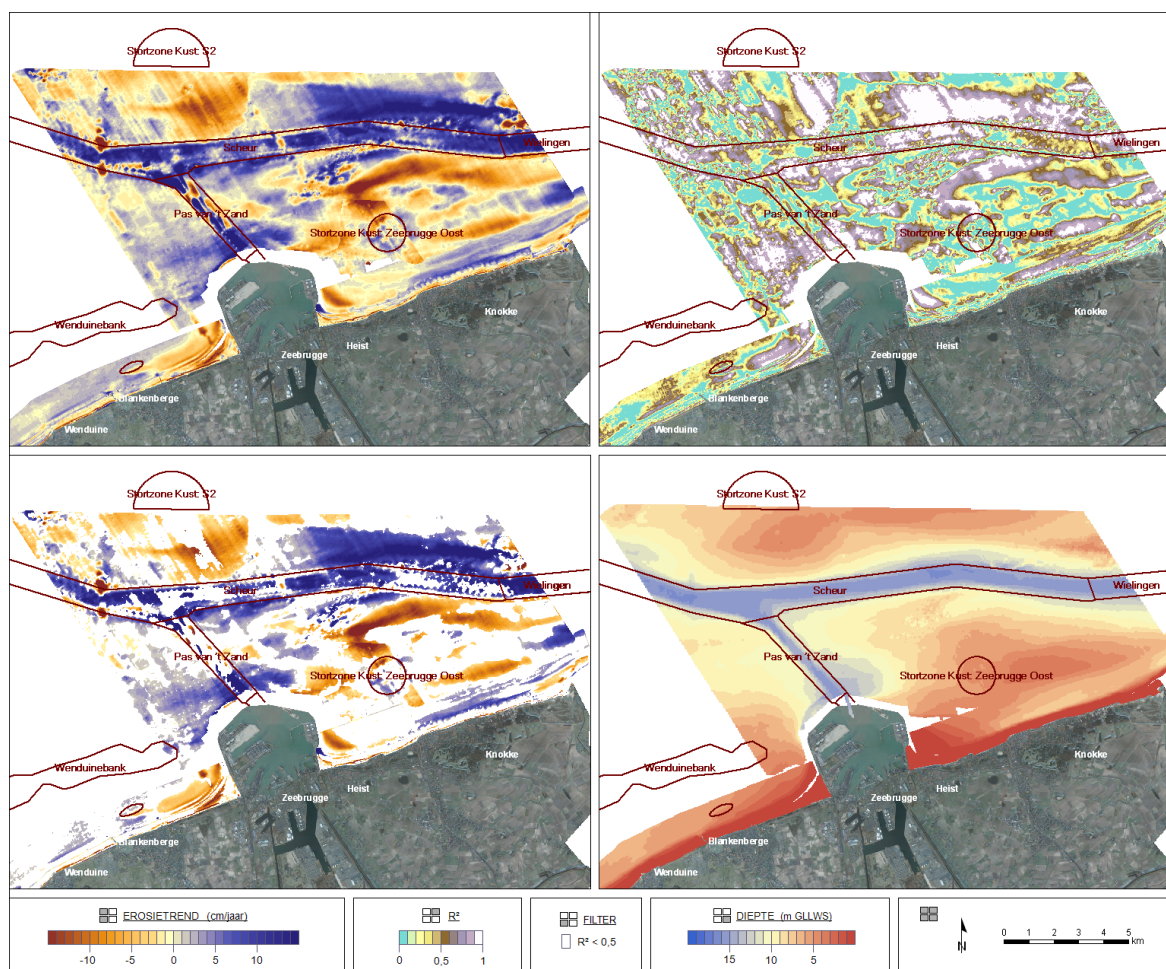
Significante erosie treedt op voor de haveningang, wat het gevolg is van de verhoogde stroomsnelheden t.g.v. contractie van de stroomlijnen onder invloed van de strekdammen. Ook over het grootste deel van de vaargeulen treedt een verdiepingstrend op, als gevolg van de uitgevoerde baggerwerken.

Opvallend is dat zich een zone van significante en sterke erosie bevindt ten noorden van het oostelijk deel van het Scheur. Mogelijk speelt het continu uitbaggeren van het Scheur hierbij een rol (een mechanisme waarbij de taluds van de vaargeulen streven naar een minder steile evenwichtshelling, waardoor de omgeving van de vaargeul als het ware “naar beneden getrokken” wordt), de erosiezone strekt zich echter wel ver naar het noorden uit, zodat mogelijk nog andere en vooral nog onbekende invloeden spelen.

Merk op dat deze erosietrend niet waar te nemen is ten noorden van het westelijk deel van het Scheur. Hier wordt een gelijkaardige evolutie mogelijk tegengehouden door de aanwezigheid van de stortplaats S2 en is integendeel een sedimentatietrend waar te nemen. Het valt echter opnieuw niet uit te sluiten dat andere mechanismen bijdragen aan deze sedimentatiezone, gezien de omvang van de sedimentatietrend en het relatief beperkte gebruik van stortzone S2.

Tot slot dient de aandacht nog gevestigd te worden op de merkwaardige zone met zeer sterke sedimentatietrend ten zuiden van het oostelijk deel van het Scheur. Deze trend is merkwaardig omdat in de bathymetrie op deze locatie geen opvallende morfologische structuren aanwezig zijn (zoals een geul of bank) en omdat de trend niet onmiddellijk gelinkt kan worden aan een menselijke activiteit. De oorzaak van deze sedimentatiezone is bijgevolg vooral nog onbekend. Er kan eventueel wel opgemerkt worden dat de intensief gebruikte stortzone Br&W ZBO nabij gelegen is, doch op de locatie van de stortzone zelf is zo goed als geen significante trend waar te nemen (wat de lage dumpefficiëntie van deze stortzone bevestigt).

Merk wel op dat in de gehele kustnabije zone “Wielingen-Scheur” de Westerschelde als invloedsfactor kan spelen. Hoe, op welke schaal en met welke reikwijdte de invloed van de Westerschelde speelt is echter niet geweten.



Figuur 19 – Erosietrend voor de kustnabije zone “Wielingen-Scheur”.

6 Volumetrische trendanalyse

6.1 Inleiding

De in dit hoofdstuk gepresenteerde volumetrische trendanalyses vormen een aanvulling op de morfologische trendanalyse uit hoofdstuk 5. Deze laatste biedt het voordeel van de ruimtelijke verdeling van de erosie/sedimentatie patronen te visualiseren, daartegenover staat wel dat per kaartje slechts één parameter (via kleuren) weergegeven kan worden. In dit rapport is ervoor gekozen volgende twee parameters (in elk een apart kaartje) te visualiseren:

- de richtingscoëfficiënt van de lineaire regressielijn berekend uit de tijdreeks van dieptewaarde, deze parameter kan in zekere zin geïnterpreteerd worden als een “gemiddelde” erosiesnelheid,
- de determinatiecoëfficiënt R^2 van de lineaire regressielijn.

Uiteraard kan er voor de visualisatie van andere parameters gekozen worden (bijvoorbeeld de standaardfout). Het nadeel van de morfologische trendanalyse is dat de R^2 -waarde slechts tot op zekere hoogte aangeeft in welke mate de dieptewaarden in een rastercel het a priori lineair veronderstelde verloop benaderen. Inderdaad betekent een relatief hoge R^2 niet noodzakelijk dat de dieptewaarden consistent de berekende lineaire trend volgen: het werkelijke verloop kan bijvoorbeeld volgens een gekromde curve verlopen, of de berekende trend kan vertekend zijn door de aanwezigheid van een uitbijter. Het is dan ook aan te raden het werkelijke tijdsverloop van de dieptegegevens grafisch te inspecteren, wat voor elke rastercel apart uiteraard onbegonnen werk is. Daarom worden langsheen de Belgische kust enkele grootschalige gebieden afgebakend en de totale volumetrische trends in deze gebieden berekend (als richtingscoëfficiënt van de enkelvoudige lineaire regressie met kleinste-kwadratenmethode toegepast op een tijdreeks van volumes sediment binnen een afgebakend gebied) en grafisch voorgesteld.

De ruwe basis voor de afbakening is dat binnen deze gebieden een eenduidige trend optreedt (bijvoorbeeld enkel erosie). Verder zijn de gebieden niet volgens strikte criteria afgebakend: zo werd bij de afbakening soms ook rekening gehouden met de significantie (de R^2 -waarde). Niet zelden en uiteraard ook niet toevallig vallen de gebieden vaak samen met een bestaande morfologische eenheid (bijvoorbeeld een geul) of een “invloedssfeer” van een structuur (bijvoorbeeld van een strekdam). Merk in dit opzicht ook op dat bepaalde gebieden beperkt zijn door het bereik van de lodingen (aan de zeewaartse kant of aan de landsgrenzen), hoewel het gebied in kwestie op basis van het criterium volgens hetwelk het is afgebakend nog verder zou doorlopen. Om die reden wordt ook steeds de oppervlakte gegeven van het gebied waarover de volumetrische trend is berekend.

Bedoeling van deze volumetrische trendanalyse is enerzijds nagaan of binnen de trendgebieden – afgebakend op basis van de morfologische trendanalyse en waarbij a priori een lineair tijdsverloop van de dieptewaarden werd verondersteld – de evolutie werkelijk lineair verloopt, en anderzijds om een idee te krijgen van de grootteorde van de netto hoeveelheid sedimentwinst of -verlies binnen deze grootschalige gebieden.

Merk op dat bij het grafisch uitzetten van een reeks van volumes binnen een bepaald gebied het gedrag in functie van de tijd volledig wordt weergegeven (in tegenstelling tot de morfologische trendanalyse, waarbij het tijdsgedrag samengevat wordt in één enkele parameter, nl. de “gemiddelde” erosiesnelheid), maar dat wel informatie omtrent de ruimtelijke verdeling in het XY-vlak verloren gaat door het sommeren/uitmiddelen (het kubereren) van de dieptewaarden over het volledige gebied in kwestie (bij de morfologische trendanalyse is deze ruimtelijke informatie wel maximaal behouden). In zekere zin dient er dus een trade-off tussen ruimtelijke resolutie (maximaal bij de morfologische trendanalyse) en tijdsresolutie (maximaal bij de volumetrische analyse). Overigens zijn deze randbemerkingen algemeen geldig: in principe zijn er (wanneer men bijvoorbeeld de evolutie van de zeebodem wil beschrijven) immers vier dimensies in rekening te brengen: de plaatsbepaling (X- en Y-coördinaat), de hoogte of diepte (Z-coördinaat) en de tijd (T-coördinaat). Op kaarten en grafieken heeft men echter hoogstens drie dimensies ter beschikking: de twee dimensies van het papier en een derde die gevisualiseerd kan worden bijvoorbeeld door de weergave van isolijnen of via kleurschakeringen. Hieruit volgt dat bij zulke visualisaties onvermijdelijk informatie verloren gaat, het is dan ook aan de onderzoeker om te kiezen welke dimensies weggelaten of uitgemiddeld worden en welke dimensies of parameters gevisualiseerd worden. Men kan er inderdaad voor kiezen om in plaats van een dimensie een parameter te visualiseren, waarvan men meent dat deze de

uitgemiddelde dimensie goed samenvat: zo kan men bijvoorbeeld voor een stuk kustlengte werken met een uitgemiddeld profiel (de Z-coördinaat is dan uitgemiddeld over de Y-coördinaat), of men kan –zoals in de morfologische trendanalyse– de “gemiddelde” erosiesnelheid weergeven ((verandering van de) Z-coördinaat uitgemiddeld over de tijd) of zelfs de R^2 -waarde (die informatie bevat over de verandering van Z in functie van T, nl. in hoeverre deze verandering lineair is).

De indeling van dit hoofdstuk is als volgt: in paragraaf 6.2 worden eerst nog enkele bemerkningen geformuleerd i.v.m. het uitvoeren van kuberingen in ArcMap, paragraaf 6.3 geeft een overzicht van de afgebakening van de verschillende zones, waarna in 0 de volumetrische evolutie voor elke zone apart wordt voorgesteld en kort besproken. Tot slot geeft paragraaf 6.5 de totale volumetrische trends langsheen de Belgische kust voor nat strand en vooroever. De geïnteresseerde lezer verwijzen we ook nog naar de appendix aan het einde van dit rapport, waarin wat dieper wordt ingegaan op het (mathematische) verband tussen de morfologische en de volumetrische trendanalyse.

6.2 Cave@: kuberingen in ArcMap

Om de tijdreeks van volumes voor een bepaald gebied te bekomen dient men als eerste stap de topobathymetrische rasters te beperken tot het geselecteerde gebied. Dit kan in ArcMap uitgevoerd worden door het geselecteerde gebied af te bakenen met een polygoon, deze polygoon vervolgens te selecteren als “analysis mask” (met de Spatial Analyst toolbar: Spatial Analyst → Options → General) en een neutrale bewerking op de rasters uit te voeren in de raster calculator om tot het geselecteerde gebied beperkte topobathymetrische rasters te bekomen. In een tweede stap worden de kuberingen uitgevoerd, dit kan rechtstreeks door in de 3D Analyst toolbar de selectie “3D Analyst → Surface Analysis → Area and Volume” te maken, waarbij het referentieniveau ingesteld kan worden.

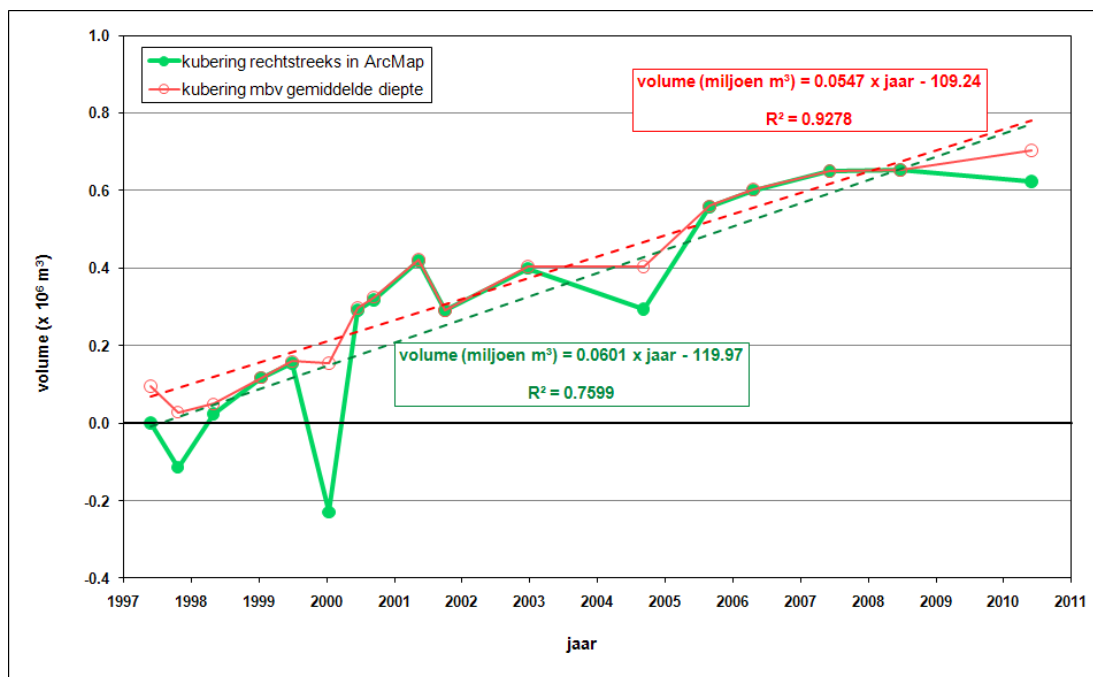
In deze studie zijn de kuberingen echter op een alternatieve wijze uitgevoerd. Immers, de uit de eerste stap van de werkwijze resulterende rasters bedekken in de praktijk niet alle exact het door de polygoon afgebakende gebied. Als gevolg hiervan hebben sommige rasters een licht afwijkende oppervlakte (tot 2%), wat uiteraard ook resulteert in een afwijkende kubering. Deze afwijking op sommige van de volumes is echter in bepaalde gevallen van dezelfde grootteorde als de volumeverandering tussen twee opeenvolgende datapunten, wat uiteraard een vertekend beeld geeft van de volumetrische trend. Het is onduidelijk waarom ArcMap in bepaalde gevallen rasters met afwijkende oppervlaktes aanmaakt, niettegenstaande de rasters van een bepaalde tijdreeks alle op uniforme wijze zijn aangemaakt.

Om deze afwijkingen te elimineren zijn de kuberingen uitgevoerd door voor elk afgebakend raster te kijken naar de gemiddelde diepte (terug te vinden door rechts te klikken op desbetreffende raster naam in het “Table of Contents” venster, en vervolgens “Properties → Source” te selecteren). Vermenigvuldigen van het tegengestelde van de gemiddelde diepte met de oppervlakte van het gebied resulteert dan in het volume sediment boven Om TAW binnen het geselecteerde gebied.

De grafiek in Figuur 20 toont de tijdreeks van volumes voor het gebied “droog strand en duinaanzet tussen Heist en het Zwin” (zie Figuur 22 voor de exacte begrenzing van dit gebied). De grafiek toont zowel de rechtstreeks in ArcMap gekubeerde volumes (lichtgroen) als de via de gemiddelde diepte berekende volumes (lichtrood). Van beide tijdreeksen is ook de best passende rechte weergegeven. De twee berekeningswijzen geven voor dit gebied grote en niet verwaarloosbare verschillen voor de kuberingen van voorjaar 1999 en zomer 2004. Merk op dat deze verschillen niet zozeer de grootte van de volumetrische trend beïnvloeden (accretietrend van $60 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ tegenover $55 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$) als wel de significantie van de trend (een R^2 -waarde van 0,76 tegenover 0,93).

In wat volgt zullen alle kuberingen uitgevoerd zijn door de vermenigvuldiging van de diepte met de oppervlakte, waarbij de in de tijdreeks van topo-bathymetrische rasters meest frequent voorkomende oppervlakte gebruikt wordt (of de gemiddelde oppervlakte, indien te veel verschillende oppervlakten voorkomen bij de rasters).

Merk tot slot op dat bij het kuberen m.b.v. de gemiddelde diepte ook afwijkingen in de tijdreeks van volumes kunnen optreden indien de topo-bathymetrische rasters niet alle dezelfde oppervlakte hebben, eenvoudigweg omdat de diepte dan niet exact over hetzelfde gebied wordt uitgemiddeld. Deze afwijkingen worden echter als verwaarloosbaar beschouwd.



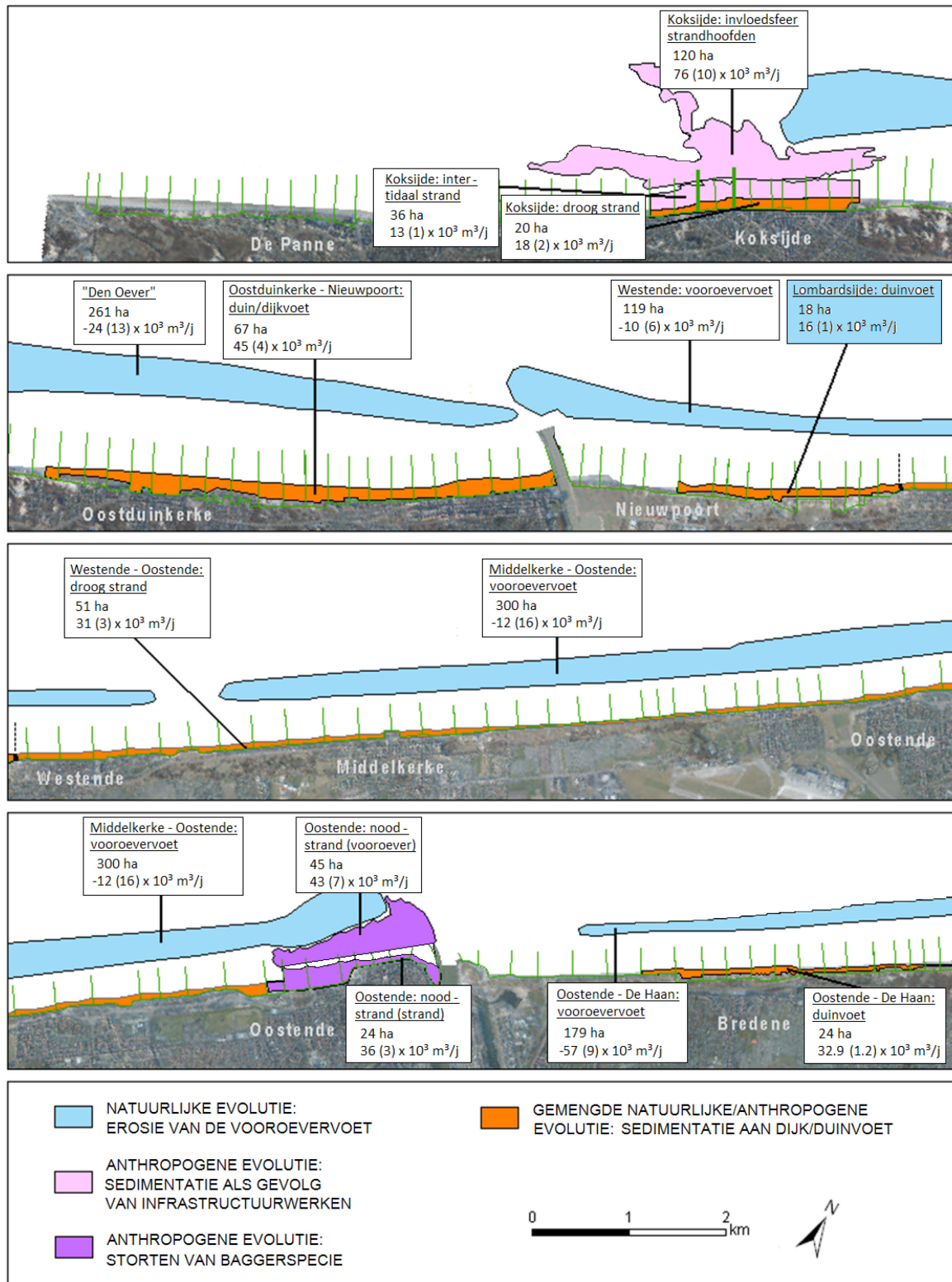
Figuur 20 – Tijdreeks van volumes voor het gebied “droog strand en duinaanzet tussen Heist en het Zwin”. De grafiek toont zowel de rechtstreeks in ArcMap gekubeerde volumes (lichtgroen) als de via de gemiddelde diepte berekende volumes (lichtrood).

6.3 Overzicht van de afgebakende zones

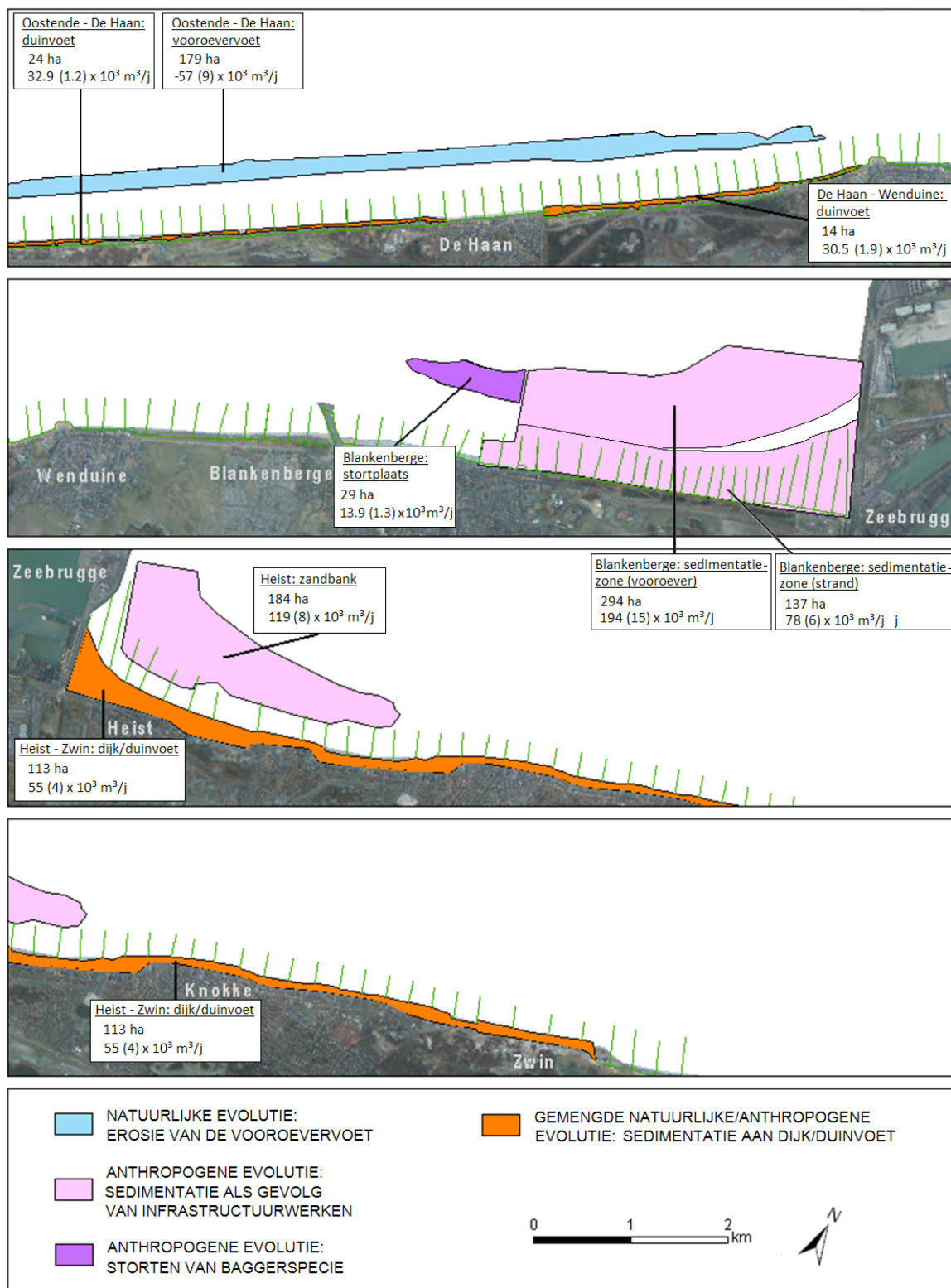
Figuur 21 en Figuur 22 geven een overzicht van de afgebakende zones. Van elke zone wordt naast de naam ook de oppervlakte (in hectare) en de volumetrische trend (in kubieke meter per jaar), met tussen haakjes de standaardfout op deze volumetrische trend. Deze standaardfout SF is berekend volgens de formule

$$SF(\text{vol. trend}) = \sqrt{\frac{1 - R^2}{n - 2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (\text{volume } i - \text{gemiddeld volume})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{datum } i - \text{gemiddelde datum})^2}} \quad (18)$$

waarbij n het aantal datapunten is. In de volgende paragrafen wordt de volumetrische evolutie van de verschillende zones kort onder de loep genomen.



Figuur 21 – Afbakening van de trendgebieden voor strand en vooroever langsheen de Belgische kust.



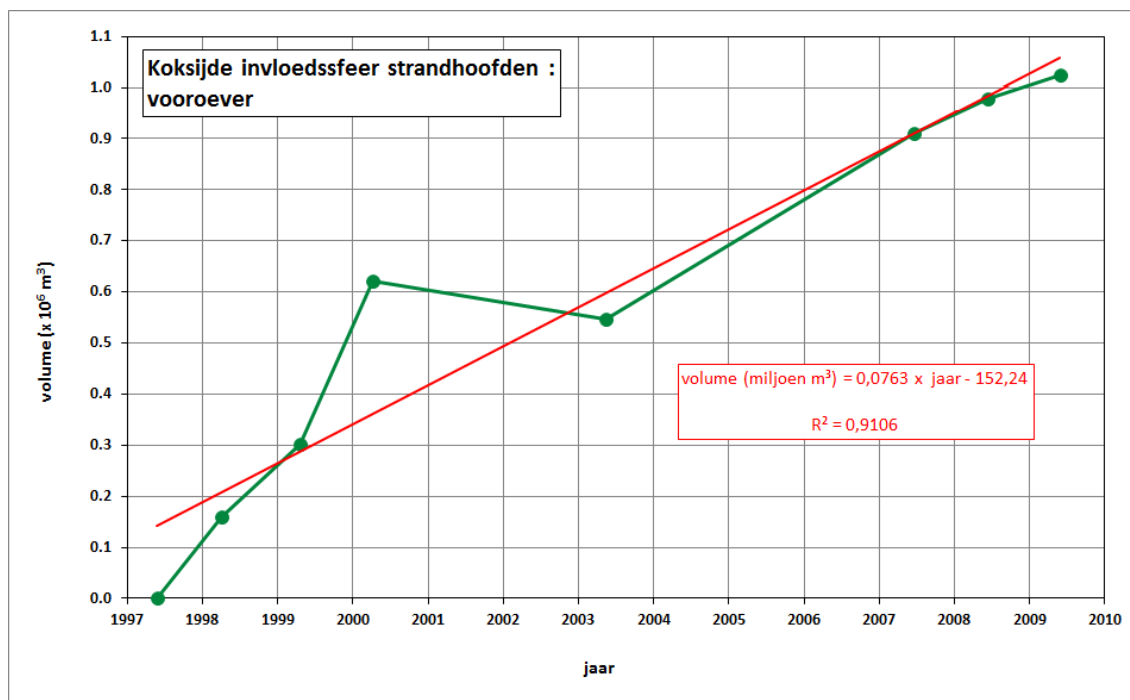
Figuur 22 – Afbakening van de trendgebieden voor strand en vooroever langsheen de Belgische kust (vervolg).

6.4 Volumetrische trendanalyse: resultaten en bespreking

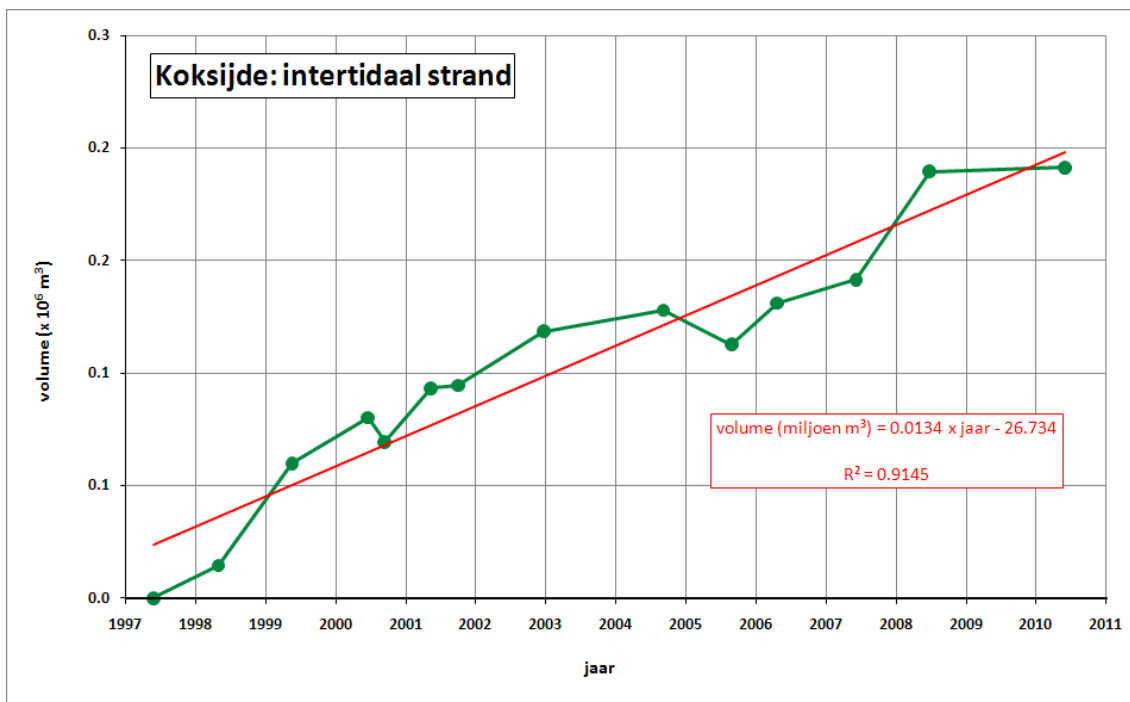
6.4.1 Invloedssfeer strandhoofden Koksijde: vooroever, intertidaal strand, droog strand

De significante en duidelijk lokaal verhoogde sedimentatietrend in de omgeving vormt de basis voor de afbakening van de zone “invloedssfeer strandhoofden Koksijde: vooroever”. De begrenzing van deze zone valt samen met de grens tussen erosie en sedimentatie, waarbij aan landwaartse zijde de zone beperkt is tot de laagwaterlijn. De volumetrische evolutie van deze zone van wordt weergegeven in Figuur 23. De sedimentatietrend bedraagt $76 (10) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en is significant ($R^2 = 0,91$). Afgezien van de hoge waarde voor het jaar 2000 kan worden gesteld dat deze zone een quasi lineaire sedimentatietrend ondergaat. De sedimentatietrend in deze zone wordt toegeschreven aan de twee 400m lange strandhoofden te Koksijdebad (zie derde paneel in Figuur 7 voor de exacte ligging van deze strandhoofden).

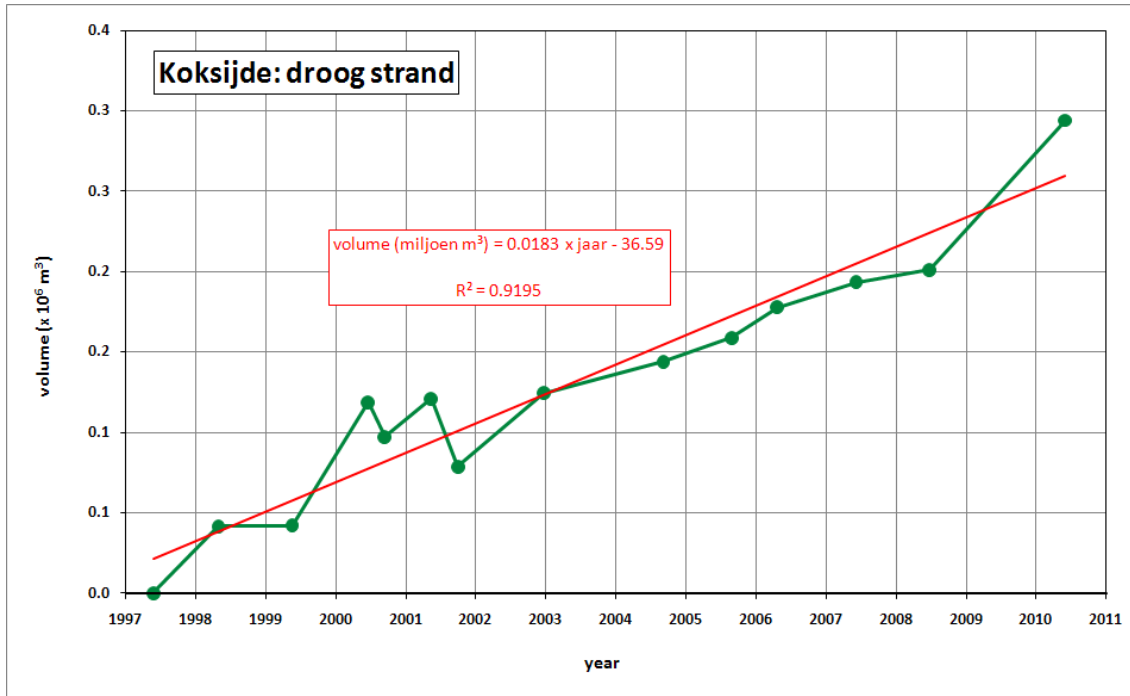
Omdat de waargenomen sedimentatietrend niet stopt bij de laagwaterlijn zijn ook zones afgebakend voor het intertidaal strand en voor het droog strand (tot aan de dijk). De volume-evoluties van beide zones kunnen teruggevonden worden in respectievelijk Figuur 24 en Figuur 25. De afgebakende zone op het intertidaal strand bedraagt 36 ha en kent een groei $13 (1) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, het droog strand doet nog beter met een groei van $18 (2) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ voor 20 ha. Voor beide zones is de evolutie benaderend lineair (R^2 groter dan 0,9), afgezien van de gebruikelijke natuurlijke fluctuaties. Voor het droog strand wordt de aangroei trend deels verklaard door de jaarlijkse ophogingen, die voor de afgebakende zone ruwweg $7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ bedragen [5]. Een belangrijk deel van de aangroei kent dus ook een natuurlijke oorsprong. Voor het intertidaal strand is de sedimentatietrend des te opmerkelijker, enerzijds omdat bijna nergens langsheen de Belgische kust een significante trend wordt aangetroffen in het intertidaal, anderzijds omdat het zand voor de jaarlijkse ophogingen van het droog strand veelal aan de intertidale zone werden onttrokken. Zeer waarschijnlijk wordt de volumetrische evolutie in de intertidale zone nog beïnvloed door de aanwezigheid van de strandhoofden. Merk tot slot ook op dat de volumetrend in de intertidale zone een R^2 heeft van 0,91, terwijl in Figuur 7 (paneel 2 en 3) in dit gebied bijna nergens een significante trend ($R^2 > 0,5$) wordt aangetroffen. Op het verband tussen de morfologische trendanalyse (hoofdstuk 5) en de volumetrische trend zal verderop nog teruggekomen worden.



Figuur 23 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde invloedssfeer strandhoofden: vooroever”.



Figuur 24 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde: intertidaal strand”.

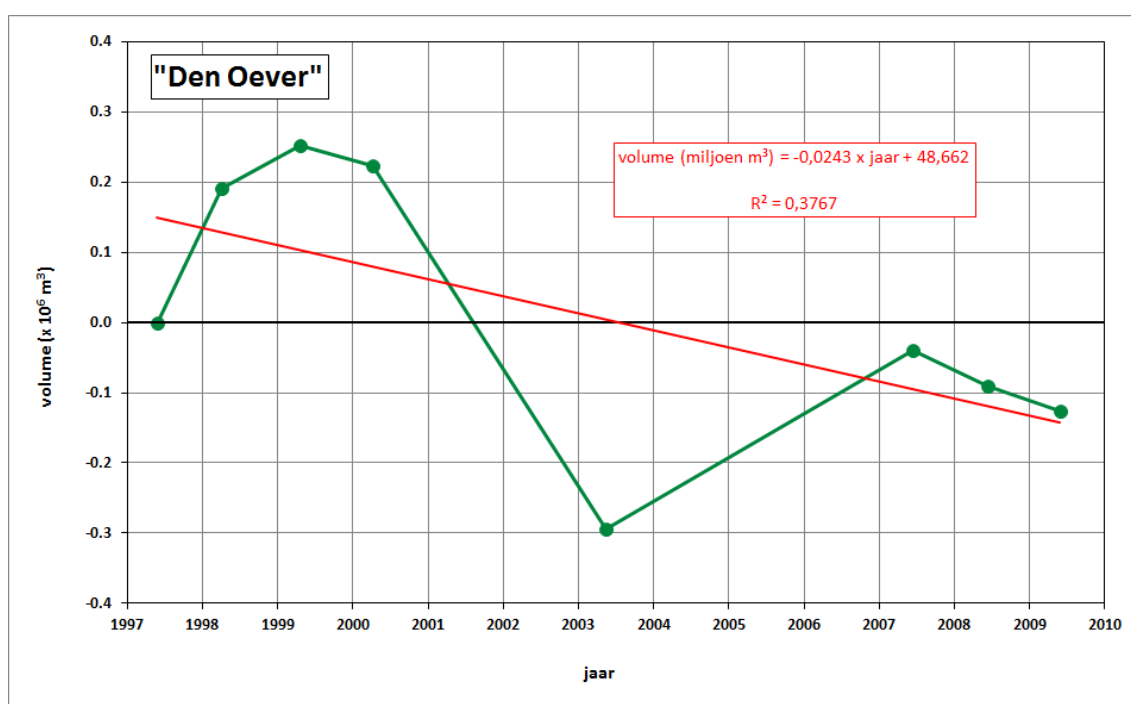


Figuur 25 – Volumetrische evolutie van de zone “Koksijde: droog strand”.

6.4.2 Den Oever

De vooroever voor de kust van Oostduinkerke wordt op kaarten vaak met de naam "Den Oever" aangeduid. Hier is het de naam gegeven aan de zone van Koksijde-bad tot Nieuwpoort-haven, en die aan zeewaartse zijde begrensd wordt door de 4m TAW dieptelijn en aan landwaartse zijde door de 2m TAW dieptelijn. Deze landwaartse grens komt ruwweg overeen met de vooroevervoet, en loopt tussen aan de ene kant de meest zeewaarts gelegen brekerbank en aan de andere kant de langgerekte erosiestrook tussen Koksijde en Nieuwpoort (zie Figuur 8).

De volumetrische evolutie van dit gebied van 261 ha wordt weergegeven in Figuur 26. De volumetrische trend bedraagt $-24 (13) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en is met een R^2 van 0,37 slechts zeer weinig significant. Vanaf 1999 lijkt er zich wel een erosieve trend in te zetten, maar de opvallend (abnormaal?) lage waarde in 2003 en het gebrek aan extra datapunten in de periode 2001-2006 verhinderen van hierover duidelijkere uitspraken te doen.



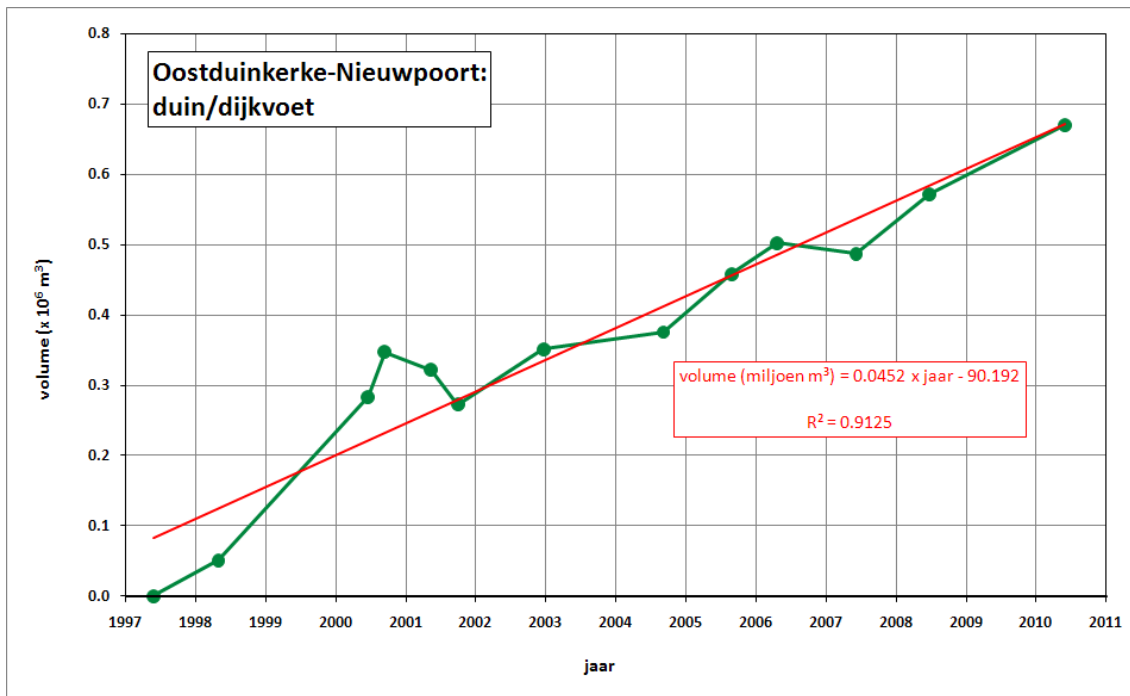
Figuur 26 – Volumetrische evolutie van de zone "Den Oever".

6.4.3 Oostduinkerke-Nieuwpoort: duin/dijkvoet

Het betreft hier een langgerekte zone droog strand van 67 ha die loopt van Oostduinkerke-bad tot aan de Nieuwpoortse havengeul. De zone is afgebakend op basis van de sterke sedimentatietrend die er wordt waargenomen (zie Figuur 8), de zeewaartse grens wordt gevormd door de hoogwaterlijn. Aan landwaartse zijde wordt de zone begrensd door de dijk indien aanwezig (te Oostduinkerke-bad en te Nieuwpoort-bad), daar waar duinen aanwezig zijn is de zone aan landwaartse zijde niet volgens een strikt criterium afgebakend, de landwaartse grens wordt dan bepaald door de reikwijdte van de gebruikte bathymetrische rasters.

Figuur 27 toont het tijdsverloop van de volumes, samen met de volumetrische trend. Deze laatste bedraagt $45 (4) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en wordt –afgezien van natuurlijke fluctuaties– zeer goed gevolgd door de datapunten, wat resulteert in een hoge R^2 -waarde van 0,91.

In deze zone zijn enkel in het westelijk deel van Nieuwpoort-bad (secties 54-56) ophogingen uitgevoerd: jaarlijks wordt er gemiddeld $6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ zeezand aangevoerd op het badstrand [5], zodat besloten kan worden dat het grootste deel van de volume-aangroei in deze zone een natuurlijke oorsprong kent.

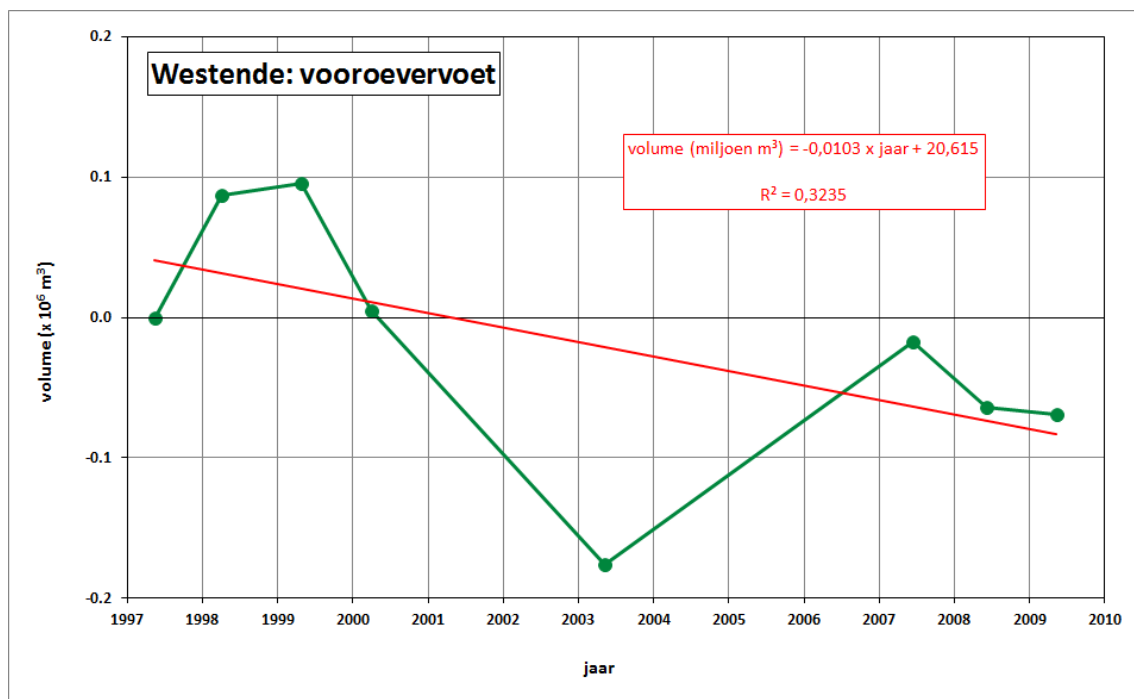


Figuur 27 – Volumetrische evolutie van de zone “Oostduinkerke-Nieuwpoort: duin/dijkvoet”.

6.4.4 Westende: vooroevervoet

De zone “Westende: vooroevervoet” komt overeen met de langgerekte en voor het merendeel erosieve strook langs de zeewaartse vooroevergrens tussen Nieuwpoort en Middelkerke, zie Figuur 9. De afbakening is ruwweg uitgevoerd op basis van de grens tussen erosie en sedimentatie uit de morfologische trendanalyse van hoofdstuk 5.

De volumetrische evolutie (Figuur 27) is zeer gelijkaardig aan deze van “Den Oever”: stijging van het volume tot 1999 gevolgd door een dalende trend, waarbij de waarde van 2003 een opvallend lage waarde heeft. De volumetrische trend bedraagt $-10 (6) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en is met een R^2 van 0,32 weinig significant. Net zoals bij de zone “Den Oever” kan men echter ook hier opmerken dat er vanaf 2000 een erosieve trend lijkt ingezet te worden, maar ook hier is het aantal datapunten te beperkt om hier sterkere conclusies aan te verbinden.

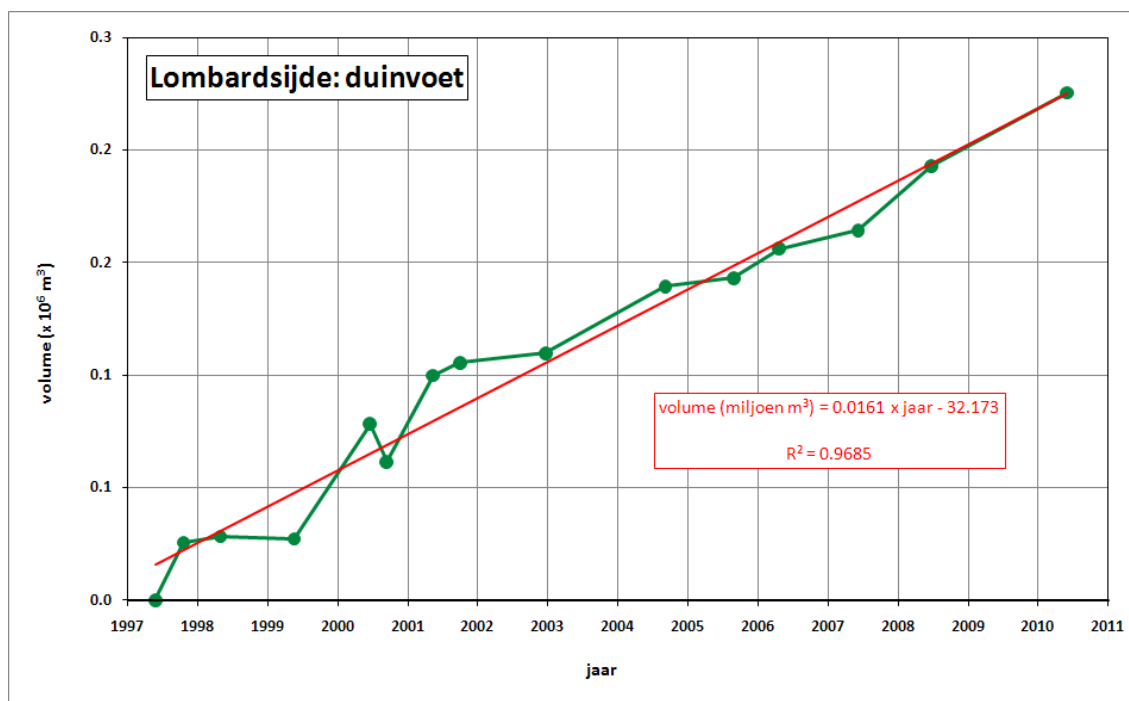


Figuur 28 – Volumetrische evolutie van de zone “Westende: vooroevervoet”.

6.4.5 Lombardsijde: duinvoet

Deze zone omvat het gebied ter hoogte van Lombardsijde waar een sterke sedimentatietrend aan de duinvoet optreedt (zie Figuur 9). Aan zeewaartse zijde is het gebied begrensd door de hoogwaterlijn, aan landwaartse zijde is geen strikte begrenzing opgelegd, maar wordt deze bepaald door de reikwijdte van de gebruikte topo-bathymetrische rasters. Over de hele lengte van deze zone zijn duinen aanwezig, het begin van de zeedijk is meteen ook de reden geweest van de oostelijke begrenzing.

De tijdsevolutie van de volumes wordt weergegeven in Figuur 29. Het verloop is quasi lineair en heeft bijgevolg ook een zeer hoge R^2 (0,97). De grootte van de volumetrische trend bedraagt $16 (1) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, wat zeer hoog is gezien de oppervlakte van de zone (18 ha). Aan het westelijk uiteinde van deze zone (sectie 65) worden wel bijna jaarlijks ophogingen van het droog strand uitgevoerd (gemiddeld $4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$), doch de stijgende volumetrend wordt bijna uitsluitend veroorzaakt door sedimentatie van de eerste meters van de duinen (of deze sedimentatietrend ook aanhoudt in de verder landinwaarts gelegen duinen kan omwille van de beperktheid van de topo-bathymetrische rasters niet worden nagegaan). De waargenomen volumetrische evolutie kent dus een natuurlijke oorsprong.

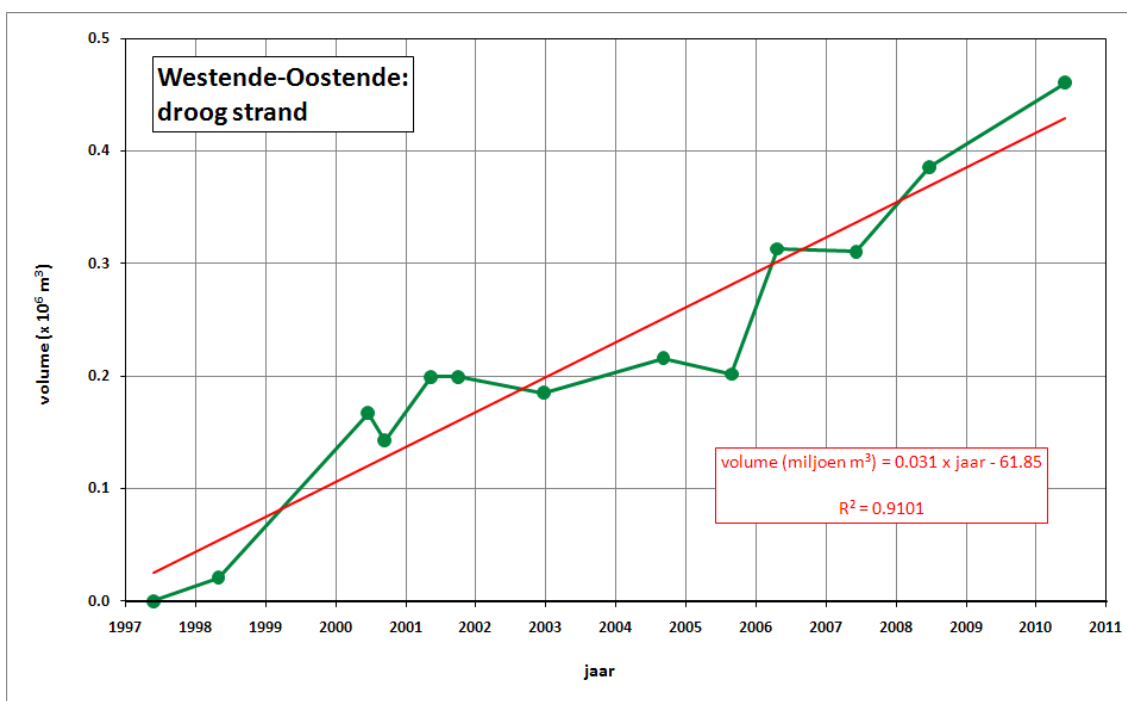


Figuur 29 – Volumetrische evolutie van de zone “Lombardsijde: duinvoet”.

6.4.6 Westende-Oostende: droog strand

Deze zone is de verderzetting van de vorige zone in de oostelijke richting, met dit verschil dat de landwaartse begrenzing niet gevormd wordt door duinen maar door de zeedijk, die over de hele lengte van de zone aanwezig is. De zeewaartse grens is nog wel dezelfde en valt samen met de hoogwaterlijn. Het gebied heeft een totale oppervlakte van 51 ha.

Figuur 30 geeft het tijdsverloop van het sedimentvolume in deze zone. Het verloop is bij benadering en afgezien van natuurlijke fluctuaties lineair ($R^2 = 0,91$), met een volumetrische trend van $31 (3) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Deze cijfers zijn (rekening houdend met de oppervlakte) van dezelfde grootteorde als deze gevonden in de zone "Lombardsijde: droog strand", het grote verschil is echter dat in deze zone wel bijna overal uitgebreide quasi jaarlijkse strandophogingen worden uitgevoerd, met een geschatte omvang van $60 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. De volumetrische evolutie wordt in deze zone bijgevolg volledig bepaald door menselijk ingrijpen.

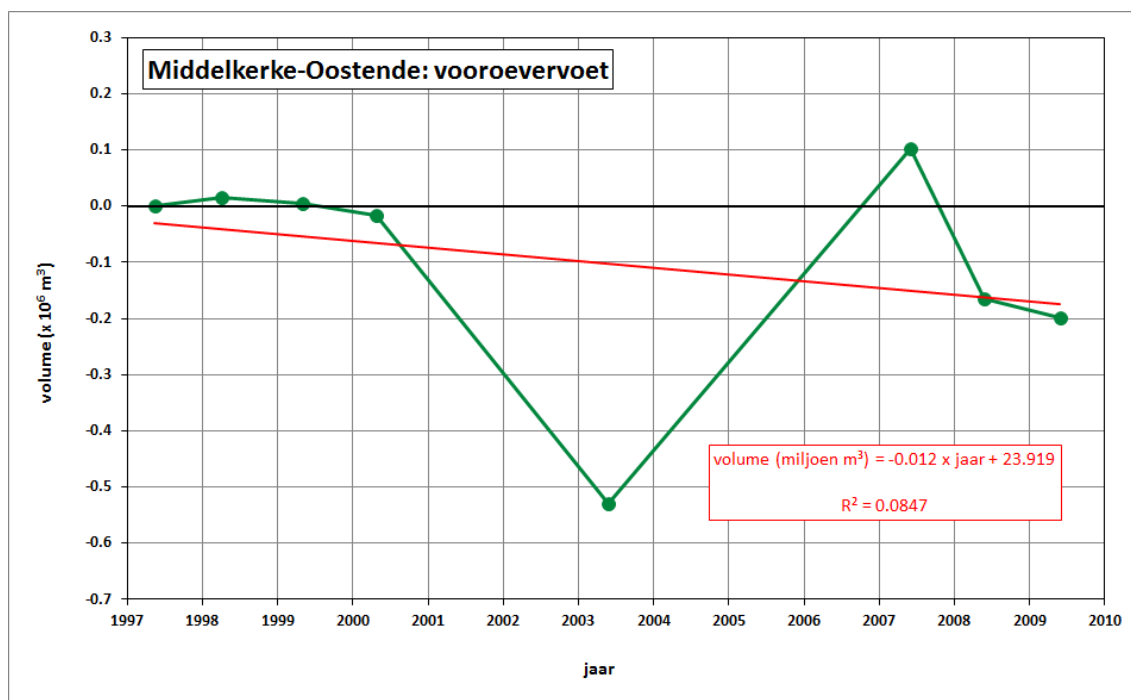


Figuur 30 – Volumetrische evolutie van de zone "Westende-Oostende: droog strand".

6.4.7 Middelkerke-Oostende: vooroevervoet

Deze langgerekte zone van 300 ha strekt zich uit van Middelkerke tot Oostende en omvat de overgang van vooroever naar zeebodem. De zone is ruwweg afgebakend als de strook waar erosie optreedt, zie Figuur 10.

Figuur 31 toont de volumetrische evolutie voor deze zone. De trend bedraagt $-12 (16) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ maar heeft zo goed als geen significantie ($R^2 = 0,08$). Opnieuw valt de lage waarde voor 2003 op. Afgezien hiervan is deze zone vrij stabiel, niettegenstaande Figuur 10 toch enkele locaties van significante erosie langsheen de vooroevervoet toont. Zeer waarschijnlijk is de hier afgebakende zone te ruim genomen en worden in de volumetrische trend de erosieve locaties teniet gedaan door in de zone opgenomen locaties waar sedimentatie optreedt.



Figuur 31 – Volumetrische evolutie van de zone “Middelkerke-Oostende: vooroevervoet”.

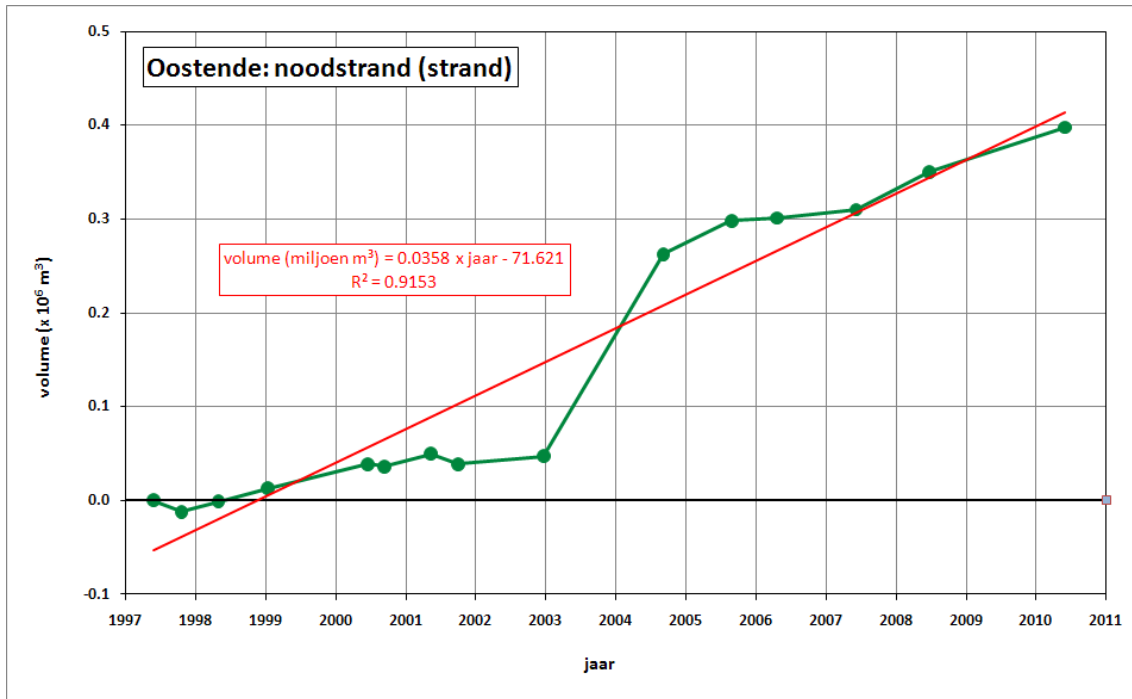
6.4.8 Oostende: noodstrand

Deze zone omvat het sedimentatiegebied ten westen van de Oostendse havengeul (zie Figuur 11), de begrenzing volgt de contour waar de erosietrend uit de morfologische trendanalyse nul is en loopt van sectie 109 tot 117. De zone is noodzakelijkerwijs opgesplitst in twee deelzones “strand” en “vooroever”, aangezien deze deelzones door twee verschillende datasets beschreven worden. Merk ook nog op dat de gehanteerde grens tussen strand en vooroever (de laagwaterlijn, op TAW + 1,39m) gebaseerd is op de meest recente topo-bathymetrie, maar dat deze laagwaterlijn vroeger (voor de aanleg van het noodstrand) bijna tegen de dijk aanlag. Om deze reden is de zeewaartse reikwijdte van de strandopmetingen van voor 2004 –en dus ook van de deelzone “strand” waar de volumetrische trendanalyse is uitgevoerd– beperkt, waardoor de datasets van strand en vooroever niet exact bij mekaar aansluiten (zie Figuur 21). De uiteindelijke sedimentatiezone is dus in werkelijkheid groter dan de som van de deelzones “strand” (24 ha) en “vooroever” (45 ha), de “blinde vlek” tussen beide deelzones heeft een oppervlakte van bijna 12 ha.

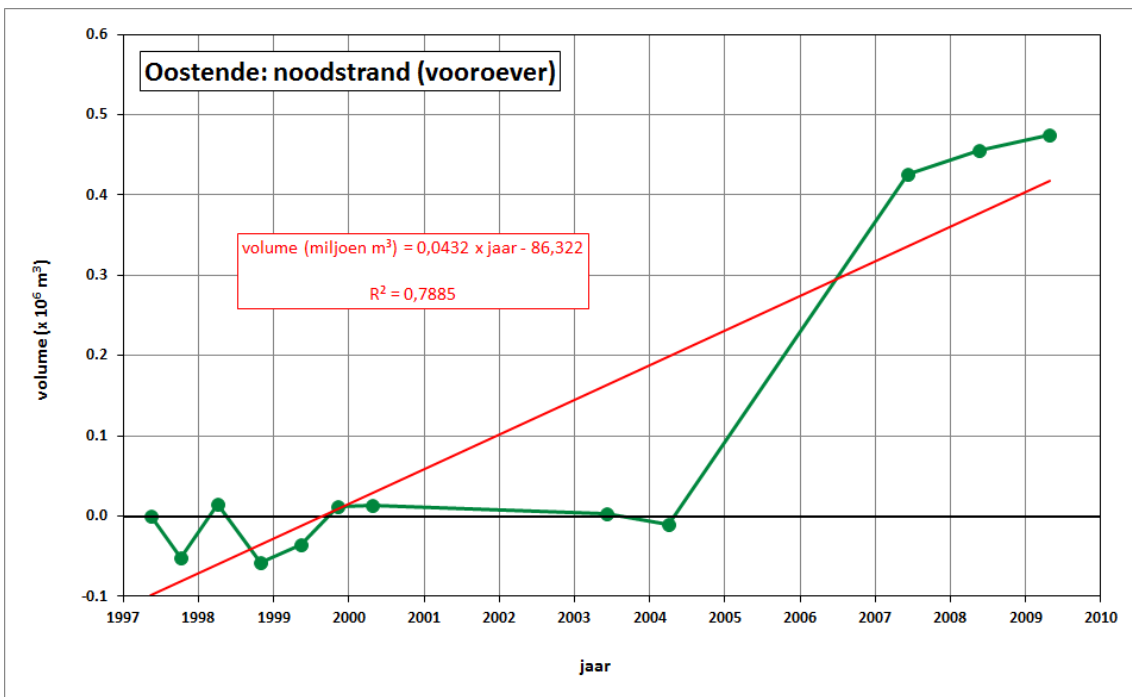
Het volumetrisch verloop van beide deelzones (Figuur 32 en Figuur 33) wordt sterk getekend door de aanleg van het noodstrand in 2004, waarbij $718 \times 10^3 \text{ m}^3$ zand werd aangebracht op strand (45% van de totale hoeveelheid [5]) en vooroever (55% van het totaal) ter hoogte van de secties 112-117. Inderdaad is in deze periode een sterke stijging van het volume waar te nemen bij zowel strand ($215 \times 10^3 \text{ m}^3$) en vooroever ($437 \times 10^3 \text{ m}^3$).

Voor de strandzone zijn in de secties 112-117 in de jaren na 2004 nog verschillende aanvullingen uitgevoerd: $159 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2005, $34 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2006, $136 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2007, en $36 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2008. In sectie 109 wordt bovendien sinds 1999 op quasi jaarlijkse basis zeezand aangevoerd, met een typische omvang van $6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. De volumetrische evolutie in deze deelzone wordt dus volledig bepaald door de uitgevoerde werken. Desondanks heeft de lineaire benadering een hoge R^2 (0,92), waarbij de volumetrische trend $36 (3) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ bedraagt.

In de vooroeverzone is enkel in 2004 zand aangevoerd, wat goed weerspiegeld wordt in het volumeverloop: enkel tussen 2004 en 2005 is er een sterke volumestijging te zien, voor de andere jaren zijn wel vrij grote fluctuaties waar te nemen. Merk op dat voor deze zone ook lodingen uit 2004 beschikbaar waren, en er geen discrepantie lijkt te zijn tussen de waarde van 2003 en 2004. Het sedimentvolume in 2003 lijkt ditmaal –in tegenstelling tot enkele van de hiervoor besproken vooroeverzones– vreemd genoeg niet abnormaal laag te zijn. De volumetrische trend bedraagt $43 (7) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, maar uit de grafiek mag duidelijk zijn dat de evolutie niet bepaald lineair verloopt, zodat aan dit cijfer op zich niet te veel belang gehecht moet worden. Dat de R^2 -waarde desondanks nog 0,78 bedraagt is louter te wijten aan de grote volumeverandering tussen 2004 en 2007 (bij eenzelfde amplitude van de fluctuaties zal een lineaire fit met een richtingscoëfficiënt met grote absolute waarde ook een hogere R^2 hebben dan een fit waarvan de absolute waarde van de richtingscoëfficiënt kleiner is).



Figuur 32 – Volumetrische evolutie van de deelzone “Oostende: noodstrand (strand)”.

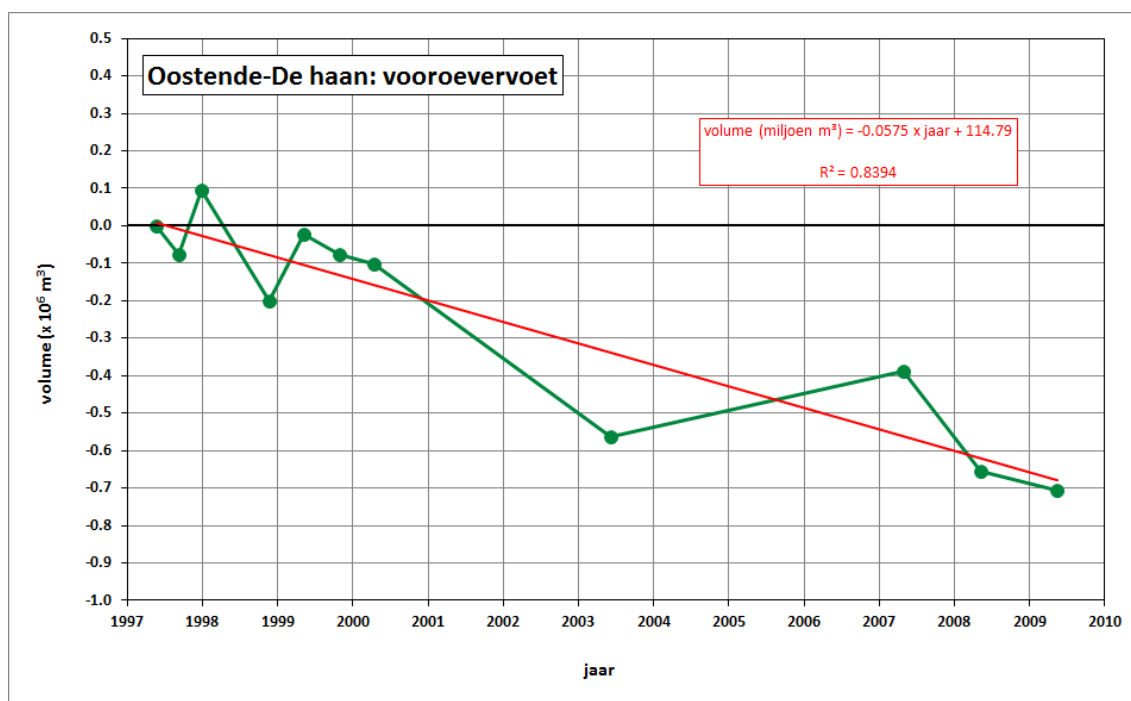


Figuur 33 – Volumetrische evolutie van de deelzone “Oostende: noodstrand (vooroever)”.

6.4.9 Oostende-De Haan: vooroevervoet

Het betreft hier de langgerekte kustparallele erosiezone aan de vooroevervoet die zich uitstrekt van Oostende tot De Haan (zie Figuur 11 t.e.m. Figuur 13). Aan landwaartse zijde is de zone afgebakend op basis van de erosie/sedimentatie-grens bekomen uit de morfologische trendanalyse, aan zeezijde is de afbakening enigszins gevoelsmatig uitgevoerd en is de grens tussen deze zone en de zone "Grote Rede" getrokken waar de erosietrend kleiner en minder significant wordt. De zone heeft een oppervlakte van 179 ha.

De evolutie van de volumes wordt getoond in Figuur 34. Ondanks de (mogelijk seizoenale) fluctuaties is er duidelijk een dalende trend. Het verloop is bij benadering lineair, met een R^2 van 0,84 en een volumetrische trend van $-57 (9) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Men kan dus besluiten dat de vooroevervoet tussen Oostende en De Haan een erosief karakter vertoont.

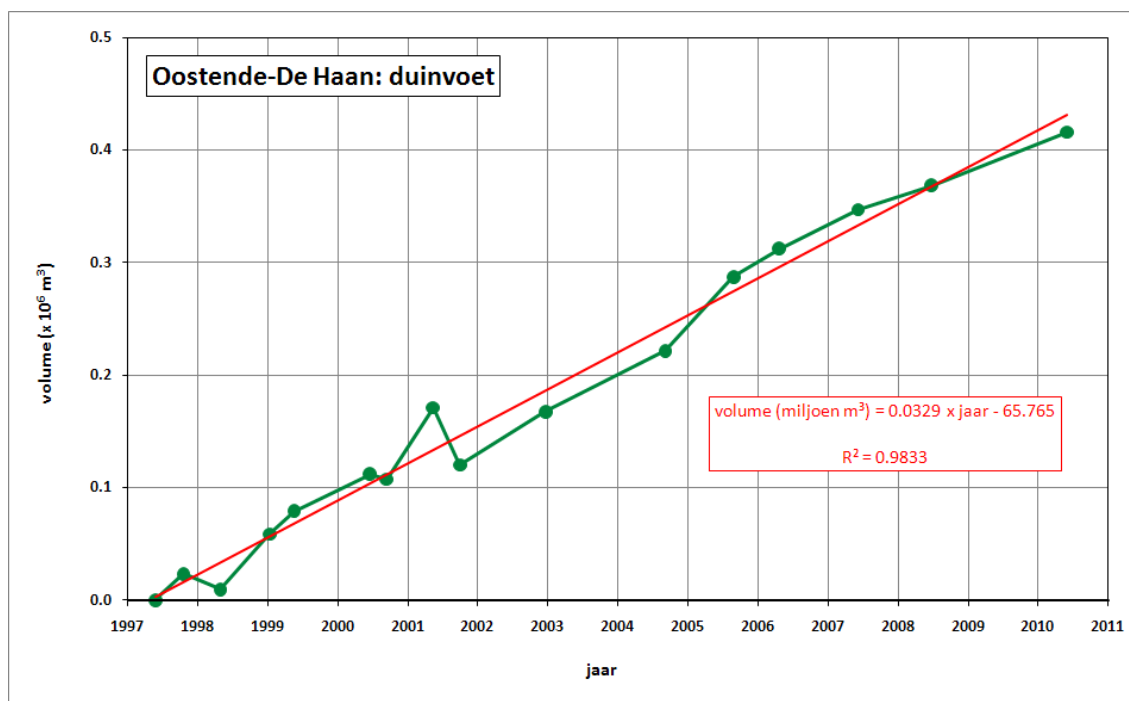


Figuur 34 – Volumetrische evolutie van de zone "Oostende-De Haan: vooroevervoet".

6.4.10 Oostende-De Haan: duinvoet

Deze zone is afgebakend op basis van de zeer sterke en significante sedimentatietrend aan de duinvoet tussen Oostende en De Haan (secties 124 t.e.m. 150, zie Figuur 11 en Figuur 12). De precieze afbakening is niet strikt maar enigszins gevoelsmatig uitgevoerd om de langgerekte strook van zeer hoge sedimentatiesnelheden te omvatten. Merk op dat meer landinwaarts gelegen duinen op vele plaatsen wel aan erosie onderhevig kunnen zijn, deze meer landinwaarts gelegen duinen zijn echter niet opgenomen in de hier besproken zone. De oppervlakte bedraagt 23 ha.

Het verloop van de volumes is weergegeven in Figuur 35 en is quasi lineair, wat ook blijkt uit de hoge R²-waarde van maar liefst 0,98. De volumetrische trend bedraagt 32,9 (1,2) x 10³ m³/jaar. De evolutie wordt als natuurlijk van oorsprong beschouwd: in de zone zijn geen ophogingen uitgevoerd gedurende de geanalyseerde periode, afgezien van de secties 124 t.e.m. 131, waar op jaarlijks gemiddeld 20 x10³ m³ aangevoerd wordt. Deze aanvoer vindt echter vooral op het badstrand plaats, en bovendien wordt de sedimentatietrend waargenomen in de hele zone, die zich veel ruimer is dan de secties 124-131. Deze jaarlijkse ophogingen hebben bijgevolg hoogstens een minieme invloed op de waargenomen evolutie.

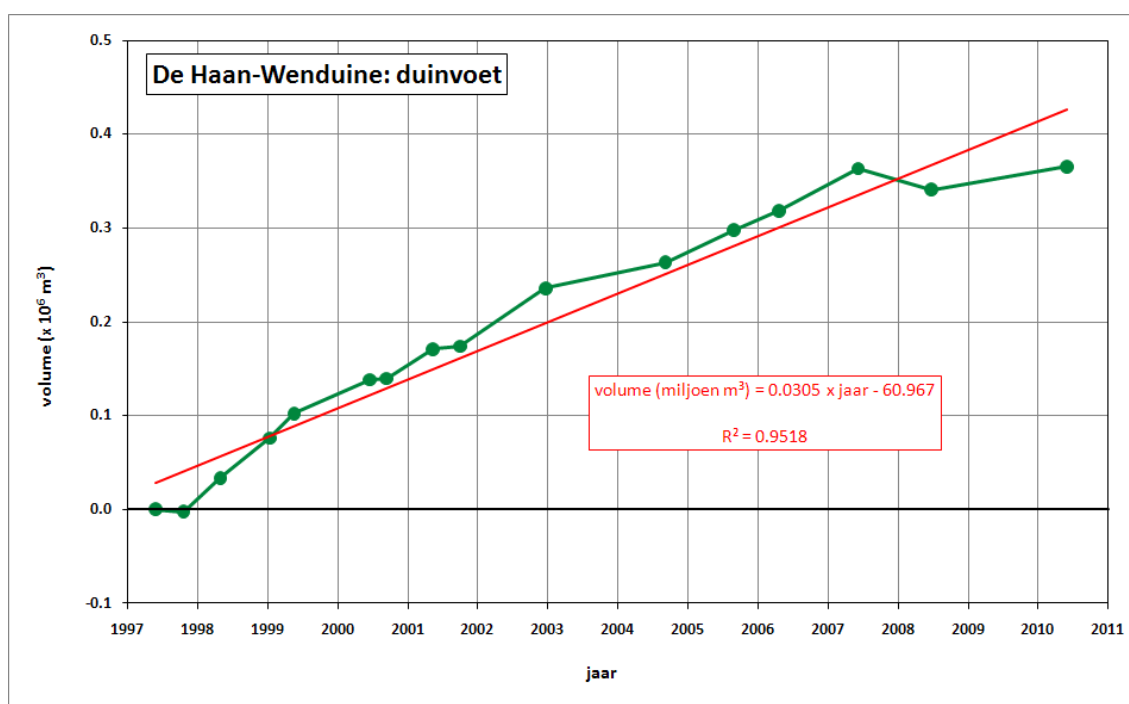


Figuur 35 – Volumetrische evolutie van de zone “Oostende-De Haan: duinvoet”.

6.4.11 De Haan-Wenduine: duinvoet

Deze zone strekt zich uit van de Haan tot aan Wenduine (secties 155 t.e.m. 172), omvat de sterk sedimenterende strook aan de duinvoet en is in feite de oostwaartse verderzetting van de vorige zone, die onderbroken werd door De Haan-centrum (met een zeedijk i.p.v. duinen). De afbakening is ook hier uitgevoerd om de zone van sterke sedimentatie rond de duinvoet te omvatten, de meer landinwaarts gelegen delen van de duinen –waar ook erosie optreedt– is hier niet inbegrepen. De zone heeft een oppervlakte van 14 ha.

De volumetrische evolutie wordt getoond in Figuur 36. Net als bij de zone “Oostende-De Haan is de evolutie quasi lineair, resulterend in een hoge R^2 van 0,95 en een volumetrische trend van $31 (2) \times 10^9 \text{ m}^3/\text{jaar}$. In de bestudeerde periode is geen zand aangevoerd geweest, zodat de evolutie als natuurlijk van oorsprong beschouwd mag worden. Wel zijn lang voor 1997 in grote delen van de beschouwde zone rijshouthagen aangeplant geweest, die wel mede verantwoordelijk zijn voor de hoge sedimentatiesnelheden. Vergeleken met de vorige zone (“Oostende-De Haan: duinvoet”) is de volumetrische trend in deze zone de helft groter (rekening houdend met de verschillende oppervlakte van de zones).



Figuur 36 – Volumetrische evolutie van de zone “De Haan-Wenduine: duinvoet”.

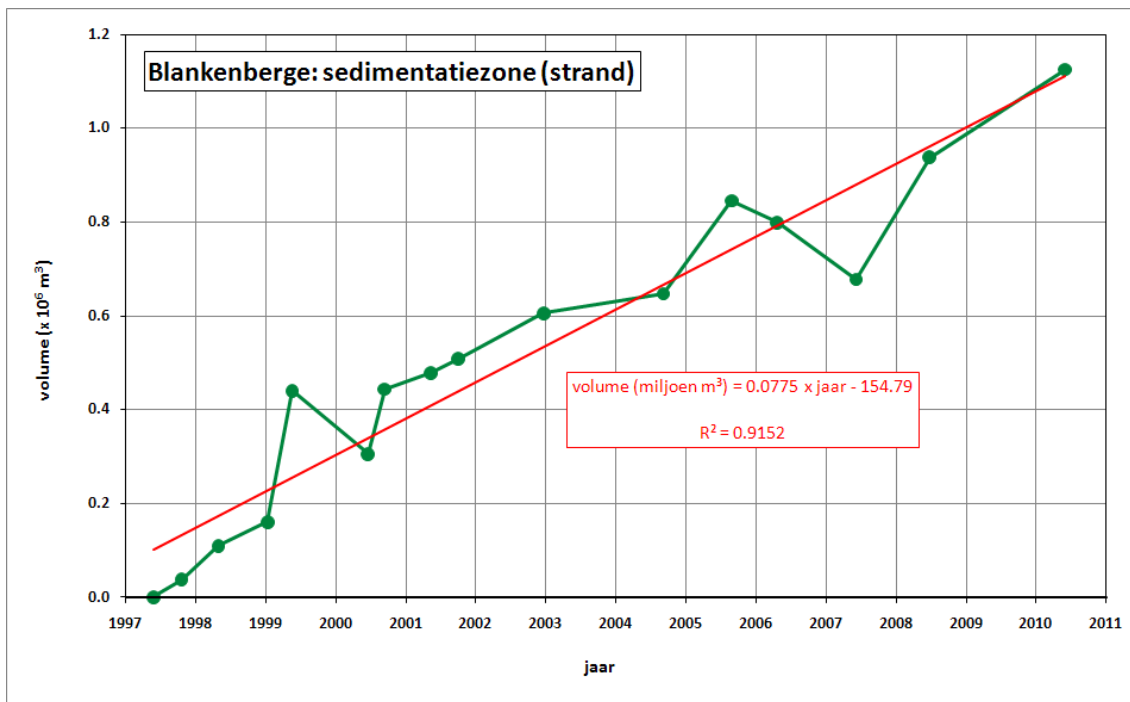
6.4.12 Blankenberge: sedimentatiezone

Deze zone bevindt zich ten westen van de westelijke strekdam van de buitenhaven van Zeebrugge, en omvat zowel vooroever als strand en duinen. De zone wordt beschouwd als de invloedssfeer van de westelijke strekdam, waardoor ze aan oostelijke zijde is begrensd. Aan westelijke zijde loopt de zone door tot net iets voorbij de pier van Blankenberge (vanaf daar wordt de morfologische evolutie, aan landwaartse zijde is geen begrenzing opgelegd en reikt de zone bijgevolg even ver als de topo-bathymetrische rasters (wat in de praktijk betekent dat de zone nog net de duinvoet een klein deel van de achterliggende duinen omvat). Aan zeewaartse zijde loopt afbakening volgens de erosie/sedimentatie-grens. Merk op dat het sedimentatiegebied zich ten dele nog verder zeewaarts uitstrekt, voorbij de reikwijdte van de vooroeverlodingen. Tevens sluiten de strandopmetingen en de vooroeverlodingen niet volledig bij mekaar aan, zodat een stuk met een oppervlakte van 18 ha niet in de analyse vervat is. In het overgrote deel van de aldus afgebakende zone vindt volgens de morfologische trendanalyse sedimentatie plaats (zie Figuur 13), hoewel bepaalde stukken aan erosie onderhevig zijn, deze stukken zijn meegenomen in de volumetrische analyse. De volumetrische analyse is opgesplitst in een strand- en een vooroever-deelzone, aangezien het om twee verschillende datasets gaat.

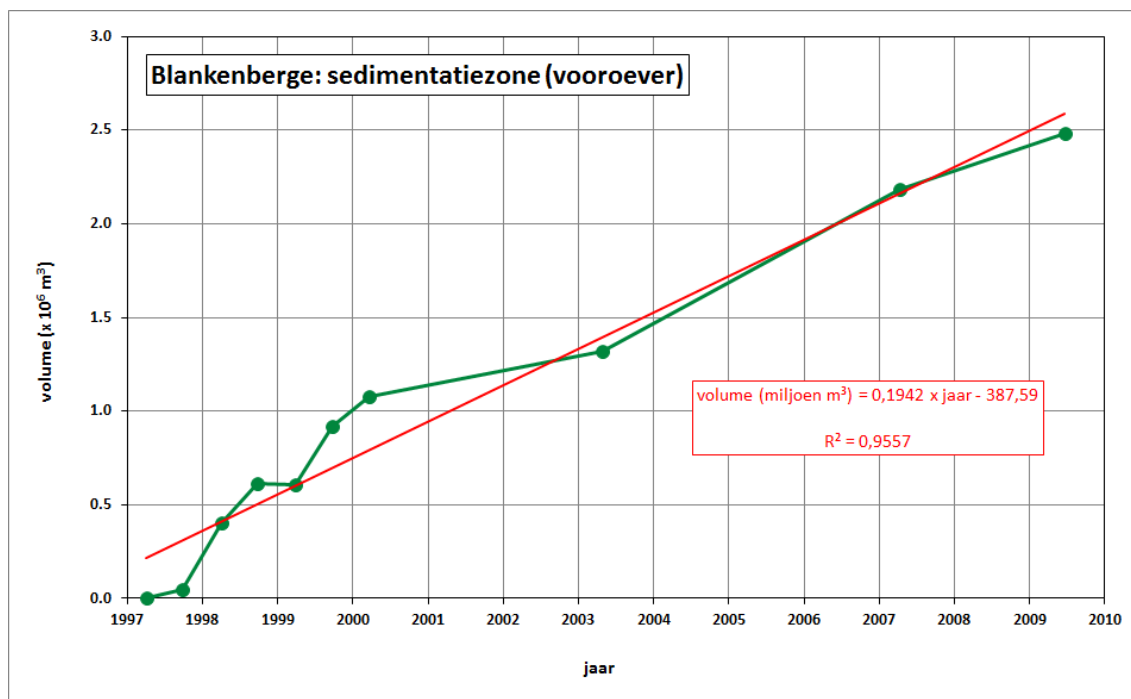
Het verloop van de volumes in beide deelzones vindt men terug in Figuur 37 (strand) en Figuur 38 (vooroever). Wat betreft het strand is er een duidelijke significante ($R^2 = 0,91$) en sterke positieve volumetrische trend van $78 (6) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en dit voor een oppervlakte van 136 ha. In deze deelzone hebben gedurende de geanalyseerde periode op min of meer jaarlijkse basis strandophogingen plaatsgevonden in het westelijk deel, met echter een eerder beperkte gemiddelde omvang van ruwweg $1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, met uitschieters van $14 \times 10^3 \text{ m}^3$ en $7 \times 10^3 \text{ m}^3$ in respectievelijk 2008 en 2009. Eind 1998 en begin 1999 is een omvangrijke duinvoetsuppletie uitgevoerd aan de "Duinse Polders" (secties 196-201), waarbij een geschatte hoeveelheid van $365 \times 10^3 \text{ m}^3$ zeezand werd aangevoerd. Tevens zijn tot tweemaal toe grootschalige afgravingswerken uitgevoerd. Deze vonden plaats in de secties 211-214 in de jaren 1999 en 2006 en bedroegen respectievelijk $450 \times 10^3 \text{ m}^3$ [5] en $213 \times 10^3 \text{ m}^3$ [6]. Zowel de duinvoetsuppletie als de afgravingswerken zijn waar te nemen in de volumetrische evolutie van Figuur 37, de eerste als een steile volumestijging tussen najaar 1998 en voorjaar 1999 en de tweede als volumedalingen tussen voorjaar 1999 en voorjaar 2000 en tussen zomer 2005 en voorjaar 2007.

De vooroever-deelzone (Figuur 38) heeft een oppervlakte van 294 ha en een zeer significante lineaire volumetrische trend $119 (8) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ (met $R^2 = 0,96$).

De volumetrische trends in deze zone worden gezien als het gevolg van de blokkering van de litorale drift door de westelijke strekdam van de Zeebrugse buitenhaven.



Figuur 37 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: sedimentatiezone (strand)”.

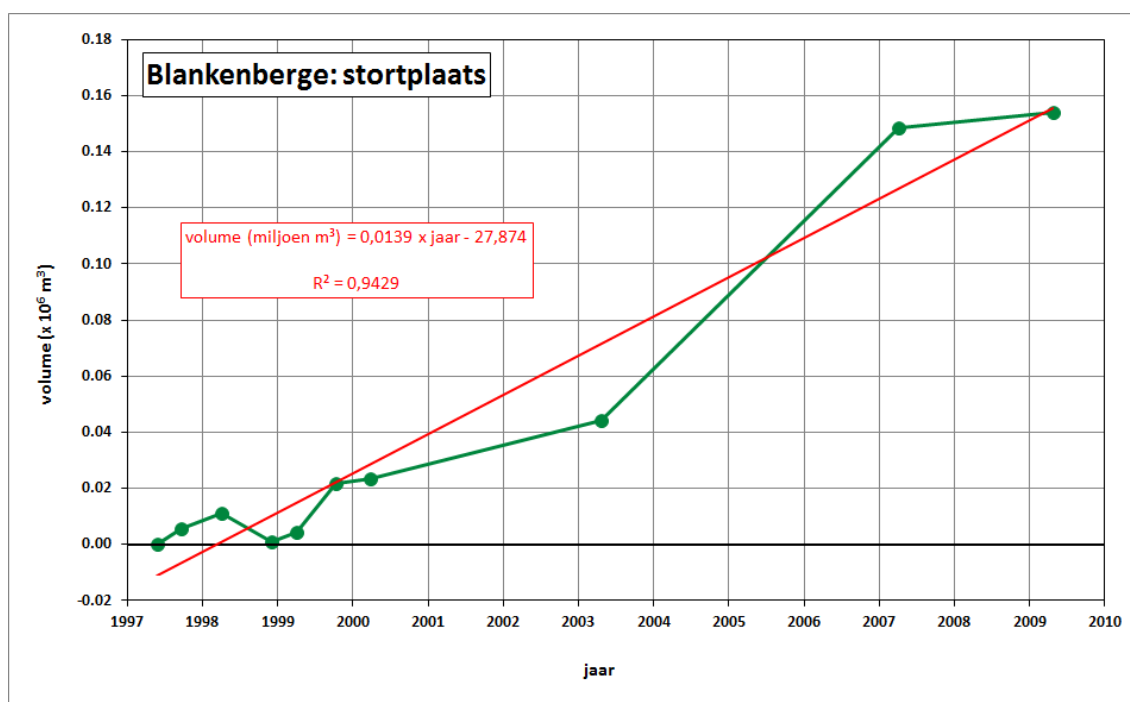


Figuur 38 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: sedimentatiezone (vooroever)”.

6.4.13 Blankenberge: stortplaats

De zone “Blankenberge: stortplaats” is afgebakend als de min of meer afgescheiden sedimentatiezone gelegen op de vooroever voor de kust van Blankenberge, onmiddellijk ten westen van de zone “Blankenberge: sedimentatiezone”. De afbakening volgt de erosie/sedimentatie-grens uit de morfologische trendanalyse (zie Figuur 14), afgezien van de oostelijke zijde waar de zone eindigt tegen de hierboven besproken zone “Blankenberge: sedimentatiezone”. De zone “Blankenberge: stortplaats” wordt gezien als de invloedssfeer van de voor de kust van Blankenberge gelegen stortzone, merk echter wel op dat de hier afgebakende zone in werkelijkheid niet volledig samenvalt met de officiële stortzone, maar iets zuidelijker gelegen is. De hier afgebakende zone heeft een oppervlakte van 29 ha.

Figuur 39 toont het tijdsverloop van de volumes voor deze zone. De volumetrische trend bedraagt $13,9 (1,3) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$, en is met een R^2 -waarde van 0,94 significant en sterk lineair. De hoeveelheid baggerstorting bedraagt gemiddeld $135 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ [6], en is de zeer waarschijnlijke oorzaak van deze “sedimentatie”-zone. Merk wel op dat uit de hierboven gegeven cijfers blijkt dat de volumetrische aangroei slechts een fractie (~10%) bedraagt van de gestorte baggerspecie, zodat mag besloten worden dat slechts een beperkt deel van de baggerstorting blijft liggen.

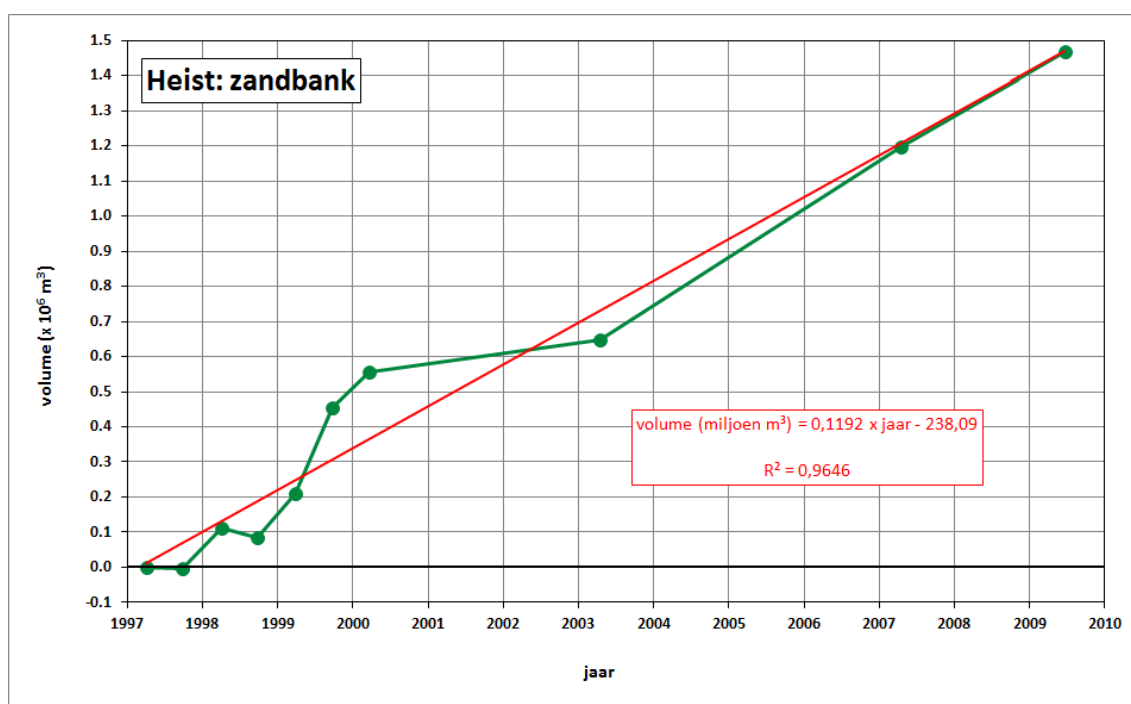


Figuur 39 – Volumetrische evolutie van de zone “Blankenberge: stortplaats”.

6.4.14 Heist: zandbank

De zone “Heist: zandbank” is afgebakend als het sedimentatiegebied op en rond de bank van Heist. Aan landwaartse zijde volgt de afbakening de erosie/sedimentatie-grens uit de morfologische trendanalyse (Figuur 15), aan zeewaartse zijde is de afbakening eerder gevoelsmatig uitgevoerd als begrenzing van de bank zelf, inclusief de tot halverwege het Albertstrand reikende staart van de bank. Aan westzijde is de zone beperkt door het bereik van de vooroeverlodingen. De zone omvat enkel vooroeverlodingen en geen strandopmetingen, de geul tussen de bank en het strand is niet in de zone inbegrepen. De oppervlakte bedraagt 184 ha.

De volumetrische evolutie wordt weergegeven in Figuur 40. De R^2 -waarde is zeer hoog (0,96), de bijhorende sterk significante lineaire trend bedraagt $119 (8) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Merk op dat in de beginjaren van de geanalyseerde periode (tot 2000) van de geanalyseerde periode er ook volume-afnames voorkomen, die mogelijk seizoensgebonden zijn (tussen voorjaar en najaar 1997, tussen voorjaar en najaar 1998). Uit de meer recente datapunten mag blijken dat de sedimentatietrend zich tot op heden onverminderd doorzet.

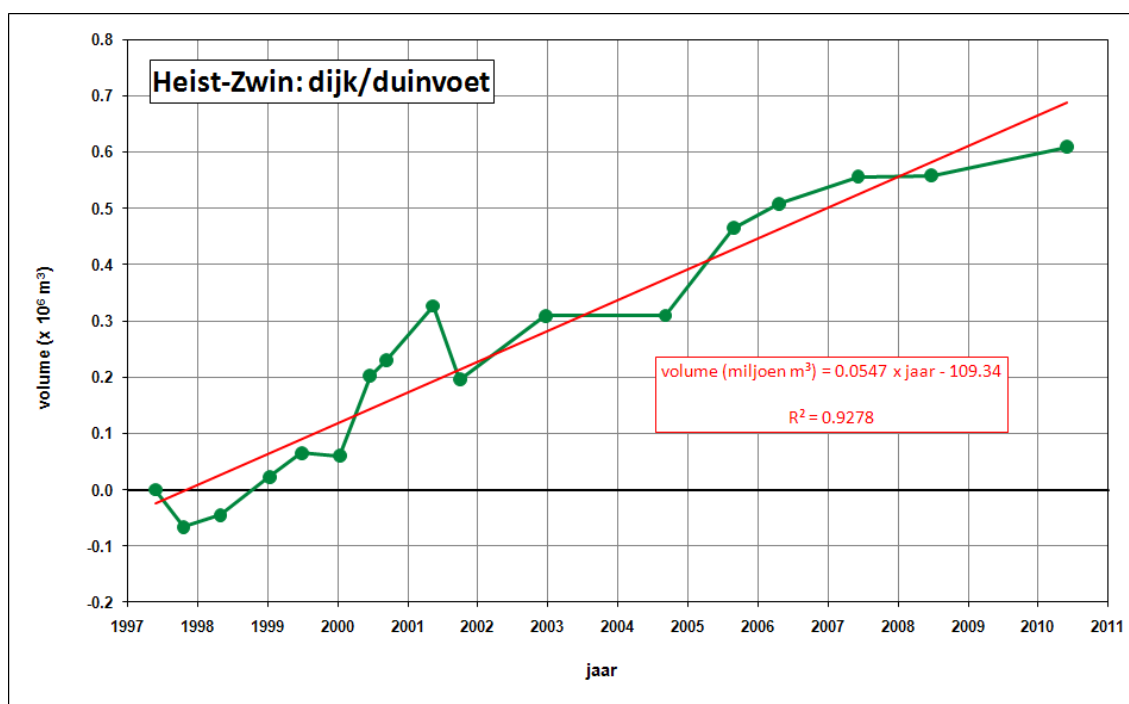


Figuur 40 – Volumetrische evolutie van de zone “Heist: zandbank”.

6.4.15 Heist-Zwin: dijk/duinvoet

De zone “Heist-Zwin: dijk/duinvoet” loopt langs de zeewaartse zijde van de zeedijk, vanaf de oostelijke strekdam van Zeebrugge tot aan het einde van de dijk (halverwege sectie 250) en omvat de langgerekte sedimentatiezone op het droog strand en in de duinen (Figuur 16). De afbakening aan zeewaartse zijde volgt de hoogwaterlijn, met uitzondering van enkele plaatselijke erosieve delen die niet in de zone inbegrepen zijn. Aan landwaartse zijde is de zone begrensd door de zeedijk. Vooral in het oostelijk deel van de zone (vanaf sectie 241) bevindt zich nog een duinenrij tussen strand en zeedijk. De oppervlakte van de zone bedraagt 113 ha.

Figuur 41 toont het tijdsverloop van de volumes voor deze zone, dat quasi lineair is met $R^2 = 0,93$ en een volumetrische trend van $55 (4) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Hierbij dient opgemerkt te worden dat vooral in het oostelijk deel van de zone jaarlijkse badstrandophogingen (gemiddeld $10 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ in de secties 225-226) en omvangrijke suppleties zijn uitgevoerd: geschatte hoeveelheden bedragen $365 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 1999, $292 \times 10^3 \text{ m}^3$ in 2004, en bij benadering $55 \times 10^3 \text{ m}^3$ in zowel 2006, 2007 als 2009. In de grafiek met het volumeverloop zijn duidelijk volumestijgingen waar te nemen na de suppleties van 1999 en 2004, merkwaardig is wel dat de stijging na de suppletie van 1999 pas waargenomen wordt na de najaarsmetingen van 1999 (die eigenlijk begin 2000 uitgevoerd zijn), terwijl deze suppletie uitgevoerd werd in de periode maart-mei 1999. Merk op dat het volumeverloop slechts gedeeltelijk een weerspiegeling is van de uitgevoerde werken, de in Figuur 41 geïllustreerde evolutie heeft eveneens een natuurlijke component, aangezien in het westelijk deel van de zone eveneens een sedimentatietrend waar te nemen valt (zie Figuur 16) en hier geen ophogingen of suppleties plaatsvinden.



Figuur 41 – Volumetrische evolutie van de zone “Heist-Zwin: dijk/duinvoet”.

6.4.16 Besluit

Het uitvoeren van een volumetrische trendanalyse op welbepaalde afgebakende gebieden laat toe het tijdsverloop van de totale hoeveelheid sediment binnen deze gebieden grafisch voor te stellen, wat niet mogelijk was bij de morfologische trendanalyse. Deze laatste methode laat wel toe de ruimtelijke variatie van de evolutie van strand en zeebodem te visualiseren, maar biedt weinig informatie over het exacte verloop in de tijd van de evolutie (enkel via twee samenvattende parameters, nl. erosietrend en R^2).

Bij de op het strand gelegen afgebakende gebieden worden niet alleen hoge R^2 -waarden gevonden ($> 0,9$ voor alle strandgebieden), uit het grafisch voorgestelde tijdsverloop van de volumes blijkt ook dat het lineaire verloop zeer goed gevolgd wordt. Op zich is dit natuurlijk geen garantie dat in elke rastercel de evolutie van de dieptewaarden lineair is, maar het is toch een sterke indicatie.

Bij een aantal op de vooroever gelegen gebieden wordt een lage R^2 gevonden. Waarschijnlijk is de afbakening van deze gebieden op basis van de erosie/sedimentatie-kaarten te ruim genomen, en zijn deze gebieden gemengd erosief/sedimenterend. Een striktere afbakening –die beperkt is tot louter erosieve of sedimenterende zones– zou zeer waarschijnlijk tot hogere R^2 -waarden leiden. De berekende volumetrische trends hebben voor deze gebieden dan ook weinig waarde, en de hierboven gepresenteerde grafische voorstellingen van de volumetrische evolutie zijn dan ook enkel nuttig om een idee te krijgen van de variatie in volumes die kan optreden van het ene naar het andere tijdstip.

De vooroeverzones waar de morfologie sterk beïnvloed wordt door aanwezige artificiële structuren (de zone rond de uitgebouwde strandhoofden in Koksijde, de luwtes in de oostelijke en westelijke strekdammen van Zeebrugge) hebben wel een hoge R^2 .

6.5 Volumetrische trendanalyse voor nat strand en vooroever langsheen de Belgische kust

Om een idee te krijgen van de totale hoeveelheden die sedimenteren of eroderen op de vooroever en op het nat strand is voor deze zones en voor vier deelgebieden de totale volumetrische trend berekend. De resultaten zijn, samen met de oppervlakte van het desbetreffend gebied, opgelijst in Tabel 5.

Deze volumetrische trends zijn berekend als som van de morfologische trend in elk van de rastercellen van het desbetreffend gebied. R^2 -waarden zijn niet gegeven, enerzijds omdat we hier geen gebieden van eenduidige en enigszins significante trends hebben afgebakend (zoals in paragraaf 0) maar net de hele kustzone bestrijken, en anderzijds omdat –zoals mag blijken uit de bespreking gegeven in de appendix op het einde van dit rapport– het uitmiddelen van R^2 -waarden van alle cellen binnen een gebied weinig zegt over de significantie van de totale volumetrische trend. De alternatieve werkwijze, waarbij eerst gekubeerd wordt en dan een trendanalyse wordt uitgevoerd op de volumes, is voor deze grootschalige gebieden niet uitgevoerd voor verschillende redenen: de belangrijkste is dat de toegevoegde waarde van zulk een (omwille van de vele uit te voeren kuberingen tijdrovende) analyse enkel uit de R^2 -waarde van de volumetrische trend bestaat. Deze is hier echter minder relevant omdat, zoals hierboven reeds vermeld, de hier beschouwde zones niet afgebakend zijn op basis van significante trends. Anderzijds kunnen we voor de kuberingen enkel bathymetrieën gebruiken die het volledige gebied in kwestie bestrijken, gezien de grootschaligheid van de gebieden dienen we dan redelijk wat datasets te laten vallen, wat de nauwkeurigheid van de volumetrische trend niet ten goede komt (dit probleem stelt zich –zoals vermeld in de appendix– niet bij een morfologische analyse, waarbij elke dataset ingezet kan worden).

Het nat strand is net zoals voorheen de hele zone tussen de hoog- en laagwaterlijn dus tussen +4,39 en +1,39 m TAW. De vooroeverzone is het gebied tussen +1,39 en -4,108 m TAW.

Voor nat strand vinden we voor alle vier de deelgebieden vergelijkbare sedimentatietrends. Voor de zone “Zeebrugge-Nederlandse grens” is de trend (rekening houdend met de oppervlakte) het grootst, waarschijnlijk onder invloed van de sterke sedimentatietrend en de nog steeds ophogende bank in de baai van Heist, die zich voor een groot stuk boven de laagwaterlijn bevindt en dus mee in de berekening voor het nat strand vervat zit.

Voor vooroeverzone is de trend negatief voor de twee meest westelijk gelegen deelgebieden, voor de zone “Oostende-Zeebrugge” is de trend zo goed als nul en voor “Zeebrugge-Nederlandse grens” positief. Bij deze laatste twee deelgebieden speelt immers de invloed van de buitenhaven van Zeebrugge, die wat betreft de vooroeverzone het langstransport blokkeert en zo sedimentatie in de hand werkt.

Tabel 5 – Volumetrische trends voor nat strand en vooroever langsheen de Belgische kust.

| zone | nat strand | | vooroever | |
|-------------------------------|------------------|--|------------------|--|
| | oppervlakte (ha) | volumetrische trend (x 10 ³ m ³ /jaar) | oppervlakte (ha) | volumetrische trend (x 10 ³ m ³ /jaar) |
| Franse grens - Nieuwpoort | 286 | 34 | 1017 | 89 |
| Nieuwpoort - Oostende | 258 | 36 | 573 | 84 |
| Oostende - Zeebrugge | 313 | 38 | 953 | 217 |
| Zeebrugge - Nederlandse grens | 144 | 13 | 466 | 168 |

7 Besluit

In dit rapport is de studie naar de morfologische evolutie van strand, vooroever en kustnabije zone langsheen de Belgische kust van 1997 tot nu besproken.

Het rapport bevat uitvoerige toelichting bij de methodologie (morfologische en volumetrische trendanalyse) en bij de implementatie ervan in ArcGIS software. Als dusdanig kan dit document opgevat worden als leidraad voor onderzoekers die een gelijkaardige analyse wensen uit te voeren.

Het belangrijkste product van deze studie wordt gevormd door de ArcMap rasters met de resultaten van de trendanalyse, dit zijn voornamelijk de rasters die de erosietrend geven en de rasters met de R^2 -waarde. Een DVD (DVD 1) met deze rasters is bijgevoegd zodat deze producten indien gewenst aangewend kunnen worden in andere studies. Op bijgevoegde DVD's zijn eveneens de gebruikte basisdatasets (topografieën van strand, bathymetrieën van vooroever en kustnabije zone) terug te vinden, dit zowel in de vorm van tekstbestanden met xyz-gegevens (DVD 1) als geïnterpoleerde ArcMap-rasters (DVD 2). Ook dit kan nog zeker van nut zijn in toekomstige studies, aangezien het op stelselmatige wijze samenbrengen van deze datasets in een uniforme vorm een tijdrovende bezigheid is geweest die dan niet meer opnieuw uitgevoerd dient te worden.

Dit rapport moet opgevat worden eerder als een overzicht dan een detailstudie van de morfologische evolutie langsheen de Belgische kust op middellange termijn (bijvoorbeeld: er wordt gewezen op een mogelijke invloed van een nabijgelegen stortplaats, zonder een detailstudie hieromtrent op te zetten (kijken naar jaarlijks gestorte hoeveelheden, aard gestort materiaal, ...)). De resulterende erosie/sedimentatiekaarten kunnen natuurlijk wel ingezet worden in andere projecten die in een bepaald deel van de Belgische kustzone zulke detailstudie wensen uit te voeren.

Hoewel dit rapport dus geenszins pretendeert een detailstudie te zijn van de morfologische evolutie van elk deeltje van de Belgische kust, kunnen uit de gevonden resultaten toch enkele belangrijke waarnemingen gedestilleerd worden:

- De vooroever heeft langsheen bijna de gehele kustlijn een erosief karakter. De erosie situeert zich voornamelijk aan de vooroevervoet, met name in de zone waarin de steilere vooroever overgaat in de vlakke zeebodem. De erosieve zone bevindt zich hierbij nog wel op de vooroever (en niet op de zeebodem). Mogelijk is deze erosietrend geassocieerd met het steiler worden van de vooroeverzone (wat reeds in een eerdere studie is waargenomen, zie [8]).
- Op de locaties waar deze erosieve trend van de vooroevervoet niet wordt waargenomen wordt de morfologie vaak overheerst door een dominante morfologische structuur (bv. geulen die tot dicht tegen de kust naderen, vaste structuren zoals strandhoofden of strekdammen).
- Het droog strand vertoont vaak een zeer significante en sterke sedimentatietrend, voornamelijk gesitueerd aan (afhankelijk van welke van de twee aanwezig is) de dijk- of duinvoet. Deze trends treden op zowel in gebieden waar regelmatig strandophogingen plaatsvinden als gebieden waar geen menselijke invloed aanwezig is. Stranden waar rijshouthagen zijn aangeplant blijken onderhevig te zijn aan een zeer sterke sedimentatietrend.
- Op het nat strand is op zo goed als geen enkele locatie een significante trend waar te nemen.
- Grote infrastructuurwerken hebben een grote invloed op de morfologische evolutie van de omliggende zone (sedimentatie in de oksels van de strekdammen van de haven van Zeebrugge, sedimentatie rond de strandhoofden van Koksijde).

Een onderzoek is nooit volledig afgelopen en er zijn altijd verbeterpunten. Hieronder volgt een lijst met enkele aandachtspunten voor een eventuele vervolgstudie:

- Er dient opgelet te worden bij het gebruik van de dataset van 2003. Het is aan te raden van de ruwe meetgegevens te gebruiken i.p.v. de gedownsamplende dataset.
- De nauwkeurigheid van de lodingsgegevens zou afgeschat moeten worden, op basis hiervan zou een foutenvoortplantingsanalyse uitgevoerd moeten worden om zo te komen tot een onzekerheidsinterval op de morfologische trend (dus een ArcMap raster met voor elke rastercel de onzekerheid op de trend).
- De resultaten van de lineaire regressie zijn uiteraard des te betrouwbaarder indien meer datasets worden meegenomen in de analyse. Voor deze studie benadrukken we in dit opzicht nogmaals de abnormale waarden voor de dataset van 2003, en hiermee samenhangend het ontbreken van voldoende gegevens in de jaren voor en na 2003 (vooral voor de vooroever), wat maakt dat de

resultaten van de trendanalyses slechts beperkt geïnterpreteerd kunnen worden. Voor trendanalyses is het dus noodzakelijk dat de topobathymetrie op regelmatige basis en met voldoende kwaliteit wordt opgemeten.

- Het zou interessant en waardevol zijn indien bij elke nieuwe strandopmeting en/of vooroeverloding een update van de trendanalyse zou uitgevoerd worden en deze vergeleken zou worden met de eerder berekende trend. Dit zou een indicatie kunnen geven of bestaande trends bevestigd worden, of daarentegen de neiging hebben te verzwakken of te versterken.
- Suppleties, ophogingen, bagger- en stortactiviteiten zijn in dit rapport slechts in kwalitatieve zin opgenomen: ze worden vermeld, eventueel met ruwe inschatting van de jaarlijkse omvang. Het zou interessant zijn om na te gaan of deze gegevens ook kwantitatief kunnen verwerkt worden in de trendanalyse.

8 Referentielijst

- [1] Van Lancker, V., Baeye, M., Du Four, I., Degraer, S., Fettweis, M., Francken, F., Houziaux, J.S., Luyten, P., Van den Eynde, D., Devolder, M., De Cauwer, K., Monbaliu, J., Toorman, E., Portilla, J., Ullman, A., Liste Muñoz, M., Fernandez, L., Komijani, H., Verwaest, T., Delgado, R., De Schutter, J., Janssens, J., Levy, Y., Vanlede, J., Vincx, M., Rabaut, M., Vandenberghe H, Zeelmaekers, E, and Goffin, A. (2011). QUantification of Erosion/Sedimentation patterns to Trace the natural versus anthropogenic sediment dynamics (QUEST4D). Draft Final Report, January 2011. Science for Sustainable Development. Brussels: Belgian Science Policy, 93 pp. + Annex FINAL REPORT. Science for Sustainable Development. Brussels: Belgian Science Policy, 97 pp
- [2] website Quest4D: <http://www.vliz.be/projects/quest4d/>
- [3] Janssens, J.; Reyns, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2011). Morfologische evolutie van het Belgisch continentaal plat gedurende de laatste 150 jaar: Deelrapport in het kader van het Quest4D-project. Versie WL2011R814_02rev2_0. WL Rapporten. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- [4] Janssens, J.; Verwaest, T.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2008). Prognose van de evenwichtsligging van de kustlijn ter hoogte van de baai van Heist. WL rapporten, 765_29. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- [4] IMDC NV i.s.m. Rik Houthuys (2010). Morfologische evolutie van de Vlaamse kust tot 2009 ingedeeld in morfologisch homogene kuststroken, vanaf de eerste meetvlucht tot 2009, rekening houdend met de aangevoerde zandhoeveelheden. Rapport in het kader van het Geïntegreerd Kustveiligheidsplan, in opdracht van Afdeling Kust.
- [5] Teurlincx, R.; Van der Biest, K.; Reyns, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2009). Haven van Blankenberge – Verminderen van de aanzanding van de havengeul en het voorplein: Eindrapport. Versie 2_0. WL Rapporten, 643_12. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- [7] Janssens, J.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2009). Baai van Heist: Advies demping geul. Versie 2_0. WL Adviezen, 765_32. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België
- [8] EUROSENSE (1998). Studie over de versteiling van de vooroever langs de Vlaamse Kust: deel 1: Toelichtende tekst. Rapport in opdracht van Administratie Waterwegen en Zeewezen. Afdeling Waterwegen Kust: Oostende.

Appendix A: verband tussen erosietrends en determinatiecoëfficiënten bij morfologische en volumetrische trendanalyse

Verband tussen morfologische trendanalyse en volumetrische trendanalyse

In plaats van voor elk van de in hoofdstuk 6 gedefinieerde gebieden de kuberingen uit te voeren op de bathymetrische rasters en daarna op de bekomen volumes een lineaire regressielijn te berekenen kan men ook de kubering uitvoeren op het erosietrend-raster berekend in de morfologische trendanalyse (in feite wordt de volgorde van de bewerkingen omgedraaid: trendanalyse → kuberingen in plaats van het bij de volumetrische trendanalyse uitgevoerde kuberingen → trendanalyse). Het verband tussen beide berekeningswijzen wordt hieronder nagegaan.

Het volume aan sediment op een bepaalde datum i en binnen een bepaald afgebakend gebied S wordt berekend door voor bathymetrisch raster i alle dieptewaarden van de rastercellen binnen S op te tellen en te vermenigvuldigen met de celgrootte (in deze studie werd bij strand en vooroever overal een celgrootte van $2\text{m} \times 2\text{m} = 4\text{m}^2$ gehanteerd):

$$\begin{aligned} \text{(volume } i \text{ binnen gebied } S) &= -(\text{celgrootte}) \cdot \sum_{\text{cel } j \in S} [\text{bathymetrisch raster } i]_{\text{cel } j} \end{aligned} \quad (19)$$

Deze formule geeft het sedimentvolume boven een arbitrair niveau (hier TAW, daar alle rasters t.o.v. TAW gerefereerd zijn), het minteken brengt in rekening dat dieptes positief en hoogtes negatief worden uitgedrukt. Afhankelijk van het referentieniveau kunnen volumes dus negatief zijn, dit speelt echter geen rol aangezien we hier niet geïnteresseerd zijn in de volumes zelf maar in de opeenvolgende volumeveranderingen. Merk overigens op dat in de in hoofdstuk 6 getoonde grafieken van volumetrische evolutie de volumes voor het visueel gemak telkens gerefereerd zijn t.o.v. het eerste volume uit de tijdreeks.

De volumetrische trend wordt als volgt berekend:

$$\text{(volumetrische trend in gebied } S) = \sum_{i=1}^n (a_i) \cdot \text{(volume } i \text{ binnen gebied } S) \quad (20)$$

waarbij de coëfficiënten (a_i) gegeven worden door de formules van de kleinste kwadratenmethode:

$$(a_i) = \frac{n \cdot (\text{datum } i) - \sum_{i=1}^n (\text{datum } i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\text{datum } i)^2 - (\sum_{i=1}^n (\text{datum } i))^2} \quad (21)$$

Hierbij wordt impliciet verondersteld dat voor elk bathymetrisch raster i alle dieptewaarden binnen gebied S zijn opgemeten op dezelfde datum i . We veronderstellen voor het gemak dat dit inderdaad zo is, in dit geval geldt dan dat binnen gebied S de datumrasters uit formule (2) vervangen kunnen worden door scalars, waardoor formule (2) overgaat in bovenstaande formule (21). Invullen van (19) in (20) geeft dan:

(volumetrische trend in gebied S)

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{i=1}^n (a_i) \cdot \left\{ -(\text{celgrootte}) \cdot \sum_{\text{cel } j \in S} [\text{bathymetrisch raster } i]_{\text{cel } j} \right\} \\
 &= -(\text{celgrootte}) \cdot \sum_{\text{cel } j \in S} \left\{ \sum_{i=1}^n (a_i) \cdot [\text{bathymetrisch raster } i]_{\text{cel } j} \right\} \tag{22} \\
 &= -(\text{celgrootte}) \cdot \sum_{\text{cel } j \in S} [\text{erosietrend}]_{\text{cel } j}
 \end{aligned}$$

waarbij in de laatste stap gebruik is gemaakt van formule (1).

Uit (22) blijkt dus dat de volumetrische trend in een gebied S ook berekend kan worden door eerst een morfologische trendanalyse uit te voeren en daarna op het resulterend erosietrend-raster een kubering binnen het gebied S uit te voeren. Beide berekeningswijzen geven in theorie hetzelfde resultaat. In de praktijk kunnen echter kleine verschillen optreden, enkele mogelijke oorzaken van deze verschillen worden hieronder opgesomd:

- Zoals reeds eerder vermeld introduceert ArcMap bij het kuberen/sommen soms kleine afwijkingen.
- Bij de morfologische trendanalyse worden doorgaans meer datasets gebruikt dan bij de volumetrische trendanalyse. Inderdaad kan men bij de volumetrische trendanalyse in een welbepaald gebied enkel gebruik maken van lodingen die het hele desbetreffende gebied dekken. De morfologische trendanalyse is hier echter flexibeler in: hierbij wordt de analyse per rastercel uitgevoerd en kan men bijgevolg gebruik maken van alle lodingen, ook degene die niet het hele gebied in kwestie dekken. Het gebruik van deze extra lodingen maakt dat bij het sommeren van de morfologische trends een licht verschillend resultaat wordt bekomen dan bij de volumetrische trendanalyse.
- Tot slot wijzen we er ook op dat bij een trendanalyse ook de exacte datum van de verschillende lodingen gekend moet zijn (deze zitten vervat in de coëfficiënten a_i). Eerder is de veronderstelling gemaakt dat binnen elk gebied alle dieptewaarden van bathymetrisch raster i zijn opgemeten op dezelfde datum i . Dit gaat in realiteit vaak op voor de strandopmetingen, maar slechts zelden voor de vooroeverlodingen, zodat bij de volumetrische trendanalyse van de vooroever is gewerkt met een over het betreffende gebied uitgemiddelde opnamedatum i . Ook hierin is de morfologische trendanalyse flexibeler en stelt zich dit probleem niet: bij de morfologische trendanalyse kan immers per rastercel voor elke dieptewaarde gekeken worden naar de lokale opnamedatum van die dieptewaarde. Deze flexibiliteit zit vervat in het gebruik van datumrasters (zie basisformules (2), (3) en (5)) in plaats van een enkele vaste gemiddelde waarde voor de opnamedatum. Aangezien de coëfficiënten a_i geen lineaire uitdrukking zijn van de verschillende opnamedatum i (zie formule (2) of (21)) leidt dit alles bijgevolg eveneens tot een verschil in volumetrend tussen beide berekeningsmethodes.

Merk op dat het over een gebied uitmiddelen van de R^2 -waarden bekomen met de morfologische trendanalyse niet overeenkomt met de R^2 -waarde bekomen met de volumetrische trendanalyse voor dat gebied. De verklaring hiervoor ligt in de formules voor R^2 (formules (3), (4), (5) en (6)), deze vormen immers geen lineaire uitdrukking in functie van de bathymetrische rasters i , dit in tegenstelling tot de formule voor de grootte van de trend (formule (1)) (voor zover men geen rekening houdt met de variatie van de opnamedatum van een bepaalde loding in een bepaald gebied).

We gaan in het resterende deel van deze appendix na of er voor een gegeven afgebakend gebied een verband is tussen enerzijds de gemiddelde R^2 -waarde berekend met de morfologische trendanalyse en anderzijds de R^2 -waarde berekend met de volumetrische trendanalyse.

Verband tussen de uitgemiddelde R^2 -waarde van de morfologische trendanalyse en de R^2 -waarde van de volumetrische trendanalyse

a) algemeen

Merken we vooreerst op dat de R^2 -waarde –in tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt– geen absolute maat is voor de afwijkingen van de datapunten ten opzichte van de lineaire fit, maar een relatieve maat. Het kan immers aangetoond worden dat bij een enkelvoudige lineaire regressie² aan een dataset (x_i, y_i) de determinatiecoëfficiënt R^2 geschreven kan worden in volgende vorm:

$$R^2 = \frac{1}{1 + \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{(\text{rico})^2} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (23)$$

In deze formule is rico de richtingscoëfficiënt van de best passende rechte, f_i de door het model voorspelde functiewaarde voor x_i , en \bar{x} de gemiddelde waarde van alle x_i .

Bovenstaande uitdrukking (23) kan bondiger geformuleerd worden als volgt:

$$R^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma_e}{s}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2}} \quad (24)$$

² Vaak wordt foutief verondersteld dat bij een *lineaire* regressie de datapunten aan een *rechte* gefit worden. Een lineaire regressie is een regressie waarbij het voorgestelde model een lineaire uitdrukking is in de (te bepalen) regressiecoëfficiënten. Als men bijvoorbeeld de datapunten tracht te fitten aan een tweedegraadsfunctie ($y = ax^2 + bx + c$), is er dus sprake van een lineaire regressie aangezien het voorgestelde model een lineaire uitdrukking is in de te bepalen regressie-coëfficiënten a , b en c . Indien men de datapunten fit aan bijvoorbeeld een exponentiële functie van de vorm $y = a \cdot x^b$ kan men niet van lineaire regressie spreken, daar het voorgestelde model niet lineair is in de parameter b . Indien men de datapunten aan een rechte fit, spreekt men van *enkelvoudige* lineaire regressie. Merk ook op dat bij het uitvoeren van een regressie in principe vermeld zou moeten worden welke schattingstechniek gebruikt is om de regressiecoëfficiënten te bepalen, i.e. er dient aangegeven te worden welke grootheid geminimaliseerd wordt bij het berekenen van de regressiecoëfficiënten. De meest gebruikte schattingstechniek is de kleinste-kwadratenmethode, waarbij de regressiecoëfficiënten zo bepaald zijn dat de som van de kwadraten van de verticale afstanden tussen de datapunten en de overeenkomstige door het model voorspelde waarden (dus $\sum (y_i - f_i)^2$) minimaal is. Er bestaan echter nog vele andere criteria voor het bepalen van de regressiecoëfficiënten (minimaliseren van de som van de absolute waarden van de verticale afwijkingen tussen datapunten en model, minimaliseren van de som van de absolute waarden van de kleinste mogelijke afwijkingen tussen datapunten en model, ...). In dit rapport is enkel gebruik gemaakt van een enkelvoudige lineaire regressie in combinatie met de kleinste-kwadratenmethode.

Hierbij is r vervangen door het symbool s ("slope") en gebruik gemaakt van de notatie voor standaardafwijking:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (25)$$

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (26)$$

met $e_i = y_i - f_i$ en bijgevolg $\bar{e} = 0$ (vermits $\bar{f} = \bar{y}$).

Formule (24) is een interessante formule, in die zin dat ze expliciet aangeeft hoe een R^2 -waarde afhangt van de fluctuaties op de datapunten (wat vaak weinig geweten is, doorgaans reikt de interpretatie niet verder dan dat de R^2 -waarde aangeeft "hoe goed de datapunten op een rechte gelegen zijn").

Uit formule (24) blijkt dat de R^2 -waarde van een trend enkel afhangt van de *verhouding* van de magnitude van de fluctuaties op de datapunten (uitgedrukt door σ_e) tot de grootte van de trend zelf (de richtingscoëfficiënt s). Dit betekent dat grote fluctuaties toch een grote R^2 -waarde kunnen opleveren, indien de trend sterk is. Omgekeerd kunnen kleine fluctuaties toch tot een weinig significante trend leiden indien de trend zelf zwak is (s klein in absolute waarde). Overigens volgt uit vergelijking (24) dat indien $s = 0$ de R^2 -waarde niet gedefinieerd is: zelfs indien alle datapunten perfect op een horizontale rechte liggen is R^2 onbepaald (het is een wijdverspreide misvatting dat R^2 dan gelijk aan 1 zou zijn omdat de data op één rechte lijn liggen).

Merk op dat de R^2 -waarde in principe ook nog afhankelijk is van de spreiding op de x -waarden (de opnamedatums) via σ_x . Voor deze specifieke discussie (morfologische versus volumetrische trendanalyse) is dit echter weinig relevant, daar binnen een gegeven afgebakend gebied voor de meeste rastercellen geldt dat de tijdreeks van dieptewaarden opgemeten zijn op dezelfde of alleszins toch weinig verschillende opnamedatums. We mogen dus stellen dat alle rastercellen een vergelijkbare σ_x vertonen (met mogelijk iets grotere verschillen in σ_x tussen rastercellen van vooroeverzones dan tussen rastercellen van strandzones, aangezien bij eerstgenoemde wel een –beperkt– verschil in opnamedatums is, daar strandopmetingen en vooroeverlodingen deel uitmaken van twee totaal verschillende meetcampagnes), en dat deze quasi overeenkomen met de σ_x -waarde van de volumetrische trendanalyse van dat afgebakend gebied.

b) morfologische versus volumetrische trendanalyse

We starten bij de morfologische trendanalyse binnen een afgebakend gebied S dat N rastercellen j omvat. In elke rastercel j beschikken we over een tijdreeks van n dieptewaarden (x_i, y_{ij}) , waarbij we veronderstellen dat de opnamedatums x_i voor alle cellen dezelfde zijn.

De morfologische trendanalyse (= de enkelvoudige lineaire regressie met de kleinste-kwadratenmethode) op cel j levert een erosietrend s_j (= de helling van de best passende rechte aan de datapunten in cel j) met een determinatiecoëfficiënt R_j^2 . Verder noemen we f_i de dieptewaarde op ogenblik x_i zoals voorspeld door het lineaire model. De verticale afwijking tussen datapunt i en overeenkomstige modelwaarde is dan gelijk aan $e_{ij} = y_{ij} - f_{ij}$.

De volumetrische trendanalyse op gebied S bestaat erin een enkelvoudige lineaire regressie met de kleinste-kwadratenmethode uit te voeren op de tijdreeks van sedimentvolumes boven een arbitrair niveau binnen S . Deze tijdreeks wordt gegeven door $(x_i, y_{i, vol}) = (x_i, -l^2 \cdot \sum_j y_{ij})$, waarbij l de zijde van de (vierkante) rastercel is. Dit resulteert dan in een volumetrische trend s_{vol} met een determinatiecoëfficiënt R_{vol}^2 . Zoals hierboven stellen we de verticale afwijking tussen datapunt i en modelwaarde gelijk aan $e_{i, vol} = y_{i, vol} - f_{i, vol}$.

Eerder is reeds aangetoond dat het verband tussen enerzijds de morfologische trends in de rastercellen binnen S en anderzijds de volumetrische trend binnen S gegeven wordt door (zie formule (22)):

$$s_{vol} = -l^2 \cdot \sum_{j=1}^N s_j \quad (27)$$

Daarbij werd echter opgemerkt dat het gemiddelde \bar{R}^2 van alle determinatiecoëfficiënten van de morfologische trendanalyse over alle cellen binnen S niet overeenkomt met de determinatiecoëfficiënt R_{vol}^2 van de volumetrische trendanalyse, waarbij \bar{R}^2 gegeven wordt door:

$$\bar{R}^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N R_j^2 \quad (28)$$

Dit is op zich niet zo vreemd, daar de formules voor het berekenen van de determinatiecoëfficiënt niet lineair zijn. In deze sectie gaan we na of er op een of andere manier toch een verband is tussen \bar{R}^2 en R_{vol}^2 , en of dit verband bijkomende informatie over de aarde van de trend kan leveren.

Hiertoe maken we gebruik van formule (24) en benaderen we de uitdrukking uit deze formule met een reeksontwikkeling waarbij enkel de 0^{de} en 1^{ste} graadsterm zijn behouden:

$$R^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma_e}{s}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2}} \approx 1 - \left(\frac{\sigma_e}{s}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (29)$$

Hierbij is gebruik gemaakt van $1/(1+u) = 1 - u + u^2 - u^3 + u^4 - \dots \approx 1 - u$. We komen later terug op het gebruik van deze reeksontwikkeling en de afkapping na twee termen. Voor de definities van de standaardafwijkingen σ_e en σ_x verwijzen we naar formules (25) en (26).

Met formule (29) komen we voor \bar{R}^2 tot de volgende uitdrukking:

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \quad (30)$$

Voor de volumetrische trend merken we eerst op dat

$$y_{i,vol} = -l^2 \cdot \sum_{j=1}^N y_{ij} \quad (31)$$

en dat eenvoudig aangetoond kan worden (m.b.v. formule (27)) dat

$$f_{i,vol} = -l^2 \cdot \sum_{j=1}^N f_{ij} \quad (32)$$

zodat ook

$$e_{i,vol} = -l^2 \cdot \sum_{j=1}^N e_{ij} \quad (33)$$

Voor de standaardafwijking $\sigma_{i, \text{vol}}$ geldt dan

$$\begin{aligned}
 \sigma_{e, \text{vol}}^2 &\equiv \sum_{i=1}^n e_{i, \text{vol}}^2 \\
 &= l^4 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^N e_{ij} \right)^2 \\
 &= l^4 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N e_{ij} \cdot e_{ik} \\
 &\leq l^4 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{e_{ij}^2 + e_{ik}^2}{2} \\
 &\leq l^4 \cdot N \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N e_{ij}^2 \\
 &\leq l^4 \cdot N \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_{e, j}^2
 \end{aligned} \tag{34}$$

Hierbij is bij de overgang van de derde naar de vierde regel gebruik gemaakt van de voor alle reële getallen a en b geldende eigenschap dat $(a - b)^2 \geq 0$, waaruit volgt dat $(a^2 + b^2)/2 \geq ab$.

Vullen we dit in in formule (29), dan bekomen we

$$\begin{aligned}
 R_{\text{vol}}^2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma_{e, \text{vol}}}{s_{\text{vol}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2}} \\
 &\approx 1 - \left(\frac{\sigma_{e, \text{vol}}}{s_{\text{vol}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \\
 &\geq 1 - \frac{l^4 \cdot N \cdot \sum_{j=1}^N \sigma_{e, j}^2}{s_{\text{vol}}^2} \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \\
 &\geq 1 - \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{e, j}^2}{N \cdot \bar{s}^2} \cdot \frac{1}{\sigma_x^2}
 \end{aligned} \tag{35}$$

waarbij in de laatste stap de gemiddelde morfologische erosietrend \bar{s} gedefinieerd is als

$$\begin{aligned}\bar{s} &\equiv \frac{1}{N} \cdot \sum_{j=1}^N s_j \\ &= -\frac{1}{N} \cdot \frac{S_{vol}}{l^2}\end{aligned}\tag{36}$$

In de laatste stap is formule (27) toegepast.

Onder voorwaarde dat de voorgaande benadering (reeksontwikkeling en afkapping van de reeksontwikkeling na twee termen) opgaat, kunnen we bijgevolg stellen dat (formules (30) en (35))

$$\begin{aligned}R_{vol}^2 &> \bar{R}^2 \\ \Leftrightarrow 1 - \left(\frac{\sigma_{e,vol}}{S_{vol}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} &> 1 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \\ \Leftrightarrow 1 - \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{e,j}^2}{N \cdot \bar{s}^2} \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} &> 1 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \cdot \frac{1}{\sigma_x^2} \\ \Leftrightarrow \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_{e,j}^2}{\bar{s}^2} &< \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \\ \Leftrightarrow \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \left(\frac{s_j}{\bar{s}}\right)^2 &< \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \\ \Leftrightarrow \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{s_j}{\bar{s}}\right)^2\right] &> 0\end{aligned}\tag{37}$$

Dus:

$$\boxed{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{s_j}{\bar{s}}\right)^2\right] > 0 \Rightarrow R_{vol}^2 > \bar{R}^2}\tag{38}$$

En omgekeerd volgt hieruit ook:

$$\boxed{R_{vol}^2 \leq \bar{R}^2 \Rightarrow \sum_{j=1}^N \left(\frac{\sigma_{e,j}}{s_j}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{s_j}{\bar{s}}\right)^2\right] \leq 0}\tag{39}$$

We bespreken kort deze uitdrukkingen:

- In formule (38) zal de factor $[1 - (s_j/\bar{s})^2]$ negatief zijn wanneer $|s_j| > |\bar{s}|$, dus voor rastercellen met een erosietrend groter dan de gemiddelde trend. Wanneer binnen afgebakend gebied erosie- en sedimentatietrends in balans zijn, zal $|\bar{s}|$ relatief klein zijn en voor de meeste rastercellen zal de factor $[1 - (s_j/\bar{s})^2]$ negatief zijn. Bijgevolg zal niet aan het linkerlid in (38) voldaan zijn en kan uit uitdrukking (38) geen sluitende conclusie getrokken worden.
- Interessanter is het wanneer het gebied zo afgebakend wordt dat binnen het gebied slechts 1 welbepaalde trend overheerst (enkel erosie of enkel sedimentatie). De uitdrukking aan de linkerkant van (38) zal dan positief zijn indien binnen het afgebakend gebied de cellen met een sterke trend (= een grote $|s_j|$) in het algemeen een kleinere $(\sigma_{e,j}/s_j)^2$ -waarde (= kleinere relatieve fluctuaties, of dus een grotere R_j^2 -waarde) vertonen dan de zwakkere trends binnen het afgebakende gebied. Merk op dat indien er geen correlatie bestaat tussen de $\sigma_{e,j}$ - en de s_j -waarden van de rastercellen, er steeds voldaan is aan het linkerlid in (38) en dan bijgevolg altijd geldt dat $R_{vol}^2 > \bar{R}^2$.
- Uitdrukking (38) geeft een voldoende maar niet nodige voorwaarde opdat $R_{vol}^2 > \bar{R}^2$, vandaar ook de enkele pijl. Deze enkele pijl werd geïntroduceerd in de derde regel van (37) en is het gevolg van de ongelijkheid uit de afleiding in (34). Deze ongelijkheid kan voldoende marge bieden zodat het mogelijk is dat niet aan de in (38) gestelde voorwaarde is voldaan en toch geldt dat $R_{vol}^2 > \bar{R}^2$.
- Er kan geen eenvoudige algemene voorwaarde afgeleid worden waaruit de tegengestelde conclusie $R_{vol}^2 < \bar{R}^2$ volgt. Inderdaad kan voor een elke willekeurige set van $\sigma_{e,j}$ -waarden (resultierend in een welbepaalde \bar{R}^2) de waarde voor R_{vol}^2 bijna willekeurig dicht bij 1 naderen indien $\sum_{j=1}^N e_{ij}$ zeer klein wordt (bijvoorbeeld als voor een bepaald datapunt de positieve afwijkingen in de ene rastercel gecompenseerd worden door de negatieve afwijkingen in andere rastercellen en vice versa). Hieruit volgt dan ook dat een eventuele voorwaarde voor $R_{vol}^2 < \bar{R}^2$ rekening moet houden met de autocorrelaties van de afwijkingen (waarbij de autocorrelaties dienen berekend te worden voor elk datapunt i apart maar wel over alle rastercellen j van het afgebakend gebied). Zulk een voorwaarde is in principe relatief vrij eenvoudig op te stellen, maar in de context hier minder bruikbaar voor interpretaties.
- Omgekeerd (zie uitdrukking (39)) volgt uit $R_{vol}^2 < \bar{R}^2$ dat er een correlatie is tussen de $\sigma_{e,j}$ - en de s_j -waarden. Meer bepaald geldt in dit geval dat de kleinste afwijkingen (dus de grootste significantie) gevonden wordt bij de rastercellen met de zwakste trend. Merk echter op dat dit laatste in de praktische toepassing van trends bij bathymetrische rasters normaal niet voorkomt. Zie hiervoor ook de erosie/sedimentatie-kaarten uit sectie 5.4, waar men visueel kan vaststellen dat integendeel de cellen met de sterkste trends ook de cellen zijn met de hoogste R^2 -waarden (en dus ook met de laagste verhouding σ_e/s , zie formule (28) voor het verband tussen R^2 en σ_e/s).

Bij bovenstaande bespreking dient evenwel de bemerking geplaatst te worden dat de reeksontwikkeling $1/(1+u) = 1 - u + u^2 - u^3 + u^4 - \dots$ enkel convergeert indien $u < 1$ (of dus enkel indien $R^2 > 0,5$). De beperking van deze reeks tot de eerste twee termen is een zeer grove benadering en is in feite enkel gerechtvaardigd voor zeer kleine u -waarden (of dus enkel voor cellen met een R^2 -waarde zeer dicht bij 1).



Waterbouwkundig Laboratorium

Flanders Hydraulics Research

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.watlab.be