

# Prognose van de evenwichtsligging van de kustlijn ter hoogte van de baai van Heist



765\_29 WL Rapporten

# **Prognose van de evenwichtsligging van de kustlijn ter hoogte van de baai van Heist**

Janssens J.; Verwaest T.; De Mulder T.; Mostaert F.

September 2008

WL2008R765\_29\_rev2\_0

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

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



**Waterbouwkundig Laboratorium**

*Flanders Hydraulics Research*

Berchemlei 115  
B-2140 Antwerpen  
Tel. +32 (0)3 224 60 35  
Fax +32 (0)3 224 60 36  
E-mail: [waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)  
[www.watlab.be](http://www.watlab.be)

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaandelijke schriftelijke toestemming van de uitgever.

Foto voorpagina: Mediatheek Fluxys - Fotograaf: Luchtfotografie Patrick Hendrickx

## Documentidentificatie

Titel:	Prognose van de evenwichtsligging van de kustlijn ter hoogte van de baai van Heist		
Opdrachtgever:	Afdeling Kust	Ref.:	WL2008R765_29_rev2_0
Keywords (3-5):	baai, Heist, sedimentatie, trendanalyse		
Tekst (p.):	22	Tabellen (p.):	/
Bijlagen (p.):	/	Figuren (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input type="checkbox"/> Ja	Uitzondering:	<input type="checkbox"/> Opdrachtgever
	<input checked="" type="checkbox"/> Nee		<input type="checkbox"/> Intern
			<input type="checkbox"/> Vlaamse overheid
		Vrijgegeven vanaf	

## Goedkeuring

<b>Auteur</b> Janssens Job	<b>Revisor</b> Verwaest Toon	<b>Projectleider</b> Janssens Job	<b>Afdelingshoofd</b> Mostaert Frank
-------------------------------	---------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------------

## Revisies

Nr.	Datum	Omschrijving	Auteur
1_0	16/06/2008	Conceptversie	Janssens J.
1_1	07/07/2008	Inhoudelijke revisie	Verwaest T
1_2	22/08/2008	Revisie opdrachtgever	De Wolf P
2_0	04/09/2008	Definitieve versie	Janssens J.

## Abstract

Sinds de aanbouw van de buitenhaven van Zeebrugge is er een sedimentatiegebied ontstaan in de luwte van de oostelijke strekdam (de zogenaamde baai van Heist). Op basis van een tijdreeks van bathymetrische gegevens van de baai van Heist wordt een lineaire trendanalyse uitgevoerd, wat resulteert in een kaart van het desbetreffende gebied die de locale erosie- en sedimentatiesnelheden weergeeft. Op basis van deze kaart kunnen de grenzen van het sedimentatiegebied vrij nauwkeurig afgebakend worden.

Een correlatiestudie toont verder aan dat de sedimentatie in de baai van Heist preferentieel optreedt enerzijds op plaatsen met een lage kwadratisch gemiddelde stroomsnelheid (berekend met een in een eerdere studie opgesteld numeriek Delft3D stromingsmodel) en anderzijds langsheen een boog parallel met en gelegen kort bij de oostelijke strekdam. Het eerste effect is te wijten aan de lagere bodemschuifspanningen die optreden bij lage stroomsnelheden, met als gevolg een verhoogde sedimentatie en een verlaagde erosie. Het mechanisme achter het tweede effect is nog onduidelijk.

Tot slot wordt op basis van een extrapolatie van de sedimentatietrends een voorspelling gemaakt van de toekomstige evenwichtsligging van de kustlijn in de omgeving van Heist. Verwacht wordt dat het gebied begrensd door een rechte vertrekkend aan de aanzet van de knik in de oostelijke strekdam en eindigend halverwege het Albertstrand gedurende de komende decaden zal verzanden. Er dient echter benadrukt te worden dat deze prognose een expert judgement is, gebaseerd op de huidige inzichten. Bijkomende metingen en onderzoek zijn vereist voor een meer betrouwbare prognose.

## Inhoudstafel

<b>Inhoudstafel</b> .....	<b>I</b>
<b>Lijst van de figuren</b> .....	<b>II</b>
<b>1 Doelstelling</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Trendanalyse van de bathymetrische gegevens</b> .....	<b>2</b>
2.1 Beschikbare dataset .....	2
2.2 Gebruikte methodologie .....	4
2.3 Resultaten en bespreking .....	6
<b>3 Het hydrodynamisch model</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Correlatiestudie</b> .....	<b>13</b>
4.1 Correlatie tussen de erosiesnelheid en de getijgemiddelde kwadratische stroomsnelheid .....	13
4.2 Correlatie tussen enerzijds de erosiesnelheid en anderzijds de getijgemiddelde kwadratische stroomsnelheid en de locatie .....	16
<b>5 Prognose</b> .....	<b>19</b>
<b>6 Samenvatting</b> .....	<b>21</b>
<b>7 Referenties</b> .....	<b>22</b>

## Lijst van de figuren

Figuur 1 – Bathymetrische kaarten van de baai van Heist voor verschillende jaartallen .....	3
Figuur 2 – Kaart met dieptegegevens van 2003, met aanduiding van de beschouwde roostercel op de zandbank (groen kruisje) en de meer zeewaarts gelegen roostercel (rood kruisje).....	4
Figuur 3 – Dieptegegevens en best passende rechte van de roostercel op de zandbank .....	5
Figuur 4 – Dieptegegevens en best passende rechte van de meer zeewaarts gelegen roostercel.....	5
Figuur 5 – Erosie in cm/jaar in de baai van Heist.....	6
Figuur 6 – Waarde van de determinatiecoëfficiënt $R^2$ in de baai van Heist .....	6
Figuur 7 – Erosie in cm/jaar in de baai van Heist, enkel de gebieden met $R^2 > 0,5$ zijn weergegeven .....	8
Figuur 8 – Afbakening van de sedimentatiezone in de baai van Heist .....	8
Figuur 9 – Stromingspatronen gedurende een getijcyclus in de baai van Heist .....	11
Figuur 10 – Getijgemiddelde van het kwadraat van de stroomsnelheid in de baai van Heist, gebaseerd op het numeriek hydrodynamisch model .....	13
Figuur 11 – Aanduiding van het interessegebied (rode veelhoek) voor de correlatiestudie .....	14
Figuur 12 – Erosiesnelheid weergegeven als functie van de getijgemiddelde kwadratische stromingssnelheid $v^2$ .....	15
Figuur 13 – Aanduiding van de cirkelboog (rode cirkel) langs dewelke uitgesproken sedimentatietrends zijn waar te nemen .....	16
Figuur 14 – Erosiesnelheid als functie van $v^2 + d/A$ .....	17
Figuur 15 – Kwalitatieve weergave van het sedimentatiepatroon in de baai van Heist .....	18
Figuur 16 – Jaar waarin de diepte voor het eerst 0 m TAW bereikt bij een voortzetting van de lineaire sedimentatietrend.....	19
Figuur 17 – Prognose van de evenwichtskustlijn die voorzien wordt bereikt te worden binnen enkele decaden .....	20

## 1 Doelstelling

Sinds de aanbouw van de buitenhaven van Zeebrugge is er een sedimentatiegebied ontstaan in de luwte van de oostelijke strekdam (de zogenaamde baai van Heist). De wijziging van de morfologie in dit gebied was reeds voorwerp van de studies in [1] en [2]. In [1] werd een trendanalyse uitgevoerd op de het verloop in de tijd van de sedimenthoeveelheid aanwezig in bepaalde deelgebieden van de baai van Heist, terwijl [2] voornamelijk een modelleerstudie omvatte.

Doelstelling van deze studie is de grenzen van het sedimentatiegebied duidelijk af te bakenen. Tevens zal getracht worden een prognose te geven voor de toekomstige morfologische evolutie van de baai van Heist.

Bovenstaande doelstellingen zullen bewerkstelligd worden door een trendanalyse uit te voeren op een beschikbare tijdreeks van dieptegegevens in het desbetreffende gebied. In die zin is deze studie een verfijning van de studie beschreven in [1]. De uit deze analyse resulterende sedimentatietrends zullen vervolgens gelinkt worden aan de in de baai van Heist optredende stromingspatronen, die werden berekend met een numeriek hydrodynamisch model, dat beschreven staat in [3]. Op deze manier zal getracht worden meer inzicht in het sedimentatieproces te verkrijgen, en tevens om een achterliggende “drijvende kracht” voor dit proces te identificeren.

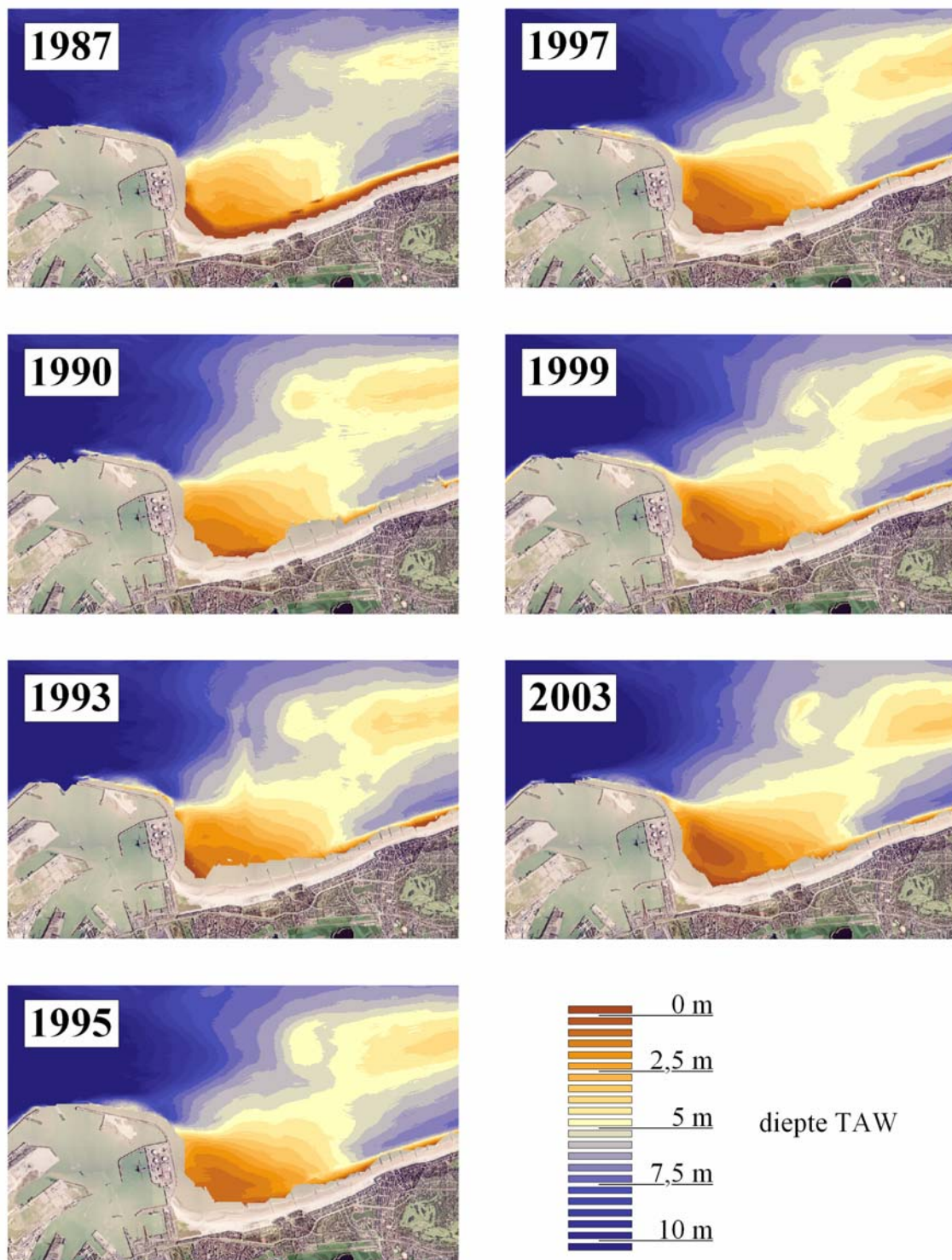
## 2 Trendanalyse van de bathymetrische gegevens

### 2.1 Beschikbare dataset

In dit hoofdstuk wordt een lineaire trendanalyse uitgevoerd op de beschikbare morfologische dataset. Deze dataset omvat bathymetrische kaarten, ter beschikking gesteld door Rijkswaterstaat Zeeland – Meetadviesdienst. De bathymetrische kaarten hebben een resolutie van 20 m x 20 m en zijn opgesteld aan de hand van singlebeam-echolodingen, opgenomen in raaien loodrecht op de kust. Het raster met de 20 m x 20 m roosterzellen –waarbij aan elke roostercel een dieptewaarde wordt toegekend– wordt bekomen door uitmiddelen en interpolatie van de singlebeam-dieptemetingen. Voor de trendanalyse van de dieptegegevens wordt gebruik gemaakt van 7 kaarten waarvan de gegevens respectievelijk werden opgemeten in de jaren 1987, 1990, 1993, 1995, 1997, 1999 en 2003. Oudere gegevens zijn eveneens beschikbaar, maar worden niet in de analyse verwerkt: bedoeling is immers om de natuurlijke morfologische evolutie van de baai van Heist te onderzoeken onder invloed van de strekdammen van Zeebrugge, waarvan de bouw pas in 1985 voltooid is.

Figuur 1 toont de 7 bathymetrische kaarten voor de verschillende jaartallen zoals hierboven gegeven. De betekenis van de verschillende kleuren is eveneens aangeduid, dieptes zijn weergegeven in meter onder het TAW-niveau, en het verschil tussen twee opeenvolgende kleuren bedraagt 0,5 m. Op bathymetrische kaarten in Figuur 1 kan duidelijk de globale sedimentatietrend in de baai van Heist worden waargenomen, evenals de vorming van de bank van Heist.





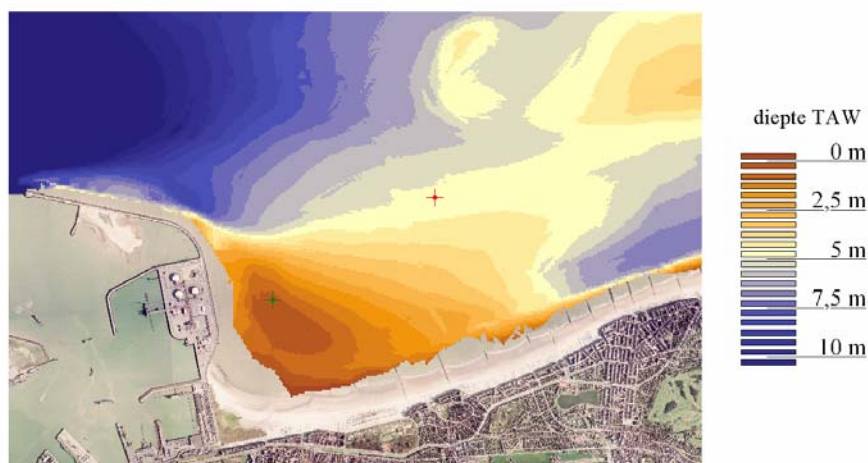
Figuur 1 – Bathymetrische kaarten van de baai van Heist voor verschillende jaartallen

## 2.2 Gebruikte methodologie

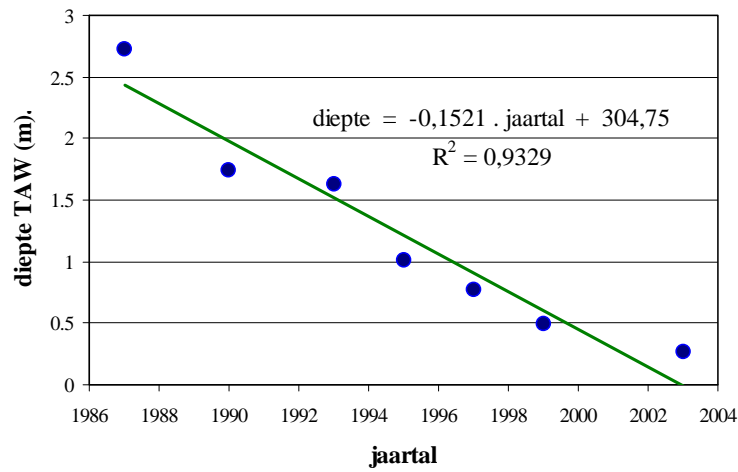
De morfologische evolutie van de zeebodem wordt nu geanalyseerd door van de tijdsafhankelijke dieptegegevens van elke 20 m x 20 m roostercel een lineaire kleinste-kwadratenbenadering uit te voeren. Deze methode is gevisualiseerd in Figuur 3 voor een van de roostercellen op de zandbank (de exacte positie van de roostercel is weergegeven Figuur 2 door middel van een groen kruisje): de blauwe punten geven de dieptewaarden van de roostercel voor de aangeduide jaartallen, de groene lijn is de best passende rechte door deze punten. De grafiek geeft duidelijk weer dat de dieptes in deze roostercel afnemen in tijd, m.a.w. in de beschouwde roostercel treedt sedimentatie op. De richtingscoëfficiënt (de helling) van deze rechte geeft de globale erosiesnelheid (in meter per jaar) tussen 1987 en 2003. Een negatieve richtingscoëfficiënt moet bijgevolg geïnterpreteerd worden als een sedimentatietrend. In het beschouwde voorbeeld bedraagt de richtingscoëfficiënt -0,15, en is er dus een globale verhoging van de zeebodem van 15 cm per jaar.

De kwaliteit van de kleinste-kwadratenbenadering wordt gegeven door de determinatiecoëfficiënt  $R^2$ , die voor elke roostercel ook berekend kan worden uit de jaartallen en de corresponderende dieptegegevens.  $R^2$  varieert tussen 0 en 1, waarden dicht bij 1 duiden erop dat de best passende rechte de dieptegegevens goed benadert. Aan de determinatiecoëfficiënt kan bovendien volgende interpretatie gegeven worden:  $R^2$  geeft het aandeel van de variatie in dieptegegevens die verklaard kan worden door het lineair model. In het beschouwde voorbeeld heeft  $R^2$  een waarde van 0,93, wat duidt op een goede kwaliteit van de benaderende rechte. Bovendien kan gesteld worden dat 93% van de variatie in de dieptegegevens verklaard kan worden door deze best passende rechte, de resterende 7% van de variatie wordt niet voorspeld door de rechte en moet gezien worden als fluctuaties ten opzichte van het vooropgestelde lineaire model.

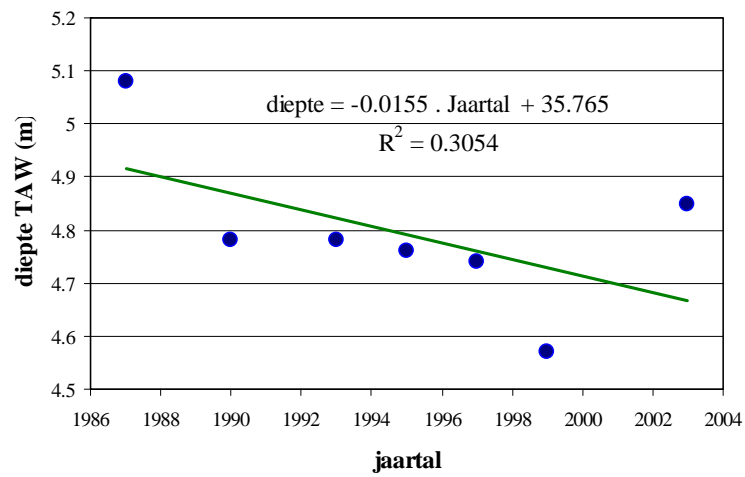
Ter illustratie is Figuur 4 in eveneens een grafiek opgenomen die de dieptegegevens en best passende rechte toont van een meer zeewaarts gelegen roostercel (de exacte positie van deze roostercel is aangegeven door het rode kruisje in Figuur 2). Globaal gezien is tussen 1987 en 2003 eveneens sedimentatie opgetreden, de waarde van de determinatiecoëfficiënt ( $R^2 = 0,31$ ) is echter te laag om van een trend te kunnen spreken. De opgetreden sedimentatie is dus te beschouwen als het gevolg van willekeurige fluctuaties.



Figuur 2 – Kaart met dieptegegevens van 2003, met aanduiding van de beschouwde roostercel op de zandbank (groen kruisje) en de meer zeewaarts gelegen roostercel (rood kruisje)



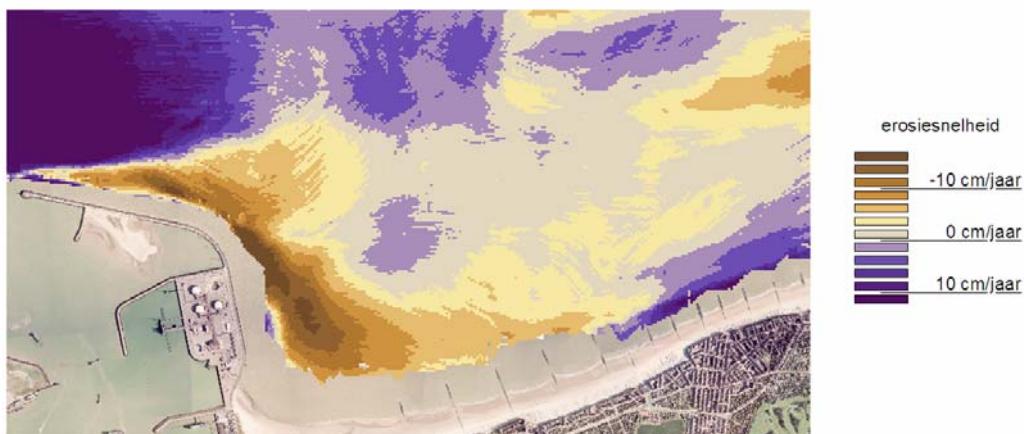
Figuur 3 – Dieptegegevens en best passende rechte van de roostercel op de zandbank



Figuur 4 – Dieptegegevens en best passende rechte van de meer zeewaarts gelegen roostercel

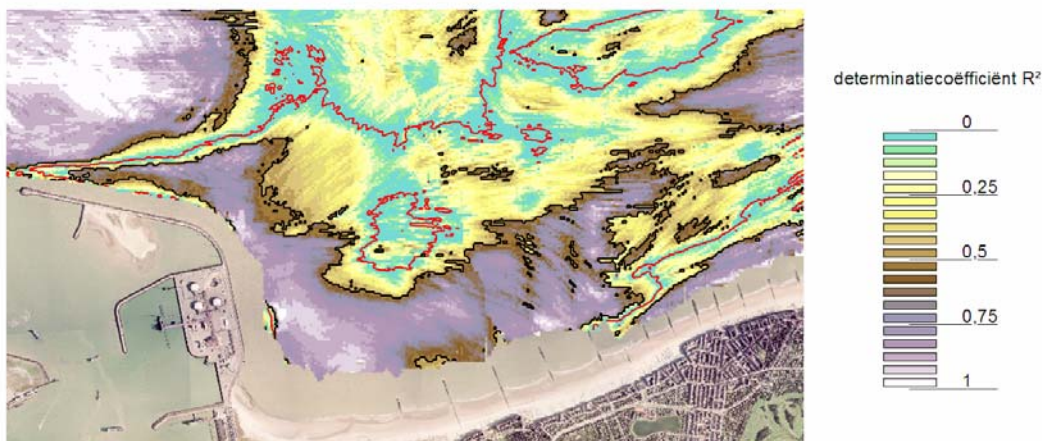
### 2.3 Resultaten en bespreking

De trendanalyse zoals hierboven uitgelegd wordt nu uitgevoerd voor elke roostercel van het raster met dieptegegevens. Dit geeft voor elke roostercel de erosietrend (de helling van de best passende rechte) en de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  (de kwaliteit van de lineaire benadering). Figuur 5 geeft de erosietrend in cm/jaar in de baai van Heist, het verschil tussen opeenvolgende kleurschakeringen bedraagt in deze figuur 2,5 cm/jaar.



Figuur 5 – Erosie in cm/jaar in de baai van Heist

Figuur 6 geeft de waarde van  $R^2$  in de beschouwde zone weer. De zwarte lijn duidt de grens aan waar  $R^2 = 0,5$ , de rode lijn geeft de ligging van de erosie/sedimentatie-grens weer (op deze lijn is de richtingscoëfficiënt van de best passende rechte gelijk aan nul). Merk op dat op de erosie/sedimentatie-grens de waarde van  $R^2$  zeer laag is: deze grens ligt immers in de overgangszones tussen enerzijds gebieden waar erosie optreedt en anderzijds gebieden waar sedimentatie optreedt, en hier kan bijgevolg dan ook geen erosie- of sedimentatietrend waargenomen worden.



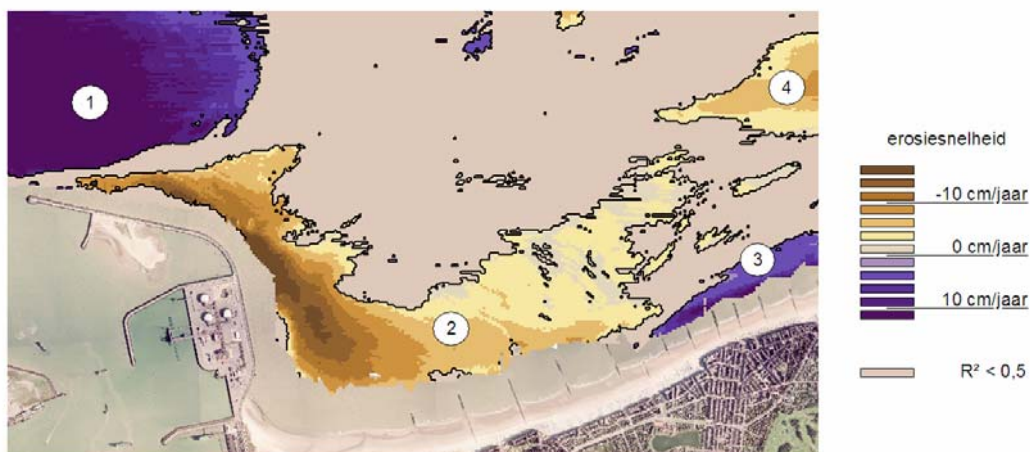
Figuur 6 – Waarde van de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  in de baai van Heist

De resultaten worden als volgt geïnterpreteerd: de waarden voor de erosiesnelheid grafisch weergegeven voor elke roostercel in Figuur 5 zijn enkel betrouwbaar indien  $R^2$  de waarde 0,5 of hoger aanneemt. In dat geval wordt de erosietrend voor minstens 50% verklaard door het lineaire model, en minder dan 50% in de variatie in dieptegegevens is het gevolg van random fluctuaties ten opzichte van het lineaire model.

Opvallend is dat in Figuur 6 het gebied waar  $R^2 > 0,5$  (binnen de zwarte lijn) samenvalt met gebieden waar de meest uitgesproken trends zijn waar te nemen in Figuur 6: grosso modo verandert het niveau van de zeebodem er in absolute waarde met minstens 5 cm/jaar. Voor sommige zones van het gebied  $R^2 > 0,5$  is dit een verhoging, voor andere een verdieping. Anderzijds valt het ook op dat in het gebied waar  $R^2 < 0,5$  de waarde voor de erosie- of sedimentatiesnelheid laag is (ruwweg kleiner dan 2,5 cm/jaar in absolute waarde). Uit dit laatste kan geconcludeerd worden dat in het gebied met  $R^2 < 0,5$  geen noemenswaardige trend qua erosie of sedimentatie optreedt en er zich daar min of meer een evenwicht heeft ingesteld. De erosie of sedimentatie die er nog optreedt is voornamelijk het gevolg van random fluctuaties. Hoewel we stellen dat in het gebied  $R^2 < 0,5$  een soort evenwicht is ingetreden, wil dit geenszins zeggen dat het niveau van de zeebodem er niet meer wijzigt: van jaar tot jaar kunnen eventueel op sommige plaatsen wel grote verschillen optreden. Men spreekt van een dynamisch evenwicht.

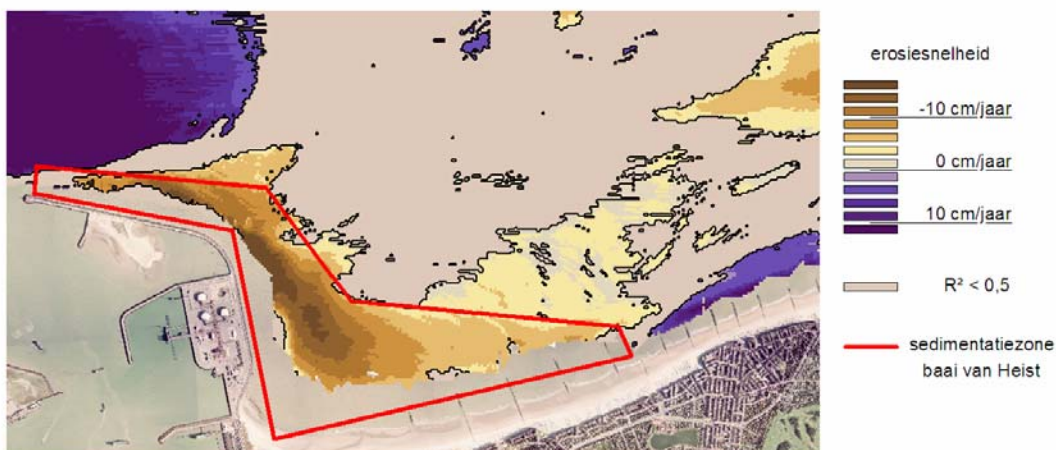
Figuur 7 toont de erosiesnelheden in de baai van Heist en omgeving, waarbij de gebieden met  $R^2 < 0,5$  zijn weggefilterd. In deze figuur zijn duidelijk vier zones te onderscheiden:

- 1) De zone juist voor de ingang van de buitenhaven van Zeebrugge: hier is een duidelijke erosietrend waar te nemen. Deze erosie is het gevolg van de grote plaatselijke stroomsnelheden, die op hun beurt te wijten zijn aan de contractie van de stroomlijnen: de stroming moet uitwijken voor de strekdammen van Zeebrugge, en hogere stromingssnelheden aannemen om eenzelfde debiet door een verminderde dwarssectie te krijgen.
- 2) De baai van Heist: hier treedt een uitgesproken sedimentatietrend op.
- 3) De Appelzak: de Appelzak was oorspronkelijk een vloedgeul. Sinds de aanleg van de buitenhaven van Zeebrugge (1896-1905) is de vloedstroom echter onderbroken, en wordt de Appelzak voornamelijk gedomineerd door ebstromingen.
- 4) De Paardenmarkt (bevindt zich slechts gedeeltelijk in het studiegebied): ook hier is een sedimentatietrend waar te nemen.



Figuur 7 – Erosie in cm/jaar in de baai van Heist, enkel de gebieden met  $R^2 > 0,5$  zijn weergegeven

Met behulp van Figuur 7 is de zone waarin in de baai van Heist sedimentatie optreedt goed af te bakenen. In noordwestelijke richting begint de sedimentatiezone aan het uiteinde van de oostelijke strekdam van Zeebrugge, en ze eindigt zuidoostelijk ruwweg halverwege het Albertstrand. Een benaderende afbakening van het sedimentatiegebied in de baai van Heist is weergegeven in Figuur 8 door middel van een rode veelhoek. Hierop kan waargenomen worden dat de meest uitgesproken sedimentatietrend optreedt langs een boog evenwijdig met en enkele honderden meters verwijderd van de oostelijke strekdam van Zeebrugge. In de richting van de kustlijn is waar te nemen dat de sedimentatietrend afneemt vanaf de oostelijke strekdam naar het Albertstrand toe, om uiteindelijk te eindigen daar waar de sedimentatiezone de geul van de Appelzak ontmoet. In die zin kan de Appelzakgeul gezien worden als een sterke “morfologische kracht” die een grens oplegt aan de sedimentatiezone van de baai van Heist [1].



Figuur 8 – Afbakening van de sedimentatiezone in de baai van Heist

Tot slot nog enige bemerkingen bij het gehanteerde lineaire model. Dit model heeft zijn beperkingen, in die zin dat een lineaire trend nooit kan leiden tot een evenwichtstoestand: een lineair model vertrekt immers van de premisse van een constante erosie- of sedimentatiesnelheid in functie van de tijd. Te

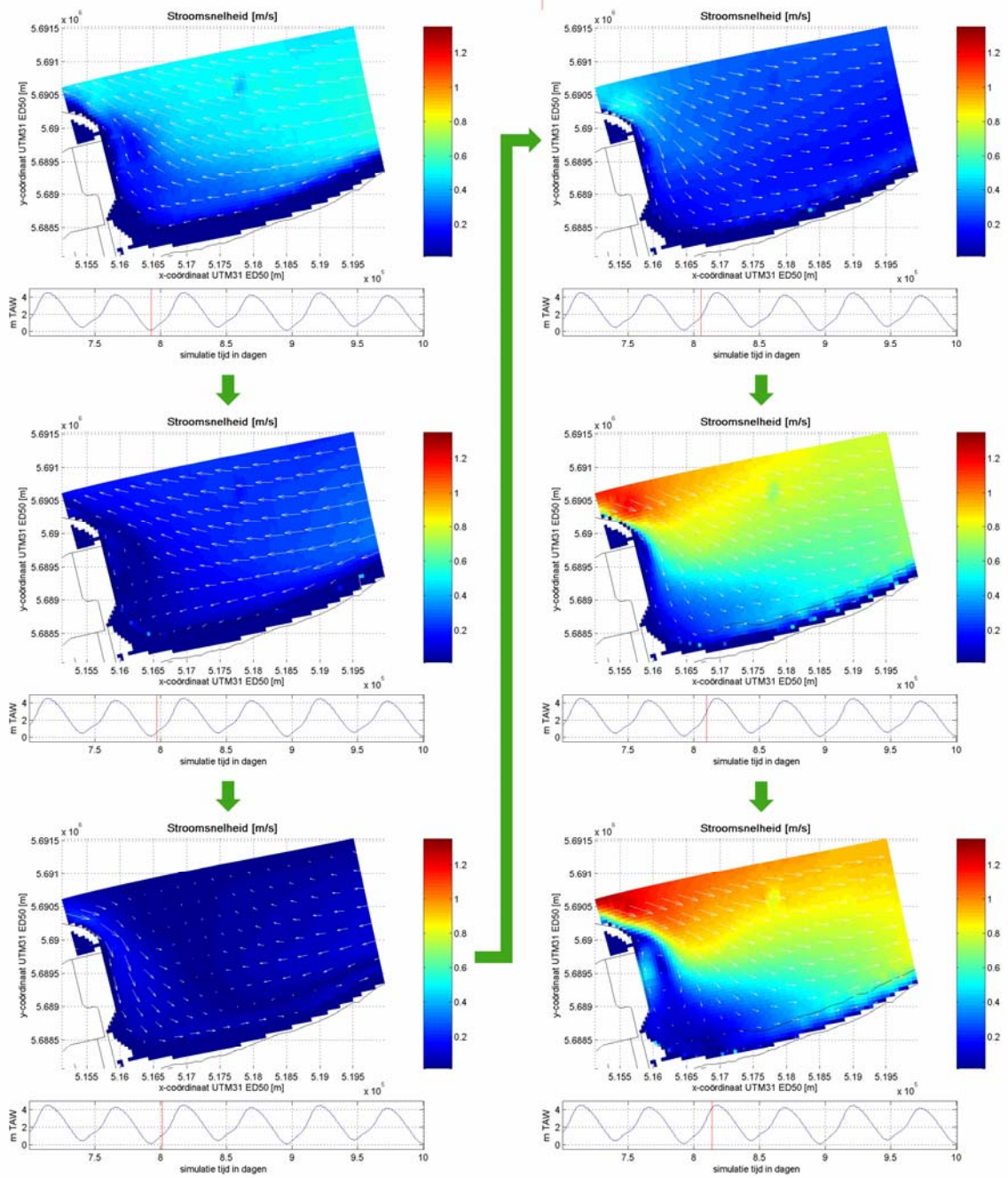
verwachten valt echter dat –naarmate een morfologische toestand van dynamisch evenwicht benaderd wordt– de erosie- of sedimentatiesnelheid in de tijd zal afnemen. Een poging tot modellering van dit gedrag is uitgevoerd geweest door in plaats van een lineair model een kwadratisch verloop van de dieptegegevens in functie van de tijd voorop te stellen. Het idee hierachter was dat het extremum (minimum of maximum) dat steeds optreedt bij een kwadratisch verloop een indicatie zou kunnen zijn voor het tijdstip waarop een evenwichtstoestand intreedt. Deze analyse leidde echter niet tot bevredigende resultaten: enerzijds leverde het kwadratische model slechts in de helft van de gevallen tot een betere benadering van de dieptegegevens dan het lineaire model, anderzijds is het aantal dieptegegevens (zeven per rooster cel) te beperkt om het extremum van het kwadratische model te interpreteren als het tijdstip waarop evenwicht intreedt.

### 3 Het hydrodynamisch model

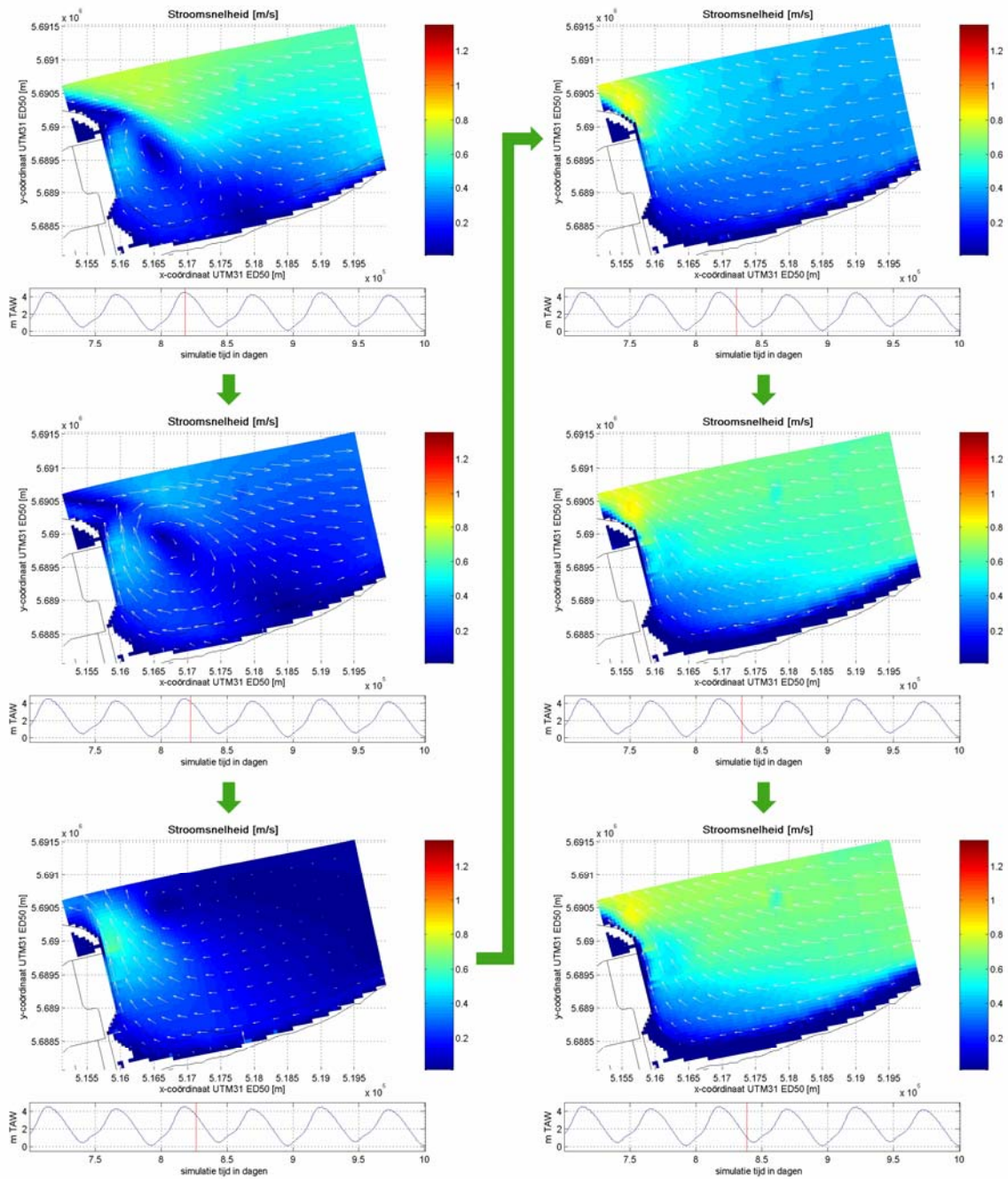
Om een beter inzicht te krijgen in de erosie- en sedimentatiepatronen in de baai van Heist is met het softwarepakket Delft3D een numeriek hydrodynamisch model opgesteld, wat toelaat de getijstromingen in de baai van Heist te simuleren. Dit model werd aan het WL ontwikkeld in het kader van een thesis [3]. Het betreft een 2D-model, wat betekent dat voor elke rooster cel een constante stromingsnelheid over de diepte wordt aangenomen. De resolutie van het gebruikte rooster is variabel, en bedraagt in de omgeving van de baai van Heist gemiddeld 50 m x 50 m. Het model berekent de stroomsnelheden die optreden onder invloed van de getijden, en houdt geen rekening met golven en wind. Voor dit model zijn dieptegegevens uit de periode 1996-2001 gebruikt, opgesteld aan de hand van lodingskaarten van vaargeulen, stortplaatsen en stranden.

De resultaten van een berekening met dit model zijn weergegeven in Figuur 9 voor één getijcyclus, beginnend vanaf laagwater en telkens met tussenstappen van een uur. Pijlen geven een beeld van de stroomrichting, de kleurschakeringen duiden de stroomsnelheid in m/s aan. De balk onderaan geeft het waterniveau en een aanduiding van het punt in de getijcyclus waarop de desbetreffende kaart betrekking heeft. Op deze figuur is duidelijk te zien dat de grootste stroomsnelheden optreden net voor de kentering van vloed naar eb. Ruimtelijk gezien treden de grootste stroomsnelheden op voor de haveningang van Zeebrugge. Zoals reeds eerder aangehaald zijn deze verhoogde stroomsnelheden het gevolg van de contractie van de stroomlijnen onder invloed van de strekdammen, met als gevolg het eerder beschreven puteffect voor de haveningang. Bemerk ook het optreden van een neer juist na hoogwater.





Figuur 9 – Stromingspatronen gedurende een getijcyclus in de baai van Heist



Figuur 9 (vervolg) – Stromingspatronen gedurende een getijcyclus in de baai van Heist

## 4 Correlatiestudie

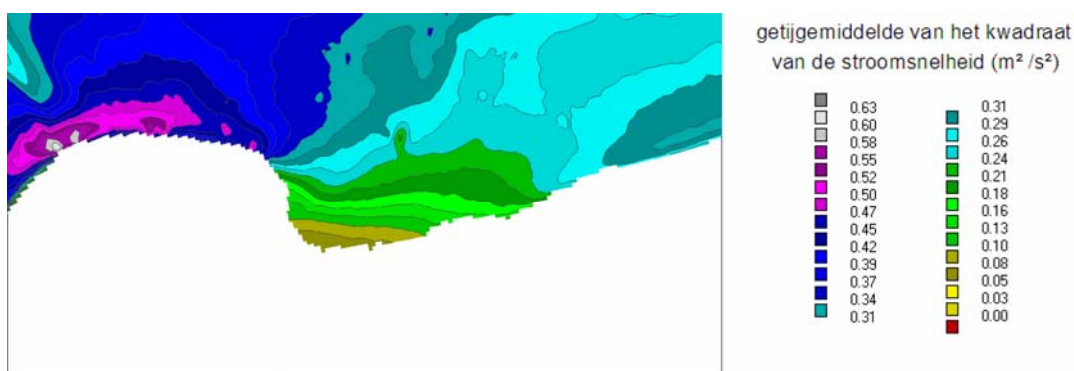
### 4.1 Correlatie tussen de erosiesnelheid en de getijgemiddelde kwadratische stroomsnelheid

In dit deel zal getracht worden een correlatie te vinden tussen enerzijds de sedimentatiesnelheden en anderzijds de stromingspatronen in de baai van Heist. Meerbepaald zal de plaatsafhankelijke erosiesnelheid, zoals voorgesteld in Figuur 5, gelinkt worden aan een kenmerkende parameter voor de stroming op die plaats. Als kenmerkende parameter voor de stroming wordt geopteerd voor het kwadraat van de stromingssnelheid  $v^2$ , uitgemiddeld over een getijcyclus. De keuze hiervoor wordt verantwoord door het feit dat de sedimentatie- of erosiesnelheid nauw samenhangt met de schuifspanning  $\tau$  uitgeoefend door de stroming op de bodem, en vaak wordt een kwadratisch verband verondersteld tussen enerzijds deze schuifspanning  $\tau$  en anderzijds de stromingssnelheid  $v$ . Zo wordt in Delft3D volgende formule gebruikt bij 2D hydrodynamische modellen voor de berekening van  $\tau$  [4]:

$$\tau = \frac{\rho \cdot g \cdot v^2}{C_{2D}^2}$$

In deze formule is  $\rho$  de dichtheid van water,  $g$  de valversnelling en  $C_{2D}^2$  een evenredigheidsfactor die de ruwheid van de bodem in rekening brengt.

Het resultaat van de berekening van de grootheid  $v^2$ , gebaseerd op het numeriek hydrodynamisch model uit vorig hoofdstuk, is weergegeven in Figuur 10. Hieruit blijkt dat de laagste waarden voor  $v^2$  waargenomen worden in de baai van Heist, en de hoogste waarden voor de haveningang van Zeebrugge. Ook in de geul van de Appelzak zijn waarden hoger dan gemiddeld waar te nemen. Bovendien verlopen de lijnen van gelijke  $v^2$ -waarden in de baai van Heist min of meer parallel en volgens dezelfde richting als de zeewaartse helft van de oostelijke strekdam.

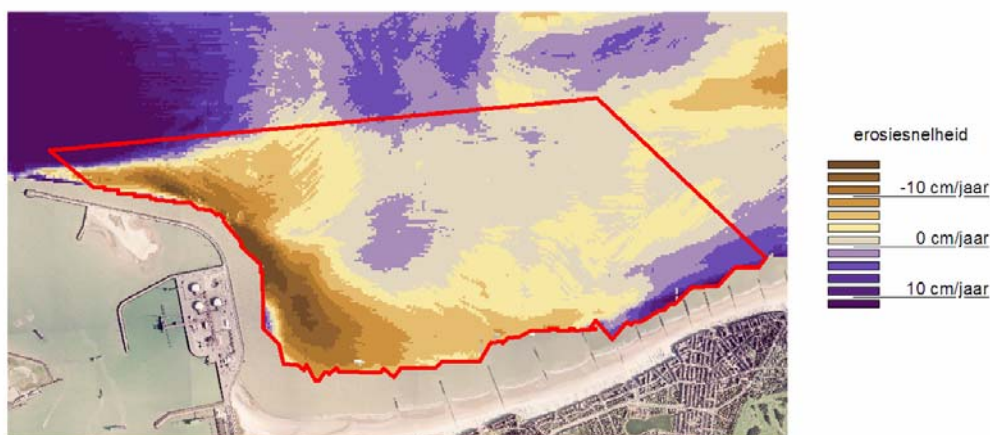


Figuur 10 – Getijgemiddelde van het kwadraat van de stroomsnelheid in de baai van Heist, gebaseerd op het numeriek hydrodynamisch model

De correlatie tussen enerzijds de sedimentatiesnelheid en anderzijds de parameter  $v^2$  zal nu nagegaan worden. Deze correlatiestudie wordt beperkt door de volgende gestelde voorwaarden:

- 1) Het gebied waarin de correlatie wordt onderzocht wordt beperkt tot het interessegebied, aangeduid door de rode veelhoek in Figuur 11.
- 2) In de correlatiestudie worden enkel zones beschouwd waar een duidelijke sedimentatietrend is waar te nemen, meerbepaald worden alleen sedimentatiesnelheden in rekening gebracht waarbij de waarde van de determinatiecoëfficiënt  $R^2$  van de best passende rechte minimaal 0,5 is.
- 3) Ten slotte worden in het interessegebied enkel locaties beschouwd waar sedimentatie optreedt. Aangezien in het interessegebied slechts een zeer beperkt aantal locaties aanwezig is met een erosietrend met  $R^2 > 0,5$ , worden hierbij slechts een zeer beperkt aantal punten genegeerd.

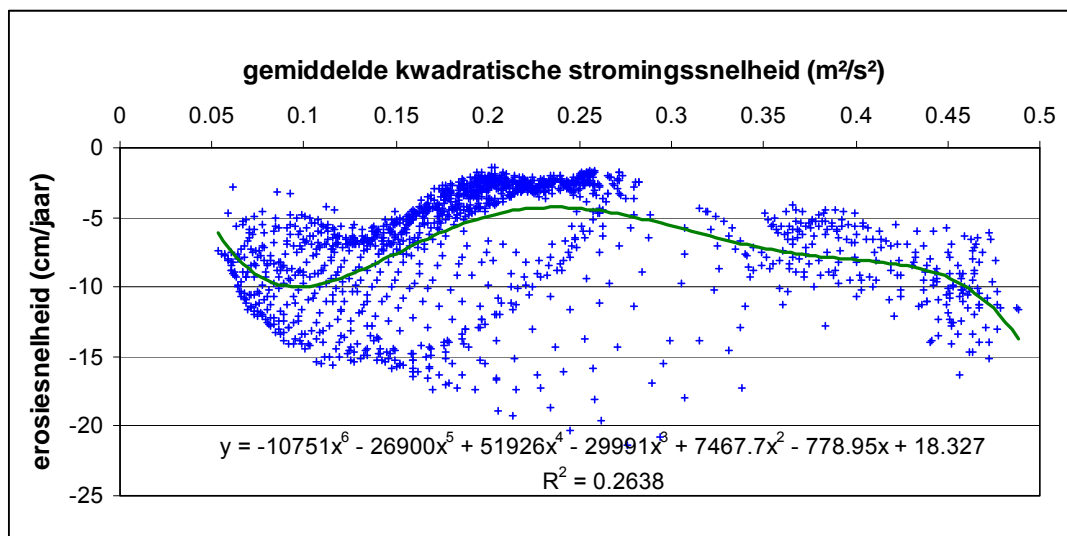
Verder dient nog opgemerkt te worden dat de bathymetrische gegevens waaruit de sedimentatiesnelheid werd berekend, beschikbaar waren op een rooster met vaste celafmetingen 20 m x 20 m (sectie 2), terwijl het rooster van het hydrodynamisch model variabele celafmetingen heeft, in de omgeving van de baai van Heist typisch 50 m x 50 m (sectie 8). Voor de correlatiestudie werd gebruik gemaakt van het rooster van het hydrodynamisch model, waarbij een uitmiddeling van de berekende sedimentatiesnelheden is uitgevoerd om deze gegevens in dit meer groffe rooster te passen.



Figuur 11 – Aanduiding van het interessegebied (rode veelhoek) voor de correlatiestudie

De grafiek in Figuur 12 geeft het verband weer tussen de parameter  $v^2$  (horizontale as) en de sedimentatiesnelheid (verticale as), en dit voor de locaties die voldoen aan de drie bovenstaande voorwaarden. De punten in het diagram van Figuur 12 lijken op het eerste zicht geconcentreerd voor te komen in clusters, wat een zeker verband tussen  $v^2$  en de erosiesnelheid lijkt te suggereren. Toch is er slechts weinig correlatie tussen beide grootheden: voor een goede correlatie zouden de punten zoveel mogelijk gegroepeerd moeten liggen rond een of andere centrale curve, wat slechts in zeer beperkte mate het geval is. Bij wijze van voorbeeld is in Figuur 12 getracht de punten te fitten aan een zesdegraadsveelterm (groene lijn). Deze fit heeft slechts een determinatiecoëfficiënt van 0,26, wat uiteraard te laag is om van een goede correlatie te kunnen spreken. Merk ook op dat bij een fit met een zesdegraadsveelterm er zeven vrijheidsgraden zijn (de zeven coëfficiënten in het voorschrift van de zesdegraadsveelterm), en men kan stellen dat men steeds een goede fit kan bekomen door genoeg

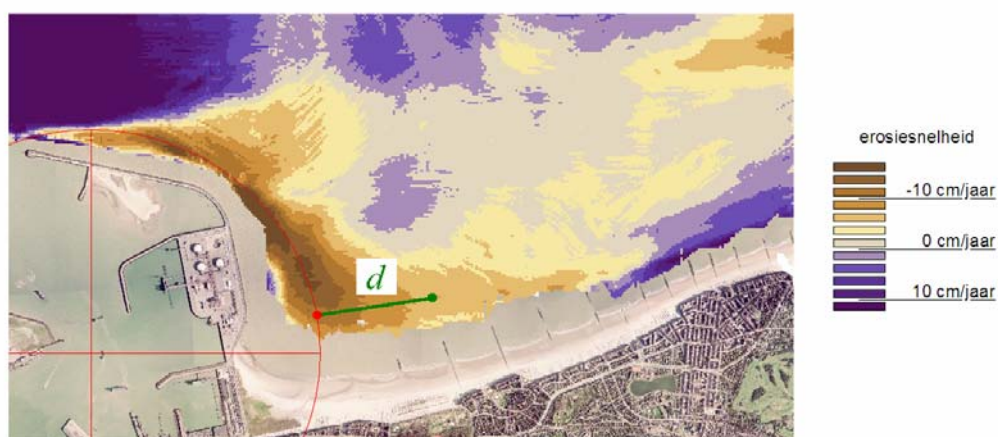
vrijheidsgraden mee te nemen in de fit. Gezien echter het grote aantal punten in de grafiek van Figuur 12 (~1400) is dit in dit geval geen bezwaar: zolang het aantal vrijheidsgraden veel kleiner blijft dan het aantal datapunten, is men in zekere zin vrij in de keuze van het aantal vrijheidsgraden.



Figuur 12 – Erosiesnelheid weergegeven als functie van de getijgemiddelde kwadratische stromingssnelheid  $v^2$

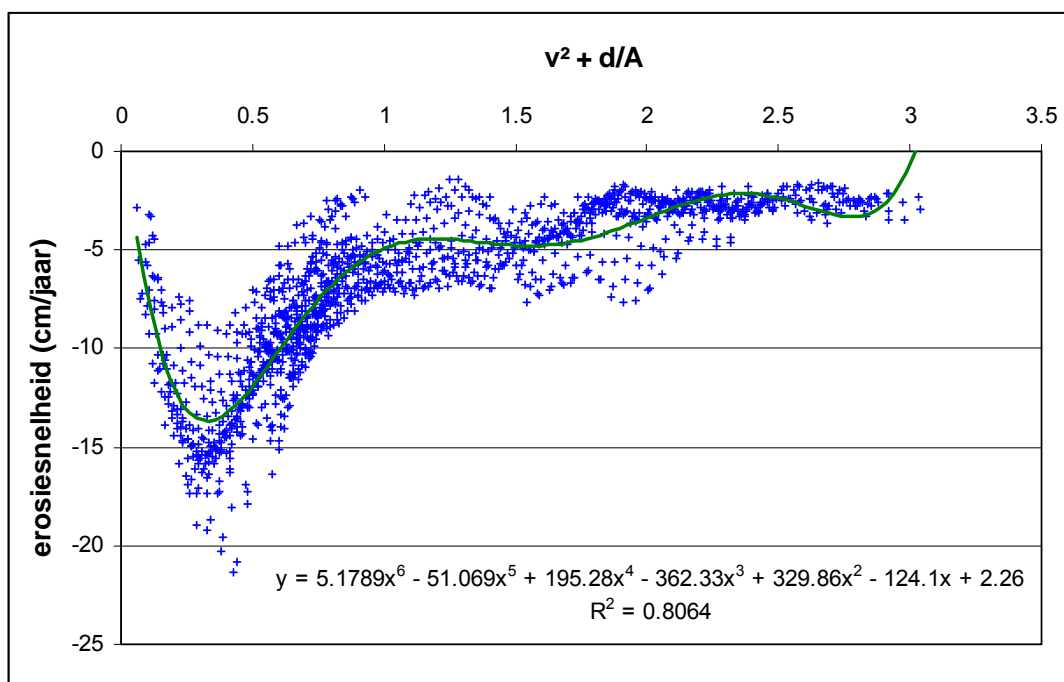
## 4.2 Correlatie tussen enerzijds de erosiesnelheid en anderzijds de getijgemiddelde kwadratische stroomsnelheid en de locatie

Uit sectie 4.1 is gebleken dat de parameter  $v^2$  alleen niet voldoet om de sedimentatiesnelheid in de baai van Heist te verklaren. In sectie 2.3 werd echter reeds opgemerkt dat sedimentatie vooral bleek op te treden langs een boog evenwijdig met en op enkele honderden meter afstand van de oostelijke strekdam. Deze vaststelling leidt tot het idee om de locatie mee te nemen in de correlatiestudie. Figuur 13 toont de cirkelboog langs dewelke uitgesproken sedimentatietrends zijn waar te nemen. De coördinaten van deze cirkelboog zijn (514410 m, 5688568 m) (UTM31, ED50), de straal van de boog is 2000 m. De extra parameter die in de nu gepresenteerde correlatiestudie zal worden meegenomen is de afstand  $d$  van de beschouwde locatie tot deze cirkelboog.



Figuur 13 – Aanduiding van de cirkelboog (rode cirkel) langs dewelke uitgesproken sedimentatietrends zijn waar te nemen

Figuur 14 presenteert een grafiek die voor de verschillende locaties in het interessegebied de erosiesnelheid geeft in functie van de som van de getijgemiddelde kwadratische snelheid  $v^2$  en de herschaalde afstand  $d/A$  van de beschouwde locatie tot de cirkel. De parameter  $A$  is een herschalingsfactor die het relatieve belang van de gemiddelde kwadratische snelheid  $v^2$  afweegt tegenover het belang van de afstand  $d$  tot de cirkel. In deze grafiek kan men zien dat de punten nu veel meer geconcentreerd liggen rond een centrale lijn. Ook in deze figuur is een zesdegraadsveelterm aan de datapunten gefit, waarbij de herschalingsfactor  $A$  zodanig gekozen is om een zo goed mogelijke fit te bekomen ( $A = 1400 \text{ s}^2/\text{m}$ , deze waarde werd gevonden via trial and error). In dit geval zijn er dus acht vrijheidsgraden: de zeven coëfficiënten van de zesdegraadsveelterm en de herschalingsfactor  $A$ . De determinatiecoëfficiënt bij deze fit bedraagt 0,81, wat duidt op een vrij sterke correlatie. Merk op dat het niet uitgesloten is dat er nog betere fits te vinden zijn dan de gepresenteerde zesdegraadsveelterm, de hier gepresenteerde fit dient enkel om aan te tonen dat er een fit met determinatiecoëfficiënt van minstens 0,81 gevonden kan worden, en er dus in elk geval sprake is van een vrij sterke correlatie.



Figuur 14 – Erosiesnelheid als functie van  $v^2 + d/A$

We kunnen dus besluiten dat de erosiesnelheid in het interessegebied nauw samenhangt met de waarde van de parameter  $v^2 + d/A$ : een hoge sedimentatiesnelheid (= sterk negatieve waarde voor de erosiesnelheid in Figuur 14) wordt bereikt bij lage waarden van  $v^2 + d/A$  (dus bij lage gemiddelde kwadratische stroomsnelheden en/of bij locaties dicht bij de rode cirkel), de grootste sedimentatiesnelheden worden gevonden bij  $v^2 + d/A \approx 0,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Stijgt  $v^2 + d/A$ , dan kan op de grafiek waargenomen worden dat de sedimentatiesnelheid afneemt. Hierop lijkt echter een uitzondering te bestaan, namelijk voor punten met  $v^2 + d/A < 0,4$ , waar zeer lage waarden voor  $v^2 + d/A$  gecombineerd worden met lage sedimentatiesnelheden. Dit zijn waarschijnlijk locaties met kleine dieptes, die in de loop van een getijcyclus gedurende een zekere periode droog komen te liggen: enerzijds zullen hierdoor de stroomsnelheden gedurende deze periode de waarde nul aannemen, resulterend in een lage gemiddelde kwadratische stroomsnelheid; anderzijds zal de sedimentatiesnelheid er ook lagere waarden aannemen, daar er ook geen sedimentatie kan optreden wanneer de locatie droogligt. Er dient ook opgemerkt te worden dat voor de punten in de grafiek van Figuur 14 de gemiddelde waarde van  $v^2$  ongeveer  $0,21 \text{ m}^2/\text{s}^2$  bedraagt, terwijl de gemiddelde waarde voor  $d/A$   $0,96 \text{ m}^2/\text{s}^2$  is. Hieruit kan geconcludeerd worden dat voor de sedimentatiesnelheid de afstand van de locatie tot de cirkel een meer doorslaggevende rol heeft dan de gemiddelde kwadratische snelheid.

Samengevat kan gesteld worden dat het sedimentatiepatroon in de baai van Heist, kwalitatief weergegeven in Figuur 15, gevormd wordt door twee invloeden:

- 1) Het plaatselijke stromingspatroon, gevormd onder invloed van de strekdammen van Zeebrugge. In de baai van Heist treden lagere stroomsnelheden op, die sedimentatie bevorderen en erosie verhinderen. Het groene gebied in Figuur 15 duidt ruwweg de invloedssfeer van dit mechanisme aan.
- 2) Preferentiële sedimentatie langsheen een boog evenwijdig met en kort bij de oostelijke strekdam, aangegeven door het lichtblauwe gebied in Figuur 15. Het mechanisme hierachter is

minder duidelijk, aangezien deze zone ook locaties omvat met hoge stroomsnelheden. Mogelijkerwijs is de sedimentatie in het lichtblauwe gebied het gevolg van de eerder vernoemde puterosie voor de haveningang van Zeebrugge: er zou dan tijdens de vloedstroom sediment verplaatst worden via bodemtransport van de depressie voor de haveningang –waar plaatselijk zeer hoge stroomsnelheden optreden– naar locaties enkele kilometers verder gelegen. Dit transport zou dan de richting van de stroomlijnen volgen. Een andere verklaring zou gezocht kunnen worden in het golfafschermend effect van de oostelijke strekdam. Het golfgedreven langtransport wordt immers geblokkeerd ter plaatse van de strekdam, wat de oorzaak zou kunnen zijn van de sedimentatie kort bij de oostelijke strekdam. Er moet echter benadrukt worden dat beide verklaringen slechts veronderstellingen zijn die niet nader onderzocht zijn.



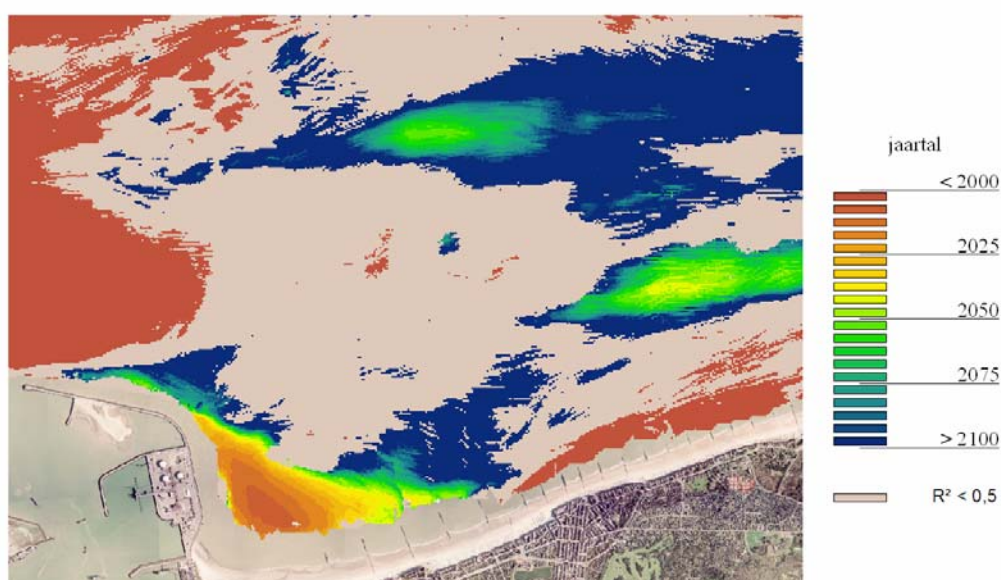
Figuur 15 – Kwalitatieve weergave van het sedimentatiepatroon in de baai van Heist

Het donkerblauwe gebied in Figuur 15 is de overlapping tussen de invloedssferen van beide zonet beschreven mechanismen. Opvallend is dat dit donkerblauw gebied samenvalt met de zandbank in de baai van Heist.



## 5 Prognose

De zone waarin volgens de huidige trend sedimentatie optreedt werd reeds ruwweg afgebakend in Figuur 8. De verdere morfologische evolutie in de baai van Heist is echter moeilijker te voorspellen. Figuur 16 presenteert een extrapolatie van de sedimentatietrend, gebaseerd op de eerder berekende erosie- en sedimentatiesnelheden volgens het lineair model en de dieptegegevens uit 2003. In deze figuur is voor de verschillende locaties het jaartal weergegeven waarin de diepte voor het eerst het niveau 0 m TAW zal bereiken (enkel de locaties met  $R^2 > 0,5$  zijn weergegeven). Deze extrapolatie mag echter niet voor het hele gebied gezien worden als een strikte voorspelling: men kan immers niet voorzien of de sedimentatietrend zich in het gebied in kwestie overal zal blijven doorzetten tot 0 m TAW, mogelijk wordt al eerder een morfologische evenwichtstoestand bereikt of varieert de sedimentatiesnelheid sterk in de tijd (en kan er ook geen lineaire trend in de dieptegegevens waargenomen worden) in sommige zones.



Figuur 16 – Jaar waarin de diepte voor het eerst 0 m TAW bereikt bij een voortzetting van de lineaire sedimentatietrend

Over het zich al dan niet voortzetten van de sedimentatietrend in de baai van Heist kunnen nog volgende bemerkingen gemaakt worden:

- 1) Verwacht wordt dat in de groene zone uit Figuur 15 de sedimentatietrend zich zal doorzetten en dit gebied op termijn ook droog zal komen te liggen. Hier is de sedimentatie immers het gevolg van de lage stroomsnelheden, die op hun beurt het gevolg zijn van de aanwezigheid van de buitenhaven van Zeebrugge. Bij blijvende aanwezigheid van de buitenhaven is het dan ook niet mogelijk dat de stroomsnelheden in de toekomst er terug zullen toenemen.
- 2) De sedimentatie die optreedt evenwijdig met de zeewaartse helft van de oostelijke strekdam (ruwweg het lichtblauwe gebied uit Figuur 15) zal waarschijnlijk wel een evenwichtstoestand bereiken alvorens TAW = 0 m wordt bereikt. Immers, dit gebied grenst onmiddellijk aan de (nog

steeds aan erosie onderhevige) put voor de haveningang van Zeebrugge. Bij een verdere erosie van deze put en een verdere sedimentatie van de lichtblauwe zone zal de overgang tussen deze twee gebieden uiteindelijk zo steil worden dat ze onstabiel wordt. Meer waarschijnlijk is dus dat deze lichtblauwe zone uiteindelijk zal evolueren naar een overgangszone tussen enerzijds de put voor de haveningang van Zeebrugge en anderzijds de verzande baai van Heist.

Uit al het voorgaande kan er voor de baai van Heist een toekomstige evenwichtstoestand van de kustlijn voorzien worden die weergegeven is door de rode lijn in Figuur 17. Gelet op de huidige sedimentatiesnelheden wordt deze nieuwe kustlijn voorzien bereikt te worden binnen enkele decaden.



Figuur 17 – Prognose van de evenwichtskustlijn die voorzien wordt bereikt te worden binnen enkele decaden

Rekening houdend met de nog onvolledige inzichten in het sedimentatieproces dat zich afspeelt in de baai van Heist dient de gegeven prognose beschouwd te worden als een expert judgement op basis van huidige inzichten. Er wordt aanbevolen om verder onderzoek en monitoring uit te voeren, onder meer het verfijnen van de morfologische trendanalyse naarmate er nieuwe bathymetrische opmetingen gebeuren, en ook het uitbreiden van de hydrodynamische procesmodellering met het effect van de golven en de invloed hiervan op het sedimenttransport.

## 6 Samenvatting

Een trendanalyse op de beschikbare dieptegegevens in de baai van Heist maakt het mogelijk een vrij strikte afbakening van het sedimentatiegebied te geven. Het uit deze analyse resulterende sedimentatiegebied is weergegeven door de rode veelhoek in Figuur 8.

Er blijkt bovendien een vrij sterke correlatie te bestaan tussen enerzijds de sedimentatiesnelheid en anderzijds som van de getijgemiddelde kwadratische stroomsnelheid (berekend met een numeriek model) en een plaatsbeschrijvende parameter. Deze plaatsbeschrijvende parameter is meer bepaald de afstand van de beschouwde locatie tot een preferentieel sedimentatiegebied, dat zich evenwijdig aan en op enkele honderden meter van de oostelijke strekdam situeert.

Er is een prognose gemaakt over de verdere evolutie van de morfologie in de baai van Heist. Zo wordt verwacht dat in het gebied begrensd door de kust, de oostelijke strekdam, en de lijn beginnend in het midden van het Albertstrand en eindigend onderaan de knik in de oostelijke strekdam, de sedimentatietrend zal blijven aanhouden totdat deze zone deel zal uitmaken van het strand. Deze sedimentatie is immers het gevolg van de lage stroomsnelheden in de baai van Heist, en verwacht wordt dat deze stroomsnelheden in de toekomst niet zullen toenemen, daar dit stromingspatroon een rechtstreeks gevolg is van de aanwezigheid van de buitenhaven van Zeebrugge. In de strook grenzend aan de zeevaartse helft van de oostelijke strekdam treedt eveneens sedimentatie op. Het mechanisme van deze sedimentatie is niet duidelijk, daar ze plaatsgrijpt in een gebied met hoge stroomsnelheden. Mogelijk is deze sedimentatie gelinkt aan de puterosie voor de haveningang van Zeebrugge en/of het golfafschermend effect van de oostelijke strekdam. Verwacht wordt dat in dit gebied zich op termijn een evenwichtsbathymetrie zal instellen, aangezien verdere verdieping van de put voor de haveningang en verdere verondieping in dit gebied uiteindelijk aanleiding zal geven tot een onstabiele steile overgang. Dit gebied zal dan uiteindelijk evolueren naar een overgangszone tussen de verzande baai van Heist en de put voor de haveningang van Zeebrugge. De prognose wordt samengevat in Figuur 17.

Teneinde een nog betere prognose te kunnen maken van de morfologische evolutie wordt aanbevolen om verder onderzoek en monitoring uit te voeren.

## 7 Referenties

- [1] T. Verwaest (2006). Oostkust – Baai van Heist – Langjarige sedimentatie. WL Rapporten, Mod. 765/14, Waterbouwkundig Laboratorium, Borgerhout, België
- [2] D. Van den Eynde, F. Kerckhof, F. Francken, J. Haelters en B. Lauwaert (2007). Ontwikkeling van de zandbank ter hoogte van Heist: eindrapport. Rapport in opdracht van het Ministerie van Wetenschapsbeleid, Beheerseenheid van het Mathematisch Model van de Noordzee, ZAHE/1/DVDE/200710/NL/ER
- [3] K. De Wit (2001). Hydrodynamic modelling of the wave and current pattern in front of eroding coast at Knokke-Zoute, Belgium. Thesis with annex figures
- [4] WL Delft Hydraulics (2007). Delft3D-FLOW – User Manual (Delft3D-FLOW version 3.55.00, FLOW-GUI version 3.39.28)



**Waterbouwkundig Laboratorium**

*Flanders Hydraulics Research*

Berchemlei 115

B-2140 Antwerpen

Tel. +32 (0)3 224 60 35

Fax +32 (0)3 224 60 36

E-mail: [waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.watlab.be](http://www.watlab.be)