



# De zandhonger van de Oosterschelde

*Casestudie: De morfologische ontwikkeling van de Galgeplaat*

Afstudeerrapport

door

**Matthias Lodewijk Elias Brendaan van der Hoeven**

Begeleid door:

Prof Dr. Ir M.J.F. Stive, Dr. Ir. Z.B. Wang, Dr. Ir. M. Zijlema,  
Drs. E. van Zanten.







## Voorwoord

De leerstoel Kustwaterbouwkunde van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit in Delft en het RijksInstituut voor Kust en Zee in Middelburg hebben besloten een afstudeeropdracht te formuleren over de effecten van de Zandhonger op de Galgeplaat. Gedurende de periode 1983 tot 2001 zijn er veel hoogtemetingen op de Galgeplaat verricht. Aan de hand van deze en van metrologische metingen zal een data-analyse worden uitgevoerd. Hiermee moet meer inzicht in de daling van de Galgeplaat worden verkregen.

Via Prof. Dr. Ir. M.J.F. Stive ben ik op de hoogte gebracht van deze opdracht. Aangezien ik in mijn leven regelmatig gezeild heb op de Oosterschelde heb ik een grote kennis van het gebied en een grote interesse voor de veranderende morfologie van het bekken. Met veel plezier heb ik gewerkt aan dit onderzoek en tevens rond ik hiermee mijn studie Kustwaterbouwkunde af.

*M.L.E.B. van der Hoeven*

*Studienummer: c1004891*

*Telefoon: 0619548821*

*Email: M.L.E.B.vanderhoeven@student.tudelft.nl*





## Samenvatting

Na de bouw van de Oosterscheldekering is het morfologisch evenwicht van de Oosterschelde ernstig verstoord, doordat de getijdenslag en vooral het getijdenprisma sterk zijn verminderd. De eb- en vloedgeulen zijn te ruim voor het volume aan water dat er sindsdien doorheen stroomt. De geulen sedimenteren langzaam tot een nieuw evenwicht in het morfologisch systeem. Deze "Zandhonger" van de Oosterschelde wordt geschat op 400-600 miljoen m<sup>3</sup> zand. Dit zand wordt slechts beperkt van buitenaf aangevoerd doordat de kering sedimentimport ernstig bemoeilijkt. Hierdoor vindt er een herverdeling plaats van het al aanwezige zand in de Oosterschelde. Het in de platen, slikken en schorren opgeslagen zand verplaatst zich langzaam naar de geulen.

Dit onderzoek bestudeert de processen die bepalend zijn voor de afbraak van de Galgeplaat. De beheerder heeft een beter inzicht hierin nodig om beleid tot behoud van het intergetijdengebied te kunnen maken. De probleemstelling luidt: Welke processen zijn bepalend voor de afbraak van de Galgeplaat, voornamelijk gelet op de verticale erosie? Hoe zal deze zich ontwikkelen?

De hypothesen uit de literatuurstudie (, 2006) worden in dit onderzoek met behulp van een data-analyse getoetst. In het tweede hoofdstuk wordt de belangrijkste gebruikte literatuur gegeven en de verschillende hypothesen. Hieruit worden de bepalende processen voor de morfologie van de Galgeplaat zichtbaar. Aan de hand van computermodellen worden de bevindingen uit de data-analyse nog eens extra getoetst.

Daarnaast wordt aan de hand van de computermodellen een voorspelling gemaakt van de plaatverandering.

Dit onderzoek is gebaseerd op meetgegevens verzameld in de periode 1983 tot 2001. Een veel langere tijdreeks dan in eerdere onderzoeken gebruikt werd. De belangrijkste gebruikte meetgegevens zijn: hoogtemetingen, waterstanden, windsnelheden en -richtingen. Uit het onderzoek komt een minimale correlatie tussen getij en opgetreden sedimentatie/erosie naar voren. Veel duidelijker is de correlatie tussen de opgetreden weersomstandigheden en de opgetreden sedimentatie/erosie: Hoe hoger de windsnelheid hoe heviger de opgetreden erosie. Op basis van windgegevens is dan ook verder gewerkt in dit onderzoek.

Uit de data-analyse blijkt dat er voor de voltooiing van Oosterscheldekering vaak plaatopbouw voorkomt. Er is dan min of meer een evenwicht in sedimentatie en erosie, met een licht overschot van sedimentatie. Na de komst van de kering, in de periode 1987-1993, begint de daling van de Galgeplaat. Uit de data-analyse blijkt dat er nog wel plaatopbouw plaatsvindt, maar niet genoeg om de erosie te niet te doen.

Door een onderverdeling in windrichting komen de sedimentatie-/erosiepatronen sterker naar voren. Hieruit blijkt dat de noordelijke windrichting zorgt voor de resterende plaatopbouw. Windgedreven-, golfgedreven- en getijdenstromingen samen zorgen dan voor een versterkt plaatwaarts sedimenttransport. De zuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de grootste erosie op de gehele plaat. In de periode 1987-1993 heeft de wind voor 44% een karakteristieke zuidwestelijke windrichting.



Dit verklaart de duidelijke achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat: Doordat de golfrichting haaks op de getijdenstroming staat, wordt veel sediment door het getij plaatafwaarts getransporteerd.

In de data-analyse is extra gekeken naar de invloed van een gesloten kering op de sedimentatie/erosie op de Galgeplaat. Hieruit blijkt dat een sluiting van de stormvloedkering niet leidt tot extra erosie. Het is moeilijk om uit de beschikbare data het exacte effect van een sluiting vast te stellen, er zijn namelijk weinig vergelijkbare situaties met een niet gesloten kering. Wel blijkt dat een sluiting geen extreme erosie op de Galgeplaat tot gevolg heeft.

Voor een beter beeld van de toekomstige verandering van de Galgeplaat, is in de data-analyse gekeken naar de verandering van de plaatverlaging in de tijd. Het blijkt dat al snel na de realisatie van de kering de plaatopbouw zo goed als verdwijnt. De erosie daarentegen verandert weinig. Tussen 1994 en 2001 is de plaatafbraak zelfs minder extreem geworden. Dit lijkt te duiden op een vertraging in de achteruitgang van de Galgeplaat. Bij het trekken van deze conclusie is echter enige voorzichtigheid geboden. In de jaren 1994-2001 zijn de opgetreden stormen veel minder extreem geweest. Dit maakt de vergelijking lastiger. Echter voor een voorspelling kan aan de hand van probabilistische berekeningen de kans van voorkomen van stormen berekend worden. Zo kan een duidelijker beeld worden verkregen van de plaatdaling.

Om de verticale erosie beter in beeld te brengen, is in de data-analyse gekeken naar de verschillen tussen sedimentatie/erosie van verschillende plaathoogten. Hieruit blijkt dat de middelhoge plaat-

delen onderhevig zijn geweest aan de sterkste erosie. Verruit het grootste plaat oppervlak heeft deze hoogte, dit verklaart de grote veranderingen in de droogvalduur van de plaat.

Met behulp van computersimulaties met het WAQUA- en SWAN-model zijn de bevindingen uit de data-analyse nogmaals bekeken. Met name naar de invloeden van de windgedreven stromingen op het resulterende stromingsveld. Hieruit komt naar voren dat een noordwestelijke windrichting zorgt voor een significante toename van een plaatwaarts sedimenttransport. Dit geeft een extra onderbouwing voor de bevindingen uit de data-analyse. Daarnaast is met behulp van simulaties met het SWAN-model een beeld verkregen van de significante golfhoogte bij de diverse windrichtingen. Hieruit blijkt dat niet alleen de golfhoogte de bepalende factor is voor de plaatafbraak. De noordwestelijke windrichting zorgt namelijk voor de grootste golfhoogte bij de Galgeplaat, maar resulteert niet in de grootste erosie.

Daarnaast zijn de computermodellen gebruikt om de invloed van een plaatdaling of een zeespiegelrijzing op de stromings- en golfvelden te bestuderen. De combinatie van de uitkomsten van beide modellen toont een aantal belangrijke gevolgen. Hierbij moet worden opgemerkt dat sedimenttransportcapaciteit in dit onderzoek alleen bepaald wordt door windgedreven stromingen en getijdenstromingen. Voor de lagere plaatdelen blijkt dat de bodemschuifspanning veroorzaakt door de golven, afneemt en de sedimenttransportcapaciteit gelijk blijft. Dit veroorzaakt een vertraging van de plaatverlaging. Voor de middelhoge plaatdelen lijkt de achteruitgang van de plaathoogte nauwelijks te zorgen voor een stroomsnelheidstoename boven de plaat.



De bodemschuifspanningen veroorzaakt door de golven, nemen sterker af. Samen met de gelijkblijvende sedimenttransportcapaciteit, lijkt dit een vertraging van de plaatverlaging te bewerkstelligen. Voor de hogere plaatdelen lijkt de plaatdaling te zorgen voor een kleine toename van de stroomsnelheid en dus voor een toename van de sedimenttransportcapaciteit. Er blijkt een kleine toename van de bodemschuifspanning van deze plaatdelen. De toename van de bodemschuifspanningen en van de sedimenttransportcapaciteit lijken een versnelling van de plaatverlaging van de hogere plaatdelen te veroorzaken.



## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>			
1.1	Probleemanalyse .....	1			
1.1.1	Probleembeschrijving .....	1			
1.1.2	Probleemstelling .....	3			
1.2	Beschrijving onderzoeksgebied .....	4			
1.3	Aanpak .....	5			
<b>2</b>	<b>Vanuit literatuur naar hypotheses .....</b>	<b>7</b>			
2.1	Proces beschrijving .....	7			
2.1.1	Plaatopbouw .....	7			
2.1.2	Plaatafbraak .....	11			
2.1.3	Windgedreven stromingen .....	12			
2.1.4	Twee onderzoeksparameters .....	14			
2.1.5	De hypotheses .....	14			
<b>3</b>	<b>Van meetgegevens naar de verschillende grafieken..</b>	<b>17</b>			
3.1	Beschikbare meetgegevens .....	17			
3.1.1	Hoogtemetingen op de Galgeplaat .....	17			
3.1.2	Windgegevens .....	18			
3.1.3	Waterstanden .....	19			
3.1.4	Golfgegevens .....	20			
3.1.5	WAQUA-model resultaten .....	20			
3.1.6	SWAN-model resultaten .....	20			
3.2	Van meetgegevens naar parameters .....	21			
3.2.1	Sedimentatie/erosie .....	21			
3.2.2	Homogene dataset van hoogtemetingen .....	21			
3.2.3	De drie meetperiodes .....	22			
3.2.4	Karakteristieke windsnelheid .....	23			
3.2.5	Karakteristieke windrichting .....	24			
3.2.6	Karakteristieke getijdenslag .....	25			
3.2.7	Golfopbouw .....	26			
3.2.8	Peak-over-Threshold .....	27			
3.2.9	Windgedreven stromingen .....	27			
3.2.10	Gebruikte formules bij bepalen bodem- schuifspanning en sedimenttransport .....	27			
3.3	Gebruikte figuren en grafieken .....	31			
3.3.1	Grafiek sedimentatie/erosie tegen de karakteristieke windsnelheid .....	31			
3.3.2	Sedimentatie-/erosiehistogram .....	32			
3.3.3	Grafiek van sedimentatie/erosie op de windroos .	33			
3.3.4	Stromings-/sedimenttransport /bodemschuifspanning/golfvelden .....	34			
<b>4</b>	<b>De parameter selectie .....</b>	<b>35</b>			
4.1	Mogelijk verband tussen getijdenslag en sedimentatie/erosie .....	35			
4.1.1	De maximale getijdenslag .....	36			
4.1.2	De karakteristieke getijdenslag .....	38			
4.1.3	Conclusie .....	39			
4.2	Mogelijk verband tussen windsnelheden en sedimentatie/erosie .....	39			
4.3	De invloed van de tijdsduur van hogere windsnelheden.	40			
4.4	Peak-over-Threshold .....	41			
4.5	Slotconclusie van de parameterselectie .....	43			





<b>5</b>	<b>Hypothesetoetsing met de Galgeplaat als een geheel ...</b>	<b>45</b>
5.1	Verandering na de komst van Oosterscheldekering .....	45
5.1.1	<i>De periode voor de aanleg van de stormvloedkering ...</i>	45
5.1.2	<i>De periode na de aanleg van de storm vloedkering</i>	46
5.1.3	<i>Sedimentatie-/erosiehistogram .....</i>	47
5.1.4	<i>Conclusie.....</i>	47
5.2	De onderverdeling naar windrichting.....	48
5.2.1	<i>De noordelijke windrichtingen.....</i>	49
5.2.2	<i>De noordwestelijke windrichtingen .....</i>	51
5.2.3	<i>De westzuidwestelijke windrichtingen .....</i>	53
5.2.4	<i>De zuidelijke windrichtingen .....</i>	55
5.2.5	<i>De sedimentatie-/erosiehistogrammen .....</i>	57
5.2.6	<i>Sedimentatie/erosie op de kompasroos .....</i>	58
5.2.7	<i>Conclusie.....</i>	59
5.3	De invloed van de sluiting van de kering op het sedimentatie-/erosiegedrag .....	60
5.3.1	<i>De invloed van de sluiting van de kering op de Galgeplaat als geheel.....</i>	60
5.3.2	<i>Conclusie.....</i>	61
5.4	Verandering in sedimentatie-/erosiegedrag in de tijd...	62
5.4.1	<i>De verandering in de periode 1984-2001.....</i>	62
5.4.2	<i>Verandering van het getij.....</i>	65
5.4.3	<i>Conclusie.....</i>	67
5.5	Slotconclusie van de gehele Galgeplaat .....	68
<b>6</b>	<b>Hypothesetoetsing met een onderverdeling van de Galgeplaat .....</b>	<b>69</b>
6.1	Een onderverdeling van de Galgeplaat in plaatdelen ...	69
6.1.1	<i>De vier plaatdelen met de karakteristieke getijdenslag</i>	70
6.1.2	<i>De vier plaatdelen met alle windrichtingen .....</i>	73
6.1.3	<i>De onderverdeling van de windrichtingen met vier plaatdelen.....</i>	76
6.1.4	<i>De vier plaatdelen met alle windrichtingen en de sluitingen.....</i>	84
6.1.5	<i>Slotconclusie .....</i>	85
6.2	Een hoogteverdeling van de Galgeplaat.....	86
6.2.1	<i>Verdeling in drie plaathogtes .....</i>	87
6.2.2	<i>Conclusie.....</i>	91
6.2.3	<i>De drie verschillende plaathogtes bij sluitingen.</i>	92
6.2.4	<i>conclusie.....</i>	94
6.3	Discussie.....	94
6.4	Slotconclusie .....	96
<b>7</b>	<b>Computersimulaties.....</b>	<b>99</b>
7.1	De golven en stromingen bij de windrichtingen.....	99
7.1.1	<i>Het WAQUA-model .....</i>	99
7.1.2	<i>Het SWAN-model .....</i>	110
7.1.3	<i>Conclusie.....</i>	119
7.2	De invloed van de plaatdaling .....	120
7.2.1	<i>Het WAQUA-model .....</i>	120
7.2.2	<i>Het SWAN-model .....</i>	122
7.2.3	<i>Slotconclusie over de plaatdaling .....</i>	124



---

<b>8</b>	<b>Conclusies &amp; Aanbevelingen .....</b>	<b>126</b>
8.1	Conclusies .....	126
8.2	Aanbevelingen.....	128
8.2.1	<i>Voorspellingsmethode om plaatverlaging nauwkeurig te kunnen voorspellen .....</i>	<i>128</i>
8.2.2	<i>Plaatverlaging compenseren met een plaatsuppletie 128</i>	
8.2.3	<i>Hervatten van de hoogtemetingen.....</i>	<i>130</i>
8.2.4	<i>Invloed van getijdenslag tijdens extreme weersomstandigheden .....</i>	<i>131</i>
8.2.5	<i>Een verbetering proces-modulering.....</i>	<i>131</i>
<b>9</b>	<b>Literatuurlijst .....</b>	<b>133</b>



## Lijst met figuren

<i>Figuur 1.1 Een overzichtkaart van de Oosterschelde waarop de platen, slikken en schorren staan aangegeven.....</i>	<i>2</i>
<i>Figuur 1.2 Bodemprofiel rondom de Galgeplaat aan de hand van vaklodingen gemaakt in 2001.....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 1.3 Bodemprofiel van de Galgeplaat aan gegeven met diepte contourlijnen. ....</i>	<i>4</i>
<i>Figuur 2.1 Het verschil van sedimenttransporten ter plaatse van de Galgenplaat, ten tijde van een springtij en een doottij (Eindrapport Geomor, 1987).....</i>	<i>8</i>
<i>Figuur 2.2 Restcirculatie in een geulbocht.....</i>	<i>9</i>
<i>Figuur 2.3 Orbitale waterbewegingen bij passage van een golf.....</i>	<i>11</i>
<i>Figuur 2.4 Het sedimenttransport tijdens een extreme weersomstandigheid (Eindrapport Geomor, 1987).....</i>	<i>13</i>
<i>Figuur 3.1 Een weergave van de daling, bij een meetlocatie op het Noorden van de Galgeplaat, op een hooggelegen gedeelte. ....</i>	<i>17</i>
<i>Figuur 3.2 De verschillende meetstations in de Zeeuwse delta. ....</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 3.3 Weergave van de waterstanden bij drie verschillende meetstations bij een gesloten Oosterscheldebekering.....</i>	<i>19</i>
<i>Figuur 3.4 Het 'staggered grid' zoals gebruikt in het WAQUA -model; de waterhoogte of de stroomsnelheid is bekend.....</i>	<i>20</i>
<i>Figuur 3.5 Locaties van de meetpunten op de Galgeplaat die samen de homogene dataset vormen.....</i>	<i>21</i>

<i>Figuur 3.6 Weergave van de veranderende getijdenslag in het Oosterschelde bekken tijdens de eindhase van de oplevering van de stormvloedkering. .</i>	<i>22</i>
<i>Figuur 3.7 Grafiek van gemeten windsnelheden bij het Marollegat.....</i>	<i>23</i>
<i>Figuur 3.8 Grafiek van gemeten windrichting in graden van de kompasroos. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 3.9 Afbeelding van vector die bestaat uit windsnelheid en windrichting. ....</i>	<i>24</i>
<i>Figuur 3.10 Weergave van de waterstand bij het Marollegat.....</i>	<i>25</i>
<i>Figuur 3.11 De golfopbouw in diepwater t.o.v. windsnelheid, waterdiepte, strijklengte en stormduur. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figuur 3.12 Weergave van de korrelgrootte van het zand in het Oosterscheldebekken(Geomor,1987).....</i>	<i>28</i>
<i>Figuur 3.13 Waterbewegingen die worden veroorzaakt door een golf.....</i>	<i>29</i>
<i>Figuur 3.14 Een voorbeeld van een grafiek van sedimentatie/erosie.....</i>	<i>31</i>
<i>Figuur 3.15 Een voorbeeld van een sedimentatie-/erosiehistogram. ....</i>	<i>32</i>
<i>Figuur 3.16 Een voorbeeld van een grafiek van sedimentatie/erosie op de windroos.....</i>	<i>33</i>
<i>Figuur 3.17 Een voorbeeld van een stromingsveld rondom de Galgeplaat.....</i>	<i>34</i>
<i>Figuur 4.1 Snelheidsreductie opgetreden in het Oosterscheldebekken sinds de komst van de stormvloedkering (Zandhonger Oosterschelde, 2005)...</i>	<i>35</i>
<i>Figuur 4.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. het maximaal getij tijdens de meetperiode 1987-1993.....</i>	<i>36</i>
<i>Figuur 4.3 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. het maximaal getij tijdens de meetperiode 1984-begin 1986. ....</i>	<i>37</i>



<i>Figuur 4.4 Grafiek van sedimentatie/erosie afgezet tegen de karakteristieke getijdenslag tijdens de meetperiode 1987-1993.....</i>	<i>38</i>
<i>Figuur 4.5 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag tijdens de meetperiode 1984 -begin 1986.....</i>	<i>38</i>
<i>Figuur 4.6 Grafiek van de opgetreden sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid.....</i>	<i>39</i>
<i>Figuur 4.7 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. tijdsduur van windsnelheden, de kleur geeft de karakteristieke windsnelheid aan.....</i>	<i>40</i>
<i>Figuur 4.8 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. tijdsduur van windsnelheden, de kleur geeft de karakteristieke windsnelheid aan.....</i>	<i>40</i>
<i>Figuur 4.9 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (5 m/s).....</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 4.10 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (10 m/s).....</i>	<i>41</i>
<i>Figuur 4.11 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (150 dm/s).....</i>	<i>42</i>
<i>Figuur 4.12 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (200 dm/s).....</i>	<i>42</i>
<i>Figuur 5.1 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid in de periode 1984-begin 1986.....</i>	<i>45</i>
<i>Figuur 5.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid in de periode 1987-1993.....</i>	<i>46</i>
<i>Figuur 5.3 De verschillende sedimentatie-/erosiehistogrammen voor en net na de realisatie van de Oosterscheldekering.....</i>	<i>47</i>

<i>Figuur 5.4 Grafiek van de noordelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. de opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>49</i>
<i>Figuur 5.5 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.....</i>	<i>50</i>
<i>Figuur 5.6 Grafiek van de noordnoordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>51</i>
<i>Figuur 5.7 Grafiek van de noordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>51</i>
<i>Figuur 5.8 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.....</i>	<i>52</i>
<i>Figuur 5.9 Grafiek van de westzuidwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>53</i>
<i>Figuur 5.10 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.....</i>	<i>54</i>
<i>Figuur 5.11 Grafiek van de zuidelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>55</i>
<i>Figuur 5.12 Het profiel van de bodemhelling aan de zuidzijde van de Galgeplaat.....</i>	<i>56</i>
<i>Figuur 5.13 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de noordelijke windrichtingen.....</i>	<i>57</i>
<i>Figuur 5.14 De sedimentatie-/erosiehistogrammen van de resterende windrichtingen.....</i>	<i>57</i>
<i>Figuur 5.15 Grafiek van de windsnelheid en de windrichting op de kompasroos, in kleur zijn sedimentatie(+) en erosie(-) aangegeven (in mm/meetlocatie).....</i>	<i>58</i>
<i>Figuur 5.16 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid waarin ook de sluitingen zichtbaar zijn.....</i>	<i>60</i>



<i>Figuur 5.17 Waterstanden in en net buiten het bekken tijdens een sluiting van de kering.....</i>	<i>60</i>
<i>Figuur 5.18 Verandering van het sedimentatie-/erosiegedrag in de periode 1984-1993.....</i>	<i>62</i>
<i>Figuur 5.19 Verandering van het sedimentatie-/erosiegedrag in de periode 1994-2001.....</i>	<i>63</i>
<i>Figuur 5.20 Een weergave van de plaatdaling, bij een meetlocatie op het noorden van de Galgeplaat, op een hooggelegen gedeelte.....</i>	<i>64</i>
<i>Figuur 5.21 Een afbeelding van de verandering van de getijdenasymmetrie in het Oosterscheldebekken.....</i>	<i>65</i>
<i>Figuur 6.1 De onderverdeling van de meetlocaties over de verschillende gebieden op de Galgeplaat.....</i>	<i>69</i>
<i>Figuur 6.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de maximale getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1987-1993.</i>	<i>70</i>
<i>Figuur 6.3 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de maximale getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1984- begin 1986.....</i>	<i>71</i>
<i>Figuur 6.4 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1987-1993.....</i>	<i>71</i>
<i>Figuur 6.5 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1984-1986.....</i>	<i>72</i>
<i>Figuur 6.6 Onderverdeling van de Galgeplaat in de deelgebieden, alle windrichtingen zijn hier vertegenwoordigd.....</i>	<i>73</i>

<i>Figuur 6.7 De sedimentatie-/erosiehistogrammen van de Noordkop en de Westkant.....</i>	<i>74</i>
<i>Figuur 6.8 De sedimentatie-/erosiehistogrammen van de Zuidkop en de Oostkant.....</i>	<i>74</i>
<i>Figuur 6.9 Grafiek van de windsnelheid en de windrichting op de kompasroos.....</i>	<i>75</i>
<i>Figuur 6.10 Grafiek van de Noordelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>76</i>
<i>Figuur 6.11 Grafiek van de noordnoordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>77</i>
<i>Figuur 6.12 Grafiek van de noordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>78</i>
<i>Figuur 6.13 Grafiek van de zuidwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>79</i>
<i>Figuur 6.14 Grafiek van de zuidelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.....</i>	<i>81</i>
<i>Figuur 6.15 Daggemiddelde sedimentatie-/erosiepatroon bij verschillende windrichtingen per locatie.....</i>	<i>82</i>
<i>Figuur 6.16 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid op de verschillende plaatdelen, ook de sluitingen zijn aangegeven d.m.v. een omcirkeling.....</i>	<i>84</i>
<i>Figuur 6.17 De verdeling van de Galgeplaat in drie hoogtegebieden met hun meetlocaties.....</i>	<i>86</i>
<i>Figuur 6.18 Grafiek van de verschillende hoogtegebieden en hun.....</i>	<i>87</i>



<i>Figuur 6.19 Hoogteverandering die is opgetreden op de schorren, slikken en platen in de periode 1983-2001(Zandhonger Oosterschelde 2005)...</i>	88
<i>Figuur 6.20 Korrelgrootte verdeling van het zand op de Galgeplaat(Geomor, 1987).</i>	89
<i>Figuur 6.21 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de hooggelegen plaatdelen.</i>	90
<i>Figuur 6.22 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de middenhoog en laaggelegen plaatdelen.</i>	90
<i>Figuur 6.23 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid op de verschillende plaathoogten, ook de sluitingen zijn aangegeven.</i>	92
<i>Figuur 6.24 De waterstanden in en net buiten het Oosterscheldebekken tijdens een sluiting van de kering.</i>	93
<i>Figuur 6.25 Afbeelding van de Roggeplaat, boven de hoogte kaart van de plaat en onder het sedimentatie/erosie kaart in de periode 1983-2001.</i>	95
<i>Figuur 7.1 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00 uur tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.</i>	100
<i>Figuur 7.2 Sedimenttransportcapaciteit rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.</i>	101
<i>Figuur 7.3 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.</i>	102

<i>Figuur 7.4 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.</i>	103
<i>Figuur 7.5 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een noordwestelijke krachtige wind.</i>	103
<i>Figuur 7.6 Sedimenttransport rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.</i>	104
<i>Figuur 7.7 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een noordwestelijke krachtige wind.</i>	104
<i>Figuur 7.8 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.</i>	105
<i>Figuur 7.9 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting zuidwestelijk.</i>	106
<i>Figuur 7.10 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een zuidwestelijke krachtige wind.</i>	106
<i>Figuur 7.11 Sedimenttransportcapaciteit rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting zuidwestelijk.</i>	107
<i>Figuur 7.12 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een zuidwestelijke krachtige wind.</i>	107
<i>Figuur 7.13 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.</i>	108
<i>Figuur 7.14 Weergave van het golfveld rondom de Oosterscheldekering.</i>	110



*Figuur 7.15 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind (10°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P..... 111*

*Figuur 7.16 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind (10°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P..... 111*

*Figuur 7.17 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind (10°) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P..... 112*

*Figuur 7.18 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind (10°) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P. .... 112*

*Figuur 7.19 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P. .... 113*

*Figuur 7.20 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P. .... 113*

*Figuur 7.21 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P. .... 114*

*Figuur 7.22 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P. .... 114*

*Figuur 7.23 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P. .... 115*

*Figuur 7.24 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.... 115*

*Figuur 7.25 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P. .... 116*

*Figuur 7.26 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.... 116*

*Figuur 7.27 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (200°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P..... 117*

*Figuur 7.28 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (200°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P. .... 117*

*Figuur 7.29 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (200°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P..... 118*

*Figuur 7.30 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (200°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P. .... 118*

*Figuur 7.31 Bodemschuifspanning veroorzaakt door de stroming, het bovenste figuur is 24 juli 1994 tijdens max. vloed, het onderste figuur is met halve meter waterstandverhoging..... 120*

*Figuur 7.32 Sedimenttransport veroorzaakt door stroming tijdens maximale vloed, het bovenste figuur is 24 juli 1994, het onderste met een halve meter waterstandsverhoging. .... 121*

*Figuur 7.33 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven, een noordwestelijke wind van 20 m/s , bovenste figuur met een waterstand van +1.5 m en de onderste +2.0 m N.A.P..... 122*

*Figuur 7.34 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven, een zuidwestelijke wind van 20 m/s , bovenste figuur met een waterstand van +1.5m en de onderste +2.0m N.A.P..... 123*

*Figuur 7.35 Plaatverlaging voor de lagere plaatdelen t.o.v. de tijd..... 124*

*Figuur 7.36 Plaatverlaging voor de middelhoge plaatdelen t.o.v. de tijd.125*

*Figuur 7.37 Plaatverlaging voor de hoge plaatdelen t.o.v. de tijd..... 125*

*Figuur 8.1 Voorbeeld van plaat suppletie die de natuurlijke plaatopbouw versterkt..... 129*



*Figuur 8.2 De proefsuppletie die wordt uitgevoerd op de Galgeplaat in de zomer van 2007..... 130*

## **Een tabel**

*Tabel 2.1 Een schaalverdeling van m/s naar de schaal van Beaufort..... 18*





# 1 Inleiding

Dit hoofdstuk licht de probleemanalyse, locatie en de aanpak toe.

## 1.1 Probleemanalyse

### 1.1.1 Probleembeschrijving

Tijdens de realisatie van de Oosterscheldekering was men zich er van bewust dat het intergetijdengebied zou veranderen. Er waren echter geen varianten, die zowel de veiligheid, de natuurwaarde als de economische waarde van het gebied konden waarborgen. De Europese Unie heeft richtlijnen opgesteld om de natuurwaarde van Europa te waarborgen, om zo een samenhangende ecologische hoofdstructuur in Europa tot stand te brengen. Het doel hiervan is het behoud van kenmerkende en/of bedreigde habitats en het behoud van het aantal soorten (Natura 2000). De vogelrichtlijn en de habitatrichtlijn verplichten de lidstaten van de Europese Unie tot instandhouding, bescherming of herstel van voldoende gevarieerde leefgebieden voor de wilde flora en fauna. Ze verplichten de beheerder actie te ondernemen als er zich vermindering in kwaliteit/kwantiteit van leefgebieden dan wel populaties van dieren voordoet. In dit kader werd de Oosterschelde in 1989 aangewezen als Speciale Beschermingszone (SBZ). Vanuit de vogelrichtlijn waren er de volgende argumenten.

De Oosterschelde is:

- een belangrijke schakel in een internationaal samenhangend systeem van waterrijke gebieden;
- een schakel tussen land en zee;
- een broedgebied voor bijzondere vogels;
- van bijzonder grote betekenis als rust-, rui- en foerageergebied voor doortrekkende en overwinterende vogels.

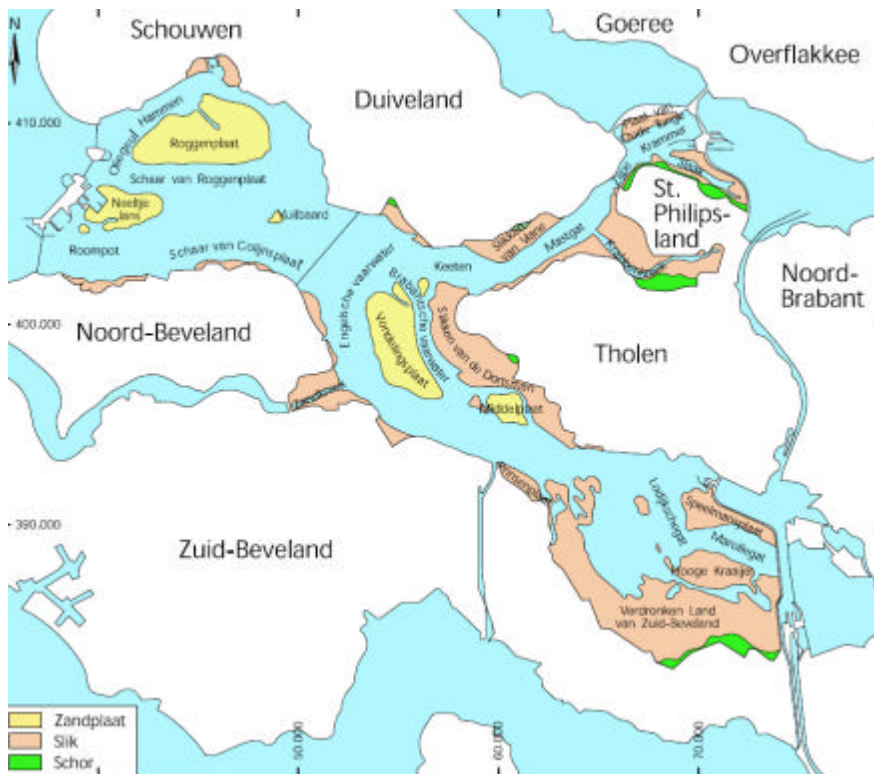
Vanuit de habitatrichtlijn waren er andere argumenten:

De Oosterschelde heeft een zeldzame habitat met haar zoutwater getijdengebied, kreken, schorren, slikken en zandplaten.

Na de bouw van de Oosterscheldekering is het morfologisch evenwicht van de Oosterschelde ernstig verstoord. Dit komt doordat de getijdenslag en vooral het getijdenprisma van de Oosterschelde sterk zijn verminderd. De eb- en vloedgeulen van de Oosterschelde zijn te ruim voor het watervolume dat er doorheen stroomt. De geulen zullen langzaam sedimenteren tot er weer evenwicht in het morfologische systeem is. Dit wordt ook wel de 'Zandhonger' van de Oosterschelde genoemd. Door de afname van de getijdenstromingen, lijkt er geen significante plaatopbouw meer plaats te vinden in de Oosterschelde. De overige hydraulische randvoorwaarden van het intergetijdengebied lijken nauwelijks veranderd. Het gevolg hiervan is een doorlopende afbraak van de platen, slikken en schorren. Mede doordat er vrijwel geen zandtransport door de kering mogelijk lijkt te zijn, zorgt de 'Zandhonger' als het ware voor een herverdeling van het zand in het bekken. Op deze manier probeert het morfologische systeem zijn evenwicht weer te vinden. De totale zandbehoefte van de



Oosterschelde wordt in haar huidige geometrie, geschat op 400-600 miljoen m<sup>3</sup>. Het zandvolume van de platen, slikken en schorren wordt geschat op 160 miljoen m<sup>3</sup>. Er wordt dan vanuit gegaan dat de platen, slikken en schorren tot een maximaal niveau van -3 m N.A.P. eroderen. Dit betekent dat een mogelijk morfologisch evenwicht niet haalbaar is door herverdeling van het sediment in het bekken. Figuur 1.1 toont waar deze platen, slikken en schorren zich bevinden.



Figuur 1.1 Een overzichtkaart van de Oosterschelde waarop de platen, slikken en schorren staan aangegeven.

Beheerder Rijkswaterstaat Zeeland staat voor de vraag hoe de zandhonger zich zal ontwikkelen en de gevolgen daarvan voor de gebruiksfuncties: veiligheid tegen overstroming, vaarwater voor de beroepsvaart en de natuurwaarde. Het project Geomor is opgestart in begin 1980 en eindigde in 1987. Het is opgestart om de morfologische verandering van de Oosterschelde in kaart te brengen. De doelstelling was, een prognose te geven van het verlies van plaatareaal in de komende decennia. Er werd gesteld dat de Oosterschelde zandhonger zou krijgen. Deze prognose blijkt erg nauwkeurig, gezien de tot nu waargenomen afname van het plaatareaal. Het Geomor project onderzocht alleen horizontale erosie. De verticale erosie van de platen (verlies aan droogvalduur) is vele malen ingrijpender dan de horizontale erosie (verlies aan plaatareaal).

Achteraf blijkt dat de vraagstelling van het Geomor project niet toereikend was om de grote veranderingen van de Oosterschelde te kunnen voorspellen. De beheerder kan geen goed beleid maken omdat er weinig inzicht is in de verticale erosie. Om een beter inzicht te krijgen in de veranderingen van de Oosterschelde, is er een nieuw onderzoek gestart. Dit onderzoek moet de belangrijkste processen van de plaaterosie onthullen. Met een beter beeld van de toekomstige ontwikkelingen in de Oosterschelde, kan de projectgroep "Verkenning zandhonger" de gevolgen in kaart brengen voor de gebruikersfuncties. Op basis daarvan kunnen oplossingsrichtlijnen worden opgesteld. Dit onderzoek is een deel van "Verkenning zandhonger".

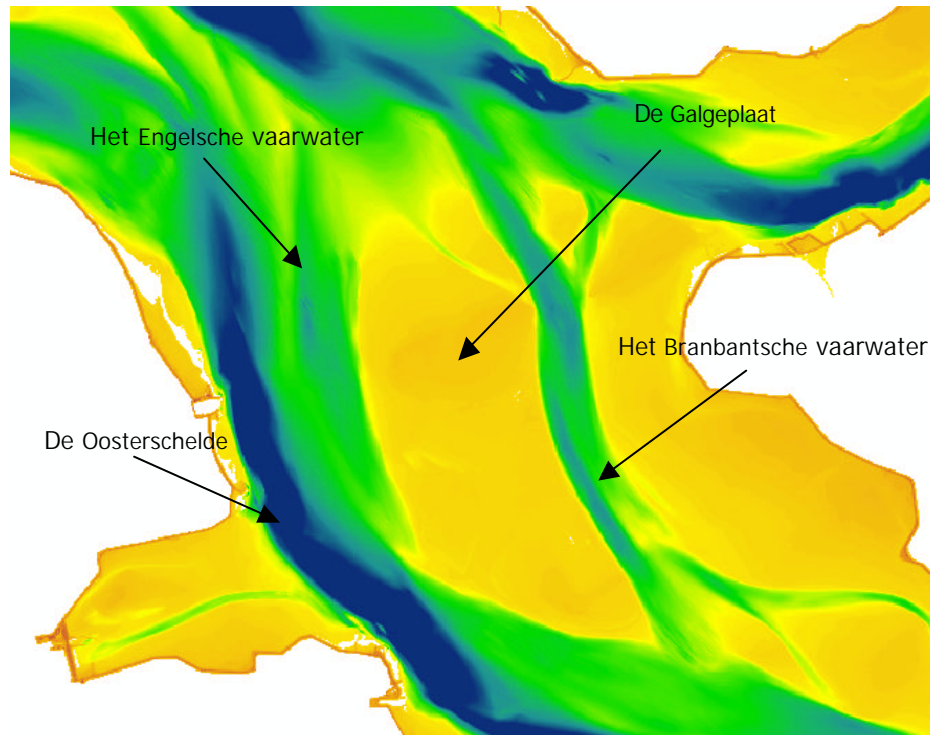


### 1.1.2 Probleemstelling

De beheerder van de Oosterschelde moet op basis van richtlijnen verschillende gebruikersfuncties in stand houden. Toen in 1989 de Oosterschelde werd aangewezen als Speciale Bergingszone (SBZ), betekende dat met behulp van richtlijnen de natuurwaarde beschermd moest worden. Op dat moment was er nog te weinig inzicht in de gevolgen van de Oosterscheldekering omdat er geen langdurige kennis was over de verticale erosie.

De probleemstelling is de volgende:

Er is geen duidelijk beeld wat de bepalende processen zijn in de afbraak van de Galgeplaat in de Oosterschelde, voornamelijk gelet op de verticale erosie. De toekomstige ontwikkeling van de achteruitgang van de plaathoogte van de platen in de Oosterschelde.



*Figuur 1.2 Bodemprofiel rondom de Galgeplaat aan de hand van vaklodingen gemaakt in 2001.*

## 1.2 Beschrijving onderzoeksgebied

Figuur 1.3 toont het diepteprofiel rondom de Galgeplaat. Hierin zijn de drie belangrijke getijdengeulen aangegeven, die de Galgeplaat omringen. Deze worden in dit rapport vaak bij naam genoemd. Om een beter beeld te krijgen van de verschillen in bodemhelling rondom de Galgeplaat, wordt verwezen naar figuur 1.2. Hierin zijn de diepte verschillen aangegeven met dieptecontourlijnen. Hiermee is de steile overgang van geul naar plaat aan zowel de oostzijde, de westzijde als de zuidzijde goed zichtbaar geworden. Het noorden van de Galgeplaat wordt gekenmerkt door een flauwe bodemhelling.



*Figuur 1.3 Bodemprofiel van de Galgeplaat aan gegeven met diepte contourlijnen.*



### 1.3 Aanpak

Dit onderzoek is gebaseerd op meetgegevens verzameld in de periode 1983 tot 2001, dus op een lange tijdreeks waarin de belangrijkste parameters zijn gemeten. Deze meetgegevens bestaan uit hoogtemetingen, windsnelheden, windrichtingen, golfmetingen en waterstanden. De morfologie van de Oosterschelde is zeer complex. Er is voor gekozen om het onderzoeksgebied te verkleinen, hierdoor zijn de lokale omstandigheden eenvoudiger te definiëren. Dit onderzoek wijkt af van het Geomor Project en eerdere studies. Het Geomor Project is gebaseerd op veel meetgegevens, met een kleinere frequentie en meer parameters.

Dit onderzoek bestudeert de bepalende processen van de morfologie van de Galgeplaat. Aan de hand van de beschikbare hoogtemetingen van de Galgeplaat tezamen met de windgegevens en waterstandsmetingen zal een data-analyse worden uitgevoerd. Met behulp van de data-analyse wordt voor een aantal hypothesen naar een onderbouwing gezocht. Voor de totstandkoming van de hypothesen, zie: "Het literatuuronderzoek naar de achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat" (Van der Hoeven, 2006). Hoofdstuk twee geeft hier een korte samenvatting van.

In het laatste hoofdstuk van dit rapport wordt gekeken of de conclusies uit de data-analyse vallen te rijmen met wat verschillende computermodellen laten zien. Hierbij zal gewerkt worden met het WAQUA-model en het SWAN-model.





## 2 Vanuit literatuur naar hypothesen

### 2.1 Proces beschrijving

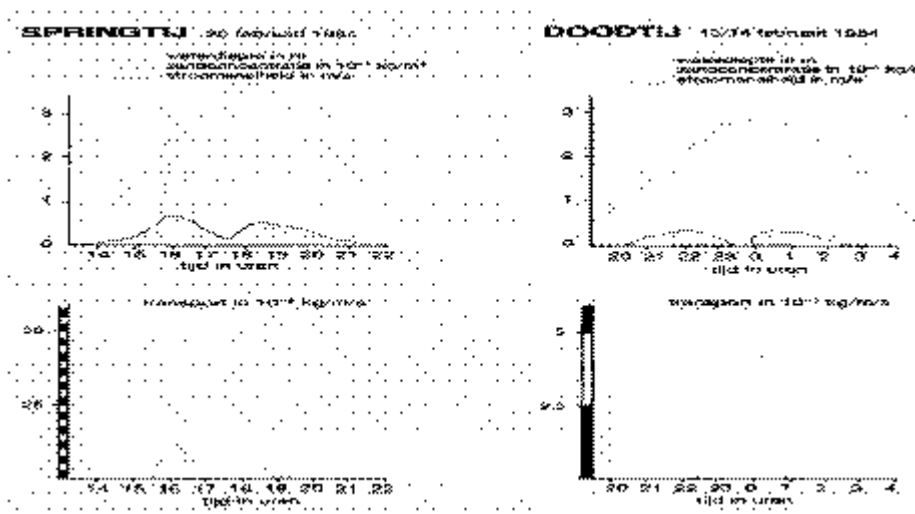
In deze paragraaf worden de bepalende opbouwende en afbrekende processen nadere besproken. Dit is een verkorte literatuur toelichting, voor een uitgebreidere versie wordt verwezen naar het literatuuronderzoek (Van der Hoeven, 2006). Aan de hand van deze proces beschrijving zijn de verschillende onderzoeksparameters en hypothesen tot stand gekomen.

#### 2.1.1 Plaatopbouw

##### 2.1.1.1 Plaatopbouw door getijdenstroming

Getijdenstromingen zijn in estuaria de motor voor het opbouwen van de zandlichamen en het zandtransport. Natuurlijk zorgt de stroming ook voor bodemschuifspanning. Dit heeft vooral een belangrijke invloed op het bodemprofiel. Het bodemprofiel past zich namelijk zo aan, dat er een balans ontstaat tussen het natte doorstromend oppervlak van een geul en de stroomsnelheden, die grotendeels ontstaan door de getijdenbeweging. Hierdoor neemt getijdenstroming de belangrijkste rol op zich voor het sedimenttransport en voedt deze platen en slikken met zand. Aan de rand van de platen vindt veel meer sedimentatie plaats dan op het midden van de plaat. Dit komt doordat ter plaatse van de randen de snelheidsgradiënt van het stromende water veel groter is dan op het midden van de plaat. De concentratie van sediment in de waterkolom staat in verband met de stroomsnelheid van het water. Op de plek waar de snelheidsgradiënt het grootst is vindt de meeste sedimentatie plaats. De stroomsnelheid is van groot belang voor de transportcapaciteit van het stromende water. De

stroomsnelheden gedurende springtij zijn veel hoger dan tijdens doortij. Bij de Oosterschelde kan dit voor de vloodsnelheden tijdens springtij een verhoging van meer dan 50% betekenen, ten opzichte van doortij. Dit houdt in, dat het transport van sediment tijdens doortij, ten opzichte van springtij, een factor van 10 à 20 kan verschillen. Voor de plaatopbouw betekent dit een vergroting van de potentiële opbouw met een factor 4 à 5 ten opzichten van doortij.



Figuur 2.1 Het verschil van sedimenttransporten ter plaatse van de Galgenplaat, ten tijde van een springtij en een doodtij (Eindrapport Geomor, 1987).

Figuur 2.1 toont het verschil in sedimenttransport bij doodtij en bij springtij. Deze sedimenttransporten zijn door middel van metingen vastgesteld. De opbouw van platen en slikken is het grootst wanneer de afbrekende factoren het kleinst zijn. Aangezien golven de belangrijkste afbrekende factor van de platen en slikken zijn, kan tijdens rustig weer de grootste plaatopbouw geschieden. Via een computermodellering is gebleken dat wanneer er geen golven zouden zijn, de plaatopbouw lang door kan gaan (Anneke Hibma, 2004). Zo lang dat de plaathoogte boven het hoogwaterpeil uit kan rijzen. Dit heeft deels te maken met numerieke diffusie van het computermodel, maar ook met de opbouwende krachten van de getijdenstromingen. In haar onderzoek zijn in de computersimulatie dus geen golven aanwezig, hieruit blijkt dat voor plaatopbouw geen golven nodig zijn.





### 2.1.1.2 Bochtstroming

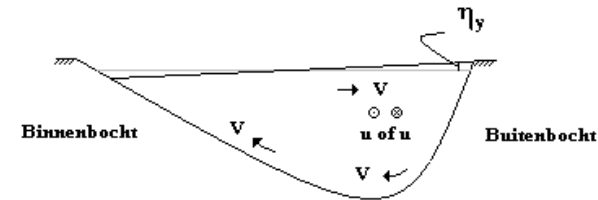
Via de geulen in de monding stroomt het zeewater het getijdenbekken binnen om zo de platen te overspoelen. Deze platen vervullen een bergende rol en slaan het zeewater gedurende een deel van de getijdencyclus op. De meanderende en vertakte geulen, eb- en vloedscharen en platen zijn de karakteristieke kenmerken van de topografie van een intergetijdengebied. Deze topografie is voor een belangrijk deel toe te schrijven aan horizontale en transversale circulatiestromen die worden opgewekt bij geulbochten. Deze bochten in de geul zorgen voor gradiënten in de snelheid en in hoogte verschillen van het wateroppervlak. Door deze gradiënten worden de circulatiestromen opgewekt, zoals in figuur 2.2 te zien is in een dwarsdoorsnede en een bovenaanzicht van een dergelijke geulbocht.

Om een krachtenbalans van dit geheel op te stellen, is het belangrijk de volgende veronderstelling te maken: de stroming heeft zich aangepast onder invloed van bodemweerstand en oppervlakte verhang aan de geulbocht. Zowel de geul- als de stromingsstructuur zijn hoekonafhankelijk, in een cilindrisch coördinatenstelsel. De krachtenbalans ziet er als volgt uit:

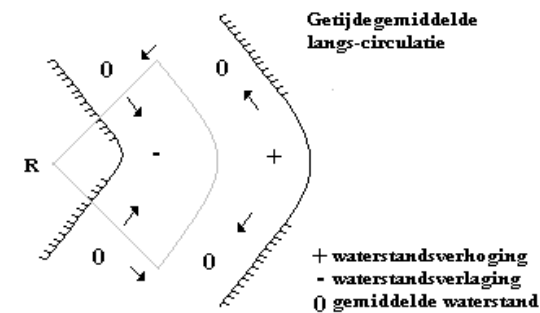
$$-\frac{u^2}{R} + fu + \frac{1}{r}P_y - (Nv_z)_z = 0$$

*Centrifugaal-kracht*
*Coriolis*
*Drukgradiënt*
*Turbulente viscositeit*

Dwarsaanzicht



Bovenaanzicht



Figuur 2.2 Restcirculatie in een geulbocht.

Hier in is:

- R = de straal van de geulbocht (deze is veel groter verondersteld dan de geulbreedte),
- u = de snelheid langs de geul-as,
- z = de verticale coördinaat (bodem: z=h, oppervlak z=?),
- v = de dwarsnelheid en y de dwarscoördinaat,
- N = de viscositeit factor.



De Coriolis bijdrage is gemiddeld over een getijdencyclus neutraal. Dit houdt in dat bij eb en vloed de richting van de kracht tegengesteld is. Bij de centrifugaalkracht is dit niet het geval, deze werkt bij eb en vloed in dezelfde richting. Dichtheidsverschillen kunnen een belangrijke impact hebben op de krachtenbalans. Ze beïnvloeden de verticale structuur van de eddy-viscositeit  $N$  en de grootte en verticale structuur van de transversale druk  $P_y$ . Door bodemwrijving en snelheidsverschillen kan gelaagdheid in de stroming ontstaan. Bij sterke gelaagdheid kan de schering in de centrifugaalkracht gecompenseerd worden door dwarsverhang in het oppervlak van het water. Dit houdt in dat er daardoor geen grote dwarscirculatie ontstaat.

### 2.1.1.3 Het ontstaan van ebscharen en vloedscharen

In een getijdengeul is de waterstand lager in de binnenbocht dan in de buitenbocht. Dit dwarsverhang veroorzaakt ook een langsverhang. Langs beide bochten, in de lengte richting naar het centrum van de bocht toe, is dan ook een stijging, dan wel daling waarneembaar van de waterstand. Deze langs-verhangen zorgen voor de horizontale circulatie. Deze is ter plaatse van de waterspiegel naar de buitenbocht toegericht. Dit heeft tot gevolg dat de getijdenstromingen, zowel eb als vloed, de bocht uit willen schieten aan het einde van de buitenbocht. In de buurt van de bodem is de stroming naar de binnenbocht toegericht. Op deze plaats in de waterkolom is de concentratie van sediment het hoogst. Hierdoor is het netto sedimenttransport gericht naar de binnenbocht. De horizontale circulatie heeft hetzelfde effect als de transversale circulatie. Beide circulaties hebben uitbochting en plaatopbouw in de binnenbocht tot gevolg.

Een rechte geul zal niet stabiel zijn, want elke uitwijking in de bedding van de geul zal uitgroeien. De geuluitbochting is een zelfversterkend fenomeen. Naarmate de bocht scherper wordt, versterkt dit de

geuluitbochting. Het Coriolis effect is bij eb en vloed tegengesteld van richting, hierdoor zal een brede geul die een S-bocht maakt, de neiging hebben zich te splitsen in een eb- en een vloedgedomineerde geul. Eb- en vloedscharen zijn te vinden in de binnenbochten van een meanderende geul door een plaatgebied. Aan het einde van de voorafgaande buitenbocht begint een schaar zich te ontwikkelen door het doorschieten van de stroming. De gemiddelde waterstand bij vloed is hoger dan gedurende eb. Het snelheidsverschil leidt ertoe dat de vloedscharen zich sterker zullen ontwikkelen dan de ebscharen. De platen worden voornamelijk gevoed met zand afkomstig van deze scharen.

Er bestaat een relatie tussen de 'golflengte' van een meanderende geul en het getijdenvolume. Hoe groter het getijdenvolume, hoe groter de meander zal worden. Wanneer het getijdenprisma afneemt, verandert de bochtkromming en de meanderlengte. Door het afnemen van het getijdenprisma neemt de stroomsnelheid ook af. Dit heeft tot gevolg dat de erosie in de buitenbocht afneemt. Het langzaam stromende water past zich sneller aan de bochtkromming aan. Dit zorgt ervoor dat de plaatsen waar de maximale erosie zich voordoet, zich stroomopwaarts verplaatsen in de bocht. Stroomopwaarts t.o.v. de vloedstroming. Ook de sedimentatie verplaatst zich hierdoor meer stroomafwaarts in de buitenbocht. Dit verklaart dat een kleiner getijdenprisma een verkleining van de meander en de bochtkromming tot gevolg heeft.



## 2.1.2 Plaatafbraak

### 2.1.2.1 Het ontstaan van windgolven

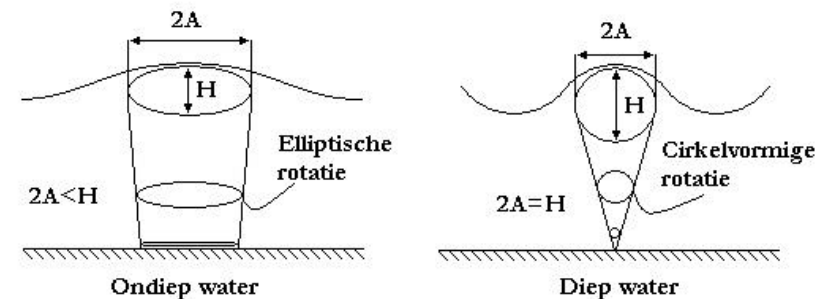
Uit onderzoek is gebleken dat windgolven worden opwekt door spanningen veroorzaakt door wind. Twee verschillende spanningen worden door de wind geleverd, namelijk normaal spanningen en wrijvingsspanningen. Bij het ontstaan van golven spelen de normaalspanningen veruit de belangrijkste rol. De wrijvingsspanningen zijn zo goed als te verwaarlozen bij het ontstaan van golven. Deze normaalspanningen zijn drukvelden die zich over het wateroppervlak voort bewegen. Dit druk verschil zorgt voor het ontstaan van de golven. Hierna pas speelt de wind die er overheen raast een meer prominente rol. De wind probeert het oppervlakte profiel van de golven te volgen, maar zal na de golftop het profiel even moeten loslaten, hierdoor ontstaat aan de lijzijde een onderdruk en aan de loefzijde tegelijkertijd een overdruk. Dit druk verschil draagt bij aan een versnelde golfgroei.

Door dit fysische systeem groeien golven naar mate ze langer onder invloed zijn van de wind. De golven onttrekken energie uit de wind die er overheen raast. De interesse in dit onderzoek gaat uit naar de golfopbouw. De golfopbouw wordt door twee omgevingsparameters sterk beïnvloedt. Ten eerste de strijklengte van de wind over het water; hoe langer deze is hoe meer windenergie er wordt omgezet in golfenergie. Ten tweede de waterdiepte; hoe dieper het water is des te groter de golven kunnen worden. Bij ondiep water gaat er golfenergie verloren door de bodemschuifspanningen die ontstaan. Er is sprake van ondiepwater golven, als de waterdiepte kleiner is dan de helft van de golflengte. Beide parameters worden bepaald door de lokale

geometrie. Hieruit blijkt dat de maximale golfhoogte sterk wordt bepaald door lokale omstandigheden.

### 2.1.2.2 Erosie door golven

Zoals al eerder gezegd, zijn het de golven die de belangrijkste rol spelen in het opwoelen van het zand. Het meest duidelijk zichtbaar is dat ter plaatsen van de brekerzone. De plek waar de golf zogoed als al haar energie verliest door kapot te slaan op het zand. In een intergetijde gebied verplaatst de plek van de golfaanval naarmate de eb dan wel vloed verstrijkt. Vandaar dat in een estuarium een groot bodemoppervlak wordt bloot gesteld aan golfaanval. Dit is echter niet het gehele gebied dat onderhevig is aan golferosie. Golven zorgen namelijk ook buiten de brekerzone voor erosie.



Figuur 2.3 Orbitale waterbewegingen bij passage van een golf.

Dit heeft te maken met de orbitale beweging die het water maakt wanneer er een golf passeert. In figuur 2.3 is goed de invloed van de waterdiepte te zien op de orbitale beweging die het water doorloopt. Er zijn twee belangrijke verschillen, ten eerste zijn in



ondiep water de horizontale snelheden vele malen groter dan de verticalen. Deze horizontale snelheden resulteren in zeer grote bodemschuifspanningen. Ten tweede zijn in diepwater zowel de horizontale als de verticale snelheden op de bodem gereduceerd tot nul. Als golven door ondiep water zich verplaatsen, zorgen ze voor grote bodemschuifspanningen op de bodem. Deze grote schuifspanningen resulteren in sterkere opwoeling van zand, wat een grote sedimenttransporten mogelijk kan maken. Het is al eerder vermeld dat tijdens rustig weer en springtij in principe de grootste plaatopbouw zich kan voordoen. De grootste erosie is mogelijk tijdens doortij en extreme weersomstandigheden. Er zijn twee redenen waarom de maximale erosie zich voordoet tijdens doortij. Ten eerste omdat tijdens springtij de grootste plaatopbouw zich voordoet, die een groot deel van de erosie kan compenseren. Ten tweede is tijdens springtij een gedeelte van de eb- en vloedcyclus de waterstand te hoog voor golfinvloeden op de lagere delen van de plaat.

### 2.1.3 Windgedreven stromingen

Windgedreven stromingen ontstaan doordat water wordt opgezet door de wind. Deze windgedreven stromingen zijn pas van bepalend karakter tijdens extreme weersomstandigheden. De formule om de windopzet te kunnen beschrijven, luidt als volgt:

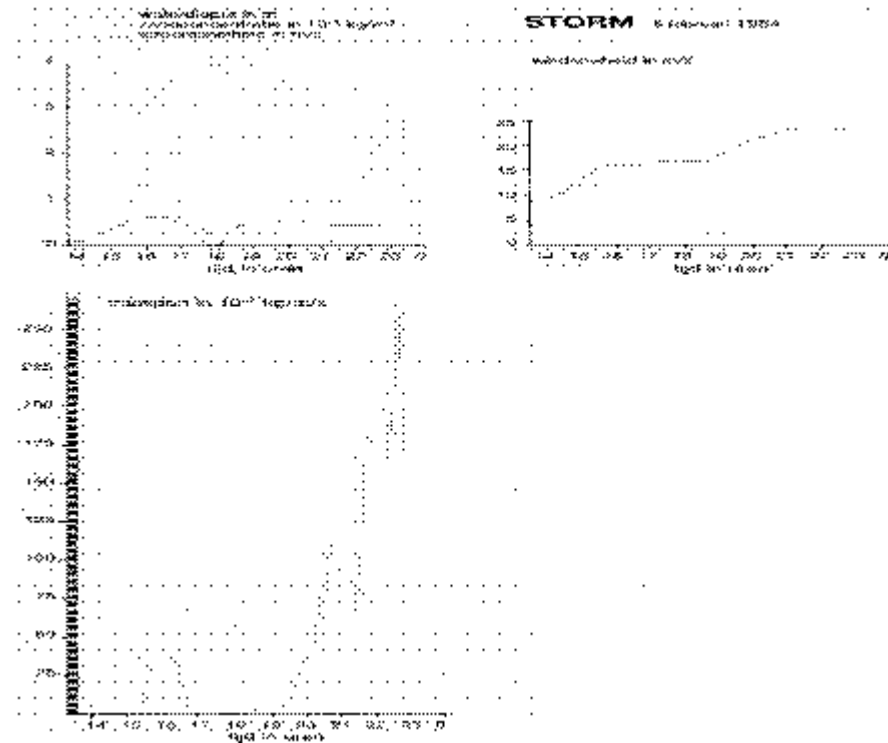
$$W = c \frac{U^2}{gd} F$$

Hier in is: *W is de wind opzet*  
*c is de frictiecoëfficiënt,*  
*U is de windsnelheid,*  
*F is de strijklengte,*  
*d is de waterdiepte*

Uit deze formule is af te leiden, dat de o.a. waterdiepte bepalend is voor de grootte van de windopzet. Naarmate de waterdiepte kleiner wordt, krijgt de wind meer grip op het water. De wind gedreven stromingen kunnen hierdoor vooral in ondiep water een belangrijke factor zijn. In een estuarium met allerlei verschillende waterdiepten, zorgen ze voor grote verschillen in het sedimenttransport. Dit effect wordt versterkt tijdens extreme weersomstandigheden, omdat dan ook de grootste golven aanwezig zijn. Deze grote golven zorgen voor een hoge concentratie sediment in de waterkolom. Tijdens extreme weersomstandigheden kunnen de windgedreven stromingen belangrijk zijn wat betreft sedimentatie-/erosie patronen in het estuarium. In het bijzonder bij kleine waterdieptes boven op de platen beïnvloeden de windgedreven stromingen de richting en de kracht van de waterstroming aanzienlijk en daarmee de grootte en richting van het sedimenttransport.



Figuur 2.4 toont het sedimenttransport tijdens een storm. Als dit wordt vergeleken met figuur 2.1 wordt het verschil goed duidelijk tussen normale weersomstandigheden en tijdens een storm. Hieruit blijkt dat de concentratie sediment in de waterkolom velen malen groter is. In figuur 2.4 is te zien dat de piek van de concentratie, gelijk valt met de hardste wind en kleinste waterdiepte. Het transport zelf is ook het grootste bij deze beperkte waterdiepte.



Figuur 2.4 Het sedimenttransport tijdens een extreme weersomstandigheid (Eindrapport Geomor, 1987).



### 2.1.4 Twee onderzoeksparameters

Hoofdstuk drie behandelt de twee onderzoeksparameters. De eerste onderzoeksparameter zijn de waterstandsmetingen. Hiermee kan een hypothese worden gevormd: "Er is een correlatie tussen opgetreden getij en opgetreden sedimentatie/erosie". Toen dit onderzoek gestart werd, waren er verschillende meetgegevens beschikbaar over de gehele meetperiode (1983-2001), o.a. waterstandmetingen. Hiermee kan het opgetreden getij worden bepaald, hierin zit zowel het astronomisch getij als de windopzet. In samenhang met de bodemhoogtemetingen kan er op zoek worden gegaan naar een correlatie tussen het opgetreden getij en de opgetreden sedimentatie/erosie. Bij de hoogtemetingen was de tijdsduur van de meest voorgekomen meetperiode tussen de twee en drie weken. Dit is korter dan de springtijcyclus, waardoor er een duidelijk verschil is tussen het opgetreden getij in de verschillende meetperiodes. In de periode 1987-1993 hebben zich geen grote veranderingen in de geometrie van het bekken voorgedaan. De grootte van de getijdenslag staat dus in direct verband met de grootte van de getijdenstromingen. Daar de getijdenstromingen de belangrijkste motor zijn voor de plaatopbouw, wordt er een verband vermoed tussen het getij en de sedimentatie/erosie op de Galgeplaat.

Met de tweede onderzoeksparameter kan een dergelijke hypothese worden gevormd: "Er is een correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en opgetreden sedimentatie-/erosie". De plaatafbraak wordt door twee systemen bepaald: golven en stromingen. De golven woelen het zand op en dit sediment wordt getransporteerd door het stromende water. De golven in de Oosterschelde zijn sinds de bouw van de kering lokale windgolven. Het golfklimaat van de Oosterschelde

is dus goed te beschrijven aan de hand van de opgetreden weersomstandigheden tezamen met de lokale geometrie. De lokale geometrie wordt bepaald door een aantal belangrijke variabelen; de strijklengte en de waterdiepte.

### 2.1.5 De hypotheses

In deze subparagraaf wordt een nadere toelichting gegeven bij de hypotheses. Deze hypotheses zijn opgesteld aan de hand van de literatuur behandeld in de voorgaande paragrafen. Voor een extra toelichting op de totstandkoming van de hypotheses wordt verwezen naar de literatuurstudie (Van der Hoeven, 2006). Aan de hand van de data-analyse worden de volgende hypothese getoetst:

1. Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen significante plaatopbouw meer plaats.
2. Een onderverdeling van de karakteristieke windrichting zorgt voor een duidelijker verband tussen het sedimentatie-/erosiepatroon en de opgetreden weersomstandigheden.
3. De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat.
4. De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert in de tijd.
5. Een onderverdeling van de Galgeplaat zorgt voor een duidelijker verband tussen de opgetreden sedimentatie-/erosie en de opgetreden weersomstandigheden.
6. Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathoogtes kan meer inzicht verschaffen in de verticale erosie.



### **2.1.5.1 Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen significante plaatopbouw meer plaats**

Uit de eerder uiteenzetting van de literatuur blijkt dat het getijdenprisma een belangrijke factor is voor de plaatopbouw. De komst van de Oosterscheldekering en de compartimenteringdammen betekende een drastische afname van het getijdenprisma. Dit resulteerde bij de Galgeplaat in een snelheidsreductie van de getijdenstromingen van 20-40%. De golfaanval op de Galgeplaat is weinig tot niet veranderd door de komst van de kering. Aangezien er vanaf 1987 een duidelijke achteruitgang van de plaathoogte waarneembaar is, lijkt het alsof er geen plaatopbouw meer plaatsvindt door het geknepen getij. Deze hypothese toetst het vermoeden naar voren dat er sinds de komst van de Oosterscheldekering geen significante plaatopbouw meer plaats vindt.

### **2.1.5.2 Een onderverdeling van de karakteristieke windrichting zorgt voor een duidelijker verband tussen het sedimentatie-/erosiepatroon en de opgetreden weersomstandigheden.**

De lokale variabelen, de waterdiepte en de strijklengte, hebben een belangrijke invloed op de morfologie van de plaat. De wind zorgt voor de ontwikkeling van golven en windgedreven stromingen. Elke windrichting kent eigen lokale omstandigheden: Een westenwind heeft een andere strijklengte dan bijvoorbeeld een noordwestenwind. Ook het diepteprofiel van het water verschilt per windrichting. Hierdoor hebben de verschillende windrichtingen een eigen significante golfhoogte. De golfhoogten in combinatie met het plaatprofiel bepalen de opwoelende werking van de brekende golven. Een onderverdeling van de karakteristieke windrichtingen kan mogelijk voor een duidelijker

verband zorgen tussen de opgetreden weersomstandigheden en de opgetreden sedimentatie/erosie.

### **2.1.5.3 De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat.**

De kering sluit tijdens extreme weersomstandigheden uit westelijke tot noordelijke windrichtingen. Door de gesloten kering, blijft de waterdiepte boven de platen beperkt en lager dan zonder een sluiting. Vroeger kon de windopzet vanuit zee zorgen voor een flinke waterstandsverhoging. Dit zorgde ervoor dat de waterdiepte boven de Galgeplaat groter werd. De sluiting van de kering zorgt ervoor dat de waterdiepte op de Galgeplaat kleiner is tijdens deze stormen. Bij de onderzoekshypothese wordt er van uitgegaan, dat de vermindering van de waterdiepte, een toename van bodemschuifspanningen en windgedreven stroomsnelheden boven de plaat tot gevolg heeft. Deze toenames maken grotere zandtransporten mogelijk. Hierdoor wordt verwacht dat zich tijdens een gesloten kering ernstige erosie voordoet.

### **2.1.5.4 De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert in de tijd.**

Sinds de komst van de Oosterscheldekering is het plaatprofiel drastisch aan het veranderen. Er vindt een afvlakking van het profiel plaats: plaatverlaging bovenop het zandlichaam en sedimentatie aan de rand van de plaat. Hierdoor neemt de waterdiepte boven de plaat door de jaren heen toe. Dit heeft gevolgen voor zowel de stroomsnelheid als de bodemschuifspanningen boven de plaat. Een toename van de waterdiepte zorgt er voor dat de windgedreven stromingen sterk afnemen. Daar staat tegen over dat de getijdenstromingen iets toenemen. Er wordt vanuit gegaan dat een



toename van de waterdiepte uiteindelijk resulteert in een afname van de stroomsnelheid tijdens omstandigheden waar nog plaatopbouw plaats vindt. De toenamen van de waterdiepte heeft tot gevolg dat de bodemschuifspanningen veroorzaakt door golven afnemen. Dit komt doordat de golf zich in dieper water begeeft, hierdoor neemt de opwoelende werking van de golven af. Slechts in enkele gevallen leidt plaatdaling tot een kleine toename van de golfhoogte, bij extreme weeromstandigheden. Hierdoor treedt er tijdens deze omstandigheden geen verandering op. De plaatdaling zorgt in algemene zin voor een afname van de bodemschuifspanningen veroorzaakt door de golven.

Waarschijnlijk is er een optimale waterdiepte voor de maximale plaatdaling. Deze optimale waterdiepte is vermoedelijk klein, doordat de het sedimenttransport bovenop de plaat als beperkende factor wordt gezien. Waarschijnlijk zal er een versnelling van de plaatverlaging optreden tot de optimale waterdiepte is bereikt, hierna zal een vertraging optreden. Echter rekening houden met de getijdenslag, verschuift de optimale waterdiepte over de plaat. Maar hoe lager een plaat is komen te liggen hoe minder oppervlakte van de plaat deze optimale diepte heeft op enig moment. Vandaar de veronderstelling dat geïntegreerd over de gehele plaat de plaatverlaging vertraagt in de loop der tijd.

#### **2.1.5.5 Een onderverdeling van de Galgeplaat zorgt voor een duidelijker verband tussen de opgetreden sedimentatie/erosie en de opgetreden weersomstandigheden.**

De lokale omstandigheden waterdiepte en beschutting, spelen een belangrijke rol in het lokale golfklimaat. Vandaar dat een

onderverdeling van de Galgeplaat in plaatdelen het morfologisch systeem van de Galgeplaat kan verhelderen.

#### **2.1.5.6 Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes meer inzicht kan verschaffen in de verticale erosie.**

De droogvalduur van de Galgeplaat is veel sneller afgenomen dan eerder werd voorspeld. Vandaar dat men op zoek is naar een verbeterd inzicht in de verticale erosie op de Galgeplaat. De hogere plaatdelen lijken in de verschillende vaklodingen, niet de sterkste plaatverlaging te kennen. Een verklaring hiervoor kan zijn dat deze plaatsen de grootste plaatopbouw kennen. Deze locaties worden op natuurlijke wijze op hoogte gehouden door de overgebleven plaatopbouw. De sterke achteruitgang van de Scholeksterpopulatie kan worden verklaard door de hevige erosie van de middelhoge plaatdelen. Deze plaathogtes worden ook het langst blootgesteld aan golfaanval tijdens de getijdencyclus. Vandaar dat een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes meer inzicht kan verschaffen in deze verticale erosie.





### 3 Van meetgegevens naar de verschillende grafieken

De eerste paragraaf laat zien welke meetgegevens er voor het onderzoek zijn gebruikt. De tweede paragraaf belicht de methode die gebruikt is om van de meetgegevens naar de parameters over te gaan. In de derde paragraaf zullen de verschillende grafieken worden verklaard.

#### 3.1 Beschikbare meetgegevens

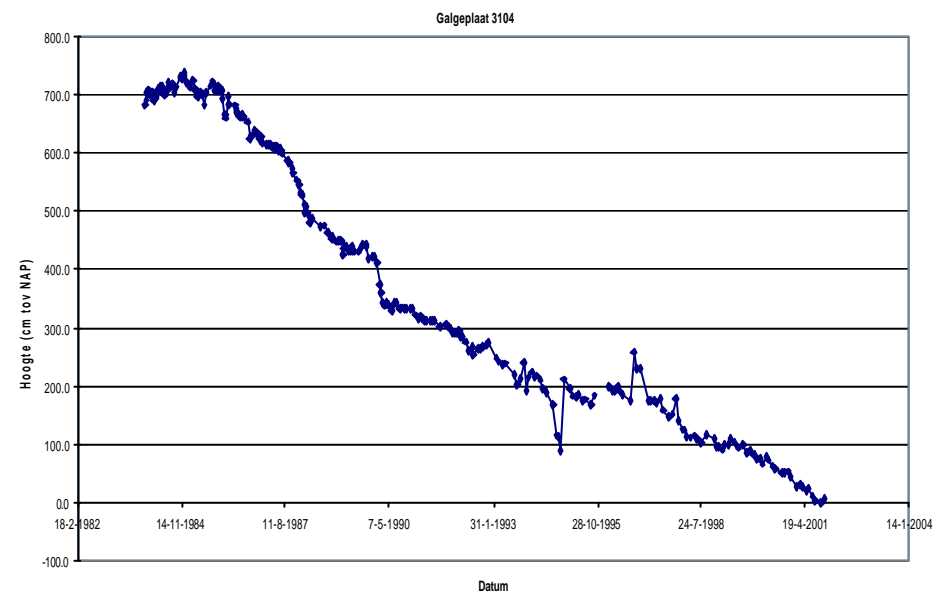
Deze paragraaf licht de verschillende gegevens toe die beschikbaar waren ten tijde van dit onderzoek.

##### 3.1.1 Hoogtemetingen op de Galgeplaat

Rijkswaterstaat wist dat de aanleg van de Oosterscheldekering grote gevolgen zou hebben voor het intergetijdengebied. Er is dan ook besloten deze veranderingen te monitoren. Op de Galgeplaat waren 43 locaties waar de hoogteveranderingen gemeten werden. In 1983 is men begonnen, echter niet meteen met alle meetlocaties. Pas vanaf halverwege 1984, zijn er meetgegevens van alle 43 meetlocaties. De hoogtemetingen zijn uitgevoerd tot eind 2001.

De meetlocaties zijn over de plaat verdeeld in raaien, om een beter inzicht te krijgen in het veranderen van het profiel van het intergetijdengebied. In paragraaf 1.3.1 staat een afbeelding van de Galgeplaat waarop de 43 meetlocaties zijn aangegeven. Een hoogtebepaling van een meetlocatie bestaat uit 15 hoogtemetingen om het punt heen om ongeregelde heden van kleine ribbels in de zandbodem weg te filteren. De meest voorkomende periode tussen twee metingen ligt tussen de 2 à 3 weken. Niet alle meetlocaties zijn op dezelfde dag

gemeten, soms zit er enkele dagen tussen. In de eerste periode van 1983-1990 is het frequentst gemeten. In de periode 1991-2001 neemt het aantal metingen per jaar langzaam af. In dit onderzoek is gekeken naar het hoogteverschil tussen metingen, om zo een verband te kunnen leggen tussen opgetreden weersomstandigheden en sedimentatie/erosie op de Galgeplaat. Figuur 3.1 geeft een afbeelding van de hoogtereregistratie van een meetlocatie op de Galgeplaat.



Figuur 3.1 Een weergave van de daling, bij een meetlocatie op het Noorden van de Galgeplaat, op een hooggelegen gedeelte.



Schaal van Beaufort	Windsnelheid		Omschrijving volgens KNMI
	knoop	m/s	
0	0- 1	0.0- 0.2	windstil
1	1- 3	0.3- 1.5	zwakke wind
2	4- 6	1.6- 3.3	zwakke wind
3	7-10	3.4- 5.4	matige wind
4	11-15	5.5- 7.9	matige wind
5	16-21	8.0-10.7	vrij krachtige wind
6	22-27	10.8-13.8	krachtige wind
7	28-33	13.9-17.1	harde wind
8	34-40	17.2-20.7	stormachtige wind
9	41-47	20.8-24.4	storm
10	48-55	24.5-28.4	zware storm
11	56-63	28.5-32.6	zeer zware storm
12	64+	32.7+	orkaan

Tabel 3.1 Een schaalverdeling van m/s naar de schaal van Beaufort.

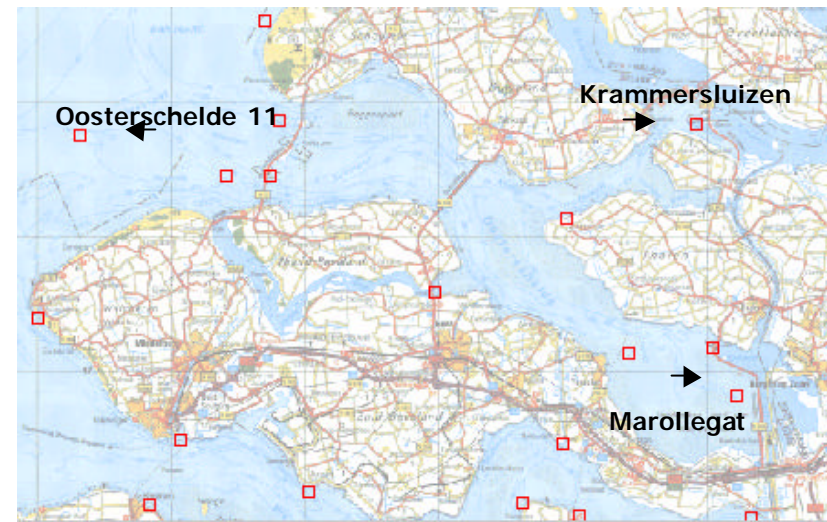
### 3.1.2 Windgegevens

In de Oosterschelde is een aantal windmeetstations. Elke tien minuten wordt de windsnelheid en de windrichting bepaald. Op de Galgeplaat is geen meetstation, er is voor gekozen het meetstation bij het Marollegat te gebruiken, zie figuur 3.2. Ten eerste omdat het dicht bij de Galgeplaat is. Ten tweede omdat het ten noorden en ten westen omgeven wordt door vrij water. Dit is een belangrijke reden omdat het de minste windverstoring oplevert bij de heersende windrichtingen, net als bij de Galgeplaat. Hierdoor hebben ze overeenkomstige hydraulische randvoorwaarden. Dit onderzoek gebruikt deze windgegevens, om te kijken of er een verband is tussen de windomstandigheden en de opgetreden sedimentatie-/erosie bij de Galgeplaat. In dit onderzoek wordt gewerkt met de windsnelheid in dm/s. In tabel 3.1 is de schaal van Beaufort gegeven ten opzichte van de windsnelheid in m/s (Beaufort, 1806), zodat de lezer zich gemakkelijker een beeld kan vormen van de kracht van de wind.

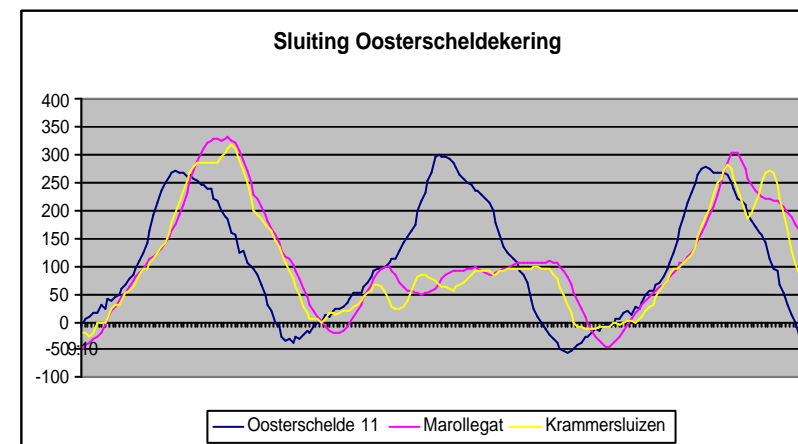


### 3.1.3 Waterstanden

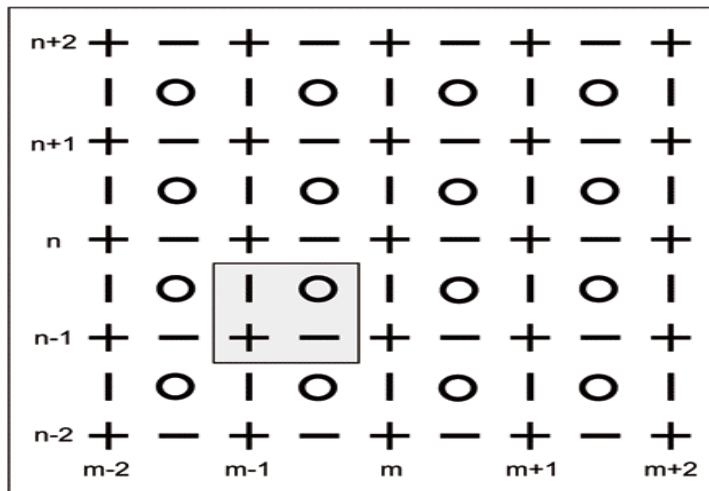
Ten westen van de stormvloedkering en in de Oosterschelde is een aantal meetstations die de waterstand registreren. Dit gebeurt elke tien minuten. Dit onderzoek gebruikt deze gegevens om te kijken of er een verband is tussen opgetreden getijdenslag en de opgetreden erosie/sedimentatie op en rondom de Galgeplaat. De meetgegevens van het meetstation in het Marollegat zijn hiervoor gebruikt. Om een goede voorspelling te kunnen maken van de veranderingen, is er ook gekeken naar veranderingen van de getijdenkrommen. Hiervoor zijn drie meetstations gebruikt: de Oosterschelde 11, het Marollegat en de Krammersluizen, zie figuur 3.2. In figuur 3.3 zijn de waterstanden van deze drie meetstations aangegeven tijdens een sluiting van de kering.




Figuur 3.2 De verschillende meetstations in de Zeeuwse delta.



Figuur 3.3 Weergave van de waterstanden bij drie verschillende meetstations bij een gesloten Oosterscheldekering.



#### EXPLANATION

-  ENCLOSURES ALL ELEMENTS OF A SINGLE CELL
- +** WATER-LEVEL GRID POINT
- O** DEPTH GRID POINT
- I** V-VELOCITY GRID POINT
- U-VELOCITY GRID POINT

Figuur 3.4 Het 'staggered grid' zoals gebruikt in het WAQUA-model; de waterhoogte of de stroomsnelheid is bekend.

### 3.1.4 Golfgegevens

In de periode 1983-2001 is in de Oosterschelde op een aantal plaatsen de golfhoogte geregistreerd. Al snel bleek dat deze golfgegevens voor dit onderzoek niet bruikbaar zijn. Ten eerste omdat bij de Galgeplaat maar zeer weinig werd gemeten. Ten tweede omdat op andere meetlocaties het bodemprofiel van de Oosterschelde zorgt voor totaal verschillende golfomstandigheden. Dit onderzoek gebruikt deze gegevens dan ook niet.



### 3.1.5 WAQUA-model resultaten

In het onderzoek is gebruik gemaakt van het computermodel WAQUA.

Het model berekent waterbewegingen en water kwaliteitsimulaties. Het model is zeer geschikt voor estuaria, kustgebieden en rivieren. De WAQUA software is gebaseerd op SIMONA een flexibel concept voor ontwikkeling van modelleringsoftware (eindige differentie methode). Het model is twee dimensionaal en berekent water niveaus, stromingen en transport van deeltjes in open water. Het gebruikte model in dit onderzoek berekent het stromingsprofiel van de Oosterschelde met behulp van een "staggered grid", waarbij de waterhoogte en stroomsnelheid elkaar afwisselen (zie figuur 3.4). In het model wordt eventuele windopzet aan de hand van de weersomstandigheden berekend. Het gebruikte bodemprofiel is het SCALOOST-profiel uit het jaar 1991.

### 3.1.6 SWAN-model resultaten

Bij de onderbouwing van de data-analyse, wordt een aantal malen gebruik gemaakt van het computermodel SWAN. De afkorting staat voor Simulating WAVes Nearshore. Het model is geschikt voor het bepalen van extreme golf omstandigheden in kustwateren, zoals estuaria, getijdenbekkens en intergetijdengebieden. Met namen het voorspellen van lokale windgolven met gegeven bodemprofiel, windveld, waterniveau en stromingsveld kan het SWAN-model worden gebruikt. Het model is een derde generatie fasegemiddeld golfmodel voor de simulatie in diep water en in ondiep water. Het model zit in het huidige Delft3d model verwerkt. Het gebruikte bodemprofiel is het KUSTZUID uit het jaar 1991. Dit is in principe hetzelfde profiel als het SCALOOST maar grover.



## 3.2 Van meetgegevens naar parameters

Deze paragraaf licht toe hoe de verschillende parameters zijn bepaald op basis van de beschikbare meetgegevens. Aan de hand van deze parameters is op zoek gegaan naar een verbeterd systeeminzicht.

### 3.2.1 Sedimentatie/erosie

Om de hoogtemetingen te gebruiken ter onderbouwing van de onderzoekshypotheses, wordt er in dit onderzoek gewerkt met het hoogteverschil tussen twee opeenvolgende metingen van een meetlocatie. Van een hoogtemeting wordt de eerdere hoogtemeting afgetrokken, een positief verschil betekent sedimentatie, een negatief verschil betekent erosie, hieronder is de berekening zichtbaar:

$$Se = \frac{h_m - h_{m-1}}{\Delta t}$$

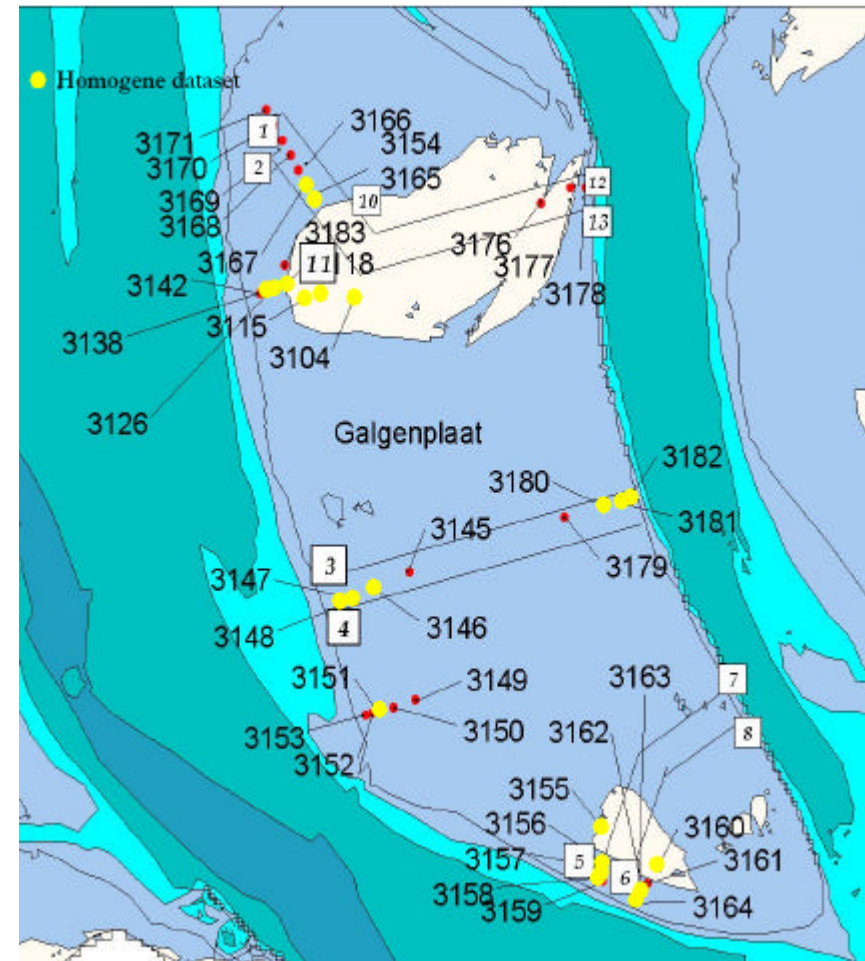
$Se$  = Sedimentatie / erosiesnelheid (in mm / week)

$h$  = Hoogtemeting (in mm)

$\Delta t$  = Tijdsverschiltussende hoogtemetingen (in dagen)

### 3.2.2 Homogene dataset van hoogtemetingen

De behandeling van alle hoogteverschillen afzonderlijk zou een onoverzichtelijk geheel geven. Sedimentatie/erosie data is gesommeerd over de plaat en uitgedrukt in mm sedimentatie of erosie, daarom is het van belang dat alleen wordt gewerkt met meetlocaties die de gehele periode zijn gemeten.



Figuur 3.5 Locaties van de meetpunten op de Galgenplaat die samen de homogene dataset vormen.



Dit is de homogene dataset. Figuur 3.5 toont de meetlocaties op de Galgeplaat. Deze figuur geeft ook aan welke meetlocaties gebruikt zijn voor de homogene dataset.

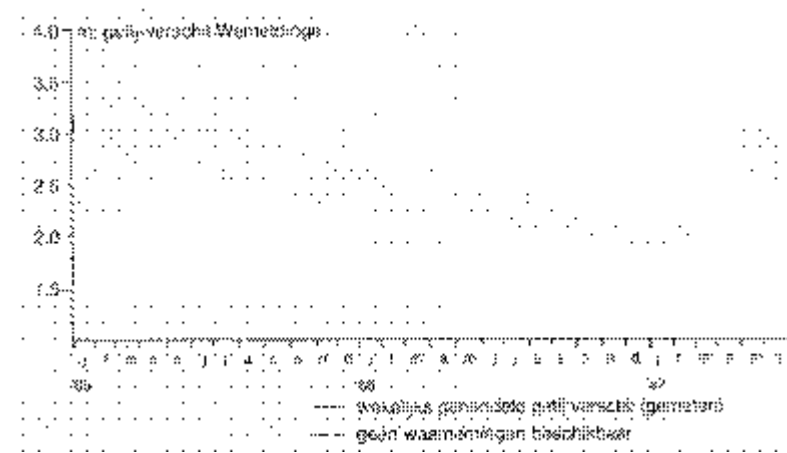
### 3.2.3 De drie meetperiodes

Dit onderzoek is voor een belangrijk deel gebaseerd op de vele hoogtemetingen uitgevoerd op de Galgeplaat in de periode 1983-2001. Tijdens de data-analyse zijn drie deelperiodes hieruit meerdere keren bestudeerd. Er spelen een paar belangrijke factoren mee die de deelperiode mede bepaalde. Om een onderbouwing te vinden voor de hypothese: "Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen significante plaatopbouw meer plaats", wordt er een vergelijking gemaakt tussen twee periodes. De ene periode is van voor de realisatie van de Oosterscheldekering, de andere van erna. Doordat er wordt gewerkt met een homogene dataset, zie subparagraaf 3.2.2, kan dit een beperking opleveren van de te gebruiken dataset.

De eerste periode is van begin 1984 tot aan begin 1986, er liggen een aantal redenen voor de keuze van deze periode. Ten eerste is in het begin van 1984 de homogene dataset pas mogelijk, daarvoor waren nog niet alle meetlocaties aanwezig. Het einde van deze periode heeft te maken met de sterke reductie van het getijdenverschil in het jaar 1986. Doordat de aanleg van de stormvloedkering in een vergevorderd stadium was in 1986, werd het instromende getij sterk gehinderd. Hierdoor is een duidelijke afname van de getijdenslag zichtbaar in dat jaar, zie figuur 3.6. De eerste periode is uitgekozen om haar grotere getijdenslag, vandaar dat de periode maar loopt tot begin 1986.

De tweede periode is vanaf maart 1987 tot eind 1993. Het begin van deze periode is gekozen omdat de realisatie van de Oosterschelde

kering dan volledig is voltooid. Daarbij is ook de getijdenslag weer terug op haar voorspelde niveau, zie figuur 3.6. De tweede periode loopt tot eind 1993. In hoofdstuk 2 komt naar voren dat het bekken duidelijk aan het veranderen is. Deze verandering kan voor een vertroebeling in de dataset zorgen. Daarnaast wordt de frequentie van de hoogtemetingen na 1993 veel kleiner, wat ook weer een vertroebeling in de dataset kan veroorzaken. Hierdoor is er voor gekozen de dataset eind 1993 af te breken.



Figuur 3.6 Weergave van de veranderende getijdenslag in het Oosterschelde bekken tijdens de eindfase van de oplevering van de stormvloedkering.

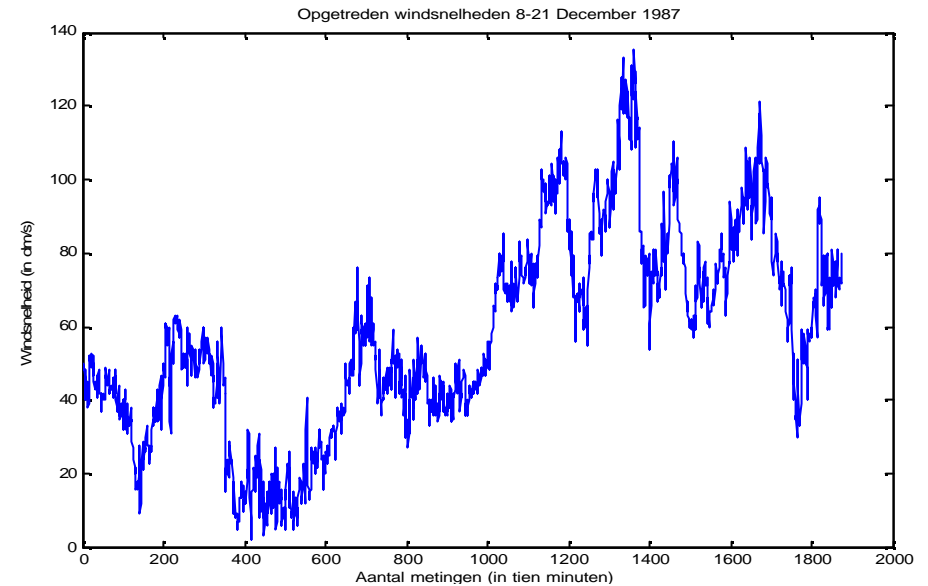
De derde periode is vanaf begin 1994 tot 2001. Deze periode is in het onderzoek gebruikt om te kijken naar de verandering in het sedimentatie-/erosiepatroon in de tijd.



### 3.2.4 Karakteristieke windsnelheid

In dit onderzoek wordt op zoek gegaan naar een correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en opgetreden sedimentatie-/erosie op de Galgeplaat. De sedimentatie/erosie wordt bepaald door het verschil tussen twee opeenvolgende hoogtemetingen. Voor elke periode tussen deze hoogtemetingen wordt een karakteristieke windsnelheid bepaald. De windsnelheid is veruit de belangrijkste factor voor golfopbouw, daardoor kan deels de slag naar golfhoogte gemaakt worden. Hierdoor zal een mogelijke correlatie makkelijker worden gevonden.

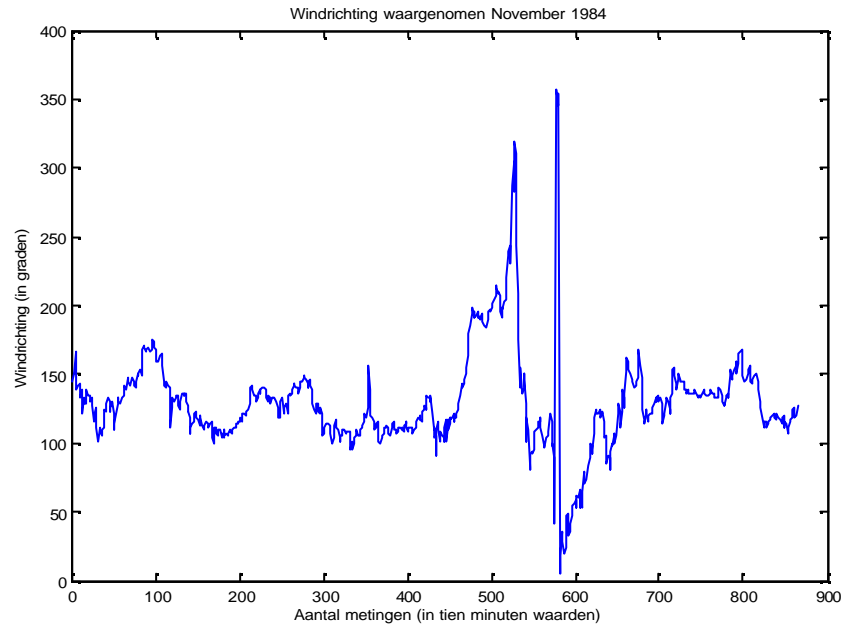
De windsnelheid is elke tien minuten op verschillende locaties in de Oosterschelde bepaald. Om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de wind op de Galgeplaat en omgeving, is gekozen voor een meetlocatie ten zuidwesten van de Galgeplaat, het Marollegat. Zie figuur 3.7 als voorbeeld van de geleverde winddata. Er is gekozen om de windsnelheid in het kwadraat te nemen. Hierdoor zullen de extra hoge windsnelheden een grotere bijdrage leveren aan de karakteristieke windsnelheid. Deze kwadratische term van de windsnelheid is ook terug te vinden in het verband tussen het ontstaan van golven door wind, zie paragraaf 3.2.7.



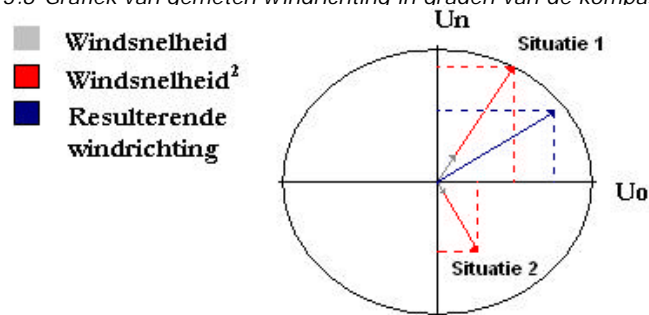
Figuur 3.7 Grafiek van gemeten windsnelheden bij het Marollegat.

De karakteristieke windsnelheid wordt als volgt bepaald:

$$U_{\text{karakteristiek}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{tot}}} \cdot \int_0^{t_{\text{tot}}} u^2 dt}$$



Figuur 3.8 Grafiek van gemeten windrichting in graden van de kompasroos.



Figuur 3.9 Afbeelding van vector die bestaat uit windsnelheid en windrichting.

### 3.2.5 Karakteristieke windrichting

Ook wordt er een karakteristieke windrichting voor elke periode bepaald. De windrichting wordt elke tien minuten gemeten, zie figuur 3.8. De windsnelheid in de formule van de karakteristieke windsnelheid staat in het kwadraat. Dit betekent dat hogere windsnelheden een groter aandeel hebben. De windrichtingen van deze hogere windsnelheden moeten net zo bepalend zijn voor de karakteristieke windrichting. Om hetzelfde gewicht aan de karakteristieke windrichting te geven, kan niet zomaar gekwadrateerd worden, omdat de windrichting gegeven is in graden. Uit de verzamelde data kan voor elke tien minuten een vector worden gemaakt. Deze vector bestaat uit een lengte, de windsnelheid in het kwadraat en een argument in de vorm van de windrichting in graden van de kompasroos. In figuur 3.9 geeft een voorbeeld van het bepalen van de karakteristieke windrichting. De windrichting wordt uitgezet op de kompasroos en de lengte van de vector is de windsnelheid. De lengte van de vector wordt eerst in het kwadraat genomen. Dan wordt de vector opgesplitst in een noordelijke en een oostelijke component, dit wordt gedaan voor alle 10 minuten waarden in een meetperiode. Daarna worden alle noordelijke componenten opgeteld en de wortel getrokken van de som, zo ook voor de oostelijke componenten. Vervolgens wordt op basis van deze resulterende componenten de karakteristieke windrichting bepaald. Zie formule hieronder.

$$W_{karakteristiek} = a \tan \left( \frac{\sqrt{\sum_n^0 \sin(w_n) * (u_n)^2}}{\sqrt{\sum_n^0 \cos(w_n) * (u_n)^2}} \right)$$

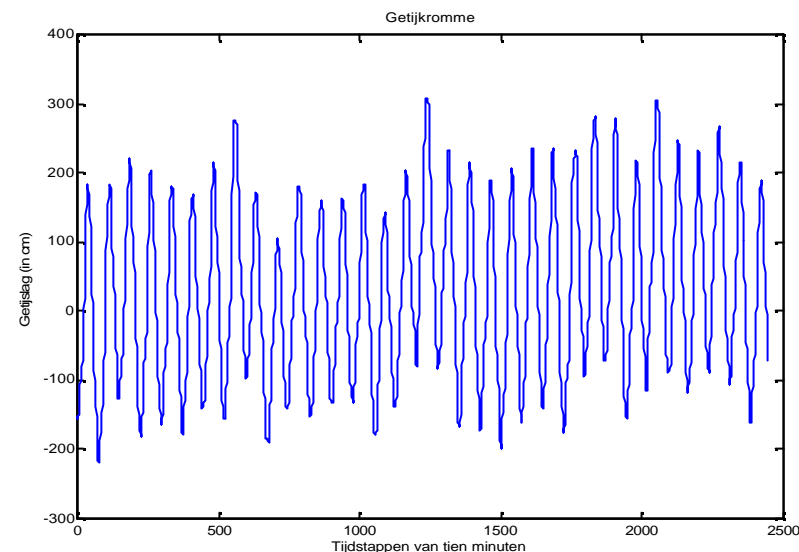




Uit de dataset kwam al snel naar voren dat niet alle windhoeken vertegenwoordigd zijn in de karakteristieke windrichting in de periode 1984-1993. Dit wordt verklaard door de overheersende windrichtingen die de Zeeuwse delta kenmerken. De periodes tussen de hoogtemetingen op de Galgeplaat, lopen uiteen van vijf dagen tot drie maanden. Twee tot drie weken kwam het meest voor. Door overheersende windrichtingen komen er geen karakteristieke windrichtingen voor uit de noordoostelijke windhoek. De periodes tussen de metingen waren te lang om deze specifieke windhoek eruit te kunnen filteren, ze kwamen te weinig voor. Bovendien treden de oostelijke windrichtingen het vaakst op in de zomer, juist dan komen de langste meetperiodes voorkomen. (zie figuur 5.2).

### 3.2.6 Karakteristieke getijdenslag

De hypothese is dat alleen bij grotere eb- en vloedverschillen nog significant plaatwaarts transport plaatsvindt. Een belangrijk punt bij deze getijdenslagen is dat het gaat om het astronomisch getij plus de mogelijk aanwezige windopzet (zie figuur 3.10). Daar de getijdenstromingen zorgen voor plaatopbouw, zal de invloed van de getijdenslag nader bekeken worden. Om de invloed te kunnen bepalen van het getij op het sedimentatie-/erosiepatroon wordt op twee manieren een karakteristieke getijdenslag bepaald. De eerste manier gaat er vanuit dat na de bouw van de Oosterscheldekering de plaatopbouw zo goed als stil is komen te liggen en dat er alleen bij extreme getijdenslagen nog plaatopbouw plaatsvindt. Vandaar dat hier gekeken wordt naar de maximale getijdenslag die is waargenomen tijdens de meetperiode.

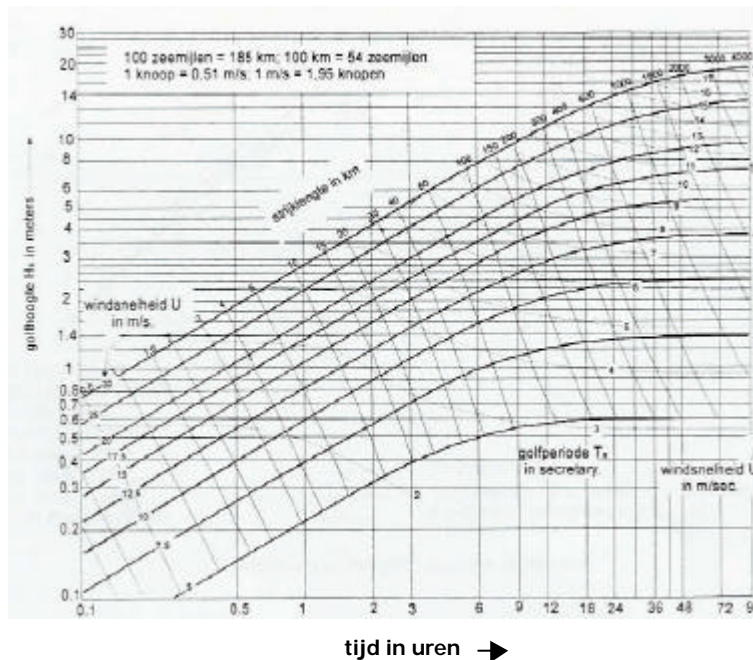


Figuur 3.10 Weergave van de waterstand bij het Marollegat.

Bij de tweede manier wordt er een karakteristieke getijdenslag voor de meetperiode vastgesteld, op basis van alle getijdenslagen. De karakteristieke getijdenslag wordt als volgt berekend:

$$G_{\text{karakteristiek}} = \sqrt{\sum Amplitude_1^2 + \dots + Amplitude_n^2}$$

Doordat eerst de som wordt genomen van de amplitudes in het kwadraat en daarna pas de wortel getrokken, wegen de grotere getijdenamplitudes zwaarder in deze karakteristieke getijdenslag.



Figuur 3.11 De golfopbouw in diepwater t.o.v. windsnelheid, waterdiepte, strijklengte en stormduur.

### 3.2.7 Golfopbouw

De kennis van golfopbouw door wind is grotendeels empirisch. De eenvoudige en meest gebruikte formule is die van Sverdrup/Munk/Brettschneider uit 1984. De windsnelheid is hierin veruit de belangrijkste variabele voor de golfopbouw. De formule hieronder geeft de golfopbouw weer als er geen beperkingen zijn voor waterdiepte of strijklengte.

$$\frac{gH_s}{u_w^2} = 0.23$$

$H_s$  = Significante golfhoogte

$u_w$  = Windsnelheid

Als waterdiepte en strijklengte wel een beperkende factor worden, dan ontstaat de volgende formule:

$$\frac{gH_s}{u_w^2} = 0.283 \tanh \left[ 0.578 \left( \frac{gh}{u_w^2} \right)^{0.75} \right] \tanh \left[ \frac{0.0125 \left( \frac{gF}{u_w^2} \right)^{0.42}}{\tanh \left[ 0.578 \left( \frac{gh}{u_w^2} \right)^{0.75} \right]} \right]$$

$h$  = Waterdiepte

$F$  = Strijklengte

Op basis van deze formule is figuur 3.11 opgesteld. Hieruit zijn golfhoogten te voorspellen voor de verschillende lokale omstandigheden.



### 3.2.8 Peak-over-Threshold

In het literatuuronderzoek (Van der Hoeven, 2006) stelt de hypothese dat de ernstigste erosie plaatsvindt tijdens extreme weersomstandigheden. Dit kan betekenen dat bij normale weersomstandigheden het complexe systeem geen correlatie laat zien. Om toch een correlatie te vinden wordt gebruik gemaakt van een soort Peak-over-Threshold-methode. Er wordt bij deze methode steeds een grens gesteld bij een bepaalde windsnelheid, alle windsnelheden daaronder worden uit de dataset gefilterd. Wanneer er een hoge 'threshold' wordt gebruikt, vallen er dus een hoop datapunten weg. Als de hypothese uit het literatuuronderzoek klopt dan haalt deze methode veel ruis weg. Hierdoor wordt een correlatie beter zichtbaar.

### 3.2.9 Windgedreven stromingen

Windgedreven stromingen hangen samen met windopzet. Deze windgedreven stromingen zijn pas van bepalend karakter tijdens extreme weersomstandigheden. De formule om de windopzet te kunnen beschrijven, luidt als volgt:

$$W = \frac{c \cdot U^2 \cdot F}{g \cdot d}$$

$W$  = dewindopzet (m)

$c$  = de frictiecoëfficiënt

$U$  = dewindsnelheid (m/s)

$F$  = destrieklengte (m)

$d$  = dewaterdiepte (m)

Uit deze formule is af te leiden, dat ook de waterdiepte bepalend is voor de grootte van de windopzet. Naarmate de waterdiepte kleiner wordt, krijgt de wind meer grip op het water. De windgedreven stromingen kunnen hierdoor vooral in ondiep water een belangrijke factor zijn. In een estuarium met allerlei verschillende waterdieptes, kunnen ze zorgen voor grote verschillen in het sedimenttransport.

### 3.2.10 Gebruikte formules bij bepalen bodemschuifspanning en sedimenttransport

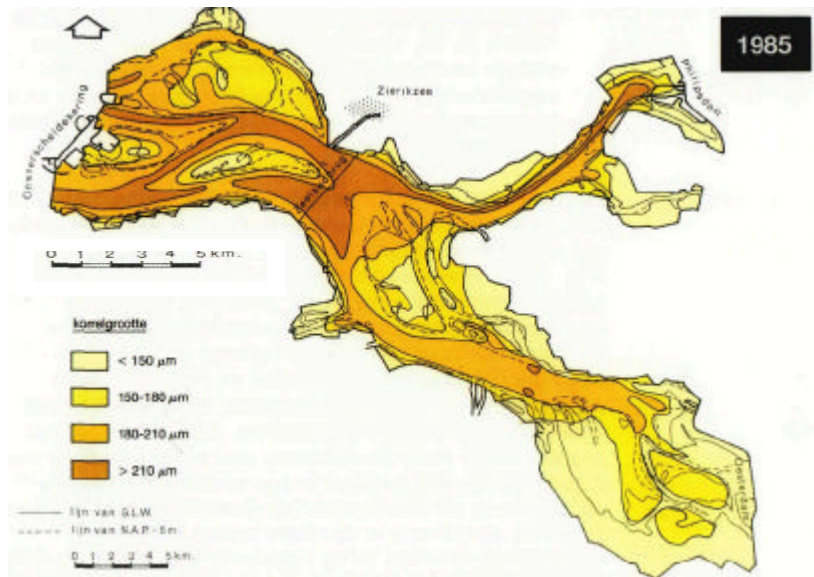
#### 3.2.10.1 Bodemruwheid

De bodemruwheid is een belangrijke variabele bij het bepalen van de bodemschuifspanning. Het is in de praktijk erg moeilijk om de bodemruwheid te meten. Er zijn wel verschillende laboratoriumonderzoeken geweest. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het onderzoek van Van Rijn (1984):

$$r = 3 * D_{90} = 4 a 5 * D_{50}$$

Figuur 3.12 toont de verschillen in korrelgrootte van het zand in het Oosterscheldebekken. De zandgrootte is uitgedrukt in de eenheid:  $D_{n50}$ . In dit onderzoek is de korrelgrootte over de gehele Galgeplaat gelijkgesteld op een waarde van  $150 \mu\text{m}$ . Hiermee wordt alleen de korrelgerelateerde bodemschuifspanning bepaald die van belang is voor het sedimenttransport:

$$r = 4 a 5 * D_{50} = 675 \text{ mm}$$



Figuur 3.12 Weergave van de korrelgrootte van het zand in het Oosterscheldebekken (Geomor, 1987).

In 1775 heeft Chézy een formule afgeleid voor het berekenen van gemiddelde stroomsnelheden. Hiervoor bepaalde hij de volgende coëfficiënt:

$$C = 18 \log(12R / r)$$

$$C = \text{Chézycoëfficiënt}$$

$$R = \text{Hydraulische straal}$$

$$r = \text{Bodemruwheid}$$

### 3.2.10.2 Bodemschuifspanning onder een eenparige stroming

Een eenparige stroming wil zeggen dat de krachten die op het water werken in balans zijn. De drijvende kracht achter een vrije oppervlactestroming is de zwaartekracht. Deze neerwaartse kracht  $G$  wordt bepaald door het watervolume en het soortelijk gewicht van het water:

$$G = \mathbf{r} g \Delta x (h - z)$$

$$G = \text{Zwaartekracht per breedte (N/m)}$$

$$\Delta x = \text{Lengte (m)}$$

$$h = \text{Waterdiepte (m)}$$

$$z = \text{Verticale as (bodem: } z = 0)$$

$$\mathbf{r} = \text{Soortelijk dichtheid (kg/m}^3)$$

Het deel van de zwaartekracht dat in de richting van het stromende water werkt is  $G \cdot i$ . Hierin staat  $i$  voor de bodemhelling. De bodemhelling is ook vaak gegeven als daling in meter per meter. De vereenvoudigde formule wordt:

$$\mathbf{t}(z = 0) = \mathbf{r} g h i$$

Voor een eenparige stroming kan de formule van Chézy gebruikt worden:

$$\mathbf{t}_c = \mathbf{r} g \frac{\bar{v}^2}{C^2}$$

$$\mathbf{t}_c = \text{Bodemschuifspanning}$$

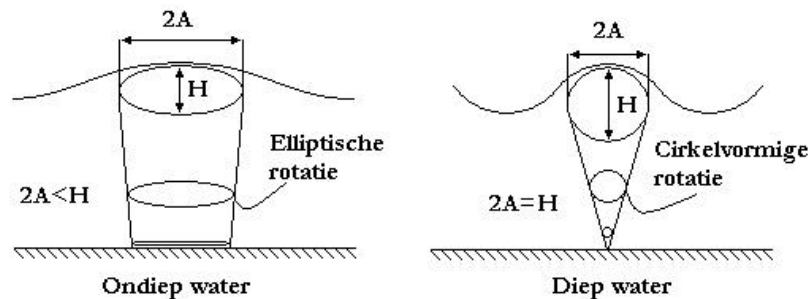
$$\bar{v} = \text{Dieptegemiddeldestroming}$$

$$C = \text{Chézycoëfficiënt}$$



### 3.2.10.3 Bodemschuifspanning door golven

Ook de waterbewegingen veroorzaakt door golven zorgen voor bodemschuifspanningen. Figuur 3.13 toont de bewegingen van waterdeeltjes onder golven, voor zowel diep water als ondiep water. Bij ondiep water zorgen golven duidelijk voor grote horizontale stroomsnelheden dichtbij de bodem. Deze zorgen voor significante bodemschuifspanningen en dus het opwoelen van zand.



Figuur 3.13 Waterbewegingen die worden veroorzaakt door een golf.

De lineaire golftheorie beschrijft de maximale horizontale stroomsnelheid en de maximale verplaatsing van een waterdeeltje onder een golf, zie de formule rechts. In ondiep water veranderen de waterbewegingen in asymmetrische golven. Voor een correcte beschrijving zouden golftheorieën van een hogere orde gebruikt moeten worden. De lineaire golftheorie leidt echter tot aannemelijke berekeningen.

$$\hat{u}_0 = \frac{wH}{2} \frac{1}{\sinh(kh)}$$

$$\hat{a}_0 = \frac{\hat{u}_0 T}{2p}$$

$w$  = Hoek frequentie (Hz)

$H$  = Golfhoogte (m)

$T$  = Golfperiode (s)

$k$  = Golfgetal ( $2p / L$ ) ( $m^{-1}$ )

$L$  = Golf lengte (m)

$\hat{a}_0$  = Maximale horizontale

waterverplaat sin gnetbuiten degrenslaag (m)

Gebaseerd op experimenten is de volgende formule opgesteld voor de bodemschuifspanning onder golven (Jonsson 1966):

$$t_w = \frac{1}{2} r f_w (\hat{u}_0)^2$$

$t_w$  = Bodemschuifspanningdoorgolven

$f_w$  = Wrijvingsfactor



In werkelijkheid is de orbitale beweging van de golven nul op de bodem. Er is sprake van een grenslaag net boven de bodem. Hierin vindt de overgang plaats naar deze horizontale snelheid. Deze grenslaag is bij golven met een kleine periode ( $T < 10$ s) tussen de 1-10 cm. De dikte van de grenslaag is belangrijk voor de bepaling van de wrijvingsfactor. De volgende formule is in dit onderzoek gebruikt (Swart, 1976):

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{\hat{a}_0}{r} \right)^{-0.194} \right]$$

$$f_w = 0.30, \text{ als } \left( \frac{\hat{a}_0}{r} \right) < 1.59$$

$r = \text{Bodemruwheid (m)}$

### 3.2.10.4 Sedimenttransport

In het onderzoek worden verschillende weersomstandigheden met elkaar vergeleken. Bij een van deze vergelijkingen wordt er gekeken naar het verschil in sedimenttransport rond de Galgeplaat. Het sedimenttransport is bepaald met een semi-empirische formule. De berekeningen die zijn uitgevoerd om het transport te bepalen zijn gebaseerd op tijdsafhankelijke stromingsvelden. Hiervoor is gekozen omdat vooral de maximale stromingsnelheden het transport veroorzaken. Doordat de stroomsnelheid zwaar is vertegenwoordigd in de formule, kunnen gemiddelde stromingsvelden een ander beeld weergeven. Het sedimenttransport is een som van het bodemtransport en het zwevende transport. De transportformule van Engelund&Hansen 1967 wordt gebruikt:

$$S = S_b + S_{se} = \frac{0.05 \cdot U^5}{g^{0.5} \cdot C^3 \cdot d^2 \cdot d_{50}}$$

$U = \text{stroomsnelheid}$

$C = \text{Chezycoefficient}$

$d = \text{relatieve dichtheid } (r_s - r_w) / r_w$

$d_{50} = \text{karakteristieke korelgrootte}$

In dit onderzoek wordt er vooral gekeken naar de verschillen tussen de sedimenttransporten. De concrete hoeveelheid is daarbij van minder belang.



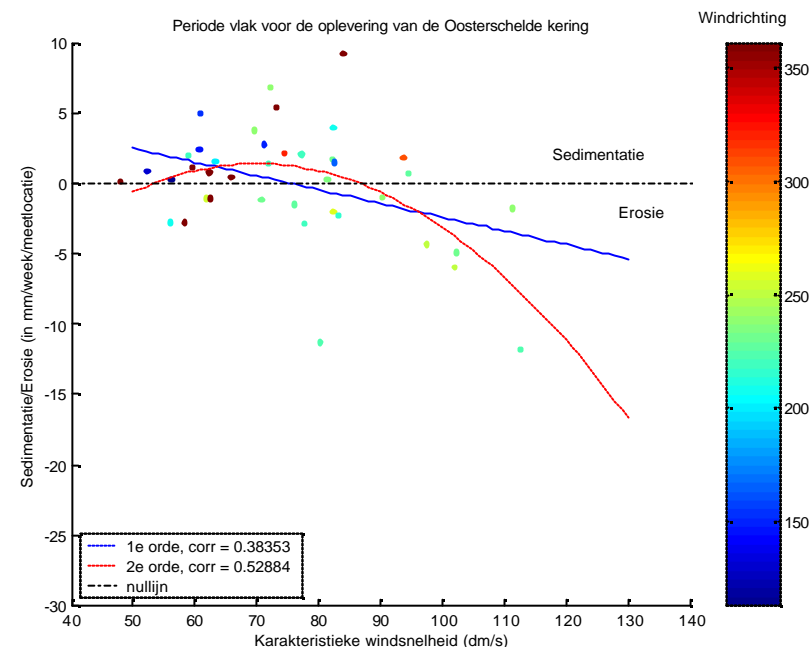
### 3.3 Gebruikte figuren en grafieken

Deze paragraaf licht de gebruikte figuren en grafieken toe, zodat het aflezen van deze figuren in dit rapport gemakkelijk zal gaan.

#### 3.3.1 Grafiek sedimentatie/erosie tegen de karakteristieke windsnelheid

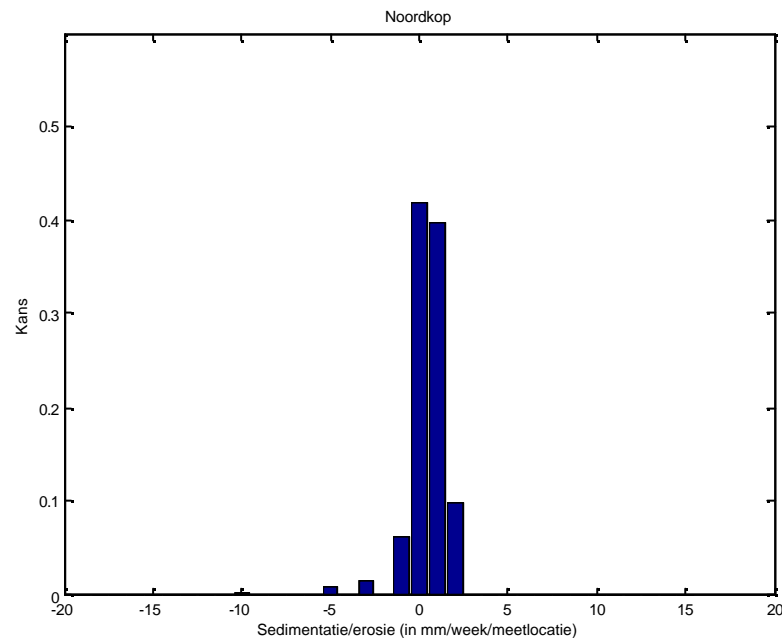
In dit onderzoek wordt gezocht naar een correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en opgetreden sedimentatie-/erosie. Om hier een beter inzicht in te krijgen is vaak gewerkt met een grafiek van de karakteristieke windsnelheid, karakteristieke windrichting en de sedimentatie-/erosie. In figuur 3.14 is te zien dat de y-as de sedimentatie/erosie weergeeft, de x-as de karakteristieke windsnelheid. De kleur van de verschillende datapunten geeft de karakteristieke windrichtingen aan, die correspondeert met kleurenbalk. Er zijn echter datapunten met een karakteristieke windrichting van 0-2 graden. Bij deze punten is 360 graden opgeteld omdat het sedimentatie-/erosiepatroon meer overeenkomsten heeft van noordelijke windrichtingen dan van zuidwestelijke windrichtingen.

De sedimentatie-/erosie in dit voorbeeld is een cumulatieve som van alle meetlocaties uit de homogene dataset. Dit zal niet altijd zo zijn, dan wordt duidelijk vermeld welke meetlocaties vertegenwoordigd zijn. De y-as heeft als eenheid mm per meetlocatie per week. Als tijdseenheid is een week gekozen om zo te kleine waarden te voorkomen. In deze grafieken wordt soms gewerkt met afkortingen voor de naam van de x-as en de y-as. De afkortingen zijn: Uk voor karakteristieke windsnelheid en Se voor sedimentatie/erosie. In de grafiek zijn twee mogelijke trendlijnen weergegeven.



Figuur 3.14 Een voorbeeld van een grafiek van sedimentatie/erosie.

Onderin staat de correlatie aangegeven van deze trendlijnen met de dataset. De lineaire trendlijn is gegeven omdat deze de meest betrouwbare voorspelling geeft. Hogere orde trendlijnen kennen vaak een zeer lage betrouwbaarheid bij extrapolatie. De tweede orde trendlijn is gegeven, om te kijken hoe groot de correlatie is met de dataset. Deze laat een lijn zien waarin de karakteristieke windsnelheid in het kwadraat vertegenwoordigd is. Deze hogere orde kan ons meer inzicht verschaffen in de verhouding van de windsnelheid ten opzichte van het sedimentatie-/erosiepatroon.



Figuur 3.15 Een voorbeeld van een sedimentatie-/erosiehistogram.

Dit komt overeen met de formule van golfopbouw, waarin de windsnelheid ook in het kwadraat is vertegenwoordigd. De correlatiecoëfficiënt van de trendlijnen ten opzichte van de dataset is gegeven onder in de grafiek. De correlatiecoëfficiënt kan hier tussen nul en 1 liggen. Nul staat hierbij voor geen correlatie en één voor volledige correlatie.

### 3.3.2 Sedimentatie-/erosiehistogram

In de eerder besproken grafiek tussen sedimentatie/erosie en de karakteristieke windsnelheid, komt mogelijk de correlatie tussen deze twee naar voren. Doordat de meetperioden niet standaard van tijdsduur zijn, heeft in principe elk punt in de grafiek een andere kans van voorkomen. Om een duidelijker beeld te krijgen van de opgetreden kans op sedimentatie/erosie op de Galgeplaat is het histogram gebruikt. De kans op voorkomen van sedimentatie/erosie wordt berekend door de variabele meetperiode terug te rekenen naar standaard week perioden. Hierbij wordt een frequentie bepaald, door de meetperiode te delen door de gehele periode die bekeken wordt. Uiteindelijk zijn alle sedimentatie-/erosie week gemiddelden metingen onderverdeeld op grootte. Bij deze onderverdeling zijn ook de kansen op voorkomen opgeteld. In figuur 3.15 is een voorbeeld gegeven van sedimentatie-/erosiehistogram. Op de y-as is de kans op voorkomen weergegeven en op de x-as is de sedimentatie/erosie in mm per meetlocatie per week weergegeven. Het sedimentatie-/erosiehistogram geeft meer inzicht in het voorkomen van sedimentatie en erosie op de Galgeplaat.





### 3.3.3 Grafiek van sedimentatie/erosie op de windroos

Om een duidelijk beeld te geven van de invloed van de windrichting op het sedimentatie-/erosiegedrag, is er nog een extra grafiek gegeven. Figuur 3.16 is een voorbeeld van een grafiek van de sedimentatie/erosie op de windroos. De kleur van de verschillende datapunten geeft aan of er sprake is van sedimentatie of erosie en de grootte hiervan, blauw is erosie en rood sedimentatie. Op de x-as en de y-as zijn de oostelijke respectievelijke noordelijke componenten aangegeven van de windsnelheid. Deze componenten komen voort uit een vector. Deze vector heeft als lengte de karakteristieke windsnelheid en als argument de karakteristieke windrichting. Hieronder staat aangegeven hoe deze componenten berekend zijn:

$$U_{nk} = \cos(U_w) \cdot U_k$$

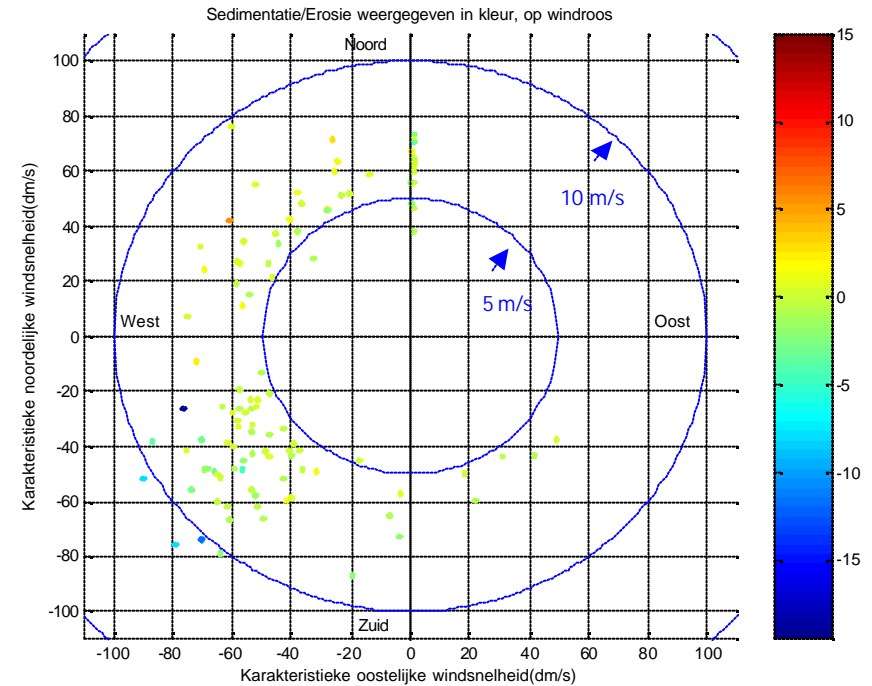
$$U_{ok} = \sin(U_w) \cdot U_k$$

$U_k$  = Karakteristieke windsnelheid

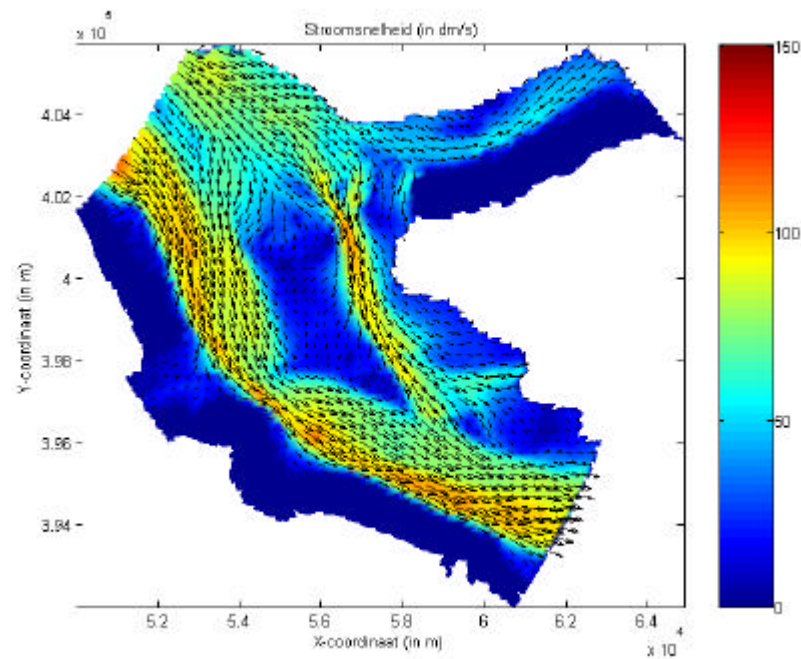
$U_w$  = Karakteristieke windrichting

$U_{nk}$  = Karakteristieke noordelijke component

$U_{ok}$  = Karakteristieke oostelijke component



Figuur 3.16 Een voorbeeld van een grafiek van sedimentatie/erosie op de windroos.



Figuur 3.17 Een voorbeeld van een stromingsveld rondom de Galgeplaat.

### 3.3.4 Stromings-/sedimenttransport /bodemschuifspanning/golfvelden

Figuur 3.17 geeft een voorbeeld van een stromingsveld weer. Op de X- en de Y-as zijn de verschillende coördinaten uitgezet. In dit plaatje correspondeert de kleur met de grootte van de stroomsnelheid. Dit kan in andere figuren ook sedimenttransport, bodemschuifspanning of golfhoogte zijn. Op de kleurenbalk is de snelheid af te lezen, de eenheid is te lezen bij de titel. Om de richting van de stroming te visualiseren, zijn er vectoren in het kaartje gezet. De richting van de vectoren komt overeen met de richting van de stroming. De grootte van de vector komt eveneens overeen met de grootte van de snelheid.



## 4 De parameter selectie

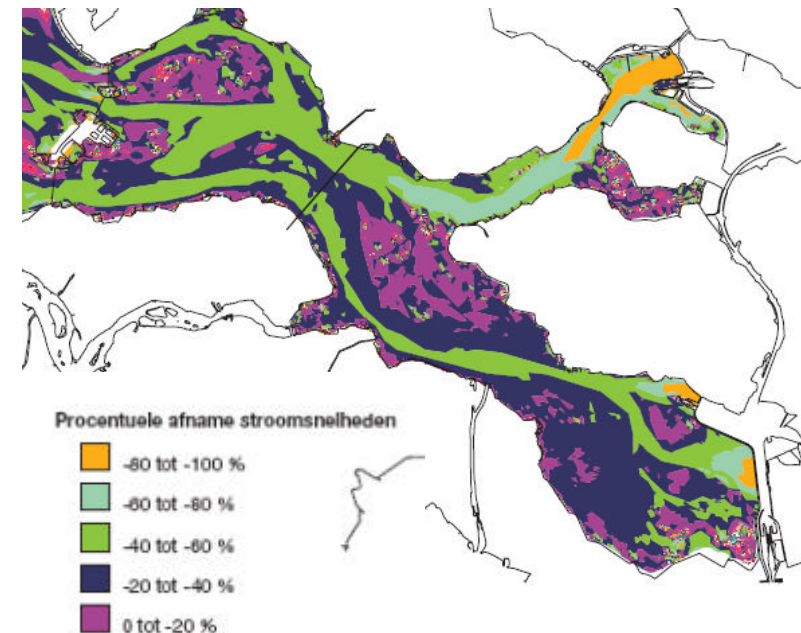
Dit hoofdstuk beschrijft het globale begin van de data-analyse. tijdens de data-analyse wordt gewerkt met hoogteverschillen tussen twee opeenvolgende metingen van een meetlocatie. In het begin wordt gekeken naar de Galgeplaat als geheel. Telkens wordt per periode een cumulatief hoogteverschil bepaald van de gehele homogene dataset. Er wordt gekeken of er een correlatie te vinden is met zowel getijdengegevens als weersomstandigheden.

In paragraaf 4.1 wordt gekeken of er een correlatie is met het opgetreden getij. In paragraaf 4.2 naar een correlatie met de karakteristieke windsnelheid. In paragraaf 4.3 naar de invloed van de tijdsduur van extreme weersomstandigheden. In paragraaf 4.4 wordt beargumenteerd in welke richting dit onderzoek verder gaat.

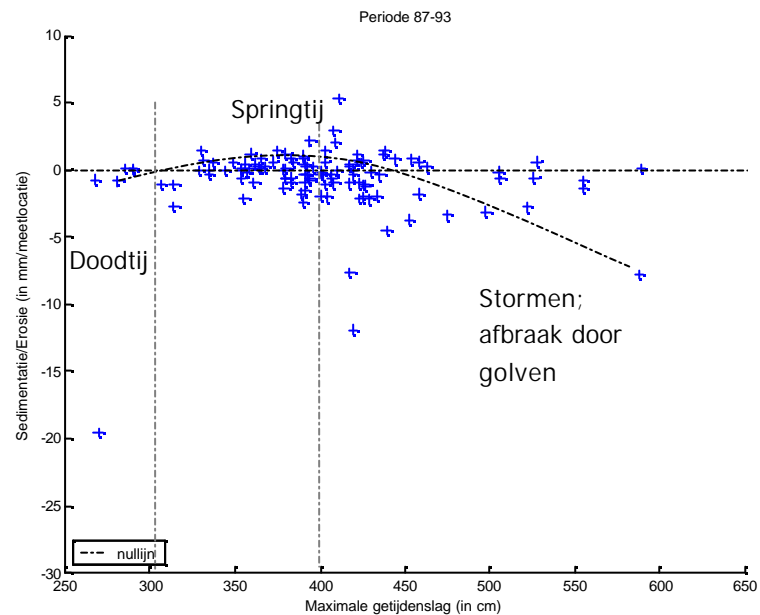
### 4.1 Mogelijk verband tussen getijdenslag en sedimentatie/erosie

Kan de hypothese: "Er is een correlatie tussen opgetreden getij en opgetreden sedimentatie/erosie", onderbouwd worden? Uit het literatuuronderzoek kwam naar voren, dat er vanuit wordt gegaan dat er geen plaatopbouw meer plaatsvindt sinds de realisatie van de Oosterscheldekering. De reden voor deze gedachtegang, was de drastische afname het getijdenprisma en de afname van de getijdenslag. Dit zorgde voor een drastische afname van de getijdenstromingen. Deze afname was niet uniform over het bekken verdeeld. In de Noordtak vlak bij de krammersluizen, zijn de stroomsnelheden in sommige gevallen wel met 80% afgenomen, terwijl in de Roompot maar een reductie is van 0-10%. De locatie in het bekken bepaalt in grote mate de snelheidsreductie. Bij de Galgeplaat

bedraagt deze afname 20 tot 40%, zie figuur 4.1. In subparagraaf 4.1.1 wordt gekeken naar een correlatie tussen de maximaal opgetreden getijdenslag en het sedimentatie-/erosiegedrag van de Galgeplaat. In subparagraaf 4.1.2 wordt gekeken naar een correlatie tussen de opgetreden sedimentatie-/erosie op de Galgeplaat en de karakteristieke getijdenslag.



Figuur 4.1 Snelheidsreductie opgetreden in het Oosterscheldebekken sinds de komst van de stormvloedkering (Zandhonger Oosterschelde, 2005).



Figuur 4.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. het maximaal getij tijdens de meetperiode 1987-1993.

#### 4.1.1 De maximale getijdenslag

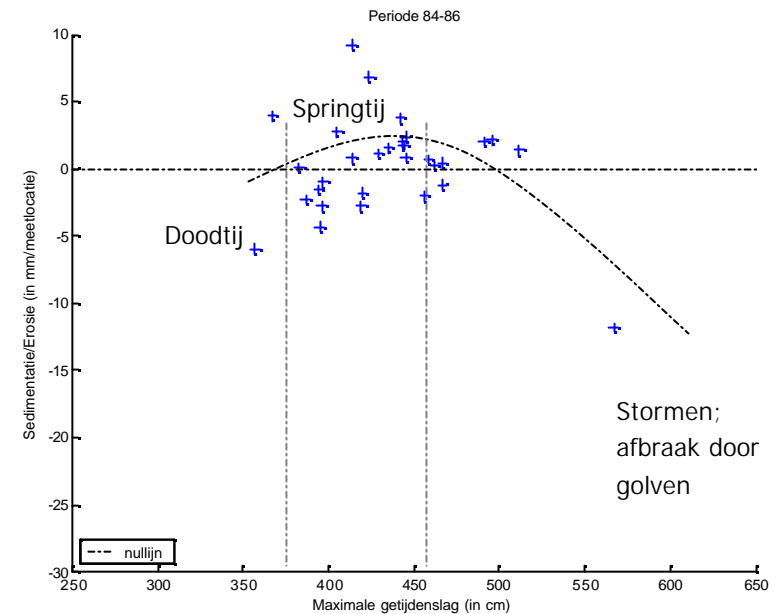
Bestaat er een verband tussen de maximaal opgetreden getijdenslag (zie paragraaf 3.2.6) en de opgetreden sedimentatie/erosie?

In figuur 4.2 is de grafiek te zien van de opgetreden sedimentatie-/erosie t.o.v. de maximaal opgetreden getijdenslag. In de figuur is een lijn aangegeven waarmee een mogelijk systeembeschrijving wordt aangegeven. De grijzen lijnen geven doodtij en springtij weer. Belangrijk bij dit maximale getij is dat het gaat om het astronomische getij plus de eventueel aanwezige windopzet. Uit de figuur komt naar voren dat er nog wel plaatopbouw plaats vindt, echter is deze maar zeer beperkt. De grootste plaatopbouw lijkt voor te komen tijdens springtij. De grotere maximale getijden slagen in het figuur zijn veroorzaakt door extra aanwezige windopzet. Uit de figuur komt dus naar voren het effect van windopzet anders is dan grotere getijdenslagen zonder windopzet.

In figuur 4.2 is geen duidelijke trend aan te wijzen. Wel is te zien dat naarmate de getijdenslag toeneemt er uiteindelijk meer erosie plaatsvindt. Aangezien de windopzet ook in de maximale getijdenslag zit, betekent dat ten tijde van de extreem grote getijdenslagen er stormen waren. Tijdens stormen zorgen de golven voor de plaataanval en vervoeren de stromingen het zand. Uit figuur 4.2 wordt opgemaakt dat er een minimale correlatie is tussen opgetreden sedimentatie-/erosie en de maximale getijdenslag.



In figuur 4.3 toont duidelijk dat er meer plaatopbouw aanwezig was voor de komst van de stormvloedkering. De verklaring hiervoor is de relatief grotere getijdenslag en getijdenprisma voordat de kering voltooid was. Een grotere getijdenslag samen met het grotere getijdenprisma resulteren in grotere getijdenstromingen. Een grote getijdenslag zorgt ervoor dat de morfologie er meer wordt door beïnvloed. Tijdens doottij is weinig plaatopbouw mogelijk door de geringe getijdenstromingen. Tijdens springtij vond ook vroeger de plaatopbouw plaats. Vandaar ook dat in de grafiek van doottij naar springtij een stijgende lijn is weergegeven. Hieruit komt blijkt ook dat in deze periode de plaat opbouw veel groter was. Hierna volgende de omstandigheden met een grote windopzet. Tijdens stormen uit het westen en uit het noorden, vinden er aanzienlijke windopzetten plaats. Vandaar dat er grote getijdenslagen gemeten worden. Tijdens een storm is de plaatafbraak door golven groot, waardoor er aanzienlijke plaaterosie kan optreden. In de figuur is de lijn duidelijk gekenmerkt door een punt uit de data wolk. Statisch gezien is dit gevaarlijk, echter zijn de stormen zeer bepalend voor het sedimentatie-/erosiepatroon. M.a.w. een enkele storm kan het sedimentatie/erosie patroon voor een groot deel vormgeven, vandaar dat hier ook het geval is bij.

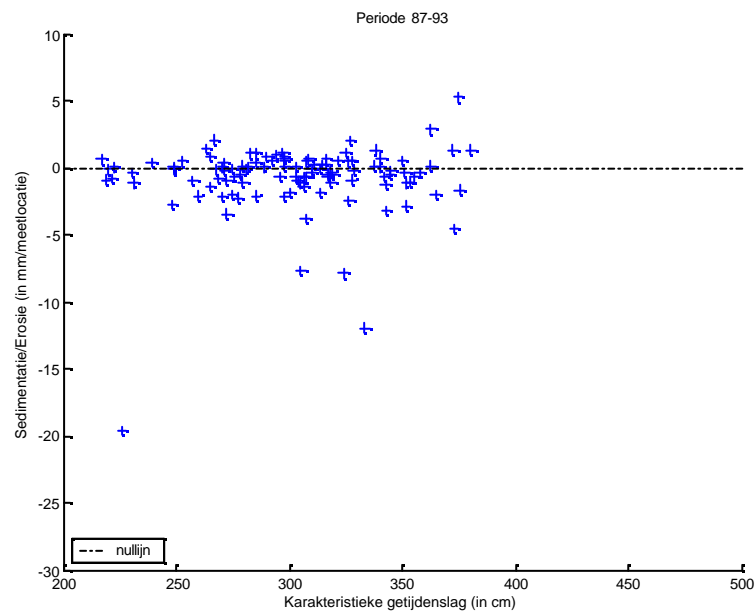


Figuur 4.3 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. het maximaal getij tijdens de meetperiode 1984-begin 1986.



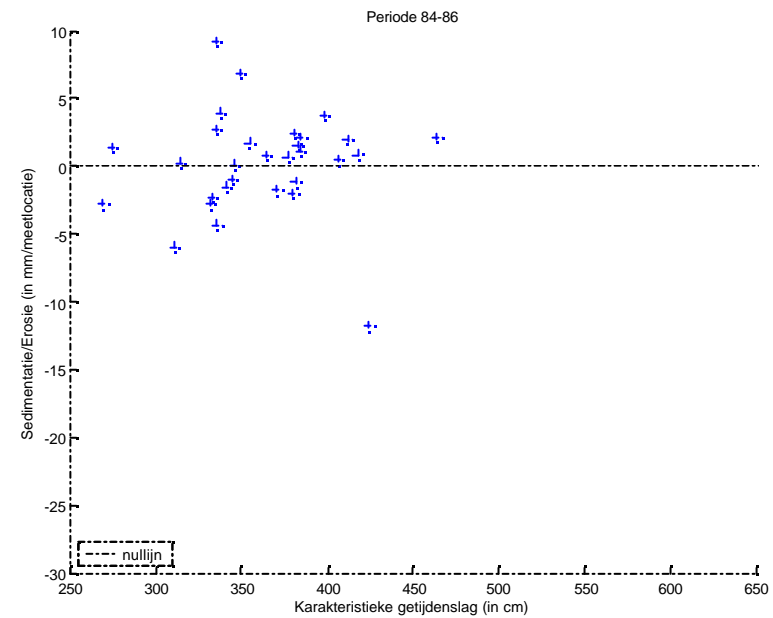
#### 4.1.2 De karakteristieke getijdenslag

Is er invloed van de karakteristieke getijdenslag op het sedimentatie-/erosiegedrag. In figuur 4.4 en figuur 4.5 zijn de grafieken te zien van opgetreden sedimentatie/erosie tegen de karakteristieke getijdenslag. Er wordt gekeken naar de periode 1987-1993 en 1984- begin 1986. De homogene dataset wordt gebruikt. Belangrijk bij de karakteristieke getijdenslag is, dat het gaat om het astronomisch getij plus eventuele windopzet. In figuur 4.4 noch in figuur 4.5 is een duidelijke trend aan te wijzen.



Figuur 4.4 Grafiek van sedimentatie/erosie afgezet tegen de karakteristieke getijdenslag tijdens de meetperiode 1987-1993.

Hieruit wordt opgemaakt dat er een minimale correlatie tussen opgetreden sedimentatie/erosie en de karakteristieke getijdenslag is. In de periode voor 1987 is er weer een zelfde figuur te zien als bij de maximale getijdenslag. Figuur 4.5 is duidelijk anders dan figuur 4.3. Dit komt doordat het om een karakteristieke getijdenslag gaat, hierdoor verdwijnen de extreme getijdenslagen tijdens stromen.



Figuur 4.5 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag tijdens de meetperiode 1984-begin 1986.



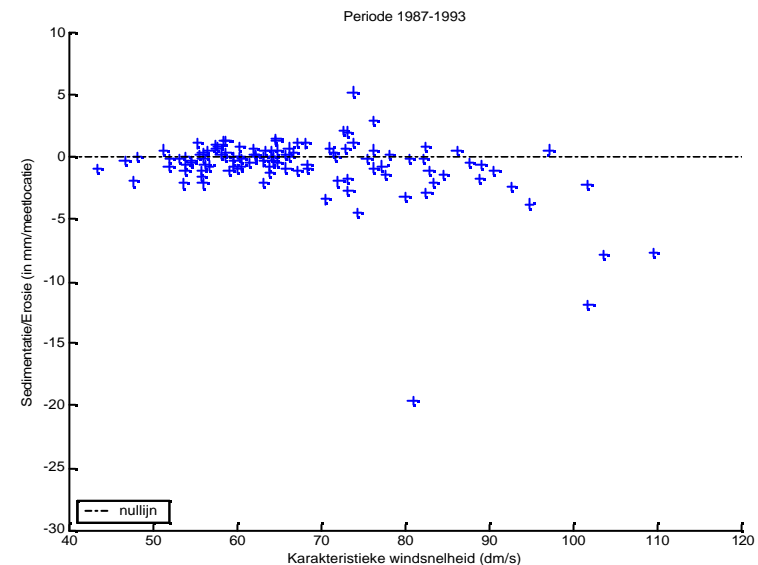
### 4.1.3 Conclusie

In paragraaf 4.1.1 en 4.1.2 wordt onderzocht of er een verband bestaat tussen de opgetreden getijdenslag en de opgetreden sedimentatie-/erosie. De verschillende figuren laten zien dat het effect van een grotere getijdenslag anders is dan het effect van windopzet. De stormen die de windopzet veroorzaken gaan namelijk gepaard met een sterkere erosie. Het door de windopzet toegenomen getijdenprisma kan dit niet goed maken. Daarnaast komt uit de verschillende figuren naar voren dat het verband minimaal is mede daar het gaat om opgetreden astronomisch getij plus de aanwezige windopzet. Doordat de windopzet er bij in zit, houdt dit in dat de windsnelheid ook deels is vertegenwoordigd in de maximale getijdenslag en de karakteristieke getijdenslag. Dit verklaart waarom er niet een duidelijke correlatie naar voren komt. De windopzet is namelijk zeer afhankelijk van de windrichting. Als de strijklengte langer is wordt de windopzet groter. Het onderzoek gaat verder zonder de getijdenslag als parameter te gebruiken. Het verband tussen deze en de opgetreden sedimentatie-/erosie is minimaal en daarnaast zijn er weinig mogelijkheden het te optimaliseren.

## 4.2 Mogelijk verband tussen windsnelheden en sedimentatie/erosie

Deze paragraaf onderzoekt de correlatie tussen de opgetreden sedimentatie/erosie en de opgetreden weersomstandigheden. In figuur 4.6 geeft de grafiek van de opgetreden sedimentatie/erosie en de opgetreden karakteristieke windsnelheid. Hier is nog niet de karakteristieke windrichting meegenomen, omdat er eerst gekeken wordt of er sowieso sprake is van een correlatie tussen deze beide parameters. In de grafiek is een trend waarneembaar tussen de toename van de

karakteristieke windsnelheid en de toename van de opgetreden erosie. Hierbij moet opgemerkt worden dat er nog wel degelijk sprake is van plaatopbouw. Er lijkt tijdens extreme weersomstandigheden zeer ernstige erosie op te treden. Een belangrijk voordeel bij het gebruiken van de karakteristieke wind is, dat er nog een onderverdeling in windrichting gemaakt kan worden. Een westelijke storm kent een ander sedimentatie-/erosiepatroon dan een noordelijke storm. Dit heeft te maken met het verschil in strijklengte en waterdiepte, bij deze verschillende windrichtingen. Door een onderverdeling in de karakteristieke windrichting kan de correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en het opgetreden sedimentatie-/erosiepatroon geoptimaliseerd worden.

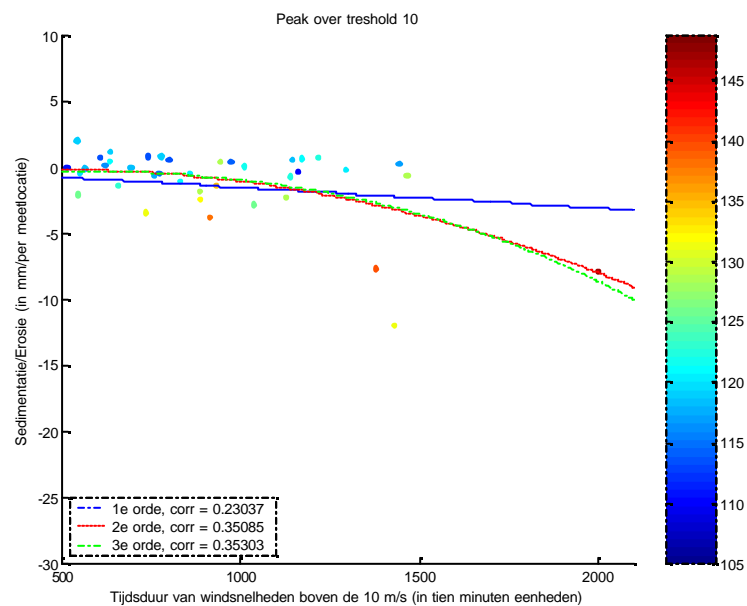


Figuur 4.6 Grafiek van de opgetreden sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid.



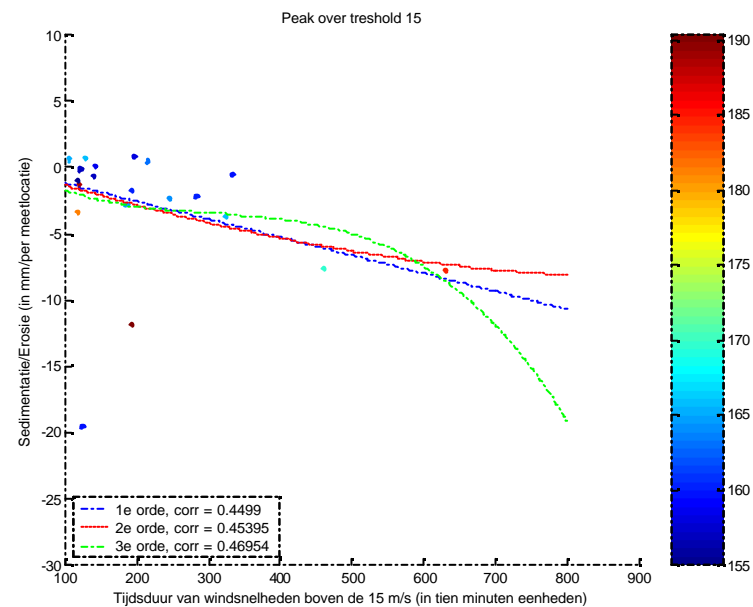
### 4.3 De invloed van de tijdsduur van hogere windsnelheden.

In figuur 4.7 en figuur 4.8 is de tijdsduur van twee verschillende "Peak over Threshold's" gegeven, van 10 m/s en 15 m/s, ten opzichte van de sedimentatie/erosie van de Galgeplaat als geheel. In deze figuren geeft de kleur de karakteristieke windsnelheid aan, deze kleur correspondeert met de kleuren balk. De windsnelheid staat daarin aangeduid in dm/s.



Figuur 4.7 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. tijdsduur van windsnelheden, de kleur geeft de karakteristieke windsnelheid aan.

Wat opvalt is dat naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt, de erosie groter wordt. Dit verschijnsel lijkt bij figuur 4.7 redelijk gelijk op te treden voor de verschillende tijdsduren. Dit kan betekenen dat de karakteristieke windsnelheid de bepalende factor is voor de erosie en dat de tijdsduur een minder belangrijke rol speelt. Dit hangt samen met de korte strijklengte die de wind heeft op de Oosterschelde. Hierdoor wordt al snel de maximale golfhoogte behaald. Door de getijenslag wordt de strijklengte continue veranderd, waardoor de tijdsduur van klein belang is.



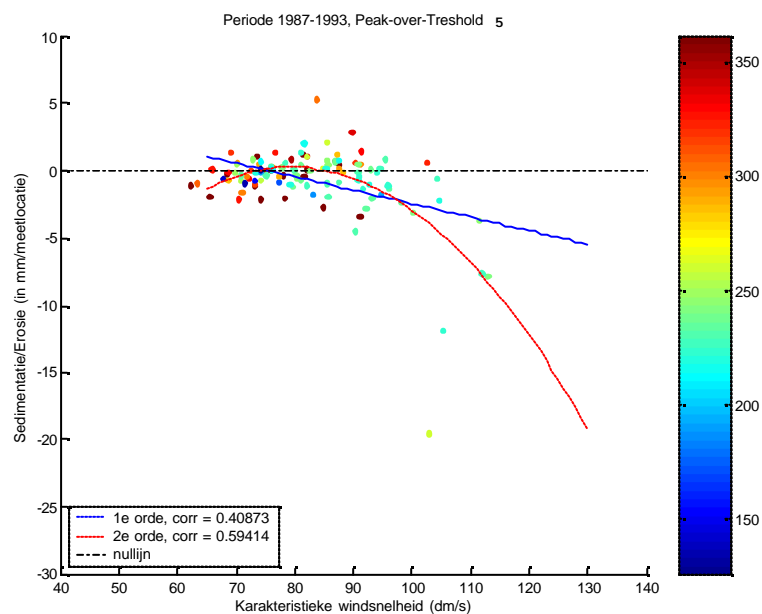
Figuur 4.8 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. tijdsduur van windsnelheden, de kleur geeft de karakteristieke windsnelheid aan.





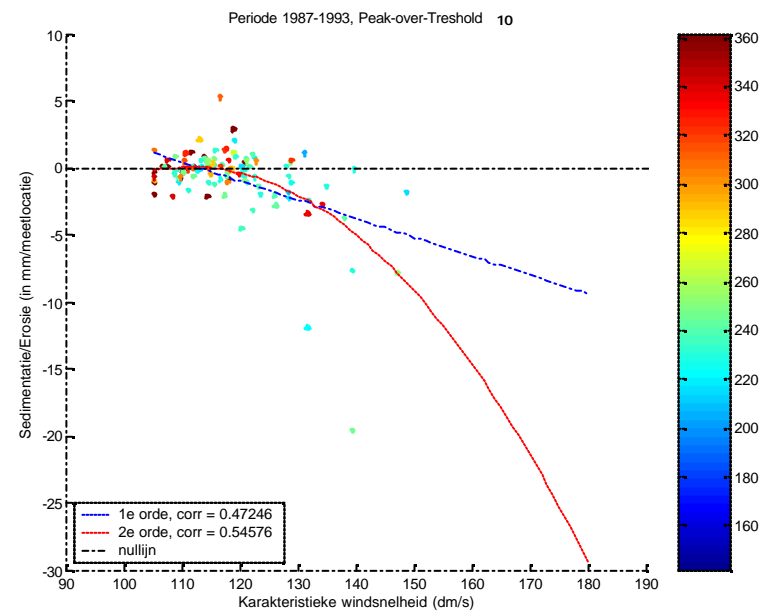
## 4.4 Peak-over-Threshold

Uit hoofdstuk 2 blijkt dat men er vanuit ging dat vooral de hogere windsnelheden de significante erosie veroorzaken. Doordat er hier gewerkt wordt met een karakteristieke windsnelheid per periode, hebben ook de lagere windsnelheden hun aandeel in de karakteristieke windsnelheid. Dit betekent dat een periode met extreme weersomstandigheden, zowel rustig als ruig, een even grote karakteristieke windsnelheid heeft als een periode met gemiddelde weersomstandigheden.



Figuur 4.9 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (5 m/s).

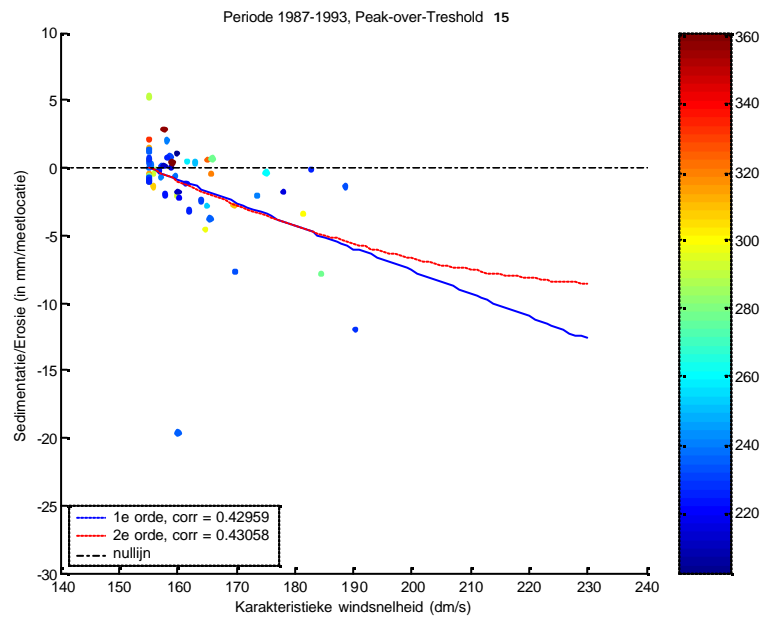
In figuur 4.9, 4.10, 4.11 en 4.12 zijn bij het bepalen van de karakteristieke windsnelheid, geen windsnelheden onder de respectievelijk 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s en 20 m/s meegenomen. In deze grafieken is niet alleen de karakteristieke windsnelheid gefilterd maar dus ook de karakteristieke windrichting. De karakteristieke windrichting refereert weer met de kleurenbalk. Door deze methode worden de extremere weersomstandigheden nog meer belicht. Deze extreme weersomstandigheden zijn vaak zuidwestelijke stromen. Hierdoor neemt de bandbreedte van de windrichtingen af bij hogere Peak-over-Thresholds.



Figuur 4.10 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (10 m/s).

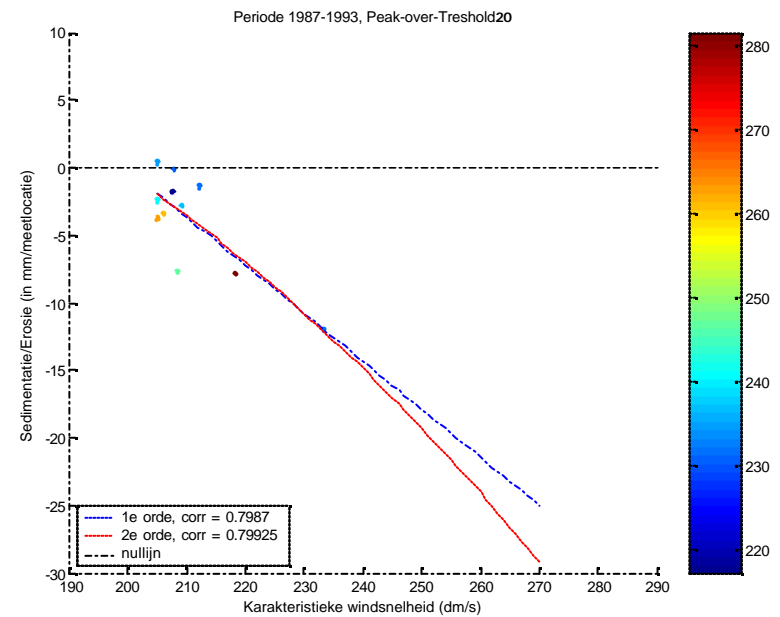


In figuur 4.11 is te zien dat een hogere Peak-over-Threshold niet hoeft te betekenen dat de correlatie verhoogd wordt. Wel zijn er bij de hogere Peak-over-Threshold, veel minder datapunten. Hierdoor lijkt de lineaire trendlijn beter tot zijn recht te komen. Het probleem van de afname van het aantal datapunten is, dat de statistische waarde van de lineaire extrapolatie sterk vermindert. Vandaar dat er een balans moet worden gevonden tussen betrouwbaarheid en voorspellend vermogen. In figuur 4.6 is de karakteristieke windsnelheid gebaseerd op alle windsnelheden.



Figuur 4.11 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (150 dm/s).

Wanneer dit wordt vergeleken met een Peak-over-Threshold van 5 m/s, blijkt dat er een verbetering optreedt van de correlatie. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van de trendlijn. Aangezien hier het aantal datapunten hetzelfde blijft zal de statistische waarde van de voorspelling hetzelfde blijven. Echter bij nog hogere Peakover-Thresholds blijkt de betrouwbaarheid wat toe te nemen, maar de statistische waarde neemt sterk af. Er is gekozen om verder te werken met een Peak-over-Threshold van 5 m/s, omdat hier het beste resultaat wordt behaald.



Figuur 4.12 Grafiek met gefilterde karakteristieke windsnelheid, alleen boven de (200 dm/s).



## 4.5 Slotconclusie van de parameterselectie

In dit hoofdstuk zijn de verschillende parameters bestudeerd om te bepalen met welke parameters verder moet worden gewerkt. Uit paragraaf 4.1 kwam naar voren dat er een minimale correlatie tussen het getij en de opgetreden sedimentatie/erosie is, mede daar het gaat om opgetreden astronomisch getij plus de aanwezige windopzet. Doordat de windopzet er bij in zit, houdt dit in dat de windsnelheid ook deels is vertegenwoordigd in de maximale getijdenslag en de karakteristieke getijdenslag. Dit verklaart deels waarom er niet een duidelijke correlatie naar voren komt. De windopzet is namelijk o.a. afhankelijk van de windrichting. Als de strijklengte langer is, kan de windopzet groter worden. Een grotere astronomische getijdenslag heeft namelijk niet hetzelfde effect als een groter getijprisma door windopzet. Hierdoor wordt de getijdenslag niet langer gebruikt als parameter om op zoek te gaan naar een sterke correlatie met het sedimentatie-/erosiepatroon. In hoofdstuk vijf wordt wel het verband nog een keer bekeken bij een onderverdeling van de plaat.

Uit paragraaf 4.2. komt wel een trend naar voren: Hoe groter de karakteristieke windsnelheid hoe heviger de opgetreden erosie. Het onderzoek gaat verder met de windsnelheid als onderzoeksparameter! Een groot voordeel van de karakteristieke windsnelheid is, dat er een onderverdeling gemaakt kan worden op windrichting. De verschillende windrichtingen worden door de geometrie van de Oosterschelde gekenmerkt door verschillende strijklengten en waterdiepten. Hierdoor zal er nog een verduidelijking kunnen optreden van het verband. Het onderzoek gaat verder met de windsnelheid als onderzoeksparameter.

Uit paragraaf 4.3 blijkt dat de invloed van de tijdsduur van opgetreden extreme windsnelheden vrij beperkt is. Dit hangt samen met de kleine strijklengte in het bekken. Zeker tijdens laagwater zijn de strijklengtes erg beperkt, waardoor een langere tijdsduur niet resulteert in een hogere significante golfhoogte.

In de laatste paragraaf is besloten verder te werken met alleen windsnelheden boven de 5 m/s. Om zo de ruis in de dataset te verkleinen en een mogelijk verband beter zichtbaar te maken.





## 5 Hypothesetoetsing met de Galgeplaat als een geheel

In dit hoofdstuk worden verschillende hypothesen getoetst. Er wordt alleen gewerkt met een dataset waar alle meetlocaties in zijn vertegenwoordigd, m.a.w. de Galgeplaat als een geheel (figuur 2.5).

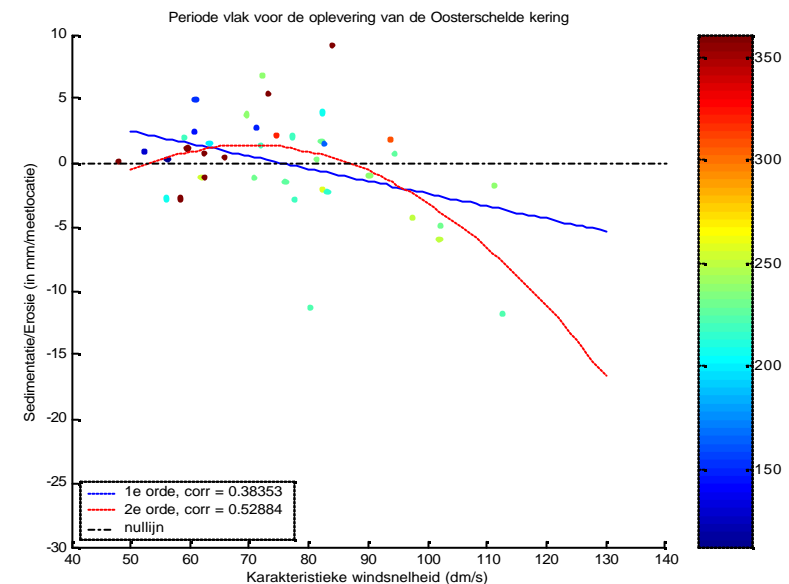
### 5.1 Verandering na de komst van Oosterscheldekering

Deze paragraaf zoekt naar een mogelijke onderbouwing voor de hypothese: "Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen significante plaatopbouw meer plaats."

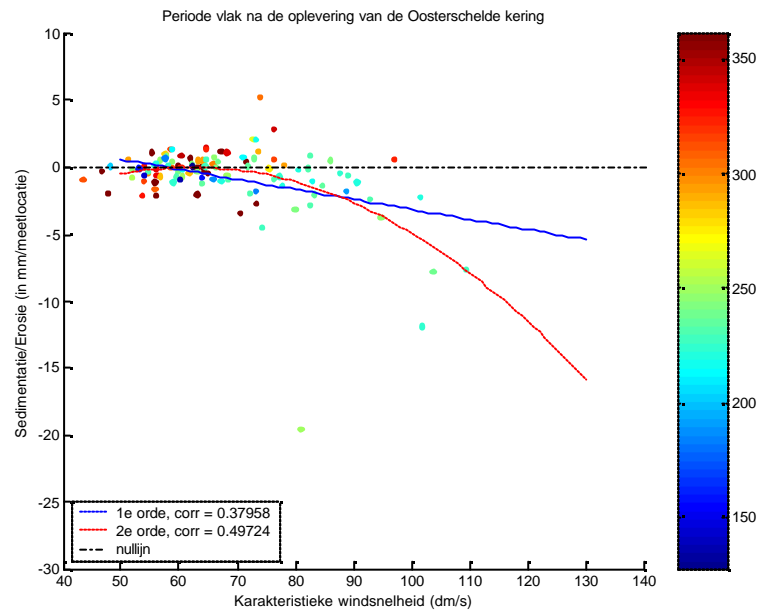
#### 5.1.1 De periode voor de aanleg van de stormvloedkering

Voor de periode 1984 - begin-1986 is gekozen, omdat in deze periode nog plaatopbouw plaatsvond. Het begin van de dataset is halverwege 1984, omdat voor die tijd de gebruikte homogene dataset niet mogelijk was. Hij eindigt halverwege 1986 omdat daarna de aanleg van de kering in een vergevorderd stadium was. Hierdoor was de verkleining van de monding zo goed als voltooid en werd de getijdenslag sterk verkleind. Dat er toen nog plaatopbouw was, wordt verklaard uit het relatief grotere getijdenprisma doordat de deltawerken nog niet waren voltooid. In deze periode was het getijdenprisma ook groter dan in de periode voor het begin van de realisatie van de Deltawerken. Dit verklaart de plaatbouw in deze periode, de geulen worden dieper en de plaat hoger. Deze periode wordt ook bekeken om een vergelijking te kunnen maken, met de periode toen de kering er net lag. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat er tijdens deze periode een verandering gaande was van de getijdenslag. Deze periode wordt dan ook alleen

gebruikt om te laten zien dat er een significante verandering is opgetreden. In figuur 5.1 staat de grafiek van de sedimentatie-/erosie ten opzichte van de karakteristieke windsnelheid. Wat direct opvalt is de grote spreiding van de puntenwolk, doordat er nog een aantal keren significante plaatopbouw plaatsvindt. Naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt, komt er steeds meer erosie voor. De zuidwesterstormen bepalen de erosie.



Figuur 5.1 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid in de periode 1984-begin 1986.



Figuur 5.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid in de periode 1987-1993.

### 5.1.2 De periode na de aanleg van de stormvloedkering

Hier wordt de periode 1987-1993 nader bekeken. Figuur 5.2 toont de grafiek van sedimentatie/erosie ten opzichte van de karakteristieke windsnelheid. De puntenwolk is veel minder gespreid dan in de periode 1984 begin-1986. Er vindt nog maar sporadisch plaatopbouw plaats. De noordelijke windrichtingen lijken daar verantwoordelijk voor. De heersende zuidwestelijke windrichting zorgt voor de meeste erosie op de Galgeplaat. In de grafiek komt een correlatie naar voren tussen de windsnelheid, windrichting en sedimentatie/erosie.

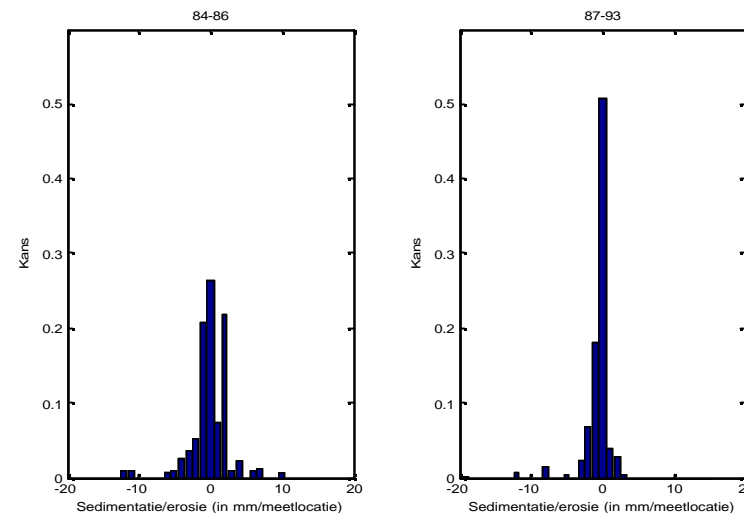


### 5.1.3 Sedimentatie-/erosiehistogram

Om een verduidelijking te geven van de veranderingen na de komst van de Oosterscheldekering, geeft figuur 5.3 het sedimentatie-/erosiehistogram voor de beide periodes. Het linker histogram toont hoe het was net voor de sluiting van de kering, het rechter de situatie in de jaren er vlak na. De veranderingen van het histogram laten zien dat na de bouw van de kering de significante plaatopbouw is verdwenen.

Het rechterhistogram laat een piek bij een sedimentatie/erosie tegen het nulpunt zien. In veel meetperiodes lijkt er dus niets meer te gebeuren. Dit wordt verklaard uit de afgenomen stroomsnelheden. Het sedimenttransport is in grote mate afhankelijk van deze getijdenstromingen. De transportcapaciteit van het water, wordt berekend met een formule, waar de stroomsnelheid tot de macht 4 à 5 in zit. Dit betekent dat een afname van 20-40% van de stroomsnelheid, grote gevolgen heeft voor de sedimenttransportcapaciteit van de getijdenstromingen.

Uit de negatieve kant van beide histogrammen blijkt dat er tijdens extreme weersomstandigheden niet veel veranderd is. Vooral de zuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de grootste erosie (zie figuur 4.1 en 4.2). Af en toe is er nog wel plaatopbouw, deze is echter zeer gering en kan de erosie tijdens extreme weersomstandigheden niet goed maken. Dit is de onderbouwing voor de hypothese: "Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen netto plaatopbouw meer plaats." In de volgende paragraaf wordt verder ingegaan op wanneer er nog plaatopbouw plaatsvindt.



Figuur 5.3 De verschillende sedimentatie-/erosiehistogrammen voor en net na de realisatie van de Oosterscheldekering.

### 5.1.4 Conclusie

Deze paragraaf bevestigt dat na de realisatie van de Deltawerken er geen netto plaatopbouw meer plaats vindt. Hiermee wordt bedoeld dat er nog wel degelijk plaatopbouw is, echter is deze niet groot genoeg om de erosie te niet te doen. Voor deze onderbouwing is gewerkt met de cumulatieve som van alle meetlocaties uit de homogene dataset. Uit de figuren 5.1, 5.2 en 5.3 blijkt dat er in de periode voordat de Oosterscheldekering voltooid was inderdaad veel vaker plaatopbouw voorkwam.



## 5.2 De onderverdeling naar windrichting

Deze paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: "Een onderverdeling van de karakteristieke windrichting zorgt voor een versterkt verband tussen sedimentatie/erosie en opgetreden weersomstandigheden." Aan de hand van deze verduidelijking wordt er een beter systeeminzicht verkregen. Uit figuur 5.2 blijkt dat de grootste erosie ontstaat bij de windhoek westzuidwest. Dit is ook de overheersende windrichting van stormen in Nederland. De noord-westelijke windrichtingen kennen een trend, die naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt meer sedimentatie lijkt op te leveren. Er zijn een aantal redenen te noemen die deze verschillen mogelijk maken, die zullen hieronder worden toegelicht.

Deze verschillen ontstaan doordat het bodemprofiel van de Oosterschelde veel reliëf kent. Hierdoor zit er een groot verschil in de mogelijkheid tot opbouw van golfenergie per windrichting. Dit kan betekenen dat er een duidelijk verschil zit in de veroorzaakte golfaanval. Dit verschil zal dan in belangrijke mate bepaald worden, door de strijklengte van de wind over het water, de lokale waterdiepte en de helling van de bodem naar de plaat toe.

Niet alleen de golfopbouw is van belang ook de windopzet in de Oosterschelde kan een rol spelen. De windopzet kan zorgen voor versterkte vloed-/ebstromen, dit kan zorgen voor plaatopbouw. Om deze trends duidelijker zichtbaar te maken volgen hieronder grafieken specifiek voor een bepaalde windrichting. Bij deze verdeling is er op gelet dat de hydraulische randvoorwaarden: strijklengte en waterdiepte, van dezelfde grootte zijn.

Het sedimenttransport over de plaat speelt ook een belangrijke rol bij de verschillen die optreden in het sedimentatie-/erosiepatroon bij de verschillende windhoeken. Bij noordelijke en zuidelijke windrichtingen is de plaatlengte vele malen groter dan bij oostelijke en westelijke windrichtingen. Met plaatlengte wordt de afstand die het water af legt over de plaat bedoeld. Deze langere plaatlengte zorgt ervoor dat niet al het opgewoelde zand de plaat verlaat. De turbulente stromingen die ontstaan door de golven, verdwijnen grotendeels bij een lange plaatlengte, hierdoor kan er een deel van het sediment weer neerslaan de plaat. Daarnaast kent de lengtedoorsnede van de Galgeplaat meer hoogteverschillen. Deze hoogteverschillen zorgen voor stromingsgradiënten, dit kan ook tot sedimentatie leiden. Dit betekent dat er minder zand de plaat verlaat naarmate de plaatlengte langer is. In westelijke en oostelijke windrichtingen is de plaatlengte veel korter. Hierdoor blijft de turbulente stroming van de brekende golven langer merkbaar. Door de kleinere lengte van het breedteprofiel van de Galgeplaat zijn er minder stromingsgradiënten waardoor ook minder zand neerslaat bovenop de plaat. Dit zorgt ervoor dat grote hoeveelheden sediment de plaat verlaten.



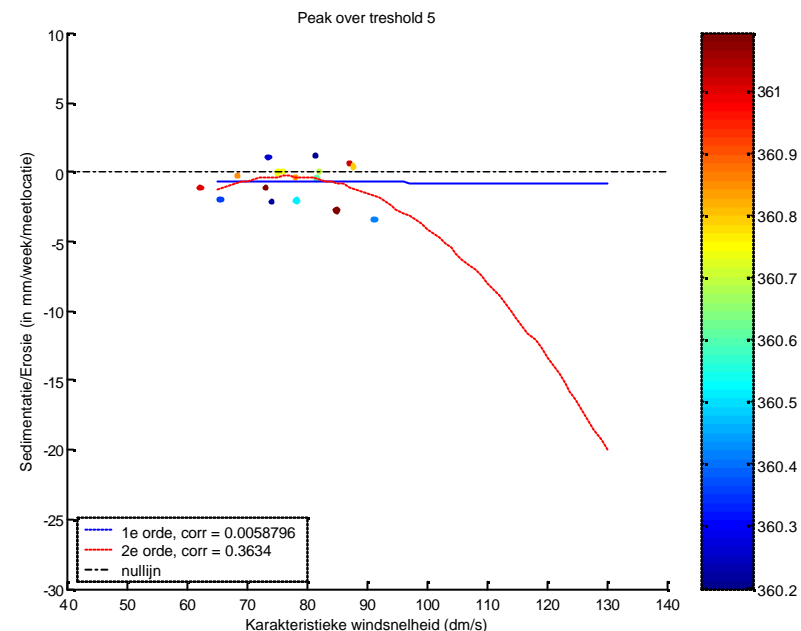


## 5.2.1 De noordelijke windrichtingen

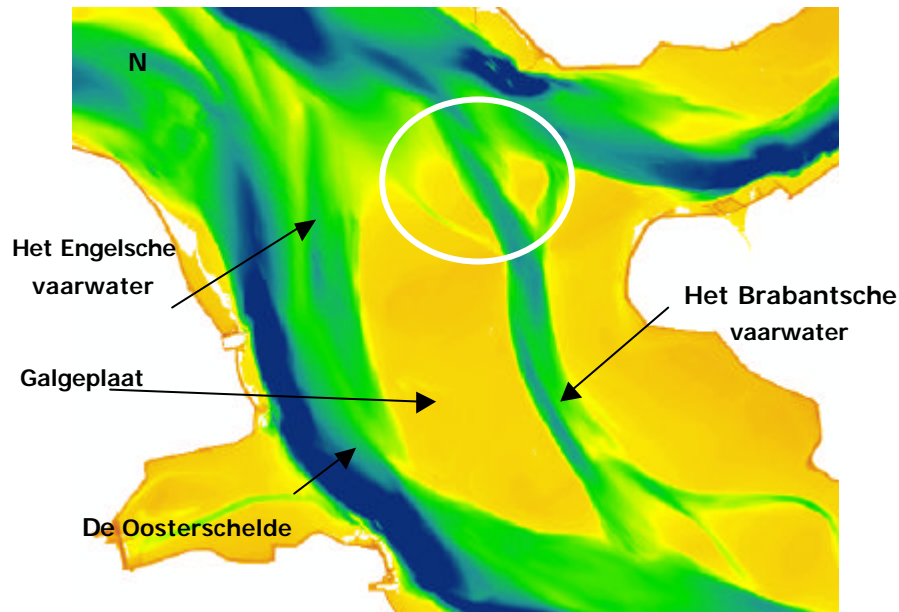
Bij de noordelijke windrichtingen toont de trendlijn geen sterke toename richting sedimentatie/erosie, er lijkt niet veel te gebeuren. De erosie overheerst lichtelijk en de trend laat dan ook een toename hierin zien naar mate de windsnelheid groter wordt, zie figuur 5.4.

De ondiepte ten noorden van de Galgeplaat is bij laagwater 0,25 tot 1 meter diep. In figuur 5.4 is goed zichtbaar dat de Galgeplaat in de luwte ligt van deze ondiepte. Daarnaast levert de ondiepte een zeer flauwe bodemhelling op. Deze flauwe bodemhelling (zie paragraaf 1.3) zorgt voor een geleidelijke afname van de golfenergie. Hierdoor zal er geleidelijk meer sediment in de waterkolom komen. Een andere belangrijke parameter is de strijklengte van de wind. Uit de noordelijke richting is deze ongeveer zes kilometer. Dit is pas bij hogere windsnelheden een beperkende factor voor golfopbouw.

Een ander belangrijk gevolg van de beperkte waterdiepte is dat de wind grote stromingen kan veroorzaken. De windopzet is niet zo groot dat deze een significante verandering in de golfhoogte tot gevolg heeft. De windgedreven stromingen lijken tezamen met de getijdenstromingen een sedimenttransport naar de Galgeplaat te genereren.



Figuur 5.4 Grafiek van de noordelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. de opgetreden sedimentatie/erosie.



Figuur 5.5 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.

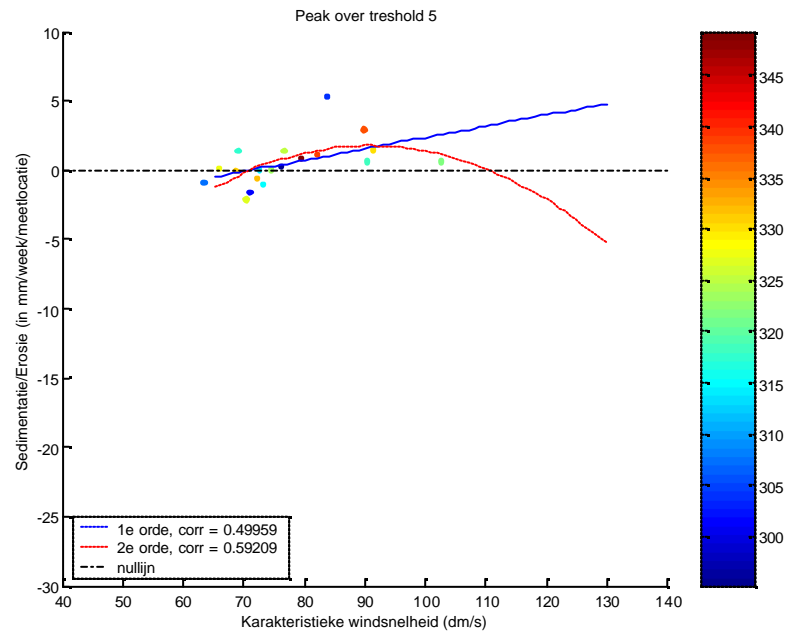
Het plaatgericht sedimenttransport wordt dus ergens onderbroken. Figuur 5.5 toont de beschutte ligging van de Galgeplaat bij een noordenwind. Rechts in het omcirkelde gebied zijn de platen en slikken te zien die deze beschutting veroorzaken. Links in het omcirkelde gebied, is een flauwe bodemhelling van de plaat zichtbaar. In het profiel is een kleine getijdengeul zichtbaar. Deze zal een groot deel van het sediment dat over de bodem richting plaat getransporteerd wordt afvoeren naar de grotere geul. Hierdoor wordt er minder sediment de plaat op getransporteerd.

Uit de data-analyse komt naar voren dat erosie bij deze windrichting licht overheerst. Bij een noordelijke windrichting zorgen de windgedreven stromingen tezamen met de getijdenstromingen voor een sedimenttransport naar de Galgeplaat. Een kleine getijdengeul onderbreekt dit transport. Dit lijkt te verklaren waarom uit de noordelijke windhoek de plaatopbouw zeer beperkt is en dat de erosie daarom lichtelijk overheerst.

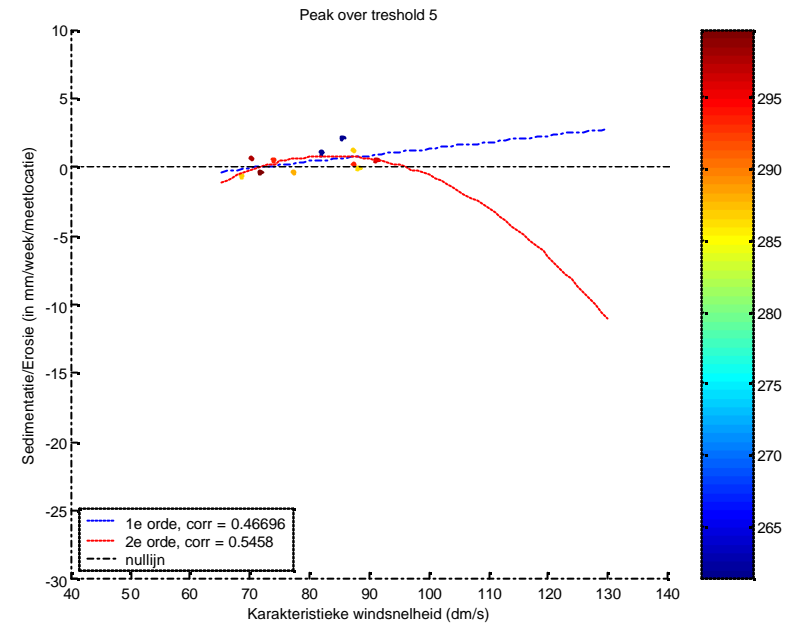


## 5.2.2 De noordwestelijke windrichtingen

Deze windhoek is nog eens extra onderverdeeld, omdat de noordnoordwestelijke windrichtingen een sterkere trend vertonen dan de noordwestelijke windrichtingen. Figuur 5.6 en figuur 5.7 geven de kenmerken van de noordwestelijke windrichtingen. De trendlijnen in deze figuren tonen een duidelijke trend opwaarts. Dit houdt in dat naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt, de sedimentatie ook toeneemt.



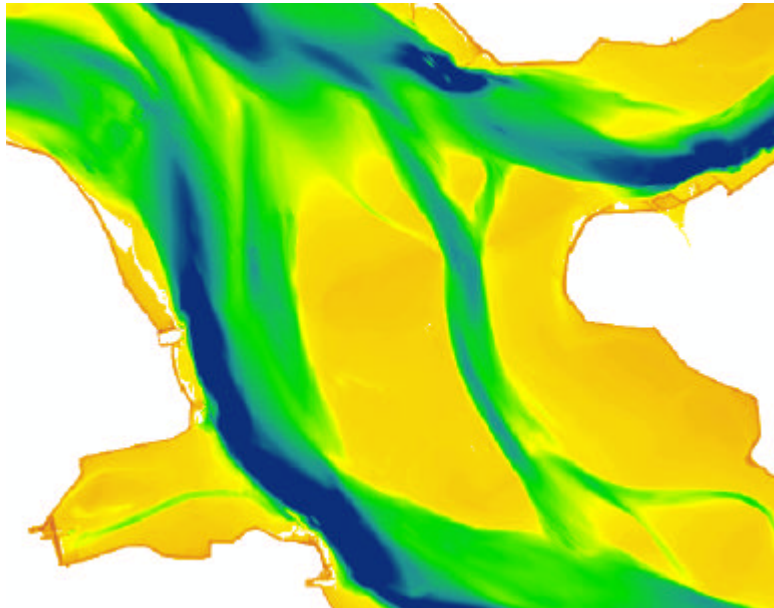
Figuur 5.6 Grafiek van de noordnoordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



Figuur 5.7 Grafiek van de noordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



Paragraaf 1.3 laat zien dat het noorden van de Galgeplaat een flauwe bodemhelling heeft. Het flauwe profiel zorgt voor een brede brandingszone. Hierdoor zal er over een relatief grote afstand veel zand worden opgewoeld. De brekende golven wekken een stroming richting de plaat op. Deze stroming in combinatie met de windgedreven stromingen zorgt voor een sedimenttransport plaatwaarts.



*Figuur 5.8 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.*

De strijklengte is in deze windrichting aanzienlijk langer, rond 15 kilometer. Hierdoor wordt de golfhoogte uit deze windrichting niet beperkt door de strijklengte. De beperkte diepte voor de plaat houdt de golfaanval op ruime afstand van de plaat. De strijklengte zorgt voor een grote windopzet. Een deel van deze strijklengte kent een geringe waterdiepte. Deze geringe waterdiepte zorgt voor een sterkere ontwikkeling van de windgedreven stromingen. Deze windopzet versterkt de vloedstroming die via de vloedchaar de plaat voedt met zand.

De afstand van het sedimenttransport over de plaat is het grootst uit de noordwestelijke richting. Het sedimenttransport over de plaat kent hoogteverschil doordat het over de beide hoge plaatdelen gaat. Als het water in het noorden de plaat op stroomt neemt de stroomsnelheid vlak achter het hoge plaatdeel sterk af. Dit leidt daar tot het neerslaan van het sediment. Als het water verder over de plaat stroomt neemt de stroomsnelheid toe door de wind. Hierdoor neemt de concentratie sediment in het water toe. Echter aan het eind van plaat, in het zuiden, bevindt zich wederom een hoog plaatdeel. Hier vindt wederom sedimentatie plaats. Het gevolg hiervan is dat slechts weinig sediment de plaat verlaat bij deze windrichting.

Bij een noordelijke windrichting zorgen de windgedreven stromingen tezamen met de getijdenstromingen voor een sediment-transport naar de Galgeplaat. Daarnaast kent het sedimenttransport veel snelheidsgradiënten, waardoor weinig sediment de plaat kan verlaten. Deze factoren lijken te verklaren dat bij een toename van de karakteristieke windsnelheid ook de sedimentatie toeneemt.

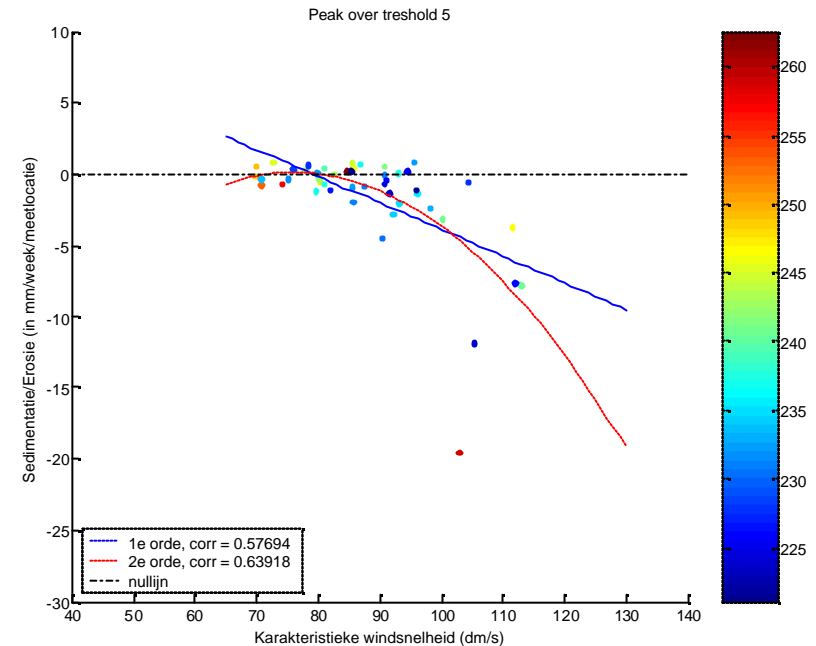


### 5.2.3 De westzuidwestelijke windrichtingen

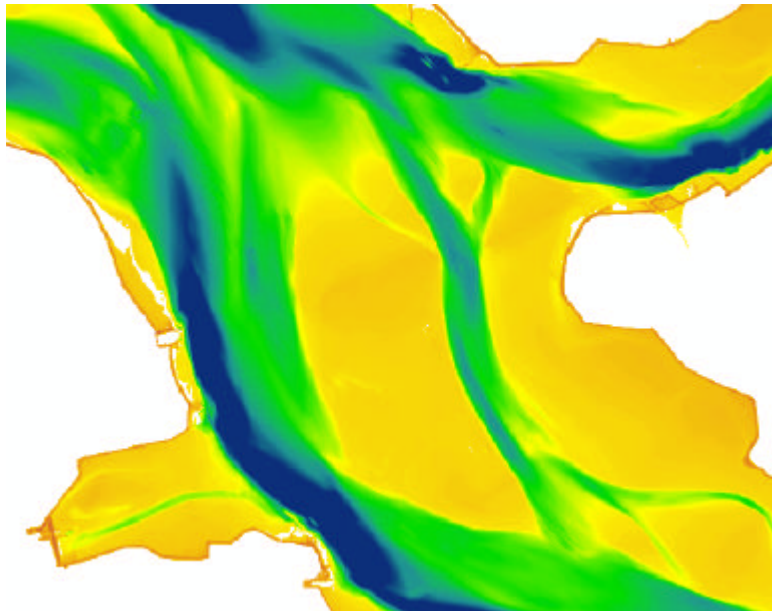
Deze windrichtingen vormen de overheersende windhoek voor de erosie op de Galgeplaat, zie figuur 5.9. Dit blijkt al uit hoofdstuk 4. Bij een nadere analyse van de datapunten valt op dat er veel extreme windsnelheden voorkomen uit deze richting. Wordt deze windhoek vergeleken met de andere windhoeken met een overeenkomstige karakteristieke windsnelheid, dan blijkt dat de westzuidwestelijke windhoek meer erosie veroorzaakt, de extreme stormen daargelaten.

De strijklengte uit deze windrichting is beperkt, drie tot vier kilometer. De waterdiepte van de geul "Oosterschelde" is stukken groter dan die van de rest van het water rondom de Galgeplaat. Hoe groter de waterdiepte, hoe kleiner de windopzet. Dit betekent dat zowel de waterdiepte als de strijklengte een beperking zijn voor de windopzet.

Figuur 5.10 toont het bodemprofiel aan de westzijde van de Galgeplaat. De bodemhelling aan de westzijde van de plaat is veel steiler, ten opzichte van die in het noorden. Het profiel varieert enigszins langs de plaat, maar overal zijn dezelfde kenmerken zichtbaar. Door het steilere profiel zal de brandingszone veel smaller zijn. De golfenergie zal in de smalle brandingszone verloren gaan. Hierdoor ontstaan er zeer lokaal erg grote bodemschuifspanningen. Daarnaast liggen de getijdengeulen "Oosterschelde" en "Engelsche vaarwater" direct naast de Galgeplaat. De grootte van de Geul wijst ook op sterke getijdenstromingen.



Figuur 5.9 Grafiek van de westzuidwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



*Figuur 5.10 Diepteprofiel rond de Galgeplaat t.o.v. het N.A.P.*

Aangezien de richting van de getijdenstroming haaks op de richting van de golven is wordt het sediment niet of nauwelijks richting plaat getransporteerd. Het opgewoelde zand in de brandingszone wordt door de getijdenstroming plaatafwaarts getransporteerd. Dit leidt tot directe afname van het zandvolume van de Galgeplaat.

De afstand van het sedimenttransport over de plaat is vele malen kleiner dan die uit de noordwestelijke richting. Het sedimenttransport van west naar oost over de Galgeplaat verschilt ten opzichte van het transport van noord naar zuid op twee belangrijke punten. Ten eerste: De turbulente stromingen van de brekende golven zullen door de kleinere afstand een grotere rol spelen. De turbulente stromingen zorgen ervoor dat het sediment niet neerslaat. Ten tweede: Het west-oost profiel kent veel minder hoogteverschil dan het noord-zuid profiel, hierdoor zijn de snelheidsgradiënten minder groot. Dit leidt tot minder sedimentatie.

Bij een zuidwestelijke windrichting is er niet een groot plaatwaarts sedimenttransport. Doordat de getijdengeul dichtbij de brandingszone ligt, lijkt deze daarom veel sediment plaatafwaarts te transporteren. Daarnaast kent het sedimenttransport over de plaat veel minder grote snelheidsgradiënten. Hierdoor kan minder sediment op de plaat neerslaan. Deze factoren lijken te verklaren dat bij een toename van de karakteristieke windsnelheid de erosie ook sterk toeneemt.

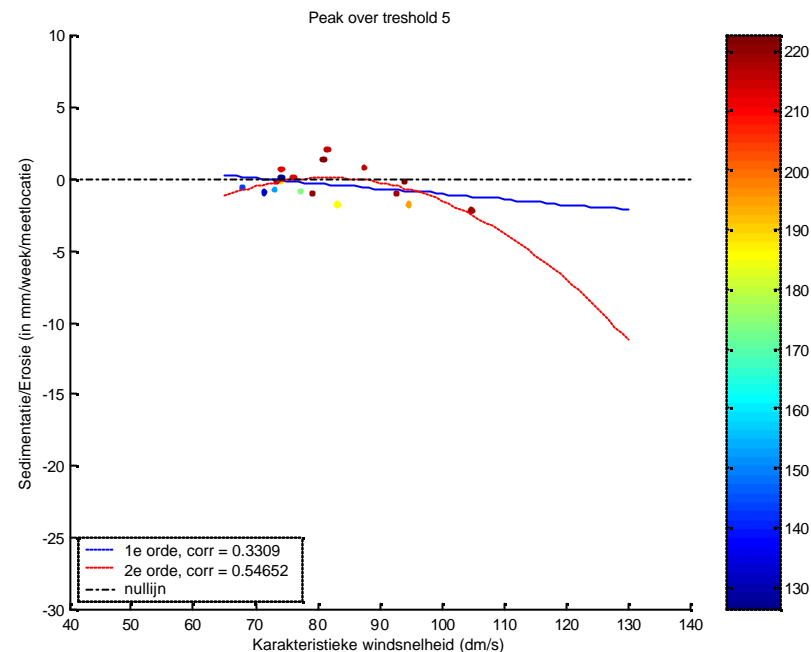


## 5.2.4 De zuidelijke windrichtingen

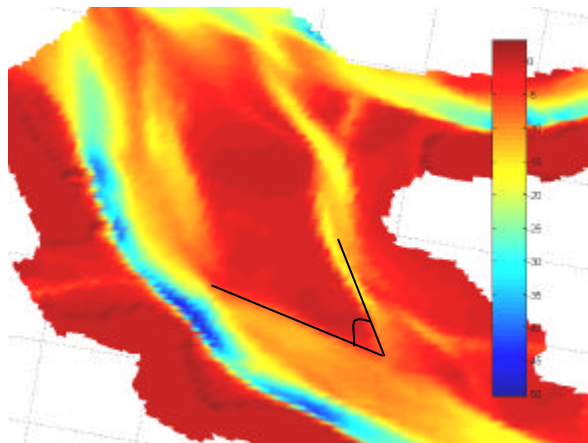
Figuur 5.11 geeft de zuidelijke windrichtingen weer. De trend is hier naar beneden gericht. De erosie is bij deze windrichting overheersend en neemt toe naar mate de windsnelheid toeneemt. Het is veel minder extreem dan bij de zuidwestelijke windrichting.

De overeenkomst met de zuidwestelijke windrichtingen is dat ook hier een steile helling zichtbaar is in de overgang van geul naar plaat. Hierdoor zal ook hier sneller erosie optreden. Een verschil is echter dat de getijdenstromingen en de golfrichting hier niet haaks op elkaar staan. Dit beperkt de erosie.

De hoge plaatdelen aan de zuidkant laten zien dat hier vroeger ook sedimentatie optrad. De overeenkomst met de noordelijke windhoek is dat de wind over een grote strijklengte beschikt. De windgedreven stromingen zorgen hier voor een versterking van de ebstroming. Deze is echter gering doordat er hier geen windopzet vanuit zee is. Er zullen slechts lokale windgedreven stromingen ontstaan. Hierdoor worden de ebstromen minimaal versterkt waardoor er geen extra sedimentatie op de Zuidkop plaatsvindt.



Figuur 5.11 Grafiek van de zuidelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



Figuur 5.12 Het profiel van de bodemhelling aan de zuidzijde van de Galgeplaat.

De golfaanval vanuit het zuiden heeft een grote invalshoek, zie figuur 5.12. Deze lijkt er voor te zorgen dat de effectiviteit van de golfaanval veel minder is.

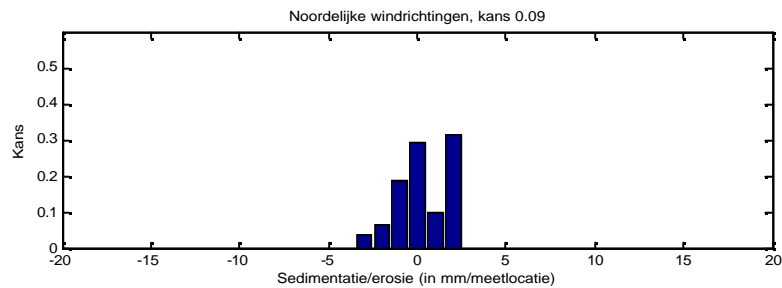
Bij de zuidelijke windrichting kent het sedimenttransport veel snelheidsgradiënten. Dit zorgt ervoor dat slechts weinig sediment de plaat verlaat. Dit tezamen met de eerder genoemde factoren lijkt de trend van de dataset te verklaren; een toename van de karakteristieke windsnelheid leidt tot een beperkte afname van de erosie.



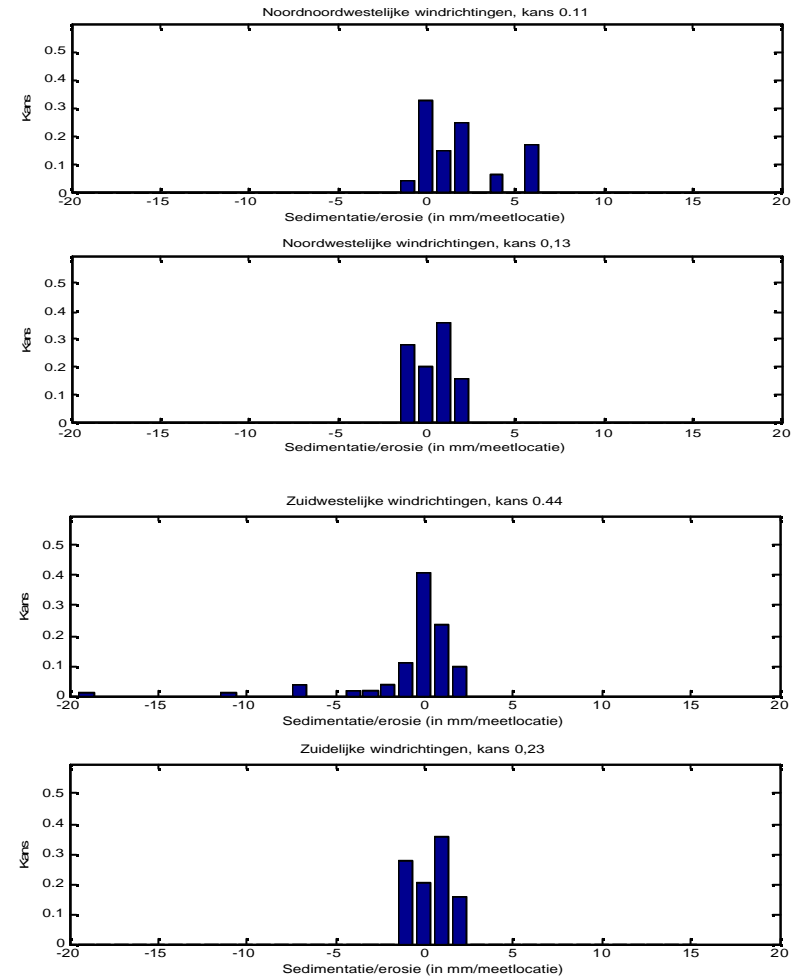


## 5.2.5 De sedimentatie-/erosiehistogrammen

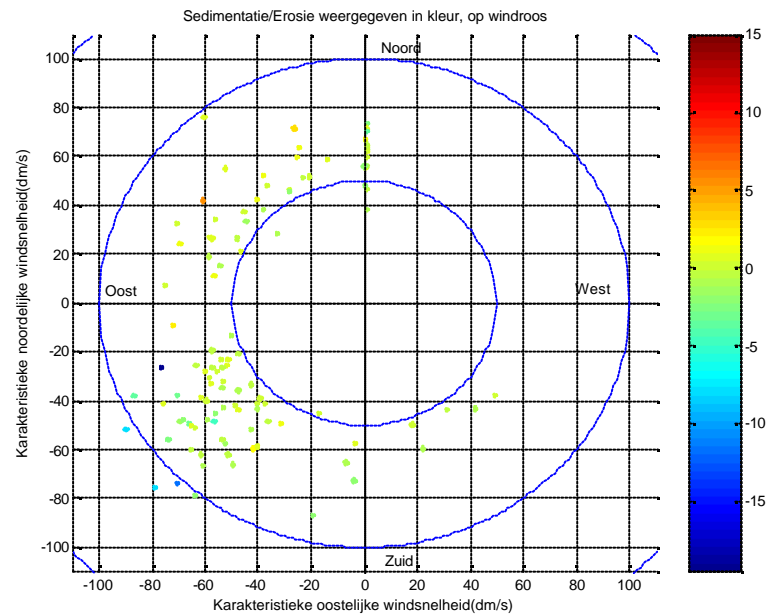
Deze paragraaf geeft de verschillende histogrammen van de windhoeken. Daarnaast staat bovenin de figuren ook in fractie aangegeven hoe vaak de windrichting voorkwam in de onderzoeksperiode. De figuren 5.13 en 5.14 tonen de verschillende histogrammen. Uit deze histogrammen komt naar voren dat de westzuidwestelijke windrichtingen verreweg het vaakst voorkomen, namelijk 44% van de meeperiode. Hiermee is te verklaren, dat tijdens de periode 1987-1993 een duidelijke plaatverlaging heeft plaatsgevonden. De noordnoordwestelijke windrichting kent als enige nog significante plaatopbouw. Deze histogrammen zijn gebaseerd op weekgemiddelden van sedimentatie-/erosie in mm per meetlocatie.



Figuur 5.13 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de noordelijke windrichtingen.



Figuur 5.14 De sedimentatie-/erosiehistogrammen van de resterende windrichtingen.



Figuur 5.15 Grafiek van de windsnelheid en de windrichting op de kompasroos, in kleur zijn sedimentatie(+) en erosie(-) aangegeven (in mm/meetlocatie).

## 5.2.6 Sedimentatie/erosie op de kompasroos

Figuur 5.15 geeft een duidelijk beeld van de windrichting en de opgetreden sedimentatie/erosie. De binnenste blauwe cirkel geeft de karakteristieke windsnelheid aan van 5 m/s, de buitenste van 10 m/s. Uit deze figuur blijkt dat de heersende zuidwestelijke windrichtingen de meeste erosie veroorzaken. Ook is te zien dat pas bij een karakteristieke windsnelheid van rond de 9 m/s de hevigste erosie optreedt.



### 5.2.7 Conclusie

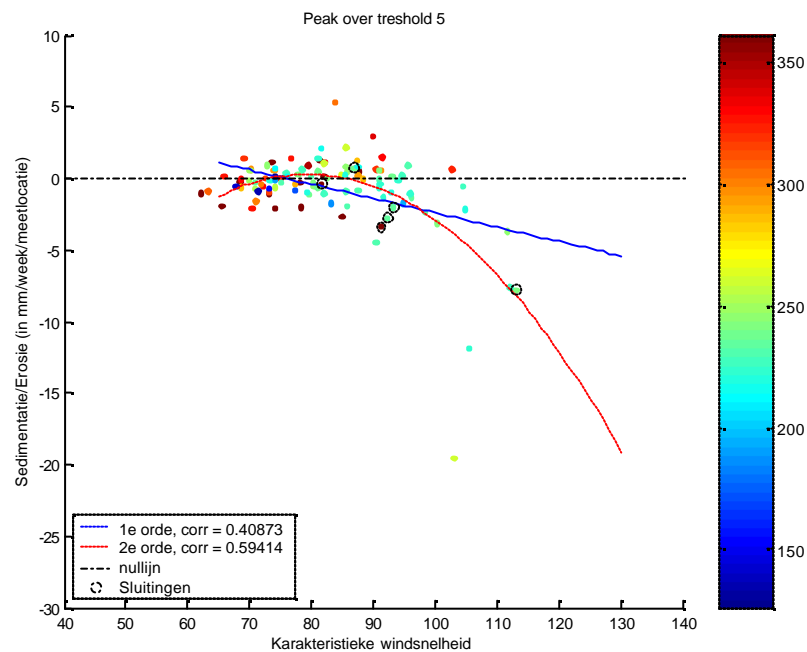
In paragraaf 5.2 is een onderverdeling gemaakt in de karakteristieke windrichting, op basis van hydraulische randvoorwaarden. Hierdoor is een duidelijker verband naar voren gekomen tussen de karakteristieke windsnelheid en de opgetreden sedimentatie/erosie. Ook zijn door deze onderverdeling duidelijk de verschillen die optreden bij de onderscheiden windrichtingen naar voren gekomen.

De zuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de meeste erosie. Hiervoor is een aantal redenen aan te geven: De steile bodemhelling aan de westkant van de plaat zorgt voor een smalle brandingszone, waardoor de golfenergie op een klein gebied wordt afgegeven. Bovendien bevindt de geul zich dicht bij de Galgeplaat, waardoor veel sediment wordt afgevoerd via de geul. Dit lijkt de sterke erosie bij een zuidwestelijke windrichting te verklaren. 44% van alle meetperioden in de periode 1987-1993, heeft een karakteristieke zuidwestelijke windrichting. Dit verklaart de duidelijke achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat.

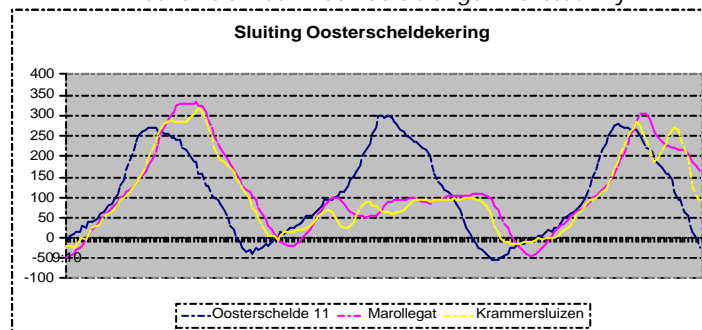
De noordwestelijke windrichting kent een trend, waarbij sedimentatie overheerst en toeneemt naar mate de windsnelheid toeneemt. De waterdiepte ten noorden van de Galgeplaat is beperkt. Dit zorgt voor een flauwe bodemhelling richting plaat wat zorgt voor een brede brandingszone. In deze brandingszone wordt de golfenergie geleidelijk afgegeven. Deze flauwe bodemhelling zorgt voor grotere windgedreven stromingen richting plaat wat resulteert in een plaatwaarts sedimenttransport. Dit lijkt de sedimentatie bij de noordwestelijke windrichting te verklaren.

Zowel de noordelijke als de zuidelijke windrichtingen tonen een zwakkere trend, hierbij overheerst de erosie en licht toenemend naar mate de windsnelheid toeneemt.

Paragraaf 5.2 geeft een onderbouwing voor de hypothese: "Een onderverdeling van de karakteristieke windrichting zorgt voor een duidelijke verband tussen sedimentatie/erosie en opgetreden weersomstandigheden."



Figuur 5.16 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid waarin ook de sluitingen zichtbaar zijn.



Figuur 5.17 Waterstanden in en net buiten het bekken tijdens een sluiting van de kering.

## 5.3 De invloed van de sluiting van de kering op het sedimentatie-/erosiegedrag

Deze paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: "De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat."

### 5.3.1 De invloed van de sluiting van de kering op de Galgeplaat als geheel

Deze stelling komt voort uit de gedachtegang, dat sluiting van de Oosterscheldekering grote gevolgen heeft voor de hydraulische randvoorwaarden van het systeem. Het streefpeil tijdens een sluiting van de Oosterscheldekering ligt tussen de 1,0-2,0 +m N.A.P. Figuur 5.16 laat de waterstanden zien in en net buiten de Oosterschelde. De belangrijkste gevolgen van een sluiting zijn: een lagere waterstand in het bekken, een gelijkblijvend waterpeil in het bekken dit betekent fixatie van de plaats van golfaanval op de plaat, drastische afname van de getijdenstromingen.

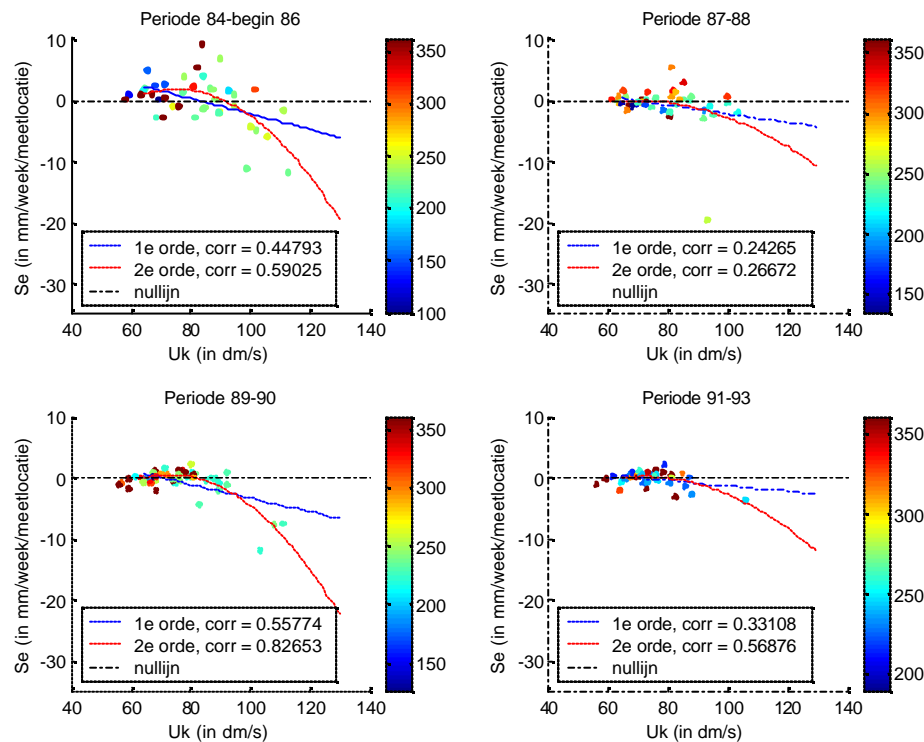
In figuur 5.17 is de sedimentatie/erosie van de plaat als geheel uitgezet tegen de karakteristieke windsnelheid. De sluitingen zijn omcirkeld aangegeven in de dataset. Uit de trendlijn valt op te maken dat de sluitingen deze trend ook volgen. Naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt, lijkt de invloed van de sluiting van de kering groter te worden. Er treedt echter meer erosie op dan de trendlijn in de dataset voorspelt. Er moet gewaakt opgelet worden omdat er sprake kan zijn van een schijnrelatie.



Tijdens een sluiting van de Oosterscheldekering is er namelijk altijd sprake van extreme weersomstandigheden. Bovendien is er nog een aantal datapunten met sterkere erosie, terwijl de kering niet gesloten was.

### **5.3.2 Conclusie**

Globaal is er geen duidelijk verband te vinden tussen het sluiten van de kering en het optreden van extra erosie op de Galgeplaat. Er wordt dus geen onderbouwing gevonden voor de hypothese: "De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat."



Figuur 5.18 Verandering van het sedimentatie-/erosiegedrag in de periode 1984-1993.

## 5.4 Verandering in sedimentatie-/erosiegedrag in de tijd

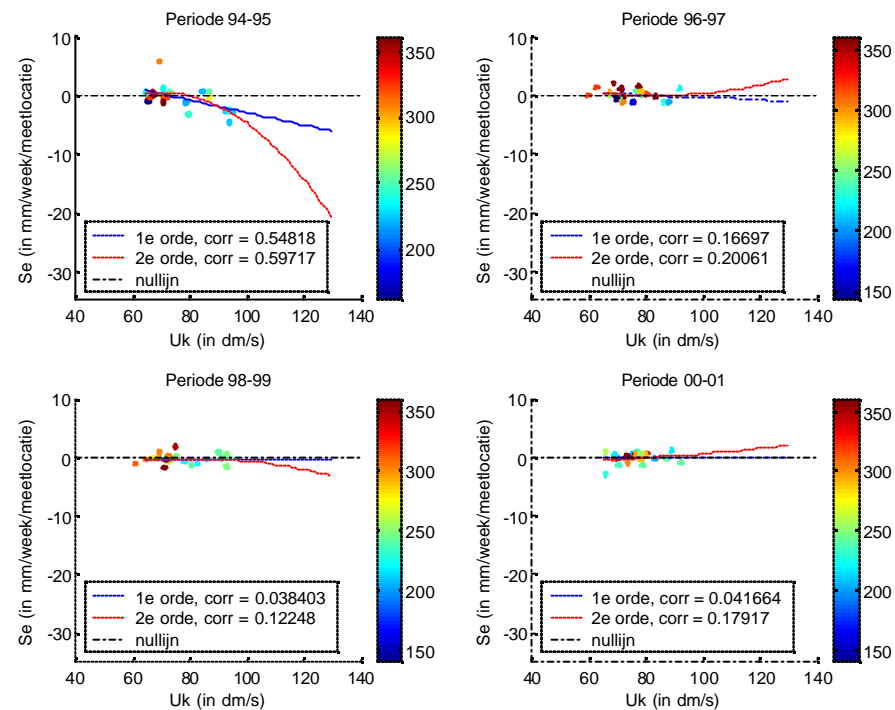
Het bodemprofiel van de Oosterschelde is sinds de komst van de kering onderhevig aan veranderingen. De trend lijkt afvlakking van het. Deze verandering is ook duidelijk zichtbaar bij de Galgeplaat. Deze paragraaf tracht een onderbouwing te vinden voor de hypothese: "De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert, naarmate de tijd vordert." Voor deze onderbouwing is de meetperiode 1984-2001 verdeeld in acht perioden. Er is gekozen voor een periode van twee jaar, omdat er anders te weinig datapunten per periode zouden overblijven.

### 5.4.1 De verandering in de periode 1984-2001

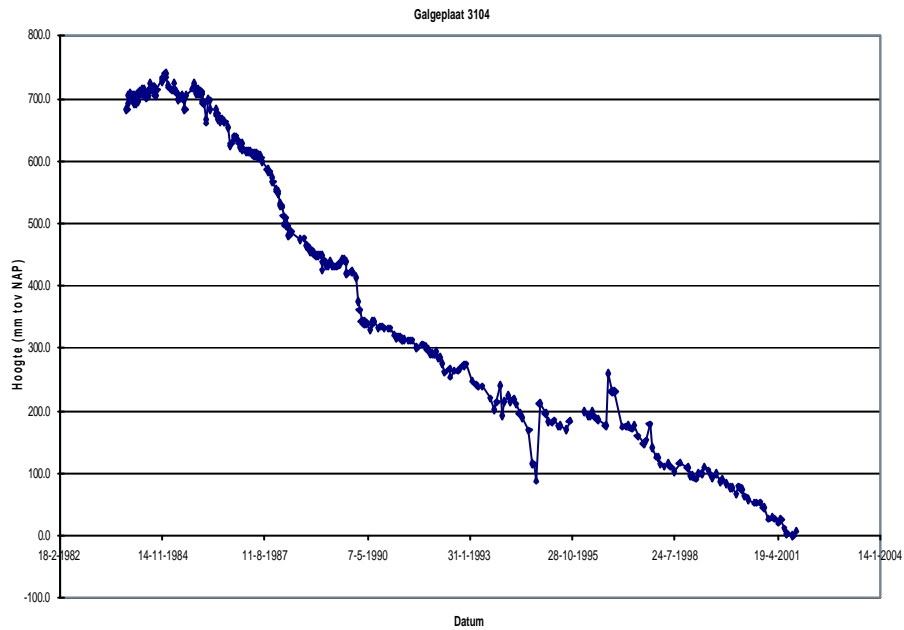
In figuur 5.18 en figuur 5.19 zijn de verschillende periodes uitgezet. Figuur 5.18 laat zien dat er voor de realisatie van de kering nog duidelijk plaatopbouw aanwezig is. In de jaren na de realisatie van de Oosterscheldekering verdwijnt de plaatopbouw al snel. Alleen in de periode 1987-1988 lijkt deze af en toe nog voor te komen. De plaatafbraak blijkt in de loop der jaren nauwelijks aan verandering onderhevig. Doordat in de periodes 1989-1990 en 1991-1993 geen plaatopbouw lijkt voor te komen, is de puntenwolk veel minder verspreid. Dit valt te verklaren uit het minder complex worden van de morfologie. Voor de sluiting was ook de getijdenstroming van invloed. Nu wordt de morfologie sterk bepaald door het golfklimaat. Hierdoor laat het systeem zich makkelijker door een trendlijn voorspellen en wordt ook de spreiding kleiner. Dit is goed zichtbaar in figuur 5.18.



Figuur 5.19 laat zien dat de achteruitgang van de plaathoogte stagneert in de latere jaren na de bouw van de Oosterschelde-kering. De plaatopbouw lijkt zo goed als verdwenen. Deze trend is al zichtbaar vanaf 1989, de plaatafbraak lijkt echter veel minder extreem geworden. Dit lijkt te duiden op een afname van de plaatdaling van de Galgeplaat. Er moet worden opgelet met het trekken van een conclusie. In de jaren 1994-2001 zijn de opgetreden stormen veel minder extreem geweest.



Figuur 5.19 Verandering van het sedimentatie-/erosiegedrag in de periode 1994-2001



*Figuur 5.20 Een weergave van de plaatdaling, bij een meetlocatie op het noorden van de Galgeplaat, op een hooggelegen gedeelte.*

In figuur 5.20 is de hoogteverandering van een meetlocatie op de Galgeplaat weergegeven. De meetlocatie ligt op een hoog deel in het noorden van de Galgeplaat waar in 1984-1985 nog plaatverhoging plaatsvond. Daarna zet de daling in. In 1990 is een scherpe daling te zien. In de eerste maanden van 1990 zijn er drie extreme stormen op een rij geweest. Hiervan zijn duidelijk de gevolgen te zien. Uit de figuur blijkt echter ook dat de plaatdaling zo goed als het gehele jaar doorzet. Er is slechts in enkele gevallen hoogteherstel te zien. Wordt gekeken over de gehele periode, dan is ook te zien dat de plaatdaling met de tijd minder snel gaat. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat hier slechts gaat om een hoogteregistratie van één meetlocatie.

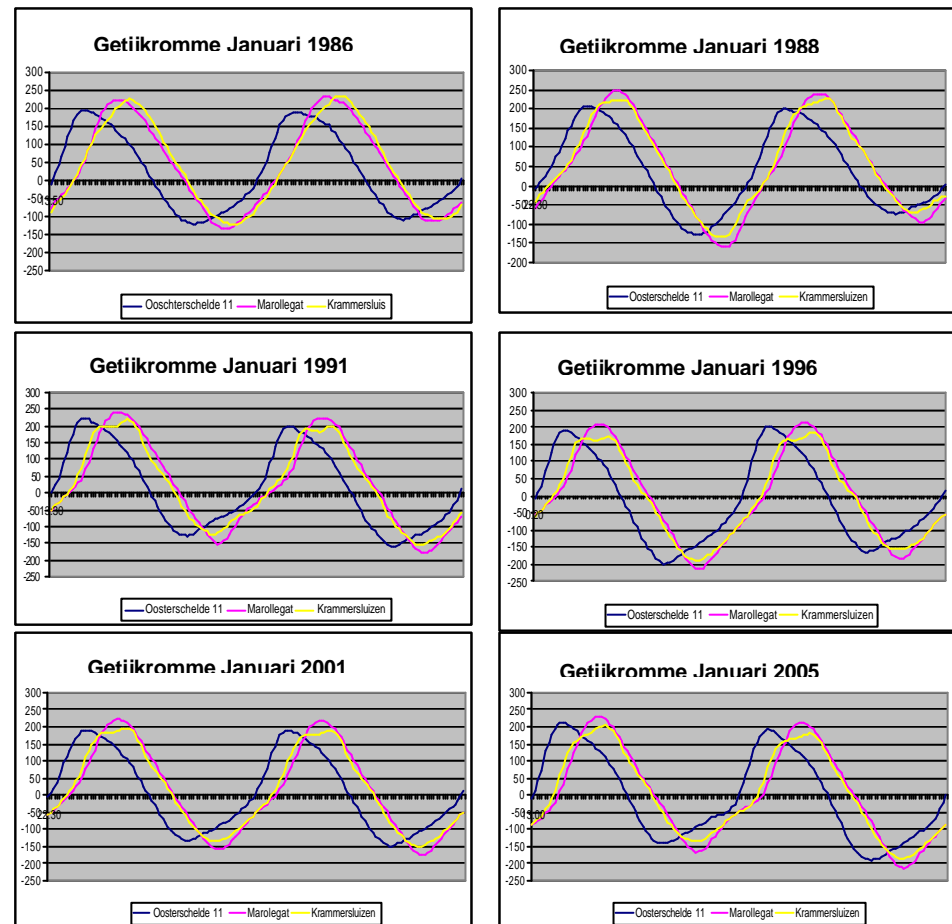




## 5.4.2 Verandering van het getij

Uit de data-analyse blijkt dat naarmate de bouw van de kering langer geleden is, de significante plaatopbouw lijkt te verdwijnen. Een verklaring hiervoor komt al naar voren in de literatuurstudie (Van der Hoeven, 2006). De getijdenkromme na realisatie van de stormvloedkering is aan het veranderen. Uit figuur 5.21 blijkt dat de oorspronkelijke langere laagwaterkentering, langzaam verandert in een langere hoogwaterkentering. Het verschil tussen deze beide systemen uit zich vooral in de sedimentbalans.

Een deel van het zand sedimenteert in de geulen. Veel zand slaat echter neer aan de rand van de platen ter hoogte van de laagwaterlijn. Dit zorgt er voor, dat de plaatoppervlakte enigszins toeneemt. Langzaam maar zeker verandert het bekken naar een bekken met ondiepe geulen en een steeds groter kombergend plaatoppervlak. In de Noordtak van de Oosterschelde is de breedte van het bekken veel kleiner dan in de kom, hierdoor hebben de plaatveranderingen een veel grotere invloed op de getijvorming, dan in andere plaatsen in de Oosterschelde. Een van de kenmerken van een bekken met ondiepe geulen en een groot kombergend plaatoppervlakte is een lange hoogwaterkentering.



Figuur 5.21 Een afbeelding van de verandering van de getijdenasymmetrie in het Oosterscheldebekken.



De verandering van de getijdenkromme zorgt voor een verandering van sedimentatie in het bekken. Een langere hoogwaterkentering zorgt voor een morfologisch systeem, waarbij de zandplaten voornamelijk gevoed worden met fijn sediment. Dit fijn sediment slaat neer in het bekken tijdens hoogwater, zowel op de platen als in de diepe geulen. Het grof sediment dat voor 1987 door de hogere vloedsnelheden werd afgezet op de plaat, zal door de getijdenstromingen niet meer zo hoog opgevoerd kunnen worden.

Uit de studie: "Fine sediments in the Oosterschelde tidal basin before and after partial closure." (Ten Brinke, 1994), blijkt dat het Oosterscheldebekken veranderd is in een zandimporterend systeem. Voor de realisatie van de Oosterscheldekering was het nog een zandexporterend systeem. De Oosterschelde importeert alleen fijn sediment, dit heeft twee redenen. Ten eerste: Grof sediment wordt voornamelijk getransporteerd vlak bij de bodem. De ontgrondingskuilen, aan beide zijden van de Oosterscheldekering stoppen dit transport. Ten tweede: Er moet eerst een nieuw evenwicht ontstaan in de voordelta van de Oosterschelde. De te ruime geulen aldaar zullen als eerste aanzanden.

Op plaatsen in het bekken, waar de grootste stroomsnelheidsreductie heeft plaatsgevonden, is afzet van het fijn sediment te vinden (Ten Brinke, 1994). Dit zijn voornamelijk de randen van het bekken en de extreme dieptes in de geulen (>30m). Uit de studie van Ten Brinke, blijkt dat er niet veel is veranderd in de samenstelling van de toplaag van 10 cm van de Galgeplaat. De stroomsnelheden zijn kennelijk nog steeds groot genoeg om het neergeslagen fijn sediment weg te spoelen. Hierdoor is er in de nieuwe situatie zo goed als geen plaatopbouw.



### 5.4.3 Conclusie

De figuren 5.18 en 5.19 tonen de verandering van trend in de tijd, de plaatverlaging blijkt af te nemen. Al na twee jaar na de sluiting van de kering lijkt de plaatopbouw zo goed als verdwenen. De erosie lijkt weinig te veranderen tot 1994. Tussen 1994 en 2001 lijkt de plaatafbraak te verminderen. Er moet worden opgelet met het trekken van een conclusie. In de jaren 1994-2001 zijn de opgetreden stormen veel minder extreem geweest. Dit maakt de vergelijking lastig en er moet daarom worden gelet op een schijnrelatie .

Het estuarium is veranderd van een zand exporterend systeem, in een zand importerend systeem. Een van de redenen hiervoor is de verandering van een langere laagwaterkentering naar een langere hoogwaterkentering. Kenmerken van een estuarium met een lange hoogwaterkentering zijn ondiepe geulen en een groot plaatoppervlak. Deze verandering is zichtbaar in het bekken, doordat de platen afvlakken. Deze afvlakking betekent een toename van het kombergend plaatoppervlakte. De geulen in de Oosterschelde zijn langzaam aan het verzanden.

Voor de hypothese: "De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert in de tijd." is in deze paragraaf een onderbouwing gegeven. Of dit komt door het veranderen van de morfologie van het bekken of door het ontbreken van extreme weersomstandigheden in de periode 1994-2001 is nog onduidelijk. In hoofdstuk 8 wordt bij de aanbevelingen aangegeven op welke manier dit moet worden aangepakt in een vervolgstudie.



## 5.5 Slotconclusie van de gehele Galgeplaat

In paragraaf 5.1 blijkt dat er voor de voltooiing van Oosterschelde-kering veel vaker plaatopbouw voorkwam. Dit is de onderbouwing voor de hypothese: "Na de realisatie van de Deltawerken vindt er geen significante plaatopbouw meer plaats."

De zuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de meeste erosie. Een van de belangrijkste redenen daarvoor lijkt de steile bodemhelling aan de Westkant van de plaat te zijn. Hierdoor is de brandingszone minder breed, waardoor de golfenergie in een klein gebied wordt afgegeven. Door deze steile helling bevindt de geul zich dichtbij de Galgeplaat, hierdoor zal veel opgewoeld sediment worden afgevoerd in de geul.

De noordwestelijke windrichtingen kent nog steeds plaatopbouw. De ondiepte ten noorden van de Galgeplaat zorgt voor een flauwe bodemhelling richting plaat. Deze flauwe bodemhelling zorgt voor een brede brandingszone. In deze brandingszone wordt het zand veel geleidelijker opgewoeld. Dit flauwe profiel zorgt ook voor een grotere golfgedreven stroming richting plaat. De strijklengte bij deze windhoek is groot. Mede door de beperkte waterdiepte vindt er een veel grotere windopzet plaats. Deze windopzet versterkt de vloedstromingen, die de Galgeplaat voeden met sediment. Bij een toenemende karakteristieke windsnelheid blijkt dan ook dat de sedimentatie toeneemt. Dit verklaart waarom het noorden van de Galgeplaat de hoogste plaathoogte kent.

In de periode 1987-1993 heeft de wind voor 44% een karakteristieke zuidwestelijke windrichting. Dit verklaart de duidelijke achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat. Dit is de onderbouwing voor de

hypothese: "Een onderverdeling van de karakteristieke windrichting zorgt voor een duidelijke verband tussen sedimentatie/erosie en opgetreden weersomstandigheden."

Voor de hypothese: "De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert, naarmate de tijd vordert." is in deze paragraaf een onderbouwing gegeven. Of dit komt door het veranderen van de morfologie van het bekken of door het ontbreken van extreme weersomstandigheden in de periode 1994-2001 is nog onduidelijk. In hoofdstuk 8 wordt bij de aanbevelingen aangegeven dat door middel van een statistische aanpak de kans op extreme weersomstandigheden kan worden bepaald.

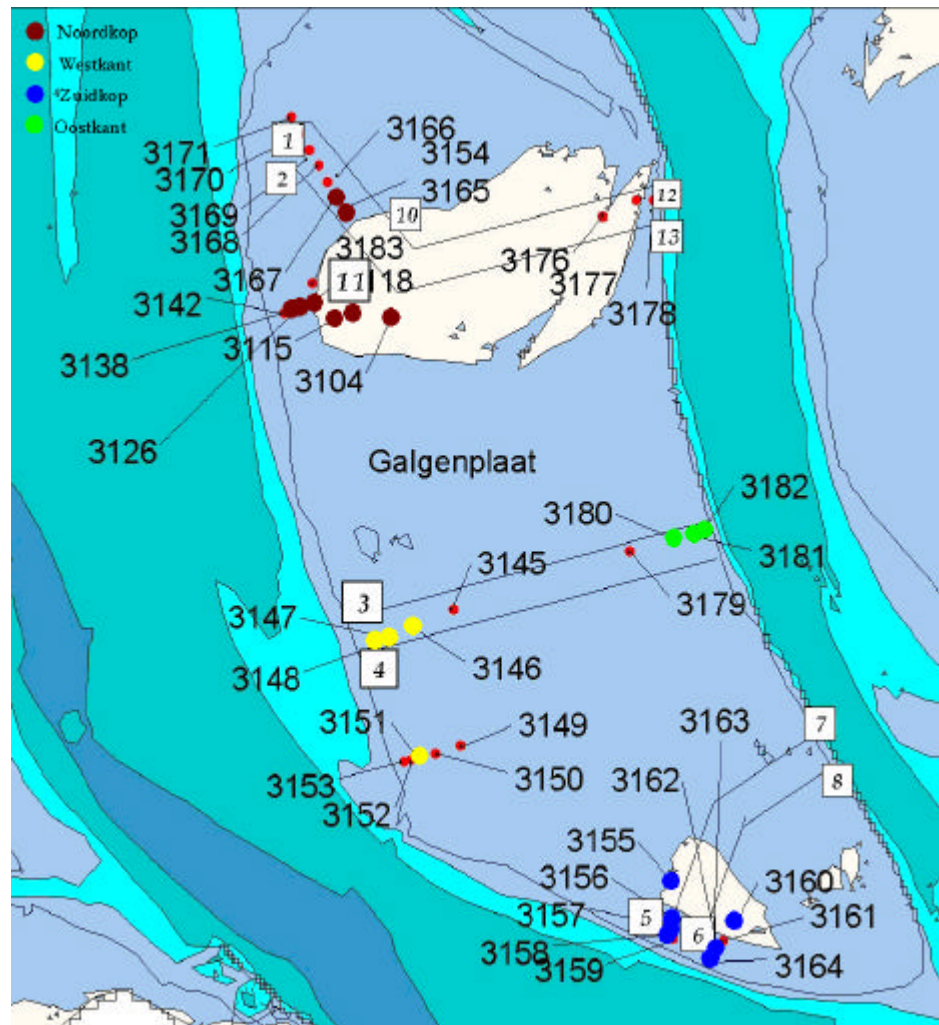


## 6 Hypothesetoetsing met een onderverdeling van de Galgeplaat

In het vorige hoofdstuk werd de Galgeplaat als geheel beschouwd. In dit hoofdstuk worden er twee verschillende onderverdelingen bekeken. De verschillende windrichtingen stellen elk een bepaalde kant van de Galgeplaat het meest bloot aan golfaanval. Vandaar dat er in de eerste paragraaf de volgende hypothese getoetst wordt: "Een onderverdeling van de Galgeplaat zorgt voor een duidelijker verband tussen sedimentatie/erosie en de opgetreden weersomstandigheden." In de tweede paragraaf wordt gepoogd om een onderbouwing te vinden voor de hypothese: "Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaat-hoogtes kan meer inzicht verschaffen in de verticale erosie."

### 6.1 Een onderverdeling van de Galgeplaat in plaatdelen

Om beter zicht te krijgen op waar precies de windrichtingen de plaat aanvallen, is de Galgeplaat verdeeld in vier plaatdelen: Noordkop, Westkant, Zuidkop en Oostkant. Zie figuur 6.1 voor de onderverdeling van de verschillende meetlocaties uit de homogene dataset. De uitkomsten worden beïnvloed door de gebruikte meetlocaties. Hierdoor zeggen de resultaten van de Noordkop vooral iets over de sedimentatie-/erosie van het gebied waar de meetlocaties liggen. Dit geeft wel meer inzicht in de processen die optreden op deze verschillende locaties. Doordat de meetlocaties bij de Noordkop deels ook aan de Westkant liggen, kan zich bij deze onderverdeling een vertekend beeld voordoen. Bij de interpretatie van de resultaten wordt hiermee rekening gehouden.

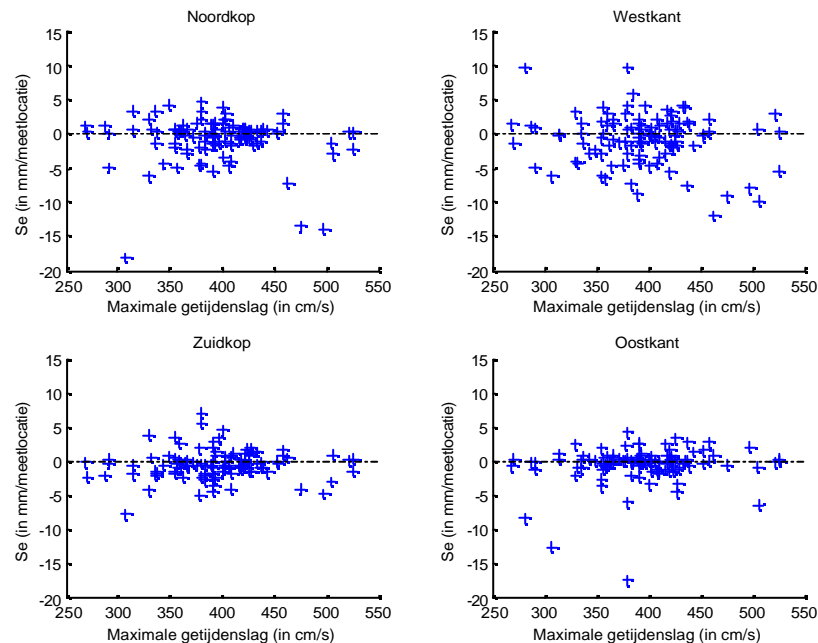


Figuur 6.1 De onderverdeling van de meetlocaties over de verschillende gebieden op de Galgeplaat.



## 6.1.1 De vier plaatdelen met de karakteristieke getijdenslag

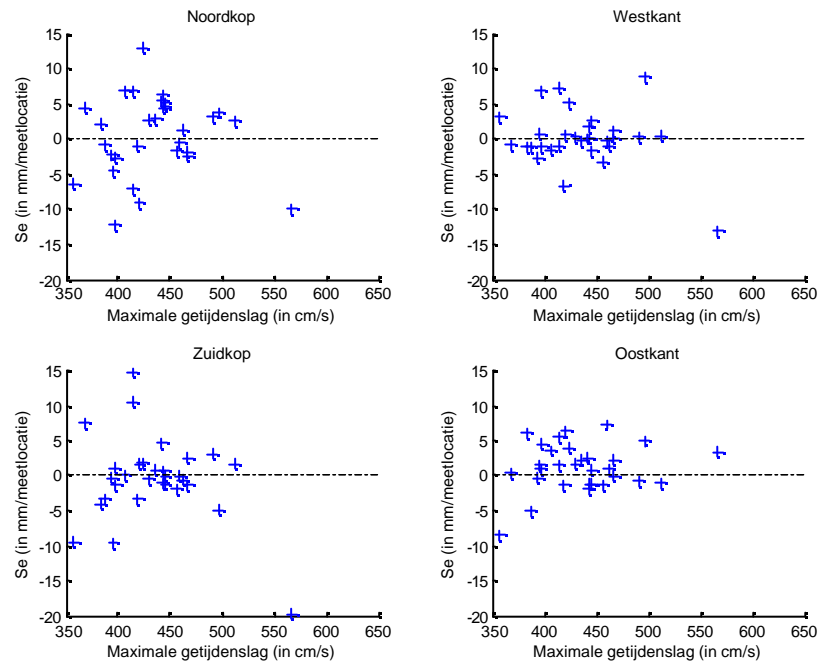
Deze paragraaf kijkt naar een mogelijk verband tussen de karakteristieke getijdenslag en de opgetreden sedimentatie/erosie op lokaal niveau, om zo meer systeemkennis te vergaren. De vraag is of sommige plaatdelen meer beïnvloed worden door de getijdenbeweging.



Figuur 6.2 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de maximale getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1987-1993.

### 6.1.1.1 De maximale getijdenslag

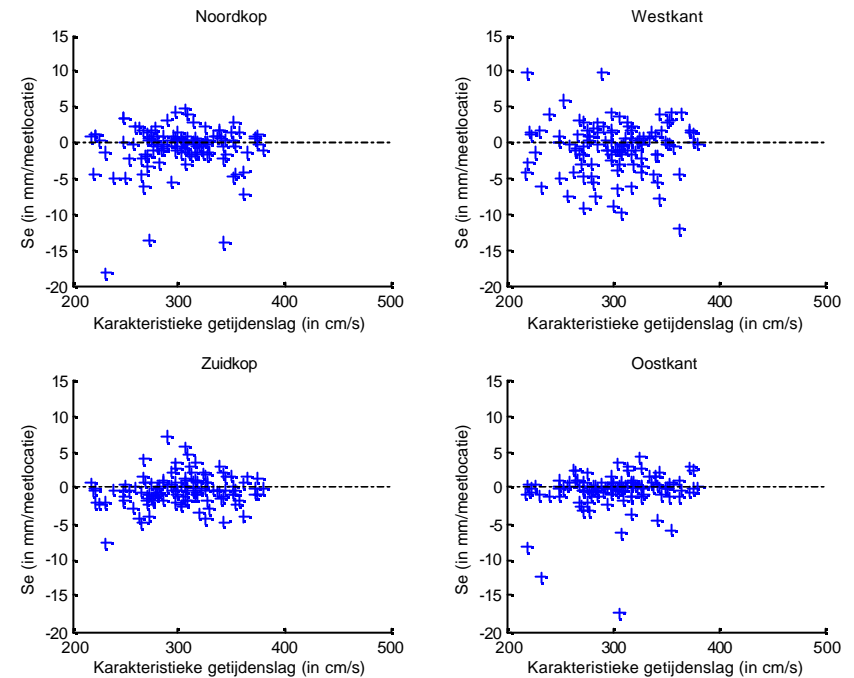
De figuren 6.2 en 6.3 tonen grafieken waarin de sedimentatie/erosie is uitgezet tegen de maximale getijdenslag. De perioden zijn 1987-1993 en 1984 begin-1986. In de periode na de voltooiing van de Oosterscheldekering is bij geen van de locaties een verband te herkennen. Wel is ook hier de spreiding aan de westkant van de Galgeplaat het grootst. In de periode 1984 begin-1986 is de grootste sedimentatie te vinden aan de Noord- en Zuidkop. Op deze twee plaatsen bevinden zich ook de hoogste plaatdelen. Op de Noordkop van de Galgeplaat is een vloed-schaar te vinden en op de Zuidkop een ebschaar. Deze scharen voeden de plaat met zand. Vandaar dat de Noordkop en de Zuidkop de meeste sedimentatie kennen in deze periode. De getijdenbeweging is hier de motor voor de plaatopbouw. Er is echter geen verband zichtbaar tussen de toename van de getijdenslag en die van de sedimentatie. Omdat het hier gaat om een waterstandmeting zitten zowel het astronomisch getij als de windopzet verwerkt in de getijdenslag. Hierdoor zijn ook de windsnelheid en de windrichting variabelen in deze parameter. Dit betekent dat naarmate het harder waait uit de noordwesthoek het maximale getij, dan wel de karakteristieke getijdenslag, zal toenemen. Deze toename komt door de windopzet. Bij deze krachtige wind zal er een grotere golferosie plaatsvinden. Hierdoor treedt er vaak veel erosie op bij een hoge maximale getijdenslag. De maximale getijdenslag waar de grootste sedimentatie optreedt, heeft een grootte van 4-4,5 meter. Springtij zonder windopzet is de ideale omstandigheid voor plaatopbouw. De grafieken bevestigen dat de getijdenstromingen voor de sluiting van de kering, meer invloed hadden op de morfologie van de Galgeplaat.



Figuur 6.3 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de maximale getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1984 - begin 1986.

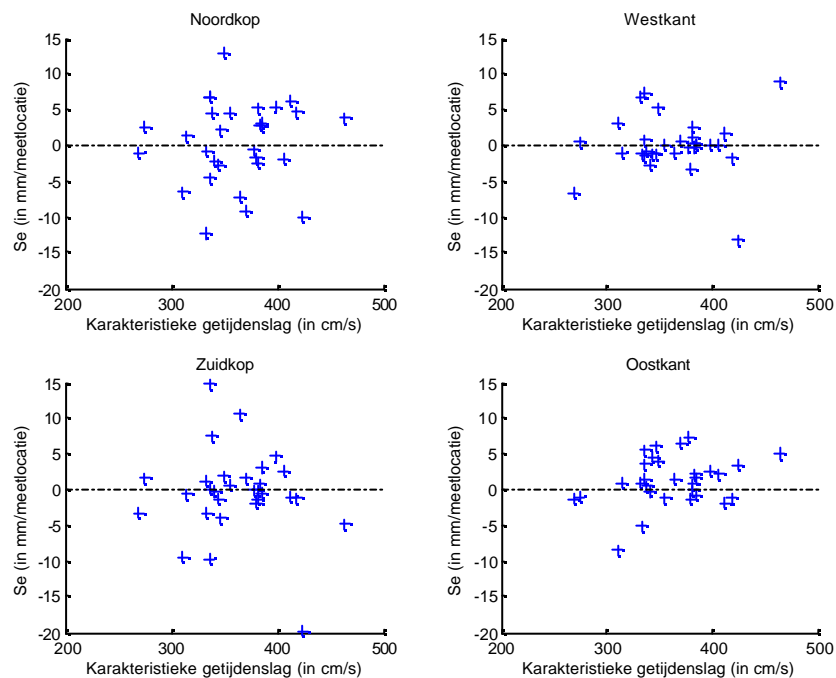
### 6.1.1.2 De karakteristieke getijdenslag

Ook bij de karakteristieke getijdenslag is geen duidelijk verband waarneembaar. Wel blijkt uit figuur 6.4 en 6.5 dat voor de realisatie van de kering het getij een grotere invloed had op de morfologie. Bij deze methode wordt de factor van de windopzet verkleind.



Figuur 6.4 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1987-1993

Hierdoor wordt aan de Oostkant een wat duidelijker verband zichtbaar. Dit wordt verklaard uit de beschutte ligging van de Oostkant voor golferosie, waardoor de invloed van het getij groter is dan op de andere locaties.



Figuur 6.5 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke getijdenslag, met de verschillende plaatgebieden, tijdens de meetperiode 1984-1986

### 6.1.1.3 Conclusie

Uit de grafieken in deze paragraaf kan een aantal dingen worden opgemaakt. Ten eerste: Er is geen duidelijk verband aanwezig tussen de karakteristieke getijdenslag en de opgetreden sedimentatie/erosie. Voor de sluiting van de kering is er een grotere sedimentatie zichtbaar aan de Noord- en Zuidkop. Dit is te verklaren door respectievelijk de vloed- en ebschaar die daar liggen. Deze scharen voeden de plaat met zand. Door de afgenomen getijdenstromingen na de sluiting is deze voeding ook teruggelopen. De invloed van het getij op de morfologie van de Galgeplaat is afgenomen. Ten tweede: Het probleem bij de gebruikte methode is dat het gaat om waterstanden. Dit betekent dat zowel het morfologisch getij als de windopzet er bij in zitten. Hierdoor speelt ook de windvariabele mee die het verband vertroebelt.

Er wordt hier geen verband gevonden, maar wel meer inzicht in het systeem verkregen. Het doel van het onderzoek is meer inzicht te krijgen in de toekomstige plaatverandering. Daarvoor lijken de waterstandsmetingen slecht bruikbaar. Zoals in hoofdstuk drie al naar voren komt richt het onderzoek zich verder op de gemeten weersomstandigheden.

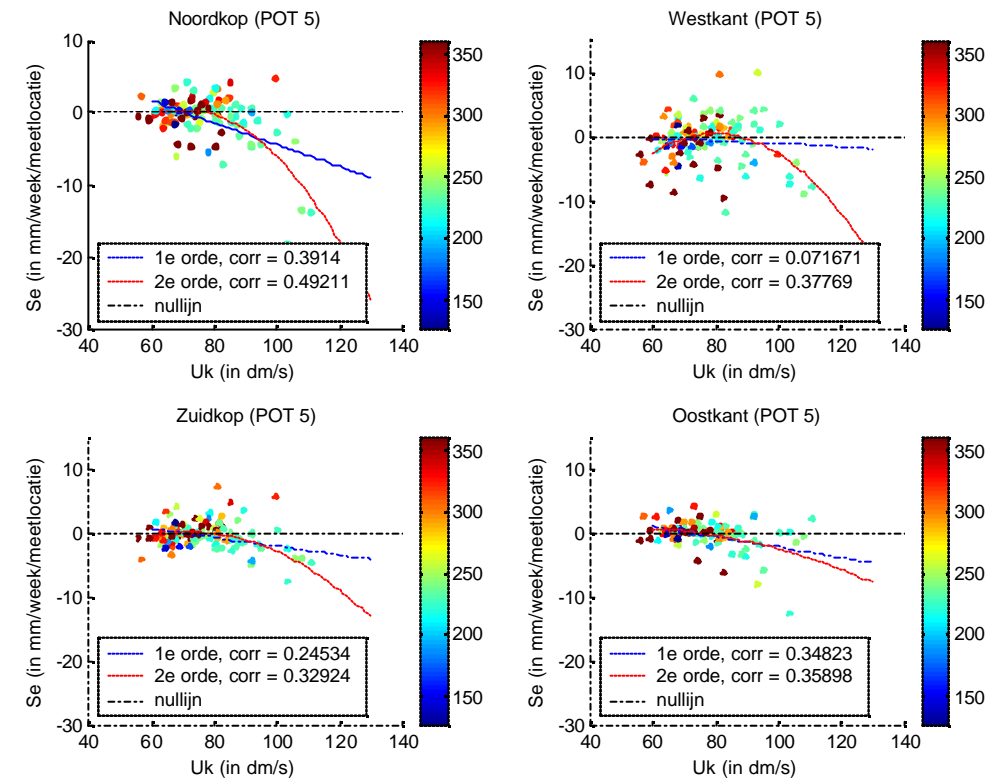




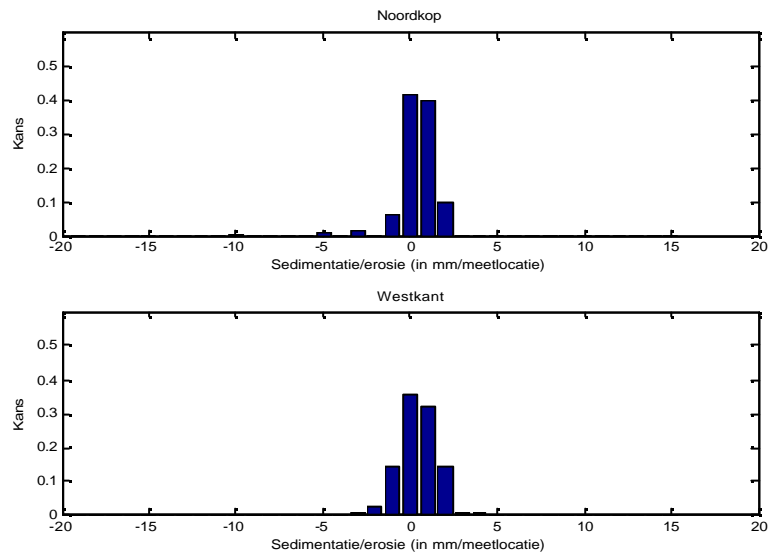
## 6.1.2 De vier plaatdelen met alle windrichtingen

In figuur 6.6 is voor de verschillende plaatdelen de sedimentatie-/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid uitgezet. Er wordt hier gekeken naar de periode 1987-1993. Als deze grafiek wordt vergeleken met de grafiek van de Galgeplaat als geheel, is te zien dat zeker de Noordkop en de Westkant een grotere spreiding kennen. Dit zijn precies de twee locaties die het meest worden blootgesteld aan golfaanval tijdens de heersende zuidwestelijke windrichting. Deze windrichting veroorzaakt ook veruit de grootste erosie op de Galgeplaat. Vandaar de extreme verschillen.

Zoals al eerder gebleken is, blijkt de westzuidwestelijke windrichting te zorgen voor erosie aan alle kanten. De noordwestelijke windrichting blijkt overal te zorgen voor sedimentatie. De verschillende sedimentatie-/erosiepatronen van de plaatdelen worden goed zichtbaar. Echter het verband tussen de opgetreden sedimentatie-/erosie en de opgetreden weersomstandigheden lijkt nog niet sterker geworden door de onderverdeling. Vandaar dat in de volgende paragraaf er weer een onderverdeling gemaakt wordt naar de windrichting.



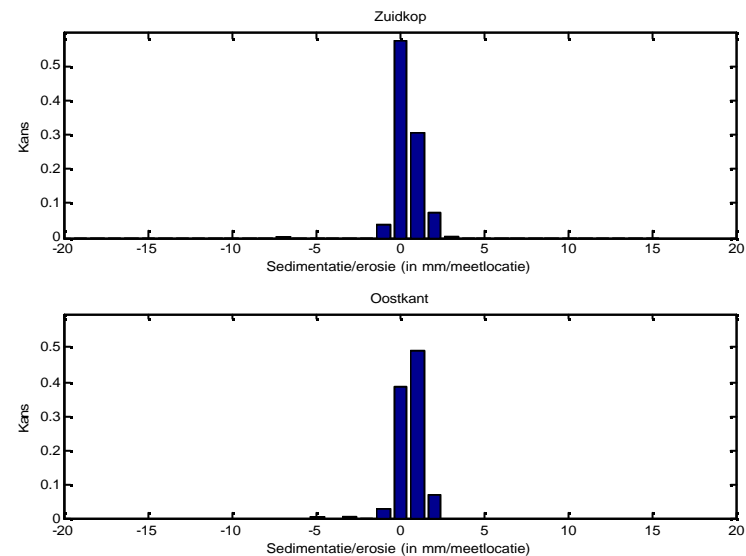
Figuur 6.6 Onderverdeling van de Galgeplaat in de deelgebieden, alle windrichtingen zijn hier vertegenwoordigd.



Figuur 6.7 De sedimentatie -/erosiehistogrammen van de Noordkop en de Westkant.

### 6.1.2.1 Sedimentatie-/erosiehistogram

In deze paragraaf zijn de verschillende sedimentatie-/erosie-histogrammen weergegeven. Figuren 6.7 en 6.8 geven verschillende histogrammen weer, hieruit blijkt dat de Noordkop het hevigst wordt aangevallen tijdens extreme weersomstandigheden. De Westkant kent het meest gespreide histogram. Uit de data-analyse komt al naar voren dat tijdens zuidwesten wind de Noordkop wordt bloot gesteld aan sterke erosie. Duidelijk komt naar voren dat het zuiden en het oosten relatief gezien het meest in de luwte liggen. Dit blijkt ook al uit eerdere figuren.



Figuur 6.8 De sedimentatie -/erosiehistogrammen van de Zuidkop en de Oostkant.

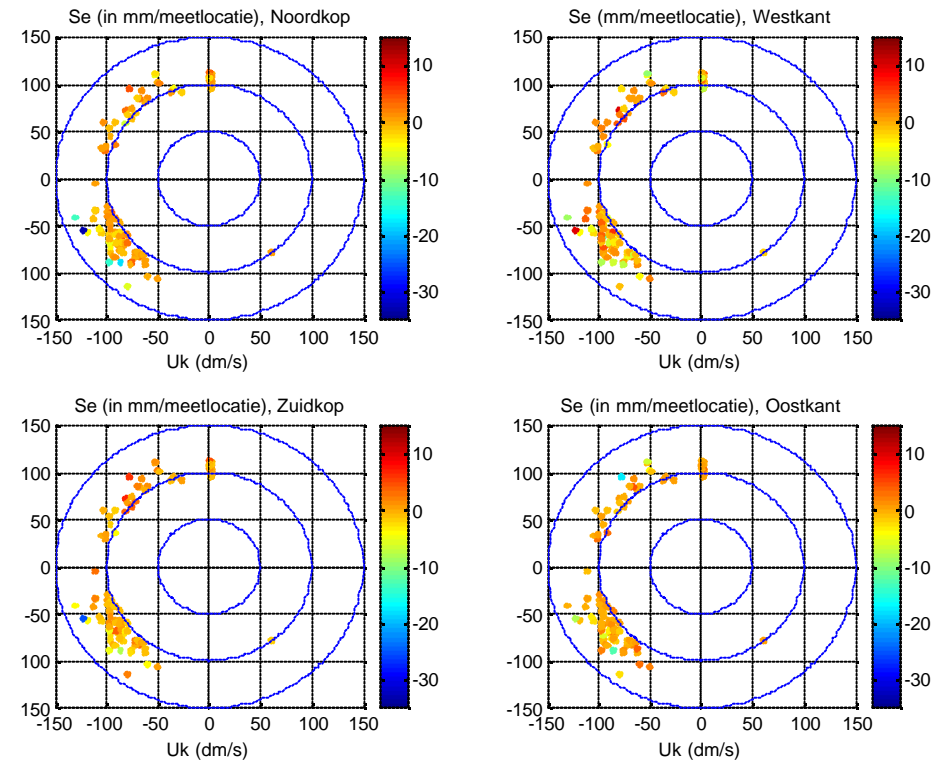


### 6.1.2.2 Sedimentatie/erosie op de windroos

In figuur 6.9 zijn alle datapunten op de windroos uitgezet. Alle windsnelheden onder de tien m/s zijn eruit gefilterd. De drie blauwe cirkels zijn van binnen naar buiten de 5, 10 en 15 m/s.

### 6.1.2.3 Conclusie

De plaatverdeling zorgt voor een beter beeld van wat er op welke locatie gebeurt. Het is nu echter nog moeilijk te zeggen of het de correlatie verbetert. Hiervoor moet nog een onderverdeling gemaakt worden voor de windrichting. Door de plaatverdeling is er wel een helder beeld ontstaan van de verschillende situaties op de Galgeplaat. Uit de verschillende grafieken blijkt dat de grootste variatie in het sedimentatie-/erosiepatroon zit aan de Westkant en op de Noordkop. De Zuidkop en de Oostkant tonen een geringe trend naar beneden. Er zijn minder extreme gevallen van sedimentatie/erosie aan deze zijden. Dit is een direct gevolg van de overheersende windrichting. Bij de zuidwestelijke windrichtingen ligt de Oostkant in de luwte van de plaat, de Zuidkop kent een grote invalshoek.

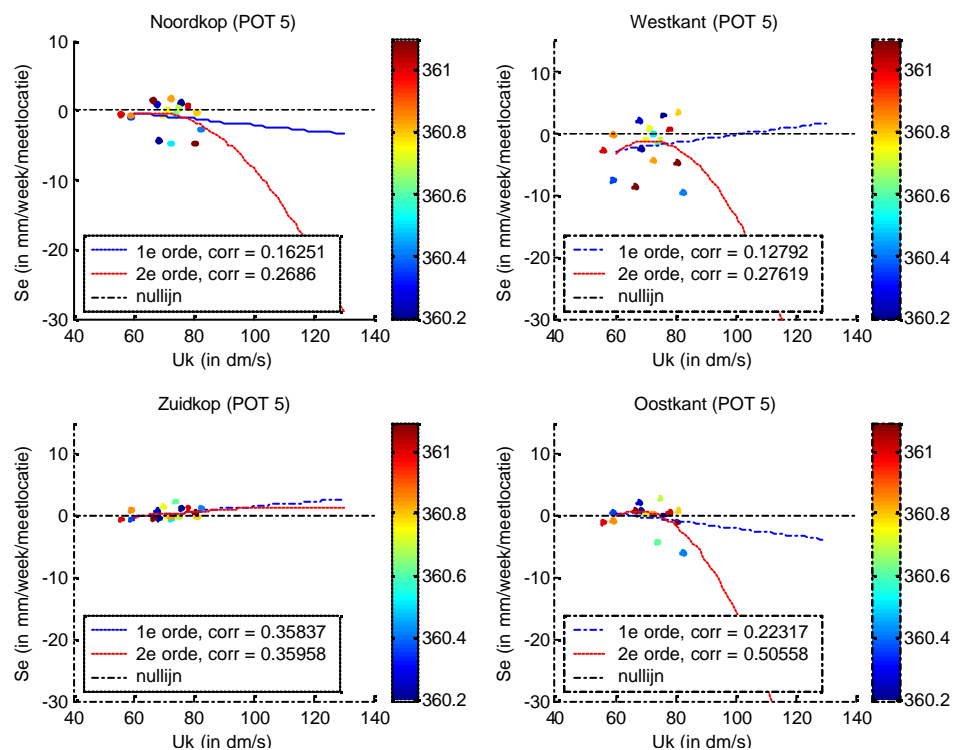


Figuur 6.9 Grafiek van de windsnelheid en de windrichting op de kompasroos.



### 6.1.3 De onderverdeling van de windrichtingen met vier plaatdelen

Deze paragraaf zoekt verder naar de correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en opgetreden sedimentatie/erosie. Door middel van een onderverdeling van de windrichtingen wordt gepoogd een beter beeld te krijgen.



Figuur 6.10 Grafiek van de Noordelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.

#### 6.1.3.1 De noordelijke windrichtingen

In figuur 6.10 zijn de noordelijke windrichtingen te zien, het gaat hier om de periode 1987-1993.

##### Westkant

Direct valt op dat de Westkant een grote spreiding van de puntenwolk kent en dat deze spreiding groter lijkt te worden naarmate de windsnelheid toeneemt. Het wel of niet onder water staan van de plaat tijdens bepaalde weersomstandigheden kan hiervoor een verklaring zijn. Hierdoor kan de luwte aan de Westkant sterk verschillen.

##### Noordkop

De Noordkop toont ook een trend richting erosie. Al in paragraaf 5.2.1 komt naar voren dat het noordoosten van de Noordkop een flauwe bodemhelling kent. Echter in de aanloop naar de plaat toe zit een kleine getijdengeul. Deze geul zal veel sediment afvoeren naar het "Brabantsche vaarwater" waardoor het plaatgericht sedimenttransport sterk afneemt. Uiteindelijk zorgt de golfaanval dan voor de erosie.

##### Zuidkop

De Zuidkop toont een trendlijn waarbij de sedimentatie overheerst en toeneemt naarmate de windsnelheid toeneemt. Dit lijkt te verklaren uit een herverdeling van het zand van de Galgeplaat. Doordat er over de gehele plaat een grote hoeveelheid sediment in de kolom zit, zal dit aan de lizijde van de plaat neerslaan. Dit komt doordat er een grote gradiënt in stroomsnelheid zit bij de Zuidkop.



## De Oostkant

De Oostkant van de Galgeplaat is onderhevig aan erosie bij deze windrichting. De geul laat flink hogere golven toe, bij hoge waterstanden ligt de plaat namelijk zelfs niet meer in de luwte van de schorren en de slikken ten westen van Stavenisse. Hierdoor zal de golfaanval aanzienlijk groter zijn. Hiermee wordt de erosie verklaart aan de Oostkant.

### 6.1.3.2 De noordwestelijke windrichtingen

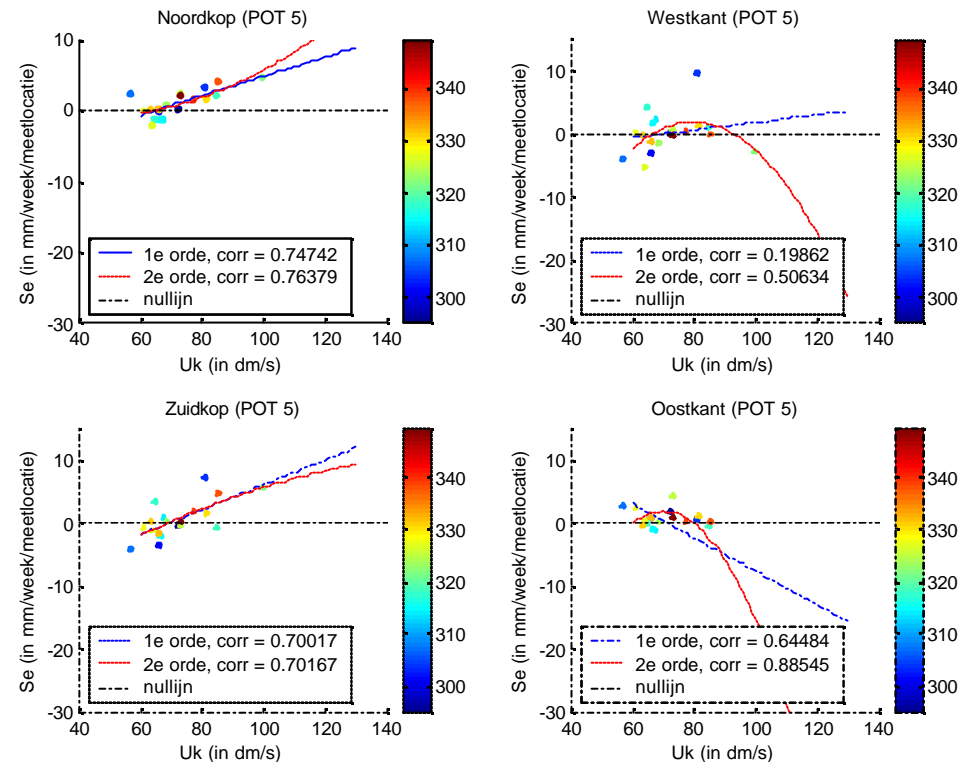
In figuur 6.11 en 6.12 zijn respectievelijke de karakteristieke noordnoordwestelijke en de noordwestelijke windrichtingen weergegeven. Het gaat hier om de meet periode 1987-1993.

## De Noordkop

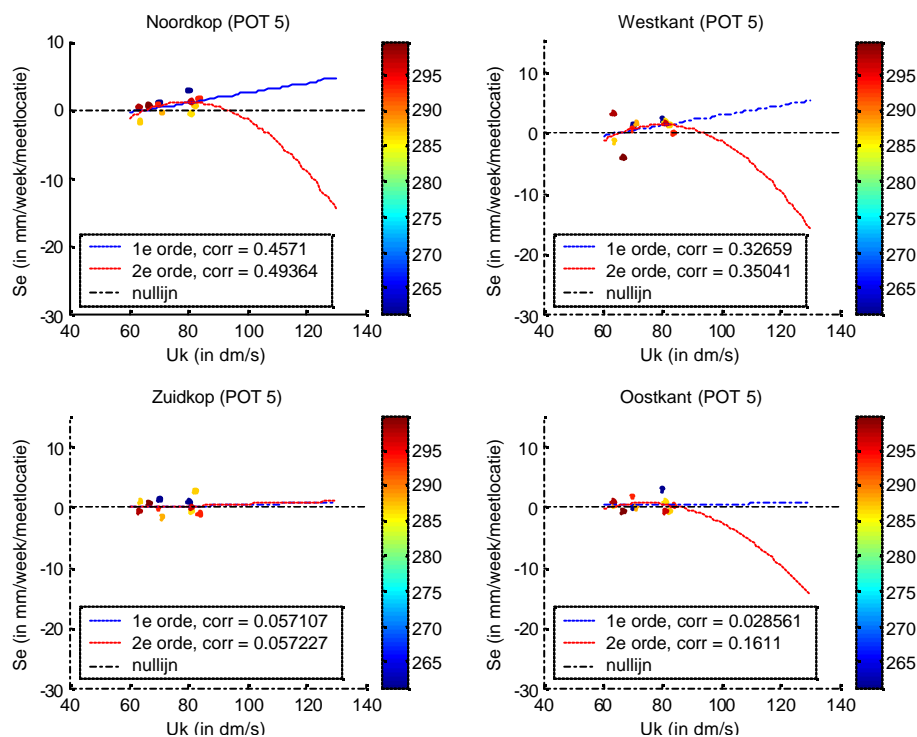
De Noordkop toont een trend waarbij de sedimentatie overheersend en deze neemt toe naarmate de windsnelheid toeneemt. Hierbij valt op dat de Noordkop zogoed als nooit onderhevig is aan erosie bij deze windrichting. De verklaring hiervoor is dat de golf-, de windgedreven stromingen en de getijdenstromingen zorgen voor een plaatwaarts sedimenttransport, zie paragraaf 5.2.2.

## De Westkant

De Westkant toont ook een trend waarbij de sedimentatie overheersend is en deze neemt toe naarmate de windsnelheid toeneemt. De overgang van geul naar plaat aan de westzijde is steil. Hierdoor is de brandingszone aan de westzijde smal, bij een golfrichting haaks op de plaat. Bij de noordwestelijke golfrichting zal deze brandingszone breder zijn door de grotere invalshoek van de golven. Ook aan deze zijde zorgen de golf- en windgedreven stromingen en de getijdenstromingen tezamen voor een plaatwaarts sedimenttransport.



Figuur 6.11 Grafiek van de noordnoordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



Figuur 6.12 Grafiek van de noordwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.

### De Zuidkop

De Zuidkop kent uit de noordnoordwestelijke windrichting een sterke trend richting sedimentatie (zie figuur 6.11). Bij deze windrichting ligt de Zuidkop aan het einde van de weg die het water over de Galgeplaat heen heeft afgelegd. Boven de plaat is de sedimentconcentratie hoog. In het zuiden ligt ook een hoog plaatdeel. Net hier achter treedt een grote snelheidsgradiënt op, dit veroorzaakt de sedimentatie in het zuiden van de Galgeplaat bij deze windrichting.

### De Oostkant

De Oostkant toont een duidelijke verschil qua trend in de figuren 6.11 en 6.12. In figuur 6.11 toont de Oostkant een trend waarbij de erosie overheerst en neemt toe naarmate de windsnelheid toeneemt. Uit figuur 6.11 wordt de trendlijn sterk bepaald door een enkel punt met sterke erosie. Hieruit blijkt dat de Oostkant tijdens extreme weersomstandigheden uit deze windrichting sterke erosie kan veroorzaken. Terwijl in normale weersomstandigheden dit niet het geval is. Hiermee komt naar voren dat de extreme weersomstandigheden sterk bepalend zijn voor het sedimentatie-/erosiepatroon. Uit de windhoek 300 tot 350 ligt de Oostkant niet meer in de luwte, vanuit het "Brabantsche vaarwater" wordt de Galgeplaat blootgesteld aan golfaanval. De stroming is parallel aan de geul en niet plaatwaarts, hierdoor zal veel sediment afgevoerd worden via de geul.

In figuur 6.12 toont de Oostkant een trend waarbij de sedimentatie licht overheerst, echter deze neemt niet toe naarmate de windsnelheid toeneemt. De verklaring hiervoor is dat de Oostkant bij deze windhoek in de luwte ligt van de slikken ten westen van Stavenisse.



### 6.1.3.3 De zuidwestelijke windrichtingen

In figuur 6.13 zijn westzuidwestelijke windrichtingen uitgezet. De meetperiode is 1987-1993. Duidelijk is te zien, dat deze windrichting grote erosie veroorzaakt op de gehele Galgeplaat.

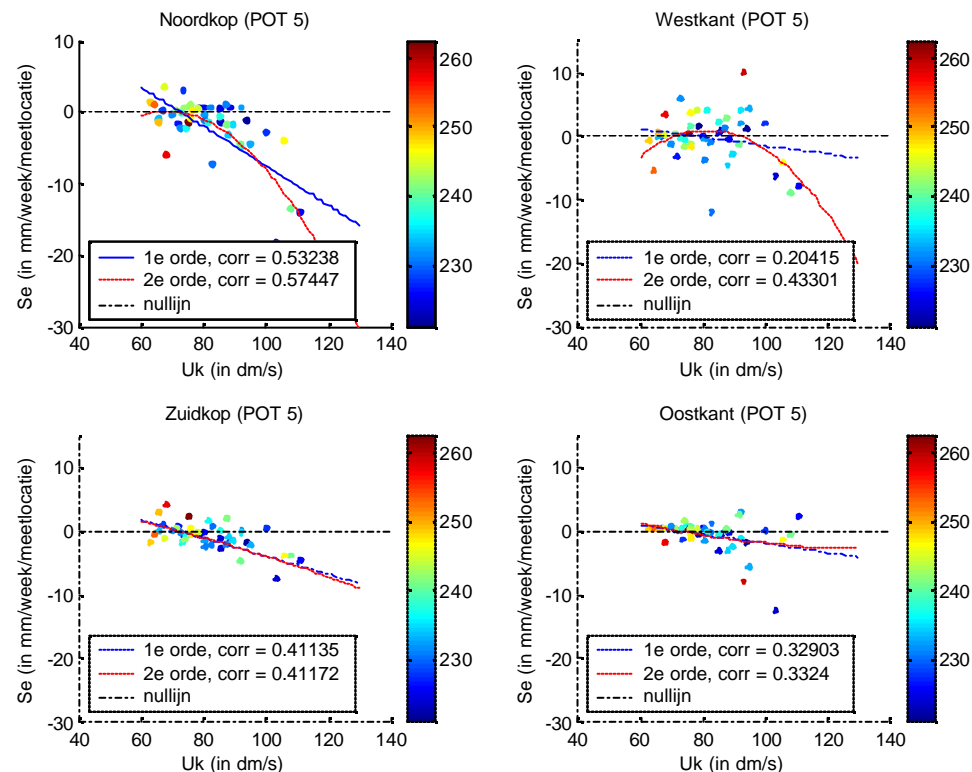
#### De Noordkop

De Noordkop toont een trend waarbij de erosie overheersend is en toeneemt naarmate de windsnelheid toeneemt. Hierbij valt op dat vooral tijdens extreme weersomstandigheden de erosie veel groter is vergeleken met de andere plaatdelen. De strijklengte bij deze windrichting aan de noordzijde is significant groter dan op andere locaties op de Galgeplaat. Dit komt doordat het noorden niet meer in de luwte ligt en wordt blootgesteld aan golven met een strijklengte vanaf de kering. Daarnaast is de bodemhelling veel steiler uit deze windrichting. Hierdoor wordt de golfenergie in een smalle brandingszone afgegeven. In deze brandingszone staat de getijdenstroming haaks op de golfrichting. De getijdenstroming voeren het sediment af via de geul, het plaatgerichte sedimenttransport is nihil.

#### De Westkant

De Westkant van de Galgeplaat kent grote variaties in de opgetreden sedimentatie/erosie bij deze windrichting door de variërende waterstand. Bij lage waterstanden is het plaatwaarts transport zo goed als nul. De getijdenstroming voert het door de brekende golven opgewoelde zand af. Door de steile overgang van geul naar plaat, blijft het diep tot vlak bij de laagwaterlijn. Hierdoor zijn bij lage waterstanden de windgedreven stromingen richting plaat klein. Pas bij hogere waterstanden kunnen deze windgedreven stromingen boven de Galgeplaat toenemen, ze zijn van west naar oost gericht. Bij hogere

waterstanden wordt de bodemhelling flauwer waardoor de golfgedreven stromingen toenemen. Het plaatwaarts sedimenttransport neemt dan toe. Bij extreme weersomstandigheden worden de golven te groot en neemt de erosie sterk toe.



Figuur 6.13 Grafiek van de zuidwestelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



### **De Zuidkop**

De Zuidkop kent een trend richting erosie. Door de hogere plaathoogte aldaar, blijft de bodemhelling gedurende een groot deel van de getijdencyclus steil. Door de grotere invalshoek van het zuidelijke plaatdeel op deze windrichting nemen de plaatgerichte stromingen sterk af.

### **De Oostkant**

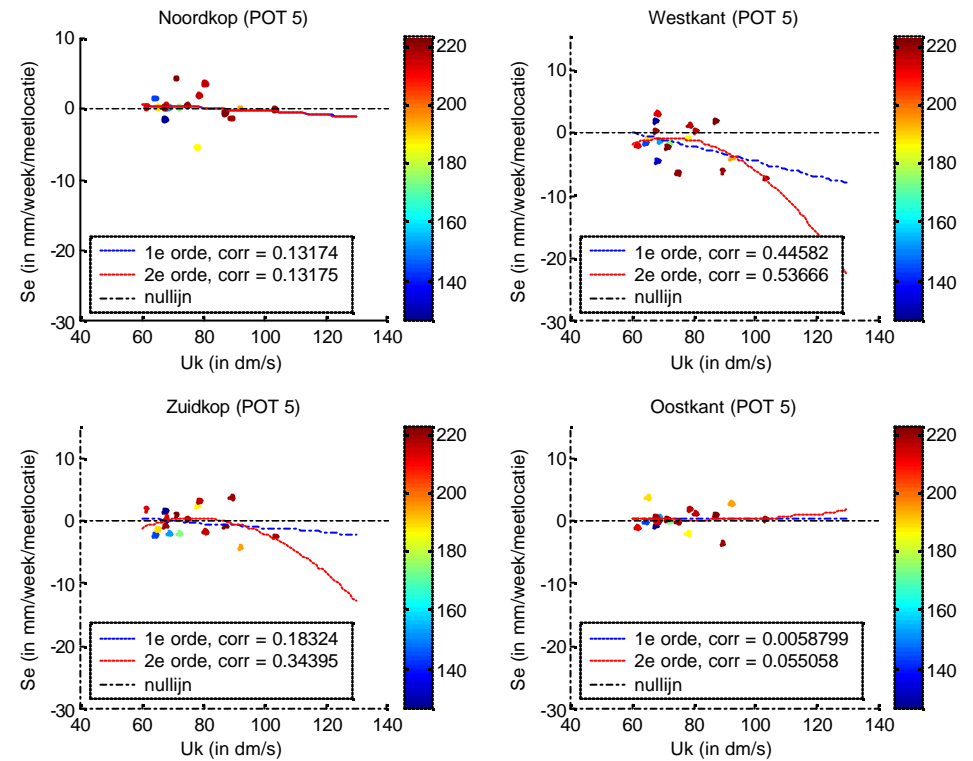
De Oostkant vertoont minder erosie, dit wordt verklaard uit het feit dat deze kant van de plaat in de luwte ligt van de golfaanval. Echter bij hoge waterstanden zullen golven die over de plaat heen gaan ook aanzienlijke bodemschuifspanningen aan de Oostkant veroorzaken. Vandaar dat bij hoge windsnelheden aan de Oostkant grote verschillen te zien zijn in opgetreden sedimentatie/erosie.



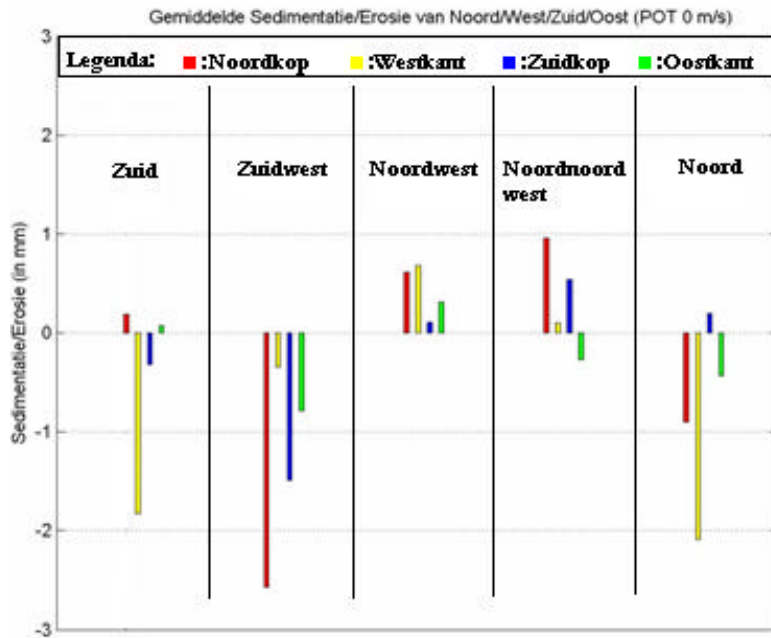


### 6.1.3.4 De zuidelijke windrichtingen

In figuur 6.14 zijn de zuidelijke windrichtingen uitgezet. Opvallend is dat de Westkant van de Galgeplaat als enige plaatdeel duidelijke erosie kent uit deze windhoek. Dit komt doordat dit de zijde is die een langere strijklengte kent bij deze windrichting. Bij afgaand water echter zal de ebstroom versterkt worden door de windgedreven stromingen waardoor de erosie beperkt blijft. De Zuidkop kent een ebschaar. Bij afgaand water zullen de windgedreven stromingen ook hier zorgen voor een versterkte stroming de plaat op. De bodemhelling hier is vele malen steiler dan bij de Noordkop; hierdoor zal er minder sediment worden meegenomen door de plaatgerichte stroming. Hiermee wordt verklaard dat deze stroming uiteindelijk niet zal zorgen voor een trend richting sedimentatie.



Figuur 6.14 Grafiek van de zuidelijke karakteristieke windrichtingen t.o.v. opgetreden sedimentatie/erosie.



Figuur 6.15 Daggemiddelde sedimentatie-/erosiepatroon bij verschillende windrichtingen per locatie.

### 6.1.3.5 Gemiddelde sedimentatie/erosie per windrichting

Figuur 6.15 toont de opgetreden daggemiddelde sedimentatie-/erosiepatronen met een onderverdeling van zowel de windrichting als de plaatlocatie. Hieruit blijkt dat tijdens westzuidwestelijke windrichtingen overal op de plaat een daling plaatsvindt. Dit lijkt te wijzen op een verlies aan zandvolume van de plaat. Uit deze figuur blijkt ook dat de erosie op de Noordkop veruit het grootst is. Bij de zuidelijke en de noordelijke windrichtingen is te zien dat de lijzijde van de plaat sedimentatie kent. Dit is te verklaren uit een abrupte snelheidsvermindering op het moment dat het water van de plaat afstroomt. Deze snelheidsverandering gaat gepaard met een afname van de transportcapaciteit van het water. Hierdoor slaat het sediment neer. Verder valt uit deze figuur op te maken dat de noordwestelijke windrichtingen bijna overal op de plaat lijken te zorgen voor sedimentatie.



### 6.1.3.6 Conclusie

Deze paragraaf zoekt verder naar de correlatie tussen opgetreden weersomstandigheden en opgetreden sedimentatie/erosie. Uit de onderverdeling van zowel de plaat als de windrichtingen is de correlatie beter zichtbaar geworden. Hiermee is de volgende hypothese onderbouwt: Een onderverdeling van de Galgeplaat zorgt voor een duidelijker verband tussen de opgetreden sedimentatie-/erosie en de opgetreden weersomstandigheden.

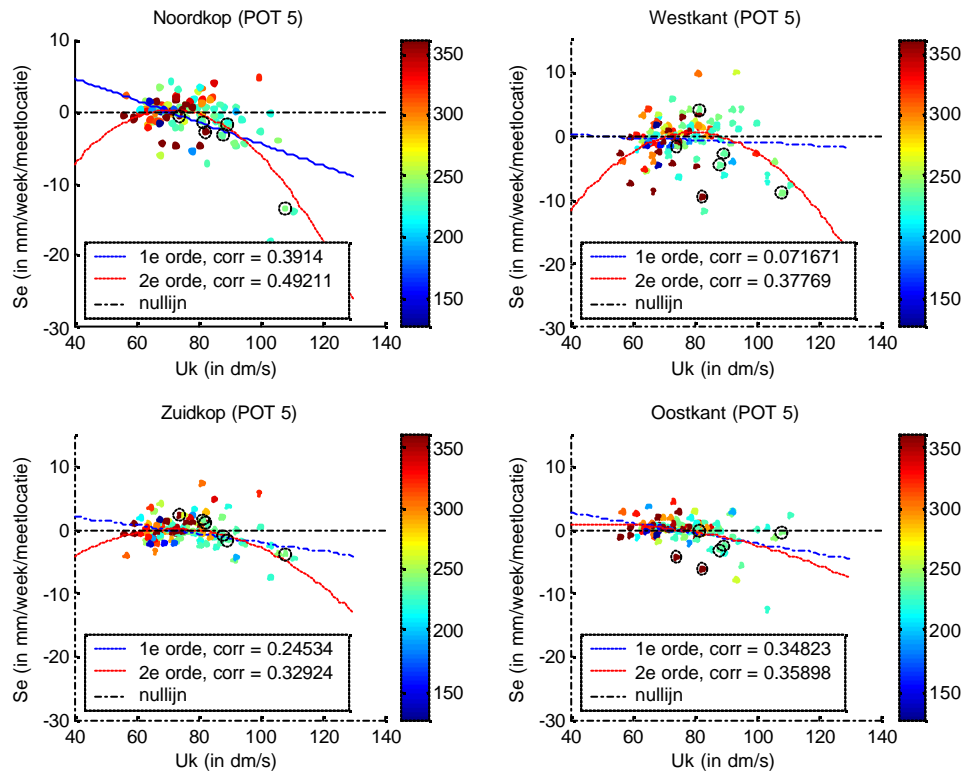
Uit figuur 6.10 blijkt dat de noordelijke windrichting zorgt voor een toenemende erosie bij een toenemende windsnelheid, op de Noordkop en de Zuidkop. Een kleine getijdengeul in de aanloop naar het noorden van de plaat zal veel sediment plaatafwaarts transporteren. Hierdoor is het sedimenttransport over de plaat gering, dit verklaart waarom de Noordkop en de Zuidkop geen sedimentatie kennen. De Westkant en de Oostkant tonen een trend waarbij de sedimentatie overheerst en toeneemt bij een toenemende windsnelheid. Deze beide zijden liggen bij deze windrichting in de luwte, en kennen dus minder golfaanval.

Uit figuur 6.11 en 6.12 blijkt dat de noordwestelijke windrichtingen zorgen op de Noordkop, de Westkant en de Zuidkop voor een toename van sedimentatie bij een toenemende windsnelheid toeneemt echter niet op de Oostkant. De Noordkop kent uit de noordwestelijke windrichting een flauwe bodemhelling naar de plaat toe. Hierdoor zorgen de golf-, de windgedreven stromingen en de getijdenstroming voor een plaatwaarts sedimenttransport.

De zuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de grootste erosie op de gehele Galgeplaat. De Noordkop erodeert het sterkst. Een aantal lokale factoren lijkt dit te verklaren. De strijklengte is bij deze windrichting aan de noordzijde significant groter. Daarnaast is de bodemhelling in het westen van de Noordkop veel steiler. Hierdoor zal de getijdenstroming al het door de brekende golven opgewoelde zand afvoeren. Door de steil overgang van geul naar plaat, blijft het diep tot vlak bij de laagwaterlijn. Hierdoor zijn de windgedreven stromingen richting de plaat klein bij lage waterstanden.

Alleen de Westkant van de Galgeplaat kent een sterke erosie door de zuidelijke windrichting. Dit komt doordat deze zijde een langere strijklengte kent bij deze windrichting. De Zuidkop kent een ebschaar. Bij afgaand water zullen de windgedreven stromingen hier zorgen voor een versterkte stroming de plaat op. De bodemhelling hier is veel steiler dan bij de Noordkop, hierdoor zal er minder sediment worden meegenomen door de plaatgerichte stroming. Hiermee wordt verklaard dat de zuidelijke windrichtingen niet resulteren in een trend richting sedimentatie, maar juist licht richting erosie.

Bij het bepalen van het gemiddelde sedimentatie-/erosiepatroon dat optreedt bij de windrichtingen, komt naar voren dat alleen bij de noordwestelijke windrichtingen nog sedimentatie optreedt. Tijdens zuidwestelijke windrichting vindt overal op de plaat een daling plaats. Dit lijkt te wijzen op een verlies aan zandvolume van de plaat. Daarnaast kent de Noordkop veruit de grootste erosie.



Figuur 6.16 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid op de verschillende plaatdelen, ook de sluitingen zijn aangegeven d.m.v. een omcirkeling.

### 6.1.4 De vier plaatdelen met alle windrichtingen en de sluitingen

Deze paragraaf onderzoekt of er een onderbouwing te vinden is op lokaal niveau, voor de hypothese: "De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat." Figuur 6.16 toont de verschillende sedimentatie-/erosiepatronen van de vier plaatdelen. Met zwart omcirkeld zijn de perioden waarin de Oosterscheldekering een keer gesloten was. Bij de Noordkop en bij de Zuidkop is in dit figuur te zien dat de erosie tijdens een sluiting nauwelijks afwijkt van andere perioden. Bij de Westkop lijkt er zelfs sprake van een gunstig effect door de sluiting tijdens lagere karakteristieke windsnelheden. Bij de Westkant en de Oostkant van de Galgeplaat lijkt de sluiting van de kering een negatief effect te hebben.

Sluitingen bij westelijke en noordelijke winden houden de windopzet buiten het bekken. De golfaanval bij lagere waterstanden verheft de erosie aan de westkant. Het zorgt voor een sterker direct zandvolume verlies. Daar de Westkant sterke erosie kent bij de westelijke windhoek is daar het verschil ook het duidelijkst zichtbaar. Het lijkt er echter wel op dat de erosie tijdens de sluiting groter is dan wat de trend uit de dataset voorspelt. De erosie van de westzijde is bij een sluiting heviger dan normaal bij vergelijkbare karakteristieke windsnelheid. De Oostkant van de Galgeplaat heeft bij noordelijke windrichtingen weinig luwte voor de golfaanval. De erosie van de oostzijde is bij een sluiting heviger dan normaal bij vergelijkbare karakteristieke windsnelheid.



De kleine verschillen maken geen goede onderbouwing van de hypothese mogelijk. Wel lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat sluiting van de kering niet leidt tot minder erosie.

### 6.1.5 Slotconclusie

Er is geen duidelijk verband aanwezig tussen de karakteristieke getijdenslag en de opgetreden sedimentatie/erosie. Voor de sluiting van de kering is er een grotere sedimentatie zichtbaar aan de Noord- en Zuidkop. Er wordt wel meer inzicht in het systeem verkregen. Voor het doel van het onderzoek lijken de waterstandsmetingen niet bruikbaar.

De plaatverdeling zorgt voor een beter beeld waar welke windrichting de plaat het sterkst aanvalt.

De noordelijke windrichting zorgt overal voor erosie behalve aan de Westkant. De noordoostelijke kant van de Galgeplaat kent een flauw profiel. Hier kan dan ook een sedimenttransport richting plaat ontstaan. Door de kleine getijdengeul in de aanloop naar de plaat zal echter veel sediment richting hoofdgeul worden getransporteerd.

De karakteristieke noordwestelijke windrichtingen zorgen overal voor een toename van sedimentatie als de karakteristieke windsnelheid toeneemt, behalve bij de Oostkant. De Noordkop kent een flauwe bodemhelling wat leidt tot een brede brandingszone. De golf- en windgedreven stromingen en de getijdenstroming zorgen voor een plaatwaarts sedimenttransport.

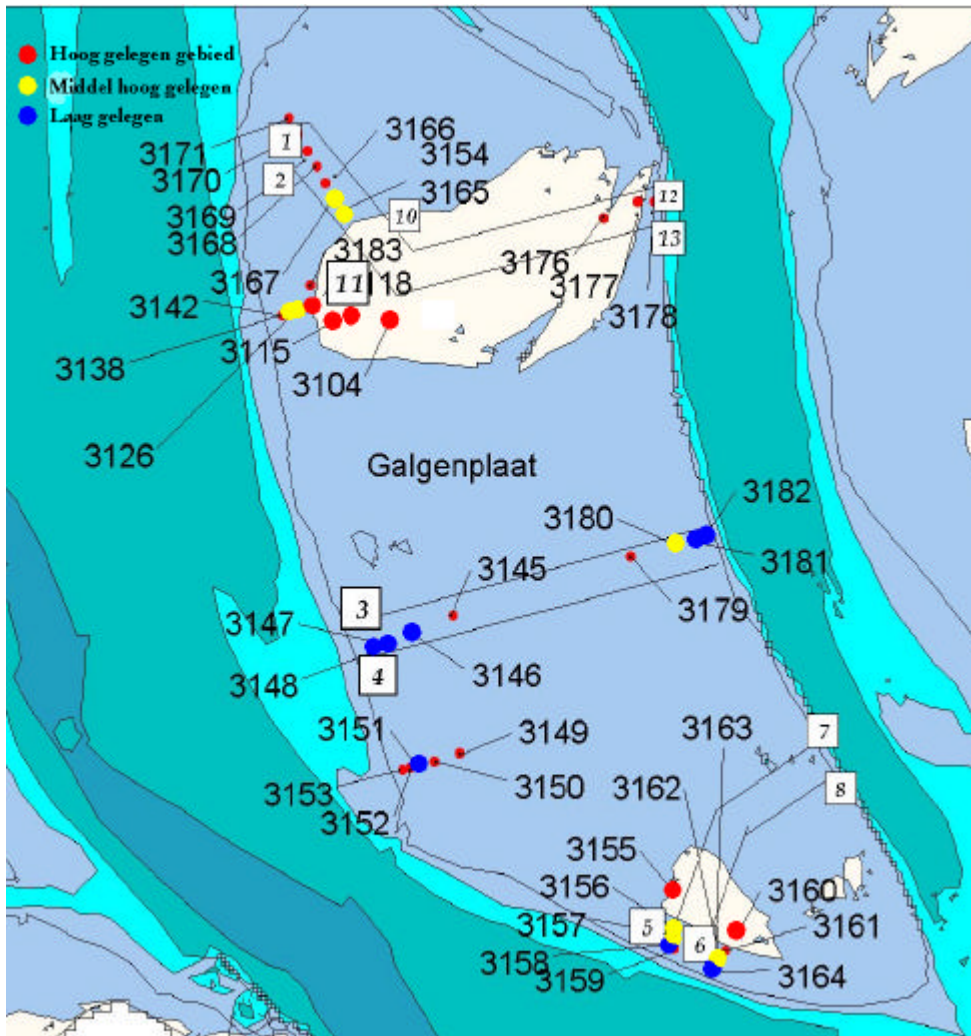
De westzuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de grootste erosie op de gehele Galgeplaat. De Noordkop erodeert het sterkst door de

grotere strijklengte en de steile bodemhelling in het westen van de Noordkop.

Alleen de Westkant kent een sterke erosie door de langere strijklengte van de zuidelijke windrichting. Door de ebschaar aan de Zuidkop zal bij afgaand water, de windgedreven stroming hier zorgen voor een versterkt plaatwaarts sedimenttransport. De steile helling beperkt dit echter.

Bij het bepalen van het gemiddelde sedimentatie-/erosiepatroon, blijkt dat alleen bij noordwestelijke windrichtingen nog sedimentatie optreedt. Tijdens zuidwestelijke windrichtingen vindt overal plaatdaling plaats. Dit lijkt te wijzen op direct verlies aan zandvolume.

Er is geen onderbouwing gevonden voor de hypothese: "De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat". Wel lijkt de Westkant en de Oostkant bloot te worden gesteld aan extra erosie, echter voor een onderbouwing moet nog verder onderzoek worden verricht naar de directe gevolgen van een sluiting van de kering.



Figuur 6.17 De verdeling van de Galgeplaat in drie hoogtegebieden met hun meetlocaties.

## 6.2 Een hoogteverdeling van de Galgeplaat

In deze paragraaf wordt gepoogd om een onderbouwing te vinden voor de hypothese: "Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes meer inzicht kan verschaffen in de verticale erosie."

Dit paragraaf maakt een onderverdeling in plaathogten. Op basis hiervan wordt onderzocht welke delen van de plaat het ergst onderhevig zijn aan erosie. Het Geomor project heeft niet gekeken naar de verandering van de plaathoogte erosie van de Galgeplaat. Om een beter inzicht te krijgen in de verandering van de droogvalduur van de Galgeplaat is dit echter erg belangrijk. Droog valduur is een belangrijke bepalende factor voor het voorkomen van soorten vogels en bodemdieren. Deze onderverdeling probeert meer zicht te krijgen op welke plaathoogte de Galgeplaat het meest onderhevig is aan golfaanval. Figuur 6.17 geeft de verdeling van de meetlocaties van de homogene dataset. De meetlocaties zijn uniform verspreid over de plaat om mogelijke schijnrelaties te voorkomen.



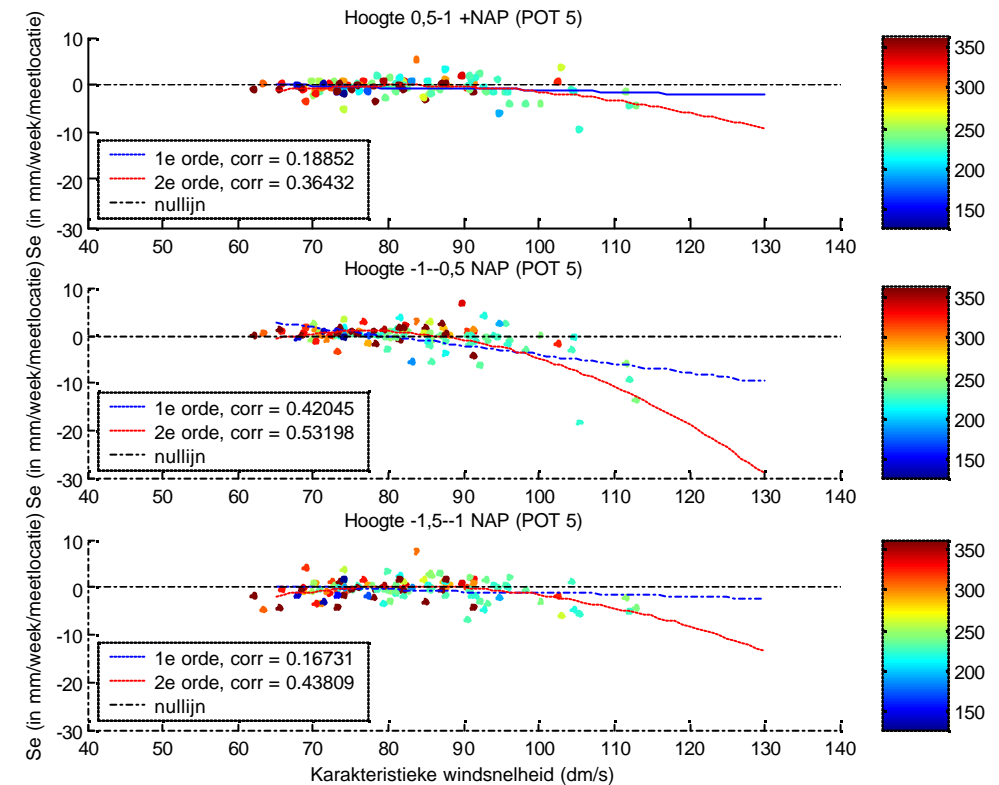
## 6.2.1 Verdeling in drie plaathoogtes

Deze paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: "Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathoogtes meer inzicht kan verschaffen in de verticale erosie." Figuur 6.18 geeft de drie hoogtes, ze worden in deze paragraaf als volgt benoemd:

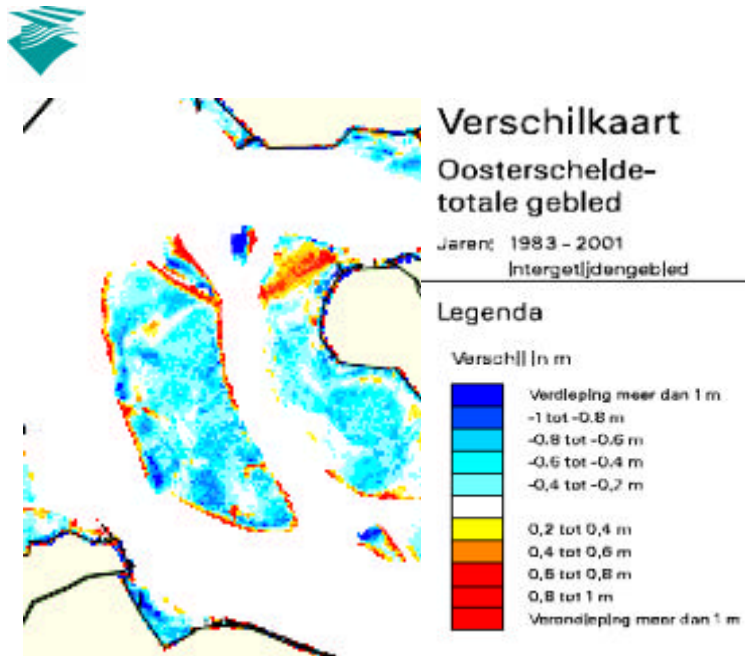
1. De hogere plaatdelen, met een hoogte variërend tussen de + 0.5 m N.A.P en +1 m N.A.P.
2. De middelhoge plaatdelen, met een hoogte variërend tussen de + -0.5 m N.A.P en -1 m N.A.P.
3. De lage plaatdelen, met een hoogte variërend tussen de -1.0 m N.A.P en -1.5 m N.A.P.

Figuur 7.2 laat zien dat de middelhoge plaatdelen van de Galgeplaat de grootste plaatdaling kennen. Per getijdencyclus hebben de middelhoge plaatdelen een langere overspoelingstijd dan de hoge plaatdelen. Hierdoor worden ze langer blootgesteld aan bodemschuifspanningen veroorzaakt door de golven.

Hoe groter de waterdiepte, hoe kleiner de bodemschuifspanning zal zijn. Een grotere diepte maakt echter grotere golven mogelijk Dit zorgt ervoor dat er grotere bodemschuifspanningen mogelijk zijn. Een grotere waterdiepte gaat vaak gepaard met een toename van de getijdenstroming. Hoe groter de stroomsnelheid, hoe groter de sedimenttransportcapaciteit. De hogere plaatdelen hebben gemiddeld gezien de kleinste waterdiepte. Dit zorgt ervoor dat hier de kleinste stroomsnelheden zijn, dus het minste sedimenttransport.



Figuur 6.18 Grafiek van de verschillende hoogtegebieden en hun sedimentatie-/erosiepatroon (Periode 1987-1993).



Figuur 6.19 Hoogteverandering die is opgetreden op de schorren, slikken en platen in de periode 1983-2001 (Zandhonger Oosterschelde 2005).

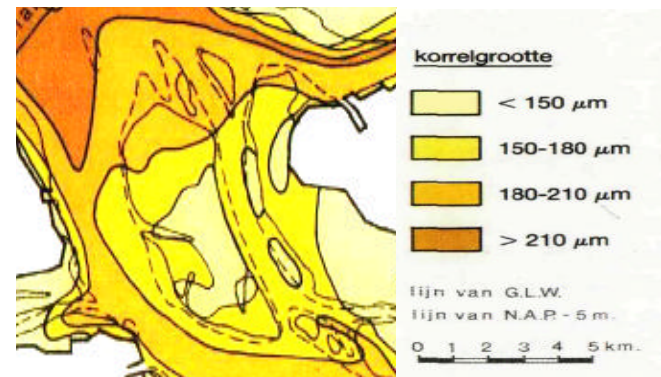
Bij de hoogste plaatdelen bevinden zich de grootste snelheidsgradiënten. Bij het hoogste punt aangekomen kan het water niet verder stromen door een te laag waterniveau, of het stroomt er overheen. In beide gevallen treedt er een grote snelheidsgradiënt op. In het eerste geval komt het water tot stilstand. In het tweede geval zal de stroomsnelheid sterk afnemen door de toenemende waterdiepte. Grote gradiënten in stroomsnelheid leiden tot grote gradiënten in transportcapaciteit. Hierdoor vindt er op de hogere plaatdelen meer sedimentatie plaats. Dit geeft de verklaring waarom de hogere plaatdelen een kleinere plaatdaling laten zien. Deze grote snelheidsgradiënten zitten ook aan de steile randen van de Galgeplaat. Door de abrupte toename van de diepte heeft het water dat van de plaat afstroomt hier een grote snelheidsafname. Hier zal dan ook veel sediment dat is opgewoeld van de plaat neerslaan.

Figuur 6.19 laat een hoogteverschilkaart zien van de periode tussen 1983 en 2001. Deze kaart is gemaakt aan de hand van vaklodingen. Dit is een dieptemeting die vele malen onnauwkeuriger is dan de sedimentatie-/erosiemetingen die bij dit onderzoek zijn gebruikt. Het voordeel hiervan is wel dat ze een compleet beeld geven van de opgetreden sedimentatie/erosie op de Galgeplaat. Het beeld dat deze figuur laat zien is precies het beeld dat er uit de data-analyse naar voren kwam. Aan de rand van de Galgeplaat treedt bijna overal sedimentatie op. Op de middelhoge plaatdelen foerageren de meeste vogels. Een plaatdaling op deze hoogte heeft dus veel grotere gevolgen voor de vogelpopulatie.





Figuur 6.20 toont de korrelgrootte verdeling van het zand zoals die op de Galgeplaat is. Figuur 7.3 laat zien dat ook aan de oostelijke zijde significante erosie heeft opgetreden. Dit is vreemd omdat de oostelijke zijde vaak in de luwte ligt wat betreft de golfaanval. Uit het figuur komt naar voren dat daar het fijnste zand zich bevindt. Dit zand zal makkelijker eroderen, hier mee is een verklaring gevonden voor de sterke erosie aan de oostelijke kant ten opzichte van de noordelijke plaatdelen.

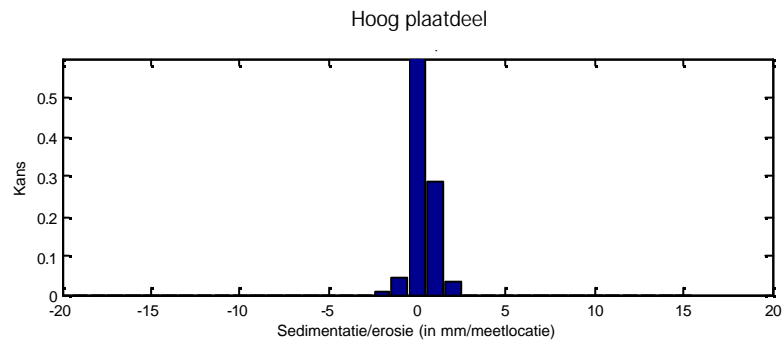


Figuur 6.20 Korrelgrootte verdeling van het zand op de Galgeplaat (Geomor, 1987).

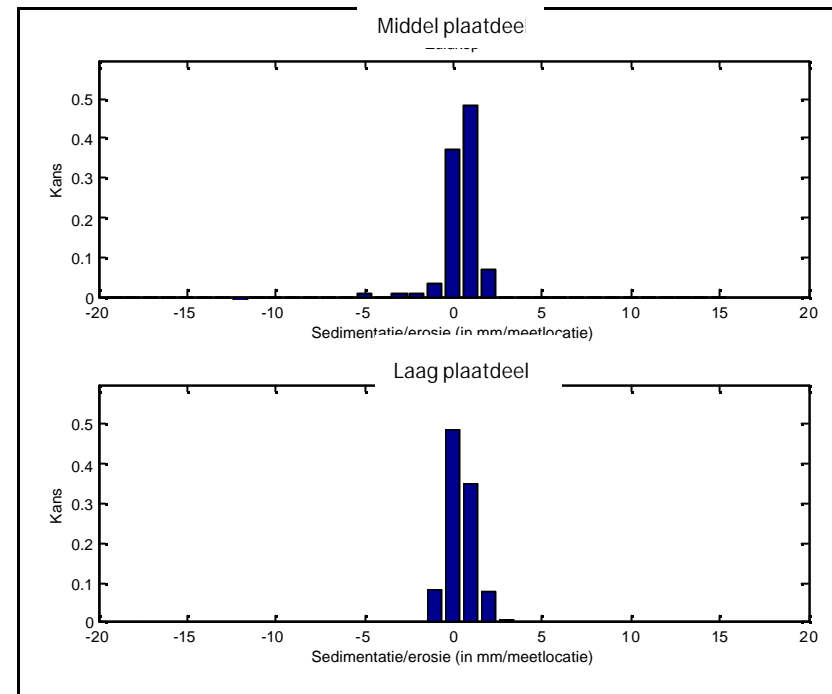


### 6.2.1.1 De sedimentatie-/erosiehistogrammen per plaat hoogte

Deze paragraaf geeft ter verduidelijking de verschillende histogrammen weer. Er valt op dat er weinig verschil zit tussen de histogrammen (zie figuur 6.21 en figuur 6.22). De sterkste erosie vindt plaats op de middelhoge plaatdelen. De meest extreme weersomstandigheden zijn over het algemeen de stormen met de langste duur. Deze langere duur en de getijdenbeweging zorgen ervoor dat de middelhoge plaatdelen de grootste golfaanval kennen.



Figuur 6.21 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de hooggelegen plaatdelen.

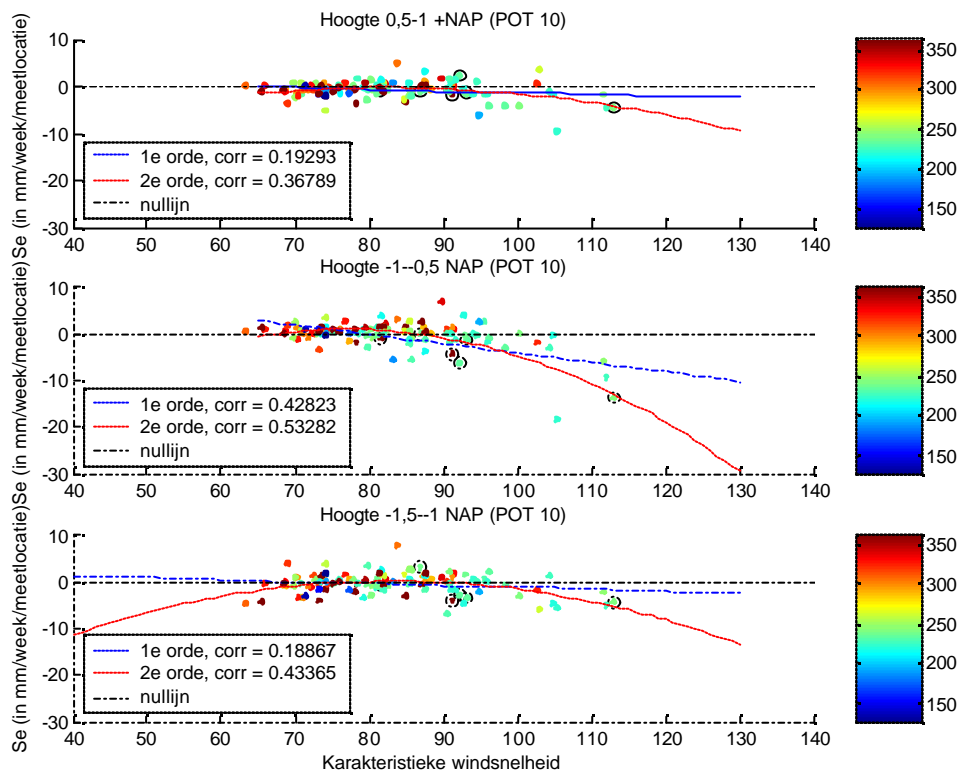


Figuur 6.22 Het sedimentatie-/erosiehistogram van de middenhoog en laaggelegen plaatdelen.



## 6.2.2 Conclusie

Deze paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: 'Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes meer inzicht kan verschaffen in de verticale erosie.' Uit de verschillende grafieken blijkt dat inderdaad de middelhoge plaatdelen, onderhevig zijn aan de sterkste erosie. Met als belangrijkste reden dat de deze plaatdelen gedurende de langste tijd worden blootgesteld aan bodemschuifspanningen. Door de lagere ligging dan met de hoge plaatdelen zijn de stromingen door het getij sterker. Hierdoor kan het opgewoelde sediment ook daadwerkelijk worden afgevoerd.



Figuur 6.23 Grafiek van sedimentatie/erosie t.o.v. de karakteristieke windsnelheid op de verschillende plaathogten, ook de sluitingen zijn aangegeven.

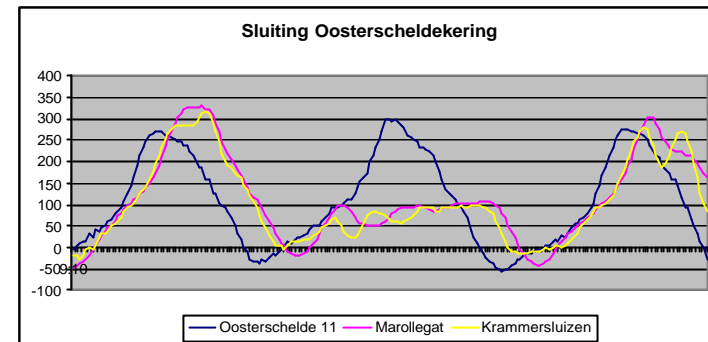
### 6.2.3 De drie verschillende plaathogten bij sluitingen

Figuur 6.23 toont het sedimentatie-/erosiepatroon van de plaathogten en de sluitingsperiodes. Het effect van de sluiting van de kering lijkt bij de hogere plaatdelen niet groot te zijn. Voor de middelhoge plaatdelen lijkt de sluiting de erosie te versterken.

Tijdens een sluiting van de kering wordt de waterstand lager gehouden dan hij anders geweest zou zijn. Dit betekent dat de hogere plaatdelen relatief beschermd liggen door de lage waterstand. Uit figuur 6.23 blijkt ook dat de sluiting van de kering meestal zorgt voor sedimentatie-/erosie boven de aangegeven trendlijnen. De sluiting heeft een negatief effect op de middelhoge plaatdelen en een positief effect op de hoge delen. Het streefpeil tijdens een sluiting van de Oosterscheldekering ligt tussen de 1,0-2,0 +m N.A.P. Figuur 6.24 toont duidelijk de geweerde hoogwaterstand door de kering. Deze fixatie van het waterniveau zorgt er voor dat de middelhoge plaatdelen gedurende een lange tijd worden blootgesteld aan aanzienlijke bodemschuifspanningen en sterke stromingen. Deze stromingen zullen voornamelijk bestaan uit windgedreven stromingen, omdat het hoogwater wordt tegengehouden door de kering waardoor de getijdenstromingen sterk afnemen. En er zal bij een sluiting van de kering altijd sprake zijn van extreme weersomstandigheden. Dit zorgt voor sterke windgedreven stromingen, zeker omdat de waterdiepte in het bekken lagere wordt gehouden dan normaal.



De noordwestelijke windrichting zorgt voor sedimentatie op de Noordkop, hier ligt het grootste oppervlak aan hoge plaatdelen. Door de lagere waterstand tijdens een sluiting worden de windgedreven stromingen sterker. Eerder in dit onderzoek bleek dat de windgedreven stromingen een belangrijk aandeel hebben in het sedimenttransport van brandings-zone naar plaat. Dit kan het positieve effect van de sluiting van de kering verklaren.



Figuur 6.24 De waterstanden in en net buiten het Oosterscheldebekken tijdens een sluiting van de kering.



#### 6.2.4 conclusie

De eerste paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: 'Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes kan meer inzicht verschaffen in de verticale erosie.' Uit de data-analyse blijkt dat de middelhoge plaatdelen onderhevig zijn aan de sterkste erosie. Mede door het grote oppervlak heeft de achteruitgang van de middelhoge plaatdelen ingrijpende gevolgen voor de droog valduur.

De tweede paragraaf laat zien dat een sluiting een negatief effect heeft op de middelhoge plaatdelen en een positief effect op de hoge en de lage plaatdelen. Een sluiting vindt plaats tijdens extreme weersomstandigheden uit de noordwestelijke tot zuidwestelijke windhoek. Het streefpeil tijdens een sluiting ligt tussen de 1,0-2,0 +m N.A.P. Deze fixatie van het waterniveau zorgt voor een langdurige blootstelling van de middelhoge plaatdelen aan aanzienlijke bodemschuifspanningen en sterke vooral windgedreven stromingen.

### 6.3 Discussie

In dit hoofdstuk zijn twee onderverdelingen bekeken. Bij beide worden de zelfde meetlocaties gebruikt, alleen de verdeling ervan is anders. De twee onderverdelingen overlappen elkaar. Een voorbeeld: De hoge plaatdelen bevinden zich in het noorden en zuiden van de Galgeplaat. Dit betekent dus dat het noordelijke en het zuidelijke plaatdeel relatief meer hoge plaatdelen bevatten dan de westelijke en de oostelijke plaatdelen. Hierdoor zijn dezelfde effecten in de verschillende onderverdelingen vertegenwoordigd. Het verband tussen de opgetreden sedimentatie-/erosie en de opgetreden weersomstandigheden komt het sterkst naar voren bij de onderverdeling in plaatdelen, doordat lokaal gezien de geometrie van de Galgeplaat sterk verandert.

Dit heeft een bepalende invloed op de golfopbouw en –aanval die van grote invloed zijn op het sedimentatie-/erosiepatroon.

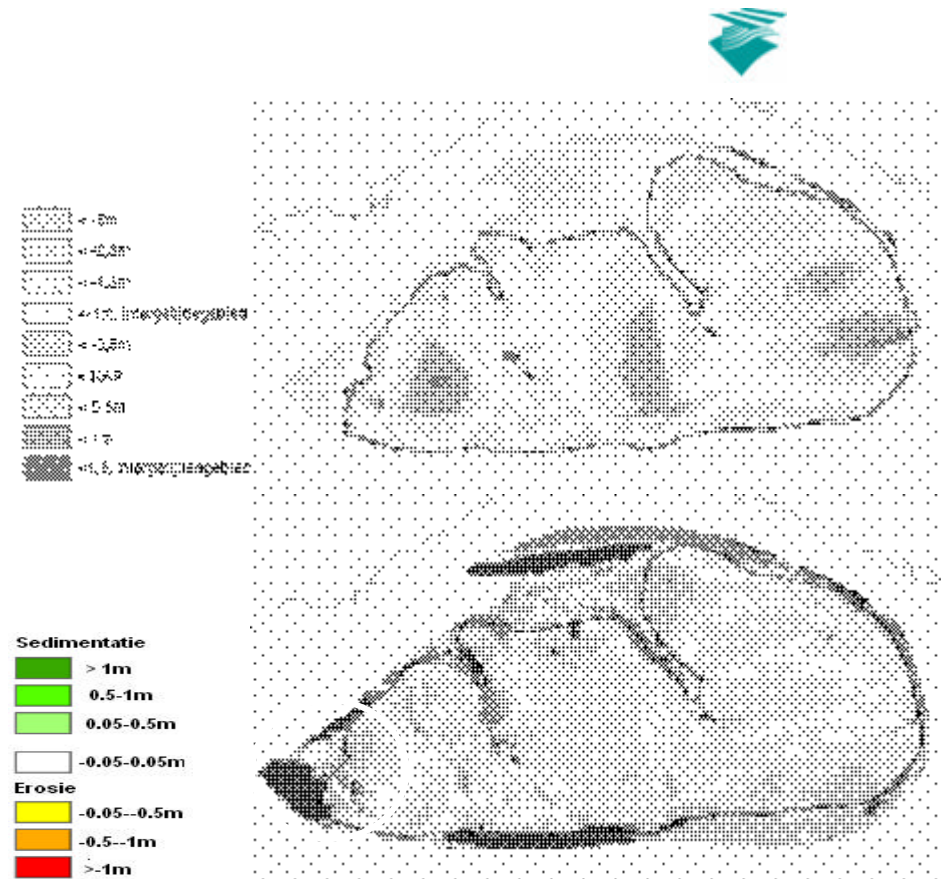
De hoogteverdeling geeft meer inzicht in de globale trends van de achteruitgang van de plaat en in welke plaathogte wordt blootgesteld aan de sterkste erosie. Dit vergroot het inzicht in het systeem en maakt zo een voorspelling naar de achteruitgang van de droogvalduur nauwkeuriger.

De onderverdeling van de plaat op locatie verschaft het meeste systeeminzicht. Hieruit kan duidelijk naar voren komen welke windrichting zorgt voor de sterkste erosie en bij welke windrichting nog plaatopbouw kan plaats vinden. Dit inzicht is belangrijk bij het ontwerpen van een plaatsuppletie.

Om te bepalen of deze conclusies ook gelden voor andere platen in de Oosterschelde, wordt er gekeken naar het opgetreden sedimentatie-/erosiepatroon van een andere plaat. Figuur 6.25 toont twee afbeeldingen van de Roggeplaat. Deze plaat ligt veel dicht bij de stormvloedkering. De bovenste figuur geeft de hoogtekaart weer van de plaat, de onderste figuur geeft de sedimentatie-/erosie weer die is opgetreden in de periode 1983-2001. In het omcirkelde gebied is sprake geweest van een plaatval vandaar dat hier lokaal zeer sterke erosie is opgetreden.

Als gekeken wordt naar de plaatsen waar de ergste erosie is opgetreden, lijkt de lokale geometrie een belangrijke rol te spelen. In het zuiden en in het noorden van de plaat is aan de rand een sterke erosie waar te nemen. Twee belangrijke oorzaken die naar voren komen uit de onderverdeling van de Galgeplaat in delen, lijken hier ook de erosie te bepalen. Bij de zuidkant en de noordkant van de Roggeplaat zijn er steile overgangen van geul naar plaat en de getijdenstroming staat haaks op de golfrichting die de sterkste golfaanval veroorzaakt. De onderverdeling op locatie verschaft hier ook een beter inzicht in waar een mogelijke plaatsuppletie moet worden gerealiseerd.

Als gekeken wordt naar de plaatsen waar sedimentatie optreedt is te zien dat de hogere plaatdelen worden gekenmerkt door sedimentatie. Doordat de hogere plaat delen verspreid liggen over de plaat, komt dit het best naar voren uit een onderverdeling in plaathoogte.



Figuur 6.25 Afbeelding van de Roggeplaat, boven de hoogte kaart van de plaat en onder het sedimentatie/erosie kaart in de periode 1983-2001.



## 6.4 Slotconclusie

De plaatverdeling zorgt voor een beter beeld waar welke windrichting de plaat het sterkst aanvalt.

De noordelijke windrichting zorgt overal voor erosie behalve aan de Westkant. De noordoostelijke kant van de Galgeplaat kent een flauw profiel. Hier kan dan ook een sedimenttransport richting de plaat ontstaan. Door de kleine getijdengeul in de aanloop naar de plaat zal echter veel sediment plaatafwaarts worden getransporteerd.

De karakteristieke noordwestelijke windrichtingen zorgen overal voor een toename van sedimentatie als de karakteristieke windsnelheid toeneemt, behalve bij de Oostkant. De Noordkop kent een flauwe bodemhelling wat leidt tot een brede brandingszone. De golf- en windgedreven stromingen en de getijdenstroming zorgen voor een plaatwaarts sedimenttransport.

De westzuidwestelijke windrichtingen veroorzaken de grootste erosie op de gehele Galgeplaat. De Noordkop erodeert het sterkst door de grotere strijklengte en de steile bodemhelling in het westen van de Noordkop.

Alleen de Westkant kent een sterke erosie door de langere strijklengte van de zuidelijke windrichting. Door de ebschaar aan de Zuidkop zal bij afgaand water, de windgedreven stroming hier zorgen voor een versterkt plaatwaarts sedimenttransport. De steile helling beperkt dit echter.

Bij het bepalen van het gemiddelde sedimentatie-/erosiepatroon, blijkt dat alleen bij noordwestelijke windrichtingen nog sedimentatie optreedt. Tijdens zuidwestelijke windrichtingen vindt overal plaatdaling plaats. Dit lijkt te wijzen op direct verlies aan zandvolume.

Er is geen onderbouwing gevonden voor de hypothese: "De sluiting van de Oosterscheldekering zorgt voor extra erosie op de Galgeplaat". Wel lijkt de Westkant en de Oostkant bloot te worden gesteld aan extra erosie, echter voor een goede onderbouwing moet extra onderzoek worden uitgevoerd.

De tweede paragraaf zoekt naar een onderbouwing voor de hypothese: 'Een onderverdeling van de Galgeplaat in drie plaathogtes meer inzicht kan verschaffen in de verticale erosie.' Uit de data-analyse blijkt dat de middelhoge plaatdelen onderhevig zijn aan de sterkste erosie. Mede door het grote oppervlak heeft de achteruitgang van de middelhoge plaatdelen ingrijpende gevolgen voor de droog valduur.

De tweede paragraaf laat zien dat ook een sluiting heeft een negatief effect op de middelhoge plaatdelen en een positief effect op de hoge. Een sluiting vindt plaats tijdens extreme weersomstandigheden uit de noordwestelijke tot zuidwestelijke windhoek. Het streefpeil tijdens een sluiting ligt tussen de 1,0-2,0 +m N.A.P. Deze fixatie van het waterniveau zorgt voor een langdurige blootstelling van de middelhoge plaatdelen aan aanzienlijke bodemschuifspanningen en sterke vooral windgedreven stromingen.





Uit de derde paragraaf komt naar voren dat de hoogte verdeling het inzicht in het de globale trends van de verandering van de droogval duur. De onderverdeling van de plaat op locatie verschaft het meeste systeem inzicht. Hiermee komt duidelijk naar voren welke windrichting zorgt voor de sterkste erosie en de windrichting waarbij nog plaatopbouw kan plaats vinden. Dit inzicht kan belangrijk zijn bij het ontwerpen van een plaatsuppletie.





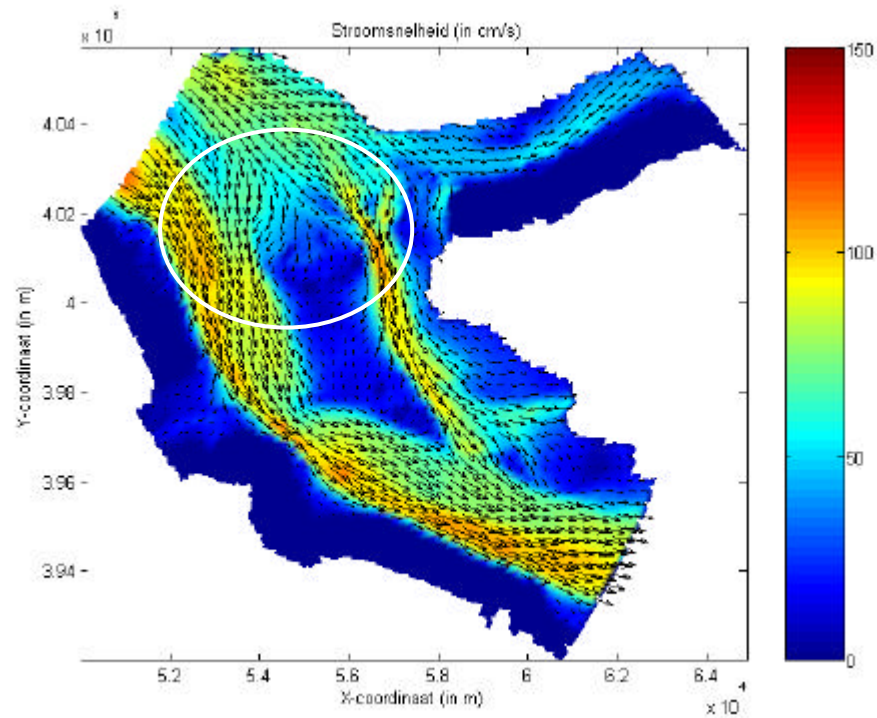
## 7 Computersimulaties

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van computersimulaties de gevonden onderbouwingen uit de data-analyse nader bekeken. Met het WAQUA-model worden stroomvelden bekeken die ontstaan bij de verschillende windrichtingen. Zo wordt gekeken of een noordwestelijke windrichting inderdaad zorgt voor een versterkt plaatgericht sedimenttransport. Daarnaast wordt ook gekeken of een zuidwestelijke windrichting pas bovenop de plaat de stroomrichting van het water kan veranderen. Met het SWAN-model worden de golfvelden bekeken van de windrichtingen met verschillende windsnelheden. Hiermee wordt gekeken naar de invloeden van de strijklengte, de waterdiepte en de bodemhelling ter plaats van de aanloop van de plaat. Hierna wordt met beide modellen bekeken wat de invloed is van de plaatdaling op het sedimentatie-/erosiepatroon. Met computersimulaties kan beter in de toekomst worden gekeken, hiermee wordt hopelijk een extra onderbouwing gegeven voor de hypothese: "De achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat vermindert, naarmate de tijd vordert".

### 7.1 De golven en stromingen bij de windrichtingen

#### 7.1.1 Het WAQUA-model

Om de verschillende stromingsvelden met elkaar te kunnen vergelijken is in het model alleen de getijdenbeweging gebruikt van 24 juli 1994. Alleen de windomstandigheden van die dag zijn gewijzigd. Het model is gebaseerd op het SCALOOST-bodemprofiel. Dit profiel heeft 23.000 punten in het weergegeven gebied. Als randvoorwaarde in het model wordt de getijdenbeweging van een paar kilometer buitengaats opgelegd. Hierdoor wordt de windopzet, veroorzaakt op zee, niet meegenomen in deze vergelijking. De windopzet op zee zou zorgen voor een tijdelijke toename van het getijdenprisma, waardoor de getijdenstromingen extra worden versterkt. Ware het niet dat bij extreme waterstandverhogingen de kering natuurlijk wordt gesloten.



*Figuur 7.1 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00 uur tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.*

### 7.1.1.1 Referentie omstandigheden

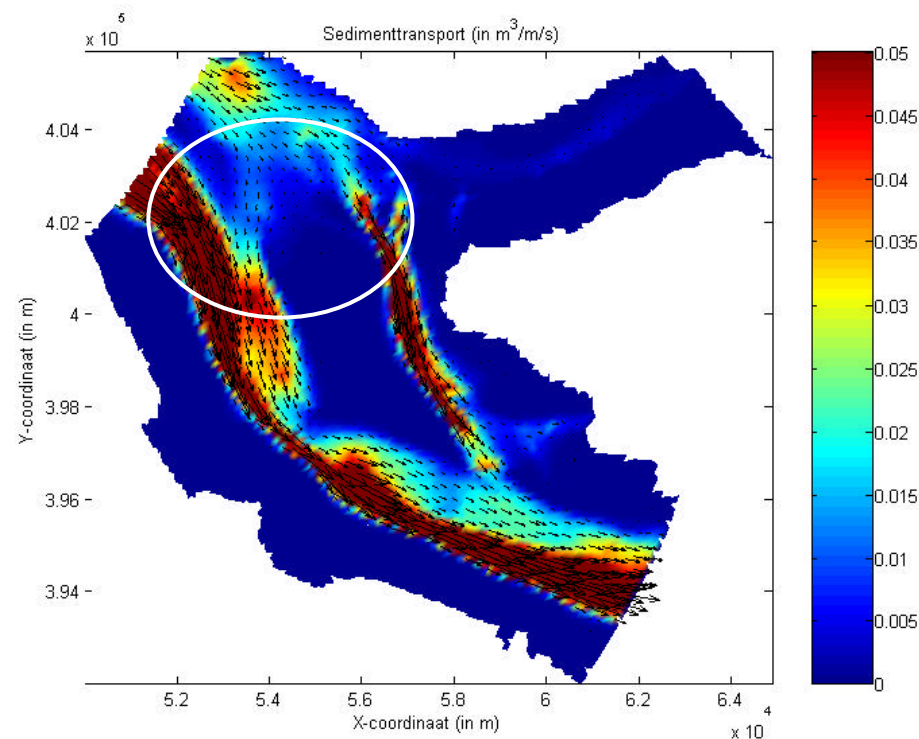
Om een beter beeld te krijgen van de invloed van de windgedreven stromingen op het stromingsveld rond de Galgeplaat, is er gebruik gemaakt van het WAQUA-model. Figuur 7.1 geeft het stromingsveld weer op 24 juli 1994. Op deze dag was er sprake van springtij. De wind had deze dag een gemiddelde windsnelheid van 4 m/s (2 Beaufort) met een noordoostelijke windrichting. Hierdoor was er sprake van een minimale windopzet in het bekken. De stromingen die het model weergeeft, zijn daarom alleen maar getijdenstromingen. De figuur toont de situatie zoals deze was om drie uur 's-middags. De vloedstroming was toen maximaal.



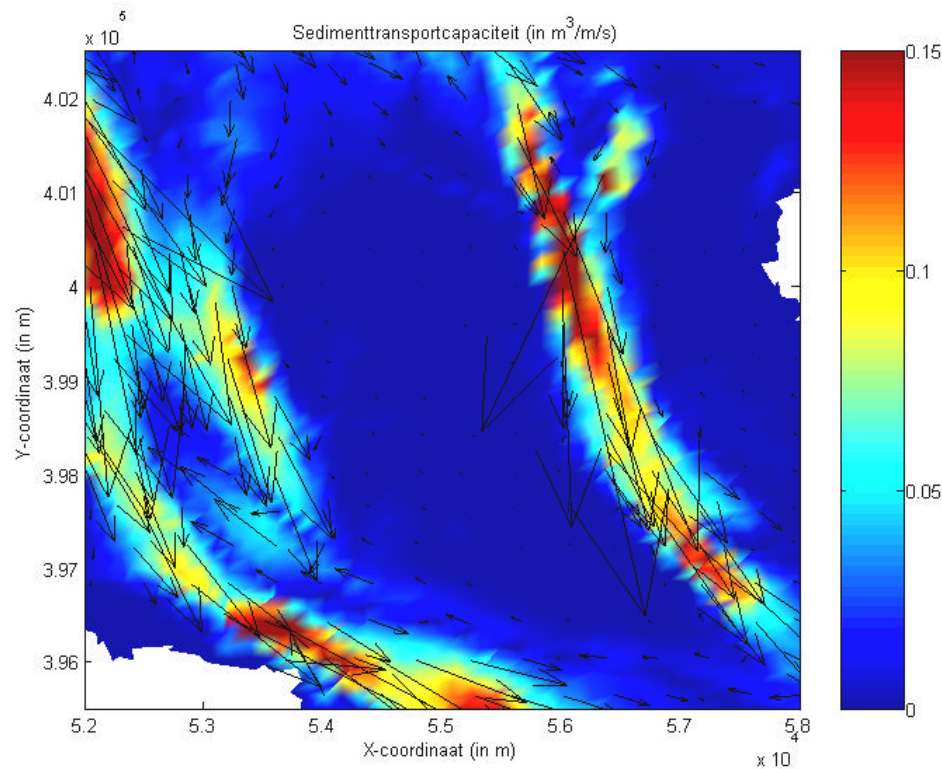
Figuur 7.1 toont het stroomsnelheidsprofiel rondom de Galgeplaat. Links en rechts van de plaat zijn de sterkste vloedstromingen zichtbaar. De geuldominantie van de getijdenstroming valt hier goed te herkennen. Bij de "Oosterschelde" is te zien dat de sterkste stroming in de buitenbocht van de geul optreedt. Een deel van de Galgeplaat ligt in de buitenbocht van het "het Brabantsche vaarwater", hier kent de plaat een zeer steile overgang naar de geul. In het omcirkelde gebied is te zien dat de vloedstroming sterk afzwakt wanneer ze in de buurt komt van de Galgeplaat. Het merendeel van het water buigt net ten noorden van de Galgeplaat af naar de geulen. Via deze geulen stroomt het water verder het bekken in.

De stroomsnelheid van water is zeer bepalend voor de transportcapaciteit van sediment. In de formule van de transportcapaciteit is de stroomsnelheid tot macht vier à vijf vertegenwoordigd. Vandaar dat dit tijdstip nader wordt bekeken, omdat op dit moment van de getijdencyclus de maximale vloedstroom optreedt.

Figuur 7.2 toont het sedimenttransportcapaciteit rondom de Galgeplaat. Dit is bepaald aan de hand van het stroomveld om drie uur 's-middags op 24 juli 1994. De grootste transportcapaciteit is te vinden in de geulen. Boven de gehele Galgeplaat is het sedimenttransport verwaarloosbaar klein. De stroming lijkt niet krachtig genoeg om nog sediment naar de plaat te transporteren. De transportcapaciteit kent een sterke gradiënt bij het afstromen van de plaat. Daar vindt dan ook sedimentatie plaats.



Figuur 7.2 Sedimenttransportcapaciteit rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.



*Figuur 7.3 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 4 m/s, de windrichting noordoostelijk.*

Figuur 7.3 toont het residu van de sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli. Het residu is bepaald aan de hand van 25 moment opnames van de stroomsnelheid en van de waterstand in het betreffende gebied. De stroomsnelheden zijn wederom met het WAQUA-model berekend. Met de stroomsnelheden en de waterstanden zijn de sedimenttransportcapaciteiten van de moment opnames berekend. Deze zijn bij elkaar op geteld en zo is figuur 7.3 ontstaan. Hiermee kan een beeld verkregen waar de vloed of eb dominant is. Uit het figuur wordt zichtbaar dat er slechts zeer beperkt plaatgericht sedimenttransport aanwezig is.

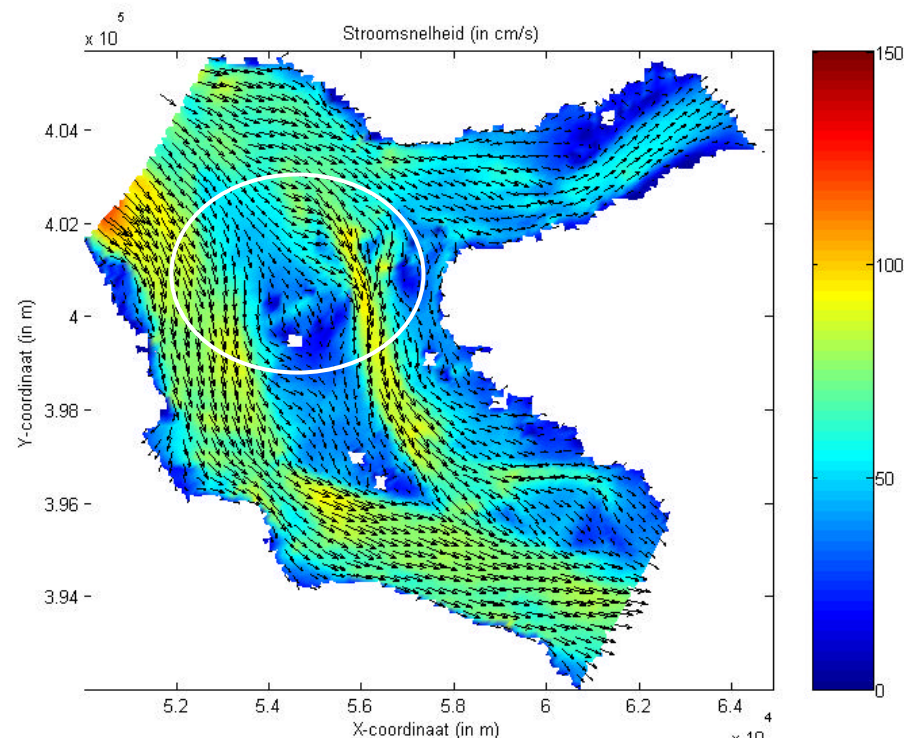


### 7.1.1.2 Invloed van een krachtige noordwestelijke wind

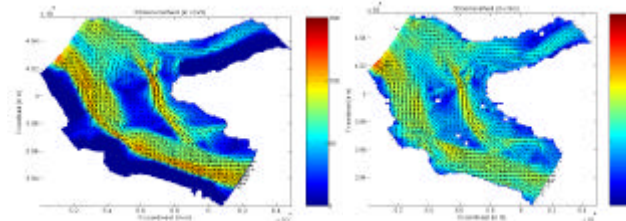
Figuur 7.4 toont het stromingsveld rond de Galgeplaat, tijdens een langdurige krachtige wind uit het noordwesten (7 beaufort, 16m/s). Er is een afname zichtbaar van de maximale stroming in de geulen maar een sterke toename van de stroming boven de platen en slikken. Door de opgewekte windgedreven stroming neemt de geuldominantie van de getijdenstroming af. De vloedstroming versterkt door de windgedreven stroming gaat in het omcirkelde gebied ongestoord over de Galgeplaat heen. Aan de westkant van de Galgeplaat is nu ook een duidelijke plaatwaartse stroom zichtbaar. Deze lokale stromingen kunnen een belangrijke rol spelen in de toevoer van sediment naar de plaat. Onder in het omcirkelde gebied bevindt zich het hoogste plaatdeel. Hier net onder bevindt zich een grote gradiënt in de stroomsnelheid. Deze gradiënt zorgt voor het neerslaan van sediment.

Deze windgedreven stroming tezamen met de door de golven opgewekte stroming, voeren het in de brandingszone opgewoelde zand richting plaat. De invloed van de wind wordt sterker naarmate de waterdiepte afneemt. Uit het dataonderzoek komt naar voren dat er bij deze noordwestelijke windrichting nog plaatopbouw voorkomt. De computersimulaties in het WAQUA-model bevestigen de verklaring voor de sedimentatie bij de noordwestelijke wind.

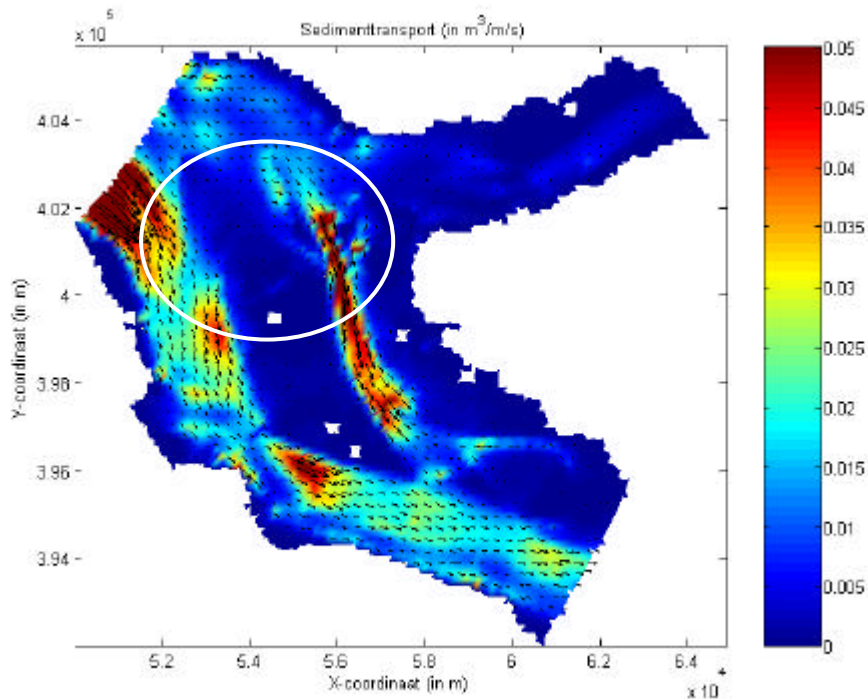
Er is zelfs een duidelijke trend zichtbaar (zie figuur 5.8 en 5.9): Er is een toename van sedimentatie bij een toename van de karakteristieke windsnelheid. De windgedreven stromingen nemen sterk toe naarmate de windsnelheid toeneemt. Het zijn dus de windgedreven stromingen die na de sluiting het sediment naar de Galgeplaat brengen.



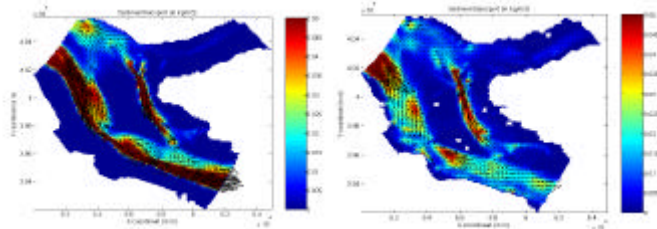
Figuur 7.4 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.



Figuur 7.5 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een noordwestelijke krachtige wind.



Figuur 7.6 Sedimenttransport rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.



Figuur 7.7 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een noordwestelijke krachtige wind.

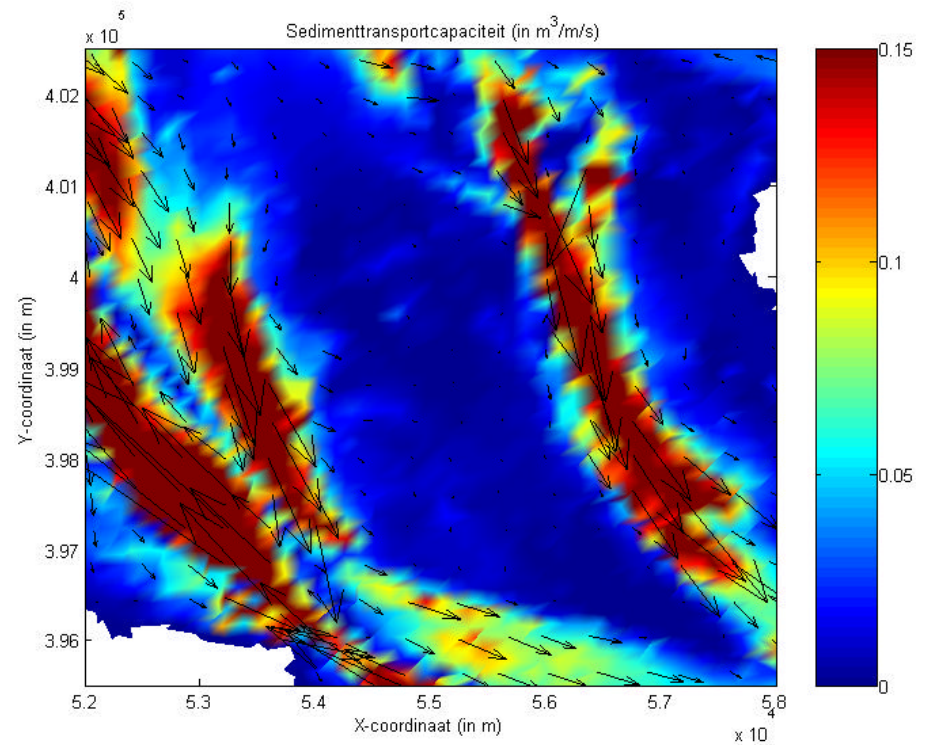
Figuur 7.6 toont het maximale sedimenttransport rond de Galgeplaat tijdens een noordwestelijke windrichting. De geuldominantie van het sedimenttransport is hier duidelijk afgenomen. In het omcirkelde gebied is goed zichtbaar, dat de toegenomen stroomsnelheid boven de Galgeplaat, resulteert in een flinke toename van de transportcapaciteit van sediment boven deze plaat. De toename is het beste zichtbaar aan de randen van de plaat. Aangezien dat ook vlak bij de brandingszone is, kan hier een plaatgericht sedimenttransport plaatsvinden. Zowel in het noorden, in het zuiden als in het westen op de Galgeplaat zijn nu sedimenttransporten mogelijk. Alleen aan de oostkant lijkt er geen grote verandering op te treden.

Uit de data-analyse komt naar voren dat bij de noordnoordwestelijke windrichtingen vooral het noorden, het zuiden en het westen lichte sedimentatie vertonen. Dit blijkt ook uit figuur 7.6, zeker als er gekeken wordt naar de locaties van de hoogtemetingen (zie figuur 6.1). Met behulp van de computersimulaties in het WAQUA-model is er een bevestiging gevonden voor de verklaring van de sedimentatie tijdens noordwestelijke windrichtingen.

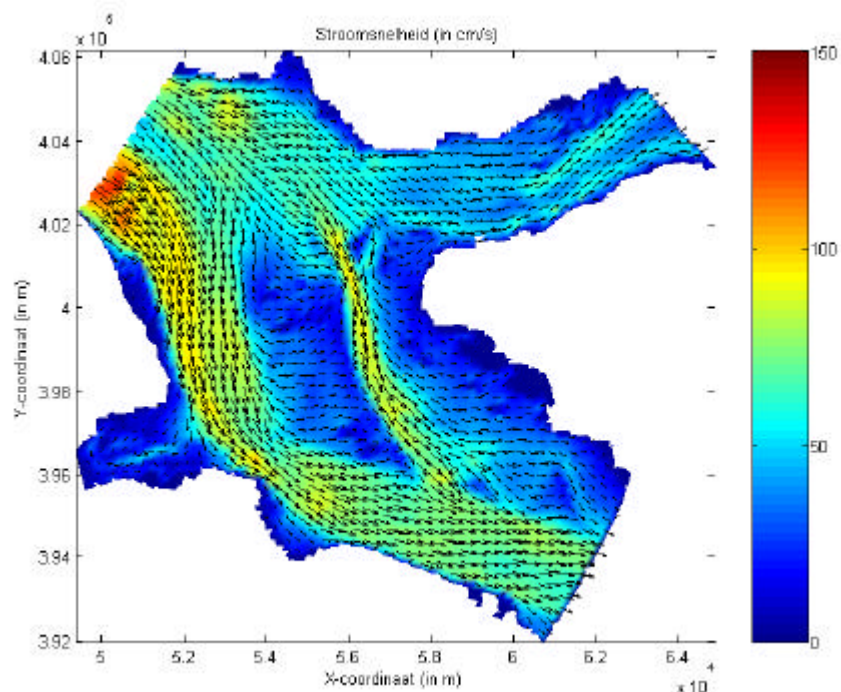




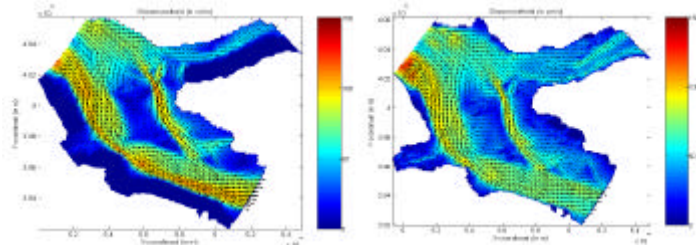
Figuur 7.8 toont het residu van de sedimenttransportcapaciteit over een getijdencyclus tijdens een noordwestelijke wind. De figuur toont een toename van het plaatgerichte sedimenttransport aan de noordwestelijke zijde van de Galgeplaat. Deze toename is met name zichtbaar aan de rand van de plaat dichtbij de brandingszone. Dit verklaart waarom er tijdens een noordwestelijke windrichting nog plaatopbouw zichtbaar is in de data-analyse.



Figuur 7.8 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 16 m/s, de windrichting noordwestelijk.



Figuur 7.9 Stroomsnelheidsprofiel rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting zuidwestelijk.



Figuur 7.10 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een zuidwestelijke krachtige wind.

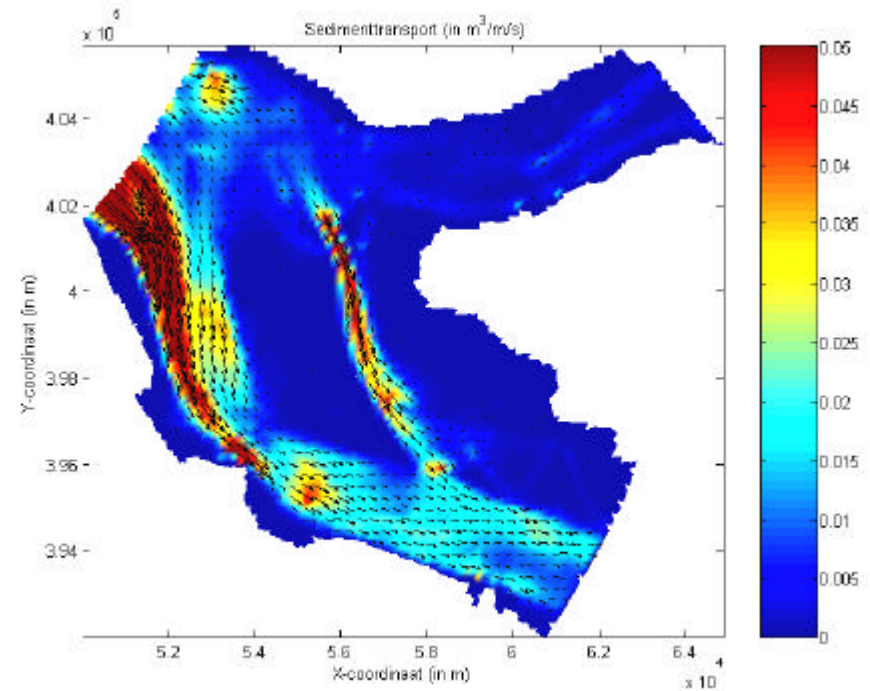
### 7.1.1.3 Invloed van een krachtige zuidwestelijke wind

Figuur 7.9 toont het stromingsveld bepaald met het WAQUA-model tijdens een krachtige zuidwestelijke wind (240 graden op de kompasroos). Boven de Galgeplaat is het stromingsveld zeer duidelijk beïnvloed door de windrichting, de stroming is daar oostelijk. De windgedreven stromingen veroorzaken deze verandering in de richting. Er is geen grote toename van de stroomsnelheid zichtbaar. Dit komt doordat de getijdenstroming en de windgedreven stroming niet dezelfde richting hebben en de strijklengte uit deze richting klein is. Hierdoor zal het verplaatste watervolume in het bekken vele malen kleiner zijn. Ten noorden van de plaat, waar een grotere waterdiepte is, lijkt de getijdenstroming de overhand te hebben. Echter de windgedreven stroming zorgt ook daar niet voor een duidelijke toename van de stroomsnelheid.

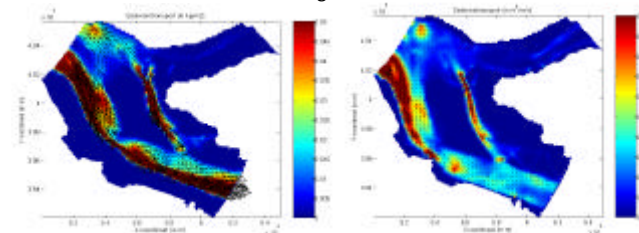
De overgang van de westelijke hoofdgeul naar de plaat kenmerkt zich door een steile helling. Deze steile helling resulteert in een kleine brandingszone. Hierdoor gaat de golfenergie in een kort tijdsbestek verloren. Het karakter van de brekende golf verandert hierdoor ook sterk. De golf breekt niet langzaam maar slaat kapot op de steile helling. Door de steile helling zullen de getijdenstromingen tot dicht bij de plaat optreden. De getijdenstromingen zullen een groot deel van het opgewoelde zand van de plaat wegvoeren. Hierdoor is het plaatgerichte sedimenttransport klein, pas boven op de Galgeplaat zijn de windgedreven stromingen overheersend.



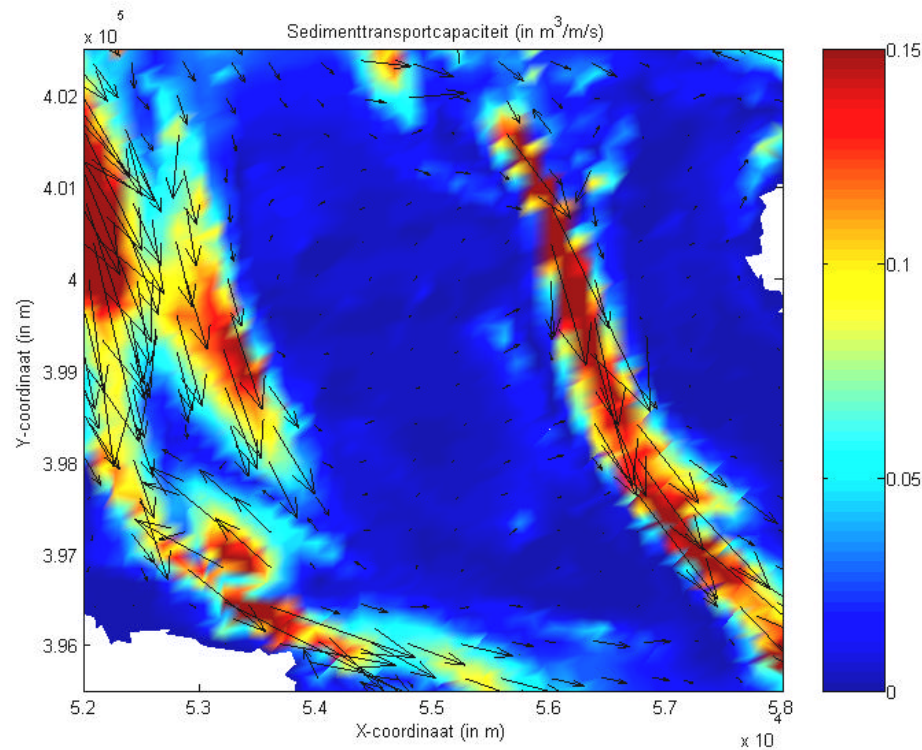
Figuur 7.11 toont de maximale transportcapaciteit van sediment door het water. In deze weergave wordt duidelijk dat de windgedreven stromingen uit de zuidwestelijke richting niet sterk genoeg zijn. Een aantal belangrijke factoren verkleint de windgedreven stroming uit deze windhoek. De kortere strijklengte, in vergelijking met de noordwestelijke windrichting zorgt ervoor dat de windopzet kleiner wordt, waardoor het verplaatste watervolume afneemt. De grotere waterdiepte zorgt ervoor dat de wind minder grip heeft op het water. Doordat het water aan de westkant diep blijft tot dicht bij de plaat, zal de windgedreven stroming zich pas echt ontwikkelen boven de plaat. Dit is de verklaring waarom de stromingsrichting alleen boven de plaat duidelijk wordt beïnvloed door de wind. Hierdoor wordt er veel minder sediment naar de plaat getransporteerd. Met behulp van WAQUA-model is een bevestiging gevonden voor de verklaring van de sterke erosie van de zuidwestelijke windrichting.



Figuur 7.11 Sedimenttransportcapaciteit rond de Galgeplaat op 24 juli om 15:00, tijdens de sterkste vloedstroom. De windsnelheid is 16 m/s, de windrichting zuidwestelijk.



Figuur 7.12 Vergelijking tussen links een noordelijke rustige wind en rechts een zuidwestelijke krachtige wind.



*Figuur 7.13 Residu sedimenttransportcapaciteit van een getijdencyclus op 24 juli, tijdens een windsnelheid van 16 m/s, de windrichting noordwestelijk*

Figuur 7.13 toont het residu van de sedimenttransportcapaciteit over een getijdencyclus tijdens een zuidwestelijke wind. De figuur toont een geen toename van het sedimenttransport aan de randen van de plaat. Bovenop de Galgeplaat veroorzaakt de zuidwestelijke windrichting voor een oostelijk sedimenttransport. Doordat bij de randen van de plaat het sedimenttransport gedomineerd wordt door de getijdenstroming, is het netto sedimenttransport in de branding plaatafwaarts gericht. Dit verklaart de sterke erosie tijdens een zuidwestelijke windrichting die naar voren komt uit de data-analyse.

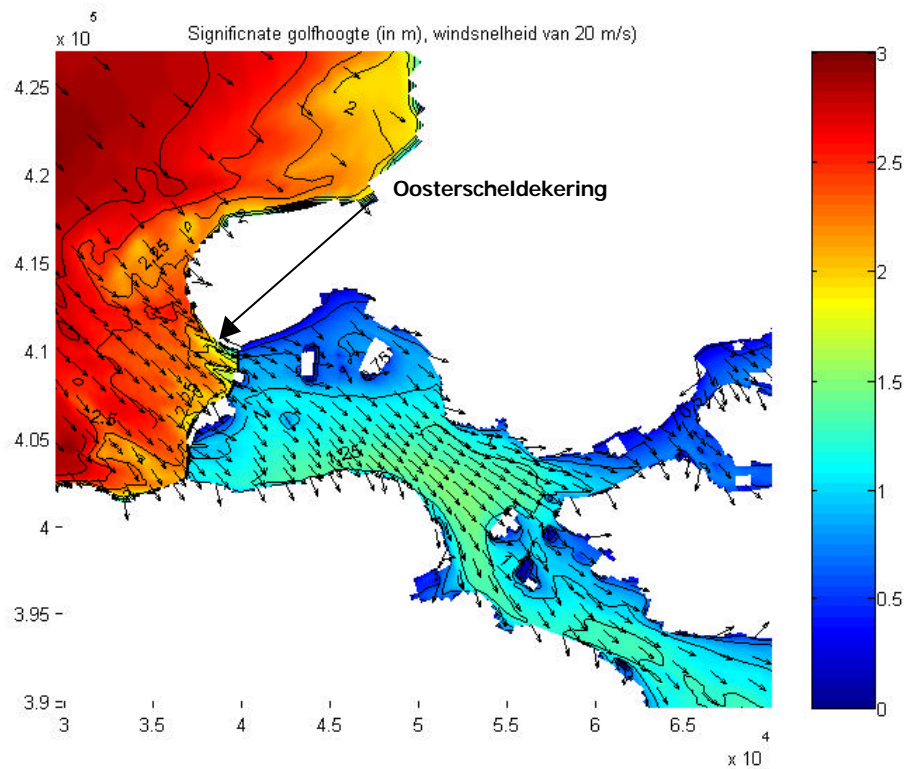


#### **7.1.1.4 Conclusie van het WAQUA - model**

Met behulp van computersimulaties met het WAQUA-model is de invloed onderzocht van windgedreven stromingen op de plaatgerichte sedimenttransportcapaciteit. De twee bepalende windrichtingen voor het sedimentatie-/erosiepatroon zijn hiervoor nader bekeken: de noordwestelijke, verantwoordelijk voor de nog overgebleven plaatopbouw en de zuidwestelijke, verantwoordelijk voor de ergste plaatdaling.

Uit de data-analyse blijkt dat de noordwestelijke windrichtingen zorgen voor de nog resterende plaatopbouw. Uit de computersimulatie met het WAQUA-model blijkt dat de noordwestelijke windrichtingen een duidelijke verhoging van de stroomsnelheden boven de Galgeplaat laten zien. Bovendien is rondom de Galgeplaat de stroming meer plaatgericht, wat een groter sedimenttransport richting Galgeplaat lijkt te verklaren.

Uit de data-analyse blijkt dat de zuidwestelijke windrichtingen zorgen voor de sterkste erosie. Uit de computersimulatie met het WAQUA-model blijkt dat de zuidwestelijke windrichtingen een duidelijke invloed hebben op de stroomrichting boven de Galgeplaat. De stroomsnelheden nemen niet toe daar de wind haaks op de stroom staat. Rondom de Galgeplaat is de stroming niet meer plaatgericht, waardoor er geen toename is van het sedimenttransport richting plaat. Door de steile bodemhelling aan de Westkant zijn er sterke getijdenstromingen dicht bij de brandingszone, wat een sterke afvoer van sediment van de plaat af tot gevolg heeft. Dit lijkt de sterke erosie aan de Westkant te verklaren.



Figuur 7.14 Weergave van het golfveld rondom de Oosterscheldekering.

## 7.1.2 Het SWAN-model

Voor de golfberekeningen is het SWAN-model gebruikt. Het toegepaste omgevingsmodel is het Kustzuid-model. Zowel de Westerschelde, als de Oosterschelde en een groot gebied voor de kust van deze estuaria zitten in het model. Doordat het ingevoerde bodemprofiel een groot gebied bestrijkt, is het een stuk grover dan het WAQUA-model. In het aangegeven gebied rond de Galgeplaat (zie figuur 7.1) heeft het bodemprofiel 6.500 coördinaten. Het Kustzuid-model heeft een foutmarge van 10 tot 20%. Dit is een erg grote foutmarge. In dit onderzoek gaat het vooral om opgetreden verschillen in golfhoogtes bij verschillende windrichtingen waardoor de foutmarge geen invloed heeft..

Figuur 7.14 toont het gebied rond de Oosterscheldekering. In de simulatie is van een zeer krachtige storm uitgegaan uit de noordwestelijke windrichting. Op sommige plaatsen zijn witte vlakken zichtbaar, hier is geen of een zeer kleine waterdiepte aanwezig. Het model geeft hier logischerwijs ook geen golfhoogte aan. Duidelijk zichtbaar is de dempende werking van de kering op het golfveld in het bekken. In het model is de dempende werking door middel van een transmissiecoëfficiënt verwerkt. Deze transmissiecoëfficiënt is aan de hand van golfmetingen vastgesteld. Uit het figuur blijkt dat de invloed van zeedeining op het golfklimaat bij de Galgeplaat nihil is.

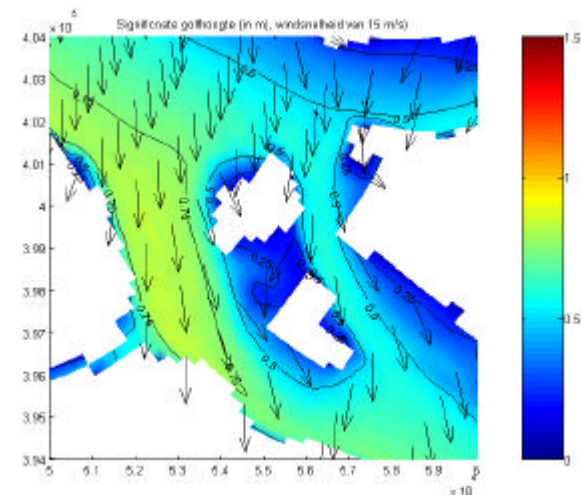
In de komende subparagraaf wordt gekeken naar de verschillen in golfopbouw bij de windrichtingen. Belangrijke parameters die naar voren komen in de data-analyse zijn het diepteprofiel en de strijklengte.



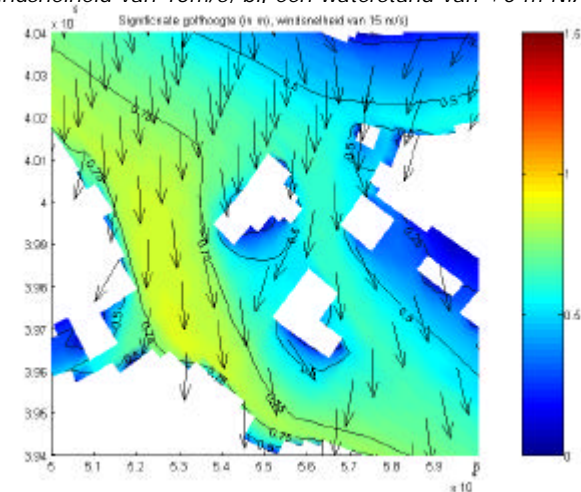
### 7.1.2.1 De noordelijke windrichtingen

De getijdenbeweging in het bekken zorgt ervoor dat de belangrijke parameters voor de golfopbouw continue verschillen. Vanuit de noordelijke windrichting zal bij laagwater de strijklengte aanzienlijk kleiner zijn vergeleken met de strijklengte bij hoogwater. Daarnaast is er een duidelijk verschil aanwezig in waterdiepten rondom de plaat. De toename van de waterdiepte bij ondiep water is relatief groot. Deze verschillen kunnen het golfveld aanzienlijk veranderen. Bij lagere windsnelheden is de benodigde strijklengte voor de maximale golfopbouw aanzienlijk kleiner dan bij de hogere windsnelheden. Bij windsnelheden tot 10 m/s uit de noordelijke windrichting is er geen verschil in golfhoogte tijdens hoog- en laagwater. De figuren 7.15 en 7.16 tonen een minimale toename van de golfhoogte bij de verschillende waterstanden bij een windsnelheid van 15 m/s. Door de hogere waterstand zijn de golven boven de Galgeplaat wel groter. De figuren 7.15 en 7.16 laten het golfveld zien tijdens een wind met een snelheid van 20 m/s. Het verschil in golfhoogte is hier sterker. Dit komt doordat de benodigde strijklengte voor de te behalen maximale golfhoogte groter is geworden. Voor de golfaanval op de Galgeplaat spelen de waterstanden een veel belangrijkere rol. Het droogvallen van platen en slikken ten noorden van de Galgeplaat kan voor een luwte zorgen. De hoge plaatdelen van de Galgeplaat zorgen ook zelf voor luwte.

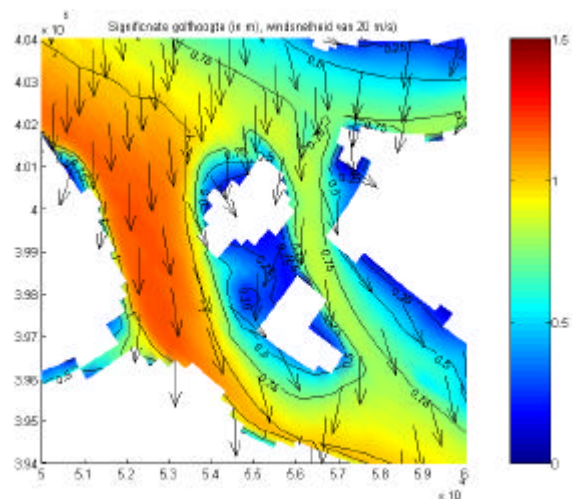
Figuur 6.10 laat de verschillende sedimentatie-/erosiepatronen van de plaatdelen zien, die uit het dataonderzoek naar voren komen. Hierbij werd de Noordkop van de plaat gekenmerkt door erosie. De figuren 7.15 t/m 7.18 tonen dat het noorden van de plaat sterk wordt aangevallen. De invalshoek van de golven is klein, want bijna loodrecht op de plaat. De oostzijde van de Galgeplaat wordt ook gekenmerkt



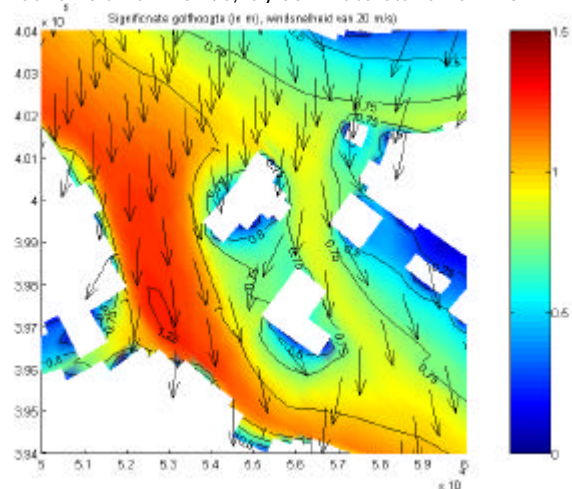
Figuur 7.15 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind ( $10^\circ$ ) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.16 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind ( $10^\circ$ ) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P.



Figuur 7.17 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind ( $10^\circ$ ) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.18 Golfveld opgewekt door een noordelijke wind ( $10^\circ$ ) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.

door erosie. Figuur 7.17 toont dat de golfhoogte in het “Brabantsche vaarwater” bij noordelijke windrichtingen, aanzienlijk lager is dan in het “Engelsche vaarwater” en de “Oosterschelde”. Dit komt doordat het eiland Tholen de nodige luwte verschaft. Deze luwte zal vooral bij lagere waterstanden grote invloed hebben op het golfveld. Hierdoor zal de erosie aan de oostzijde van plaat bij deze windrichting beperkt blijven.

De west- en de zuidzijde van de plaat worden gekenmerkt door sedimentatie bij deze windrichting. De figuren 7.16 en 7.17 tonen dat deze zijden niet direct worden aangevallen door de golven. Dit komt doordat de hoge plaatdelen voor luwte zorgen aan de lijszijde van de plaat. Daarnaast is de golfrichting bijna parallel aan de westzijde. Hierdoor zal de eroderende werking van de golven nihil zijn.



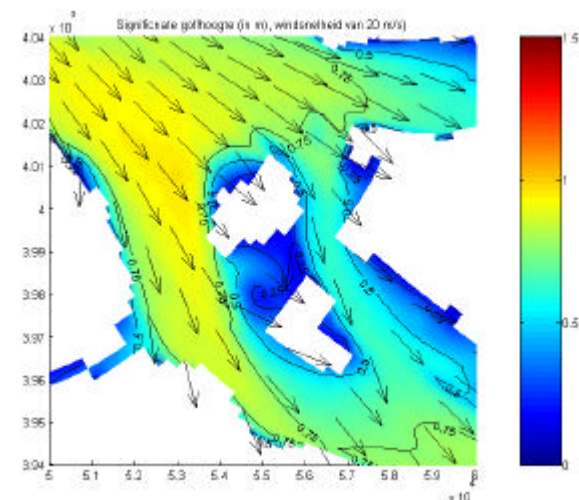


### 7.1.2.2 De noordwestelijke windrichtingen

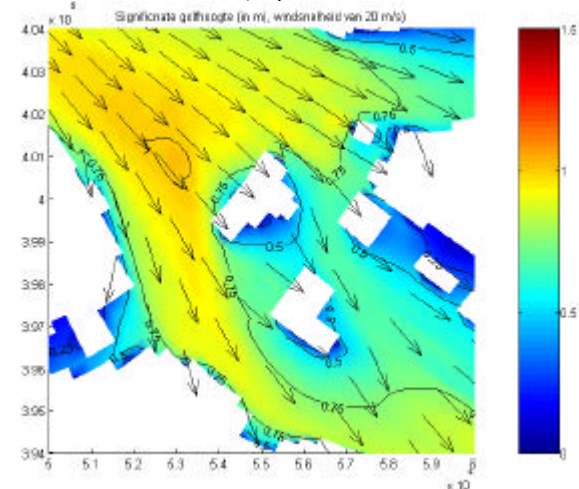
Figuren 7.19 en 7.20 geven het golfveld weer bij een krachtige noordwestelijke wind. Vergeleken met de andere wind-richtingen komen er grote golven voor uit deze richting. De lange strijklengte over het water lijkt hiervoor de reden. De golfrichting lijkt zowel in het noorden als aan de westzijde van de Galgeplaat parallel met de het stromingsveld te lopen. Wanneer de golven breken zullen ze de plaatgerichte stroming versterken tijdens de vloedperiode. Dit zorgt voor een groter sedimenttransport richting plaat.

Uit de data-analyse komt naar voren dat overal op de plaat sedimentatie optreedt bij deze windrichting. Alleen bij de noordnoordwestelijke windrichtingen treedt er erosie op aan de oostkant. Bij deze windrichting ligt de Oostkant niet in de luwte, doordat het "Brabantsche vaarwater" parallel ligt aan de golfrichting. De andere plaatdelen kennen sedimentatie bij deze windrichting. De drie verschillende stromingen die een rol spelen bij het aanvoeren van sediment naar de plaat, werken bij deze windrichting samen. De stroming is parallel aan de grootste lengte van de plaat. Bij deze lange afstand over de plaat, zullen er veel gradiënten in de stroomsnelheid voorkomen. Wanneer deze gradiënten een afname in de stroomsnelheid inhouden, leidt dit tot sedimentatie.

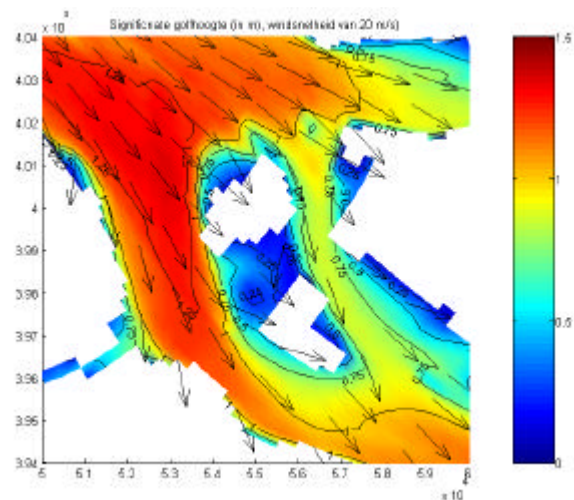
De hoge plaatdelen in het noorden worden gevoed met zand door het water wat er op stroomt. Nadat het hoogste punt van de plaat bereikt is, treedt er een grote snelheidsafname op. Hierdoor zal veel sediment neerslaan net achter het hoogste plaatdeel. Dit verklaart waarom de hoge plaatdelen minder snel dalen dan de lagere plaatdelen. De verschillende waterstanden leiden ook hier tot een duidelijk verschil in golfhoogte. Een grotere strijklengte zorgt voor een toename van de



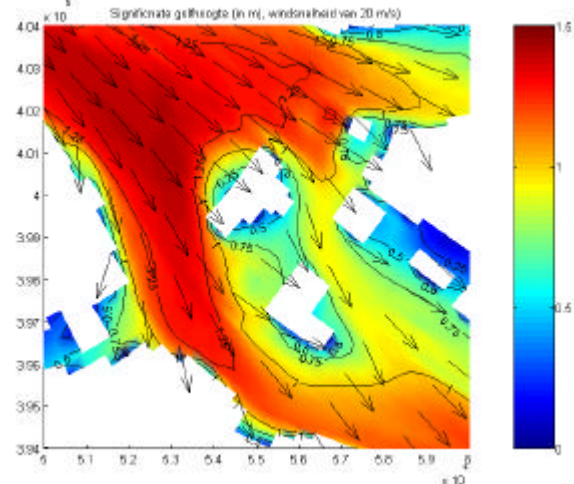
Figuur 7.19 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een wat erstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.20 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 15m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P.



Figuur 7.21 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.22 Golfveld opgewekt door een noordwestelijke wind (325°) met een windsnelheid van 20m/s, bij een waterstand van +1.5m N.A.P.

significante golfhoogte. De waterdiepte in het bekken lijkt de golfhoogte niet te beperken. Rond de Galgeplaat zorgt de waterdiepte wel voor verschil in het breken van de golven. Figuur 7.18 toont het golfveld bij een zeer krachtige (20 m/s) noordwestelijke wind. De waterstand is op dat moment +0m N.A.P. In het noorden van de plaat is goed te zien dat de golfhoogte geleidelijk afneemt. De waterdiepte is hier de beperkende factor.

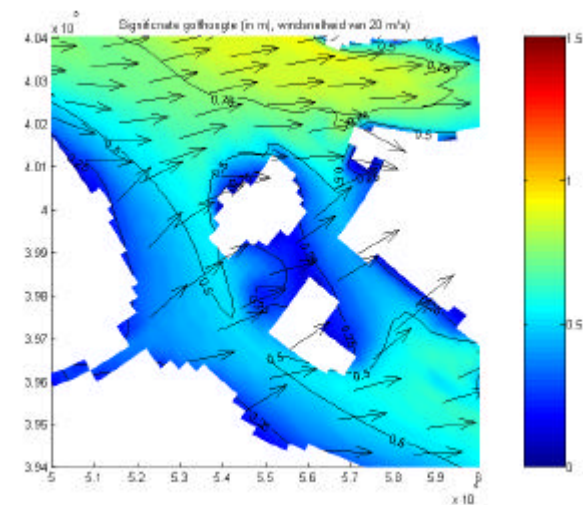
Figuur 7.21 geeft dezelfde weersomstandigheden weer, alleen is hier de waterstand +1.5m N.A.P. In het noorden blijven dezelfde contourlijnen van de golfhoogte zichtbaar als in figuur 7.22. Nu hoort er echter een grotere golfhoogte bij. Dit laat wederom zien dat de golfhoogte aldaar beperkt wordt door de waterdiepte. Hierdoor zal er ten noorden van de Galgeplaat altijd een brede brandingszone zijn. Dit tezamen met de plaatgerichte stroming, bestaand uit zowel de windgedreven stroming als de stroming opgewekt door de golven, lijkt een sedimenttransport richting plaat tot stand te brengen.



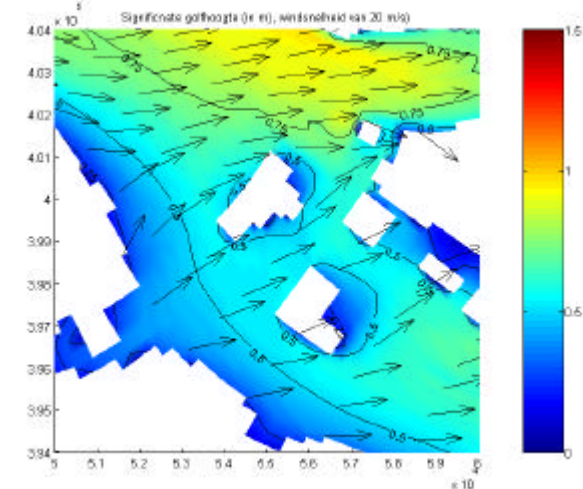
### 7.1.2.3 De zuidwestelijke windrichting

De figuren 7.23 en 7.24 geven de golfvelden weer bij een krachtige (15 m/s) zuidwestelijke wind. De golven uit deze windhoek zijn aanzienlijk kleiner dan die van de eerder behandelde golfvelden. De kleine strijklengte is hiervoor de reden. Het noorden van de Galgeplaat wordt wel blootgesteld aan grote golfhoogte. Dit komt doordat de strijklengte daar vele malen langer is. De richting van de golven is haaks op stroomrichting. Uit figuur 7.7 blijkt dat de windgedreven stromingen het stromingsveld boven de Galgeplaat bepalen. De stroming is van west naar oost gericht. Het bodemprofiel aan de westkant van de Galgeplaat kent een steile helling. Figuur 7.21 laat een abrupte afname zien van de golfhoogte aan de westkant. Door de steile helling in de bodem, zal de brandingszone smal zijn. De brandingzone is daardoor vlak bij diepwater. Uit figuur 7.7 blijkt dat hier sterke getijdenstromingen staan parallel aan de plaat. Het door de golven opgewoelde sediment, wordt daardoor grotendeels afgevoerd door de getijdenstroming. Dit betekent direct zandverlies voor de Galgeplaat.

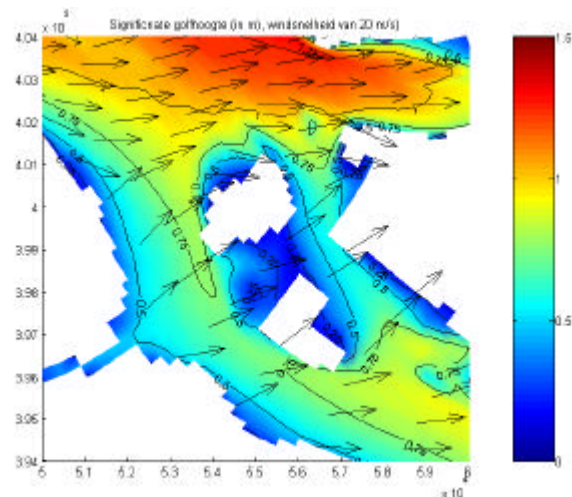
Uit de data-analyse blijkt dat de middelhoge plaatdelen de sterkste daling kernen (zie hoofdstuk zes). In alle golfvelden is te zien dat het gebied tussen de twee hoge plaatdelen, het midden van de Galgeplaat, hogere golven kent. Doordat de waterdiepte groter is, zijn er ook grotere golven mogelijk. Doordat er in dit midden veel minder hoogteverschil aanwezig is, komen er ook kleinere snelheidsgradiënten voor. Figuur 7.7 laat dit ook zien. Hierdoor zal veel opgewoeld sediment afgevoerd worden naar de geul het "Brabantsche vaarwater". Dit betekent direct zandverlies voor de Galgeplaat.



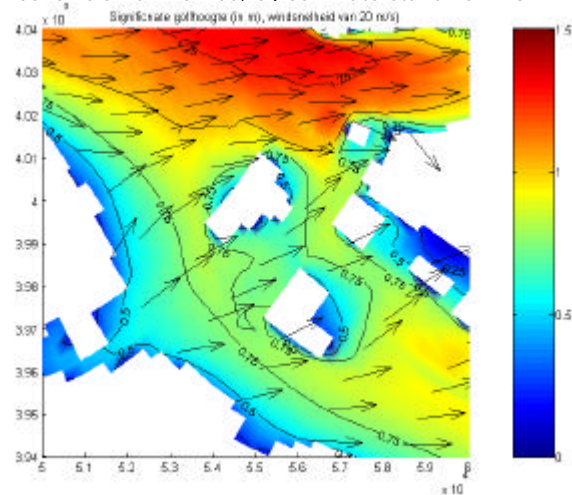
Figuur 7.23 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.24 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.



Figuur 7.25 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



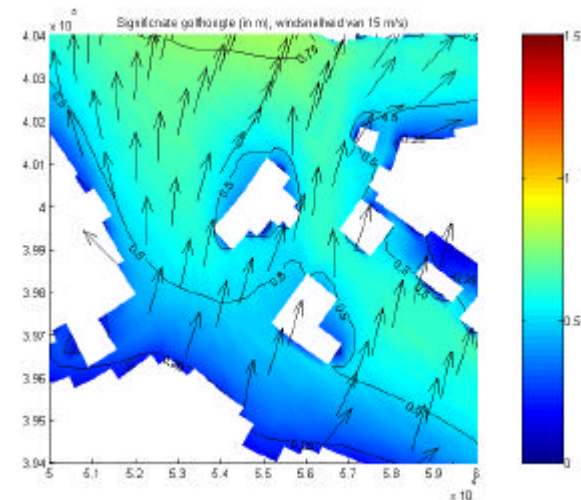
Figuur 7.26 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind (240°) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.

Figuur 7.25 en 7.26 tonen het belang van de Galgeplaat aan voor de golfaanval op Tholen. Figuur 7.25 laat zien dat de golfhoogte ten oosten van de plaat zeer gering blijft. Hierdoor is de golfaanval op de "Slikken van den Dortsman" voor Tholen ook minimaal. Vooral de Galgeplaat lijkt de verdere groei van de golfhoogte te beperken. In figuur 7.26 is te zien dat bij een hogere waterstand de golfhoogte minder afneemt. Hierdoor worden de slikken blootgesteld aan een grote golfaanval. De sluiting van de kering zorgt voor een beperkte waterstand in het bekken. Hierdoor zal gedurende een lange tijd de golfaanval op de "Slikken van den Dortsman" beperkt worden. Dit zal echter tijdelijk van aard zijn, doordat de Galgeplaat op deze manier aan extra golfenergie wordt blootgesteld. Deze extra golfenergie zal een sterkere plaatdaling tot gevolg hebben van de Slikken v/d Dortsman ten westen van Stavenisse.

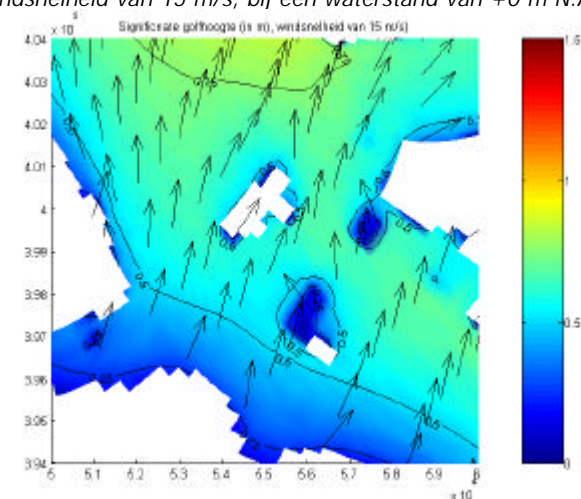


#### 7.1.2.4 De zuidelijke windrichting

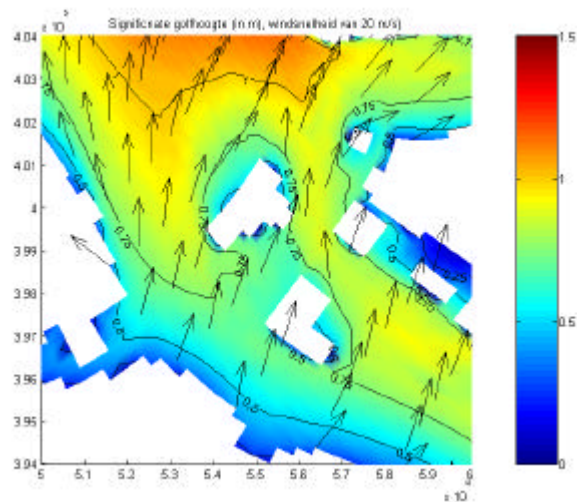
Figuur 7.27 t/m 7.30 tonen het golfveld bij een zuidelijke windrichting. De golfopbouw bij deze windrichting is zeer beperkt door de kleine strijklengte. De golfaanval vanuit deze windrichting heeft over een groot plaatdeel een grote invalshoek. Hierdoor zal er ook maar een klein gedeelte erosie ondervinden. Uit de data-analyse blijkt dat uit de zuidelijke windrichtingen de erosie zeer beperkt blijft. Alleen het zuiden en het westen van de Galgeplaat tenderen licht naar erosie naarmate de karakteristieke windsnelheid toeneemt. Uit de figuren is goed op te maken dat de golfaanval aan de zuidwestkant inderdaad een kleine invalshoek heeft. Het "Brabantsche vaarwater" ligt dit keer niet in de beschutting, de golfaanval blijft echter beperkt doordat de golfrichting van de plaat af is gericht.



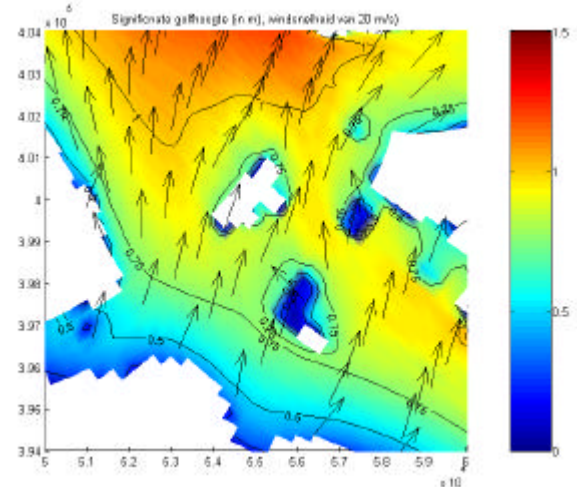
Figuur 7.27 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind ( $200^\circ$ ) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.28 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind ( $200^\circ$ ) met een windsnelheid van 15 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.



Figuur 7.29 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind ( $200^\circ$ ) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +0 m N.A.P.



Figuur 7.30 Golfveld opgewekt door een zuidwestelijke wind ( $200^\circ$ ) met een windsnelheid van 20 m/s, bij een waterstand van +1.5 m N.A.P.

Figuur 7.29 toont het golfveld bij een zéér krachtige zuidelijke windrichting. Bij het zuidwestelijke deel van de Galgeplaat is een abrupte afname van de golfhoogte zichtbaar. Dit heeft ook hier te maken met een steile helling bij de overgang van geul naar plaat. Deze steile helling zorgt ervoor dat de branding van de golven tijdens lage waterstanden zeer dicht bij de geul ligt. Hierdoor zal het opgewoelde sediment makkelijk worden afgevoerd door de getijdenstroming. Daarnaast zal een steile helling/abrupte diepte toename leiden tot een sterke verlaging van de stroomsnelheid van het water dat de plaat afstroomt. Dit zorgt voor sedimentatie net voorbij de laagwaterlijn. Figuur 7.30 toont een significante toename van de golfhoogte boven de Galgeplaat. Bij hogere waterstanden is de waterdiepte boven het zuidwestelijke plaatdeel groot genoeg om de golven door te laten. De diepte lijkt verdere golfopbouw niet toe te staan. Dit betekent dat hier maar zeer beperkt golfbreking plaatsvindt, met als gevolg een beperkte bodemschuifspanning.



### 7.1.3 Conclusie

In deze paragraaf zijn met behulp van het SWAN-model golfvelden berekend voor de verschillende windrichtingen. Hiermee kan het beeld uit de data-analyse beter worden verklaard. De simulaties zijn uitgevoerd met twee windsnelheden, 15 m/s en 20 m/s en bij twee waterstanden.

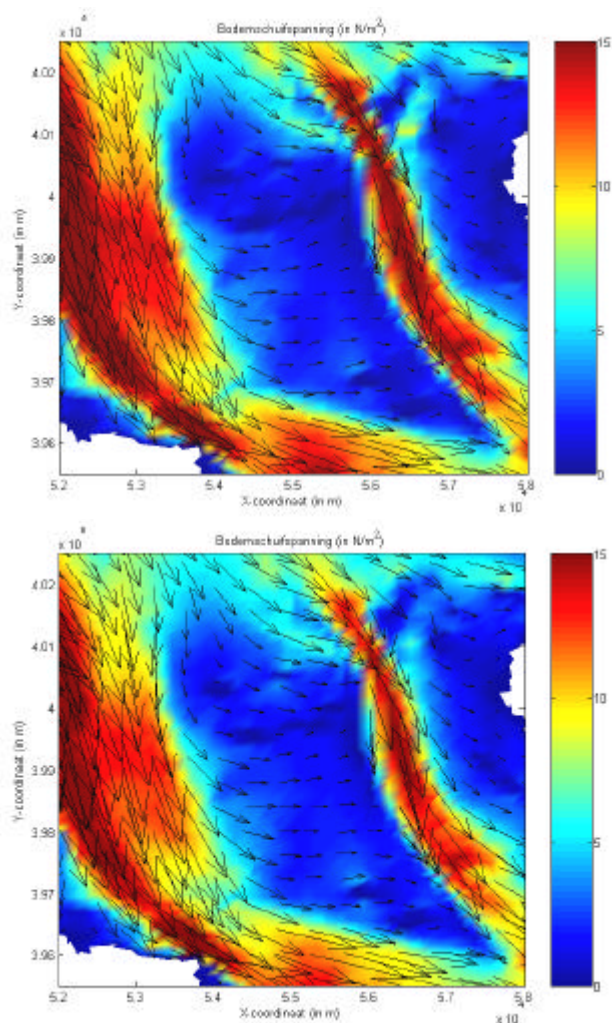
Bij alle windrichtingen blijkt dat alleen bij de hogere windsnelheden de strijklengte beperkend is voor de golfopbouw. Pas bij een krachtige wind (15 m/s) is het verschil tussen de golfhoogte bij laag- en hoogwater duidelijk zichtbaar. Bij een noordelijke windrichting ligt de Galgeplaat tijdens laagwater in de luwte van de "Slikken van den Dortsman".

De noordwestelijke windrichting kent bij hogere windsnelheden de grootste golfopbouw daar de strijklengte dan verreweg het grootst is. Echter door het flauwe bodemprofiel bij de Noordkop van de Galgeplaat wordt de golfenergie hier geleidelijk afgegeven. Bij vloed werken de getijdenstroming, de wind- en de golfgedreven stroming samen, hierdoor vindt er nog sedimentatie plaats.

De zuidwestelijke windrichting kent door de beperkte strijklengte een beperkte golfopbouw. Uit de data-analyse komt naar voren dat deze windrichting de sterkste erosie toont. Dit wordt verklaard door de steile bodemhelling. Hierdoor wordt de brandingszone smal en worden de bodemschuifspanningen groot. De optredende getijdenstromingen in de brandingszone voeren veel sediment af.

Bij de zuidelijke windrichtingen hebben de golven een grote invalshoek op de plaat. Hierdoor wordt de plaataanval sterk gereduceerd. Dit lijkt

dan ook de verklaring voor de lichte erosie die uit de data-analyse naar voren komt.



Figuur 7.31 Bodemschuifspanning veroorzaakt door de stroming, het bovenste figuur is 24 juli 1994 tijdens max. vloed, het onderste figuur is met halve meter waterstandverhoging.

## 7.2 De invloed van de plaatdaling

### 7.2.1 Het WAQUA-model

Om een beeld te krijgen van de invloed van de plaatdaling op het sedimentatie-/erosiepatroon van de Galgeplaat, is een aantal simulaties doorgerekend. In deze simulaties is gekeken naar de gevolgen van een krachtige zuidwestelijke wind. Dit is zichtbaar in figuur 7.31 waarin de bodemschuifspanningen getoond worden. Bovenop de plaat zijn deze oostelijk gericht. De bovenste figuur toont de situatie op 24 juli 1994. De onderste figuur geeft dezelfde situatie weer, echter nu met een waterstandsverhoging van een halve meter.

Aan de hand van deze simulatie worden in feite twee toekomstige veranderingen bekeken: een plaatverlaging van een halve meter en de invloed van de zeespiegelrijzing.

Doordat de geulen zo diep zijn zal een plaatverlaging van een halve meter een verwaarloosbaar effect hebben op de stroming. Bovenop de Galgeplaat zal een verhoging van de waterdiepte met een halve meter, relatief gezien veel groter zijn. Zo kan bekeken worden wat dit verandert in de stroomsnelheid boven de plaat.

De Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen heeft in 2002 een voorspelling gemaakt dat de getijdenslag met tien centimeter per eeuw toeneemt door de zeespiegelrijzing. De zeespiegelrijzing beïnvloedt twee belangrijke morfologische parameters. Het getijden-prisma zal groter worden door de toegenomen getijdenslag.

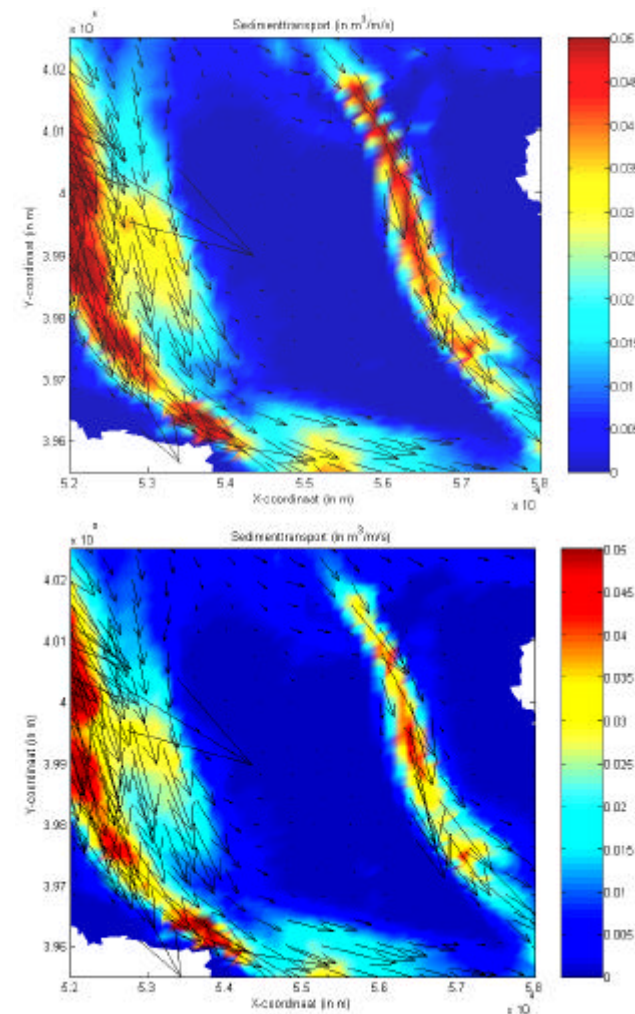




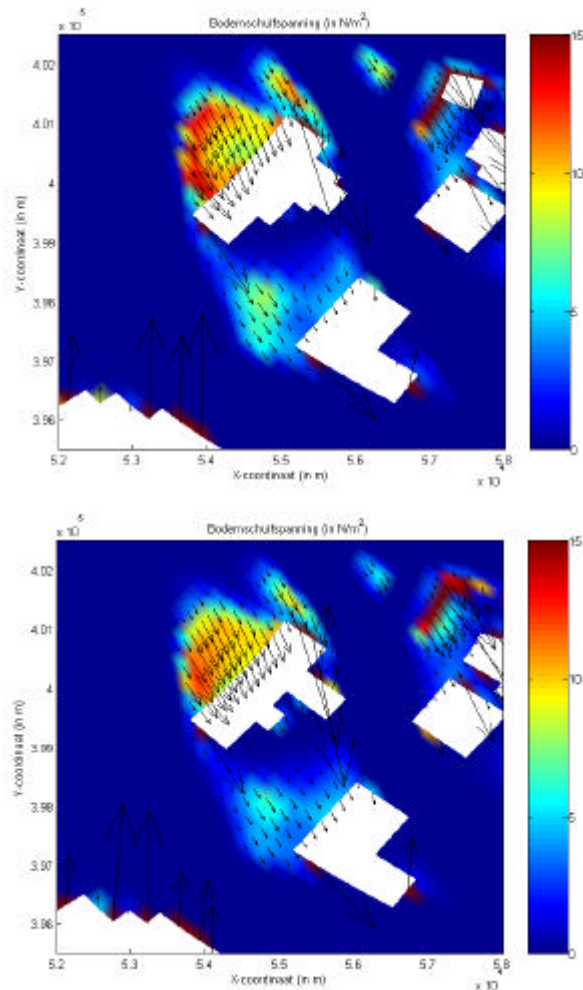
Door het toegenomen getijdenprisma, zal volgens de theorie van Escoffier, het doorstroomoppervlak van de geulen in het bekken ook vergroten. De vergroting van de getijdenslag in het bekken bedraagt:  $10/250=4\%$  per eeuw. Door dezelfde zeespiegelrijzing is echter het doorstroomoppervlak van de geul al toegenomen met ongeveer 3% per eeuw. Hieruit blijkt dat deze simulatie voor zowel een zeespiegelrijzing als een plaat verlagening een goed beeld geeft van de verandering van het stromingsveld.

Figuur 7.32 laat de verandering zien die optreedt in de bodemschuifspanning door de waterstandverhoging bovenop de Galgeplaat. Hierdoor wordt zichtbaar dat er vooral een verhoging optreedt aan de Oostkant van de plaat en bij de hogere plaatdelen. Een verhoging van de waterdiepte boven de plaat, zorgt voor een toename van de getijdenstroming boven de plaat en een afname van de windgedreven stromingen. Voor de bodemschuifspanningen hebben de getijdenstromingen een ondergeschikte rol ten opzichte van de golven. Ze zullen dan ook geen grote verandering in het sedimentatie-/erosiepatroon veroorzaken.

Figuur 7.32 toont de verandering die optreedt in de sedimenttransportcapaciteit bovenop de Galgeplaat. De getijdenstroming tezamen met de windgedreven stroming heeft het belangrijkste aandeel in het sedimenttransport. Zeker bovenop de Galgeplaat waar de golfgedreven stromingen maar zeer klein zijn door de vlakke bodem. De figuur laat zien dat de toename van het sedimenttransport zeer gering is door de waterstandverhoging boven de plaat. M.a.w. er is een toename boven de hoge plaatdelen en geen verandering boven de middelhoge plaatdelen.



Figuur 7.32 Sedimenttransport veroorzaakt door stroming tijdens maximale vloed, het bovenste figuur is 24 juli 1994, het onderste met een halve meter waterstandsverhoging.



*Figuur 7.33 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven, een noordwestelijke wind van 20 m/s, bovenste figuur met een waterstand van +1.5 m en de onderste +2.0 m N.A.P.*

## 7.2.2 Het SWAN-model

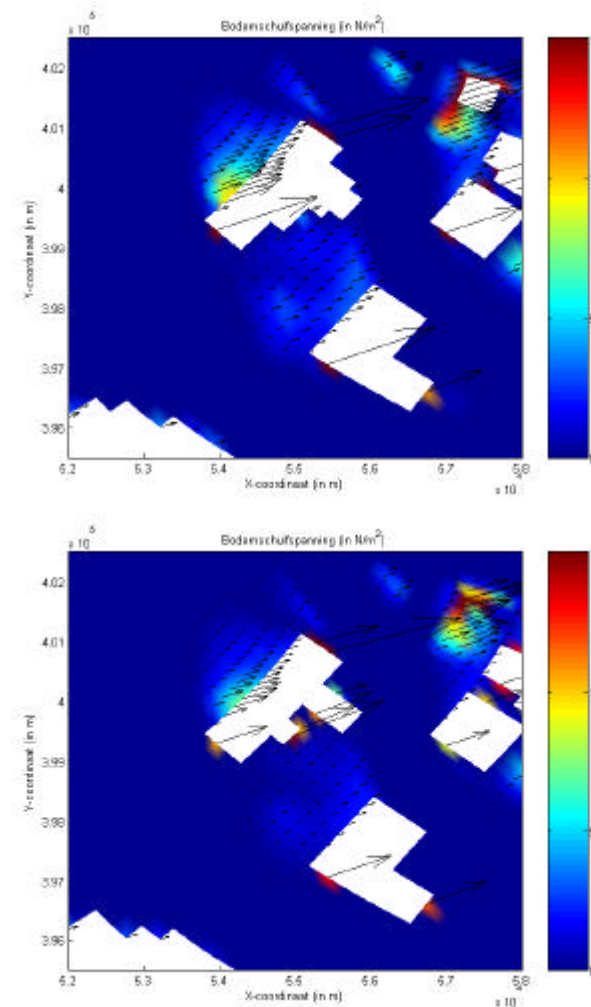
Om een beter beeld te krijgen van wat de plaatverlaging betekent voor het sedimentatie-/erosiepatroon op de Galgeplaat, is er een aantal simulaties gemaakt met het SWAN-model. In deze simulaties is ook gekeken naar een verschil in waterstandshoogte. De golven hebben verruit het belangrijkste aandeel in de bodemschuifspanningen bovenop de Galgeplaat. De golfgedreven stromingen richting de Galgeplaat zullen klein zijn. Dit komt doordat er bijna overal sprake is van een steile bodemhelling bij de overgang van de geul naar de plaat. Hierdoor zal de vrijgekomen energie bij het breken van de golven, geen significante stroming kunnen opwekken door de grote waterdiepte. Alleen in het noordelijk deel van de plaat, dat gekenmerkt wordt door een flauwe bodemhelling, kunnen de golfgedreven stromingen significant worden. Vandaar dat er alleen wordt gekeken naar de bodemschuifspanningen die de golven veroorzaken.

Figuur 7.33 toont twee simulaties. In het bovenste figuur is er een waterstand van +1.5 m N.A.P., het onderste heeft een waterstand van +2.0 m N.A.P. Bij beide berekeningen is er sprake van een stormachtige noordwestelijke wind. In beide figuren is er ingezoomd op de Galgeplaat. De witte vlakken zijn de plaatsen waar het SWAN-model geen berekening kan uitvoeren door een beperkte waterdiepte. Het verschil tussen beide is duidelijk zichtbaar. Beide simulaties tonen een brede brandingszone of wel een brede zone waar bodemschuifspanningen optreden. De toename van de waterdiepte boven de plaat zorgt voor een verschuiving van de hogere bodemschuifspanning naar de hogere plaatdelen.



Deze plaatdelen kennen een kleine oppervlakte waardoor over het algemeen de bodemschuifspanning afnemen. Aan de zijkanten van de Noordkop van de Galgeplaat zijn grote bodemschuifspanningen zichtbaar (ook te zien aan grote pijlen). Hier is de bodemhelling dan ook vele malen steiler, wat resulteert in een smalle zone waar de bodemschuifspanningen veel groter zijn.

Figuur 7.34 toont twee verschillende simulaties. In het bovenste figuur is er een waterstand van +1.5 m N.A.P., het onderste heeft een waterstand van +2.0 m N.A.P.. Bij beide berekeningen is er sprake van een krachtige zuidwestelijke wind. In beide figuren is er ingezoomd op de Galgeplaat. De witte vlakken zijn plaatsen waar het SWAN-model geen berekening kan uitvoeren door een beperkte waterdiepte. De verschillen zijn duidelijk zichtbaar. Te zien is dat bij deze waterstanden vooral de hogere plaat-delen worden aangevallen. Door de steile helling is er een abrupte toename van de bodemschuifspanningen aldaar. Een plaatverlaging resulteert in een duidelijke afname van de bodemschuifspanningen boven de middelhoge plaatdelen. Deze plaatdelen, die verruit het grootste plaatoppervlakte bestrijken, zullen bij een plaatdaling steeds minder bloot worden gesteld aan bodemschuifspanningen. Voor de hogere plaatdelen lijkt er geen significante verandering in de bodemschuifspanning op te treden.



Figuur 7.34 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven, een zuidwestelijke wind van 20 m/s, bovenste figuur met een waterstand van +1.5m en de onderste +2.0m N.A.P.



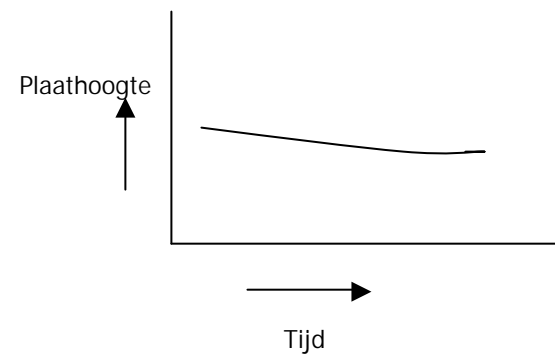
### 7.2.3 Slotconclusie over de plaatdaling

Met behulp van computersimulaties met het WAQUA-model is de invloed van de plaatdaling en/of van een zeespiegelrijzing op het stromingsveld bij de Galgeplaat bekeken. Een plaatdaling dan wel zeespiegelrijzing zorgt niet voor een significante toename van de stroomsnelheden boven de Galgeplaat als geheel. Op lokaal niveau lijkt er wel een toename zichtbaar boven de Oostkant en de hooggelegen plaatdelen. Dit betekent een toename van de mogelijke erosie en een afname van de sedimentatie aan de Oostkant en boven de hoge plaatdelen. Hierdoor kan een versnelling optreden van de erosie van deze plaatdelen.

Met behulp van het SWAN-model is ook gekeken naar de gevolgen van een plaatdaling/zeespiegelrijzing, voor door golven veroorzaakte bodemschuifspanningen. Uit de simulaties komt naar voren dat de toegenomen waterdiepte boven de plaat, tot een afname van de bodemschuifspanningen boven de gehele plaat leidt. Bij de hogere plaatdelen zorgt de plaatverlaging van de lagere delen voor een lichte toename van de bodemschuifspanningen. Dit komt doordat de golven minder energie verliezen.

Wanneer de uitkomsten van beide modellen met elkaar worden gecombineerd, kunnen er een paar conclusies worden getrokken. Voor de lagere plaatdelen lijkt er geen grote verandering op te treden wat betreft de stroomsnelheden; dit betekent dan ook geen grote verandering in de sedimenttransportcapaciteit.

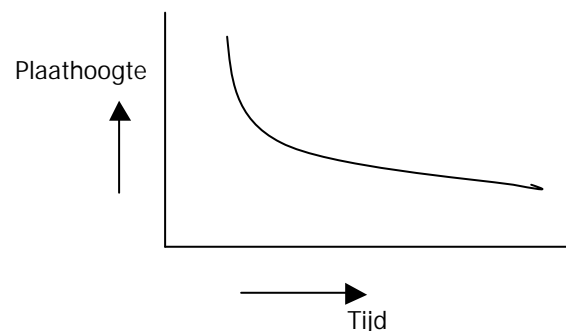
Er is wel een verlaging van de door de golven veroorzaakte bodemschuifspanningen. De afgenomen bodemschuifspanning en de gelijk gebleven sedimenttransportcapaciteit door de golven lijken een vertraging van de plaatverlaging te bewerkstelligen. In figuur 7.35 is een trend weergegeven van de plaatdaling van de lagere plaatdelen vanaf 1987.



Figuur 7.35 Plaatverlaging voor de lagere plaatdelen t.o.v. de tijd.

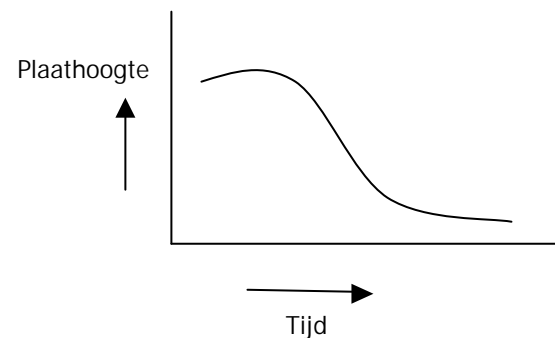


Voor de middelhoge plaatdelen lijkt de achteruitgang van de plaathoogte nauwelijks te zorgen voor een stroom-snelheidstoename boven deze delen. Bij de oostelijke plaatdelen lijkt de sterkste snelheidstoename zichtbaar. Dit resulteert daar in een kleine toename van de sedimenttransportcapaciteit. Dit is echter verwaarloosbaar voor de algehele trend van deze plaatdelen. De bodemschuifspanningen veroorzaakt door de golven, nemen sterker af. Dit, tezamen met de gelijkblijvende sedimenttransportcapaciteit, lijkt een vertraging van de plaatverlaging te bewerkstelligen, zie figuur 7.36. Hier is te zien dat de middelhoge plaatdelen net na de sluiting een snelle daling laten zien; naarmate de diepte toeneemt leidt dit tot vertraging van de plaatdaling.



*Figuur 7.36 Plaatverlaging voor de middelhoge plaatdelen t.o.v. de tijd.*

Voor de hogere plaatdelen lijkt de plaatdaling te zorgen voor een kleine toename van de stroomsnelheid en dus voor een toename van de sedimenttransportcapaciteit. Met behulp van het SWAN-model wordt duidelijk dat de plaatdaling ook resulteert in een kleine toename van de bodemschuifspanning boven deze plaatdelen. Dit komt doordat de middelhoge plaatdelen minder golfenergie absorberen door de grotere waterdiepte. Hierdoor worden de hogere plaatdelen blootgesteld aan meer golfenergie, wat leidt tot een toename van de bodemschuifspanningen. De toegenomen bodemschuifspanningen en de toegenomen sedimenttransportcapaciteit lijken een versnelling van de plaatverlaging van de hogere plaatdelen te bewerkstelligen, zie figuur 7.37.



*Figuur 7.37 Plaatverlaging voor de hoge plaatdelen t.o.v. de tijd.*



## 8 Conclusies & Aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

Voor een beter inzicht in de sedimentatie-/erosiepatronen van de Galgeplaat is een data-analyse uitgevoerd aan de hand van hoogtemetingen. Deze metingen zijn verricht in de periode 1983-2001. Door een onderverdeling van zowel windrichting als plaat, wordt er een duidelijk beeld verkregen van het sedimentatie-/erosiepatroon. Ook wordt duidelijk wat de belangrijke processen zijn in de afbraak van de Galgeplaat. Dit inzicht kan tot maatregelen leiden om de plaat-achteruitgang te vertragen dan wel stil te leggen.

In de data-analyse is de periode vlak voor de realisatie van de stormvloedkering, 1984- begin 1986, vergeleken met de periode er vlak na, 1987-1993. Hieruit blijkt dat er voor de voltooiing van Oosterschelde-kering frequenter plaatopbouw voorkomt dan erna. Ook na de voltooiing van de Oosterscheldekering is er nog wel plaatopbouw, maar onvoldoende om de erosie te niet te doen, netto erosie.

Door de Oosterscheldekering zijn de stroomsnelheden in het bekken drastisch gedaald, bij de Galgeplaat met 20-40%. De transportcapaciteit van water wordt in hoge mate bepaald door de stroomsnelheid. Een afname heeft grote gevolgen voor de sedimenttransportcapaciteit van het water. De stroomsnelheidsreductie zorgt ervoor dat significante plaatopbouw niet meer mogelijk is.

In de data-analyse is een onderverdeling gemaakt in zowel windrichtingen als plaatlocaties. Hierdoor zijn lokale factoren geïsoleerd en blijkt duidelijker waardoor de lokale sedimentatie-/erosieprocessen bepaald worden.

De zuidwestelijke windrichting veroorzaakt de meeste erosie op de Galgeplaat. Uit simulaties met het SWAN-model blijkt echter dat deze windrichting niet zorgt voor de grootste significante golfhoogte aldaar. De golfhoogte is niet de enige bepalende factor. De westzijde van de plaat kent een steile overgang van geul naar plaat. Dit resulteert in een smalle brandingszone waar de golfenergie wordt afgegeven. De steile overgang zorgt voor een sterke getijdenstroming dicht bij de brandingszone. Deze stroming staat haaks op de golfrichting en voert veel opgewoeld sediment plaaftwaarts. Hierdoor treedt er direct zandvolume verlies op. Dit verklaart de sterke erosie van de gehele Galgeplaat bij deze windrichting. In de periode 1987-1993 kent 44% van de opgetreden weersomstandigheden deze windrichting.

Uit de data-analyse blijkt een andere trend bij noordwestelijke windrichtingen: Een toenemende windsnelheid zorgt voor een toename van sedimentatie op de Galgeplaat. Uit simulaties met het SWAN-model komt naar voren dat de plaat bij deze windrichting wordt blootgesteld aan de grootste significante golfhoogte. Het noorden van de Galgeplaat kent een flauwe helling bij de overgang van plaat naar geul. Dit resulteert in een brede relatief ondiepe brandingszone. Door de beperkte diepte in de aanloop naar de plaat zijn de golf- en windgedreven stromingen veel groter. Ook de getijdenstromingen werken in dezelfde richting.



Uit simulaties met het WAQUA-model komt een significante plaatgerichte stroomsnelheidstoename naar voren bij een toenemende windsnelheid uit de noordwestelijke richting. De windgedreven stroming heeft hier een belangrijke rol in. De flauwe overgang van geul naar plaat resulteert in een significante toename van plaatwaarts sedimenttransport en verklaart de sedimentatie.

In het onderzoek komt naar voren dat de plaatverlaging afneemt in de tijd. Binnen twee jaar na de bouw van de kering komt er geen significante plaatopbouw meer voor op de Galgeplaat als geheel. De door de golven veroorzaakte erosie lijkt niet te veranderen tot 1994. Van 1994 tot 2001 wordt de erosie minder extreem. Dit lijkt te duiden op een snelheidsafname van de plaatdaling. In deze periode traden wel minder extreme weersomstandigheden op.

Uit analyse van de verandering van de getijdenkrommen in het bekken, blijkt dat het estuarium is veranderd van een zandexporterend in een zandimporterend systeem. Een van de oorzaken hiervoor is de verandering van een langere laagwater- naar een langere hoogwaterkentering. Kenmerkend voor een estuarium met een lange hoogwaterkentering zijn ondiepe geulen en een groot plaatoppervlak. Deze verandering is zichtbaar in het bekken, doordat de platen afvlakken. Deze afvlakking betekent een toename van het plaatoppervlak. De geulen in de Oosterschelde verzanden langzaam.

Uit de data-analyse blijkt niet dat een sluiting van de stormvloedkering leidt tot extra erosie op de Galgeplaat. Dit komt doordat het moeilijk is het uit de data naar voren te halen. Er zijn namelijk weinig vergelijkbare situaties. Er kan wel vastgesteld worden dat een sluiting

niet leidt tot extreme erosie op de Galgeplaat vergeleken met andere situaties.

Met behulp van het WAQUA-model en het SWAN-model zijn de gevolgen bestudeerd van een plaatdaling of zeespiegelrijzing op het sedimentatie-/erosiepatroon van de Galgeplaat.

Uit simulaties met het WAQUA-model blijkt dat de plaatverlaging niet leidt tot toename van de stroomsnelheden boven de Galgeplaat als geheel. Op lokaal niveau lijkt er wel een toename zichtbaar boven de oostelijke en de hooggelegen plaatdelen. Dit betekent een toename van de mogelijke erosie en een afname van de sedimentatie. Hierdoor kan een versnelling optreden van de plaatdaling. Echter voor de Galgeplaat als geheel lijkt er niet veel te veranderen door de plaatdaling. De toename van de waterdiepte boven de plaat zorgt voor een afname van de windgedreven stromingen. Deze afname wordt echter tenietgedaan door de toename van de getijdenstromingen.

Uit de simulaties met het SWAN-model blijkt, dat de toegenomen waterdiepte boven de plaat, leidt tot een afname van de bodemschuifspanningen door de golven, als de Galgeplaat als geheel wordt bekeken. Bij de oostelijke- en hogere plaatdelen zorgt de plaatverlaging voor een kleine toename van de bodemschuifspanningen. Dit komt doordat de golven minder energie verliezen boven de andere plaatdelen.

Wanneer de uitkomsten van beide modellen met elkaar worden gecombineerd, leidt dit tot de volgende twee conclusies:



- Voor de oostelijke en hogere plaatdelen zorgt de toegenomen waterdiepte boven de plaat voor een versnelling van de plaatdaling.
- Voor de lagere en middelhoge plaatdelen lijkt er geen grote verandering op te treden in de stroomsnelheden, echter de bodemschuifspanning veroorzaakt door de golven neemt af.

Dit resulteert in een vertraging van de plaatdaling voor deze plaatdelen. Aangezien veruit het grootste oppervlakte deze plaathoogte kent, zorgt de toegenomen waterdiepte boven de plaat voor vertraging van de plaatdaling van de gehele Galgeplaat.

## 8.2 Aanbevelingen

### 8.2.1 Voorspellingsmethode om plaatverlaging nauwkeurig te kunnen voorspellen

Uit de data-analyse komt een duidelijke correlatie naar voren tussen de opgetreden sedimentatie/erosie en de opgetreden weersomstandigheden. De windrichtingen hebben ieder hun eigen specifieke trend. In de periode 1994-2001 kwamen minder heftige weersomstandigheden voor. Dit maakt het lastig om een algemene trend te voorspellen voor de plaatdaling. Extreme weersomstandigheden zorgen voor extreme plaatdaling. Een voorbeeld hiervan is de periode in het begin van 1990. Er traden toen drie extreme stormen vlak na elkaar op, wat resulteerde in een significante plaatdaling. De lineaire trend die de plaatdaling beschrijft over de periode 1987-2001 wordt hierdoor sterk beïnvloed.

Voor de voorspelling van de plaatdaling tot 2050, kan een lineaire trend uit de periode 1987-2001 gebruikt worden. Dan wordt er van uitgegaan dat de extreme weersomstandigheden van begin 1990, in de periode

tot 2050 meerdere malen zullen optreden. Het is echter maar de vraag of dat ook daadwerkelijk gebeurt.

De weersomstandigheden worden al een lange tijd zeer frequent gemeten door het KNMI. Op basis van deze gegevens kan een goed windklimaat worden bepaald. Voor elke specifieke windsnelheid per windrichting kan een kans van voorkomen worden bepaald. Deze kansen van voorkomen in combinatie met de sedimentatie-/erosiepatronen, vastgesteld in dit rapport, kunnen een goede voorspelling geven voor de plaatdaling in een bepaalde periode.

### 8.2.2 Plaatverlaging compenseren met een plaatsuppletie

Tijdens dit onderzoek is met deskundigen gesproken over methodes om de plaatverlaging te compenseren. Er zijn drie mogelijkheden:

1. De natuurlijke plaatopbouw versterken.
2. De erosie van de plaat verminderen.
3. Direct het zandvolume van de plaat vergroten, door zand bovenop de plaat aan te brengen.

De laatste methode viel tijdens de gesprekken al snel af, omdat het aanbrengen van zand bovenop de plaat de kokkelpopulatie niet ten goede komt. Daarnaast beïnvloedt het ook de samenstelling van het zand op de plaat. Voor de andere twee mogelijkheden kunnen de resultaten van dit onderzoek hulp bieden.





### 8.2.2.1 Versterken van de natuurlijke plaatopbouw

Uit dit onderzoek blijkt dat na de komst van de stormvloedkering, een noordwestelijke windrichting, nog wel degelijk voor sedimentatie op de Galgeplaat kan zorgen. Deze is echter niet voldoende om de erosie uit de andere windrichtingen te niet te doen. Maar de plaatopbouw is nog wel aanwezig en deze methode is dus mogelijk. De stroomsnelheidsafname door de stormvloedkering is de reden dat er geen significante plaatopbouw meer voorkomt.



*Figuur 8.1 Voorbeeld van plaat suppletie die de natuurlijke plaatopbouw versterkt.*

Figuur 8.1 toont een voorbeeld hoe een versterking van de natuurlijke plaatopbouw verwezenlijkt kan worden. De rode lijnen stellen strekdammen voor. Deze strekdammen vangen de vloedstroming die vlak voor de plaat naar de geulen afbuigt (zie figuur 7.1). De strekdammen zullen niet hoger zijn dan de plaat zelf. Doordat de strekdammen dicht bij elkaar komen naarmate zij de plaat naderen, neemt het natte stroomoppervlak sterk af. Deze afname zorgt voor een toename van de stroomsnelheid, dit zal nog versterkt worden door de windgedreven stroming. Doordat de brandingszone zich tussen de strekdammen bevindt, zal dit resulteren in een groot plaatwaarts sedimenttransport. Hierdoor wordt de aanloop naar de plaat, het gebied tussen de strekdammen, mogelijk aangetast door erosie. Deze kan gecompenseerd worden door een suppletie van zand op die plaats. Het grote voordeel van deze methode is dat het gaat om een versterkte natuurlijke opbouw van de plaat. Hierdoor zal de zandsamenstelling van de plaat slechts gering en geleidelijk veranderen.

Met behulp van computersimulaties en een mogelijke proefsuppletie kan verder onderzoek naar de effectiviteit en de haalbaarheid van deze mogelijkheid gedaan worden.



### 8.2.2.2 De erosie van de plaat verminderen

De plaatdaling kan worden verminderd door de golfaanval weg te houden van plaat. Uit de data-analyse blijkt dat de zuidwestelijke windrichting de grootste erosie veroorzaakt. Een plaatsuppletie aan de westzijde lijkt dan ook zinnig om de golfaanval tegen te houden. Bovendien is het niet uitgesloten dat mogelijk zandverlies van de plaatsuppletie uiteindelijk op de plaat terechtkomt. Deze plaatsuppletie wordt uitgevoerd in de zomer van 2007, zie figuur 8.2. Het wordt een proef, om te kijken wat effect is van deze methode op opheffing dan wel vertraging van de plaatverlaging. Van zeer groot belang is de monitoring bij deze proefsuppletie. Niet alleen om de reductie van de golfaanval te bepalen, maar ook om te zien waar het suppletiezand uiteindelijk terechtkomt.

### 8.2.3 Hervatten van de hoogtemetingen

Uit dit onderzoek blijkt hoe waardevol de hoogtemetingen op de Galgeplaat zijn geweest. Niet alleen op het lokaal niveau van de Galgeplaat, maar ook voor het gehele bekken wordt er meer inzicht verkregen in de gevolgen van de Zandhonger. Doordat de morfologie van het Oosterscheldebekken uit balans is, is het gemakkelijker om bepalende processen in plaatopbouw en -afbraak vast te stellen. Dit komt vooral doordat het systeem minder complex wordt. Zo kende de Galgeplaat de afgelopen 20 jaar een plaatdaling. Terwijl een systeem dicht bij een evenwichtssituatie zowel plaatafbraak als plaatopbouw laat zien. In zo'n systeem wordt het lastiger om verschillende trends te ontdekken uit een data-analyse.



*Figuur 8.2 De proefsuppletie die wordt uitgevoerd op de Galgeplaat in de zomer van 2007*



Aan de hand van dit onderzoek is er meer duidelijkheid gekomen over de plaatafbrekende processen. Hiermee kunnen maatregelen bedacht worden om de negatieve effecten van de Zandhonger te bestrijden en daarnaast zal uit wetenschappelijk oogpunt interessant zijn om meer inzicht in deze morfologische processen te vergaren.

Wat levert een mogelijke herstart van hoogtemetingen op de Galgeplaat nog extra op? Morfologische systemen kennen zeer uiteenlopende tijdschalen. In dit onderzoek komt naar voren dat het bekken langzaam verandert naar een nieuwe evenwichtssituatie. Om deze transformatie goed te kunnen bestuderen zijn de hoogtemetingen van grote waarde. De tijdschaal van de transformatie van het bekken naar een nieuw evenwicht, is vele malen langer dan de bestudeerde periode 1983-2001. De plaatverlaging van de Galgeplaat verandert continu qua karakter. Doormiddel van een data-analyse van de hoogtemetingen kan de plaatverlaging beter voorspeld worden. De belangrijkste reden om de hoogtemetingen nieuw leven in te blazen is om vroeg en effectief te kunnen reageren. Zowel voor het behoud van de natuurwaarde van de Oosterschelde als voor de veiligheid van de dijkringen die de Oosterschelde omringen is dit van wezenlijk belang.

Hierboven werden de hoogtemetingen al van grote waarde genoemd. Van onschatbare waarde worden ze als bij hervatting het aantal meetpunten werd uitgebreid met:

1. Hoogtemetingen op het midden van de Galgeplaat, zodat het zandtransport over de plaat beter in beeld kan worden gebracht.
2. Hoogtemetingen net voorbij de laagwaterlijn richting geul, waardoor herverdeling van het sediment beter in beeld kan worden gebracht.

3. De hoogtemetingen net voor en net na extreme weersomstandigheden uitvoeren. Hiermee kan ook een beter beeld worden verkregen van de effecten van een sluiting van de kering.

### **8.2.4 Invloed van getijdenslag tijdens extreme weersomstandigheden**

Uit dit onderzoek blijkt dat de getijdenslag lastig te gebruiken is als onderzoeksparameter. Dit komt doordat de meest voorgekomen meetperiode 2-3 weken is, waardoor de variatie tussen doortij en springtij verdwijnt. Dit is een van de redenen dat de getijdenslag niet is gebruikt als onderzoeksparameter in dit onderzoek. Toch wordt er wel degelijk een verband vermoed tussen de opgetreden sedimentatie/erosie en de opgetreden getijdenslag tijdens extreme weersomstandigheden. Verder onderzoek moet worden uitgevoerd naar het verschil in erosie tijdens stormen die plaats vinden tijdens doortij dan wel springtij. Hiermee kan een beter beeld verkregen worden van de invloed van de sluiting van de kering.

### **8.2.5 Een verbetering proces-modulering**

In dit onderzoek is gewerkt met twee verschillende modellen, het WAQUA-model voor het simuleren van de getijden- en de windgedreven stroming en het SWAN-model voor het simuleren van de verschillende golfvelden. Er is niet een combinatie gemaakt tussen deze twee modellen, hierdoor zijn de golfgedreven stromingen niet meegenomen in het sedimenttransport. Deze kunnen van bepalende invloed zijn op lokaalniveau wat betreft het sedimenttransport. Vandaar dat een combinatie van deze twee modellen een verbetering van het systeem inzicht kan geven. Verder onderzoek naar een verbeterde procesmodulering is aan bevolen.





## 9 Literatuurlijst

d'Angremond, K, Januari 2003, Inleiding waterbouwkunde, collegedictaat CT2320.

Battjes, J.A., September 2001, Korte golven, collegedictaat CT4320, pagina: 4-1--6-24.

Battjes, J.A., April 2002, Stroming in waterlopen, collegedictaat CT3310, pagina: 105-125.

Bok de C., , Augustus 2001, Long-term Morphology of The Eastern Scheldt, Werkdocument RIKZ/2002.108x

Delft University of Technology and Alkyon Hydraulic Consultancy & Research bv., September 2004, Coastal Morphology & Coastal Protection, collegedictaat T5309, September 2004

Dekking F.M., Kraaikamp C., Lopuhaä H.P., Meester L.E., Autumn 2003, Kanstat, Probability and Statistics for the 21<sup>st</sup> Century Part 1, , pagina: 57-177

Dekking F.M., Kraaikamp C., Lopuhaä H.P., Meester L.E., Autumn 2003, Kanstat, Probability and Statistics for the 21<sup>st</sup> Century Part 2, , pagina: 171-199

De Vriend, H.J., Dronkers, J., Stive, M.J.F., Van Dongeren, A and Wang, J.H., Januari 2002, Coastal inlets and tidal basins, collegedictaat CT5303, pagina: 4.1-6.24.

Geurts van Kessel, A.J.M., December 2004, Verlopend tij, Rapport RIKZ/2004.028

Geurts van Kessel, A.J.M., Kater B.J., Prins T.C., 2003, Veranderende draagkracht van de Oosterschelde voor kokkels, Rapport RIKZ/2003.043

Hibma, A., Morphodynamic modelling of estuarine channel-shoal systems, 2004

Holthuijsen, L.H., Januari 2004, Windwaves, collegedictaat CT5316

Jonkers W.,1988, Sedimenttransport, werkdocument GWAO-92.809X

Kohsiek L.H.M., Mulder J.P.M., Louters T., Berden F., Februari 1987, De Oosterschelde naar een nieuw onderwaterlandschap, Eindrapport Project Geomor

Lambeek J., Juli 2006, Ontwerp Pilot Zandsuppeltie Oosterschelde, rapport nr: A1647

Louters T., Mulder J.P.M., Postma R., Hallie F.P., July 1991, Changes in coastal morphological processes due to the closure of tidal inlets in the SW Netherlands, Journal of Coastal Research Vol. 7, No. 3

Minister van Verkeer en Waterstaat, Augustus 1973, Rapport Commissie Oosterschelde, 1974

Ministerie van Landbouw, September 2005, Natuurprogramma Westerschelde, Natuur en Voedselkwaliteit.



Mulder J.P.M., Louters T., 1994, Chanfes in basin geomorphology after implementation of the Oosterschelde estuary project, *Hydrobiologia* 282/283: 29-39 1994

Oosterlaan W.M.A., Zagers L.M., 1995, Veranderingen in de hydrodynamiek en de morfologie van het Oosterscheldebekken

Schiereck G.J., 2004. Bed, bank and shore protection,

Stelling G.S., Booij N., Computational modelling flow and transport, Augustus 1999

Ten Brinke W.B.F., Dronkers J., Mulder J.P.M., 1994, Fine sediments in the Oosterschelde tidal basin before and after partial closure, *Hydrobiologia* 282/283: 41-56 1994

M.L.E.B. van der Hoeven, Augustus 2006, Literatuuronderzoek naar de achteruitgang van de plaathoogte van de Galgeplaat

Van der Weck A.W., Tank F.T.G., Januari 1995, Bodemligging Galgeplaat Oosterschelde 1987-1994,

Van Maldegem D.C., Van Pagee J.A., Maart 2005, Zandhonger Oosterschelde, Werkdocument RIKZ/ZDA/2005.802w

Vrijling J.K., Van Gelder P.H.A.J.M., Augustus 2002, Probabilistic design in hydraulic engineering, college dictate CT5310



---

## Dankwoord

Tijdens de 9 maanden dat er aan het afstudeeronderzoek is gewerkt, hebben vele personen een bijdrage geleverd. Aan allen is de auteur dank verschuldigd. Met name:

- Prof Dr. Ir M.J.F. Stive als hoofdbegeleider van de Technische Universiteit Delft;
- Dr. Ir. Z.B. Wang als dagelijksbegeleider van de Technische Universiteit Delft;
- Dr. Ir. M. Zijlema als begeleider van de Technische Universiteit Delft;
- Drs. Eric van Zanten als dagelijks begeleider van het RIKZ in Middelburg;
- Ir. C. Israël en Drs. D. de Jong als kritische lezers van dit afstudeerrapport;
- J.R. Hendriks en Ir. P. Lievensse voor hun inspanningen bij de computersimulaties met de computermodellen SWAN en WAQUA;
- Cees Joossen voor het uitleggen van de procedure van de hoogtemetingen tijdens het veldwerk.
- Drs. R.E.C.M. van der Hoeven voor het kritisch lezen van het afstudeerrapport;
- B. Kiers voor zijn bijdrage aan het onder controle houden van de miljoenen meetgegevens .

