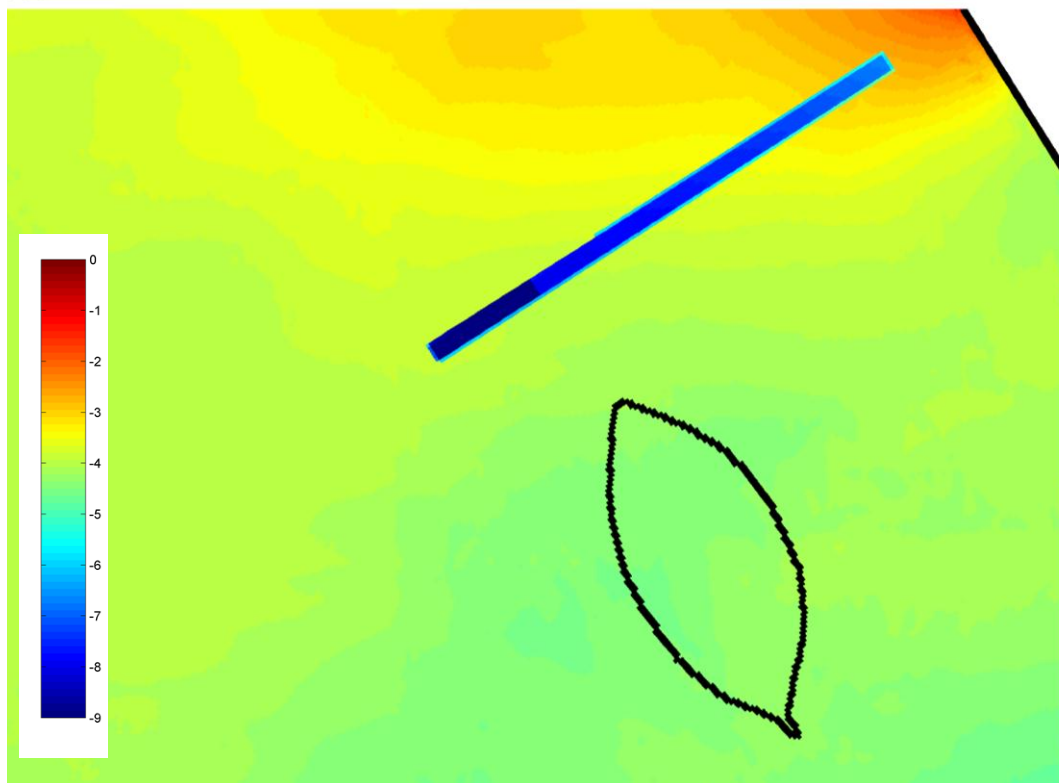




## Marker Wadden

### Resultaten Slibberekeningen

Natuurmonumenten



22 mei 2013

Eind concept

BA8757-103-104

**HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.**  
**RIVERS, DELTAS & COASTS**

Barbarossastraat 35  
Postbus 151  
6500 AD Nijmegen  
(024) 328 42 84 Telefoon  
(024) 360 54 83 Fax  
info@nijmegen.royalhaskoning.com E-mail  
www.royalhaskoningdhv.com Internet  
Amersfoort 56515154 KvK

|                        |                                                       |
|------------------------|-------------------------------------------------------|
| Documenttitel          | Marker Wadden<br>Resultaten Slibberekeningen          |
| Verkorte documenttitel |                                                       |
| Status                 | Eind concept                                          |
| Datum                  | 22 mei 2013                                           |
| Projectnaam            | Marker Wadden                                         |
| Projectnummer          | BA8757-103-104                                        |
| Opdrachtgever          | Natuurmonumenten                                      |
| Referentie             | BA8757-103-104/ LW-AF20130750/HM<br>/903718/VVDM/Nijm |

|                  |                                                                                                 |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Auteur(s)        | Thomas Vijverberg, Tom van den Berg                                                             |
| Collegiale toets | Pascal Boderie (Deltares)                                                                       |
| Datum/paraaf     | 22 mei 2013  |
| Vrijgegeven door | Eltjo Ebbens                                                                                    |
| Datum/paraaf     | 22 mei 2013                                                                                     |

## INHOUDSOPGAVE

|                                          | Blz.      |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INLEIDING</b>                       | <b>1</b>  |
| 1.1 Aanleiding                           | 1         |
| 1.2 Doel van de studie                   | 1         |
| 1.3 Doel van de rapportage               | 1         |
| 1.4 Leeswijzer                           | 2         |
| <b>2 MODELOPZET EN MODELONTWIKKELING</b> | <b>3</b>  |
| 2.1 Methode berekeningen grof rooster    | 3         |
| 2.1.1 Model                              | 3         |
| 2.1.2 Scenarios                          | 3         |
| 2.2 Methode berekeningen fijn rooster    | 6         |
| 2.2.1 Model                              | 6         |
| 2.2.2 Scenarios                          | 7         |
| 2.3 Modelontwikkeling                    | 9         |
| <b>3 RESULTATEN MODELBEREKENINGEN</b>    | <b>11</b> |
| 3.1 Scenario's grof rooster              | 11        |
| 3.1.1 Aanslibbing en erosie              | 11        |
| 3.1.2 Stroming                           | 14        |
| 3.1.3 Effect op slibconcentratie         | 14        |
| 3.2 Scenario's fijn rooster              | 16        |
| 3.2.1 Aanslibbing en erosie              | 16        |
| 3.2.2 Stroming                           | 20        |
| 3.3 Overige onderwerpen                  | 20        |
| 3.3.1 Slibbom                            | 20        |
| 3.3.2 Aantal fracties in het slibmodel   | 23        |
| <b>4 CONCLUSIES</b>                      | <b>26</b> |
| <b>REFERENTIES</b>                       | <b>27</b> |

## BIJLAGEN

- A. Aanslibbing op observatiepunten
- B. Effect op stroombeeld – berekeningen met grof rooster
- C. Effect op stroombeeld – berekeningen met fijn rooster
- D. Bodemschuifspanningen stationaire windberekeningen

## **1 INLEIDING**

### **1.1 Aanleiding**

Natuurmonumenten wil een belangrijke bijdrage leveren aan herstel en ontwikkeling van het ecosysteem van het Markermeer. Daartoe heeft zij het concept van Marker Wadden geïnitieerd.

Marker Wadden is een programma waarbinnen een combinatie van maatregelen boven en onder water een substantiële kwaliteitsverbetering van het ecosysteem dient te bewerkstelligen. Dit programma zal gefaseerd worden gerealiseerd, waarbij de verwachting is dat de eerste 10 jaar (de looptijd van het bestemmingsplan Marker Wadden) een oppervlakte van orde-grootte 1500 hectare natuur kan worden gerealiseerd. In het eindbeeld (2050) is sprake van een oppervlakte van 10.000 hectare. (water, wadden en moeras). De heldere randen, gradiënt in slib, land-waterzones van formaat en versterkte ecologische verbindingen zijn bepalend voor een verbetering van het ecosysteem. De maatregelen van Marker Wadden zijn in hun onderlinge samenhang effectief en doeltreffend om de beoogde systeemverbetering tot stand te brengen.

Marker Wadden bestaat uit een bovenwater- en onderwaterlandschap. Het onderwaterlandschap bestaat uit zandwinputten en een geulenstelsel waarin slib wordt ingevangen. Met de bouwstoffen uit de zandwinput en het slibgeulenstelsel worden vervolgens het bovenwaterlandschap in de vorm van natuureilanden 'gebouwd'.

Dit bovenwaterlandschap bestaat uit slikplaten, rietvelden, vloedbossen en stranden en zal met een rif tegen golfslag worden beschermd. Aan de diepere Lelystadse zijde komt vooral voedselrijk moeras. Aan de kant van het ondiepere Enkhuizerzand komen ondiepe watervlaktes met waterplantenvegetaties en hier en daar zand- en schelpenbanken.

Om de effecten van het concept Marker Wadden te analyseren op de slibdynamica en slibinvang is gebruik gemaakt van het slibmodel van het Markermeer. Dit model is ontwikkeld door Deltares in 2008 en wordt voor verschillende doeleinden met betrekking tot het Markermeer ingezet. Voorliggend rapport is het resultaat van de initiële slibberekeningen die eind 2012 / begin 2013 zijn uitgevoerd ten behoeve van het project Marker Wadden.

### **1.2 Doel van de studie**

Deze studie heeft een aantal doelen:

- Bepalen hoe het onderwaterlandschap het beste vormgegeven kan worden, zodanig dat de slibvang maximaal is.
- Bepalen hoeveel slib er potentieel ingevangen kan worden.
- Bepalen van het effect van Marker Wadden op de omgeving in het Markermeer.

### **1.3 Doel van de rapportage**

Het doel van deze rapportage is het beschrijven van de modelopzet en modelontwikkeling ten behoeve van deze studie voor het project MarkerWadden.

Belangrijk hierbij is dat vastligt wat de uitgangspunten waren voor de studie, hoe de modelschematisaties zijn uitgevoerd en welke andere keuzes zijn gemaakt, zodat uiteindelijk reproduceerbaar is wat er is gedaan.

Daarnaast beschrijft dit rapport de modeluitkomsten en conclusies. Deze uitkomsten zijn in twee workshopen (11 januari 2013 en 2 april 2013) gepresenteerd. Deze rapportage dient als totaal overzicht van de uitkomsten van de slibberekeningen.

## **1.4 Leeswijzer**

Hoofdstuk 2 beschrijft de modelopzet en modelontwikkeling. Er zijn zowel berekeningen uitgevoerd met een grof rekenrooster (paragraaf 2.1) als fijn rekenrooster (paragraaf 2.2). Per paragraaf is aangegeven welke scenario's (ontwerpen van Marker Wadden) zijn doorgerekend. Daarnaast is enige modelontwikkeling uitgevoerd voor de berekeningen met het fijne rooster. Dit is beschreven in paragraaf 2.3.

Hoofdstuk 3 behandelt de resultaten van de berekeningen. Ook hier is onderscheid gemaakt tussen de berekeningen met het grove rooster (paragraaf 3.1) en fijne rooster (paragraaf 3.2).

Deze rapportage wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen in hoofdstuk 4.

## 2 MODELOPZET EN MODELONTWIKKELING

### 2.1 Methode berekeningen grof rooster

#### 2.1.1 Model

Het basismodel voor de berekeningen met het grove rooster is het slibmodel dat in het kader van eerdere studies voor het Markermeer is ontwikkeld (Deltares, 2008) en binnen NMIJ is gevalideerd met behulp van de data van het veldexperiment luwtestructuur (Deltares, 2012). Dit model heeft de volgende modellentrein:



De stroming en golven worden berekend met een gekoppeld Delft3D flow en wave model. De resultaten hiervan worden offline in delwaq ingebracht, waarmee de slibdynamica wordt berekend. De output wordt met behulp van beschikbare matlab scripts gemaakt.

Het grove grid heeft een roosterresolutie van ongeveer 150 – 200 m. Als bodem wordt een bathymetrie van het jaar 2006 gebruikt, zoals dat bij de opzet van het Markermeer slibmodel beschikbaar is gesteld. Ook voor de windbelasting wordt het jaar 2006 als basis genomen. Van dat jaar is van het windstation Berkhout winddata (snelheid en - richting, uurwaarden) beschikbaar.

Als waterpeil wordt een streefpeil opgelegd. Dit betekent in de winter een waterpeil van NAP -0,4 m en in de zomer een waterpeil van NAP -0,2 m. Via de sluizen in de Houtribdijk wordt dit peil in het model opgelegd. Wind effecten zorgen voor een waterstandsdynamiek over het gehele meer.

Als referentiescenario (= start scenario) is de huidige situatie genomen, scenario nr SC04.

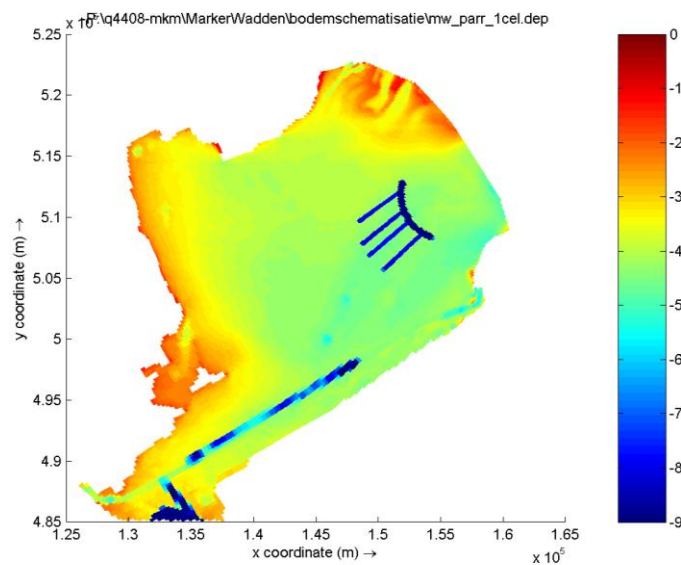
#### 2.1.2 Scenarios

Met het grove model zijn vervolgens model scenario's doorgerekend met verschillende ontwerpen van het onderwaterlandschap (geulen) en bovenwaterlandschap (moeras). Het onderwaterlandschap is geschematiseerd in het bodembestand van het model: op basis van het ontwerp van de geulen zijn de bodempunten aangepast.

Het bovenwaterlandschap is geschematiseerd met behulp van 'thin dams' (dunne dammen). Dit betekent dat de cellen binnen dit gebied afgeschermd worden en dus in feite niet meer meedoen met de berekeningen. Water en slib kan niet meer naar of van dit gebied worden getransporteerd. Dit betekent ook dat er geen interactie plaatsvindt tussen het bovenwaterlandschap en het Markermeer: eventuele geulen zijn niet geschematiseerd. Door middel van deze manier van schematiseren wordt de grootschalige transporten beïnvloed door het bovenwaterlandschap. Er is in deze fase van de berekening uitgegaan van een bovenwaterlandschap van 500 ha. Dit is de eerste fase van Marker Wadden.

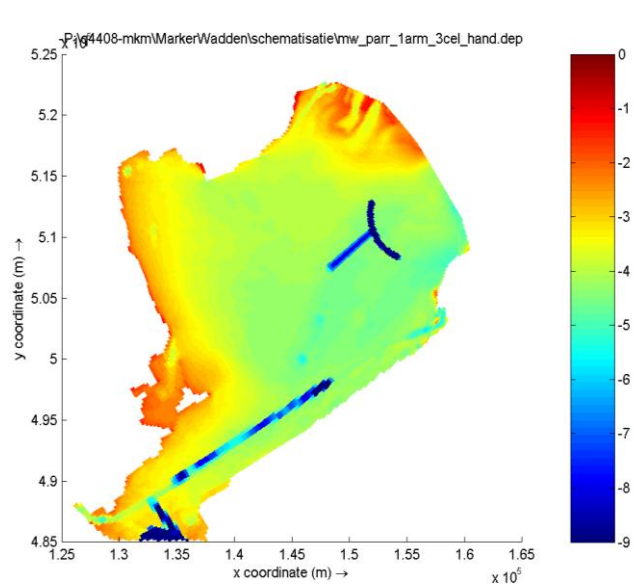
De volgende scenario's zijn doorgerekend met het grove model, met bijbehorende codes die corresponderen naar de Delft3D simulaties.

### MW01



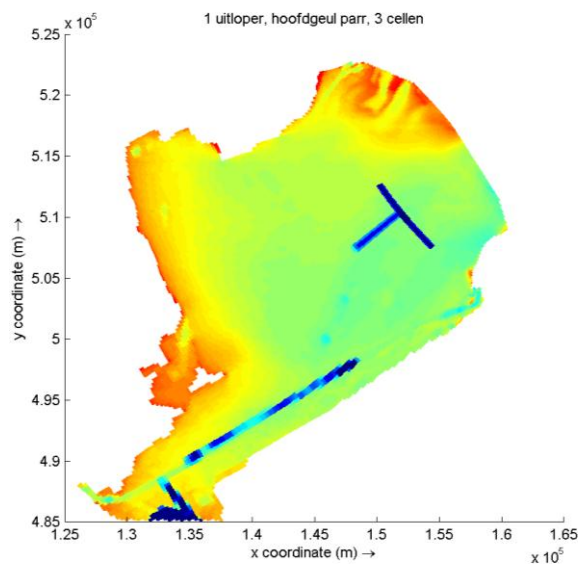
**Figuur 2.1: Scenario MW01 - Kenmerken: hoofdgeul: 5,9 km gekromd, 4 zijtakken: 4,0 km, Vergraving: 23 miljoen m<sup>3</sup>**

### MW03



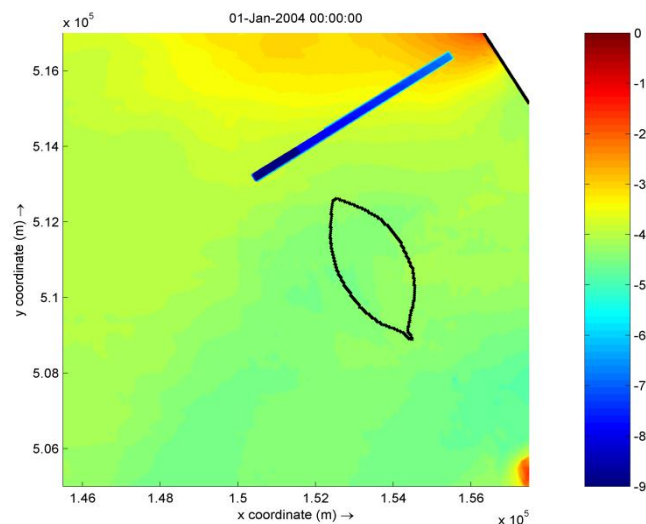
**Figuur 2.2: Scenario MW03 - Kenmerken: Hoofdgeul: 5,9 km gekromd, 1 zijtak breed: 4,8 km, Vergraving: 19 miljoen m<sup>3</sup>**

## MW04



**Figuur 2.3: Scenario MW04 - Kenmerken: Hoofdgeul: 6,7 km recht, 1 zijtak breed: 4,8 km, Vergraving: 18 miljoen m<sup>3</sup>**

## MW15 (2<sup>e</sup> set sommen)



**Figuur 2.4: Scenario MW15 - Kenmerken: Geul: 6,1 km, Diepte geul: 4 m t.o.v. omgeving, Uiteinde: 10 m t.o.v. omgeving, Vergraving: 7,3 miljoen m<sup>3</sup>**

Dit scenario (MW15) is doorgerekend in de tweede set berekeningen na de eerste workshop. Alle varianten zijn vanaf toen met een fijn rooster doorgerekend. Voor de vergelijking is variant 1 (=MW13+14) ook nog met het grove rooster doorgerekend.



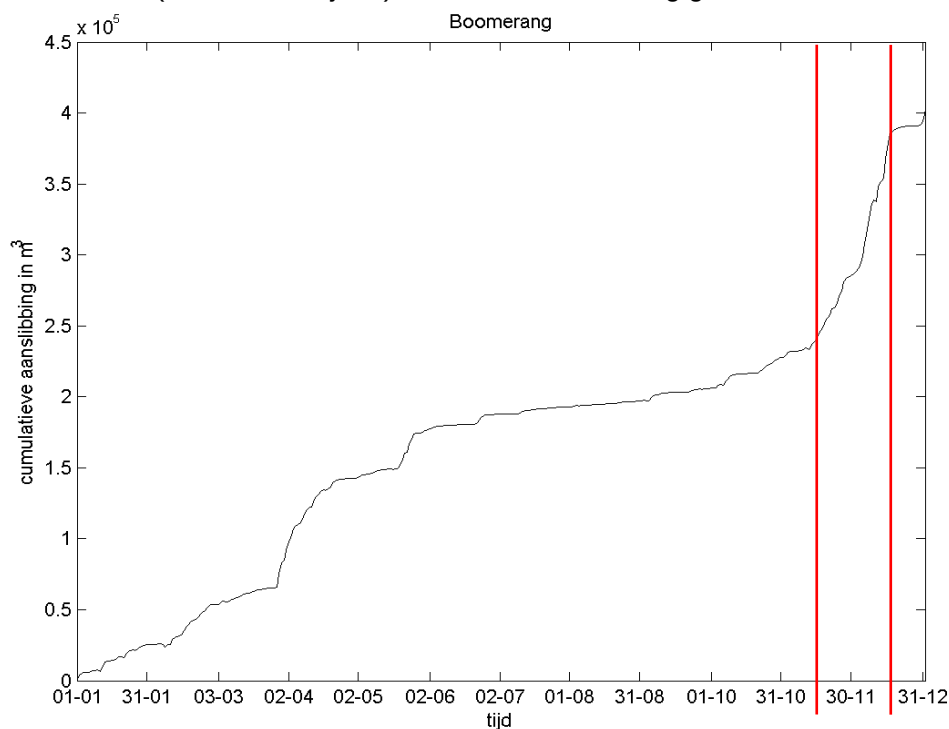
## 2.2 Methode berekeningen fijn rooster

### 2.2.1 Model

Omdat de geulen in het grove rooster maar binnen een paar rekencellen worden geschematiseerd is het beter om te rekenen met een verfijnd rooster. Hierdoor zal de stroming rondom het onderwaterlandschap beter worden gesimuleerd en zal de aanslibbing realistischer zijn.

De volgende modelaanpassingen zijn uitgevoerd op de basisschematisatie (zoals beschreven in sectie 2.1.1.):

- Het rooster in het gehele Markermeer is verfijnd met een factor 4, zowel in de m als n richting. Dit betekent dat er 16 keer zoveel rekencellen zijn. De resolutie van het rooster is 40 – 50 m. De rekentijdstap is verkleind tot 1 min (ipv 2,5 min).
- De bodem is naar het nieuwe rooster geïnterpoleerd vanuit een extern 5x5 m puntenbestand. Dit puntenbestand dient ook als basis voor het SC04 model.
- Met het fijne rooster wordt maar een deel van het jaar 2006 doorgerekend, omdat anders de rekentijd te groot wordt. Er is gekozen om dat deel van het jaar door te rekenen dat het meeste aandeel heeft in de aanslibbing van de geulen. Op basis van de modelberekeningen met het grove rooster is bepaald welk deel van het jaar dat is. Figuur 2.5 geeft de aanslibbing voor het hele jaar weer in de geul langs het bovenwaterlandschap (Boomerang). Hierin is te zien dat de periode 16 november tot 14 december (tussen rode lijnen) de meeste aanslibbing geeft.

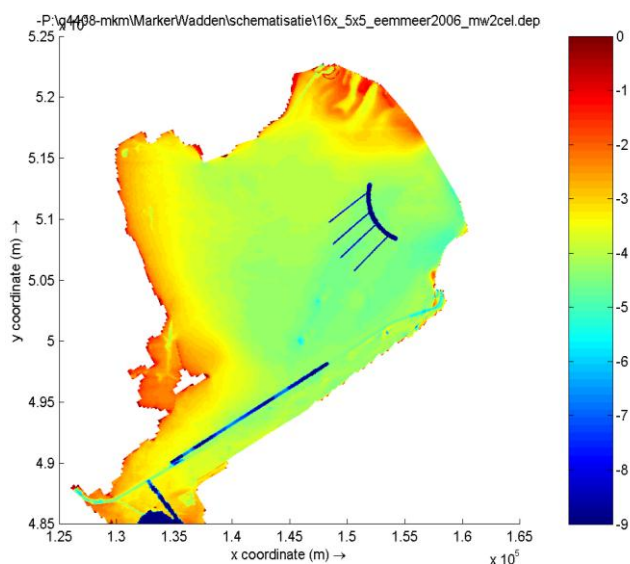


**Figuur 2.5: Aanslibbing in de 'Boomerang', gekromde geul. Meest significante periode is weergegeven binnen de rode lijnen. Deze periode is gebruikt voor de berekeningen met het fijne rooster**

## 2.2.2 Scenarios

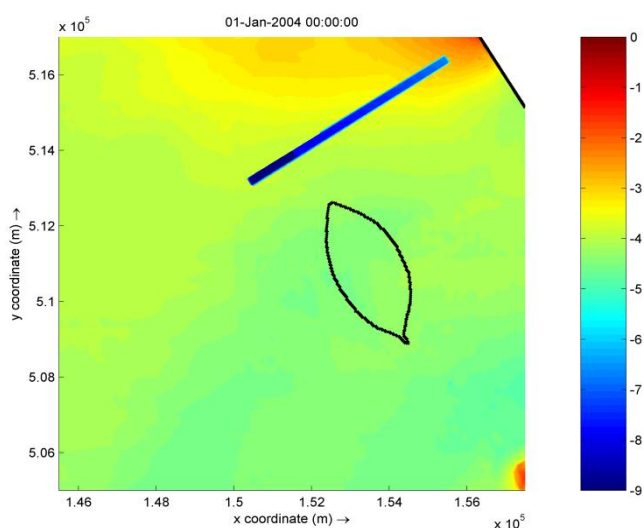
De volgende scenario's zijn doorgerekend met het fijne model, met bijbehorende codes die corresponderen naar de Delft3D simulaties.

MW05 (= MW01 met fijne rooster, in 1e set sommen)



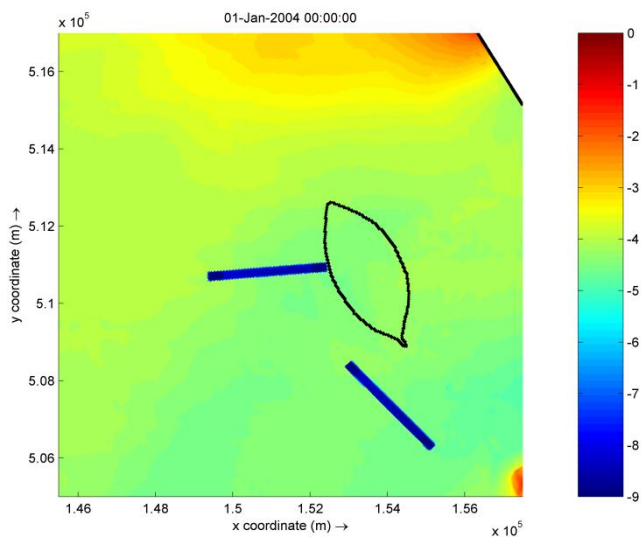
**Figuur 2.6: Scenario MW05 - Kenmerken: Hoofdgeul: 5,9 km gekromd, 4 zijtakken: 4,0 km, Vergraving: 17 miljoen m<sup>3</sup>**

Variant 1 (=MW13+14)



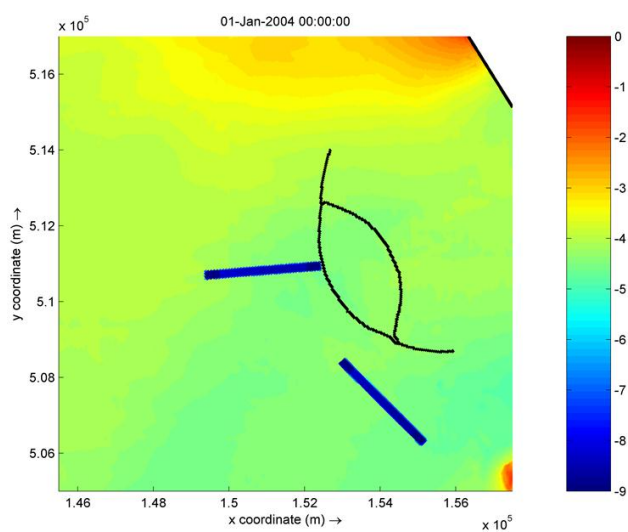
**Figuur 2.7: Scenario Variant 1 - Kenmerken: Geul: 6,1 km, Diepte geul: 4 m t.o.v. omgeving, Uiteinde: 10 m t.o.v. omgeving, Vergraving: 7,3 miljoen m<sup>3</sup>**

### Variant 2a (=MW18+19)



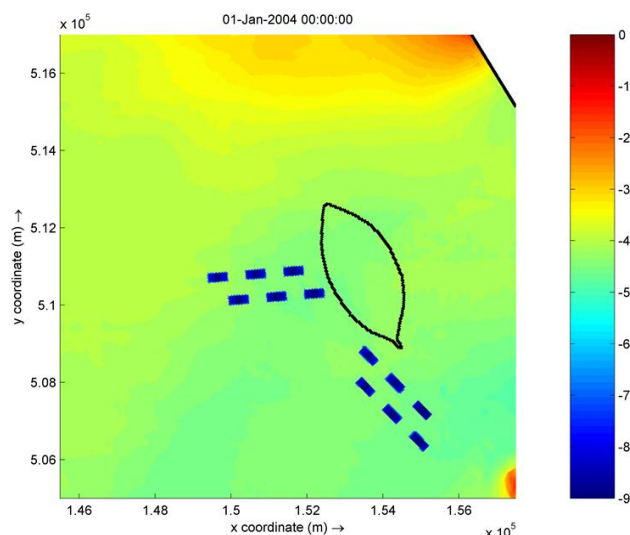
**Figuur 2.8: Scenario Variant 2a - Kenmerken: 2 geulen: 3,1 km, Diepte geulen: 4 m t.o.v. omgeving, Uiteinden: 10 m t.o.v. omgeving, Vergraving: 7,3 miljoen m3**

### Variant 2b (=MW20+21)



**Figuur 2.9: Scenario Variant 2b - Kenmerken: 2 geulen: 3,1 km, Diepte geulen: 4 m t.o.v. omgeving, Uiteinden: 10 m t.o.v. omgeving, Vergraving: 7,3 miljoen m3**

### Variant 3 (=MW22+23)



**Figuur 2.10: Scenario Variant 3 - Kenmerken: 12 Putten: 570 x 280m, Diepte: 4 m t.o.v. omgeving, Midden: 10 m t.o.v. omgeving, Vergraving: 7,6 miljoen m3**

## 2.3 Modelontwikkeling

De bij aanvang van deze studie beschikbare versie 3 van het slibmodel (v3.55) voldoet niet voor berekeningen met het fijne rooster. Dat model heeft te weinig werkgeheugen. Er was dus geen model beschikbaar om de gewenste geometrie van de geulen goed te kunnen schematiseren. Daarom is de code van het gevalideerde slibmodel opnieuw gecompileerd met een zogenaamde 64-bits versie voor Linux. Met deze nieuwe versie (slibmodel versie 4, FlowWave versie V5.01) kan het sterk verfijnde modelrooster zonder technische problemen doorgerekend worden.

Inhoudelijk is er tussen versie 3 en 4 het een en ander gewijzigd. De onderliggende stroming- (FLOW) en golf- (SWAN) modellen zijn niet gewijzigd. De module WAVE, die interactie tussen golven en stroming afhandelt, is wel gewijzigd. De fysica rondom de overdacht van golven op (rest)stroming is conceptueel gewijzigd. De nieuwe code wordt door de fysici van Deltares en TUD als verbetering aangemerkt. Het betreft dus geen software bug maar een wijziging van inzicht in de manier waarop de hydrodynamica en de golfmodule gekoppeld zijn.

Bij overgang van versie FlowWave 3.55 naar 5.01 blijken de berekende stroomsnelheden (significant) groter te zijn. Daarmee gebruiken we voor deze studie dus een versie van het slibmodel die inhoudelijk afwijkt van de versie die in 2012 gekalibreerd is (zie de tabel hieronder).

De validatie studie van het slibmodel die in 2012 in NMIJ is uitgevoerd constateerde dat de door het model berekende stroming vooral in het midden van het meer (rondom meetpunt FL42) niet optimaal was. Mede naar aanleiding van die constatering zijn bovengenoemde wijzigingen in de WAVE module van Delft3D aangebracht. Hernieuwde validatie van de stroombeelden is gewenst en zal moeten uitwijzen of de

geïmplementeerde verbeteringen ook daadwerkelijk leiden tot een betere gelijkheid tussen model en gemeten stroomsnelheden (ADCP metingen op FL42-Midden Markermeer).

**Tabel 2.1: Overzicht verschillende versies slibmodel**

| Versie<br>slib-<br>model | Jaar | Versie<br>D3D                 | Model karakteristiek                                               | Validatie (waterstand, golfhoogte,<br>stroomsnelheid, slibgehalte) |                                 |                                                           |
|--------------------------|------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                          |      |                               |                                                                    | hele meer                                                          | NH kust                         | putten                                                    |
| 1.0                      | 2007 | Flow 3.55                     | - Fetch benadering voor golven<br>(Bretneider)                     | Ja.<br>meetpaal<br>2008-2009 en<br>Remote<br>sensing               | Nee                             | Deels<br>(aanslibbing<br>Vaargeul<br>Amsterdam<br>Lemmer) |
| 2.0                      | 2010 | Flow 3.55                     | - Spectrale golfmodellering<br>(SWAN)<br>- SWAN en Flow ontkoppeld | Ja<br>meetpaal<br>2011-2012                                        | Ja rondom<br>luwtestructu<br>ur | Nee                                                       |
| 3.0                      | 2011 | Flow-Wave<br>3.55             | - inc. golf gedreven stroming<br>- SWAN en Flow gekoppeld          | Ja<br>meetpaal<br>2011-2012                                        | Ja rondom<br>luwtestructu<br>ur | Nee                                                       |
| 4.0                      | 2012 | Flow-Wave<br>5.01<br>(64bits) | -als 3.0<br>-verbetering WAVE                                      | Nee                                                                | Nee                             | Nee                                                       |

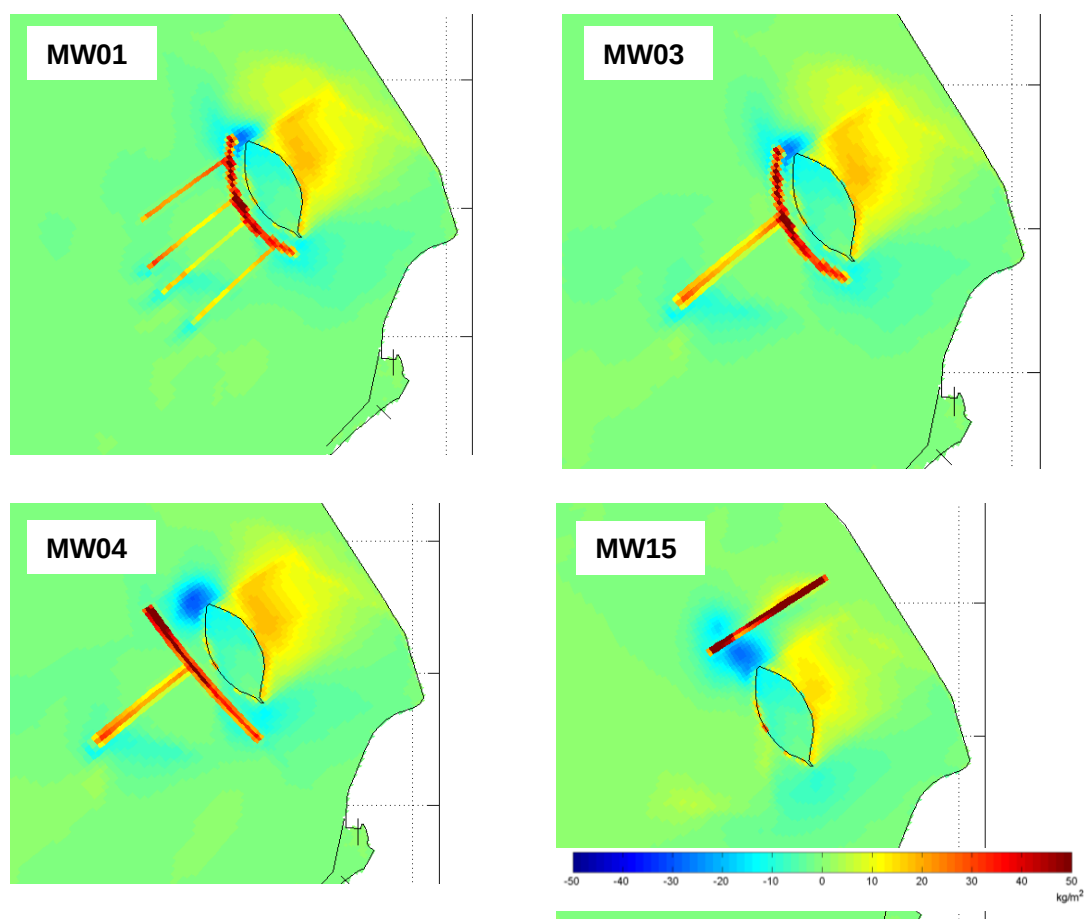
### 3 RESULTATEN MODELBEREKENINGEN

#### 3.1 Scenario's grof rooster

De berekeningen die zijn uitgevoerd met het grove en fijne rooster worden apart van elkaar gepresenteerd. Dit heeft te maken met het verschil in simulatietijd. Daarnaast kunnen de scenario's met het grove rooster op meer aspecten worden geanalyseerd. Voor de duidelijkheid zijn de beide typen berekeningen dus gescheiden. Deze paragraaf gaat in op de resultaten voor de berekeningen met het grove rooster. Paragraaf 3.2 beschrijft de resultaten van de berekeningen met het fijne rooster. De scenario's in deze paragraaf zijn geanalyseerd op de aspecten: aanslibbing (3.1.1.), stroming (3.1.2.) en slibconcentratie (3.1.3.).

##### 3.1.1 Aanslibbing en erosie

Figuur 3.1 laat de aanslibbing (geel/rood) en erosie (blauw) zien ten opzichte van de referentiesituatie, veroorzaakt door Marker Wadden, voor verschillende scenario's.



**Figuur 3.1: Aanslibbing en erosie t.o.v. referentie situatie. geel / oranje = sedimentatie, blauw = erosie. Eenheid is kg/m<sup>2</sup>**

Op basis van deze 2D figuren kan het volgende worden opgemerkt:

- Aan de luwtezijde van het bovenwaterlandschap, tussen het moeras en de Houtribdijk, vindt sedimentatie van slib plaats. Dit wordt vooral veroorzaakt door golfuwte, omdat in dit gebied de golven nauwelijks aanwezig zijn bij vaak voorkomende winden uit westelijke richtingen.
- Aan de randen van het bovenwaterlandschap vindt erosie plaats. Op deze locaties neemt de stroomsnelheid toe, omdat de grootschalige circulatie hier omheen moet stromen. Door stroomtoename zal enige erosie optreden.
- In de geulen vindt uiteraard sedimentatie plaats. Qua invang van slib werken de uiteinden van de geulen effectiever dan het centrale deel. Bij de variant met 4 takken werken de binnenste delen van de geulen minder effectief. Dit geldt ook voor de variant met de enkele hoofdgeul; het middendeel van de geul is minder effectief. Variant MW15, met de enkele geul noordelijk van het bovenwaterlandschap, laat een vrij uniforme aanslibbing zien over de gehele lengte.
- De rechte hoofdgeul werkt effectiever dan de kromme hoofdgeul. Dit wordt vooral veroorzaakt door een gunstiger stroombeeld: minder channeling (zie ook stroombeelden in paragraaf 3.1.2.).

De totale aanslibbingsvolumes gedurende een jaar zijn berekend per scenario en per type geul. Tabel 3.1 laat de getallen zien voor de oude Delft3D executable, tabel 3.2 voor de nieuwe executable. In deze analyse is ook bekeken hoeveel m<sup>3</sup> slib er sedimenteert in de periode half november / half december. Dit is de periode waarvoor de berekeningen met het fijne rooster worden uitgevoerd. Het aanslibbingspercentage dat wordt berekend voor deze periode wordt gebruikt om de resultaten van de berekeningen te kunnen schalen naar een jaarlijkse aanslibbing. In tabel 3.3 is de aanslibbing vertaald naar een aanslibsnelheid (in cm per jaar). Voor alle berekeningen is een slibdichtheid aangenomen van 200 kg/m<sup>3</sup>. Dit correspondeert met niet geconsolideerd slib (waterig).

**Tabel 3.1: Sedimentatie volume in m<sup>3</sup>/jaar bij dichtheid 200 kg/m<sup>3</sup> en percentage voor grof rooster (v5.00)**

|      | Sedimentatie volume in m <sup>3</sup> /jaar bij dichtheid 200 kg/m <sup>3</sup> |           |                   |                      |             |                  |                        |             |            |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|----------------------|-------------|------------------|------------------------|-------------|------------|
|      | zijtak                                                                          | hoofdgeul | zijtak<br>nov-dec | hoofdgeul<br>nov-dec | luwtegebied | luwte<br>tov ref | nov-dec<br>luwtegebied | %<br>geulen | %<br>luwte |
| mw01 | 193.212                                                                         | 337.093   | 46.525            | 93.508               | 1.659.584   | 557.200          | 194.753                | 26          | 12         |
| mw03 | 115.672                                                                         | 330.404   | 31.884            | 92.934               | 1.654.859   | 552.475          | 195.259                | 28          | 12         |
| mw04 | 133.479                                                                         | 450.984   | 37.216            | 137.446              | 1.663.529   | 561.145          | 201.445                | 30          | 12         |
|      |                                                                                 |           |                   |                      |             |                  |                        | 28          | 12         |

**Tabel 3.2: Sedimentatie volume in m<sup>3</sup>/jaar bij dichtheid 200 kg/m<sup>3</sup> en percentage voor grof rooster (v5.01)**

|      | Sedimentatie volume in m <sup>3</sup> /jaar bij dichtheid 200 kg/m <sup>3</sup> |           |                   |                      |             |                  |                        |             |            |
|------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|----------------------|-------------|------------------|------------------------|-------------|------------|
|      | zijtak                                                                          | hoofdgeul | zijtak<br>nov-dec | hoofdgeul<br>nov-dec | luwtegebied | luwte<br>tov ref | nov-dec<br>luwtegebied | %<br>geulen | %<br>luwte |
| ref  |                                                                                 |           |                   |                      | 1.102.384   |                  | 150.630                |             |            |
| mw01 | 381.999                                                                         | 478.266   | 89.497            | 128.672              | 1.622.742   | 520.358          | 201.434                | 25          | 12         |
| mw03 | 185.279                                                                         | 471.686   | 46.367            | 128.347              | 1.617.861   | 515.477          | 199.857                | 27          | 12         |
| mw04 | 199.751                                                                         | 590.649   | 48.690            | 168.694              | 1.622.898   | 520.514          | 204.460                | 28          | 13         |
| mw15 |                                                                                 | 391.997   |                   | 100.503              | 1.377.927   | 275.543          | 187.399                | 26          | 14         |
|      |                                                                                 |           |                   |                      |             |                  |                        | 26          | 13         |



**Tabel 3.3: Sedimentatie volume in m<sup>3</sup>/jaar en hoogte (cm) bij dichtheid 200 kg/m<sup>3</sup> voor grof rooster (v5.01)**

|      | m <sup>3</sup> bij dichtheid 200 kg/m <sup>3</sup> |           |                      | cm bij dichtheid 200 kg/m <sup>3</sup> |       |
|------|----------------------------------------------------|-----------|----------------------|----------------------------------------|-------|
|      | totaal geulen                                      | luwte     | luwte tov referentie | totaal geulen                          | luwte |
| mw01 | 860.265                                            | 1.622.742 | 520.358              | 45                                     | 4     |
| mw03 | 656.965                                            | 1.617.861 | 515.477              | 23                                     | 4     |
| mw04 | 790.400                                            | 1.622.898 | 520.514              | 23                                     | 4     |
| mw15 | 391.997                                            | 1.377.927 | 275.543              | 26                                     | 4     |

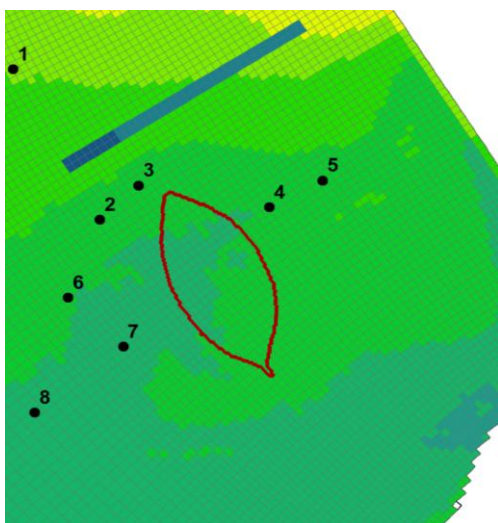
De belangrijkste conclusies uit bovenstaande tabellen zijn:

- De berekeningen met de nieuwe Delft3D executable (v5.01) laten meer aanslibbing zien in de verdiepingen, zowel in de hoofdgeul als in de zijtakken. Dit heeft te maken met een iets verhoogde stroomsnelheid in de nieuwe berekeningen. Een hogere stroomsnelheid resulteert in een hoger slibtransport en dus in een hoger aanslibbings potentieel.
- In de hoofdgeul sedimenteert 330.000 tot 450.000 m<sup>3</sup> volgens de oude berekeningen. Scenario MW04, met de rechte hoofdgeul is het meest effectief. Volgens de nieuwe berekeningen is dit 470.000 tot 590.000 m<sup>3</sup>. Ook hier is MW04 het meest effectief.
- In de zijtakken sedimenteert 110.000 tot 190.000 m<sup>3</sup> (oude exe) en 180.000 – 380.000 m<sup>3</sup> (nieuwe exe). Scenario MW01 vangt het meeste in. Dit heeft echter te maken met dat de 4 geulen iets groter zijn qua oppervlak.
- In het luwtegebied sedimenteert orde 1,6 miljoen m<sup>3</sup>. Dit wordt onafhankelijk van de versie van de executable berekend in alle varianten, behalve in MW15. In dit scenario is een geul geplaatst ter plaatse van de instroom naar het luwtegebied. Dit zorgt voor een invang van slib in de geul en niet in het luwtegebied. De hoeveelheid slib dat in de geul terecht komt, orde 400.000 m<sup>3</sup>, is ongeveer ook de hoeveelheid dat minder sedimenteert in het luwtegebied. De geul in MW15 vangt minder slib in dan bij de andere scenario's, omdat de geul kleiner is (vergraving is minder).
- In de periode half november tot half december wordt orde 26-28 % van het jaarvolume ingevangen in de geulen en 12-13% in het luwtegebied. Deze percentages worden gebruikt voor de vertaling van de berekeningen met het fijne rooster naar jaarlijkse aanslibbingsvolumes.

Verder is de aanslibbing en erosie op een aantal observatiepunten geanalyseerd. Voor het scenario MW15 is, op de punten zoals weergegeven in figuur 3.2, de cumulatieve aanslibbing/erosie geplot. In bijlage A zijn de 8 grafieken weergegeven.

Over het algemeen laten de locaties 2 en vooral 3 erosie zien, na een jaar 2 tot 4 cm. Locaties 4 en 5 laten sedimentatie zien, waarbij op locatie 4 de meeste aanslibbing wordt berekend: 12 cm. De andere locaties laten in de tijd een wisselend beeld van erosie en sedimentatie zien van enkele cm's.





**Figuur 3.2: Locaties van de observatiepunten**

### 3.1.2 Stroming

De verschillende scenario's zijn ook geanalyseerd op stroombeelden bij diverse windcondities. In bijlage B zijn de stroombeelden opgenomen.

Uit de resultaten kunnen de volgende zaken worden opgemaakt:

- In de kromme hoofdgeul treedt channeling op, de geul trekt de stroming aan. Dit gebeurt zowel bij ZW wind – stroming aan bodem van noord naar zuid -, als bij noorden wind – stroming aan de bodem van zuid naar noord. De stroomsnelheden in deze kromme hoofdgeul worden orde 0.2 – 0.3 m/s. Hierdoor werkt deze geul niet optimaal voor slibvang, omdat een deel van het slib niet kan bezinken door de hogere snelheden.
- Voor variant MW04 is te zien dat de channelling in de hoofdgeul veel minder is, vooral bij ZW wind. Hierdoor is de rechte geul effectiever voor slibvang. De stroming is meer loodrecht georiënteerd op de geul.
- In de zijtakken treedt ook channeling op. De stroomsnelheid wordt verhoogd door de oriëntatie van de geul. De geulen liggen parallel aan de gemiddelde stroming bij de veel voorkomende windrichtingen zuid tot noordwest. Snelheden tot 0.3 m/s kunnen optreden in de geulen. Ook hierdoor werken de zijtakken niet helemaal effectief. De takken kunnen beter loodrecht op de gemiddelde stroming worden georiënteerd. Hiermee is rekening gehouden bij het ontwerp van de 2<sup>e</sup> set scenario berekeningen.
- Rondom het bovenwaterlandschap treedt ook stroomsnelheidstoename op, vooral bij de twee uiteinden. De snelheid kan op die locaties orde 0.2 tot 0.25 m/s worden, waardoor erosie optreedt op de locaties.
- In de omgeving van Marker Wadden zijn de stroomsnelheden zoals in de rest van het Markermeer, dus ongestoord. Maximale snelheden zijn ongeveer 0.15 tot 0.2 m/s.

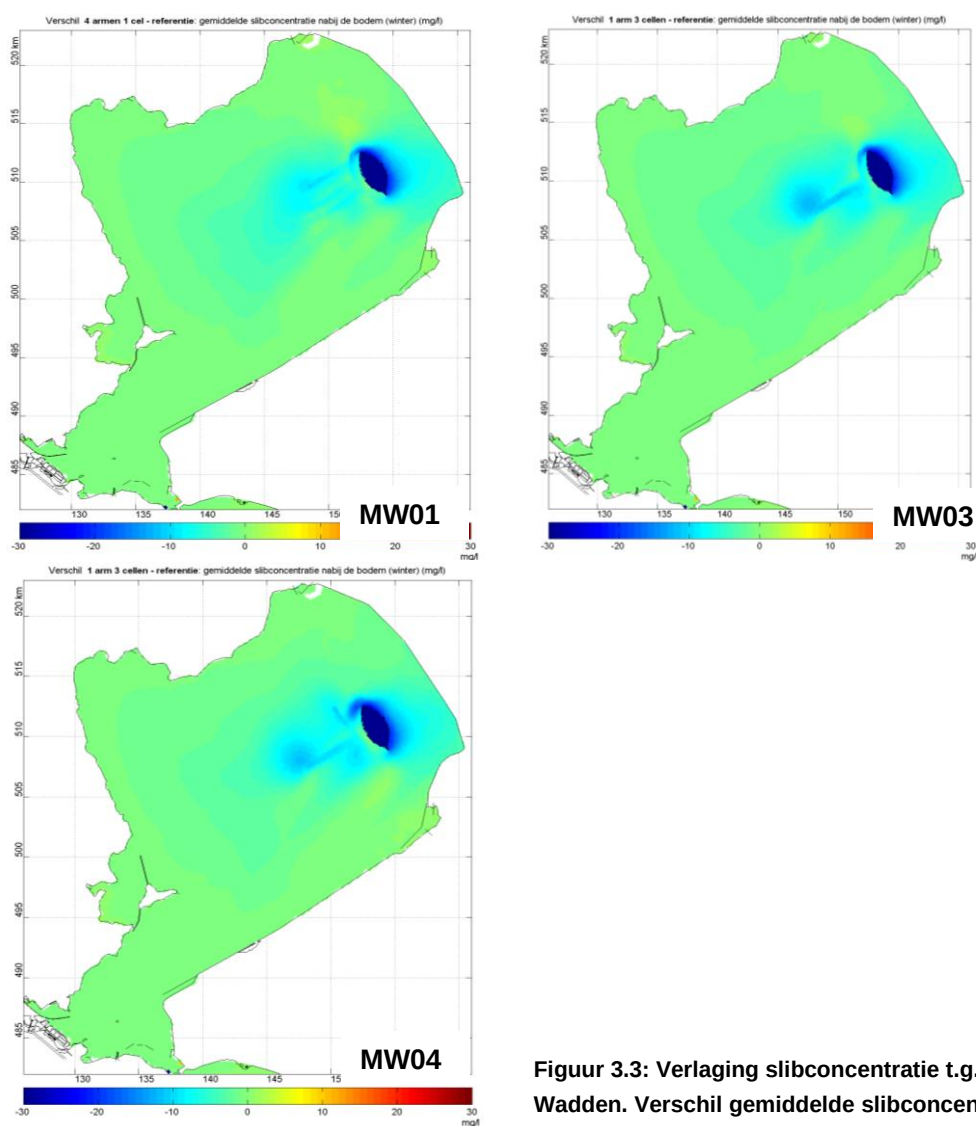
### 3.1.3 Effect op slibconcentratie

Zowel het onderwater- als bovenwaterlandschap heeft effect op de slibconcentratie in de waterkolom. Direct boven de geulen wordt de slibconcentratie minder door een deel van het slib dat in de geulen uitzakt.

Het bovenwaterlandschap heeft effect op de grootschalige slibstroom in het Markermeer en veroorzaakt ook luwte in het gebied tussen Marker Wadden en de Houtribdijk. Ook hierdoor zal de slibconcentratie verminderen.

Figuur 3.3 laat de verandering van de slibconcentratie zien ten opzichte van de referentiesituatie, aan de bodem en in de winter. In dit geval is de verlaging van de slibconcentratie in de orde van 15 mg/l, boven de geulen. Dit is ongeveer 10 – 15 % verlaging ten opzichte van de referentie. In de directe omgeving van de geulen is de verlaging orde 5 tot 10 mg/l.

Het effect van Marker Wadden is terug te zien tot het centrale deel van het Markermeer.



Figuur 3.3: Verlaging slibconcentratie t.g.v. Marker Wadden. Verskil gemiddelde slibconcentratie aan de bodem in de winter

## 3.2 Scenario's fijn rooster

Deze paragraaf beschrijft de resultaten van de berekeningen met het fijne rooster. De scenario's zijn geanalyseerd op de aspecten: aanslibbing en stroming. Uit deze aspecten is bepaald welke situaties het meest gunstig zijn voor de doelstelling van het project Marker Wadden.

### 3.2.1 Aanslibbing en erosie

De simulatie tijd van de modelberekeningen met het fijne rooster is van half november tot half december 2006. De aanslibbing dat in deze periode door het model wordt berekend is met behulp van de percentages uit tabel 3.2 omgerekend naar een jaarlijks aanslibbingsvolume. Hierdoor kunnen de volumes van de 'nieuwe' scenario's vergeleken worden met de oorspronkelijke scenario's. Tabel 3.4 geeft de aanslibbingsvolumes weer voor de geulen (onderwaterlandschap) en het luwtegebied (gebied tussen bovenwaterlandschap en Houtribdijk). Verder is de aanslibbing vertaald naar aanslibsnelheid van cm/jaar.

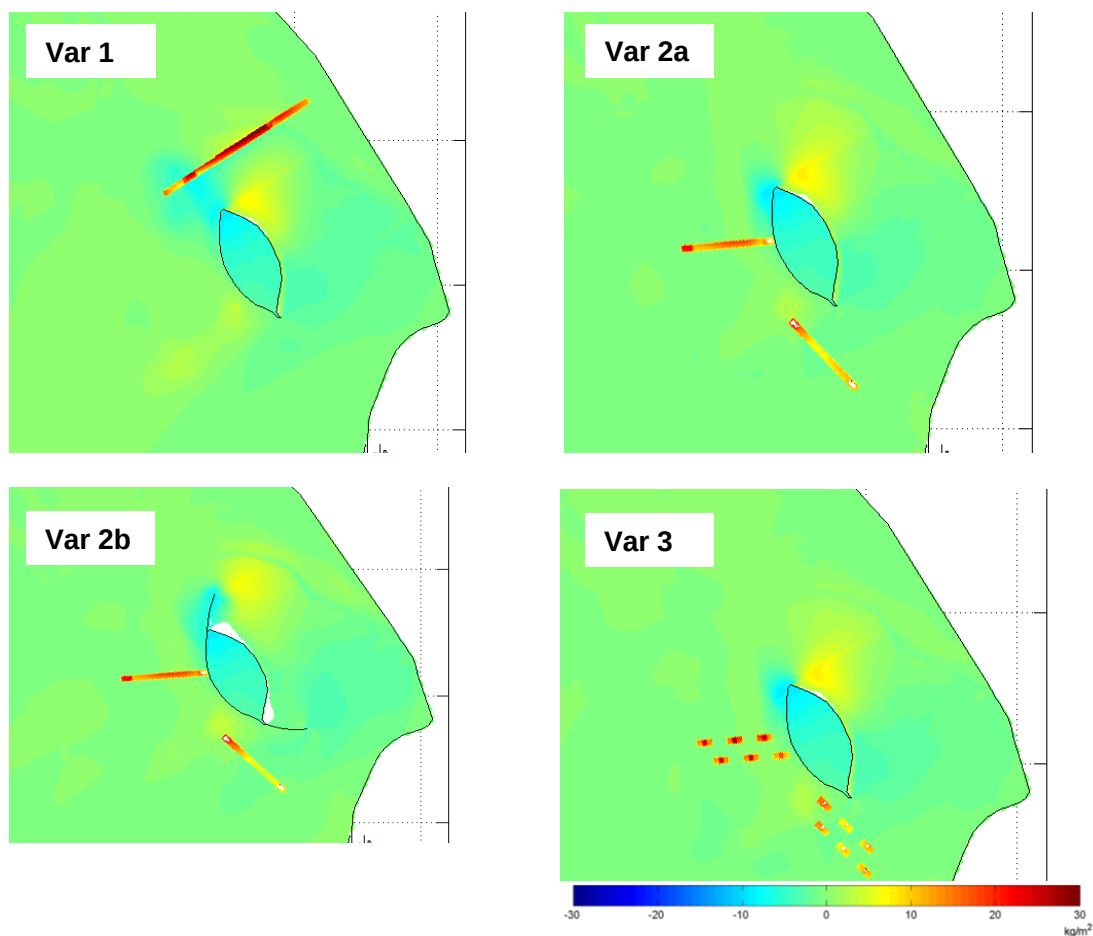
**Tabel 3.4: Sedimentatie volume in m<sup>3</sup>/jaar en hoogte (cm) bij dichtheid 200 kg/m<sup>3</sup>, verfijnd rooster na schaling**

|            | m3 bij dichtheid 200 kg/m3 |           |                      | cm bij dichtheid 200 kg/m3 |       |
|------------|----------------------------|-----------|----------------------|----------------------------|-------|
|            | totaal geulen              | Luwte     | luwte tov referentie | totaal geulen              | luwte |
| Variant 1  | 601.388                    | 1.227.716 | 125.332              | 34                         | 3     |
| Variant 2a | 331.840                    | 1.610.302 | 507.918              | 21                         | 4     |
| Variant 2b | 333.392                    | 1.657.549 | 555.165              | 21                         | 4     |
| Variant 3  | 348.611                    | 1.580.884 | 478.500              | 21                         | 4     |

De belangrijkste conclusies uit bovenstaande tabel zijn:

- Variant 1 is het meest effectief. Ondanks de kleinere omvang vangt de geul niet veel minder in dan scenario MW04, berekend op het grove rooster. De aanslibbingssnelheid is zelfs groter. Dit is voornamelijk het gevolg van de ligging van de geul. De stroming naar het achterliggende luwtegebied gaat via de geul. Het gevolg hiervan is echter dat de sedimentatie in het luwtegebied hierdoor afneemt.
- Variant 2 vangt ongeveer 330.000 m<sup>3</sup> per jaar in, wat vergelijkbaar is met de scenario's MW01 en MW03. Echter is de vergraving minder, waardoor de geulen effectiever slib invangen per vergraven m<sup>3</sup>.
- Variant 3 laat ongeveer dezelfde aanslibbing zien als variant 2, orde 350.000 m<sup>3</sup> per jaar.

Figuur 3.4 laat de aanslibbings en erosie patronen in de ruimte zien. De resultaten komen aardig overeen met de resultaten van de grove berekeningen (figuur 3.1). Omdat echter maar een deel van het jaar is doorgerekend zijn de hoeveelheden minder. Verder is de aanslibbing in een deel van het luwtegebied niet aanwezig. Dit kan ermee te maken hebben dat in de korte simulatietijd maar een beperkt aantal stormen uit een bepaalde richting voorkomen die minder aanslibbing geven in het zuidelijk deel van het luwtegebied. In dit deel zal naar verwachting aanslibbing komen bij noorden wind, want dan is de retourstroming naar het noorden aan de bodem. Een harde noorden wind treedt niet op in de simulatieperiode van de fijne sommen.

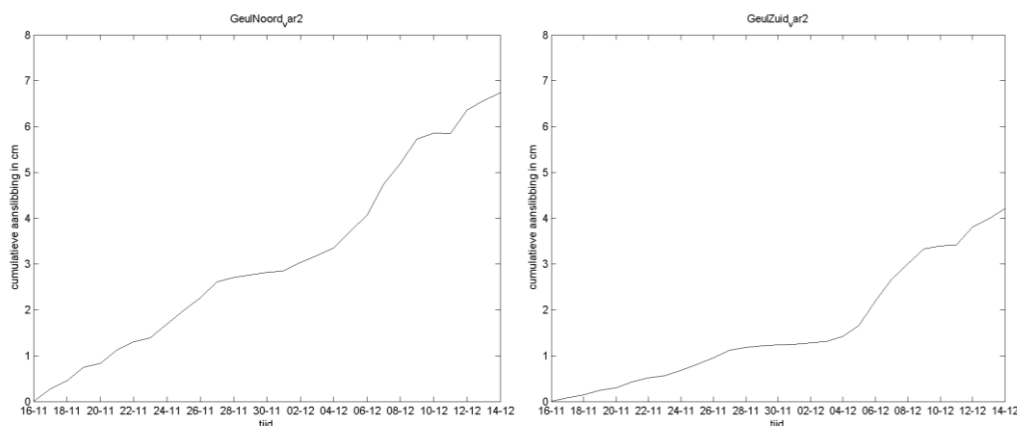


**Figuur 3.5: Aanslibbing en erosie t.o.v. referentie situatie van de 2e set berekeningen. geel / oranje = sedimentatie, blauw = erosie. Eenheid is kg/m<sup>2</sup>**

Voor variant 2 is nadere analyse uitgevoerd naar de effectiviteit van de beide geulen en het effect van de verlenging van de dammen rondom het bovenwaterlandschap (2a en 2b).

#### Variant 2a, noordgeul vs zuidgeul

Figuur 3.4 laat de aanslibbing gedurende de simulatieperiode zien voor de noordgeul (links) en zuidgeul (rechts). In de noordgeul sedimenteert 6,8 cm in die periode en in de zuidgeul 4,2 cm. De noordgeul is dus effectiever; de zuidgeul vangt ongeveer 40 % minder slib in.

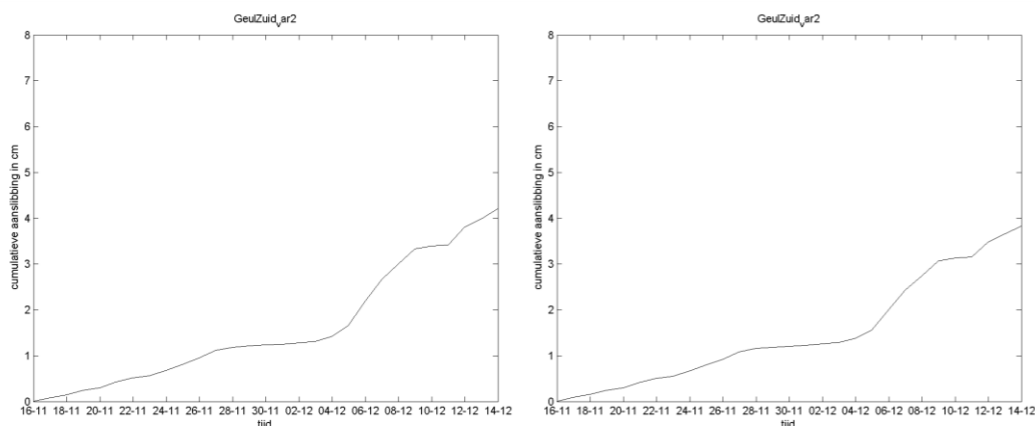


**Figuur 3.4: Vergelijking aanslibbing in noordgeul (links) en zuidgeul (rechts) voor variant 2a in de periode 16 november tot 14 december**

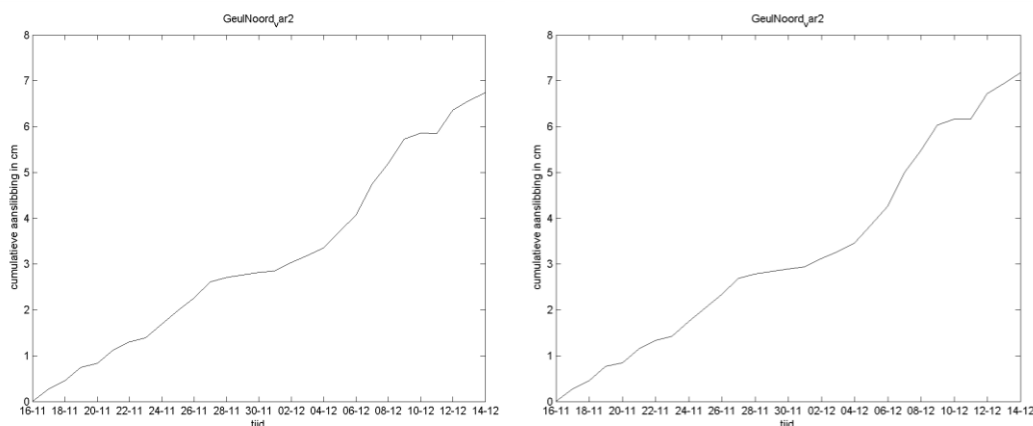
Dit verschil in effectiviteit kan echter wel worden veroorzaakt door de keuze van de simulatieperiode. In de periode half november tot half december 2006 komen voornamelijk stormen voor uit zuidwestelijke richting. Dit betekent dat de grootschalige circulatiestroming aan de bodem vooral van noord naar zuid is georiënteerd. Hierdoor ligt de noordgeul gunstiger voor het slibtransport en kan het dus zijn dat daardoor de geul effectiever invangt. Indien een periode was gekozen waarbij stormen uit het noorden optreden, was de stroming aan de bodem van zuid naar noord georiënteerd. In dit geval was vermoedelijk de zuidgeul effectiever geweest. Omdat echter vaker stormen optreden uit de westelijke en zuidwestelijke richting, lijkt de conclusie dat de noordgeul effectiever is wel geldig.

#### Variant 2a vs Variant 2b

Figuur 3.5 laat de aanslibbing zien in de zuidgeul voor scenario 2a (zonder verlenging van de dammen) en 2b (met verlenging van de dammen). Figuur 3.6 laat beide situaties zien, maar dan voor de noordgeul.



**Figuur 3.5: Vergelijking aanslibbing in zuidgeul voor variant 2a (links) en variant 2b (rechts) in de periode 16 november tot 14 december**

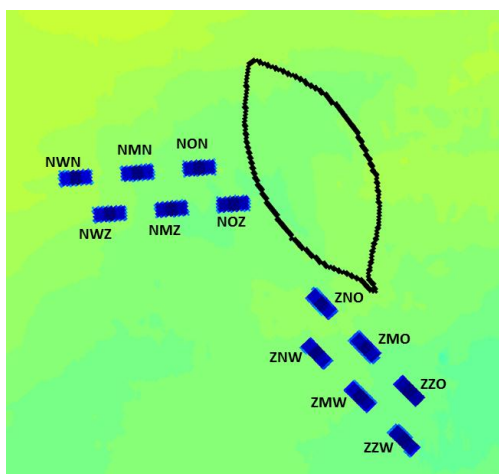


**Figuur 3.6: Vergelijking aanslibbing in noordgeul voor variant 2a (links) en variant 2b (rechts) in de periode 16 november tot 14 december**

Voor de zuidgeul geldt dat in de situatie met verlenging van de dammen de geul minder slib invangt, ongeveer 10 % minder dan zonder verlenging van de dammen. Dit kan worden verklaard doordat de stroming verder om het bovenwaterlandschap moet afbuigen, daardoor een deel van het transport niet meer in de geul terecht komt. Het verschil is echter nog niet heel groot - op basis van de stroombeelden zou kunnen worden geconcludeerd dat het potentieel transport maar de helft is. Een deel van dit verlies wordt echter gecompenseerd door een grotere stroomsnelheid aan de zuidelijke rand van het bovenwaterlandschap. Dit zorgt voor meer erosie, een groter slibtransport en dus een groter potentieel invangvolume.

Voor de noordgeul is de situatie precies andersom. De verlenging van de dammen zorgt voor een verhoging van de invang van 6 %. Dit kan worden verklaard, doordat de grootschalige circulatie meer langs de westkant van het bovenwaterlandschap wordt gestuurd, dan aan de oostkant. Het slibtransport zal daardoor ook meer westelijk zijn. Op deze locatie is de noordgeul aanwezig. Het invangpotentieel is dus ook hoger.

Voor variant 3 is een nadere analyse uitgevoerd naar de effectiviteit van de verschillende putten. Hiervoor zijn de putten individueel benoemd volgens onderstaand figuur. De aanslibbing in de simulatieperiode is weergegeven in de tabel.



| Put | Aanslibbing (cm / Nov-Dec) |
|-----|----------------------------|
| NMN | 8,80                       |
| NMZ | 7,24                       |
| NON | 8,12                       |
| NOZ | 5,72                       |
| NWN | 6,95                       |
| NWZ | 6,92                       |
| ZMO | 3,15                       |
| ZMW | 3,19                       |
| ZNO | 5,31                       |
| ZNW | 4,21                       |
| ZZO | 3,48                       |
| ZZW | 4,05                       |

**Figuur 3.7: Aanslibbing in individuele putten voor variant 3**



Uit deze analyse kan worden opgemaakt dat de noordelijke putten over het algemeen meer slib invangen dan de zuidelijke. Dit correspondeert met de bevindingen van variant 2, de noordelijke geul was effectiever dan de zuidelijke geul. Van de noordelijke putten laat de meest noordelijke rij putten meer aanslibbing zien (8,8 / 8,12 / 6,95 cm) dan de zuidelijke rij (7,24 / 5,72 / 6,92 cm). Dit kan worden verklaard doordat de stroming en daarmee het slibtransport van noord naar zuid is. De noordelijke rij putten vangen daardoor eerst slib in, waardoor voor de zuidelijke rij putten minder slibtransport beschikbaar is.

Bij de zuidelijke putten is weinig verschil tussen de oostelijke rij en de westelijke rij putten.

Zoals aangegeven bij de effecten van variant 2, kan ook hierbij de keuze van de simulatieperiode, en als gevolg daarvan de stroming en slibtransport, een rol spelen.

### 3.2.2 Stroming

Ook voor de tweede set scenario's zijn de stroombeelden geanalyseerd. Bijlage C laat de stroombeelden zien. Omdat de tweede set berekeningen zijn uitgevoerd voor een korte periode is er maar 1 significante storm in deze periode. Deze storm komt uit zuid-zuidwestelijke richting.

Bij deze windcondities treden bij de uiteinden van het bovenwaterlandschap verhoogde stroomsnelheden op van ongeveer 0,25 tot 0,3 m/s. Bij variant 1 treedt deels channeling op in de geul, waardoor de stroomsnelheden worden verhoogd: 0,3 tot 0,5 m/s. De hoogste snelheden in die geul worden gevonden in het zuidelijk deel van de geul.

Bij variant 2 treedt net buiten de geul hogere stroomsnelheden op, orde 0,2 m/s. Boven de geulen, vooral de zuidelijke geul, valt de stroming helemaal weg. Dit komt door de loodrechte aanstroming.

In het gebied rondom Marker Wadden is de stroomsnelheid 0,1 – 0,2 m/s.

Het globale stroompatroon in deze situatie is van noord naar zuid. Dit correspondeert met het stroombeeld bij een zuid-zuidwestelijke wind.

## 3.3 Overige onderwerpen

### 3.3.1 Slibbom

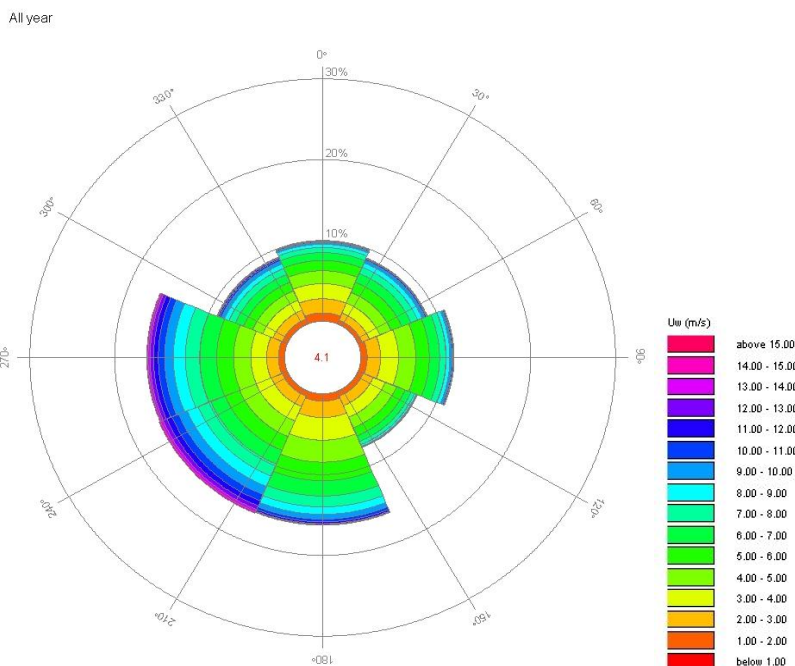
Het slib dat ten oosten van het bovenwaterlandschap sedimenteert zou mogelijk bij een storm uit het noorden, oosten of zuiden weer kunnen eroderen. Hierdoor kan tijdelijk de slibconcentratie in de waterkolom toenemen, wat negatieve effecten kan hebben op de ecologie. Daarnaast gaat, als gevolg van de erosie en het transport van het materiaal, een deel van het slib dat is gesedimenteerd verloren, waardoor de uitbouw van het bovenwaterlandschap langzamer verloopt. Dit is een niet gewenste situatie.

Met het model is bepaald of en wanneer deze situatie kan optreden. Hiervoor zijn modelberekeningen met stationaire wind uit verschillende richtingen en met verschillende sterkte uitgevoerd. Per situatie is het stromingspatroon en het golfveld uitgerekend en vertaald naar bodemschuifspanning. De bodemschuifspanning is een maat voor de belasting op de bodem. Over het algemeen geldt dat indien de schuifspanning groot is zal slib eroderen van de bodem, indien de schuifspanning laag is zal slib niet eroderen. Echter speelt de aanvoer en afvoer van slib ook een rol. Afhankelijk hiervan treedt netto erosie of sedimentatie op.

Er zijn vijf modelberekeningen uitgevoerd, namelijk voor wind uit het noordwesten, noorden, noordoosten, zuidoosten en zuiden. Gezien de oriëntatie van het bovenwaterlandschap zijn deze winden belangrijk voor een acute mobilisatie van het gesedimenteerde materiaal. Dit zijn echter wel windrichtingen die gedurende een jaar relatief weinig voorkomen. Daarnaast treedt er bij deze windrichtingen meestal een relatief lage windsnelheid op.

Figuur 3.8 laat de windverdeling zien waarbij uur-gegevens van de periode 1 januari 1951 tot en met 11 april 2013 zijn geanalyseerd in windklassen van 45°. Tabel 3.5 geeft een overzicht van de herhalingstijden met de daarbij horende windsnelheid per richting. Voor deze herhalingstijden zijn de berekeningen uitgevoerd, per herhalingstijd zijn ze onderling vergelijkbaar. Uit de berekeningen volgt het golfhoogteverloop tussen het onderwaterlandschap en de Houtribdijk. Een voorbeeld hiervan voor noordwesten vind is weergegeven in figuur 3.9

Appendix D laat een tabel zien met resultaten van de stationaire berekeningen. Per herhalingstijd en windrichting is een figuur gemaakt van de bodemschuifspanning. Uit deze figuren is de globale bodemschuifspanning in het luwtegebied bepaald. Tabel 3.6 geeft dit per situatie weer.

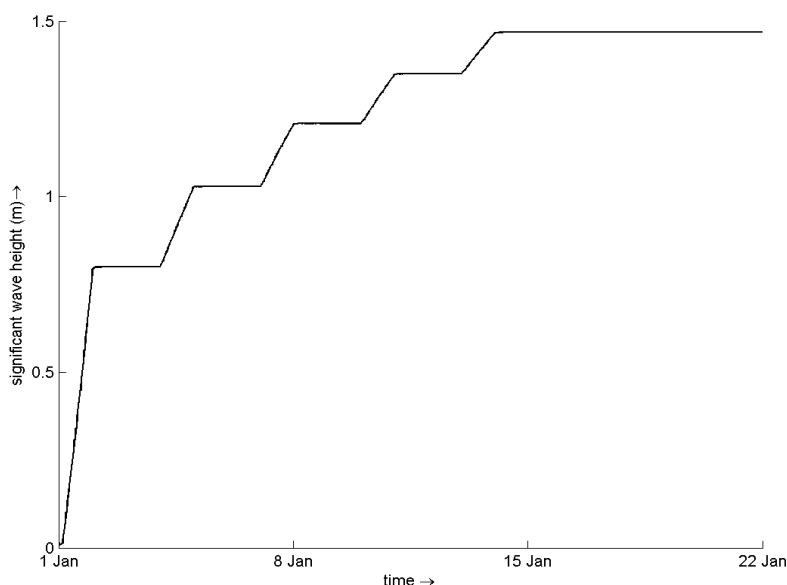


Figuur 3.8: Verdeling wind, periode 1951-2013

Tabel 3.5: Windsnelheid (m/s) per geanalyseerde windrichting voor verschillende herhalingstijden

| Herhalingstijd | Noordwesten | Noorden | Noordoosten | Zuidoosten | Zuiden |
|----------------|-------------|---------|-------------|------------|--------|
| 1/1            | 14,98       | 12,33   | 11,69       | 10,66      | 14,46  |
| 1/10           | 18,91       | 16,43   | 13,87       | 13,38      | 17,49  |
| 1/100          | 22,29       | 20,06   | 15,57       | 15,64      | 20,18  |
| 1/1.000        | 25,44       | 23,47   | 17,14       | 17,74      | 22,70  |
| 1/10.000       | 28,45       | 26,73   | 18,63       | 19,74      | 25,12  |





**Figuur 3.9: Golfhoogteverloop (m) in de tijd voor een punt in het luvtegebied bij noordwestenwind**

**Tabel 3.6: Globale bodemschuifspanning (N/m<sup>2</sup>) in het luvtegebied voor verschillende condities**

|              | NW        | N       | NO        | ZO        | Z         |
|--------------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 1/1 jaar     | 0,8 – 0,9 | Max 0,5 | << 0,5    | << 0,5    | 0,6 – 0,8 |
| 1/10 jaar    | 1,5 – 1,8 | 1 – 1,2 | 0,5       | 0,5 - 0,6 | 1 – 1,3   |
| 1/100 jaar   | 2         | 1,5     | 0,7 – 0,8 | 0,8       | 1,8       |
| 1/1000 jaar  | 2,5       | 2,5     | 1         | 1         | 2,5       |
| 1/10000 jaar | > 2,5     | > 2,5   | 1,2       | 1,5       | > 2,5     |

Over het algemeen kan worden gesteld dat bij een bodemschuifspanning net lager dan 0,5 N/m<sup>2</sup> alleen heel fijn slib dat net is neergeslagen weer in suspensie kan komen. Bij schuifspanningen van ongeveer 0,7 N/m<sup>2</sup> zal slib dat enigszins is geconsolideerd weer in suspensie komen. Bij schuifspanningen vanaf 1,5 tot 2 N/m<sup>2</sup> zullen ook de meer geconsolideerde lagen eroderen en zal er algehele erosie optreden.

Op basis van deze algemene grenswaarden kan het volgende worden geconcludeerd voor de situatie in de luvte van het bovenwaterlandschap:

- Vooral winden uit het noordwesten zijn maatgevend voor de resuspensie van gesedimenteerde slib in het luvtegebied. Vooral uit deze richting komen vaker stormen voor met hoge windsnelheid dan vanuit de andere richtingen die zijn doorgerekend. Echter ook de winden uit noorden en zuiden kunnen zorgen voor een hoge bodembelasting.
- Bij deze windrichtingen zal er gemiddeld jaarlijks een situatie voorkomen dat het vers gesedimenteerde slib weer in suspensie komt. Hierdoor zal de slibconcentratie enigszins worden verhoogd, echter zal dit niet anders zijn dan in de huidige situatie. Ook nu wordt regelmatig de slibconcentratie in de waterkolom hoger door winddynamiek. Echter bij langdurige hoge windsnelheid zal in het luvtegebied de concentratie voor langere tijd hoog blijven, omdat daar meer materiaal beschikbaar is.
- Bij een situatie die ongeveer eens per 10 jaar voorkomt zal bij wind uit bovengenoemde richtingen een deel van het geconsolideerde materiaal uit het luvtegebied weer eroderen. Omdat er in het luvtegebied een dikker pakket aan licht tot matig geconsolideerd materiaal aanwezig is, zal er tijdelijk in dit gebied een hogere slibconcentratie aanwezig zijn.

Omdat er ook stroming optreedt, zal dit slib uit dit gebied worden getransporteerd, waardoor dit (deels) wordt verloren voor gebruik in het bovenwaterlandschap. Dit is echter een tijdelijke situatie en tevens zal bij deze windbelasting in de rest van het meer de slibconcentratie hoger zijn. Omdat er echter in het luwtegebied meer slib aanwezig is, kan dit dan zorgen voor een hogere belasting.

- Bij windsituaties die heel weinig voorkomen (1/100 jaar of minder vaak) treedt een dusdanige belasting op dat algehele erosie zal optreden van de licht en matig geconsolideerde lagen. Echter zal dan ook in de rest van het meer ongeveer een gelijke erosie optreden in deze lagen en zal daardoor ook de slibconcentratie hoog zijn. Het is dus dan maar de vraag of er achter het luwtegebied een duidelijk hogere slibconcentratie wordt waargenomen. Daarnaast is dit een situatie die nauwelijks optreedt.

Uit de resultaten van de berekeningen blijkt dat vooral wind uit het noordwesten kan zorgen voor snelle resuspensie van het slib. Uit het noordwesten komen nog regelmatig stormen voor en ook de oriëntatie van het bovenwaterlandschap zorgt ervoor dat de strijklengte groot genoeg is voor een hoge bodembelasting. Om dit te voorkomen kan het beste de strijklengte worden verkleind en het gebied worden afgeschermd. Dit kan het beste worden gedaan voor aan de noordzijde van het bovenwaterlandschap een dammetje aan te leggen of de vormgeving van het bovenwaterlandschap aan te passen, zodat het luwtegebied verder wordt beschermd. Dit dammetje of de andere vormgeving dient dan wel zodanig te worden onderworpen dat het niet de gehele slibstroom richting het luwtegebied blokkeert, omdat er dan veel minder slib wordt ingevangen.

### 3.3.2 Aantal fracties in het slibmodel

#### Slibfracties in het model

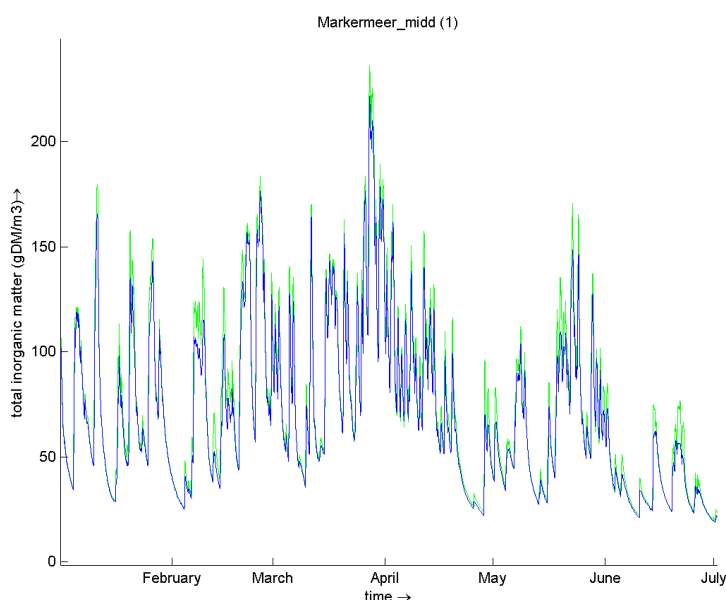
Het model dat is gebruikt voor de slibberekeningen beschouwt twee relatief fijne slibfracties die nodig zijn om het gedrag van slib in de waterkolom goed te beschrijven. Slib in de waterkolom is een belangrijke bepalende factor voor het onderwater lichtklimaat, het tot nu toe voornaamste toepassingsgebied van het slibmodel. Het slibmodel is gekalibreerd en gevalideerd aan de hand van troebelheidsmetingen in de waterkolom (van Kessel ea., 2009).

De door het model berekende aanslibbing is, ondanks onzekerheden bij de vertaling van massa naar volume, lager dan de in diepe putten in het Markermeer geobserveerde aanslibbing (Boderie, e.a. 2010). Door in het model een extra (derde) grovere slibfractie toe te voegen kan de geobserveerde aanslibbing met het model beter worden gereproduceerd zonder dat daarbij de kalibratie van zwevend stof in de waterkolom te veel wordt verstoord. Dat is met het model onderzocht (Boderie, e.a. 2010). In deze studie is een grovere slibfractie met valsnelheid 20 m.d-1 opgenomen naast twee al aanwezige fijnere fracties (0.8 en 4.0 m.d-1). De resultaten wijken in de waterkolom maar weinig af van de modelresultaten met twee fracties (zie figuur 3.10). De resultaten zijn sterk vergelijkbaar: de piekconcentraties van de berekening met drie fracties zijn iets hoger vanwege de bijdrage van de derde fractie. Verder zijn de verschillen in de waterkolom minimaal.

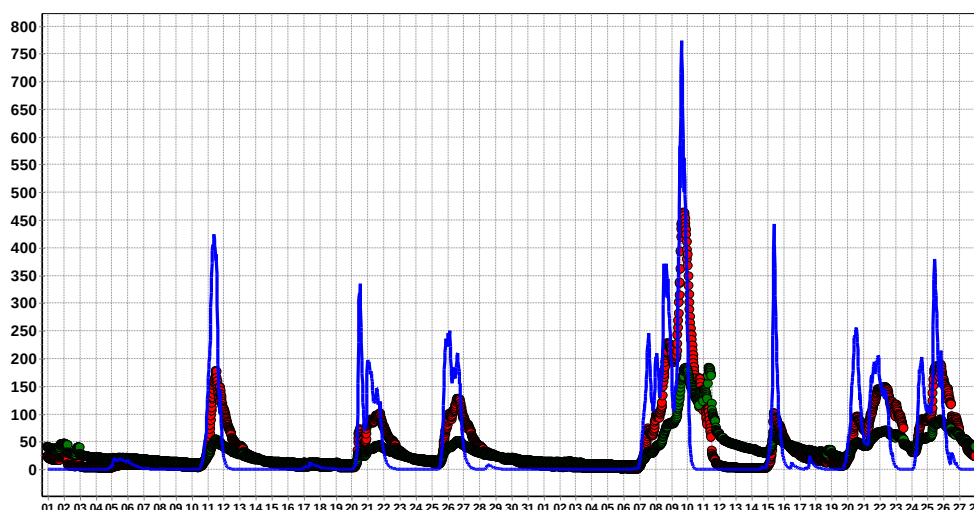
De grovere fractie komt alleen tijdens harde wind boven in de waterkolom en verstoort dan de oorspronkelijke validatie enigszins. De observatie (Vijverberg, 2008) dat tijdens stormen de concentratie slib nabij de bodem kortstondig hoog kan worden (1000 mg/L) ondersteunt dit beeld.

De bijdrage van een grovere fractie aan de aanslibbing is echter wel significant. Figuur 3.11 toont de bijdrage van de drie fracties aan de gesimuleerde sedimentatie. Te zien is dat de grove fractie kortstondig een significante bijdrage aan de sedimentatie levert. Uit de modelgegevens van figuur 3.11 is afgeleid dat de sedimentatie met drie fracties een factor 1.5 keer de sedimentatie met twee fracties bedraagt.

Opgemerkt moet worden dat waarde van de “factor” mede bepaald wordt door de hoeveelheid van de grove slib fractie die in het model opgenomen is. Hoe meer grof slib in het model aanwezig is, hoe groter de bijdrage aan de sedimentatie en dus de “factor”. De keuze die destijds voor de hoeveelheid grof slib gemaakt is (Boderie ea., 2010), is gebaseerd op een schatting van een slib expert. Het is aan te bevelen de schatting te baseren om veldmetingen van slibkarakteristieken en metingen uit te voeren die de kalibratie van zo'n grove fractie mogelijk maken: metingen onder in de waterkolom, metingen in putten en eventueel metingen in slibvallen.



**Figuur 3.10: Berekende zwevend stofconcentratie (mg/L) in Markermeer Midden (meetpaal FL42) voor de periode januari – juni 2006. Blauw = berekening met twee slibfracties, groen = berekening met drie fracties**



**Figuur 3.11: Berekende aanslibsnelheid (g.m-2.d-1) in Markermeer Midden in periode januari – februari 2006. Groen is fijne fractie, Rood=middelste fractie en Blauw=grove fractie**

### Conclusie

De met het slibmodel Markermeer berekende aanslibbingsnelheden zijn gebaseerd op de bijdrage van twee relatief fijne fracties. Door het model uit te breiden met een grovere fractie zal de berekende aanslibsnelheid orde 1.5 keer hoger zijn. De resultaten in de waterkolom zullen maar weinig afwijken van de modelresultaten met twee fracties.

Ten overvloede merken we hier nogmaals op dat het model rekent in grammen en dat bij de vertaling naar het aantal kuubs in de verdieping een aanname voor de slibdichtheid gemaakt worden die zeer sterk bepalend is voor de uitkomst. Omdat er geen veldmetingen van de dichtheid van het materiaal in de putten beschikbaar is de onzekerheid bij de vertaling groot.

## 4 CONCLUSIES

Op basis van de uitgevoerde modelberekeningen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De geulen in het onderwaterlandschap werken het meest effectief voor slibinvang als ze loodrecht op de stroming zijn georiënteerd. Indien de geulen parallel aan de overheersende stroming worden geplaatst (over het algemeen is dat noordoost naar zuidwest) dan treedt er channeling (stroomsnelheidsverhoging) op. Hierdoor werken de geulen minder effectief voor slibinvang.
- In de geulen kan orde 300.000 – 800.000 m<sup>3</sup> slib per jaar worden ingevangen, afhankelijk van de hoeveelheid vergraving en locatie van de geulen.
- Ook in het luwtegebied tussen Marker Wadden en de Houtribdijk sedimenteert slib. Dit is 2 tot 4 keer zoveel als in de geulen, afhankelijk van het ontwerp.
- Variant 1 van de tweede set berekeningen is het meest effectief voor de invang van slib in de geul. Echter bij deze variant wordt een deel van het slib dat in het luwtegebied sedimenteert ingevangen in de geul, waardoor de totale sedimentatie niet hoger wordt. Om deze reden is variant 2 beter als wordt gekeken naar de totale invang.
- Bij variant 2 werkt de noordgeul iets effectiever. Verlengen van de dammetjes rondom het bovenwaterlandschap geeft 6% meer aanslibbing in de noordgeul. Echter de zuidgeul laat in dat geval 10 % minder aanslibbing zien.
- Bij variant 3 werken de noordelijke putten beter dan de zuidelijke putten. Dit is conform de conclusies van variant 2. Binnen de noordelijke putten werkt de noordelijke rij beter dan de zuidelijke rij.
- Bij de randen van het bovenwaterlandschap treedt verhoogde stroomsnelheid op. Als gevolg hiervan zal enige erosie optreden.
- Marker Wadden geeft een verlaging van de slibconcentratie tot ongeveer halverwege het Markermeer. Verlaging is ongeveer 10, lokaal 15 mg/l, gemiddeld in winter. Tussen Marker Wadden en de Houtribdijk wordt dit vooral veroorzaakt door golfuwte. In het centrale deel van meer wordt dit voornamelijk veroorzaakt door de verdiepingen, waarin een deel van het slib bezinkt.
- Het slib dat in het luwtegebied sedimenteert kan bij bepaalde – niet veel voorkomende - omstandigheden weer in suspensie komen. Vooral bij noordwesten en noorden wind kan bij een 1/1 jaar en 1/10 jaar de belasting in het luwtegebied hoog worden. Bij deze windrichtingen zal er gemiddeld jaarlijks een situatie voorkomen dat het vers gesedimenteerde slib weer in suspensie komt. Bij een situatie die ongeveer eens per 10 jaar voorkomt zal bij wind uit deze richtingen een deel van het geconsolideerde materiaal uit het luwtegebied weer eroderen. Hierdoor kan tijdelijke de slibconcentratie hoger zijn dan zonder Marker Wadden.
- Het model rekent met 2 fijnere slibfracties in de waterkolom. Hiermee is het model ook gecalibreerd op slibconcentraties in het water. Voor aanslibbing in geulen kan echter een grovere slibfractie zorgen voor een aanzienlijk hoger aanslibbingsvolume. Op basis van eerder werk is bepaald dat dit een factor 1.5 kan schelen ten opzichte van de resultaten met de gebruikte versie van het slibmodel. Aanslibbingsvolumes in de geulen kunnen dus nog wel een factor 1.5 hoger zijn.

## 5 REFERENTIES

Boderie, van der Wal, van Kessel en Genseberger (2010). Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam-Lelystad. Deltares rapport no. 1202714.

Deltares (2008), Calibration suspended sediment model Markermeer, Thijs van Kessel, Gerben de Boer, Pascal Boderie.

Deltares (2012), Validation suspended sediment model Markermeer – version II & Application to silt screen, Pascal Boderie, Alfons Smale, Christophe Thiange, 1201198-010-ZWS-0001

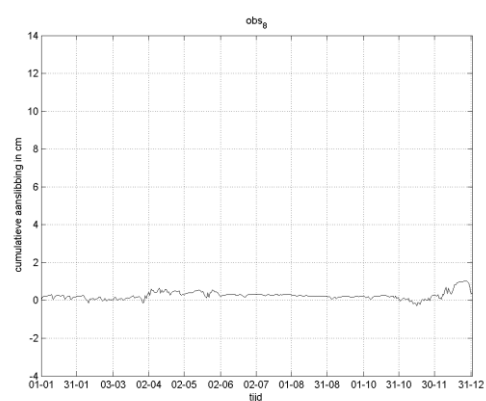
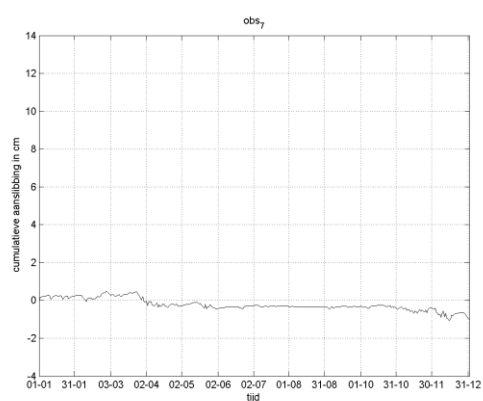
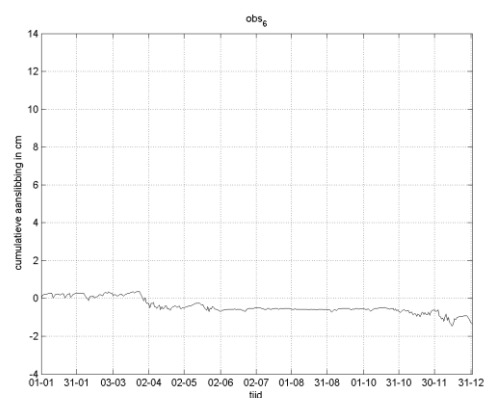
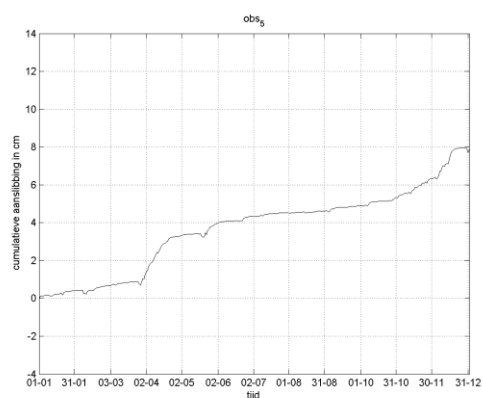
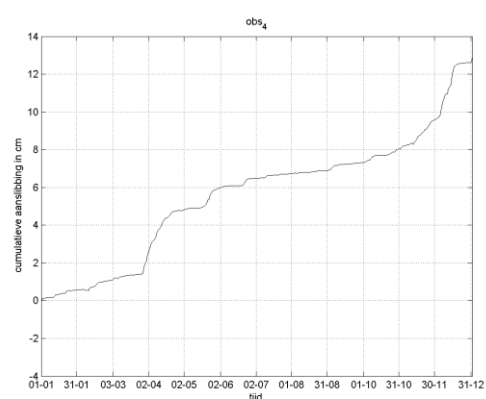
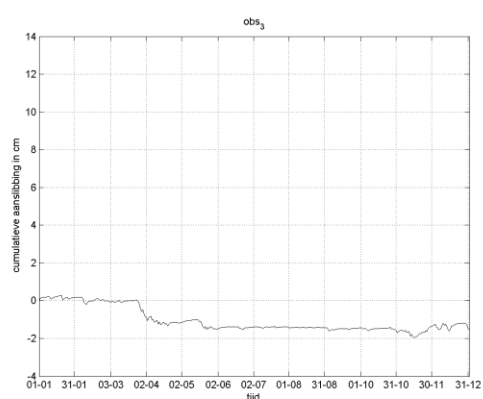
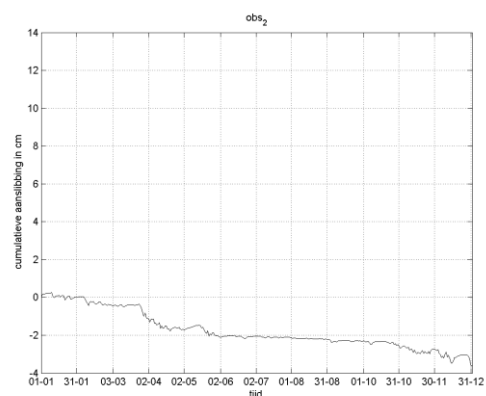
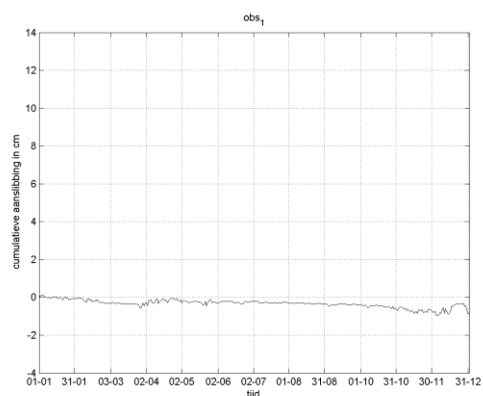
Kessel, T. van, G.J. de Boer, and P.M.A. Boderie, (2009). Calibration suspended sediment model Markermeer. Deltares report Q4612, Delft, The Netherlands.

Vijverberg, T. (2008). Mud dynamics in the Markermeer. Silt traps as a mitigation measure for turbidity Afstudeerverslag Technische Universiteit Delft.

## **BIJLAGE A**

### **Aanslibbing op observatiepunten**

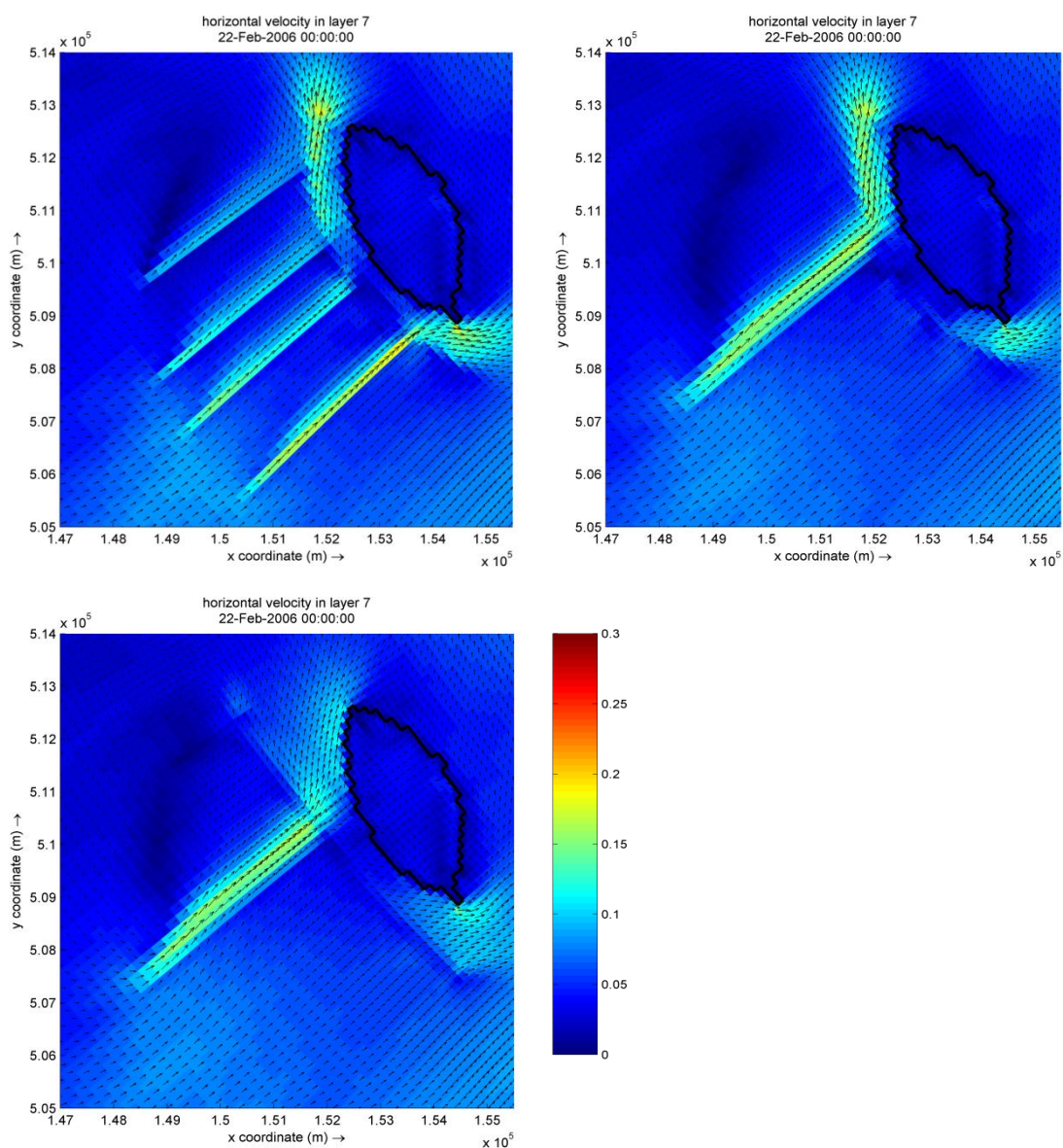




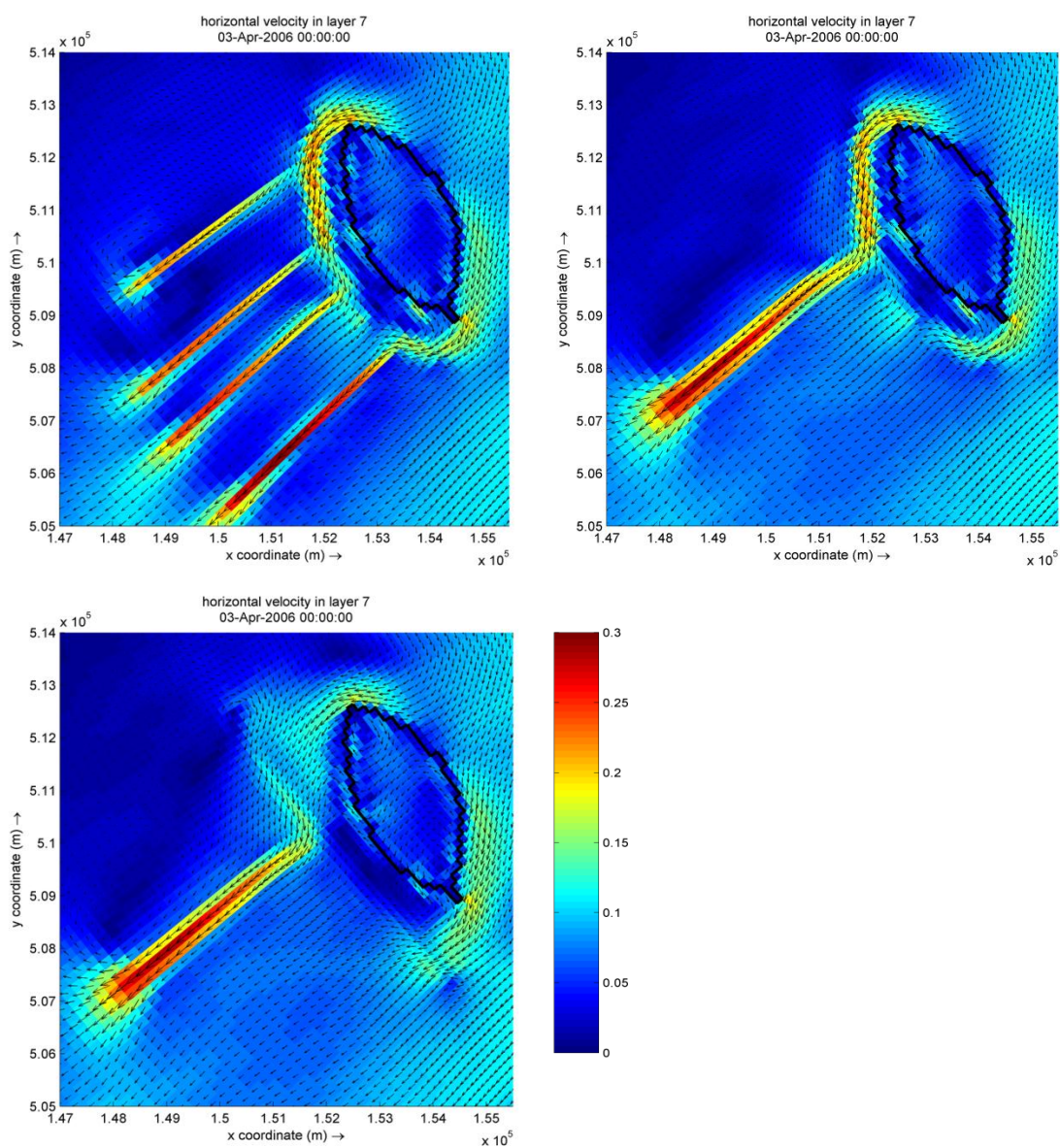
## **BIJLAGE B**

### **Effect op stroombeeld – berekeningen met grof rooster**

Wind NO 6 a 9 m/s, gem. 8.4 m/s

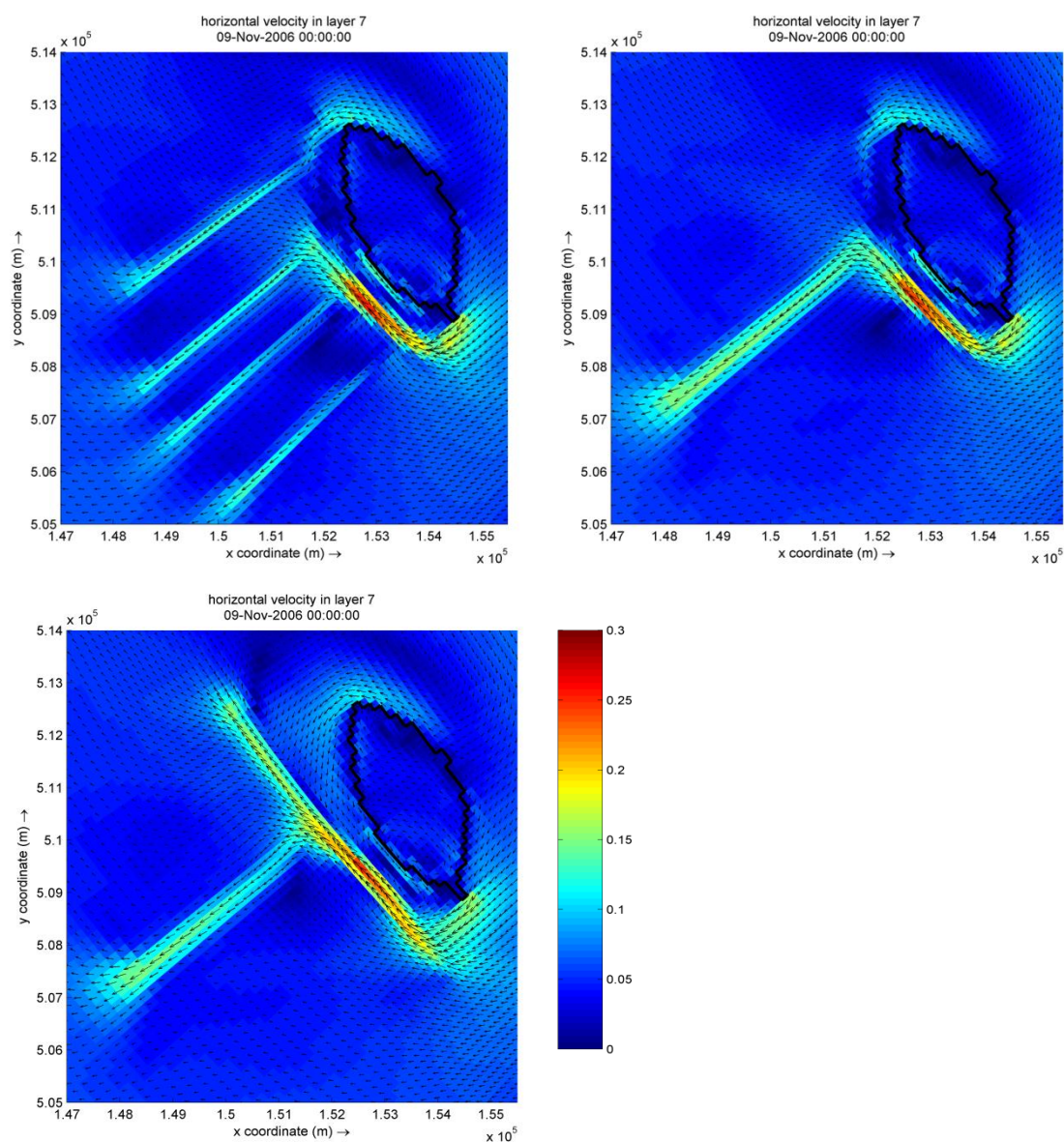


Wind Z-ZW, 2 a 12 m/s, gem. 8.3 m/s





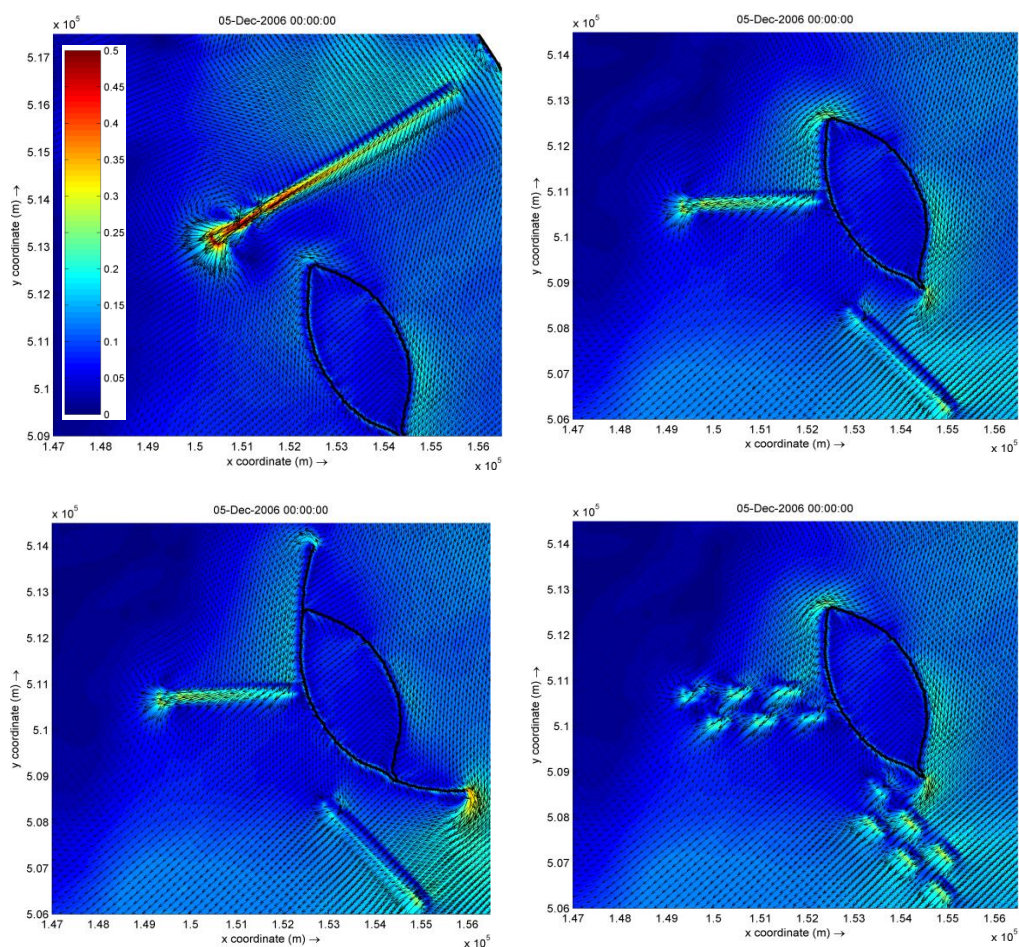
Wind ZW, 3 a 9 m/s, gem. 6.6 m/s



## **BIJLAGE C**

### **Effect op stroombeeld – berekeningen met fijn rooster**

Wind Z-ZW, 7 a 14 m/s, gem. 9,1 m/s



## **BIJLAGE D**

### **Bodemschuifspanningen stationaire windberekeningen**



