

Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu

# Validatie modelberekeningen slib en primaire productie

Achtergrondrapport MER winning suppletiezand Noordzee 2013 t/m 2017



Water. Wegen. Werken. Rijkswaterstaat.

# Winning suppletiezand Noordzee 2013-2017

Validatierapport

Geert Keetels Valesca Harezlak Thijs van Kessel Arnold van Rooijen Yann Friocourt Theo van der Kaaij Hans Los

1204963-000

Titel Winning suppletiezand Noordzee 2013-2017

| Opdrachtgever       | Project     | Kenmerk              | Pagina's |
|---------------------|-------------|----------------------|----------|
| RWS Dienst Noordzee | 1204963-000 | 1204963-000-ZKS-0038 | 101      |

## Trefwoorden

zandwinning, milieueffect rapportage, zuidelijke Noordzee, slib, primaire productie, modelstudie, kustsuppletie, Waddenzee

## Samenvatting

In dit rapport worden de calibratie en resultaten van de modellen voor waterbeweging, slib en nutriënttransport en primaire productie (GEM) gepresenteerd, die voor effectberekeningen worden gebruikt om het effect van zandwinning ten behoeve van kustsuppletie en/of kustversterking op slibconcentraties, doorzicht, nutriënttransport en primaire productie te berekenen. Alle drie modellen zijn gebaseerd op bestaande schematisaties en parameterinstellingen. Voor elk model is aandacht besteden aan het verdere kalibreren en valideren van een aantal parameters. Zo zijn de restdebieten in het Doverkanaal en door het Marsdiep vergeleken met metingen. Ook zijn de parameters van het slibmodel in de Waddenzee verder aangepast om de modelkwaliteit in dit gebied te verbeteren, zonder verlies van kwaliteit langs de Nederlandse kust. In het algemeen geeft een vergelijking van de modelresultaten met metingen bij een aantal meetstations aan dat de overeenstemming goed is. De berekende saliniteit kan locaal iets aan de lage kant zijn, maar echter zijn de saliniteitmetingen te schaars en de schattingen van de uitwisseling tussen de Noordzee en de Waddenzee te onzeker om dit verder te beoordelen aan de hand van alleen maar een één jaarsberekening. Het slibmodel onderschat de absolute slibconcentraties in de Waddenzee vanwege zijn beperkte horizontale resolutie maar is nog steeds in staat om relatieve veranderingen goed te reproduceren. Er wordt dus geconcludeerd dat het Zuno-DD model (combinatie waterbeweging, slib, en GEM) een goede basis vormt om met een scenario studie het effect van de zandwinning te kwantificeren op de Noordzee en Waddenzee.

## Referenties

Zaaknummer 31054726/Van den Broek

| Datum     | Auteur                   | Paraaf   | Review  | Paraaf   | Goedkeuring  | Paraaf  |
|-----------|--------------------------|--|---|--|--|---|
| jul. 2012 | Geert Keetels            | A  | Willem Stolte   | Ð  | Tom Schilperoort   | b.a.A   |
|           | Valesca Harezlak         |  |   |  |  |   |
|           | Thijs <b>van Kesse</b> l |  |   |  |  |   |
|           | Arnold van Rooijen       | ,  |   |  |  |   |
| _         | Yann Friocourt           | P  |   |  |  |   |
|           | Theo van der Kaaij       | 54   |   |  |  |   |
|           | Hans Los                 | D)   |   |  |  |   |
|           | Datum<br>jul. 2012       | DatumAuteurjul. 2012Geert KeetelsValesca HarezlakThijs van KesselArnold van RooijenArnold van RooijenYann FriocourtTheo van der KaaijHans LosC | DatumAuteurParaafjul. 2012Geert Keetels//Valesca Harezlak//Thijs van Kessel//Arnold van Rooijen//Yann Friocourt//Theo van der Kaaij//Hans Los// | Datum     Auteur     Paraaf     Review       jul. 2012     Geert Keetels     Willem Stolte       Valesca Harezlak     Valesca Harezlak       Thijs van Kessel     Arnold van Rooijen       Yann Friocourt     Yann Friocourt       Theo van der Kaaij     Yann       Hans Los     Yann | Datum     Auteur     Paraaf Review     Paraaf       jul. 2012     Geert Keetels     Willem Stolte     Image: Constraint of the stole       Valesca Harezlak     Valesca Harezlak     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole       Thijs van Kessel     Arnold van Rooijen     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole       Yann Friocourt     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole       Theo van der Kaaij     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole       Hans Los     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole     Image: Constraint of the stole | Datum     Auteur     Paraaf Review     Paraaf Goedkeuring       jul. 2012     Geert Keetels     Willem Stolte     Tom Schilperoort       Valesca Harezlak     Thijs van Kessel     Image: Store |

# Status

definitief

# Inhoud

| 1 | Inlei      | iding   | 1      |
|---|------------|---|--------|
|   | 1.1        | Modelleringstrategie  | 2      |
|   |            | 1.1.1 Het waterbewegingsmodel   | 3      |
|   |            | 1.1.2 Het slibmodel   | 3      |
|   |            | 1.1.3 Het nutriënttransport en primaire productie model GEM               | 4      |
|   |            | 1.1.4 Het DEB-model voor de ontwikkeling van Ensis                        | 4      |
|   |            | 1 1 5 Het EcoWasp-model van de Waddenzee                                  | 4      |
|   | 1.2        | Leeswijzer  | 5      |
| 2 | Invi       | oed van de keus van een jaar  | 7      |
| _ | 21         | Beschrijving stroming en transport in de zuidelijke Noordzee en Waddenzee | 7      |
|   | 22         | Zuidelijke Noordzee (ZUNO) en Waddenzee                                   | 8      |
|   | 23         | Discussie van het te gebruiken jaar                                       | 8      |
|   | 2.4        | Conclusies m.b.t. het gebruik van 2007 als basisjaar voor de berekeningen | 13     |
| 2 | Wat        | arbowagingsmodel  | 15     |
| 3 | 2 1        | Posobrijving basismodel en connecsingen                                   | 15     |
|   | 3.1<br>2.2 | Calibratia wateretandan   | 10     |
|   | ა.∠<br>ეე  |   | 17     |
|   | 3.3        |   | 17     |
|   | 3.4<br>2.5 | l otale waterstand  | 19     |
|   | 3.5        | 2.5.1 Debiet deer bet keneel ven Dever                                    | 19     |
|   | 2.0        | 3.5.1 Depiet door net kanaal van Dover                                    | 19     |
|   | 3.6        | Verificatie debiet door net Marsdiep                                      | 20     |
|   | 3.7        | Verificatie sainiteit   | 23     |
|   |            | 3.7.1 Hollandse kustzone  | 23     |
|   | ~ ~        | 3.7.2 Waddenzee   | 26     |
|   | 3.8        | Verificatie van de temperatuur  | 29     |
|   | 3.9        | Conclusies m.b.t. het waterbewegingsmodel                                 | 29     |
| 4 | Slib       | transport model   | 31     |
|   | 4.1        | Inleiding   | 31     |
|   | 4.2        | Beschrijving basismodel en aanpassingen                                   | 31     |
|   | 4.3        | Vergelijking modelresultaten en metingen                                  | 32     |
|   | 4.4        | Vergelijking met het Waddenzeemodel                                       | 40     |
|   | 4.5        | Toepassing Zuno-DD en Waddenzeemodel voor een verhoging van de concentra  | ties51 |
|   | 4.6        | Conclusies m.b.t. het slibmodel   | 52     |
| 5 | Mod        | del voor primaire productie   | 53     |
|   | 5.1        | Beschrijving basismodel en aanpassingen                                   | 53     |
|   |            | 5.1.1 Historie  | 53     |
|   |            | 5.1.2 Aanpassing voor deze MER  | 55     |
|   | 5.2        | Validatie   | 58     |
|   |            | 5.2.1 Kaartbeelden  | 58     |
|   |            | 5.2.2 Waddenzee model   | 60     |
|   |            | 5.2.3 Tijdreeksen   | 62     |
|   |            | 5.2.4 Targetdiagrammen  | 65     |
|   | 5.3        | Conclusie   | 67     |



| 6 | Sam  | nenvatting en conclusies                 | 69 |
|---|------|--|----|
|   | 6.1  | Inleiding                                | 69 |
|   | 6.2  | Algemene methodiek: een effectketenmodel | 69 |
|   | 6.3  | Koppeling van modules in keten           | 70 |
|   | 6.4  | Beoordeling resultaten                   | 72 |
|   | 6.5  | Samenvatting                             | 76 |
| 7 | Refe | erenties                                 | 79 |

# Bijlage(n)

| Α | Delf  | t3D-FLC  | OW model of Southern North Sea (Zuno-DD) | A-1 |
|---|-------|----------|--|-----|
|   | A.1   | Introdu  | iction                                   | A-1 |
|   | A.2   | Model s  | setup                                    | A-1 |
|   |       | A.2.1    | Computational domains, grid refinement   | A-1 |
|   |       | A.2.2    | Bathymetry updates                       | A-5 |
|   |       | A.2.3    | River discharges                         | A-6 |
|   |       | A.2.4    | Lateral boundary conditions              | A-7 |
|   |       | A.2.5    | Meteorological forcing                   | A-8 |
|   | A.3   | Refere   | nces                                     | A-9 |
| в | Bijla | ge Wad   | ldenzeemodel                             | B-1 |
|   | B.1   | Het Wa   | addenzeemodel                            | B-1 |
|   | B.2   | Refere   | nces                                     | B-4 |
| С | The   | buffer b | bed model                                | C-1 |
|   | C.1   | The bu   | iffer bed model                          | C-1 |
|   | C.2   | Refere   | nces                                     | C-3 |

# 1 Inleiding

In de Noordzee wordt jaarlijks zand gewonnen om de Nederlandse kust door middel van onderwater- en strandsuppleties te beschermen tegen overstromingen vanuit zee. Door het aanbrengen van suppleties wordt de bestaande kustlijn en het bestaande kustfundament (het zandige gebied tussen de NAP -20 m dieptelijn en de landwaartse grens van de duinen) behouden. Zonder de zandsuppleties zou de kust eroderen en de veiligheid ten aanzien van overstromingen in Nederland aanzienlijk verminderen. Om regulier kustonderhoud in de toekomst te kunnen uitvoeren wil Rijkswaterstaat ook de komende jaren zand winnen in de Noordzee. Voor het winnen van zand is een vergunning nodig, zoals beschreven in de Ontgrondingenwet. Om een vergunning te verkrijgen is het opstellen van een milieueffectrapportage (MER) vereist. Dit rapport is een achtergrondrapport bij de MER voor winning van suppletiezand voor het kustonderhoud door Rijkswaterstaat en bij de MER voor de winning van zand voor het herstel van de zwakke schakels in Noord-Holland.

In deze MER-en staat een beschrijving van het zandwinproces en de verschillende effecten daarvan. Het voorliggende achtergrondrapport en de bijbehorende rapporten hebben betrekking op één van de effecten van het zandwinnen op de Noordzee, namelijk het vrijkomen van fijn sediment (slib). Hieronder wordt een beknopt overzicht gepresenteerd van de keten van effecten die samenhangt met het vrijkomen van slib op de Noordzee.

Het sediment in de Noordzeebodem bestaat uit verschillende sedimentfracties. De grovere fracties (zand) zullen grotendeels in het beun van het baggerschip bezinken. Slib in de overvloei (pijlen 1 en 3 in Figuur 1.1), verdeelt zich over drie compartimenten: een klein deel sedimenteert direct met het fijne zand, een ander klein deel wat direct een pluim vormt en weg drijft (5-15%), en het grootste gedeelte dat als een dichtheid gedreven stroom aanwezig is op de bodem en op een (onbekend) moment dan wel in de bodem diffundeert dan wel wordt opgewerveld door golven en getij (Figuur 1.1). Deze pluim kan 2-4 meter dik weg drijven tot wel 4,5 km met de getijstroming mee (Hitchcock & Bell, 2004). Hierdoor is de directe vertroebeling als gevolg van overvloei verwaarloosbaar.

Tijdens stormen wordt het op de bodem gesedimenteerde slib bovendien opnieuw opgewoeld, en wordt het wederom getransporteerd. Het totale invloedsgebied van het fijne sediment dat bij het baggeren vrijkomt op de Noordzee beslaat, over langere perioden van jaren, vele tientallen tot honderden kilometers (zie eerdere MER-studies, b.v. Van Prooijen et al., 2006, 2007).

De extra hoeveelheid slib in de waterkolom zorgt voor een verhoging van de troebelheid. In een groot deel van het Nederlandse kustgebied is lichtbeschikbaarheid de beperkende factor voor primaire productie in tenminste een deel van het jaar, onder andere in ecologisch belangrijke gebieden zoals de Voordelta, Noordzeekustzone. Een vermindering van de beschikbaarheid van licht, door de verhoogde troebelheid als gevolg van zandwinning, kan daardoor direct invloed hebben op de primaire productie. Invloed op de primaire productie kan mogelijk gevolgen hebben voor het voedselaanbod voor hogere organismen (benthos en zoöplankton en de daarvan afhankelijke schelpdieren, vissen, zeezoogdieren en vogels). Inzicht in de effecten van de zandwinning op troebelheid, primaire productie, en schelpdieren is belangrijk voor het inzichtelijk maken van de effecten van zandwinning.



Figuur 1.1 Het mechanisme van overstort (uit Aarninkhof e.a. 2010, Spearman e.a. 2011)

Het doel van deze studie is om te bepalen wat het effect van de voorgenomen zandwinningen is op het troebelheid, de primaire productie, en schelpdieren in de gehele Nederlandse kustzone (inclusief de Waddenzee). Om dit doel te bereiken worden gedetailleerde numerieke modelberekeningen uitgevoerd, die dienen als onderbouwing van de MER. De numerieke modellen zijn opgezet om het effect van zandwinning op het ecosysteem van de Noordzee en de Waddenzee te kwantificeren. Dit rapport beschrijft de opzet en validatie van de modellen voor de waterbeweging, slibverspreiding, en primaire productie die 'voor de te verwachten effecten van de zandwin-initiatieven gebruikt worden.

Of de prestaties van een model als slecht, voldoende of goed beoordeeld kunnen worden, hangt af van de vraag die met behulp van het model beantwoordt moet worden. Het doel van onderhavige studie is om middels modelberekeningen inzicht te verkrijgen in de effecten van zandwinning op het ecosysteem van de Noordzee en de Waddenzee ten behoeve van de MER kustsuppleties (RWS) en de MER herstel van de zwakke schakels Noord Holland (HHNK) (Harezlak et al, 2012a,b). Dit houdt in dat de modellen die gebruikt gaan worden, voldoende toegespitst moet zijn op het beantwoorden van deze vraag.

## 1.1 Modelleringstrategie

De fysische en biologische processen die onderzocht en gekwantificeerd moeten worden, zijn complex. Op dit moment bestaat er geen numeriek model dat in staat is om deze processen volledig en aaneengesloten te reproduceren. In plaats daarvan wordt een combinatie van numerieke modellen gebruikt, waarbij de uitvoer van een model als invoer van een volgend model dient. Voor de huidige studie is een keten van vijf numerieke modellen opgezet. Een schematisatie van de relaties tussen de verschillende modellen is in Figuur 1.2 gegeven. Sommige modellen zijn gebruikt om de effecten op de Noordzee en de Waddenzee te kwantificeren, andere worden uitsluitend voor één gebied (of Noordzee of Waddenzee) gebruikt.

In de gekozen aanpak wordt eerst een waterbewegingsmodel gebruikt om de transportvelden te berekenen. De transportvelden worden daarna gebruikt om slibtransporten te bepalen, waarna nutriëntconcentraties en primaire productie worden berekend met behulp van de



transport- en slibvelden. De uitkomsten van de laatste twee modellen worden uiteindelijk gebruikt om het effect van de zandwinning op schelpdieren te berekenen.

Figuur 1.2 Relaties en uitvoer van de numerieke modellen gebruikt om het effect van zandwinning op de ecologie van de zuidelijke Noordzee en Waddenzee te kwantificeren.

# 1.1.1 Het waterbewegingsmodel

Het waterbewegingsmodel wordt gebruikt om de transportpatronen te berekenen die het transport van slib en nutriënten bepalen. Het model is gebaseerd op het Delft3D-FLOW software systeem en bevat de zuidelijke Noordzee (ZuNo) en Waddenzee. Delft3D-FLOW is een drie-dimensionaal hydrodynamisch computermodelpakket dat transportvelden in tijd en ruimte als gevolg van getij, wind, en rivierlozingen berekent. Het model gebruikt de zogenaamde "domein decompositie" (DD) techniek, waardoor roosterdomeinen van verschillende horizontale resoluties tegelijk gebruikt kunnen worden, wat een gunstige invloed heeft op de rekentijd. De opzet die in de huidige studie is gebruikt wordt Zuno-DD genoemd.

Voorafgaand aan de scenarioberekeningen is het hydrodynamische model gekalibreerd om de geobserveerde transportpatronen langs de Nederlandse kust en in de Waddenzee zo goed mogelijk weer te geven. In het voorliggende rapport wordt deze kalibratie en verificatie beschreven.

## 1.1.2 Het slibmodel

De slibconcentraties worden berekend met behulp van het Delft3D-WAQ software systeem. Dit model maakt gebruik van de transportvelden berekend door het waterbewegingsmodel (het hierboven omschreven Delft3D-FLOW), om het transport van slibdeeltjes te berekenen. Slibdeeltjes komen vrij in de beoogde wingebieden, en worden getransporteerd door stromingen. Onder invloed van de zwaartekracht kunnen de deeltjes op de bodem bezinken, maar ze kunnen ook als gevolg van de combinatie van stromingen, golven, en wind opwervelen, waarna ze onder invloed van stromingen verder getransporteerd kunnen worden. De details van het model worden in dit rapport verder gespecificeerd.



Het model wordt gebruikt om de slibconcentraties in de waterkolom en de zeebodem in de zuidelijke Noordzee en de Waddenzee te berekenen. Voorafgaand aan de scenarioberekeningen is het slibmodel gekalibreerd om de gemeten slibconcentraties en bodemsamenstelling langs de Nederlandse kust en in de Waddenzee zo goed mogelijk weer te geven. In het voorliggende rapport wordt deze kalibratie en verificatie beschreven.

## 1.1.3 Het nutriënttransport en primaire productie model GEM

Het GEM (Generisch Ecologisch Model) Noordzee model is ontwikkeld op basis van het generieke software systeem Delft3D-ECO. Dit model beschrijft het stoftransport, de nutriënten- en zuurstofhuishouding, de primaire productie, chlorofyl, samenstelling van het fytoplankton en het onderwater lichtklimaat.

Het model maakt gebruik van transportvelden uit het hydrodynamische model (het hierboven omschreven Delft3D-FLOW) en velden van slibconcentraties in de waterkolom en in de bodem (uit het hierboven omschreven slibmodel) om de verhouding en concentraties van nutriënten en licht te berekenen. Die hoeveelheden worden dan gebruikt om de primaire productie, chlorofyl, detritus en samenstelling van het fytoplankton te berekenen.

Het model wordt gebruikt om de primaire productie in de zuidelijke Noordzee en de Waddenzee te berekenen. Voorafgaand aan de scenarioberekeningen is het GEM model gekalibreerd om de gemeten hoeveelheden (nutriënten, chlorofyl, detritus, etc.) langs de Nederlandse kust en Waddenzee zo goed mogelijk weer te geven (Los et al., 2008; Los en Blaas, 2010).

1.1.4 Het DEB-model voor de ontwikkeling van *Ensis* 

Het effect van zandwinningen op de groei van schelpdieren in de Noordzee wordt bepaald met een "Dynamic Energy Budget "-model (Kooijman 2010, hierna te benoemen als DEB-model) voor *Ensis* (Wijsman e..a 2011). Voor deze toepassing is het effect van de zandwinning op de groei van *Ensis directus* (zwaardschede) berekend, met als reden dat *Ensis directus* een groot deel van de totale biomassa aan schelpdieren in de zuidelijke Noordzee omvat. Op basis van gehaltes van slib en particulair organisch materiaal (voornamelijk algen) afkomstig van het slibmodel en het GEM-model op zes gedefinieerd locaties in de kustzone, berekent dit model de groei van *Ensis* individuen. Met de huidige stand van zaken van DEB-modellen voor *Ensis* is het namelijk nog niet mogelijk de dynamica van populaties weer te geven. Zie Wijsman e.a. (2011) voor de opzet calibratie en validatie en scenarioberekeningen worden gerapporteerd in Schellekens (2012).

1.1.5 Het EcoWasp-model van de Waddenzee

Voor de ecologische toestand van de Waddenzee is het ecosysteemmodel EcoWasp toegepast. Het model gebruikt de verandering van de slibconcentraties van het slibmodel (voor de toestand ín de Waddenzee) en de verandering van de nutriënt- en algenconcentraties van het GEM-model (voor de toestand in de Noordzeekustzone als randvoorwaarden) om (onder andere) de biomassa van mosselen in de Waddenzee te berekenen. Het model berekent onder meer wat de biomassa van schelpdieren in het systeem kan zijn, en hoe groot de activiteit er van kan zijn (zoals filtratiesnelheden, groeisnelheden, reproductie). Met de uitkomsten kan tevens worden berekend hoeveel voedsel er geproduceerd wordt voor andere organismen; dit kunnen vogels zijn maar ook onder meer garnalen, zeesterren of krabben. De validatie en toepassing van dit EcoWasp-model worden gegeven in Brinkman (2012).

De toevoer van nutriënten en organisch materiaal vanuit het IJsselmeer, de uitwisseling tussen Waddenzee en Noordzee, de watertemperatuur en de zonnestraling zijn sturende grootheden voor de modelberekeningen. In het model wordt een "mossel" als 'standaard'-schelpdier beschouwd.

In het voorliggende rapport komt het EcoWasp-model verder niet ter sprake, de verificatie en scenarioberekeningen worden gerapporteerd in Brinkman (2012).

## 1.2 Leeswijzer

In dit rapport worden de resultaten van de hydrodynamische simulaties gepresenteerd en de calibratie van de modellen voor slib en voor nutriënttransport en primaire productie (GEM). De resultaten van de scenarioberekeningen zijn te vinden in Harezlak et al. (2012a,b), en de resultaten en de calibratie van de DEB- en EcoWasp-simulaties zijn te vinden in respectievelijk Schellekens (2012) en Brinkman (2012).

Deze rapportage is opgebouwd uit verschillende hoofdstukken. Voor het bepalen van het doorzicht en de primaire productie is allereerst een goed gekalibreerd stromingsmodel van essentieel belang. Gezien de rekentijd van de modellen bleek het onmogelijk om de waterbeweging voor meerdere jaren te modelleren. In plaats hiervan is de waterbeweging van één jaar gebruikt. De keus voor dat jaar wordt bediscussieerd in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 wordt de opzet en de calibratie van het waterbewegingsmodel beschreven. Ten tweede is een gekalibreerd slibtransportmodel benodigd. Hierin dient zowel het transport van het slib in het water als gevolg van getijstroming meegenomen te worden, als de uitwisseling van slib tussen de bodem en het water. Een uitgebreide beschrijving van de opzet en calibratie is gegeven in Hoofdstuk 4. Tenslotte is de calibratie van het GEM-model ter simulatie van het nutriëntentransport en de primaire productie van belang. Een beschrijving is gegeven in Hoofdstuk 5. Uiteindelijk wordt de rapportage afgesloten met Hoofdstuk 6: samenvatting en conclusies.

# 2 Invloed van de keus van een jaar

## 2.1 Beschrijving stroming en transport in de zuidelijke Noordzee en Waddenzee

De stroming in de Zuidelijke Noordzee worden sterk gedomineerd door het getij. De belangrijkste getijcomponent in de Nederlandse kustzone is het tweemaaldaagse maangetij M2. Nabij de Rijnmonding is de getijslag ongeveer 1.5 m tijdens doodtij en 1.9 m tijdens springtij. De richting van de getij gedreven stroming is van zuid-west naar noord-oost ongeveer parallel aan de Nederlandse kust. De maximale snelheden zijn ongeveer 1 m/s. De richting van de restsnelheid is ook ongeveer parallel aan de Nederlandse kust van zuid-west naar noord-oost. Nabij de kust varieert de meerjaargemiddelde restsnelheid als gevolg van wind en getij tussen de 0.03 en 0.1 m/s. Er treden echter grote variaties op in de tijd als gevolg van grote variabiliteit in de windsnelheid en richting boven de Zuidelijke Noordzee.

In de Waddenzee komt het getij vanuit het westen via de zeegaten tussen de eilanden binnen. Op de schaal van de hele Waddenzee loopt het resttransport globaal van zuid-west naar noord-oost, hoewel de interactie van het getij met de eilanden, geulen en platen echter resulteert in sterke lokale variatie in de magnitude en richting van het resttransport. Zo importeert bijvoorbeeld het Vlie en exporteert het Marsdiep.

De sterke getijstroming zorgt ervoor dat in het grootste deel van de Zuidelijke Noordzee de waterkolom verticaal goed gemengd is. Nabij de kust kan in het gebied dat onder invloed staat van de afvoer van (zoet) rivierwater onder bepaalde omstandigheden significante stratificatie ontstaan. De wetenschappelijke naam voor dergelijke kustzones is: Region of Freshwater Influence" (ROFI). Voor de Nederlandse kust is de Rijn-ROFI van belang. De stroming en stoftransportpatronen in horizontale en verticale richting kunnen onder gestratificeerde omstandigheden sterk verschillen van situaties waarin de waterkolom volledig gemengd is, zie Wiechen (2011) en De Boer et al. (2005). De responsen van gemengde en gestratificeerde waterkolommen op variaties in de wind zijn zeer verschillend. Dit geeft uiterst complexe stroom- en stofpatronen in de Rijn ROFI. De waterlozingen in de Waddenzee bij Den Oever en Kornwerderzand kunnen op de schaal van de westelijke Waddenzee en uitwisselingsgebied tussen Noordzee en Waddenzee vergelijkbare effecten geven (Buijsman en Ridderinkhof, 2007b; Elias e.a. 2005).

Het water van de Rijn en Maas vormt uiteindelijk de zogenaamde 'kustrivier', een kustlangse stroming die onder invloed van het getij, de Corioliskracht en wind noordwaarts langs de Nederlandse kust en Waddenzee naar Denemarkenis gericht. Het gedrag van deze kustrivier wordt bepaald door een aantal factoren

- Debiet van Rijn en Maas
- Initiële menging rivier en zeewater bij de monding
- Getij
- Wind
- Coriolis kracht
- Dichtheidsverschillen (saliniteit en temperatuur)

Voor een betrouwbare beschrijving van de stroming moeten de modellen deze processen voldoende nauwkeurig representeren. Specifiek voor de MER-zandwinning is de noodzaak

om de momentane en jaargemiddelde uitwisseling van water tussen het Noordzeesysteem en het Waddenzeesysteem voldoende nauwkeurig te reproduceren.

In deze studie is gebruik gemaakt van Delf3D-Flow waarmee deze processen in de Hollandse kustzone en Waddenzee zijn gemodelleerd.

## 2.2 Zuidelijke Noordzee (ZUNO) en Waddenzee

Voor de numerieke berekeningen binnen dit project is gekozen voor een keten van modellen, waarbij een model (Zuno-DD Figuur 3.1) wordt gebruikt om de waterbeweging en stoftransport op de schaal van de zuidelijke Noordzee (ZuNo) te beschrijven. Ook is een lokaal model van de Waddenzee met een hogere ruimtelijke resolutie gebruikt om lokale stromingsprocessen in de Waddenzee in meer detail te beschrijven. Dit model wordt vooral gebruikt om de kwaliteit van het Zuno-DD model in de Waddenzee te beoordelen. In bijlage B en hoofdstukken 4 en 5 wordt een vergelijking gepresenteerd van het model van de Zuidelijke Noordzee en het Waddenzeemodel voor slibtransport en voor primaire productie.

## 2.3 Discussie van het te gebruiken jaar

De rekentijd van het hydrodynamische Zuno-DD model is zodanig dat er is besloten slechts één scenario uit te voeren om de waterbeweging te berekenen. Als langjarige berekeningen uitgevoerd worden (zoals voor slib en nutriënttransport in de effectstudies, zie Harezlak e.a. 2012), betekent het dat de simulaties gebruik maken van de transportpatronen van slechts één jaar, waardoor er geen jaar tot jaar variatie optreedt in de transportvelden.

Voorafgaand aan de berekeningen is onderzocht welk jaar geschikt zou zijn voor de waterbewegingberekening. De variatie in massatransporten van water en slib in de Noordzee worden voornamelijk bepaald door variaties in wind. Daarom is besloten dat het te selecteren jaar qua wind en getij omstandigheden goedeen 'gemiddeld' jaar moest zijn.

Eerst is gekeken naar de windmetingen van het KNMI meteorologische station "de Kooy". Het station is gekozen vanwege zijn locatie, waardoor de gemeten wind voldoenderepresentatief is voorvoor de Waddenzee en de kust van de Noordzee.

De jaargemiddelde windroos voor 2007 in De Kooy is weergegeven op Figuur 2.1, met een vergelijking van de klimatologische windroos in De Kooy voor de periode 1981-2010. Jaargemiddeld zijn de windpatronen voor 2007 bijna identiek aan de climatologische windpatronen voor de laatste 30 jaar. In 2007 waren er iets meer zuidwestelijke wind en iets minder oostelijke wind, maar de verschillen zijn zeer klein.

Opvallend is dat de maandgemiddelde windpatronen in 2007 voor de meeste maanden heel anders zijn geweest dan de maandelijkse klimatologische windpatronen voor de laatste 30 jaar. Dit verschijnsel illustreert hoe theoretisch het concept van een gemiddeld jaar blijft. Voor de berekeningen betekent het (waarschijnlijk) dat de jaargemiddelde resultaten wel illustratief zijn voor een gemiddeld jaar, maar dat de resultaten per maand (bijvoorbeeld januari) niet illustratief zijn van een gemiddeld maand januari. In toekomstig onderzoek zou bijvoorbeeld daarom voor een andere aanpak gekozen worden met langjarige berekeningen.



Figuur 2.1 Jaargemiddelde windroos voor 2007 (rechts) vergeleken met de climatologische windroos voor de jaren 1981-2010 (rechts) voor het KNMI meetstation De Kooy.

Ook is gekeken naar het aantal dagen met harde wind in 2007 ten opzichte van de periode 1981-2010. Stormen spelen een belangrijke rol in slibtransport omdat daarbij gesedimenteerde slib opgewoeld kan worden en verder getransporteerd wordt.

Voor meetstation de Kooy zijn er in 2007 29 dagen geweest waarin de hoogste windstootsnelheid groter is geweest dan 20 m/s. Voor de periode 1981-2010 ligt het gemiddelde aantal dergelijke dagen op 30,2 (Tabel 2.1). Ook zijn dergelijke dagen er het hele jaar door geweest, in alle seizoenen (Figuur 2.2).

| Jaartal   | Jaargem. snelheid<br>(m/s) | Jaargem. richting<br>(°) | Aantal dagen dat hoogste<br>windsnelheid > 20 m/s |
|-----------|----------------------------|--------------------------|---|
| 1996      | 5,5                        | 200,1                    | 18  |
| 1997      | 5,4                        | 204,5                    | 25  |
| 1998      | 6,1                        | 220,5                    | 32  |
| 1999      | 5,8                        | 214,3                    | 27  |
| 2000      | 5,8                        | 219,5                    | 23  |
| 2001      | 5,4                        | 210,6                    | 16  |
| 2002      | 5,7                        | 201,1                    | 30  |
| 2003      | 5,2                        | 188,3                    | 10  |
| 2004      | 5,6                        | 213,0                    | 29  |
| 2005      | 5,4                        | 205,2                    | 17  |
| 2006      | 5,6                        | 198,3                    | 20  |
| 2007      | 5,8                        | 205,8                    | 29  |
| 2008      | 6,0                        | 196,6                    | 23  |
| 2009      | 5,5                        | 193,5                    | 15  |
| 2010      | 5,0                        | 187,4                    | 9   |
| 1981-2010 | 5,6                        | 203,9                    | 30,2  |

Tabel 2.1 Jaargemiddelde wind- snelheid en richting bij KNMI meetstation de Kooy, en aantal dagen dat de hoogste windstootsnelheid boven 20 m/s is geweest voor de jaren 1996 t/m 2010.



Figuur 2.2 Hoogste windsnelheid dagelijks gemeten bij KNMI meetstation De Kooy voor het jaar 2007 (blauw), vergeleken met de climatologische hoogste windsnelheid voor de jaren 1981-2010 (zwart) met de 10<sup>e</sup> en 90<sup>e</sup> percentiles (gestippelde lijnen).

In aanvulling op de wind is gekeken naar de Bovenrijn afvoer bij Lobith. In de kustzone zijn de nutriënten vooral afkomstig van de rivieren, waardoor de nutriëntvrachten sterk gerelateerd zijn aan de rivierafvoer.

De Bovenrijnafvoer bij Lobith voor het jaar 2007 toont zeker verschillen met de gemiddelde afvoer (Figuur 2.3). De jaargemiddelde afvoer bedraagt 2376 m<sup>3</sup>/s en dat is bijna gelijk aan de jaargemiddelde afvoer voor de periode 1989-2008 (2204 m<sup>3</sup>/s, Tabel 2.2). Wat betreft andere rivieren is bijvoorbeeld de rivierafvoer van de Thames uitzonderlijk hoog geweest in 2007 (Figuur 2.4). Op basis van eerdere studies (Blauw e.a. 2006) wordt opgemerkt dat de nutriëntgehaltes in de Nederlandse kustzone vooral bepaald zijn door de Rijn en Maas rivieren. Qua nutriëntinvoer heeft de Thames nauwelijks invloed (0-5% in de zone voorbij de - 20 NAP, Blauw e.a. 2006). Daardoor wordt geconcludeerd dat het jaar 2007 geen uitzonderlijk jaar is ten opzichte van de nutriëntvrachten en daarmee bruikbaar voor het gebruik in modelsimulaties voor de voorliggende studie.

Ook wat betreft afvoer door de spuisluizen van de Afsluitdijk (237 m<sup>3</sup>/s) zijn er zeker verschillen met de gemiddelde afvoer voor de periode 1989-2008 (202 m<sup>3</sup>/s). In de zomer van 2007 was bijvoorbeeld meer water afgevoerd dan normaal, maar in het algemeen was 2007 geen uitzonderlijk jaar.

| Tabel 2.2 | abel 2.2 Jaargemiddelde Bovenrijn afvoer bij Lobith voor de jaren 1989 t/m 2008. |                                       |  |  |
|-----------|--|---------------------------------------|--|--|
|           | Jaartal  | Jaargemiddelde Bovenrijnafvoer (m3/s) |  |  |
|           | 1989   | 1821,1                                |  |  |
|           | 1990   | 1856,5                                |  |  |
|           | 1991   | 1753,5                                |  |  |
|           | 1992   | 2012,0                                |  |  |
|           | 1993   | 2013,4                                |  |  |
|           | 1994   | 2531,0                                |  |  |
|           | 1995   | 2794,7                                |  |  |
|           | 1996   | 1759,2                                |  |  |
|           | 1997   | 1914,2                                |  |  |
|           | 1998   | 2267,8                                |  |  |
|           | 1999   | 2811,0                                |  |  |
|           | 2000   | 2521,3                                |  |  |
|           | 2001   | 2849,2                                |  |  |
|           | 2002   | 2974,2                                |  |  |
|           | 2003   | 1821,2                                |  |  |
|           | 2004   | 1890,1                                |  |  |
|           | 2005   | 1901,7                                |  |  |
|           | 2006   | 2093,8                                |  |  |
|           | 2007   | 2375,6                                |  |  |
|           | 2008   | 2116,5                                |  |  |
|           | 1989-2008  | 2203.9                                |  |  |



Figuur 2.3 Dagelijkse Bovenrijnafvoer bij Lobith in 2007 (blauw), vergeleken met de climatologische afvoer voor de jaren 1989-2008 (zwart) met de 10<sup>e</sup> en 90<sup>e</sup> percentiles (gestippelde lijnen).



Figuur 2.4 Dagelijkse afvoer van de Thames bij Kingston in 2007 (blauw), vergeleken met de climatologische afvoer voor de jaren 1989-2008 (zwart) met de 10<sup>e</sup> en 90<sup>e</sup> percentiles (gestippelde lijnen).

De sterkte van de verschillende getijcomponenten varieert over een cyclus van circa 18 jaar. In het jaar 2007 is de grootste getij component, het tweemaaldaagse maangetij M2, ongeveer 3% kleiner dan gemiddeld. De enkeldaagse componenten zijn wat sterker, circa 10% groter dan gemiddeld (Figuur 2.5). De invloed van die variaties op de transportprocessen blijft onbekend.



Figuur 2.5 Variatie van de knoopfactoren voor de M2 en K2 getijcomponenten.

## 2.4 Conclusies m.b.t. het gebruik van 2007 als basisjaar voor de berekeningen

Zowel waar het meteorologische condities (windsnelheid en -richting) als rivierafvoeren betreft lijkt 2007 een "gemiddeld" jaar, in de zin dat de jaargemiddelde grootheden dichtbij de langjarige gemiddelden liggen. In 2007 is de grootste getij component (M2) wel iets kleiner dan gemiddeld, maar tegelijkertijd is de semi-enkeldaagse component K1 groter dan gemiddeld.

Door één bepaald (echt of fictief) jaar te kiezen voor het berekenen van de transportvelden worden per definitie ook een aantal (impliciete of expliciete) keuzes gemaakt met betrekking tot welke processen wel en niet meegenomen worden in de berekeningen. Voor een aantal van die keuzes blijven de gevolgen hiervan op de dynamica van het gebied van interesse (hier de Nederlandse kustzone en de Waddenzee) grotendeels onbekend.

Een alternatief hiervoor is om meerdere jaren te berekenen. Zelfs met een dergelijke keus kunnen niet alle aspecten meegenomen worden die van belang kunnen zijn voor de dynamica van het systeem (bijvoorbeeld afhankelijk van de duur van de gekozen periode, toevallige combinatie jaren, etc.). In praktijk wordt dan vaak de rekentijd beperkend.

In het kader van deze studie van de doorlooptijd dusdanig dat het berekenen van meerdere jaren onhaalbaar was. Met deze randvoorwaarde is de keus van 2007 als basisjaar wel verstandig, gezien hoe "gemiddeld" 2007 was wat betreft wind en rivierafvoer.

# 3 Waterbewegingsmodel

## 3.1 Beschrijving basismodel en aanpassingen

Het basismodel is het hydrodynamische model "Zuno-DD" voor de zuidelijke Noordzee dat is ontwikkeld voor diverse projecten bij Deltares. Het model bestaat uit drie aparte rekenmodellen die doormiddel van domein decompositie (DD) aan elkaar gekoppeld worden, zie Figuur 3.1. Aan de zuidelijke en noordelijke randen worden de waterstanden voorgeschreven door een uitgebreide serie astronomische componenten. In alle domeinen wordt gebruik gemaakt van ruimtelijke variabele wind- en luchtdrukverdeling. De wind- en luchtdrukverdeling en andere meteorologische variabelen zijn afkomstig van het HIRLAM model van het KNMI. Voor de rivierafvoerdebieten zijn daggemiddelde waarden gebruikt (Bijlage A). De herkomst van de bodem is beschreven in Blaas et al. (2011).



Figuur 3.1 Links: rekenrooster van het Zuno-DD model voor de waterbeweging ; rechts: detail van het rekenrooster bij het Marsdiep

In Blaas et al. (2011) en van Wiechen (2011) is aangetoond dat met Zuno-DD de fysica en de dagelijkse variabiliteit in waterstanden en seizoensvariabiliteit in de saliniteit en temperatuur in de Hollandse kustzone realistisch gesimuleerd kunnen worden. In de vervolgstudie van Oeveren-Theeuwes (2011), is het fijnste rekendomein verder uitgebreid in westelijke en noordelijke richting. De prestatie van het model in de Waddenzee was echter nog niet goed genoeg voor toepassing in de Waddenzee. Belangrijkste beperking is de "doorstroombaarheid" van de rekencellen die de geulen representeren. Er is daarom een nieuwe bathymetrie gegeneerd van de Waddenzee op basis van de studie "Sterkte Belasting Waterkering" (SBW) model versie ws21, R. de Graaf (2009). Het SBW-model heeft een zeer fijnmazig rooster (200x200 m) ten opzichte van de resolutie van het Zuno-DD model in de Waddenzee (800x800 m), en bestaat op dit moment alleen in een 2D schematisatie.



Er bestaat daarnaast een hoge resolutie model van de Waddenzee (het zogenaamde Waddenzeemodel, zie ook bijlage B). Rechtstreekse toepassing van dat Waddenzeemodel is niet mogelijk omdat de rekentijd van dit model te hoog is om voor drie dimensionale stromingen slibberekeningen van meerdere maanden ingezet te worden. Wel is dat model gebruikt voor een aantal gevoeligheidsberekeningen voorafgaand de effectstudies, zie bijlage B. Daarom is alleen de bathymetrie van het SBW model geïnterpoleerd op de rooster van het Zuno-DD model.



Figuur 3.2 Bathymetrie gebruikt in het Zuno-DD model. Diepte in de geulen is gelijk aan de maximale diepte in het SBW model. Diepte op de platen is gelijk aan de gemiddelde diepte in het SBW model.

Met de resolutie van het Zuno-DD model kunnen stromingen op het niveau van de geulen niet weergegeven worden. Deze stroming is belangrijk voor een goede representatie van de stroming van en naar de Waddenzee. In de interpolatie van een bathymetrie met geulen en platen op een rooster moet voorzichtig worden omgegaan met de keuzes die gehanteerd worden. Zo is het wenselijk om zoveel mogelijk de transporten in de geulen goed te reproduceren, liever dan de dieptes realistisch weer te geven, zie Figuur 3.2. De diepte in de rekencellen van het Zuno-DD model waar een geul in ligt, is verkregen door het maximum te nemen van de diepte van de onderliggende rekencellen in het SBW model. Dit resulteert in een verdieping van de geulen, waardoor het debiet door de rekencellen in Zuno-DD overschat wordt. Die overschatting wordt gecompenseerd door een kunstmatige vergroting van de ruwheid in de kanalen om het debiet te verlagen. De benodigde waarde is vastgesteld

door calibratie van het M2-getij op een aantal stations in de Waddenzee, zie secties 3 en 4 van deze hoofdstuk.

## 3.2 Calibratie waterstanden

Het Zuno-DD model is afgeregeld door correctie van de astronomische randvoorwaarden van het model, zie Blaas et al. (2011). Hierbij is gekeken naar de prestatie van het model op de Noordzee en langs de Hollandse kust. De astronomische randvoorwaarden van het model zijn niet aangepast. Voor de Waddenzee heeft een verdere calibratie plaatsgevonden.

De doelvariabelen van deze calibratie (voortbouwend op Blaas e.a. 2011) zijn de amplitude en fase van het M2-getij in de Waddenzee. Afregeling geschiedt door aanpassing van de bodemruwheid in de geulen. De motivatie hiervoor is reeds gegeven in sectie 3.1. Een randvoorwaarde van deze calibratie was natuurlijk ook dat de kwaliteit van het model langs de Nederlandse kust niet zou verslechteren.

Transport variabelen als (rest)debiet in het Marsdiep, saliniteit en temperatuur worden als verificatiegrootheden beschouwd. Naast die waterbewegings-gerelateerde grootten wordt de uiteindelijke bruikbaarheid van het model ook uiteindelijk bepaald op basis van de slib- en GEM- berekeningen.

## 3.3 Calibratie getij

Figuur 3.3 geeft de M2-getij amplitude en fase op de Waddenzee stations weer van de "voor calibratie" run. Bij de stations Den Oever, Kornwerderzand en Harlingen is de M2-getij amplitude van de waterstand in het model groter dan gemeten. Door de ruwheid in de geulen kunstmatig te vergroten is de afwijking van de M2-getij amplitude verkleind tot circa 2 cm , zie Figuur 3.4. De fase-afwijking bij Den Oever en Kornwerderzand ten opzichte van de metingen is circa 10°. De afwijking in de voortplantingssnelheid van het M2-getij op het traject Den Helder- Den Oever-Kornwerderzand-Harlingen is minder dan 5°.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de belangrijkste getijcomponenten in de Noordzee, Waddenzee en langs de Hollandse kust.

Ten opzichte van eerdere vergelijkbare studies (vooral van de Goede en van Maren (2005)), zijn sommige keuzes die hier zijn gedaan heel anders. In de studie van de Goede van Maren (2005) is een model met een hoge resolutie (hoger dan Zuno-DD) gebruikt voor de waterbeweging. Met het Zuno-DD model is meer gekozen voor een acceptabel compromis tussen resolutie en rekentijd, dat ook voor de waterkwaliteitstudies (slib en primaire productie) gebruikt zou kunnen worden.

Met die keus worden sommige componenten iets minder goed weergegeven met het Zuno-DD model dan in de studie van de Goede en van Maren (2005).



Figuur 3.3 M2-getij in de Waddenzee voordat de calibratie via de bodemruwheid van de geulen heeft plaatsgevonden.De ruwheid (Manning) is constant in alle rekendomeinen 0.025 s/m<sup>1/3</sup>



Figuur 3.4 M2-getij in de Waddenzee na calibratie door middel van aanpassing van de Manningwaarde (bodemruwheid) in de geulen 0.035 s/m<sup>1/3</sup>. Manningwaarde op de platen is gelijk aan het SBW model 0.021 s/m<sup>1/3</sup>

| Tabel S. T Absolute Touten | in amplitude en lase van de b | elangrijkste gelijcomponenten | •       |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|
| Parameter                  |                               | de Goede (2005)               | Zuno-DD |
| Waterstanden in de         | Amplitude M2                  | 6.0 cm                        | 2.0 cm  |
| Noordzee                   | Fase M2                       | 6°                            | 1°      |
|                            | Amplitude S2                  | 3.9 cm                        | 1.0 cm  |
|                            | Fase S2                       | 6.8°                          | 2°      |
|                            | Amplitude M4                  | 2.3 cm                        | 2.0 cm  |
|                            | Fase M4                       | 21°                           | 15°     |
| Waterstanden               | Amplitude M2                  | 5.2 cm                        | 2.8 cm  |
| In de Waddenzee            | Fase M2                       | 3°                            | 10°     |
|                            | Amplitude S2                  | 2.9 cm                        | 1.0 cm  |
|                            | Fase S2                       | 6°                            | 8°      |
|                            | Amplitude M4                  | 2.0 cm                        | 3.2 cm  |
|                            | Fase M4                       | 23°                           | 23°     |
| Waterstanden               | Amplitude M2                  | 2.1 cm                        | 5.0 cm  |
| langs de Hollandse         | Fase M2                       | 1°                            | 1°      |
| kust                       | Amplitude S2                  | 3.3 cm                        | 1.0 cm  |
|                            | Fase S2                       | 6°                            | 1°      |
|                            | Amplitude M4                  | 2.0 cm                        | 5 cm    |
|                            | Fase M4                       | 23°                           | 12°     |

 Tabel 3.1
 Absolute fouten in amplitude en fase van de belangrijkste getijcomponenten.

## 3.4 Totale waterstand

Het M2-, S2-, N2-, K1-, O1- en M4-getij zijn de grootste getijcomponent in de Nederlandse kustwateren. De bijdrage van de andere componenten kunnen echter niet verwaarloosd worden. Deze bijdragen kunnen afzonderlijk bestudeerd worden in het frequentiedomein of gezamenlijk in het tijddomein. In bijlage B is een figuren (Figuur B.3) toegevoegd van de gemeten en gemodelleerde waterstanden bij Harlingen. In algemeen is de overeenkomst tussen de berekende en gemeten waterstanden goed.

## 3.5 Verificatie op basis van transporteigenschappen

## 3.5.1 Debiet door het kanaal van Dover

Figuur 3.5 geeft het cumulatieve debiet weer door het Kanaal van Dover. Gemiddeld over het gehele jaar 2007 is het debiet 114.000 m<sup>3</sup>/s. Prandle et al (1996) hebben uit metingen uit 1990-1991 een restdebiet afgeleid van circa 95.000 m<sup>3</sup>/s. Het berekende restdebiet komt redelijk overeen met deze schatting.



Figuur 3.5 Cumulatief debiet door het Kanaal van Dover.

## 3.6 Verificatie debiet door het Marsdiep

In Buijsman en Ridderinkhof (2007a) en Nauw en Ridderinkhof (2009) worden uitgebreide analyses gemaakt van de snelheidsmetingen die routinematige uitgevoerd worden tijdens de veerdienst tussen Den Helder en Texel. Figuur 3.6 geeft een overzicht van het verloop van het momentane debiet door het Marsdiep over de periode 1998-2008. Het maximale in- en uitstroomdebiet per etmaal is circa 100.000 m3/s. In de periode 2003-2006 is de maximale in- en uitstroom kleiner circa 85.000 m3/s. De herkomst van dit systematische verschil is niet duidelijk. Na 2006 ontbreken er veel metingen, zodat statistische analyse niet betrouwbaar is.



Figuur 3.6 Momentaan debiet door het Marsdiep. Kopie Figuur 13, Nauw (2009). Positieve waarden corresponderen met een stroming de Waddenzee in (vloedstroom) en negatieve waarden met een stroming de Waddenzee uit (ebstroom).

Figuur 3.7 geeft het verloop van het debiet door het Marsdiep gedurende een springtij-doodtijcyclus. Figuur 3.8 geeft het verloop weer van het berekende debiet in 2007. Het bereik van de maximale instroom (positief) en uitstroom (negatief) per etmaal komt goed overeen met de metingen over de periode 1998-2003 uit Figuur 3.6.



Figuur 3.7 Verloop van het momentane debiet door het Marsdiep van 3 tot 11 september 2002. Kopie Figuur 5 Buijsman en Ridderinkhof (2007a).



Figuur 3.8 Berekende momentane debiet door het Marsdiep in 2007.

Figuur 3.9 geeft het berekende debiet tijdens een springtij-doodtij-cyclus. Het bereik komt overeen met de metingen in Figuur 3.7. Er optreden wel afwijkingen tussen de gemeten en berekende waterstanden, maar omdat de periodes ook anders zijn blijft het moeilijk de oorzaak hiervan te identificeren.



Figuur 3.9 Berekende momentane debiet tijdens een springtijdoodtijcyclus in November 2007. De zwarte lijn geeft het debiet in een berekening met alleen het getij en de groene lijn het resultaat van de berekening met druk en wind.

Tabel 3.2 geeft de typische eigenschappen van het getij weer in het Marsdiep zoals beschreven door Buijsman en Ridderinkhof (2007a). Het M2-getij is de grootste component. De amplitude en fase in het model komen goed overeen met de analyse van Buijsman en Ridderinkhof (2007a) op de tijdreeks 1998-2003. De enkeldaagse componenten zijn in het model kleiner dan in de metingen. De verhouding tussen de som van de twee grootste enkeldaagse en tweemaaldaagse getijcomponenten geeft aan dat het getij in het Marsdiep gekarakteriseerd kan worden als tweemaaldaags. Het faseverschil tussen de waterstand bij Den Helder en het debiet door het Marsdiep geeft het karakter van de corresponderende getijgolf weer. Als er geen faseverschil is er sprake van een staande golf. De corresponderende getijgolf zou dan volledig worden gereflecteerd door de Waddenzee. Indien het fase verschil tussen waterstand en debiet 90° bedraagt dan is er sprake van een lopende golf. De corresponderende getijgolf slaat dan neer op het wad zonder reflectie.

Uit de analyse van Buijsman en Ridderinkhof (2007a) blijkt dat de tweemaaldaagse getijgolven in het Marsdiep een combinatie zijn van een staande golf en een lopende golf. De enkeldaagse getijden hebben een meer staande golf karakter. Het Zuno-DD model representeert dit verschil over het algemeen goed, zie Tabel 3.2. Merkwaardig is het afwijkende gedrag in het S2-getij.

Het is onwaarschijnlijk dat het S2 zich anders gedraagt dan de tweemaal daagse getijden M2 en N2. Het is daarom de vraag of dit geïnterpreteerd moet worden als een beperking van het model of een beperking in de analyse of metingen. Het faseverschil tussen het M2-getij en het M4-getij bepaalt de asymmetrie tussen de sterkte en duur van de eb- en vloedstroom. Het model geeft een grotere asymmetrie van de eb en vloedstroom ten opzichte van de meting van Buijsman en Ridderinkhof (2007a). Dit betekent dat het model kortere vloedperioden kent met hogere instroomsnelheden en langere ebperioden met lagere uitstroomsnelheden in vergelijking tot het gemeten debiet tussen 1998-2003.

Figuur 3.6 suggereert dat in de periode 2003-2006 wel enige asymmetrie in de eb en vloedstroom aanwezig is. Een dergelijke asymmetrie zou aanwezig kunnen zijn, omdat de vloed- en ebstroom dynamisch verschillend zijn. De vloedstroom wordt sterk bepaald door de impuls van het getij op de Noordzee, terwijl de ebstroom in het Marsdiep beperkt wordt door de stromingsweerstand door de geulen en platen in de Waddenzee. Daarnaast spelen driedimensionale aspecten ook een rol in de slibimport (Elias e.a. 2006).

Het jaargemiddelde debiet verschilt sterk per jaar van -5510 tot +3910 m<sup>3</sup>/s . Dit is meer dan een orde van magnitude lager dan de M2 component van het debiet. Voor het jaar 2007 zijn onvoldoende veerboot metingen beschikbaar om het restdebiet te berekenen (Nauw en Ridderinkhof, 2009).

Het berekende restdebiet komt in orde grootte overeen met de gegevens van Buijsman en Ridderinkhof (2007a) (voor de periode 1998-2003) en Nauw en Ridderinkhof (2009) voor de periode 1998-2008. Echter zijn de metingen erg variabel en de schattingen van netto debieten relatief onzeker vanwege hun grootte ten opzichte van de instantane debieten (Nauw en Ridderinkhof, 2009). In het algemeen geeft het model acceptabele debieten weer ten opzichte van bekende schattingen.

|   | Metingen      | Zuno-DD |
|---|---------------|---------|
| M2 amplitude in m <sup>3</sup> /s                           | 65750         | 62353   |
| M2 fase   | 187°          | 183°    |
| $(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$                                       | 0.20          | 0.14    |
| Faseverschil M2 Waterstand Den Helder en debiet Marsdiep    | 40°           | 41°     |
| Faseverschil S2 Waterstand Den Helder en debiet Marsdiep    | 10°           | 39°     |
| Faseverschil N2 Waterstand Den Helder en debiet Marsdiep    | 39°           | 42°     |
| Faseverschil 01 Waterstand Den Helder en debiet Marsdiep    | 62°           | 65°     |
| Faseverschil K1 Waterstand Den Helder en debiet Marsdiep    | 58°           | 67°     |
| Faseverschil M2 en M4: $2\Phi_2$ - $\Phi_4$                 | 73°           | 37°     |
| Getij gemiddelde debiet A <sub>0</sub> in m <sup>3</sup> /s | (-5510,+3910) | -1007   |

 Tabel 3.2
 Eigenschappen van het debiet door het Marsdiep

## 3.7 Verificatie saliniteit

Een andere verificatiegrootheid is de saliniteit. Saliniteit bepaalt via de vorming van stratificatie het gedrag van de stroming en de respons op variatie in de windsterkte en richting. Daarnaast zijn er onzekerheden en onnauwkeurigheden in de afvoer en saliniteit van het water uit de Rijn en Maas en bij de sluizen van Den Oever en Kornwerderzand in de Waddenzee.

## 3.7.1 Hollandse kustzone

Figuur 3.10, Figuur 3.11 en Figuur 3.12 geven de gemeten en berekende saliniteit in het oppervlakte water op drie punten tegenover Noordwijk. Het gebrek aan frequente metingen maakt het moeilijk om de kwaliteit van het model te beoordelen. Zo geeft het model een duidelijke verzoeting van het oppervlakte water nabij de kust in februari en maart 2007, consistent met de metingen (vooral Noordwijk 2 km uit de kust, Figuur 3.10). Die verzoeting is ook (hoewel minder) te zijn bij Noordwijk 10 km uit de kust (Figuur 3.11) met een saliniteit die



tijdelijk naar 20 PSU kan afnemen, maar een dergelijke verzoeting is niet terug te vinden in de metingen.

Figuur 3.10 Gemeten (rode kruizen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij Noordwijk 2 kilometer uit de kust (noordwk2).



Figuur 3.11 Gemeten (rode kruizen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij Noordwijk 20 kilometer uit de kust (noordwk20).

# Op 70 km uit de kust is de variabiliteit in de metingen lager ten opzichte van de meetlocaties op 2 en 20 km uit de kust. Het model op de locatie Noordwijk 70 km uit de kust wijkt maximaal 0.5 PSU af, zie Figuur 3.12. De metingen suggereren een grotere bandbreedte aan variaties dan wat het model weergeeft. Wel moet worden benadrukt dat die station in het gebied van het model ligt waar de resolutie grof is, omdat die buiten het gebied van interesse ligt.

Figuur 3.13 presenteert de gemeten en berekende saliniteit bij Terschelling 10 km uit de kust. De afwijking tussen de metingen en berekening is maximaal 1 PSU. Daar is de weergave van de gemeten variabiliteit weer beter.



Figuur 3.12 Gemeten (rode kruizen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij Noordwijk 70 kilometer uit de kust (noordwk70).

Deltares



Figuur 3.13 Gemeten (rode kruisen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij Terschelling 10 km uit de kust (terslg10).

## 3.7.2 Waddenzee

Figuur 3.14 presenteert de gemeten en berekende saliniteit in het oppervlakte water in het Marsdiep. De berekende saliniteit ligt voornamelijk onder de gemeten waarden. De systematisch stijging van de gemeten saliniteit in maart en april wordt weergegeven door het model maar het blijft te zoet. Figuur 3.15 geeft de gemeten en berekende saliniteit in de Vliestroom. De zoetere perioden in februari en maart 2007 worden weergeven door het model.

Figuur 3.16 geeft de berekende en gemeten saliniteit bij Harlingen. De saliniteit in het model wordt in de periode februari tot april erg laag. De meting in deze periode suggereert dat het model te zoet is. In de tweede helft van 2007 produceert het model te lage saliniteiten. Deze afwijking suggereert dat de uitwisseling tussen Waddenzee en Noordzee in het model aan de lage kant ligt. Toch blijken de instantane en restdebieten door het Marsdiep wel goed vergelijkbaar met schattingen op basis van metingen, hoewel die relatief onzeker blijven.



Figuur 3.14 Gemeten (rode kruizen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij station Marsdiep Noord (mardnd).



Figuur 3.15 Gemeten (rode kruisen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag in de Vliestroom (vlies) tussen Vlieland en Terschelling.



Figuur 3.16 Gemeten (rode kruisen) en berekende saliniteit (zwarte lijn) in de oppervlakte laag bij Harlingen (harlgvhvn).

| Aantal | Dat    | um      | Locatie        | Saliniteit |         |      |           |
|--------|--------|---------|----------------|------------|---------|------|-----------|
| meting | 1e     | laatste |                | Min.       | Gemidd. | Max. | Standarda |
| en     | meting | meting  |                |            |         |      | fwijking  |
| 388    | 15-6-  | 13-11-  | Harlingen      | 3.8        | 17.6    | 32.5 | 5.7       |
|        | 1977   | 2008    |                |            |         |      |           |
| 488    | 12-7-  | 14-11-  | Marsdiep       | 6.4        | 28.2    | 36.0 | 2.8       |
|        | 1977   | 2008    | noord          |            |         |      |           |
| 893    | 18-6-  | 13-11-  | Noordwijk 10   | 22.7       | 30.4    | 33.6 | 1.5       |
|        | 1975   | 2008    | km uit de kust |            |         |      |           |
| 576    | 18-6-  | 13-11-  | Noordwijk 2    | 18.9       | 28.7    | 34.8 | 2.1       |
|        | 1975   | 2008    | km uit de kust |            |         |      |           |
| 575    | 18-6-  | 13-11-  | Noordwijk 20   | 23.6       | 31.8    | 34.6 | 1.3       |
|        | 1975   | 2008    | km uit de kust |            |         |      |           |
| 488    | 18-6-  | 13-11-  | Noordwijk 70   | 32.8       | 34.9    | 35.6 | 0.3       |
|        | 1975   | 2008    | km uit de kust |            |         |      |           |
| 432    | 23-6-  | 14-10-  | Terschelling   | 29.0       | 32.6    | 35.1 | 0.9       |
|        | 1975   | 2008    | 10 km uit de   |            |         |      |           |
|        |        |         | kust           |            |         |      |           |
| 362    | 15-6-  | 13-11-  | Vliestroom     | 16.3       | 29.7    | 33.4 | 2.5       |
|        | 1977   | 2008    |                |            |         |      |           |

| Tabel 3.3 | Langjarige saliniteitstatistieken voor een | paar locaties |
|-----------|--|---------------|
|-----------|--|---------------|

In het algemeen geeft het model voor het jaar 2007 een veel grotere bandbreedte van saliniteit variaties dan wat terug te vinden is in de metingen, maar het gebrek aan frequentere zoutmetingen laat niet toe om de timing van omstandigheden met lage of hoge saliniteit goed weergeeft. Over langere periodes zitten dergelijke lage of hoge waarden ook in de metingen,

waardoor het geconcludeerd kan worden dat het model de langjarige variabiliteit van zout wel goed reproduceert.

Op zich zou dat inzicht toenemen door meerdere jaren achter elkaar te berekenen, waardoor metingen van verschillende jaren wel gecombineerd mogen worden. Echter, laat de rekentijd van het Zuno-DD model voor waterbeweging (8 dagen om één jaar te simuleren) in praktijk niet toe om dergelijke exercities uit te voeren.

## 3.8 Verificatie van de temperatuur

Figuur 3.17 geeft het verloop van de temperatuur bij Schiermonnikoog. Het verloop van de temperatuur wordt over het algemeen goed weergegeven door het model. De opwarming verloopt iets te langzaam, maar de afkoelingsfase vanaf september komt zeer goed overeen met de metingen. Dit gedrag is eerder waargenomen in voorgaande versies van het Zuno-DD model. In Blaas e.a. (2011) is aangetoond dat met dezelfde meteorologische gegevens (afkomstig van het meteorologische model HIRLAM van het KNMI) en instellingen van het temperatuurmodel in Delft3D het jaar 2006 nauwkeurig gerepresenteerd werd. De herkomst van de afwijking in het voorjaar van 2007 is niet bekend. Voor de waterbeweging is een dergelijk afwijking zonder gevolg. Eventueel kan die afwijking gevolgen hebben op de timing van de bloei van primaire productie. Dit zal worden beoordeeld aan de hand van de resultaten van het model voor primaire productie later in dit rapport.



Figuur 3.17 Gemeten (rode kruizen) en berekende temperatuur (groen) bij Schiermonnikoog.

## 3.9 Conclusies m.b.t. het waterbewegingsmodel

Na de hier gepresenteerde calibratie en validatie wordt geconcludeerd:

- dat de waterbeweging langs de Nederlandse kust, in termen van waterstanden en debieten goed overeen komt met de waarnemingen en andere modelstudies;
- dat de waterbeweging in de Waddenzee, in termen van waterstanden en debieten goed overeen komt met de waarnemingen en andere modelstudies;
- daarom, dat het model in deze vorm kan worden toegepast voor deze effectenstudie.
- dat de modelsaliniteit nog afwijkingen laat zien met de metingen. Omdat de saliniteit bepaald wordt door het transport van zoetwater vanuit de rivieren, impliceert deze opmerking dat de transportpatronen mogelijk nog zouden verbeterd kunnen worden.


Echter, maakt het beperkt aantal meetpunten een volledige beoordeling van de kwaliteit van het model op basis van een berekening van één jaar onmogelijk. Om meer inzicht hierover te krijgen zouden langjarige berekeningen wel helpen. Dit kon in het kader van deze studie niet gebeuren. Toch blijft de vraag of de modelsaliniteit voor 2007 dan ook beter zou worden.

Wel moet benadrukt worden dat de complete beoordeling van de toepasbaarheid het Zuno-DD model voor deze studie ook gebaseerd moet zijn op de uitkomst van de slib en primaire productie onderdelen.

### 4 Slibtransport model

#### 4.1 Inleiding

Ten behoeve van de MER-zandwinning wordt het Zuno (Zuidelijke Noordzee) model voor slib en GEM (primaire productie) sommen ingezet. Dit model is in de afgelopen jaren specifiek ontwikkeld voor het berekenen van (slib)transport in de Nederlandse kustzone. Het model is opgezet in het Delft3D-WAQ-systeem, dat onderdeel is van het Delft3D modelpakket. Voor de huidige studie is een versie van het Zuno model gebruikt waarin domein decompositie is toegepast. Het (Zuno-DD) model bestaat uit drie roosters, elk met een eigen resolutie. Het rooster voor de Hollandse kust heeft de hoogste resolutie, terwijl op dieper water de gridresolutie lager is. Het model is een uitbreiding op het oorspronkelijke (grovere) Zuno model, en is reeds gebruikt in een aantal eerdere studies (o.a. 'MOS<sup>2</sup>' (Blaas et al., 2012) en 'Cadmium' (Van Kessel et al., 2012).

Voor de huidige MER-zandwinning is het interessegebied behalve de kustzone ook het waddengebied, omdat ook relatief grootschalige zandwinning voor de versterking van de kust van Noord-Holland op locaties relatief dicht bij het Marsdiep moet worden getoetst.

Het bestaande Zuno-DD slibmodel is nog niet gekalibreerd voor de Waddenzee. De berekende slibconcentraties in de Waddenzee zijn in het bestaande model veel te laag vergeleken met de gemeten concentraties. In dit hoofdstuk worden modelverbeteringen besproken en resultaten hiervan gepresenteerd. Het doel van deze modelverbeteringen is om de kwaliteit van het model in de Waddenzee te verbeteren met behoud van de kwaliteit in de Noordzee. Daarnaast dient dit hoofdstuk als validatie voor het gehele slibmodel.

Als referentie voor deze verbeteringen dienen enerzijds de beschikbare meetgegevens voor slib in de Waddenzee en anderzijds een onderzoeksmodel voor slibtransport specifiek in de Waddenzee, dat een veel hogere resolutie heeft dan Zuno-DD. Dit model is praktisch gezien niet geschikt voor de huidige MER-studie, vanwege de lange rekentijd en het beperkte modeldomein, waar de Nederlandse kustzone grotendeels buiten valt. Hiernaast is ook nog het SBW model voor de Waddenzee beschikbaar waarmee de belasting van waterkeringen wordt berekend. Vanwege de zeer hoge horizontale resolutie en zeer lage verticale resolutie (namelijk 2D) is dit SBW model ook niet geschikt voor de huidige MER-studie.

#### 4.2 Beschrijving basismodel en aanpassingen

Voor een beschrijving van het basismodel wordt verwezen naar Van Kessel et al. (2011), Blaas et al. (2012) en Van Kessel et al. (2012). De belangrijkste aanpassingen ten opzichte van het door Blaas et al. (2012) beschreven Zuno-DD model zijn:

- 1. verhoging van de roosterresolutie in de Waddenzee;
- 2. invoering van een depositiekans <1;
- 3. aangepaste instellingen bufferlaag.

De instellingen voor de bufferlaag in het model zijn zo aangepast dat de buffercapaciteit van deze laag (d.w.z. laagdikte en evenwichtspercentage slib) en de uitwisselingssnelheid van deze laag met de waterkolom (d.w.z. gemiddelde verblijftijd) gelijk zijn aan de instellingen die zijn gevalideerd in studie naar de verspreiding van cadmium (Van Oeveren, 2011) en Van Kessel et al. (2012)). Net als in de cadmiumstudie is het jaar 2007 gebruikt als karakteristiek of gemiddeld voor de langjarige simulaties. Van Kessel et al. (2012) laat zien dat het gebruik van dit referentiejaar geoorloofd is.

Ten slotte is de instelling op een aantal detailpunten nog aangepast (o.a. minimale verticale diffusie en minimale waterdiepte waarbij depositie kan optreden).

De verhoging van de roosterresolutie in de Waddenzee is gerealiseerd door uitgaande van het hydrodynamische rooster geen aggregatie toe te passen in de Waddenzee. Hierdoor is de resolutie met een factor 3×3 verhoogd. Deze resolutie is voldoende om de grootste geulen en platen in de Waddenzee af te beelden op het rooster (figuur 3.2). Deze resolutie is echter te grof om kleinere geulen en platen af te beelden: kleinere details worden 'uitgesmeerd'.

De depositiekans p < 1 is ingevoerd om de slibconcentratie bij de bodem te verhogen, met name rond kentering. In de oorspronkelijke instellingen is de depostieflux (= afzetting op de bodem) gelijk aan de bezinkflux (flux in de waterkolom, namelijk het product van valsnelheid en concentratie:  $D = S = w_s C$ . In de nieuwe instellingen geldt  $D = p w_s C$  (met p = 0.1), waardoor rond kentering de bezinkflux naar de onderste rekenlaag initieel groter is dan de depositieflux naar de bodem. Hierdoor ontstaat tijdens kentering een concentratiepiek nabij de bodem. In combinatie met estuariene circulatie neemt hierdoor de netto slibflux door de zeegaten naar de Waddenzee toe, alsmede de concentratie in de Waddenzee. Tegenover deze verbeteringen staan geen verslechteringen van de modelprestatie op de Noordzee. Integendeel, door de gemiddeld hogere concentratie nabij de bodem is de overeenstemming met de (weinige) bodemmetingen groter. Dit geldt ook voor de netto slibflux langs de kust, zie §4.3.

#### 4.3 Vergelijking modelresultaten en metingen

De volgende resultaten worden typisch beschouwd om een slibmodel te valideren:

- bodemschuifspanning
- slibconcentratie waterkolom (bij oppervlakte en bodem)
  - o **temporeel**
  - o ruimtelijk
- slibflux waterkolom
- bodemsamenstelling
- aanslibbing
- slibbalans

Bij de ontwikkeling van het Zuno-DD slibmodel zijn al deze aspecten in de loop der jaren aan de orde geweest. De focus ligt voor deze studie op de slibconcentratie in de waterkolom, omdat deze direct bepalend is voor de primaire productie.

In de volgende figuren worden steeds de resultaten met de nieuwe instellingen van het ZUNO DD (label 'huidig') vergeleken met eerdere resultaten in het kader van de verspreidingsstudie cadmium (label 'cadmium', Van Oeveren 2011) en de studie mos2 (label 'mos2', Blaas et al. 2011). Het mos2-model heeft een geaggregeerd rooster in de Waddenzee, de roosters van het cadmium-model en het huidige model zijn gelijk. Alleen het huidige model heeft een depositiekans < 1 en ook enkele andere instellingen wijken af (zie onder §4.2)

Figuur 4.1 toont de gemeten en berekende slibconcentratie bij Noordwijk 10 voor de drie modellen. De gemeten slib concentraties worden redelijk gereproduceerd. De model resultaten zijn sterk onderling gelijkend. Omdat de modellen steeds zijn afgeregeld op Noordwijk 10 is dit ook de verwachting en bedoeling. Wel is de seizoensdynamiek wat groter voor de berekening 'cadmium' en 'huidig', met lagere concentraties in de zomer en hogere concentraties tijdens de winter, met name tijdens storm. Dit is te verklaren door de grotere

buffercapaciteit in deze berekeningen. Hiermee is inzichtelijk gemaakt dat het aangepaste model zijn kwaliteit in de Noordzee heeft behouden.

Figuur 4.2 toont de gemeten en berekende slibconcentratie bij Doove Balg west voor de drie modellen. Dit station wordt representatief geacht voor het westelijke deel van de Waddenzee. Met de nieuwe instellingen (rode lijn) blijkt de berekende concentratie sterk te zijn toegenomen. De berekende concentratie is nu beter in overeenstemming met de gemeten concentratie, maar nog altijd is de berekende concentratie ten minste een factor 2 te laag.

Figuur 4.3 toont de gemeten en berekende slibconcentratie voor een aantal stations in de Noordzee en de kustzone buiten de Waddenzee. Voor deze stations is het (gemiddelde) concentratieniveau wel realistisch. Merk op dat de schalen van de subplots afwijken.



Figuur 4.1 Slibconcentratie bij oppervlakte (mg/l), station Noordwijk 10. Blauw: mos2; Groen: cadmium; Rood: huidig; Zwarte stippen: waarnemingen.



*Figuur 4.2* Slibconcentratie bij oppervlakte (*mg/l*), station Doove Balg west. Blauw: mos2; Groen: cadmium; Rood: huidig; Zwarte stippen: waarnemingen.





Figuur 4.3 Gemeten en berekende slibconcentratie (mg/l) bij het oppervlak met huidig model. a) Terschelling 10 km; b) Terschelling 175 km; c) Noordwijk 2 km; d) Noordwijk 10 km; e) Noordwijk 20 km; f) Noordwijk 70 km; g) Schouwen 10 km; h) Goeree 6 km.



Figuur 4.4 Gemeten en berekende slibconcentratie (mg/l) bij de bodem, station Noordwijk 2. Zwarte stippen: metingen 2001, tijd-as 6 jaar verschoven Rood: huidig model, met depositiekans = 0.1; Groen: cadmiummodel, depositiekans = 1.

Figuur 4.4 toont de berekende concentratie nabij de bodem bij Noordwijk 2 voor het huidige en cadmium-model. Door het gebruik van een depositiekans is de concentratie nabij de bodem aanmerkelijk toegenomen, in tegenstelling tot die bij het oppervlak (zie Figuur 4.1). Ter referentie zijn in deze figuur ook de minipod-metingen nabij de bodem bij Noordwijk 2 in de periode 2001/2002 geplot (CEFAS, 2003) (attentie: met een verschoven tijd-as). Het berekende jaargemiddelde niveau stemt goed overeen met het gemeten jaargemiddelde, zie Tabel 4.1.

| Tabel 4.1 | Vergelijking van gemeten en berekende gemiddelde concentratie (mg/l) (hoogfrequente |                   |                   |             |               |               |  |  |
|-----------|---|-------------------|-------------------|-------------|---------------|---------------|--|--|
| waa       | rnemingen). Attentie: geen exac   | te vergelijking n | nogelijk, wan     | t middeling | periodes zijr | verschillend. |  |  |
| Station   | meti  | ng (2001)         | model             | (2007)      | model         | (2007)        |  |  |
|           |   |                   | ممير بالمميام مرم |             | بمثلما بيما   |               |  |  |

|                          |     | cadmium | huidig |
|--------------------------|-----|---------|--------|
| Noordwijk 2 bodem        | 96  | 51      | 73     |
| Noordwijk 5 bodem        | 16  | 12.8    | 13.2   |
| Noordwijk 10 oppervlakte | 4.4 | 6.1     | 6.2    |

Figuur 4.5 toont de berekende jaargemiddelde concentratie aan de oppervlakte voor de huidige instellingen. Een correcte vergelijking met eerdere instellingen is niet mogelijk, omdat in deze berekeningen geen statistiek heeft meegedraaid om jaargemiddelden te bepalen. De waargenomen ruimtelijke verdeling komt goed overeen met die van de slibatlas van Suijlen en Duin (2001). Het berekende patroon is volledig tot stand gekomen vanuit de modelsimulaties; het slibmodel wordt uitsluitend aangestuurd met hydrodynamica en randconcentraties. Initiële condities in waterkolom en bodem spelen geen rol, het model is doorgerekend tot volledig dynamisch evenwicht.



Figuur 4.5 Gemeten (links) en berekende (rechts) jaargemiddelde slibconcentraties bij oppervlak (mg/l). Huidig model, gemiddeld over 2007..

Om een vergelijking met de berekende ruimtelijk verdeling van eerdere simulaties te kunnen maken, zijn momentopnamen vergeleken. Figuur 4.6 toont de slibconcentratie boven- en onderin de waterkolom op een willekeurig moment in de berekende tijdreeks, 26 februari 2007. Er is ook een momentopname van een maand later weergegeven, zodat duidelijk wordt dat er geen sprake is van een toevallige goede overeenkomst op die willekeurige dag. Voor 26 maart (zie Figuur 4.7) wijkt het beeld niet wezenlijk af van 26 februari.

De berekende concentratie op de Noordzee wijkt niet sterk af tussen de verschillende berekeningen. Dit is conform de constatering voor station Noordwijk 10. In de Waddenzee en in de zuidwestelijke Voordelta zijn er wel duidelijke verschillen: voor de huidige berekening zijn de concentraties hoger. Nabij de bodem zijn de verschillen groter dan bij de oppervlakte, dit komt door het gebruik van een depositiekans < 1 in de huidige berekening. In de Voordelta is de berekende hogere concentratie conform de slibatlas (Figuur 4.5).

In Figuur 4.8 zijn de resultaten voor alle MWTL-stations samengevat in een zogeheten 'target diagram' (Jolliff et al., 2009). De x-as is een maat voor de berekende variabiliteit van de slibconcentratie ten opzichte van waargenomen variabiliteit, de y-as is een maat voor de bias van het model ten opzichte van de metingen. Een perfecte overeenstemming leidt tot een positie (0,0) in het diagram. Alle punten binnen de getrokken cirkel krijgen het predicaat 'redelijk', alle punten binnen de gestippelde cirkel krijgen het predicaat 'goed'. Geconcludeerd wordt dat het merendeel van de meetpunten redelijk tot goed door het model wordt gereproduceerd. Ten opzichte van het uitgangspunt (Zuno DD Blaas et al. (2012)) is het model aanmerkelijk verbeterd, met name in de Zuidwestelijke Delta en in de Waddenzee. Niettemin valt een aantal Waddenzeestations nog buiten de cirkel. Daarom wordt ook het Waddenzeemodel ingezet ter evaluatie van het ZUNO DD model.



Figuur 4.6 Berekende slibconcentratie (mg/l) op 26 februari 2007, 0h. a,b): huidig model; c,d) cadmium; e,f) mos2. a,c,e): bij de oppervlakte; b,d,f): bij de bodem.



Figuur 4.7 Berekende oppervlakte slibconcentratie (mg/l) op 26 maart 2007, 0h. a): huidig model; b) cadmium; c) mos2.



Figuur 4.8 Target diagram voor slibconcentraties voor alle MWTL-stations.

Uit deze resultaten blijkt dat het model verder is verbeterd ten opzichte van de huidige stateof-the-art en derhalve het best beschikbare instrumentarium is. Het model is goed in staat om de waargenomen slibdynamiek in de kustzone over lange tijd te reproduceren. Naarmate meer op kleine ruimtelijke schaal (< 1 km) en korte tijdschaal (< 1 uur) wordt gekeken, neemt de modelprestatie af. Niettemin is het model geschikt voor het beoogde doel: voorspelling van grootschalige verspreiding van slib in de kustzone. Het grootste zorgpunt van het model is de prestatie in de Waddenzee, waarin de berekende concentratie weliswaar sterk is verhoogd, maar nog steeds achterblijft bij de waargenomen concentratie. Hieraan wordt in de volgende paragraaf extra aandacht besteed.

#### 4.4 Vergelijking met het Waddenzeemodel

Het Waddenzeemodel is een model met een veel fijner rooster dan het Zuno-DD model. Hiermee wordt het patroon van platen en geulen nauwkeuriger gerepresenteerd. Niettemin kunnen kleine geulen die het platensysteem bij eb ontwateren(< 250 m) niet worden opgelost, alle grotere wel. Op de platen is dit rooster circa een factor 2×2 fijner, in de zeegaten is het verschil nog groter doordat in het Waddenzeerooster hier extra roosterlijnen zijn toegevoegd. In 3D zijn de rekentijden van het Waddenzeemodel lang: 1 week rekenen voor een simulatieperiode van 1 jaar. Ter vergelijking, voor ZUNO-DD is deze rekentijd ongeveer 12 uur. Voor het bereiken van dynamisch evenwicht (bijvoorbeeld na een verandering in het slibklimaat in de kustzone) moet meerdere tot vele jaren worden doorgerekend. Dit beperkt de praktische inzet van dit model. Het Waddenzeemodel is dan ook niet gebruikt om effectbepalingen door te rekenen, maar de uitkomsten van het Waddenzeemodel zijn wel gebruikt ter ondersteuning van de effectberekeningen met het ZUNO-DD model.

De instellingen voor de slibparameters is vrijwel gelijk voor beide modellen. Dit is niet verwonderlijk, aangezien succesvolle vernieuwingen in onderzoeksmodellen hun weg vinden naar adviesmodellen. Niettemin is het berekende concentratieniveau voor het Waddenzeemodel veel hoger dan voor het Zuno-DD model. Figuur 4.9 toont de berekende en gemeten concentratie voor station Doove Balg west. De met het Waddenzeemodel berekende concentraties zijn in tegenstelling tot die van het Zuno-DD model zeker niet te laag (vergelijk met Figuur 4.2). Eerder is sprake van een overschatting van de concentratie.



Figuur 4.9 Berekende (met Waddenzeemodel) en gemeten (rode stippen) slibconcentratie (mg/l) bij de oppervlakte. Station = Doove Balg west. Vergelijk met Figuur 4.2 voor vergelijking met Zuno-DD.

Figuur 4.10 toont een vergelijking tussen de berekende jaargemiddelde oppervlakteconcentratie in de Waddenzee voor beide modellen. Voor een goede vergelijking is de (logarithmische) kleurenschaal gelijk gekozen. De berekende concentraties in het Waddenzeemodel variëren van circa 30 mg/l in de zeegaten tot enkele honderden mg/l boven de platen voor de kust van Groningen en Friesland. De berekende concentraties in het Zuno-DD model variëren van circa 15 tot 20 mg/l in de zeegaten tot lokaal meer dan 100 mg/l boven de platen voor de kust van Groningen en Friesland. Zowel in het Zuno-DD als in het Waddenzeemodel neemt de concentratie in oostelijke richting toe. Dit laatste is in overeenstemming met waarnemingen.

Van het Waddenzeemodel zijn twee varianten beschikbaar: 2D en 3D. De eerste variant rekent sneller dan de tweede variant, maar mist alle transportprocessen veroorzaakt door



verticale gradiënten (in snelheid, saliniteit, temperatuur en slibconcentratie). Figuur 4.11 toont de jaargemiddelde slibconcentratie berekend met het 2D Waddenzeemodel (verticaal gemiddeld). Ondanks verschillen in horizontale en verticale resolutie en in golfmodellering komt het berekende ruimtelijke concentratiepatroon redelijk goed overeen tussen Zuno-DD (3D) en het Waddenzeemodel (2D en 3D). Qua concentratieniveau zit het ZUNO-DD model tussen het 2D en 3D Waddenzeemodel in.

Figuur 4.12 en 4.13 tonen een vergelijking tussen gemeten en berekende concentraties voor het Waddenzeemodel voor respectievelijk 1998 en 2007. Het jaar 1998 is gebruikt omdat dit beschikbaar is vanuit een vorige studie; het jaar 2007 is het representatieve jaar voor de huidige studie. De met het 3D Waddenzeemodel berekende hoge concentratieniveaus komen over het algemeen redelijk overeen met gemeten waarden, terwijl die van het Zuno-DD model en in sterkere mate de 2D-variant van het Waddenzeemodel (alleen geplot in Figuur 4.13) duidelijk te laag zijn.



Figuur 4.10 Berekende jaargemiddelde slibconcentratie (mg/l) jaar = 2007. Boven: met Waddenzeemodel; Onder: met Zuno-DD (huidig),.Concentratieschaal is gelijk.



Figuur 4.11 Berekende jaargemiddelde slibconcentratie (mg/l) met 2D Waddenzeemodel, jaar = 2007.



Figuur 4.12 Gemeten en met het 3D Waddenzee model berekende slibconcentraties (mg/l): a) Blauwe Slenk oost, b) Dantziggat, c) Vliestroom, d) Zoutkamperlaag, voor het jaar 1998.

De oorzaak voor deze sterk afwijkende concentraties is waarschijnlijk voornamelijk gelegen in de verschillende horizontale en verticale resolutie van de modellen. Hiernaast is ook de wijze van golfaandrijving verschillend tussen Zuno-DD enerzijds (geassimileerde golven) en het Waddenzeemodel (2D en 3D) anderzijds (strijklengtebenadering). Niettemin is ook de natuurlijke variatie tussen de jaren 1998 en 2007 aanzienlijk.

Figuur 4.14 toont de berekende slibfractie in de bodem voor de drie modellen. De slibfractie berekend met het 3D Waddenzeemodel is ruwweg in overeenstemming met gegevens uit de Waddenatlas (Figuur 4.15). De slibfractie berekend met het Zuno-DD is in de Waddenzee duidelijk veel te laag, hoeveel de slibfractie in de Hollandse kustzone realistisch is (0.5 tot 2%). Ook in het 2D Waddenzeemodel is de slibfractie te laag, ten gevolge van de onderschatting van de netto slibflux naar de Waddenzee vanwege de 2D aanpak.

Figuur 4.16 toont de berekende jaargemiddelde bodemschuifspanning in de Waddenzee voor beide modellen. In het Waddenzeemodel is deze veel lager dan in Zuno-DD. Dit wordt veroorzaakt door de afwijkende manier van golfmodellering. In het Waddenzeemodel is gekozen voor een strijklengte-aanpak middels lokale golfgroei. Deze aanpak leidt op de Noordzee tot een sterke onderschatting van het golfklimaat, maar dit is ondervangen door een aangepaste kritische schuifspanning voor erosie te gebruiken opdat de Noordzee geen bezinkbak voor slib wordt en slib de Waddenzee niet kan bereiken. In de Waddenzee is deze aanpak echter goed verdedigbaar.



Figuur 4.13 Gemeten en berekende slibconcentraties a) Blauwe Slenk oost, b) Dantziggat, c) Vliestroom (geen meetdata beschikbaar), d) Doove Balg oost. Groen = Wadden 3D, Rood = Wadden 2D, Blauw = Zuno-DD. Jaar = 2007.



а



С



Figuur 4.14 Berekende evenwichtsslibfractie in bodem (-). a) 3D Waddenzeemodel, jaar = 1998; b) 2D Waddenzeemodel, jaar = 2007; c) Zuno-DD (huidig), jaar = 2007. Concentratieschaal is gelijk.



Figuur 4.15 Gemeten slibpercentage in Waddenzee (bron:slibatlas). De percentages zijn waarschijnlijk met circa een factor 2 overschat.

In Zuno-DD is gebruik gemaakt van een geassimileerd golfveld. De gemeten golfhoogten van een aantal stations zijn geïnterpoleerd naar het rekenrooster. Hiervoor is gebruik gemaakt van het jaargemiddelde golfvoortplantingsgedrag berekend met SWAN. Aangezien er uitsluitend gebruik is gemaakt van golfboeien op de Noordzee en het gebruikte golfrekenrooster te grof is om de golfvoortplanting en -dissipatie in de Waddenzee nauwkeurig te bepalen, is deze methode succesvol in de Noordzee en in de kustzone, maar niet in de Waddenzee. Het golfklimaat in de Waddenzee wordt met het gebruik van deze methode sterk overschat, zodat er weinig accumulatie van slib optreedt.

Figuur 4.17 toont de berekende jaargemiddelde slibconcentratie voor het Zuno-DD model met strijklengtegolven. Figuur 4.18 toont de evenwichtsfractie slib in de bodem voor dezelfde simulatie. Alhoewel het slibpercentage in de bodem relatief sterk toeneemt in de Waddenzee in relatie tot de slibconcentratie in de waterkolom, neemt de slibconcentratie zelf sterk af in de Waddenzee. Dit komt doordat met de strijklengtebenadering de golfwerking in de Noordzee wordt onderschat en hierdoor weinig slib wordt opgewoeld. Dit leidt tot een lager aanbod voor de Waddenzee en derhalve een lagere slibconcentratie. De lokale verhoging in de Waddenzee van de kritische schuifspanning voor erosie biedt een werkbare oplossing.

De netto slibflux in de eerste 11 km langs de Hollandse kust bedraagt zo'n 5.8 MT/jaar. Dit is een toename ten opzichte van eerdere modellen, waarin een flux van 4.2 MT/jaar in de eerste 50 km langs de Hollandse kust werd berekend (Thoolen et al., 2001) en ruim een verdubbeling van de flux berekend met een eerdere variant van Zuno-DD (2.3 MT/jaar in de eerste 15 km, zie Van Kessel, 2005). De huidige flux van 5.8 MT/jaar over de eerste 11 km en 9.5 MT/jaar over de eerste 30 km is van een vergelijkbare orde als schattingen uit de literatuur, namelijk 10 tot 20 MT/y in de eerste 70 km langs de Hollandse kust (De Kok, 2004; Thoolen et al., 2001).

Tabel 4.2 toont de water- en slibbalans voor de Waddenzee. De slibbalans laat zien dat de netto bezinking in de Waddenzee 0.5 MT/jaar bedraagt. . Dit is laag ten opzichte van de schatting van 2 tot 3 MT/jaar voor de hele Waddenzee (Postma, 1981), maar consistent met de lage berekende slibconcentratie in het Zuno-DD model. Bovendien is het huidige model geen morfologisch model, zodat de permanente opslag van slib in netto sedimentatiegebieden zoals de Waddenzee wordt onderschat. Indien een hogere slibconcentratie zou worden berekend, volgt hieruit automatisch ook een grotere netto aanslibbing.

#### Tabel 4.2 Water- en slibbalans Waddenzee Zuno-DD

|                  | debiet | (m³/s)  |        | slibflux | (MT/jaar) |        |
|------------------|--------|---------|--------|----------|-----------|--------|
| vak              | IN     | OUT     | TOT    | IN       | OUT       | TOT    |
| Hollandse Kust 1 | 7,010  | -5,270  | 1,740  | 5.667    | -4.352    | 1.315  |
| Waddenzee Kust 1 | 67,487 | -69,807 | -2,320 | 51.954   | -53.614   | -1.660 |
| Eems Kust 1      | 8,967  | -9,158  | -192   | 7.250    | -7.587    | -0.337 |
| lozingen         | 579    | 0       | 579    | 0.508    | 0.000     | 0.508  |
| overig           | 33,980 | -33,786 | 195    | 34.152   | -33.949   | 0.203  |
| opslag           | 0      | -2      | -2     | 0.191    | 0.000     | 0.191  |
| erosie/depositie |        |         |        | 272.174  | -272.393  | -0.218 |



Figuur 4.16 Berekende gemiddelde bodemschuifspanning Waddenzeemodel (boven, jaar = 1998) en Zuno-DD model (onder, jaar = 2007).



Figuur 4.17 Berekende jaargemiddelde slibconcentratie nabij oppervlak (mg/l). Zuno-DD met strijklengtegolven, jaar = 2007.



Figuur 4.18 Berekende evenwichtsslibfractie in bodem (-). Zuno-DD met strijklengtegolven, jaar = 2007.

#### 4.5 Toepassing Zuno-DD en Waddenzeemodel voor een verhoging van de concentraties

Omdat het Zuno-DD model ondanks een aanzienlijke verbetering in het kader van het huidige project de absolute slibconcentratie van de natuurlijke achtergrond in de Waddenzee nog steeds onderschat, is het mogelijk dat het model het absolute effect in de Waddenzee van slibverspreiding ten gevolge van zandwinning in de Nederlandse kustzone onderschat.

Uit een vergelijking tussen het Zuno-DD model en het Waddenzeemodel voor een verhoging van de slibconcentraties (gebaseerd op scenario SZ7 van Harezlak e.a. 2012a) blijkt dat dit inderdaad zo is wat betreft de absolute concentratie. Wat betreft de relatieve concentratie (d.w.z. de verhouding tussen de concentratie-verhoging door slibverspreiding en de natuurlijke achtergrondsconcentratie) zijn de resultaten sterk vergelijkbaar, zie Figuur 4.19 t/m Figuur 4.22. De patronen van de verhoudingen tussen het scenario Sz7 en de achtergrond (bijvoorbeeld met de waarden 0.01, 0.02 en 0.05, die overeenkomen met de 1%, 2% en 5% effecten ) hebben een vergelijkbare ligging.

Dit toont aan dat het mogelijk is om de beperking van het Zuno-DD model in de Waddenzee wat betreft absoluut concentratieniveau te omzeilen door een qua absolute waarde realistisch slibveld in de Waddenzee te vermenigvuldigen met het relatieve effect van slibverspreiding. De aldus verkregen realistische inschatting van het absolute effect in de Waddenzee wordt vervolgens gebruikt voor verdere effectketenmodellering.





Figuur 4.19 Relatief jaargemiddeld effect van Scenario SZ7 in 2013. Links: Zuno-DD, rechts: Waddenzeemodel



Figuur 4.20 Absoluut jaargemiddeld effect van Scenario SZ7 in 2013 (mg/l). Links: Zuno-DD, rechts: Waddenzeemodel



Figuur 4.21 Relatief jaargemiddeld effect van Scenario SZ7 in 2014. Links: Zuno-DD, rechts: Waddenzeemodel



Figuur 4.22 Absoluut jaargemiddeld effect van Scenario SZ7 in 2014 (mg/l). Links: Zuno-DD, rechts: Waddenzeemodel

#### 4.6 Conclusies m.b.t. het slibmodel

De toegepaste verbeteringen zijn succesvol in de zin dat het slibmodel in de kustzone goed presteert, de berekende concentratie bij de bodem goed overeenkomt met waarnemingen en het concentratieniveau in de Voordelta en in de Waddenzee sterk is verbeterd. De resterende afwijking tussen model en meting is in de Waddenzee echter nog tamelijk groot. Een te nog lage roosterresolutie in de Waddenzee kan dit gedeeltelijk verklaren, in combinatie met een onvoldoende representatief golfklimaat (te hoge golven) in de Waddenzee in het Zuno-DD model.

Het Zuno-DD model wordt in de Waddenzee uitsluitend te gebruiken voor de berekening van *relatieve effecten* (t.o.v. de natuurlijke achtergrond). Een vergelijking tussen resultaten met het Zuno-DD model en het Waddenzeemodel toont immers aan dat Zuno-DD wel geschikt is voor de berekening van deze relatieve effecten in de Waddenzee. In de Nederlandse kustzone is de kwaliteit van het instrumentarium voldoende goed voor de berekening van absolute effecten.

In het algemeen moet worden benadrukt dat de kennis met betrekking tot slibprocessen in de Waddenzee nog relatief beperkt blijft (zie bijvoorbeeld Kats e.a. 2012, Sips en de Leeuw, 2009, en van Duren e.a. 2011).

### 5 Model voor primaire productie

#### 5.1 Beschrijving basismodel en aanpassingen

#### 5.1.1 Historie

Op basis van de algemeen toegepaste modelcode Delft3D-ECO is een model applicatie voor de Noordzee ontwikkeld, die bekend is als het GEM of NZBLOOM Noordzee model. Dit model beschrijft het stoftransport, de nutriënten en zuurstof huishouding, de primaire productie, chlorofyl, samenstelling van het fytoplankton en het onderwater lichtklimaat. Tegen het einde van de jaren 80 van de vorige eeuw werden de eerste stappen gezet om de ontwikkeling van eutrofiering in de Noordzee te kunnen begrijpen en te voorspellen. Er werd gebruik gemaakt van 2D transportmodellering, de gridgrootte besloeg 16 x 16 km en de waterkwaliteit werd gesimuleerd met de module DYNAMO (Van Pagee et al., 1988; Glas en Nauta;1989; Nauta et al., 1989). Het model gaf redelijke resultaten voor de totale algenbiomassa, uitgedrukt in µg/l chlorofyl-a, en nutriënten. Het was echter niet mogelijk om met dit 2D model de compositie van het fytoplankton, de variaties van interne karakteristieken van dit fytoplankton (zoals nutriënt/biomassa ratio) en steile gradiënten in tijd en plaats te simuleren. Het niet kunnen modelleren van de algensoortsamenstelling werd gezien als een tekortkoming van het model omdat er verschillen bestaan tussen algensoorten met betrekking tot hun effecten op hun omgeving (Los et al., 2001). Sinds een aantal jaar is het rekengrid veranderd in een curve-linear grid, waarbij de gridgrootte nabij de Nederlandse kust ongeveer 1 x 1 km bedraagt en in de noordwestelijke hoek van de schematisatie 20 x 20 km (zie Figuur 5.1). Het voordeel van dit grid is dat de vorm van de kuststrook beter wordt gevolgd en de steile gradiënt, die aanwezig is nabij de Nederlandse kust, accurater gemodelleerd kan worden. De variabele gridgrootte zorgt ervoor dat het model werkbare rekentijden heeft (Los et al., 2008).

Voordat men bezig ging met eutrofieringsmodellen voor de Noordzee, werd er al een jaar of 10 gewerkt aan eutrofieringsmodellen voor zoete wateren. Het werk werd veelal uitgevoerd door WL | Delft Hydraulics voor met name nationale en lokale overheden. Het verrichte werk werd geformaliseerd in het DELWAQ-BLOOM-SWITCH (DBS) model (WL | Delft Hydraulics, 1992) en is met succes op verschillende zoet waterlichamen en – systemen, waarbij er grote verschillen waren in fysische en chemische processen, toegepast. De verschillende modelapplicaties zijn verscheidene keren gevalideerd met verschillende data sets (Los, 1991; Los et al., 1994a). Omdat de BLOOM module in DBS algensoortsamenstelling in meer detail beschrijft dan DYNAMO werd al vrij snel BLOOM voor de modeltoepassingen van de zoute watersystemen gebruikt. Hierdoor werd het mogelijk 4 verschillende algensoorten, met daarin 3 fenotypen per soort, te modelleren (Los et al., 2001a en b). Zie bijvoorbeeld MANS (Los et al., 1994b) en KSENOS (Boon en Bokhorst, 1995)

Naast de inspanningen van WL | Delft Hydraulics om een waterkwaliteitsmodel voor zoute wateren te ontwikkelen, werden door andere instituten ook modellen voor dit doel ontwikkeld, zoals ECOWASP (Brinkman, 1993), SMOES (Klepper en Scholten, 1995), MOSES (Soetaert en Herman, 1995) en ERSEM (Beukema et al., 1995). Al deze modellen zijn gebruikt voor wetenschappelijke analyses en/of voor management scenario studies. Echter, de focus van deze modellen was vaak een specifieke regio in combinatie met specifieke kennis, zoals de populatie ecologie van mossels in de Waddenzee (ECOWASP) (Brinkman, 1993).



Figuur 5.1 Curve-lineair grid met 1\*1 km nabij Hollandse kust en 20\*20 km in noordwestelijke hoek.

Om het beleidsproces in Nederland ten aanzien van Noordzee modellering te versnellen, is er door het Nationaal Instituut voor Kust en Mariene Management (NICMM/RIKZ) de ontwikkeling van het Generiek Ecologisch Model (GEM) in gang gezet. WL | Delft Hydraulics heeft, in samenwerking met Mariene Onderzoeksinstituten zoals NICMM/RIKZ, NIOO-CEMO, Alterra en NIOZ dit model ontwikkeld. Na een aantal toepassingen van GEM op met name estuaria (Bokhorst, 1997; Smits et al., 1998) is GEM toegepast op de Nederlandse Kust, waarbij de resultaten beschreven werden als "...kwamen redelijk goed overeen met eerdere (statistische) analyses van meetgegevens", (Blauw et al., 1999).

In essentie is hetzelfde model in de loop van de jaren geoperationaliseerd voor een aantal modelroosters (schematisaties) zoals het kuststrook model in de jaren 90 en Zuno-fijn en Zuno-grof vanaf 2001. Omdat de Zuno-fijn toepassing destijds te lange rekentijden vergde, heeft de Zuno-grof implementatie zich ontwikkeld tot het 'werkpaard' op basis waarvan een groot aantal studies zijn of nog worden uitgevoerd zoals de uitbreiding van de Rotterdamse Haven, Flyland, KaderRichtlijn Water, MER tweede Maasvlakte, MER suppletiezand. Tijdens deze en andere toepassingen van GEM is, gedeeltelijk in samenwerking met andere Nederlandse kennisinstituten op het gebied van marien onderzoek, GEM verder uitgebreid en verbetert in vergelijking met de eerste oplevering. Hierdoor beschikt GEM nu over default parametersettings die gekalibreerd en gevalideerd zijn voor de Noordzee (zie onder andere Blauw et al., 1999; Los et al., 2001a,b; Blauw en Los, 2004; Nolte et al., 2005; Los en Wijsman, 2007, Prooijen et al., 2007; Los et al., 2008; Los en Blaas, 2010), maar die ook toepasbaar zijn gebleken voor een breed scala aan andere kust-ecosystemen (Kernkamp et al., 2002; Boon et al., 2006; Smits, 2006).

Recentelijk is het ook mogelijk om met GEM 3D simulaties te maken, zoals gedaan is in de Europese projecten Ospar, EMTOX en KnowSeas. In Los et al. (2008) is aangetoond dat 3D GEM simulaties betere resultaten geven dan 2D simulaties wanneer er sprake is van

inhomogeniteit van het waterlichaam. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het optreden van stratificatie van het water, wat in de Noordzee geregeld voorkomt bij de Oestergronden of ten noorden van de Doggersbank. Nabij de kust is de waterlaag vaak homogener gemengd, met uitzondering van stratificatie door verschil in zoutconcentratie, waardoor daar 2D simulatie volstaat. Het hangt dus af van de vraag en de locatie of 2D simulatie volstaat of dat 3D simulatie toegevoegde waarde heeft. In onderhavige studie wordt gekeken naar de effecten van onder andere zandwinning op het ecosysteem van de Noordzee, waarbij ook diepere wateren worden meegenomen. Om deze reden is het goed om GEM in 3D modus toe te passen. Dankzij de systematische ontwikkeling van de modeltoepassing bestaat een goed inzicht in de meerwaarde van verfijningen in de fysische schematisatie op het uiteindelijk gedrag van het model (zie bijvoorbeeld Los & Blaas, 2010).

#### 5.1.2 Aanpassing voor deze MER

De laatste gerapporteerde berekeningen van GEM Noordzee (kortweg GEM) zijn gemaakt voor de periode 1996 t/m 2003 op het Zuno-grof rooster (4350 vakken horizontaal) voor een 10 lagen hydrodynamica. Voor de onderhavige MER worden simulaties gedaan voor het jaar 2007 op het Zuno-DD rooster (12685 vakken horizontaal, 12 lagen verticaal). De verfijning van het rooster zorgt voor een kleinere resolutie van de resultaten. Het rekenen op een andere grid betekent dat twee soorten aanpassingen aan de modelopzet nodig zijn:

- 1. Conversie van alle rooster-afhankelijke informatie van het ZunoGrof naar het ZunoDD rooster.
- 2. Verzameling van alle relevante gegevens voor het historische jaar 2007,

In de volgende paragrafen wordt kort beschreven hoe de applicatie ten behoeve van de MER is opgezet.

#### 5.1.2.1 Fysische schematisatie

Het ZunoDD rooster staat afgebeeld in Fig. 5.1. Anders dan bij een aantal eerdere studies wordt in deze MER voor GEM precies hetzelfde (ongeaggregeerde) rooster gebruikt als voor het slib model.

#### 5.1.2.2 Horizontale en verticale dispersie

Wanneer GEM op een grover grid wordt gedraaid dan de hydrodynamica, moet er in GEM extra horizontale dispersie worden toegevoegd, zodat deze dispersie in het GEM model realistische waarden heeft. Echter, omdat deze GEM toepassing is gemaakt voor een fijn 3D model, waarop ook de hydrodynamica is gedraaid, is het niet nodig om in horizontale richting extra dispersie toe te voegen.

Daarentegen zorgt de koppeling tussen Delft3D-Flow en DELWAQ ertoe dat de verticale uitwisseling in DELWAQ te laag is. Om realistische waarden aan de verticale uitwisseling in het grid aan DELWAQ te geven, worden de door Flow berekende verticale diffusie coëfficiënten met 5.0 vermenigvuldigd en wordt tevens een minimumwaarde van 1\*10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup> gebruikt. De minimumwaarde zorgt ervoor dat er in het geval van zeer kleine verticale diffusie in Flow de diffusie toch groot genoeg is. Deze waarde is hoger dan gehanteerd bij slibmodellering omdat goede zuurstofmenging (met uitzondering van stratificatie) over de lagen cruciaal is voor GEM. Overigens speelt deze correctie met name een rol in gestratificeerde zones zoals de Oestergronden, die buiten het interessegebied van deze MER liggen.

#### 5.1.2.3 Open randen

Net als voor ZunoGrof zijn er ook voor de ZunoDD applicatie van GEM twee open randen: de Kanaalrand in het zuiden en de Noord Atlantische rand in het noorden. De debieten over deze randen komen uit het waterbewegingsmodel en kunnen niet worden aangepast binnen GEM. De beschikbare historische data betreffende de stofconcentraties op de randen, deze vertonen geen systematische variaties tussen de jaren. Daarom kunnen in principe dezelfde data gebruikt worden als bij eerdere studies (Laane et al., 1993). Bij de Afwentelingsstudie (Z4188) is wel geconstateerd dat de tot dan gebruikte N concentraties op de Kanaalrand studies te hoog waren. Daarom zijn deze nu met 30% verlaagd om beter aan te sluiten bij de waarnemingen in het Kanaal. De Noord Atlantische rand is dezelfde als voor alle recente studies met ZunoGrof (Bot et al., 1996, Brockman et al., 2002 en NERC, 1991).

#### 5.1.2.4 Rivier randen

In het GEM Noordzee model worden de debieten (water) en vrachten (stoffen) apart gespecificeerd. Dit wordt met name gedaan omdat in OSPAR kader meer dan 50 verschillende lozingen worden onderscheiden, waarvan de meeste slechts een kleine hoeveelheid zoetwater lozen met een verwaarloosbare invloed op de stroming. In de Hydrodynamische berekening, zoals die ten grondslag ligt aan de GEM applicatie voor deze MER, worden alleen de 18 grootste rivieren meegenomen. Binnen GEM worden voor deze 18 rivieren dezelfde debieten gebruikt als in het FLOW model. Om technische redenen is er echter één vereenvoudiging: de zoetwaterdebieten worden in GEM in de bovenste waterlaag geloosd. Het effect hiervan is over het algemeen heel klein.

De vrachten van opgeloste stoffen zoals nutriënten worden apart gespecificeerd voor alle grote rivieren plus de ca. 35 extra rivieren, die binnen OSPAR worden onderscheiden omdat deze lokaal nog wel van invloed kunnen zijn op de nutriëntengehaltes. Dit alles gebeurt op dag basis door interpolatie. De saliniteitsberekening van GEM wordt gecorrigeerd voor de debieten van deze extra rivieren en deze komt dus per definitie (iets) lager uit dan de berekening van Flow, waarin deze zoetwaterlozingen ontbreken.

#### 5.1.2.5 Slib

Anorganisch zwevend stof ("slib") heeft invloed op het onderwaterlichtklimaat en daarmee op de primaire productie. Slib varieert in ruimte en tijd in de Noordzee en wordt daarom als een serie kaartbeelden ingevoerd (een zogenaamde segmentfunctie). Idealiter zouden de resultaten van het slibmodel 1 op 1 kunnen worden ingevoerd. Om een aantal redenen levert dat echter niet de best mogelijke performance op van het GEM model.

In de eerste plaats is het slibmodel alleen gevalideerd voor de Nederlandse kustzone en de Waddenzee. De GEM resultaten in deze gebieden worden echter mede beïnvloed door de productie buiten dit gebied dus in die delen van het Noordzee model, waarvoor het slib model (nog) niet is gevalideerd. Voor de berekening hiervan is een realistisch slibveld een vereiste en dat komt nog niet direct uit de het slibmodel. Hiervoor wordt een aparte bewerking uitgevoerd op basis van metingen ten behoeve van de invoer van GEM.

In de tweede plaats wordt met name in gebieden, waar de ruimtelijke resolutie zeer fijn is, door het slib model soms schommelingen berekend. Omdat het GEM model gevoelig is voor dergelijke variaties in slib concentraties en patronen, is daarom besloten de slib forcering van GEM te baseren op de jaargemiddelde berekening van het slib model plus de op metingen gebaseerde aanpassing in offshore gebieden. De seizoensdynamiek is opgedrukt aan de hand van een cosinus functie met een amplitude van 0.5 (omstreeks 1 juli) tot 1.5 (omstreeks 1 januari), de wekelijkse variatie is bepaald aan de hand van een homogeen verdeelde random functie. Bij een lager dan gemiddelde wind is deze functie begrensd tussen 0.3 en

1.2, bij een hoger dan gemiddelde wind tussen 0.8 en 1.7. Jaargemiddeld is deze factor ca. 1.0. Deze variatie wordt gesuperponeerd op de cosinus variatie. Deze werkwijze is in het verleden ook een groot aantal keren toegepast (Maasvlakte 2 studie; zie ook Los et al., 2008).

Tijdens de validatie fase zijn twee additionele slibvelden gebruikt. In de eerste plaats is het resultaat van het slibmodel zonder enige bewerking als forcering van GEM gebruikt. In de tweede plaats is een speciaal slibveld geconstrueerd, waarin voor het Waddenzee gedeelte van het ZunoDD domein de resultaten van het speciale Waddenzee model zijn gebruikt door afbeelding op het ZunoDD rooster. Nota bene: buiten de Waddenzee zijn de ZunoDD slib resultaten gebruikt, ook voor dat deel van de Noordzee, dat binnen het domein van beide modellen valt (zie Figuur B.1)

#### 5.1.2.6 Initiële condities

De initiële condities voor de eerste model simulaties zijn bepaald door de resultaten van het gevalideerde ZunoGrof model voor 2003 op het ZunoDD rooster af te beelden. Vervolgens is het ZunoDD model een aantal keren cyclisch gedraaid ("doorgestart") met de volledige invoer voor 2007 totdat er geen verschil meer was waar te nemen in berekeningsresultaten tussen twee opeenvolgende berekeningen.

#### 5.1.2.7 Gegevens voor 2007

Voor de instraling en windsnelheid zijn gegevens van het KNMI gebruikt voor 2007 van station De Kooij. Instalingsgegevens zijn per week ingevoerd, maar binnen het model worden deze gegevens omgerekend naar een intensiteit per 30 minuten, uitgaande van de actuele daglengte en een standaard intensiteitspatroon voor een geïdealiseerde dag. De windgegevens worden binnen GEM overigens uitsluitend gebruikt om de reaeratie van zuurstof te berekenen. Daarom worden ze per dag ingevoerd zonder ruimtelijke differentiatie. Bij de berekening van de stroming is uiteraard wel rekening gehouden met de ruimtelijke patronen van de wind.

Binnen OSPAR worden de riviervrachten centraal verzameld en bewerkt door CEFAS. Voor het jaar 2007 kwamen deze gegevens echter pas beschikbaar toen de GEM validatie berekening al was uitgevoerd. Bovendien wordt door CEFAS dezelfde bewerking op uniforme wijze uitgevoerd voor alle rivieren waardoor de schatting voor de Nederlandse rivieren, waarvoor relatief veel gegevens beschikbaar zijn, niet de maximale nauwkeurig wordt bereikt. Dit geldt met name voor fosfaat. Bij een eerdere analyse is gebleken, dat de belasting in de kustzone hierdoor ca. 30 procent wordt onderschat (ongepubliceerde model resultaten met Zuno-grof). Voor deze MER zijn de belastingen daarom op de volgende wijze samengesteld:

- 1. Voor de Nederlandse rivieren plus de Schelde zijn de 2007 gegevens uit Donar gebruikt om de meest nauwkeurige vrachten te bepalen.
- 2. Voor het IJsselmeer is een extra correctie uitgevoerd, omdat anders dan in een rivier, hier het grootste deel van het fosfaat in levend en dood fytoplankton is opgeslagen. Deze fractie wordt apart bepaald en ingevoerd in GEM.
- 3. Voor de overige rivieren (UK, Frankrijk en Duitsland) worden de vrachten van de jaren 2000 t/m 2003 uit de CEFAS database gebruikt voor de validatie berekening en voor de scenario's.
- 4. Om de gevoeligheid van de validatie resultaten te controleren is tevens een berekening uitgevoerd waarin voor de niet-Nederlandse rivieren de CEFAS gegevens voor het jaar 2007 zijn gebruikt.

#### 5.2 Validatie

Door gebruik te maken van meetdata van verschillende meetstations in de Noordzee (Figuur 5.2) en deze te vergelijken met modelresultaten op deze locaties kan inzicht worden gegeven of en hoe goed GEM de waterkwaliteit simuleert. Er zijn verschillende mogelijkheden om validatie van modelresultaten uit te voeren. In dit rapport wordt gebruik gemaakt van tijdreeksen en targetdiagrammen waarbij het jaar 2007 als validatiejaar is gekozen.



Figuur 5.2 locatie van de meetstations in de Noordzee waar waterkwaliteit is of wordt gemeten.

#### 5.2.1 Kaartbeelden

Figuur 5.3 en Figuur 5.4 geven een overzicht van de gemeten chlorofyl-a concentraties tijdens de voorjaarbloei eind maart 2007 en in de maand juni van 2007. De meetdata zijn afkomstig van Waterbase en hebben hooguit een tweewekelijkse frequentie en verder zit er verschil in datum tussen de meetlocaties. De modeluitvoer is in het geval van kaarten op weekbasis. Om deze redenen is het niet mogelijk om per dag meet- en modeldata met elkaar te vergelijken en wordt daarom wordt meetdata op de modeldata geplot afkomstig van min en plus een week van de kaartdatum.

Figuur 5.3 toont dat tijdens de voorjaarsbloei chlorofylconcentraties door het model redelijkerwijs goed worden gesimuleerd. Ter hoogte van Walcheren is op 2 km van de kust een onderschatting van chlorofylconcentraties en op 4 km uit de kust is er een overschatting. De metingen van de Noordwijkraai tonen een afnemende trend van chlorofylconcentraties. Het model laat langs de kust lage chlorofylconcentraties zien en daarna ook de afnemende trend, zij het minder sterk dan in de metingen is te zien.



Figuur 5.3 Model- (vlakken) en meetdata (bollen) voor de chlorofylconcentraties tijdens de voorjaarbloei in maart 2007.

In juni (Figuur 5.4) simuleert het model de ruimtelijke patronen redelijk tot goed. Walcheren 4 km uit de kust wordt overschat en in de Waddenzee worden de lage gemeten chlorofylconcentraties in de diepe geulen door het model te hoog gesimuleerd.



Figuur 5.4 Model- (vlakken) en meetdata (bollen) voor de chlorofylconcentraties in juni 2007.

#### 5.2.2 Waddenzee model

In het gebruikte ZunoDD grid heeft de Waddenzee min of meer een even hoge resolutie als de Nederlandse kust. Er is apart met een fijner Waddenzeegrid gerekend om te bezien of dit fijnere grid tot betere modelresultaten leidt met betrekking tot onder andere chlorofylconcentraties in de Waddenzee. In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 worden de resultaten van het Waddenzeemodel en het ZunoDDmodel getoond, respectievelijk. De figuren laten zien dat bijvoorbeeld de geulen in het Waddenzeemodel beter zichtbaar zijn dan in het ZunoDD model en dat de chlorofylconcentraties in de Oostelijke Waddenzee lager zijn in het Waddenzeemodel dan in het ZunoDD model. De meetdata laten zien dat in dit gebied de chlorofylconcentraties laag zijn en dat het Waddenzeemodel dus betere overeenstemming heeft met de meetdata. Echter, voor de rest van de meetpunten is het niet duidelijk of het Waddenzeegrid beter is dan het ZunoDDgrid.



Figuur 5.5 Gemeten en gemodelleerde chlorofyl-a concentraties (μg/l) tijdens de voorjaarsbloei in 2007. De gemodelleerde data is afkomstig van het gedetailleerde Waddenzee model.



Figuur 5.6 Gemeten en gemodelleerde chlorofyl-a concentraties (μg/l) tijdens de voorjaarsbloei in 2007. De gemodelleerde data is afkomstig van het ZunoDD model.

Wanneer er meer in detail, dat wil zeggen per station een tijdreeks van een jaar, naar de meetstations in de Waddenzee wordt gekeken, blijken de verschillen tussen de twee modellen die zichtbaar zijn in Figuur 5.5 en Figuur 5.6 door het jaar heen veel minder groot, zie Figuur 5.7. Door de kleine verschillen tussen het Waddenzeemodel en ZunoDD en de langere rekentijden van het Waddenzeemodel is er voor gekozen de onderhavige studies uit te voeren op het ZunoDDgrid.



Figuur 5.7 Tijdreeksen van een aantal meetstations in de Waddenzee. Doorgetrokken lijnen zijn de resultaten van het ZunoDD model en de gestippelde lijn zijn de resultaten van het Waddenzeemodel.

#### 5.2.3 Tijdreeksen

De Figuur 5.8 tot en met Figuur 5.10 laten voor een aantal meetstations de gemeten concentraties van chlorofyl, nitraat en ortho fosfaat zien samen met modelresultaten voor deze parameters. Chlorofylconcentraties (figuur 5.3) volgen de langjarige gemiddelde trend goed. In vergelijking met de meetdata van 2007 is er wat meer afwijking te zien. Opvallend is dat 2007 in vergelijking met de langjarige gemiddelde chlorofylconcentraties ook lijkt af te wijken. Daarnaast wordt de timing van de algenbloei wat te vroeg gemodelleerd.



Figuur 5.8 Meet- en modeldata van chlorofylconcentraties voor een aantal meetstations in de Noordzee. De doorgetrokken lijn is de modeldata, de zwarte stippen de data voor 2007 en het open vierkant en wiebertje zijn het maandgemiddelde en de maandmediaan voor een maand over de jaren 2004 tot en met 2009, respectievelijk.

Nitraatconcentraties laten een vergelijkbare trend zien in de meet- en de modeldata. Opvallend is dat voor de twee getoonde meetlocaties van Terschelling de nitraatconcentraties in de eerste drie maanden van het jaar worden onderschat en dat aan het eind van het jaar er een overschatting is.



Figuur 5.9 Meet- en modeldata van nitraatconcentraties voor een aantal meetstations in de Noordzee. De doorgetrokken lijn is de modeldata, de zwarte stippen de data voor 2007 en het open vierkant en wiebertje zijn het maandgemiddelde en de maandmediaan voor een maand over de jaren 2004 tot en met 2009, respectievelijk.

De gesimuleerde orthofosfaatconcentraties volgen de gemeten trend goed. Alleen voor Walcheren 2 km uit de kust en Noordwijk 10 km uit de kust zijn de gemeten concentraties in de zomermaanden hoger dan dat het model simuleert.



#### Terschelling, 235 km uit de kust

Doove Balg West.



#### 5.2.4 Targetdiagrammen

Targetdiagrammen geven inzicht in hoe goed het model de gemiddelde waarde (bias) van een parameter weergeeft en of het model de gemeten variabiliteit en amplitude (Root Mean Square Difference, RMSD') van een parameter goed beschrijft. Wanneer de bias een positieve waarde heeft, dan betekent dit dat het model te hoge waarden simuleert in vergelijking met de meetwaarden. Wanneer de bias negatief is, dan zijn de gesimuleerde
waarden hoger in de meetdata dan in de modeldata. Een positieve waarde voor de RMSD' betekent dat er meer variatie in de modeldata terug te vinden is dan in de meetdata. In negatieve RMSD' betekent dan dat er minder variatie in de modeldata is dan in de meetdata. Wanneer het resultaat van de vergelijking tussen de model- en meetdata in de binnenste cirkel vallen (zie de afbeeldingen in figuur 6), dan wordt dit resultaat gekwalificeerd als goed. Wanneer het resultaat in de tweede ring ligt, dan wordt dit gezien als voldoende. Liggen er resultaten buiten de cirkels, dan wordt deze aangemerkt als onvoldoende (Jolliff et al., 2008; Los en Blaas, 2008).

In Figuur 5.11 is voor een aantal parameters de targetdiagrammen getoond. Opgemerkt dient te worden dat niet voor alle meetstations die meegenomen zijn, meetdata aanwezig is waardoor het aantal punten in de diagrammen onderling kunnen verschillen. Ook kan het een enkele keer voorkomen dat er punten buiten de targetdiagrammen vallen. De targetdiagrammen in Figuur 5.11 laten zien dat de nutriëntconcentraties van totaal stikstof, totaal fosfaat, nitraat en ortho fosfaat nagenoeg allemaal binnen de eerste en tweede cirkel vallen. De concentraties van nitraat en ortho fosfaat worden door het model wel beter gesimuleerd dan die van totaal N en totaal P. Chlorofylconcentraties laten over het algemeen ook voldoende tot goede resultaten zien, zij het dat de "wolk" van resultaten wat minder opeen zit dan voor bijvoorbeeld nitraat. Door eerder uitgelegde toepassing van de saliniteit in het model, laat deze een wat grotere afwijking zien van de meetresultaten: voor een aantal stations wordt de saliniteit te laag gesimuleerd en voor andere stations wordt er te weinig variabiliteit gesimuleerd.





Figuur 5.11 Targetdiagrammen voor chlorofyl-, nitraat-, ortho fosfaat-, totaal stikstof- en totaal fosfaatconcentraties en saliniteit. De modeldata is van 2007, de meetdata voor de periode 2004 tot en met 2010.

#### 5.3 Conclusie

Het GEM-model is over een aantal decennia heen samen met andere instituten ontwikkeld om de meest up to date kennis in het model vast te leggen. Het model is vastgelegd in tal van projecten, waaronder zandwinningen en ingezet om effecten van veranderingen in en op het Noordzeesysteem door te vertalen naar effecten op de primaire productie. De tijdreeksen en targetdiagrammen geven inzicht in de mate van overeenstemming tussen meet- en modeldata. Hieruit valt af te leiden dat voor een groot aantal meetstatiosn het model goede resultaten geeft en als zodanig een goed inzicht geeft in waterkwaliteitsprocessen die in de Noordzee plaats hebben.

De tijdreeksfiguur 5.3 toont dat het GEM-model de gemiddelde chlorofyl-a concentraties voor de periode 2004 tot en met 2009 op de getoonde puntlocaties goed simuleert. Opvallend aan deze figuur is dat in 2007 vooral in het voorjaar hogere chlorofyl-a concentraties gemeten worden dan de langjarige gemiddelde concentraties. Het GEM-model simuleert voor 2007 de voorjaarspiek voor de getoonde locaties in figuur 5.3 lager dan de meetdata tonen, met uitzondering van Terschelling 175km en 235km uit de kust, en zijn de concentraties in de zomerperiode wat hoger in met name Walcheren 2km, Noordwijk 10km en Terschelling 100km uit de kust. De verschillen tussen meet- en modeldata zijn te wijden aan het concept van modelleren: het benaderen van de werkelijkheid. Waar precies de onzekerheden zitten in de modellering van de hydrodynamica, het slib en GEM is in deze studie niet onderzocht.

Het vroeger voorspellen van de voorjaarspiek en het wat hoger of lager simuleren van chlorofylconcentraties kan gevolgen hebben voor de energiebudgetten die van belang zijn voor de benthosmodellering van DEB en ECOWASP. Echter, in de chlorofyl-a data, afkomstig van een beperkt aan puntlocaties, zit natuurlijke variatie als ook in het DEB- en ECOWASPmodel. Hoe gevoelig deze modellen zijn voor een iets vroegere chlorofylpiek en met name wat hogere chlorofylconcentraties in de zomer dan gemeten is, is niet nagegaan in deze studie. Het is een aanbeveling om met DEB en ECOWASP na te gaan hoe natuurlijke jaar tot jaar variatie in het systeem de resultaten beïnvloedt.

## 6 Samenvatting en conclusies

#### 6.1 Inleiding

Om een (hernieuwde) vergunning te verkrijgen voor de winning van suppletiezand in de Noordzee is een milieueffectrapportage (MER) vereist. Hoewel de ingrepen plaats vinden aan de basis van het ecosysteem (het fysische deel), zullen effecten zich mogelijk manifesteren in de biologische componenten van het ecosysteem. Daarom zijn in deze MER de mogelijke effecten van zandwinning op de slibconcentraties, doorzicht, nutriënttransport, primaire productie en de secundaire productie op enkele voorbeeldlocaties in de Noordzee en op de (gehele) westelijke Waddenzee beschreven. De aanpak en resultaten zijn uitgebreid beschreven in een serie zelfstandig leesbare rapporten. Deze discussiestek is bedoeld om de opstellers van de MER houvast te bieden bij de interpretatie van de resultaten van de basisrapporten.

#### 6.2 Algemene methodiek: een effectketenmodel

Bij de opstelling van de MER is gebruik gemaakt van een keten van modelsystemen bestaande uit een aantal gekoppelde componenten:

- 1. Delft3D-Flow (waterbeweging),
- 2. Delft3D-Sed (slibdynamiek),
- 3. GEM: Generiek Ecologisch Model (nutriënten, primaire productie en lichtklimaat),
- 4. DEB: Dynamic Energy Budget model (schelpdieren met name *Ensis*) op zes karakteristieke locaties in de Noordzee,
- 5. ECOWASP (nutriënten, primaire productie en filtrerende schelpdieren) in de westelijke Waddenzee.

Gebruik van een dergelijke keten van modellen is niet nieuw. Tijdens het voortijdig beëindigde project Flyland, ruim tien jaar geleden, werd al een zelfde aanpak uitgewerkt. Een soortgelijke methodiek is ook toegepast ten behoeve de MER-zandwinning voor de aanleg van tweede Maasvlakte en voor de MER betreffende zandsuppleties. Ten gevolge van voortschrijdend inzicht en verbeterde technologieën is er wel een aantal verschillen tussen deze en de voorgaande (MER) studies:

- 1. De waterbeweging in de kustzone is met een veel hogere resolutie beschreven (dit rapport),
- 2. Het slibmodel is inhoudelijk verbeterd (dit rapport),
- 3. GEM is voor het eerst met dezelfde ruimtelijke detaillering doorgerekend als het slibmodel (dit rapport),
- 4. De effecten op schelpdieren in de Noordzee (DEB) worden voor het eerst tijdens een MER gekwantificeerd (Schellekens, 2012),
- Hetzelfde geldt voor kwantificering van de effecten op schelpdieren in de Waddenzee (ECOWASP, Brinkman, 2012); ook dat was niet eerder in combinatie met alle andere modellen gedaan in een MER.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de algemene aanpak diverse keren eerder is toegepast, maar dat de specifieke invulling van de effectketen ten behoeve van deze MER op (belangrijke) onderdelen is uitgebreid en verbeterd in vergelijking met voorgaande (MER) studies.

### 6.3 Koppeling van modules in keten

Karakteristiek voor de effectketenbenadering is dat de verschillende componenten (modellen) zelfstandig worden gedraaid en met elkaar communiceren via bestanden. Deze werkwijze heeft een groot aantal praktische voordelen met betrekking tot de rekentijd en complexiteit van de modellen. Nadeel is echter dat de datastromen in één richting plaats vinden. Soms is daar geen enkel bezwaar tegen: zo heeft de aanwezigheid van fytoplankton een verwaarloosbaar effect op de stroming in de Noordzee. In andere gevallen is deze vereenvoudiging minder vanzelfsprekend zoals bij de interactie tussen fytoplankton (onderdeel van het GEM-model) en *Ensis* (onderdeel van het DEB-model). Juist om dit laatste probleem te ondervangen is tijdens de uitvoering van deze MER als experiment een versie van GEM gebruikt waarin een DEB-module voor *Ensis* is geïntegreerd. Echter, de resultaten hiervan waren (nog) niet bevredigend genoeg om voor de eigenlijke MER te worden gebruikt.

Doorgifte van informatie tussen de onderlinge modules is gestandaardiseerd voor een deel van de modellen zoals tussen de waterbeweging naar slib en GEM). Dit is niet het geval voor bijvoorbeeld de interactie tussen GEM en ECOWASP. Deze interactie is specifiek ten behoeve van deze MER ontwikkeld en kan dus ook niet als 'proven technology' worden beschouwd.

Van Delft3D-Flow naar Delft3D-Slib en GEM: De resultaten van het waterbewegingsmodel (Keetels e.a. 2012) worden met een hoge frequentie weggeschreven en om vervolgens door het slibmodel en GEM te worden ingelezen. Met behulp van een zogenaamde continuiteïtsberekening is aangetoond dat deze koppeling massabehoudend is. Verder is met behulp van een vergelijking van de berekende saliniteit in Delft3D-Flow en in GEM getest hoe goed de transportpatronen in Delft3D-Flow worden gereproduceerd in GEM. Kleine afwijkingen ontstaan doordat (1) niet na elke rekentijdstap van het hydrodynamische model de resultaten kunnen worden weggeschreven en (2) de numerieke oplossingsschema's niet precies gelijk zijn. De verschillen zijn echter dermate klein, dat we kunnen concluderen dat de berekende transportvelden in Delft3D-Flow inderdaad vrijwel geheel worden gereproduceerd in het slibmodel en in GEM.

Van Delft3D-Slib naar GEM: Het ligt voor de hand de resultaten van het slibmodel integraal over te nemen in GEM als stuurfactor voor het onderwaterlichtklimaat. Deze directe koppeling is onderzocht, maar uiteindelijk is besloten een andere koppeling tijdens deze MER te gebruiken. Bij de gekozen koppeling is het jaar-gemiddeldeslibveld van het slibmodel als basis gebruikt waarbij voor een aantal delen van de Noordzee waar het slib model (nog) niet goed presteert (zowel offshore als in zeer ondiepe gebieden, enkele decimeters water), het basisslibveld is aangevuld met een quasi-empirische methodiek om het verloop in slibconcentraties door de tijd beter te beschrijven. Deze wijze van koppeling is ook toegepast tijdens vorige vergelijkbare projecten en is gelijk voor de basisberekeningen en de scenario's.

De berekende slibconcentraties van de scenario's zijn aan GEM doorgegeven als tijd- en ruimte-afhankelijke schaalfactoren.

Van Delft3D-Slib en GEM naar DEB: Zoals eerder opgemerkt, is bij deze MER voor het eerst een kwantitatieve analyse gedaan naar de mogelijke gevolgen van de zandwinning op *Ensis* (zie ook Schellekens 2012). Hiertoe is een DEB-model toegepast op een zestal representatieve locaties in de Noordzee. Als aansturing ontvangt het DEB model anorganisch zwevend stof uit het slibmodel en chlorofyl en dood organisch materiaal uit GEM. De frequentie, waarmee deze informatie wordt doorgegeven, is hoog ten opzichte van de groeikarakteristieken van *Ensis*. Een vereenvoudiging die bij deze koppeling plaats heeft is

dat het DEB model veronderstelt dat een bepaalde hoeveelheid chlorofyl een vaste hoeveelheid voedsel betekent. Binnen GEM varieert de energieinhoud en dus voedselkwaliteit van het fytoplankton *wel* in ruimte en tijd. Gezien de betrekkelijk geringe verschillen tussen de (scenario-) berekeningen onderling is het redelijk te veronderstellen dat deze vereenvoudiging nauwelijks effect heeft als twee berekeningen onderling worden vergeleken.

**Van Delft3D-Slib en GEM naar ECOWASP:** Net als DEB is ook ECOWASP tijdens deze MER voor het eerst geïntegreerd met de anderen modellen (zie ook Brinkman 2012). De koppeling is echter gecompliceerder omdat ECOWASP veel meer informatie moet oppakken en zelf ook een ruimtelijke structuur en waterbeweging heeft. Een verdere complicatie ontstaat doordat veel van de grootheden die binnen GEM en ECOWASP worden gemodelleerd, weliswaar op elkaar lijken, maar vaak toch niet precies hetzelfde zijn. Zo onderscheidt GEM vier groepen van fytoplankton en ECOWASP slechts twee: voor dit en andere soortgelijke problemen zijn conversieregels vastgesteld.

De volgende informatie wordt vanuit het slibmodel dan wel GEM aan ECOWASP doorgegeven:

- Het slibgehalte van Delft3D-Slib. Dit wordt echter niet direct overgenomen door ECOWASP, omdat binnen EcoWasp het slibgehalte in de waterkolom zelf wordt berekend (de berekening is afgeregeld aan de hand van gemeten slibgehaltes). *Relatieve veranderingen* in slibgehaltes, die zijn berekend met het slibmodel voor de scenario's, worden daarom vertaald in *relatieve* veranderingen in het lichtklimaat van ECOWASP.
- 2. Voor nutriënten en fytoplankton geldt hetzelfde: ECOWASP gebruikt alleen de veranderingen in concentraties zoals die door GEM worden berekend voor de randvoorwaarden (de concentraties in de Noordzeekustzone). Deze wijze van koppelen gaat er van uit dat de herverdeling van GEM-stoffen over ECOWASP-stoffen gelijk blijft voor alle scenario's. In voorkomende gevallen kunnen numerieke problemen ontstaan, bijvoorbeeld wanneer het gehalte van een bepaalde component laag (nagenoeg nul) is in GEM omdat in dat geval een kleine absolute verandering in concentratie, die is berekend voor een scenario, kan leiden tot een grote relatieve verandering. Om hiervoor te compenseren worden slechts maandgemiddelde GEM-uitvoerresultaten door ECOWASP gebruikt. Nadeel is dat variaties op kortere tijdschalen, die wel worden berekend door GEM, niet worden meegenomen door ECOWASP; er vindt dus enig verlies van informatie plaats.
- 3. Een andere complicaties in de koppeling tussen GEM en ECOWASP is dat ECOWASP zijn randvoorwaarden ontleent aan metingen op een paar locaties in de Noordzee. Bij de scenario's worden de op deze locaties door GEM (en het slibmodel) berekende relatieve veranderingen overgenomen. Echter, deze hoeven niet noodzakelijkerwijs gelijk te zijn aan de veranderingen bij de instroming van de Waddenzee. Impliciet is dus verondersteld dat de berekende veranderingen maatgevend zijn voor de veranderde invoer van de Waddenzee.
- 4. Anders dan in het slibmodel en GEM, die gebruik maken van actuele stromingsvelden, gebruikt ECOWASP een statisch transportveld. Omdat de door GEM berekende concentraties aan de randen van ECOWASP mede afhangen van de stroming, zal de nutriëntenimport van de Waddenzee volgens ECOWASP gedurende het jaar niet gelijk zijn aan de import van GEM. De jaarlijkse import zou wel ongeveer gelijk moeten zijn, maar dat is niet gecontroleerd.

Samenvattend: bij de koppeling tussen het slibmodel en GEM met ECOWASP doet zich een aantal complicaties voor dat te maken heeft met verschillen in de gemodelleerde toestandsgrootheden, transportvelden en randen. We veronderstellen dat deze

consistentieproblemen geen invloed hebben op de interpretatie van de scenarioresultaten, die immers allemaal hierdoor beïnvloed worden. Strikt genomen moet echter worden gesteld dat de mate waarin deze veronderstelling klopt, niet kan worden vastgesteld op basis van de informatie die nu beschikbaar is.

### 6.4 Beoordeling resultaten

Bij de beoordeling van de resultaten spelen veel factoren een rol, die echter in een paar hoofdcategorieën kunnen worden samengevat:

- 1. Het wettelijke kader,
- 2. De betrouwbaarheid van de simulatieresultaten,
- 3. De verhouding tussen de berekende effecten en de 'natuurlijke' variabiliteit,
- 4. De verhouding tussen de berekende effecten en de effecten veroorzaakt door 'andere' maatregelen (de autonome ontwikkeling).

*Het wettelijke kader:* Een complicatie met betrekking tot het wettelijke kader is dat de wetenschappelijke basis van sommige wettelijk vastgelegde of op bestaande jurisprudentie gebaseerde normen niet overtuigend is of zelfs ontbreekt. Ook komen inconsistenties voor in gevallen waar normen op basis van verschillende wetgeving gelijktijdig van toepassing zijn. In dit rapport wordt het wettelijke kader als zodanig niet inhoudelijk bediscussieerd. Wel wordt aangeven wat de wetenschappelijke betekenis is van veranderingen, zoals die worden gesimuleerd met behulp van de modelketen. Daarbij wordt met name ingegaan op de resultaten voor de Waddenzee, omdat die vanuit het wettelijke kader gezien mogelijk de meeste kritisch zijn.

**Betrouwbaarheid simulatieresultaten:** De kwaliteit van een model hangt van veel factoren af zoals:

- 1. De mate waarin de gebruikte procesbeschrijvingen de werkelijkheid reproduceren,
- 2. De numerieke implementatie en verwerking tot computercode,
- 3. De gebruikte waardes voor procesparameters (kalibratie),
- 4. De kwantiteit en kwaliteit van de metingen (nauwkeurigheid; frequentie; ruimtelijke dekking; aantal gemeten stoffen) (validatie).

Ook van belang is een heldere omschrijving van de doelstelling van de modeltoepassing: een modelopzet, die voor een bepaalde vraag adequaat is, kan voor een andere vraag ontoereikend zijn. Een ander punt is dat wanneer (te) grote afwijkingen tussen model en waarnemingen worden gevonden, er een zorgvuldige analyse nodig is om de oorzaak vast te stellen en eventueel op lossen. Uitdrukkingen als: "Het model is niet goed" of "De waarnemingen deugen niet" zijn daarbij niet specifiek genoeg en kunnen dus wel behulpzaam zijn bij het omschrijven van symptomen, maar niet bij het diagnosticeren van het feitelijke probleem. Specifiek voor studies zoals deze, waarbij simulaties onderling worden vergeleken, is overigens wel dat bepaalde afwijkingen acceptabel kunnen zijn, bijvoorbeeld als aannemelijk kan worden gemaakt dat het effect in verschillende berekeningen gelijk is zodat de afwijking wegvalt zodra de berekeningsresultaten van elkaar worden afgetrokken.

Omdat er in dit onderzoek gebruik is gemaakt van een keten van gekoppelde modellen, zou men kunnen veronderstellen dat de onzekerheden aan de basis van de effectketen *versterkt* doorwerken naarmate de keten verder wordt doorlopen. Dat leidt dan tot een redenering als: er zijn onzekerheden in de simulatie van de waterbeweging en van het slib, die gezamenlijk leiden tot nog grotere onzekerheden in de simulaties voor primaire productie en zo verder. Deze voorstelling van zaken is echter te simplistisch omdat binnen modellen ook *verzwakking* van onzekerheden in voorgaande schakels van de keten kan plaatsvinden bijvoorbeeld door terugkoppelingsmechanismen of verschillen in tijd- en ruimteschaal. Zo kunnen de gevolgen van een onjuiste berekening van de verspreiding van een slibpluim in GEM gering of zelfs afwezig zijn als nutriënten ter plekke een belangrijkere limitatie zijn dan slib. Ter illustratie, Los & Blaas (2011) hebben aangetoond dat de Goodness of Fit (GOF) van chlorofyl zoals berekend door GEM voor heel verschillende ruimtelijke schematisaties van de Noordzee over de hele linie beter is dan de GOF van anorganisch slib of het saliniteit, die worden overgenomen uit de simulatieresultaten van andere modellen in de keten.

Versterking van effecten, waarbij betrekkelijk kleine veranderingen in de forcering van modellen leiden tot (onverwachts) grote veranderingen zijn kenmerkend voor predator-prooi modellen, waarvan een groot deel van de dynamiek wordt veroorzaakt door intrinsieke processen zoals de predator-prooirelaties. Binnen de keten van modellen in deze studie is ECOWASP een voorbeeld van een model waarbij versterking kan plaatsvinden met name in de relatie tussen fytoplankton en schelpdieren.

Behoudens het DEB-model voor *Ensis* in de Noordzee zijn de verschillende modellen, die tijdens deze studie zijn gebruikt, in het verleden al heel veel toegepast bij de voorspelling van soortgelijke scenario's. Met andere woorden, er is gebruik gemaakt van eerder gevalideerde en door auditcommissies bekeken modellen. Voor de Deltares modellen in de keten is ten behoeve van deze MER een apart validatierapport geschreven (Keetels e.a. 2012). Ook ECOWASP is een bestaand model met een lange geschiedenis, maar binnen deze MER is geen aanvullende validatie uitgevoerd. Het DEB-model daarentegen heeft een veel kortere geschiedenis. Bovendien is de aard van de beschikbare data anders dan voor GEM of ECOWASP, die met lange tijdreeksen van waarnemingen van verschillende grootheden op diverse plaatsen vergeleken kunnen worden. Dat leidt ertoe dat de uitkomsten van modellen als Delft3D-slib of GEM tijdens deze MER volgens formele goodness-of-fit-criteria zijn getoetst en gerapporteerd, maar dat de DEB-resultaten op de *logica* of *redelijkheid* moeten worden beoordeeld. Dat betekent niet dat dit model slechter is, wel dat er (veel) minder informatie beschikbaar is om de correctheid formeel aan te tonen.

**De verhouding tussen de berekende effecten en de 'natuurlijke' variabiliteit:** Er is vaak een zekere mate van spanning tussen (wettelijke) normering, die uitgaat van een goed gedefinieerde status quo van ecosysteemcomponenten en de 'ecologische werkelijkheid', waarbij soms grote ruimtelijke of temporele variaties in aantallen of dichtheden voorkomen. In het kader van deze MER liggen de berekende effecten van de verschillende ecosysteem componenten meestal in de grootteorde van enkele procenten of minder. Bij de beoordeling hiervan is het daarom zinvol om te bekijken hoe deze veranderingen zich verhouden tot de natuurlijke variabiliteit van de betrokken ecosystemen.

Voor de waterbeweging van de Noordzee geldt dat de reststroomdebieten (op jaarbasis) de belangrijkste bron van natuurlijke variatie zijn met name omdat deze worden bepaald door de Kanaaldebieten. Het Kanaal is echter ook de belangrijkste nutriëntenbron van de zuidwestelijke Noordzee. Omdat het om een heel grote stroom gaat, die bovendien op korte termijn (uren) sterk varieert, worden de Kanaaldebieten meestal geschat op basis van modelsimulaties. De maximale variabiliteit daarin is in de orde van *100 procent* op jaarbasis. Als regel zijn de debietverschillen kleiner. Iets soortgelijks geldt voor de uitwisseling tussen Noordzee en Waddenzee. Ook hiervoor geven modellen en metingen in één van de zeegaten (Marsdiep) aan dat er grote variaties in de debieten en dus in de transporten van nutriënten zijn.

Ook voor het slibgehalte geldt dat er grote variaties voorkomen. De karakteristieke tijdschaal hiervan is echter korter dan van de waterbeweging, met name doordat variaties in windsterkte heel snel (grote) variaties veroorzaken in hoeveelheden slib in de waterkolom. Jaarlijkse variaties liggen in de orde van *tientallen procenten*, variaties op de tijdschaal van weken kunnen oplopen tot *een factor 5* of zelfs meer.

De jaarlijkse primaire productie hangt af van de beschikbaarheid van lichtenergie en nutriënten. Jaarlijkse variaties in instraling in het gebied van de Noordzee zijn klein: het verschil tussen een zonnig en een somber jaar ligt in de orde van *10 procent*. Variaties in verticale menging en in zwevend stof hebben een veel groter effect op de beschikbaarheid van licht voor de primaire productiviteit met name wat betreft de start van de voorjaarsbloei. De aanvoer van nutriënten wordt behalve door variaties in Kanaaldebieten en in de Kustzone en Waddenzee sterk bepaald door de aanvoer vanuit de rivieren, waarbij de Rijn en Maas (Nieuwe Waterweg + Haringvliet) overheersen. Ook hiervoor geldt dat op korte termijn (orde week tot maand) variaties tot orde *100 procent* voorkomen, maar de jaarlijkse variaties zijn in de orde van *tientallen procenten*. Behalve de productiviteit is ook de sterfte van fytoplankton door sterfte en graas aan variaties onderhevig, maar kwantificering hiervan is veel lastiger en feitelijk niet mogelijk.

Uit de metingen blijkt dat de jaarlijkse variatie in het chlorofylgehalte als maat voor de fytoplanktonbiomassa als regel orde 10 procent bedraagt met uitschieters tot 50 procent (zie Figuur 6.1). Gedurende het seizoen is de variabiliteit groter, met name tijdens de voorjaarsbloei waarbij variaties in de orde van *100 procent* niet uitzonderlijk zijn. Het moment waarop de voorjaarsbloei begint, kan variëren over een periode van enkele weken.



Chlorofyl-a concentraties Tersch. 2 km uit de kust Chlorofyl-a concentraties Rottum 3 km uit de kust Figuur 6.1 Chorofylconcentraties (µg/l) bij een aantal meetpunten voor de jaren 2008 tot en met 2011.

Variaties in hoeveelheden schelpdieren hangen enerzijds af van de al genoemde variaties in stroming (voedselaanvoer), slib (hinderlijk) en fytoplankton (voedsel), anderzijds van habitatkarakteristieken als de beschikbaarheid van geschikt substraat, verstoring (visserij) en succes van de broedval (o.a. beïnvloed door het weer, maar ook door allerlei biotische processen). Dit alles leidt ertoe dat de waargenomen jaarlijkse variaties in de hoeveelheden mosselen in de Waddenzee groot kunnen zijn. Binnen een jaar varieert de massa van een enkel schelpdier soms met een factor twee (veel vlees aan het begin, en weinig aan het einde van de winterperiode), en zorgt predatie vaak voor een afname in de schelpdierpopulatie van 30%. Dit leidt er toe dat de variatie binnen een jaar 50-70% kan bedragen. Door

onregelmatige reproductie kan een dergelijke variatie (het verschil tussen het maximale en het minimale bestand) over een aantal jaren nog versterkt worden.

 Tabel 6.1
 Globale vergelijking (orde van grootte) van de berekende effecten van de scenario's met de natuurlijke variabiliteit voor enkele belangrijke toestandsgrootheden. De getallen zijn slechts indicatief.

| Toestandsgrootheid                      | Natuurlijke variatie | Effect scenario's |
|---|----------------------|-------------------|
| Slib (per maand)                        | 100%                 | 10%               |
| Slib (per jaar)                         | 50%                  | 5%                |
| Chlorofyl (start voorjaarsbloei)        | ± 1 maand            | 0 tot - 5 dagen   |
| Chlorofyl (hoogte voorjaarsbloei)       | ± 80%                | - 5% - 0%         |
| Chlorofyl (jaargemiddeld)               | ± 25%                | - 5% tot +2%      |
| Chlorofyl (Waddenzee GEM) (Keetels e.a. | ± 25% - 1% tot 0%    |                   |
| 2012)                                   |                      |                   |
| Chlorofyl (Waddenzee ECOWASP)           | ± 25%                | -10 tot + 10%     |
| (Brinkman 2012)                         |                      |                   |
| Mosselen (Waddenzee) (Brinkman 2012)    | ± 500%               | 0 tot – 2%        |

Nota bene: het verschil in respons van berekend chlorofyl van GEM en ECOWASP in de Waddenzee wordt veroorzaakt door de eerder vermelde verschillen in procesformulering. In GEM is de sterfte afhankelijk van de limitatie en de temperatuur en evenredig met de biomassa. Doordat ten gevolge van de zandwinning de slibgehaltes in de Waddenzee stijgen, daalt de primaire productie en dus ook de biomassa van fytoplankton. Dus er is per definitie een afname, ook al is deze klein. In ECOWASP is graas door mosselen een belangrijke sterfteoorzaak van het fytoplankton die wordt beschreven met behulp van een predator - prooi relatie tussen fytoplankton en mosselen. Van belang hierbij is dat de karakteristieke tijdschalen van fytoplankton (orde dagen) en mosselen (orde jaren) sterk verschillen. Dat leidt ertoe dat een aanvankelijke daling van de primaire productie door toename van het slibgehalte (net zoals in GEM) leidt tot een daling van de hoeveelheid mosselen, waardoor de graasdruk afneemt en het fytoplankton gehalte in volgende jaren periodiek zelfs kan stijgen in vergelijking tot de autonome situatie.

Dit verschil in interne dynamiek is tevens de belangrijkste verklaring voor het verschil in gedrag tussen GEM en ECOWASP gedurende de simulatieperiode. Omdat in GEM de sterfte direct gekoppeld is aan de biomassa en de karakteristieke tijdschaal van de traagste processen circa een tot twee jaar bedraagt, keren de modelresultaten na beëindiging van de zandwinning snel terug naar de waarden van de autonome ontwikkeling. Doordat in ECOWASP de interactie fytoplankton - mosselen een langere tijdschaal heeft, duurt het ook veel langer voor de scenario effecten volledig zijn uitgedoofd.

Samenvattend betekent dit dat de in deze MER berekende effecten van de verschillende scenario's klein, soms zelfs heel klein zijn ten opzichte van de waargenomen natuurlijke variabiliteit van slib, fytoplankton en mosselen. Toch moet worden benadrukt dat dit niet voldoende is om de effecten te verwaarlozen: zo zou bijvoorbeeld een stijging van de gemiddelde jaartemperatuur van twee graden relatief klein zijn ten opzichte van de natuurlijke variabiliteit, maar mogelijk tot dramatische gevolgen leiden. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat al deze modellen deterministisch zijn en dus slechts één mogelijke nieuwe toestand berekenen. Dat leidt ertoe dat in de meeste modellen de veranderingen altijd in een bepaalde richting zijn (slib is groter of gelijk, chlorofyl is kleiner of gelijk, *Ensis* is kleiner of gelijk). In ECOWASP kunnen in bepaalde jaren de veranderingen soms van teken omslaan. Gezien de grootte van de natuurlijke variabiliteit kan de daadwerkelijk gerealiseerde verandering gerekend over een periode van bijvoorbeeld vijf of tien jaar flink afwijken van de

gemiddeld door de modellen berekende verandering. De grootste natuurlijke variaties zijn waargenomen voor de hoeveelheden mosselen in de Waddenzee. Vermoedelijk worden deze veroorzaakt door eerder genoemde relevante factoren zoals de habitatgeschiktheid, broedval en visserij, waarvan de laatste niet expliciet binnen ECOWASP wordt gemodelleerd, en de eerste weliswaar is gemodelleerd, maar niet geëffectueerd.

Gezien de nauwkeurigheid waarmee schelpdierbestanden kunnen worden bepaald, chlorofylgehaltes of primaire producties kunnen worden gemeten betekent dat het op basis van toekomstige metingen niet mogelijk zal zijn om de in verhouding kleine met behulp van ECOWASP cq GEM berekende veranderingen in mosseldichtheden, chlorofylgehaltes of primaire productie in het veld aan te tonen.

Additionele betekenis effecten MER ten opzichte van andere activiteiten: Naast de voorgenomen activiteiten in het kader van deze MER, vindt een aantal andere activiteiten plaats zoals de aanleg van de zandmotor voor de kust van Zuid-Holland, de aanleg van de tweede Maasvlakte, de reductie van rivierbelastingen in het kader van de KRW etc. Algemeen geldt dat dit soort maatregelen binnen een MER onderdeel uitmaken van 'autonome ontwikkeling' en dus niet expliciet zichtbaar worden gemaakt. Voor een aantal onderdelen van de autonome ontwikkeling zijn weliswaar aparte MER-studies uitgevoerd, maar vergelijking van resultaten is niet zondermeer mogelijk door verschillen in methodiek. De indicatie van de cumulatieve effecten van alle andere maatregelen kan wel worden afgeleid uit een vergelijking van autonome ontwikkeling met de huidige situatie. Hieruit blijkt dat met name

- de gecombineerde zandwinning ten behoeve van andere ingrepen (combinatie van de tweede Maasvlakte, ophoogzand, WCT, etc.) als
- de nutriëntenreductie ten gevolge van de KRW,

globaal gesproken grotere effecten teweeg brengen dan die van deze MER.

#### 6.5 Samenvatting

Het waterbewegingsmodel Zuno-DD is gebaseerd op eerdere gekalibreerde en gevalideerde modellen van de zuidelijke Noordzee, inclusief de Waddenzee. De bodem in het model is aangepast om de voortplanting van het getij en het transport door de geulen in de Waddenzee te verbeteren. Het model is afgeregeld door aanpassing van de bodemruwheid. Het karakter van het momentane debiet en het restdebiet door het Marsdiep wordt goed gerepresenteerd door het model. De berekende saliniteit in de Hollandse kustzone wijkt niet systematisch af van de metingen. In de Waddenzee is de berekende saliniteit iets lager dan de metingen. Dit verschijnsel kan veroorzaakt worden door een te lage uitwisseling tussen de Waddenzee en de Noordzee. Echter zijn de saliniteitmetingen te schaars en de schattingen van de uitwisseling tussen de Noordzee en de Waddenzee te onzeker om dit verder te beoordelen. Het berekende transportveld kan als een goede basis beschouwd worden voor slib en GEM modellering.

Het slib model is ook gebaseerd op eerdere gekalibreerde en gevalideerde toepassingen van het Delft3D-WAQ softwaresysteem. Die eerdere studies waren vooral gericht op de kustzone, waardoor de Waddenzee toen minder aandacht had gekregen. In het kader van deze studie is de weergave van slibconcentraties en slibgehaltes in de bodem verbeterd om de algemene kwaliteit van het model in de Waddenzee te verbeteren. Na deze calibratieslag wordt geconcludeerd dat het model moeilijk verder verbeterd kan worden, vanwege de beperkte horizontale resolutie. Als gevolg hiervan worden de slibconcentraties in de Waddenzee onderschat door het model. Op basis van een gevoeligheidsanalyse met een hoge resolutie model van de Waddenzee wordt wel geconcludeerd dat relatieve verandering in slibconcentraties goed worden weergegeven door het model. Er wordt dus geconcludeerd dat

het Zuno-DD model een goede basis vormt om met scenario studie effect van de zandwinning op slibconcentraties te kwantificeren op de Waddenzee.

Zoals voor waterbeweging en slib is het model voor nutriënten en primaire productie GEM ook gebaseerd op eerdere gekalibreerde en gevalideerde modellen. Een vergelijking van de modelresultaten met metingen bij een aantal meetstations geeft aan dat de overeenstemming in het algemeen goed is. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het GEM model geschikt is voor het kwantificeren van het effect van zandwinning op primaire productie. In Harezlak et al. (2012a,b), Schellekens (2012) en Brinkman (2012) worden die modellen gebruikt om het effect van een aantal alternatieven te kwantificeren.

Wel moet worden benadrukt dat de modellen toch wel wat afwijking kunnen laten zien ten opzichte van de metingen. Daarnaast speelt ook dat de gevolgen van sommige keuzes in de aanpak (bijvoorbeeld de keus van het jaar 2007 als basisjaar voor de transportvelden en de onderliggende minima in de amplitude van sommige getij-componenten) zowel kwalitatief als kwantitatief onbekend zijn. De algemene goed overeenkomst tussen de modellen en de metingen suggereert dat het effect van die afwijkingen beperkt is, en waarschijnlijk binnen de marge van betrouwbaarheid van de numerieke modellen valt.

Daarnaast moet ook worden benadrukt dat de huidige stand van kennis van het gebied van interesse ook wel beperkend blijft om de modellen nauwkeuriger te beoordelen. Een goed voorbeeld hiervan betreft de schattingen van de netto uitwisseling van water en van slib tussen de Noordzee en de Waddenzee, wiens bandbreedte relatief nog groot blijft (zie bijvoorbeeld Kats e.a. 2012, Sips en de Leeuw, 2009, en van Duren e.a. 2011).

## 7 Referenties

- Aarninkhof, S.G.J., J.R. Spearman, A.F.M. de Heer, M. van Koningsveld (2010): "Dredginginduced tubidity in a natural context status and future perspective of the TASS program". WODCON conferentie, 09-2010 Shanghai
- Beukema, J.J., J.G. Baretta-Bakker, G.C. Cadée, J. Dronkers, P.H. Nienhuis, M.M. Rutgers van der Loeff., W.J. Wolff en J.T.F. Zimmerman (1995): "European Regional Seas Ecosystem Model I", Special issue of the Netherlands Journal of Sea Research (33).
- Blaas M., K. Cronin, G.Y. El Serafy, Y.F. Friocourt, I.D.T.F. Garcia Triana, S. Gaytan Aguilar, en G.H. Keetels (2012): MoS2: Model setup, data assimilation and skill assessment. Model-supported monitoring of SPM in the Dutch coastal zone, projectnummer 1002611-000, Deltares.
- Blauw, A.N., F.J. Los, E.J. Kranenborg en J.G. Boon (1999): "Toepassing van GEM op Nederlandse kustwateren", WL | Delft Hydraulics rapport Z2556.
- Blauw, A.N. en F.J. Los (2004): "Analysis of the response of phytoplankton indicators in Dutch coastal waters to nutrient reduction scenarios: A model study with the Generic Ecological Model (GEM)", WL | Delft Hydraulics rapport Z3844.
- Blauw, A.N., F.J. Los, M. Bokhorst en P.L.A. Ertemeijer (2009): "GEM: a generic ecological model for estuaries and coastal waters", Hydrobiologia (618), 175-198.
- Blauw, A.N., K. van de Wolfshaar, en H. Meuwese (2006): "Transboundary nutrient transports in the North Sea: model study", Delft Hydraulics rapport Z4188.
- Bokhorst, M (1997): "Toepassing pilot GEM westelijke Waddenzee", WL | Delft Hydraulics rapport Z2274.
- Boon, J.G. en M. Bokhorst (1995): "KSENOS, Adjustment and extension of the modelling suite for toxic substances and eutrophication in the North Sea and Dutch coastal waters", WL | Delft Hydraulics report T1236.
- Boon, J.G., X. Desmit en M. Blaas (2006): "Ecological model of the Lagoon of Venice. Part II: Set-up, calibration and validation", WL | Delft Hydraulics, technical report Z3733.
- Bot, P.V.M, W. van Raaphorst, S. Batten, R. Laane, K. Philippart, G. Radach, A. Frohse, H. Schultz, D. van den Eynde en F. Colijn (1996): "Comparison of changes in the annual variability of the seasonal cycles of chlorophyll, nutrients and zooplankton at eight locations on the north-west European shelf (1960-1994)", Deutsche Hydrographische Zeitschrift 48 (3), 349-363.
- Brinkman, A.G. (1993): "Biological processes in the ECOWASP ecosystem model", Institute for Forestry and Nature Research, IBN-DLO report 0928-6896.
- Brinkman, A. G. (2012): Zandwinning in de Nederlandse kustzone 2013-2017 en productie in de westelijke Waddenzee, een modelstudie. IMARES.

Brockman, U. en D.H. Topcu (2002): "North Sea Nutriënt Atlas", University of Hamburg, Hamburg.

- Buijsman, M.C, en H. Ridderinkhof (2007a): "Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet", *Journal of Sea Research*, 57(4), 237-256, doi:10.1016/j.seares.2006.11.004.
- Buijsman, M.C., en H. Ridderinkhof (2007b): "Water transport at subtidal frequencies in the Marsdiep inlet", *Journal of Sea Research*, 58(4), 255-268, doi:10.1016/j.seares.2007.04.002.
- Deltares en Imares (2011): "Offerte GEM sommen", Deltares rapport 1204963-000-ZKS-0005.
- van Duren, L. A., Winterwerp, H., Van Prooijen, B., Ridderinkhof, H., & Oost, A. P. (2011). "*Clear as mud: Understanding fine sediment dynamics in the Wadden Sea - Action plan*". Wadden Academy-KNAW, Leeuwarden, the Netherlands.
- Elias, E.P.L., J. Cleveringa, M.C. Buijsman, J.A. Roelvink, and M.J.F. Stive (2006): "Field and model data analysis of sand transport patterns in Texel Tidal inlet (the Netherlands)", *Coastal Engineering*, *53*(5-6), 505-529, doi:10.1016/j.coastaleng.2005.11.006.
- Glas, P.C.G. en T.A. Nauta (1989): "A North Sea computational framework for environmental and management studies: an application for eutrophication and nutrient cycles", contribution to the international symposium on integrated approaches to water pollution problems: SISIPPA, Lisbon
- de Goede E. en D.S van Maren (2005): "Impacts of Maasvlakte2 on the Wadden Sea and North Sea coastal zone, Part I Hydrodynamics", projectnummer Z3945.20, WL | Delft Hydraulics.
- de Graaf R. (2009): "SBW Wadden Sea, water level modelling", projectnummer 1200114-005, Deltares.
- Harezlak, V., A. van Rooijen, Y. Friocourt, T. van Kessel, H. Los (2012a): "Winning suppletiezand Noordzee. Scenariostudies m.b.t. slibtransport, nutriënttransport en primaire productie voor de periode 2013-2017". Deltares rapport 1204963-ZKS-0040.
- Harezlak, V., A. van Rooijen, Y. Friocourt, T. van Kessel, H. Los (2012b): "Winning suppletiezand voor herstel zwakke schakels Noord-Holland. Scenariostudies m.b.t. slibtransport, nutriënttransport en primaire productie voor de periode 2013-2017". Deltares rapport 1204963-ZKS-0036.
- Hitchcock, D. R. en S. Bell (2004). "Physical impacts of marine aggregate dredging on seabed resources in coastal deposits", Journal of Coastal Research, 20(1), 101-114, doi:10.2112/1551-5036(2004)20[101:PIOMAD]2.0.CO;2.
- Jollif, J.K., J.C. Kindle, I. Shulman, B. Penta, M.A.M. Friedrichs, R. Helber en R.A. Arnone (2008): "Summary diagrams for coupled hydrodynamic-ecosystem model skill assessment", Journal of Marine Systems, doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.05.014.

- Kats, R. K. H., Oost, A. P., & van Dalfsen, J. A. (2012): "Naar een heldere afweging voor de sedimenthuishouding in de Waddenzee". *De Levende Natuur*, *113*(3), 152-153.
- Kernkamp, H., G. Boot en A. Nolte (2002): "Onderzoek naar detoekomstige waterkwaliteit en ecologie van het Veerse Meer. Studie naar het effect van het doorlaatmiddel en aanvullende maatregelen. Deel 1: Opzet en kalibratie hydrodynamisch en waterkwaliteitsmodel", WL | Delft Hydraulics rapport Z3304.
- van Kessel T. (2005): "Effect assessment Maasvlakte 2 in the framework of the Appropriate Assessment Wadden Sea. Part II: Fine sediments". Royal Haskoning / WL | Delft Hydraulics report 9R2847.A0/Z3945.
- Van Kessel, T., H. Winterwerp, B. Van Prooijen, M. Van Ledden, and W. Borst (2011), "Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed", Continental Shelf Research, 31(10), S124-S134, doi:10.1016/j.csr.2010.04.008.
- Klepper, O., W.M. van der Tol. H. Scholten en P.M.J. Herman (1994): "SMOES: a simulation model for the Oosterschelde ecosystem. Part 1: Description and uncertainty analysis", Hydrobiologia (282/283), 453-474.
- Laane, R. W. P. M. et al. (1996), "Variability in fluxes of nutrients (N, P, Si) into the North Sea from the Atlantic Ocean and Skagerrak caused by variability in water flow", Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 48(3-4), 401-419, doi:10.1007/BF02799380.
- Los, F.J., M.T. Villars en M.R.L. Ouboter (1994a): "Model Validation Study DBS in networks", WL | Delft Hydraulics report T1210.
- Los, F.J., R. Jansen en S. Cramer (1994b): "MANS eutrophication modelling system", National Institute for Coastal and Marine Management/RIKZ, 137 pp.
- Los, F.J., J. Wijsmijn en S.Tatman (2001a): "Kust- en Zeestudies ONL Mariene Ecologie en Morfologie", WL | Hydraulics, rapport WL2001004 Z3030.10.
- Los, F.J., J. Wijsman en S. Tatman (2001b): "Description and model representation T<sub>0</sub> situation Part 2: Transport, nutients and primary production", Programmabureau Flyland, rapport Z3030.10.
- Los, F.J. en J. Wijsman (2007): "Application of a validated primary porodcuction model (BLOOM) as a screening tool for marine, coastal and transitional waters", Journal of Marine Systems (64), 201-215.
- Los, F.J., M.T. Villars en M.W.M. van der Tol (2008): "A 3-dimensional primary production model (BLOOM/GEM) and its applications to the (southern) North Sea (coupled physical-chemical-ecological model)", Journal of Marine Systems (74), 259-294.
- Los, F.J. en M. Blaas (2010): "Complexity, accuracy and practical applicability of different biogeochemical model versions", Journal of Marine Systems (81), 44-74.
- National Environmental Research Institute (2007): "The national database for marine data (MADS)", National Environmental Research Institute.

- Nauta, T.A., I. de Vries, A.A. Markus en E.G. De Groodt (1992): "An integral approach to assess cause-effect relationships in eutrophication of marine systems", Science of the Total Environment, Supplement, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1133-1147.
- Nauw, J., and H. Ridderinkhof (2009), Slibtransport door het Marsdiep op basis van veerbootmetingen (project nr. RKW-1700), NIOZ report.
- Nolte, A., P. Boderie en J. van Beek (2005): "Impacts of maasvlakte 2 on the Wadden Sea and North Sea coastal zone. Track 1: Detailed modeling research. Part III: Nutrients and Primary Production", WL | Delft Hydraulics report Z3945.
- van Oeveren-Theeuwes C. (2011): Validation of the mud buffer model for mud transport in the North Sea coastal zone on the basis of long-term measurements of Cd concentrations, projectnummer 1203191-000, Deltares.
- van Pagee, J.A., P.C.G. Glas, A.A. Markus en L. Postma (1988): "Mathematical modelling as a tool for assessment of North Sea Pollution", In W. Salomons, B.L. Bayne, E.K. Duursma en U. Forstner (Eds): "Pollution of the North Sea, an Assessment", Springer-Verlag, London.
- Prandle, D., G. Ballard, D. Flatt, A. J. Harrison, S. E. Jones, P. J. Knight, S. Loch, J. McManus, R. Player, and A. Tappin (1996), Combining modelling and monitoring to determine fluxes of water, dissolved and particulate metals through the Dover Strait, Continental Shelf Research, 16(2), 237-257, doi:10.1016/0278-4343(95)00009-P.
- Van Prooijen B., M. van Ledden, T. van Kessel, A. Nolte, F. Los, J. Boon, W. de Jong (2006): "Impact sand extraction Maasvlakte 2", Royal Haskoning, Svasek Hydraulics and WL | Delft Hydraulics
- van Prooijen B., B. Bliek, H. Los, X. Desmit (2007): Winning suppletiezand Noordzee 2008-2012. Slibtransport, nutriëntentransport en primaire productie. Svašek en WL | Delft Hydraulics, BvP/1414/07376C.
- Schellekens, T. (2012): "Groei en conditie van zwaardschede (*Ensis directus*, Conrad) voor, tijdens en na geplande zandwinning in 2013-2017". IMARES.
- Sips, H., & de Leeuw, C. (2009). "Natuurherstelplan Waddenzee, Bouwsteen thema 1: Wadbodem en waterkolom". (N. Dankers, V. de Jonge, A. P. Oost, H. Ridderinkhof, & H. de Swart, Eds.) (p. 50).
- Smits, J.G.C., A.N. Blauw en A. Nolte (1998): "Toepassing GEM Veerse Meer", WL | Delft Hydraulics rapport Z2570.
- Smits, J.G.C. (2006): "Environmental master plan and investment strategy for the Marmara Sea Basin. Water quality modeling of the Sea of Marmara: Model development and scenario simulations", WL | Delft Hydraulics, technical report Z3804.50.
- Soetaert, K. en P.M.J. Herman (1995): "Carbon fows in the Westerschelde estuary (the Netherlands) evaluated by means of an ecosystem model (MOSES)", Hydrobiologogia (311), 247-266.

- Spearman, J.R., A.F.M. de Heer, S.G.F. Aarninkhof, M. van Koningsveld (2011): "Validation of the Tass System for Predicting the Environmental Effects of Trailing Suction Hopper Dredgers". Terra et Aqua 125: 14-22
- Suijlen, J.M., Duin, R.N.M. (2001): "Variability of near-surface total suspended matter concentrations in the Dutch coastal zone of the North Sea. Climatological study on the suspended matter concentration in the North Sea". Report RIKZ/OS/2001.150X.
- Thoolen P.M.C, L.M. Merckelbach, T. van Kessel (2001): "Effects of land reclamation Maasvlakte-2 on silt transport and siltation. Phase 2: Large scale effects along the Dutch coast and in the Wadden Sea". WL | Delft Hydraulics report Z2874.20.
- van Wiechen J. (2011): "Modelling the wind-driven motions in the Rhine ROFI", Master Thesis TU Delft.
- WL | Delft Hydraulics (1992): "Process formulations DBS", WL | Delft Hydraulics report T542.

## A Delft3D-FLOW model of Southern North Sea (Zuno-DD)

### A.1 Introduction

This section describes the hydrodynamic model for the Southern North Sea (*Zuidelijke* <u>*Noordzee: ZUNO*</u>) by using a domain decomposition (DD) technique in the Delft3D FLOW simulation package. Delft3D-FLOW is a multi-dimensional hydrodynamic simulation program, which calculates non-steady flow and transport phenomena resulting from tidal and meteorological forcing on a rectilinear or a curvilinear grid (see e.g. Lesser et al., 2004). The numerical system solves the unsteady shallow water equations in two or three dimensions using finite difference methods. The system of equations consists of the horizontal equations of motion, the continuity equation and the transport equation for conservative constituents. The flow model can be used to predict flow in shallow seas, coastal areas, estuaries, lagoons, rivers and lakes. It aims to model flow phenomena of which the horizontal length and time scales are significantly larger than the vertical scales.

The equations are capable of resolving the turbulent scales (large eddies) but usually the computational grids are too coarse to resolve smaller-scale fluctuations. Therefore, the basic equations are Reynolds-averaged, introducing so called Reynolds stresses. These stresses are related to the Reynolds-averaged flow quantities by a turbulence closure model.

The hydrodynamic conditions (velocities, water elevations, density, salinity, vertical eddy viscosity and vertical eddy diffusivity) calculated in Delft3D-FLOW module are used as input to the transport and water quality model Delft3D-WAQ which is used for the SPM transport computations. For more detail on the numerical aspects of Delft3D-FLOW the reader is referred to the Delft3D-FLOW User Manual (Version 3.14, 2009).

In the model application for earlier project, the main tidal constituents (vertical tide) were calibrated by variation of the astronomical boundary conditions at the southern and northern boundary of the model domain (Blaas et al., 2011). The calibration aimed to obtain the same quality as the new Dutch Continental Shelf Model (DCSM-6), which is to become the future operational storm surge model for the North Sea (Zijl et al. 2009). The other benchmark was the vertical tide representation of the *Flyland* ZUNO Coarse model which has been the standard transport model for almost a decade within WL | Delft Hydraulics and Deltares (see e.g., Roelvink et al., 2001; Delhez et al., 2004; Los et al. 2004). In the validation, surge, salinity and temperature output parameters of the hydrodynamic model were also considered.

#### A.2 Model setup

#### A.2.1 Computational domains, grid refinement

In some earlier projects the grid of the ZUNO hydrodynamic model was optimized in the Rhine Region of Fresh Water influence (ROFI) where the dynamics are expected to be most sensitive to resolution. This optimization was motivated by earlier experience with the ZUNO Coarse model in the Rhine ROFI. The pilot study TnuITSM (Blaas et. al. 2008) but also many more sensitivity studies at Deltares (e.g. in particular De Goede and Van Maren, 2005) have indicated over the past years that the resolution of the ZUNO Coarse model in the coastal area of the Netherlands was too low to accurately resolve the hydrodynamic processes responsible for the distribution and residual transport of water masses and substances in the coastal zone. These studies are corroborated by the work of De Ruijter et al., (1997), Visser



(1993), De Kok (1997), Joordens et al. (2001) and Souza et al. (2009), De Boer et al. (2009), Pietrzak et al. (2010). These studies show that the barotropic dynamics in the coastal zone are determined by the interaction of tidal motion (the tidal excursion ~10 km for currents with average speed of 0.25 m/s) and bathymetric rectification of the tides and wind-driven currents. These interactions take place on a small scale and are influenced by the local resolution of bathymetric and hydrodynamic gradients (velocities) but eventually have a larger-scale effect. Moreover, these studies indicated that density-driven (baroclinic) circulation, tidal straining and frontal instabilities contribute very strongly to the larger-scale distribution and variability of water masses.

Gerben de Boer at TU Delft (De Boer, 2009) demonstrated the importance of the balance between straining, mixing, inertial and density driven motions determining the structure and fluxes of the riverine and marine water masses, also in relation distribution of SPM in the ROFI area. In addition Michel de Nijs at TU Delft (De Nijs et al. 2009, 2010) pointed to the importance of these baroclinic processes and interactions with the barotropic flow for the siltation and SPM content in the Rotterdam Waterway.

Since the straining processes are strongly influenced by tidal motions, the resolution of the tidal currents and the bathymetric and density gradients in the coastal area is again critical. A too low horizontal resolution, for example, will underestimate the straining effects and via vertical mixing also affect the vertical distributions. Hence a lower resolution will not only give a direct smoothing of the gradients but, due to the nonlinear dynamics, may have a much wider effect even downstream of the areas where the various interactions are dominant. Finally, apart from the tidal motions, also wind-driven up and downwelling appears to contribute to the complex patterns of residual transport and distribution of water masses (see Van Wiechen, 2011). The description of wind-driven up and downwelling is also sensitive to bathymetric resolution.

Figuur A.1 indicates the area of the Rhine ROFI according to De Boer, 2009 (consistent with Van Alphen et al. 1988 and Van der Giessen et al. 1996) in terms of maximum, average and minimum extent of stratification.



Figuur A.1 Delineation of the annual average, maximum, and minimum extent of stratification defining the Rhine ROFI (De Boer, 2009, after Van Alphen et al. 1988).

The grid refinement in the area of interest, the Rhine ROFI and *Voordelta* region, was achieved by domain decomposition (DD). The offshore areas, the open boundary and river discharge inputs of the model could still be based on the operational ZUNO Coarse application. By applying domain decomposition, the computational grid resolution can be optimized for the areas of interest, while keeping the overall grid size limited. In this way, the hydrodynamics are adequately represented in the model, and therefore suitable for modelling sediment transport in the region. A previous version of Zuno-DD was created by De Goede and Van Maren, (2005) with five sub-domains to reflect the different requirements of horizontal resolution in these areas. However, this version of Zuno-DD in practice proved to be highly demanding of computational resources and therefore never reached an operational status after its development and application in the Maasvlakte-2 Appropriate Assessment studies for which is has been developed (see also Van Ledden et al. 2005).

In order to keep the model configuration manageable, the current version of the ZUNO Domain Decomposition (Zuno-DD) model is based on three computational grids, referred to as the *coarse*, *intermediate* and *fine* grid, see Figuur A.2. This set-up was achieved by experimenting to see at what resolution the ROFI processes were adequately resolved, whilst

keeping computational time at a realistic value. Although sub domains decrease computational effort by distributing the simulations over different processors, more domains requires more communication between different domains and smaller time steps for all domains, hence more computational time (De Goede and Van Maren, 2005). Three sub domains were required to adequately capture the area of interest around the Rhine ROFI and Voordelta areas.



Figuur A.2 Overview of the coarse, intermediate and fine grids in blue, green and red respectively (left). Zoom near the Marsdiep area.

The horizontal layout of the coarse grid is identical to the original ZUNO coarse grid by Roelvink et al. (2001), with the exception that one row of grid cells has been removed at the northern boundary to exclude less accurate grid cells close to Denmark. The intermediate grid is refined in both horizontal directions by a factor of three with respect to the coarse grid. The fine grid is refined by a further factor of two with respect to the intermediate grid to ensure accurate simulation of sediment transport. The horizontal resolution ranges are shown in Tabel A.1.

| (global numbers in main part of domain, excluding harbour and river mouth areas etc.) |                 |                  |   |
|---|-----------------|------------------|---|
| grid  | min(Δx, Δy) [m] | max (Δx, Δy) [m] | Surface area refinement factor<br>with respect to ZUNO Coarse |
| Coarse  | 6 000, 5 000    | 20 000, 30 000   | 1:1   |
| Intermediate  | 1 000, 2 000    | 2 500, 3 000     | 1:9   |
| Fine  | 500, 1 000      | 1 000, 1 500     | 1:36  |

 Tabel A.1
 Ranges of horizontal resolution in the nested domains of the Delft3D FLOW model application Zuno-DD (global numbers in main part of domain, excluding harbour and river mouth areas etc.)

By this two-step grid refinement it is expected that the spatial and temporal structure of coastal zone and in particular the ROFI can be sufficiently well described without the computational burden of a full domain at the resolution of the fine grid. As stated above, the dynamics in the ROFI zone are determined by the interaction of tidal, wind and density-driven motions and bathymetric adjustments on small scales. As such they are influenced by the

local resolution of bathymetric and hydrodynamic gradients (velocities, densities etc.) but eventually have a larger-scale effect.

All grids feature the same twelve vertical sigma-layers with the spacing indicated in Table 2.2. The vertical spacing is identical to the ZUNO Coarse model and has been chosen such to better resolve the near-bed and near-surface vertical gradients.

| layer | relative thickness (%) |  |  |
|-------|------------------------|--|--|
| 1     | 4.0 (surface)          |  |  |
| 2     | 5.6                    |  |  |
| 3     | 7.8                    |  |  |
| 4     | 10.8                   |  |  |
| 5     | 10.9                   |  |  |
| 6     | 10.9                   |  |  |
| 7     | 10.9                   |  |  |
| 8     | 10.9                   |  |  |
| 9     | 10.8                   |  |  |
| 10    | 7.8                    |  |  |
| 11    | 5.6                    |  |  |
| 12    | 4.0 (bottom)           |  |  |
| Total | 100.0                  |  |  |

Tabel A.2 Relative thickness of the sigma layers of the Delft3D FLOW and WAQ model application Zuno-DD

#### A.2.2 Bathymetry updates

In the ZUNO models, a space-varying bathymetry (depth schematisation) is applied. The bathymetry is defined relative to the NAP reference level. The bathymetry of the new Zuno-DD has been updated with respect to the original ZUNO-Coarse model. This was motivated by the development of the new DCSM-6 model which was shown to gain considerably in quality by such an update (Zijl et al., 2008). Bathymetric data have been obtained from two sources.

- For the fine grid the bathymetry data originates from the most recent *Kusstrook Fijn* model which contains a compilation of surveys by the Dutch Hydrographic Service and Rijkswaterstaat, the most recent of which was carried out in 2005 (bathymetry version 6.3).
- For the intermediate and coarse grids the bathymetry data originate from an international compilation by the North West European Shelf Operational Oceanographic System (NOOS, <u>http://www.noos.cc</u>)

During the calibration stage of the Dutch Continental Shelf Model, DCSM-v6 (Zijl et al., 2009) it was found that a correction of 2.5 m extra depth on the NOOS bathymetry was necessary in order to have an accurate representation of tidal propagation along the Dutch coast. Closer inspection of the bathymetric data during the DCSM-6 development have not yet revealed the exact nature of this systematic error in the bathymetry but it is suspected that they stem from a datum definition. Since the data in the Dutch sector have been independently validated, it is concluded that the correction mainly applies to the areas away from the Dutch sector of the North Sea. Hence, a uniform correction of 2.5 m has been applied to the bathymetry of the coarse grid only.

The bathymetry of the intermediate grid, part of the NOOS dataset but based mostly on Dutch data, has not been corrected. Neither has the bathymetry of the fine grid been corrected, as it is based on the validated Dutch *Kuststrook* database by Rijkswaterstaat. In this way, the match between intermediate and fine bathymetry has been optimized and discontinuities at the transition between the intermediate and coarse grid are located away from the area of interest and mostly in deeper water. Note that this choice may have consequences for the performance of the model in the eastern Wadden Sea in particular. All depth values have been interpolated to the computational cell centres. Moreover, neighbouring cells at either side of internal grid boundaries have been manually set to the same depth, which is a requirement of the domain decomposition method.

### A.2.3 River discharges

River discharge time series are required at the mouth of major rivers in the domain (Figuur A.3). Historic data are available from a compilation by the UK Centre for Environment, Fisheries and Agriculture Science (CEFAS) covering the period 1984 to 2004 (ICG-EMO, 2007) and a compilation by WL | Delft Hydraulics covering 1996-2003 (Meuwese, 2007). Data for the Dutch rivers in these compilations originate from the DONAR database (www.waterbase.nl, http://live.waterbase.nl/). Discharge data for the Dutch, German and French rivers in these compilations were extended until 2007 whenever the original source of the data was available (Tabel A.3). Since no data were available for the UK rivers in 2007, annual mean data was derived from CEFAS and WL | Delft Hydraulics compilations. The annual data was computed from the National River FLOW Archive, from which daily flow rates were obtained and/or climatology's<sup>1</sup>. The data were extrapolated until 2007 by using the smoothed daily averages of discharges from the period 1996-2003, creating a running monthly average (Tabel A.4) (ICG-EMO, 2005; ICG-EMO, 2007, Blauw et al., 2006). It has been judged that the approximation applied to the discharges in the UK waters is not critical to the hydrodynamic simulation results in the Dutch coastal zone as the fraction of UK river water in the Dutch coastal zone is negligible with respect to that of the continental waters.

| <b>River/Discharge</b> | Exact location of data source  | Database/data source             |  |
|------------------------|--|----------------------------------|--|
| Noordzeekanaal         | IJmuiden Binnen  |                                  |  |
| Nieuwe Waterweg        | Maassluis  |                                  |  |
| Haringvliet            | Haringvlietsluizen Binnen  | www.waterbase .nl                |  |
| IJsselmeer             | Den Oever, Kornwerderzand  |                                  |  |
| Scheldt                | Schaar v. Ouden Doel (W.Schelde)   |                                  |  |
| Weser                  | Daily flow data at gauge station<br>Intschede. (without 19% drainage<br>correction). | www.bafg.de                      |  |
| Elbe                   | Daily flow data at gauge station Neu<br>Darchau, (without 21% drainage<br>correction | www.arge-elbe.de                 |  |
| Ems                    | Daily flow data at gauge station<br>Herbrum.(without 30% drainage<br>correction).    | www.nlwkn.niedersachsen.de       |  |
| Seine                  |  | seine-aval.crihan.fr/web: seine- |  |

 Tabel A.3
 Discharge sources that were extended with actual data to 2007

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> see http://www.nwl.ac.uk/ih/nrfa/station\_summaries/op/EA-South1.html

|  | aval |
|--|------|
|  | avai |

Tabel A.4 Discharge sources that were extended with climatology data.

| River/Discharge | Exact location of data source | Database/data source         |
|-----------------|-------------------------------|------------------------------|
| Humber          |                               |                              |
| Thames          |                               |                              |
| Tyne            |                               | Extrapolated data from CEFAS |
| Tees            | Amalgamation of catchment     | derived from                 |
| Firth of Forth  |                               | ml                           |
| Wash            |                               |                              |
| Solent          |                               |                              |

The compiled data are stored as NetCDF files on the Deltares data server <a href="https://repos.deltares.nl/repos/Eco-Model">https://repos.deltares.nl/repos/Eco-Model</a> Inventory/trunk/EMI/Building\_Blocks/Data/NetCDF <a href="data/RiverLoads/">data/RiverLoads/</a>



Figuur A.3 Location of the river discharges in the ZUNO domain (from Meuwese, 2007)

#### A.2.4 Lateral boundary conditions

The model has an open boundary in the Channel ( $\sim 2^{\circ}$  W) and an open northern boundary ('Atlantic'  $\sim 57^{\circ}$ N). It has been assumed that the water levels at these boundaries can be represented by the astronomical tide. The phase and amplitude of the 50 tidal constituents



have been obtained from results obtained with the Dutch DCSM-v5 (Robaczewska et al., 1997). In order to calibrate the vertical tide at the main Dutch stations the phases of the dominant tidal constituents ( $M_2$ ,  $S_2$ ) at the boundaries have been adjusted, see Section 3.3.

### A.2.5 Meteorological forcing

Meteorological forcing is required in the momentum equations and for the temperature model in Delft3D-FLOW. Space varying wind velocity (10 m height) and air pressure at mean sea level have been imposed for the momentum equations. Cloud cover, air temperature (2 m height) and relative humidity fields have been imposed for the temperature model. All data are obtained from the KNMI HIRLAM model (Figuur A.4) (<u>http://hirlam.org, www.knmi.nl</u> 22 km grid resolution version). For year 2007 and later, relative humidity data are not directly available and have been computed from air temperature and dew point temperature (at 2 m above mean sea level).

$$RH = \frac{p_w(T_d)}{p_w(T_a)} \cdot 100\%$$
(2.1)

where,  $T_a$  is dry bulb air temperature in °C,  $T_d$  is dew-point temperature in °C, *RH* is relative humidity in %; the saturation vapour pressure  $p_w$  as function of temperature is given according to the empirical expression (see also <u>http://www.weerschip.nl/formules.html</u>)

$$p_w(T) = 6.112 \cdot e^{17.62T/(243.12+T)}$$
(2.2)

which is a first-order approximation to the equation by Buck (1981).

In addition, all HIRLAM data that are sensitive to the transition between sea and land has been accounted for. Of those variables, data in meteorological model grid cells that partly cover land has been replaced by extrapolated adjacent marine data.



Figuur A.4 Part of the applied KNMI HIRLAM model grid in the area of the Zuno-DD domain. Horizontal resolution is 22 km.

### A.3 References

- van Alphen, J.S.L.J., W.P.M. de Ruijter, & J.C. Borst, 1988. Outflow and three-dimensional spreading of Rhine river water in the Netherlands coastal zone. Pages 70–92. In J. Dronkers & W. van Leussen, (eds.), *Physical processes in Estuaries.* Berlin: Springer-Verlag.
- Blaas M., M.A. Eleveld, G.Y. El Serafy, H.J. van der Woerd , T. van Kessel, G.J .de Boer, 2008. *TnuITSM: Integration of remote sensing and modelling of total suspended matter in the Dutch coastal zone*. Deltares Report 53618WL(Z4030), 66 pp.
- Blauw, A.N., K.E. van de Wolfshaar and H. Meuwese, 2006, Transboundary nutrient transports in the North Sea; a model study. WL/*Delft Hydraulics Report Z4188*, December 2006.
- De Boer, G.J., 2009, On the interaction between tides and stratification in the Rhine Region of Freshwater Influence. *PhD Thesis, TU Delft*, The Netherlands
- De Boer, G.J., J.D. Pietrzak, and J.C. Winterwerp, 2009. SST observations of upwelling induced by tidal straining in the Rhine ROFI. *Continental Shelf Research*, Vol. 29, Iss. 1, 15 Jan. 2009, Pages 263-277, doi:10.1016/j.csr.2007.06.011
- Buck, A. L. 1981, New equations for computing vapor pressure and enhancement factor, J. Appl. Meteorol. 20: 1527–1532
- Delhez, E. J. M., P. Damm, E. de Goede, J. de Kok, F. Dumas, H. Gerritsen, J. E. Jones, J. Ozer, T. Pohlmann, P. S. Rasch, M. Skogen and R. Proctor, 2004. Variability of shelf-seas hydrodynamic models: lessons from the NOMADS2 project. *Journal of Marine Systems*, 45(1-2), 39-53.

- van der Giessen, A., W.P.M. de Ruijter, & J.C.Borst, 1990. Three-dimensional current structure in the Dutch coastal zone. Netherlands *Journal of Sea Research*, 25 1/2, 45–55.
- De Goede, E.D. D.S. van Maren, 2005. Impacts of Maasvlakte 2 on the Wadden Sea and North Sea coastal zone, track 1: Detailed modelling research, part I: Hydrodynamics WL | Delft Hydraulics, Netherlands Institute for Fisheries Research (RIVO), Royal Haskoning Report WL | Delft Hydraulics, (Nov. 2005). Port of Rotterdam & National Institute for Coastal and Marine Management /RIKZ Z3945.20
- ICG-EMO 2005, Ospar Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic Ospar Workshop on Eutrophication Modelling Hamburg (Germany): 26 – 28 September 2005, Workshop report.
- ICG-EMO, 2007. OSPAR Workshop on Eutrophication Modelling, 10-12 September 2007, Workshop Report, 69 pages.
- Joordens, J.C.A., A.J. Souza, and A. Visser, 2001. The influence of tidal straining and wind on suspended matter and phytoplankton distribution in the Rhine outflow region. *Cont. Shelf Res.* 21, 301-325 (2001).
- De Kok, J.M. 1997. Baroclinic eddy formation in a Rhine plume model. *Journal of Marine Systems*, 12, 1-4, 35-52
- van Ledden M. et al., 2005. Effects of Maasvlakte 2 on the Wadden Sea and the North Sea coastal zone: Track 1 Detailed modelling research. Final report Appropriate Assessment Wadden Sea, Report Royal Haskoning Nijmegen, 18 November
- Lesser G.R., J.A. Roelvink, J. A.T. M. van Kester and G. S.Stelling, 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering* 51(8-9), pp. 883-915.
- Los, F.J., S. Tatman, A.W. Minns, 2004. Flyland A Future Airport in the North Sea? An Integrated Modelling Approach for Marine Ecology, *6th International Conference on Hydroinformatics* - Liong, Phoon & Babovic (eds) World Scientific 2004, ISBN 981-238-787-0.
- Meuwese, H., 2007, Nutrient loads on the North Sea, Feeding the North Sea, MSc. Thesis Delft University of Technology, WL | Delft Hydraulics, May 2007.
- De Nijs, M.A.J., J.C. Winterwerp, J.D. Pietrzak, 2009. On harbour siltation in the fresh-salt water mixing region. *Cont. Shelf Res.* Vol. 29(1), Jan. 2009, pp 175-193. *Physics of Estuaries and Coastal Seas:* Papers from the PECS 2006 Conference doi:10.1016/j.csr.2008.01.019
- De Nijs, M.A.J., J.C. Winterwerp, J.D. Pietrzak, 2010. The Effects of the Internal Flow Structure on SPM Entrapment in the Rotterdam Waterway. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 2357–2380. doi: 10.1175/2010JPO4233.1
- Pietrzak, J.D., G.J. de Boer & M.A. Eleveld, 2010, Mechanisms controlling the intra-annual mesoscale variability of SST and SPM in the southern North Sea, *Continental Shelf Research* 31(6), doi:10.1016/j.csr.2010.12.014
- Roelvink, J.A., T. van der Kaaij, and B.G. Ruessink, 2001. *Calibration and verification of large-scale 2D/3D flow models phase 1.* WL | Delft Hydraulics Report
- De Ruijter, W.P.M., A.W. Visser, W.G. Bos, 1997. The Rhine outfow, A prototypical pulsed plume in a high energy shallow sea. *Journal of Marine Systems*, 12, 263-276
- Souza, A.J., N. R. Fisher, J. H. Simpson, and M. J. Howarth, 2009. Effects of tidal straining on the semidiurnal cycle of dissipation in the Rhine region of freshwater influence: Comparison of model and measurements, J. Geophys. Res. 113, 1-10 (2009).
- Visser, M., 1993, On the transport of fine sediment in the Netherlands Coastal Zone, PhD Thesis Utrecht University.
- Van Wiechen, J.J.J., 2011, *Modelling the wind-driven motions in the Rhine ROFI.* MSc thesis TU Delft in collaboration with Port of Rotterdam and Deltares. TU Delft, March 2011
- Zijl, F. R. Plieger, D. Vatvani, M. Verlaan, H. Gerritsen, D. Twigt, 2009, *DCSM v6 model setup and calibration of tidal propagation*. Deltares Report Z4632, April 2009.

## **B** Bijlage Waddenzeemodel

### B.1 Het Waddenzeemodel

Ter ondersteuning van de slibmodellering zijn een aantal berekeningen uitgevoerd met het Waddenzeemodel. Dit model heeft een hogere horizontale resolutie dan het Zuno-DD model, zie Figuur B.1. Hierdoor kan de lokale bathymetrie in meer detail benaderd worden, zie Figuur B.2. Het model heeft 10 verticale lagen. De hydraulische en transport randvoorwaarden zijn gegenereerd met het Zuno-DD model.



Figuur B.1 Rooster van het Waddenzeemodel ter ondersteuning van de slibmodellering.



Figuur B.2 Bathymetrie in het Waddenzee model nabij het Marsdiep.

Figuur B.3 presenteert de berekende en gemeten waterstanden bij Harlingen. De resultaten zijn vergelijkbaar met het Zuno-DD model. Figuur B.4 geeft het verloop van de saliniteit weer bij Harlingen. De berekende saliniteit komt beter overeen met de metingen dan het Zuno-DD model.



Figuur B.3 Waterstand bij Harlingen



Figuur B.4 Saliniteit bij Harlingen, Waddenzee model (zwart), Zuno-DD (blauw) en metingen (rood).

Tabel B.1 geeft de karakteristieken van het debiet door het Marsdiep berekend met het Waddenzeemodel. Het faseverschil M2 en M4 is ligt dichter bij de metingen dan bij het Zuno-DD model, maar de afwijking ten opzichte van de metingen van Buijsman en Ridderinkhof (2007) blijft relatief groot. Het restdebiet in het Waddenzeemodel is kleiner dan het Zuno-DD model, maar valt binnen de variatie in de metingen van Buijsman en Ridderinkhof (2007).

| Tabel B.1 Getij karakter debiet Marsdiep                    |               |                    |               |               |  |
|---|---------------|--------------------|---------------|---------------|--|
|   |               | Buijsman<br>(2007) | Zuno-<br>DD   | Waddenzee     |  |
| M2 amplitude in m <sup>3</sup> /s<br>M2 fase                |               | 65750<br>187°      | 62353<br>183° | 65193<br>181° |  |
| $(K_1+O_1)/(M_2+S_2)$                                       |               | 0.20               | 0.14          | 0.14          |  |
| Faseverschil M2 Waterstand Den He                           | elder en      | 40°                | 41°           | 36°           |  |
| debiet Marsdiep   |               |                    |               |               |  |
| Faseverschil S2 Waterstand Den He                           | elder en      | 10°                | 39°           | 34°           |  |
| debiet Marsdiep   |               |                    |               |               |  |
| Faseverschil N2 Waterstand Den He                           | elder en      | 39°                | 42°           | 38°           |  |
| debiet Marsdiep   |               |                    |               |               |  |
| Faseverschil 01 Waterstand Den He                           | elder en      | 62°                | 65°           | 63°           |  |
| debiet Marsdiep   |               |                    |               |               |  |
| Faseverschil K1 Waterstand Den He                           | elder en      | 58°                | 67°           | 61°           |  |
| debiet Marsdiep   |               |                    |               |               |  |
| Faseverschil M2 en M4: $2\Phi_2$ - $\Phi_4$                 | 73°           | 37°                | 45°           |               |  |
| Getij gemiddelde debiet A <sub>0</sub> in m <sup>3</sup> /s | (-5510,+3910) | -1007              | -480          |               |  |

### B.2 References

Buijsman, M. C., and H. Ridderinkhof (2007), Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet, Journal of Sea Research, 57(4), 237-256, doi:10.1016/j.seares.2006.11.004.

### C The buffer bed model

#### C.1 The buffer bed model

The buffer parameterisation is a bed module that includes seasonal buffering of fine sediments. This means that fine sediments are stored in the seabed during calm conditions and released from the seabed during stormy conditions (Van Kessel et al., 2011). This model contains two bed layers which interact in a specific way. The thin fluffy layer forms during slack tide and is easily resuspended by tidal currents. This layer accounts for rapid resuspension and settling that in reality is thought to occur in fluffy patches on the sea floor. The total sediment mass in this layer is small. The sandy buffer layer, on the other hand, can store fines for longer times and releases SPM only during highly dynamic conditions, such as spring tides or storms. Detrainment of silt from the matrix of sand occurs only beyond critical mobilization conditions for the sand grains, whereas slow entrainment occurs during subcritical conditions. The time-average sediment fluxes between the buffer layer and the water column are limited, whereas the storage capacity of silt in the sea bed may be large, depending on the assumed mixing depth. All in all, the overlying water column is directly interacting with both layers but with different rates, representing the different physical process that play a role. Figuur C.1 illustrates the exchanges between both bottom layers and the water column for the buffer parameterisation.





Deposition towards layer  $S_1$  and  $S_2$  is determined by settling velocity  $V_{Sed}$ , and a factor  $\alpha$ «1 that distributes the flux to the fluff and buffer layer. A critical shear stress for sedimentation is not applied:

$$D_{1,IM_{i}} = (1 - \alpha_{IM_{i}})V_{Sed,IM_{i}}C_{IM_{i}}$$
(C.1a)

$$D_{2,IM_i} = \alpha_{IM_i} V_{Sed,IM_i} C_{IM_i}$$
(C.1b)

with  $C_{IMi}$  the concentration of fraction inorganic matter  $IM_i$ , and  $\alpha$  dependent on the fraction class. Deposition of fines in the buffer layer (eq. C.1b) will shut down if the silt fraction reaches a user-defined saturation rate.

Resuspension  $E_1$  of each fraction out of the fluff layer is proportional to the excess shear stress times a grain size dependent first-order rate ( $V_{\text{Res}}$ ) until a certain saturation concentration in the bed beyond which a uniform zero-order rate ( $Z_{\text{Res}}$ ) applies. The coarse and fine fractions have a different critical shear stress for resuspension ( $\tau_{cr}$ ). The zero-order formulations are based on Partheniades (1962), the first order expression is based on Van Kessel et al. (2011). The process is implemented for all three sediment fractions  $IM_i$ .

For the resuspension flux  $E_2$  from the buffer layer, a Van Rijn (1993) type of pickup formulation is applied, with Van Rijn's empirical power of the excess stress of 1.5. The fines are only detrained from this layer when the shear stress exceeds the mobilization threshold (Shields stress,  $\tau_{Sh}$ ) for the sand amongst which the fines are stored. In summary, the erosion fluxes for supercritical conditions read:

$$E_{1,IM_{i}} = \min\left(Z_{\text{Res},IM_{i}}, V_{\text{Res},IM_{i}}M_{i,1}\right)\left(\frac{\tau}{\tau_{\text{cr},S_{1}IM_{i}}} - 1\right)$$
(C.2a)  
$$E_{2,IM_{i}} = F_{\text{ResPUp}}M_{i,2}\left(\frac{\tau}{\tau_{\text{Sh}}} - 1\right)^{1.5}$$
(C.2b)

In this formulation, the following definitions hold:

- $E_{j,IM_i}$  Resuspension flux of SPM fraction  $IM_i$  from layer  $S_j$ [g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]
- *τ* Bottom shear stress [Pa]
- $\tau_{cr,S,IM_i}$  Critical shear stress for silt resuspension fraction *i* from fluff layer S<sub>1</sub> [Pa]
- $\tau_{\rm Sh}$  Critical Shields stress for sand mobilization in buffer layer S<sub>2</sub>. [Pa]
- $Z_{\text{Res.}IM_1}$  Zero-order resuspension rate from layer S<sub>1</sub> [g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>]
- $V_{\text{Res,IM}}$  First order resuspension rate from layer S<sub>1</sub> [d<sup>-1</sup>]
- $F_{\text{ResPUp}}$  Van Rijn (1993) pickup factor from buffer layer [-]
- $M_{i,i}$  Mass of sediment fraction *i* in layer *j* per surface area [g m<sup>-2</sup>]

Since the fluff consists of pure mud, the mass for layer  $S_1$  is proportional to the stored mass of fraction *i* per unit bed area for each computational segment. For layer  $S_2$  the mass depends on the mud fraction with respect to the sand:  $M_{i,2} = f_{IM_iS_2} d_2 (1-\text{Por}_{S_2}) \rho_{sand}$ , with thickness  $d_2$  and

 $f_{\rm IM,S_{\gamma}}$  the fines fraction with respect to total bed,

 $Por_{S_{2}}$  the volumetric porosity of the bed,

 $\rho_{\rm sand}$  the mass density of sand.

The reader is referred to Appendix A for detailed overview of all coefficient settings.

A first order erosion rate in principle implies that net SPM deposition may result in an increase of Mi in eq. (C.2) until an equilibrium mass per unit area is reached for which erosion equals deposition. In areas with high silt supply this equilibrium will be reached at high bed concentrations with correspondingly high exchange fluxes. The Haringvliet area is such an

area with high supply but no unlimited exchange fluxes (see e.g. Stam, 2002, Winterwerp, 2006). In order to avoid unrealistically high fluxes in such environments, the erosion term in eq. (C.2) switches from first order to zero order erosion at Mi=ZRes/VRes [gm-2]. The rationale behind this transition is that for small values of Mi the exposed surface area of silt may scale linearly with Mi, as long as the sea bed is not yet completely covered with mud. However, beyond a certain value of Mi the seabed will be completely covered with fines and even more fines will not enhance the erosion rate anymore.

#### C.2 References

- Partheniades, E., 1962. A study of erosion and deposition of cohesive soils in salt water. Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, USA. 182 p. 72
- Van Kessel, T., J.C. Winterwerp, B. van Prooijen, M. van Ledden, W.G. Borst, 2011. Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. *Cont. Shelf Res.* 31(10) S124–S134, doi:10.1016/j.csr.2010.04.008,
- Van Rijn, L.C.,1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Seas and Oceans*. Aqua Publications, The Netherlands.
- Stam, J.M.T., M. Groen, and L. Walburg, 2002. *Haringvlietmonding: reconstructie van een afsluiting*, Report RIKZ/2002.028 (in Dutch)
- Winterwerp, J.C., 2006, Fluxes of fine sediment along the Dutch coast and the impact of Maasvlakte 2, A system description, WL | Delft Hydraulics Report, Z4046.10 October, 2006
Dit is een uitgave van

۲

## Rijkswaterstaat

Kijk voor meer informatie op www.rijkswaterstaat.nl of bel 0800 - 8002 (ma t/m zo 06.00 - 22.30 uur, gratis)

september 2012 | NZ0912RE210

۲