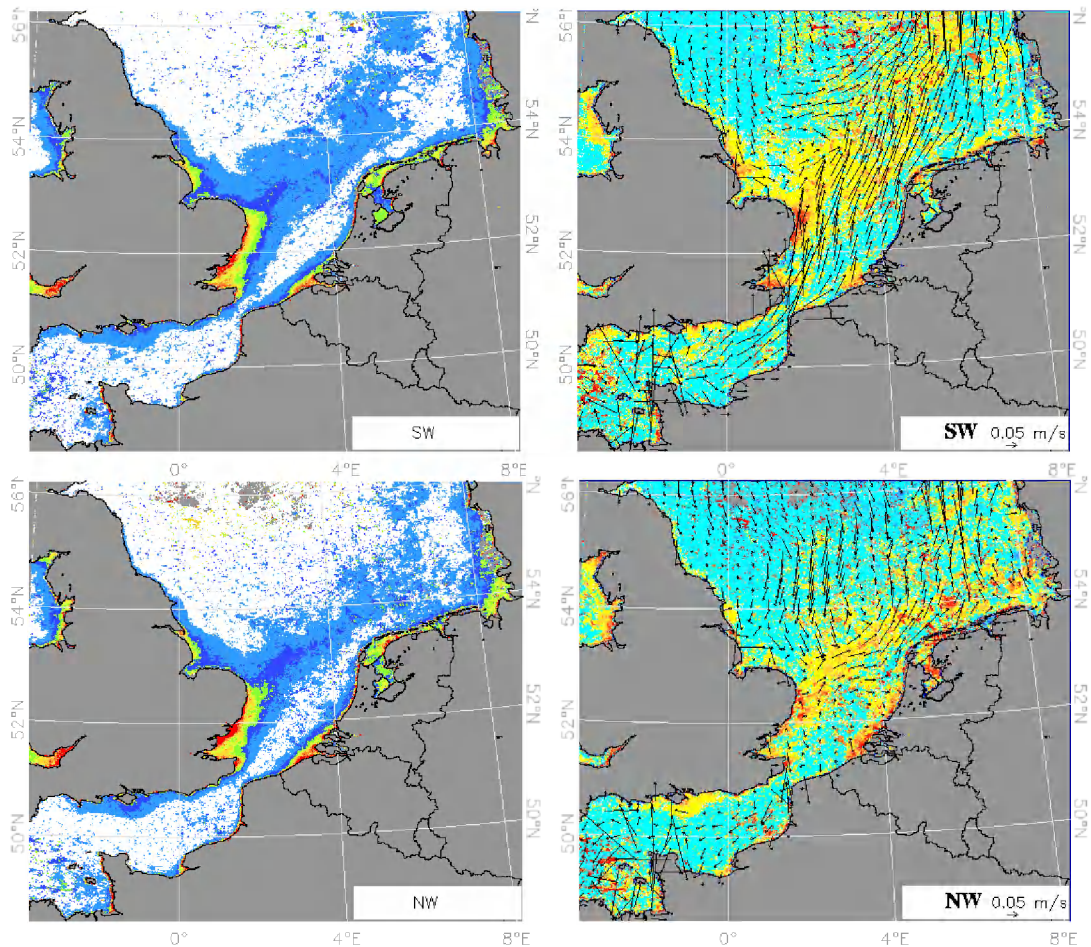




MONitoring en MODellering van het cohesieve sedimenttransport en evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperatie (MOMO)



Activiteitsrapport (1 juli 2012 -31 december 2012)

Michael Fettweis, Matthias Baeye, Frederic Francken, Byung Joon Lee, Bouchra Nechad, Dries Van den Eynde, Vera Van Lancker

MOMO/6/MF/201301/NL/AR/2

Inhoudstafel

1.	Inleiding	3
1.1.	Voorwerp van deze opdracht	3
1.2.	Algemene doelstellingen	3
1.3.	Onderzoek januari 2012 – december 2013	4
1.4.	Publicaties (januari 2012 – december 2013)	6
2.	Modellering van de flocculatie van cohesieve sedimenten met multimodale vlokgrootteverdelingen: Implementatie in COHERENS	8
2.1.	Beschrijving van het sedimenttransportmodel	9
2.2.	Beschrijving van het 'Two Class Flocculation model'	11
2.3.	Discretisatie en implementatie van TCPBE in COHERENS	11
2.4.	Handleiding van TCPBE in COHERENS	12
2.5.	Validatie van TCPBE-COHERENS	13
2.6.	Conclusies en aanbevelingen	14
3.	Invloed van weer en klimaat op de geografische variabiliteit van SPM concentratie	16
3.1.	Data en methoden	18
3.1.1.	Weertypes en classificatie van data	18
3.1.2.	Remote sensing data	19
3.1.3.	In situ data	21
3.1.4.	Numerieke model data	22
3.2.	Resultaten en bespreking	26
3.2.1.	SPM concentratiepatronen	26
3.2.2.	Beperkingen van satellietbeelden	28
3.2.3.	Weers- en klimaatsinvloeden op SPM concentratie	30
3.3.	Conclusies	32
4.	Referenties	33

Appendix 1: Bijdrage "4th Int. Geologica Belgica Meeting", 11-14 September, Brussel

Appendix 2: Bijdrage "Particles in Europe", 17-19 October, Barcelona

1. Inleiding

1.1. Voorwerp van deze opdracht

Het MOMO-project (MONitoring en MOdelling van het cohesieve sedimenttransport en de evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperaties) maakt deel uit van de algemene en permanente verplichtingen van monitoring en evaluatie van de effecten van alle menselijke activiteiten op het mariene ecosysteem waaraan België gebonden is overeenkomstig het Verdrag inzake de bescherming van het mariene milieu van de noordoostelijke Atlantische Oceaan (1992, OSPAR-Verdrag). De OSPAR Commissie heeft de objectieven van haar huidig "Joint Assessment and Monitoring Programme" (JAMP) gedefinieerd tot 2010 met de publicatie van een holistisch Quality Status Report Noordzee en waarvoor de federale overheid en de gewesten technische en wetenschappelijke bijdragen moeten afleveren ten laste van hun eigen middelen.

De menselijke activiteit die hier in het bijzonder wordt beoogd, is het storten in zee van baggerspecie waarvoor OSPAR een uitzondering heeft gemaakt op de algemene regel "alle stortingen in zee zijn verboden" (zie OSPAR-Verdrag, Bijlage II over de voorkoming en uitschakeling van verontreiniging door storting of verbranding). Het algemene doel van de opdracht is het bestuderen van de cohesieve sedimenten op het Belgisch Continentaal Plat (BCP) en dit met behulp van zowel numerieke modellen als het uitvoeren van metingen. De combinatie van monitoring en modellering zal gegevens kunnen aanleveren over de transportprocessen van deze fijne fractie en is daarom fundamenteel bij het beantwoorden van vragen over de samenstelling, de oorsprong en het verblijf ervan op het BCP, de veranderingen in de karakteristieken van dit sediment ten gevolge van de bagger- en stortoperaties, de effecten van de natuurlijke variabiliteit, de impact op het mariene ecosysteem in het bijzonder door de wijziging van habitats, de schatting van de netto input van gevaarlijke stoffen op het mariene milieu en de mogelijkheden om deze laatste twee te beperken.

Een samenvatting van de resultaten uit de voorbije vergunningsperioden kan gevonden worden in het "Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciéstortingen" (Lauwaert et al. 2004; 2006; 2008; 2009, 2011) dat uitgevoerd werd conform art. 10 van het K.B. van 12 maart 2000 ter definiëring van de procedure voor machtiging van het storten in de Noordzee van bepaalde stoffen en materialen.

1.2. Algemene doelstellingen

Het onderzoek uitgevoerd in het MOMO project kadert in de algemene doelstellingen om de baggerwerken op het BCP en in de kusthavens te verminderen en om een gedetailleerd inzicht te verwerven van de fysische processen die plaatsvinden in het mariene kader waarbinnen deze baggerwerken worden uitgevoerd. Dit impliceert enerzijds beleids-ondersteunend onderzoek naar de vermindering van de sedimentatie op de baggerplaatsen en het evalueren van alternatieve stortmethoden. Anderzijds is onderzoek naar knelpunten voor het plannen en schatten van de effecten van de baggerwerken vereist. Dit is specifiek gericht op het dynamische gedrag van silb in de waterkolom en op de bodem en zal uitgevoerd worden met behulp van modellen en in situ metingen. De specifieke acties die binnen dit onderzoek uitgevoerd worden om de algemene doelstellingen in te vullen zijn:

1. Streven naar een efficiënter stortbeleid door:

- optimalisatie van de stortlocaties. Gebaseerd op onderzoek uitgevoerd in de voorbije jaren (zie vorige syntheserapporten) zal een terreinproef worden uitgevoerd om de efficiëntie van een stortlocatie ten westen van Zeebrugge te bepalen;
- gebruik te maken van een operationeel stortmodel. Dit model zal geïntegreerd worden in de binnen BMM beschikbare operationele modellen. Het model zal gebruikt worden om in functie van de voorspelde fysische (wind, stroming, golven, sedimenttransport, recirculatie), economische (afstand, grootte baggerschip) en ecologische aspecten op korte termijn een keuze te kunnen maken tussen de beschikbare stortlocaties. Hiervoor zal binnen de huidige periode het slibtransportmodel gevalideerd worden op de geografische variabiliteit van de turbiditeitszones en de flocculatie van het slib.

2. Continue monitoring van het fysisch-sedimentologische milieu waarbinnen de baggerwerken worden uitgevoerd en aanpassing van de monitoring aan de nog op te stellen targets voor het bereiken van de goede milieutoestand (GES), zoals gedefinieerd zal worden binnen MSFD;

3. Uitbouw en optimalisatie van het numerieke modelinstrumentarium, ter ondersteuning en verfijning van acties 1 en 2.

1.3. Onderzoek januari 2012 – december 2013

Taak 1: In situ metingen en data analyse

Taak 1.1 Langdurige en getijcyclus metingen

Tijdens 4 meetcampagnes per jaar met de R/V Belgica zullen in totaal 6 13-uursmetingen uitgevoerd worden. De metingen zullen plaatsvinden in het kustgebied van het BCP. Tijdens de metingen zullen tijdsreeksen en verticale profielen worden verzameld van de stroming, de concentratie aan en de korrelgrootteverdeling van het suspensiemateriaal, de temperatuur en de saliniteit. De optische metingen (transmissometer, OBS) zullen gecalibreerd worden met de opgemeten hoeveelheid materie in suspensie (gravimetrische bepalingen na filtratie) om te komen tot concentraties. Naast de totale hoeveelheid aan suspensiemateriaal (SPM) wordt ook de concentratie aan POC/PON, chlorophyl (Chl-a, Chl-b) en phaeofytine (a, b) bepaald. Stalen van suspensiemateriaal zullen genomen worden met de centrifuge om de samenstelling ervan te bepalen.

Sinds eind 2009 wordt er te MOW1 continue metingen uitgevoerd met behulp van een tripode. Met dit frame worden stromingen, slibconcentratie, korrelgrootteverdeling van het suspensiemateriaal, saliniteit, temperatuur, waterdiepte en zeebodemaltrimetrie gemeten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van 2 tripodes. Na ongeveer 1 maand wordt de verankerde tripode voor onderhoud aan wal gebracht en wordt de tweede op de meetlocatie verankerd. De technologische mogelijkheden voor het online doorsturen van deze data wordt verder onderzocht. Ook zal in de komende jaren een meetboei (OBS, CTD) geïnstalleerd worden op dezelfde locatie.

Taak 1.2: Verwerking en interpretatie van metingen

De metingen vergaard tijdens de 13-uursmetingen aan boord van de Belgica en met de tripode worden verwerkt en geïnterpreteerd. Hiervoor werd in het verleden reeds heel wat software ontwikkeld (getijgemiddelde waarden, valsnelheid,..). Naast rapportage van de data zal aandacht geschonken worden aan:

- Langdurige SPM concentratievariaties: variabiliteit en trends.
- Bodemstalen en suspensiestalen (centrifuge) zullen worden geanalyseerd om de

- korrelgrootteverdeling, het kalkgehalte en de organische fractie te bepalen.
- Identificatie van hooggeconcentreerde slib suspensies (HCMS): hoe, waar en wanneer.
- Verticale profielen van SPM concentratie en vloggrootte.

Taak 2: Onderzoek en monitoring alternatieve stortstrategie onderhoudsbaggerwerk voorhaven Zeebrugge

De BMM is auteur van de voorbereidende studies voor de terreinproef en zal de terreinproef mee opvolgen. BMM zal verantwoordelijk zijn voor het uitvoeren van de langdurige frame metingen en de statistische verwerking van de resultaten (Taak 2.1).

De resultaten van de metingen zullen gebruikt worden bij de analyse van de efficiëntie van de baggerproef (Taak 2.3). Door BMM zullen ook met behulp van het Automatic Underway Monitoring System (AUMS) op het onderzoeksschip Belgica opnames gemaakt worden van de sedimentconcentratie binnen de haven (Taak 2.2). Deze gegevens zullen ter beschikking gesteld worden voor verdere verwerking. BMM zal deel uitmaken van de stuurgroep.

Taak 2.1: Uitvoeren van lange termijn metingen in de omgeving van de haven van Zeebrugge voor het opvolgen van de terreinproef, en het bestuderen van de interne sedimentdynamiek in de haven

Voor dit deel van de opdracht is de BMM verantwoordelijk voor het uitvoeren van de metingen en het aanleveren van de gevalideerde data voor verdere verwerking in de factual data rapportering en omzetting naar het standaardformaat. Het betreft twee meetframes, een ter hoogte van de meetpaal MOW 1 (als achtergrondwaarde, zie Taak 1.1) en een ander ter hoogte van de ingang van de haven van Zeebrugge. Deze meetframes dienen afdoend de saliniteit, stromingen, sedimentconcentratie en korrelgrootteverdeling te meten.

Taak 2.2: Beschrijving van de omgevingscondities

Gedurende de meetperiode van de langdurige metingen dienen ook de verschillende externe factoren die een invloed kunnen hebben op de interne slibdynamiek in de haven nauwkeurig bijgehouden worden en dit gedurende dezelfde periode als de metingen in taak 2.1.

Taak 2.3: Analyse efficiëntie baggerproef

Na afloop van de baggerproef dient de efficiëntie van de uitgevoerde proef geschat te worden. Hiervoor dient als eerste een TO toestand gedefinieerd te worden, waarbij op basis van de binnen Taak 2.1 en Taak 2.2 verzamelde data een inschatting kan gemaakt worden van de mogelijke events die tijdens de proef hebben plaatsgevonden, en hun invloed op de resultaten van de baggerproef.

Er zal een statistische benadering van de efficiëntie van de baggerproef uitgevoerd worden, waarbij nagegaan zal worden in hoeverre de tijdens de baggerproef gemeten waarden op de twee frames afwijken van de waarden die gemeten werden buiten de stortproef.

Taak 3: Oplossingen voor knelpunten

Taak 3.1: Geografische variabiliteit van turbiditeitszones

De lange tijdseries van oppervlakte SPM concentratie afkomstig van MODIS satelliet (vanaf 2002) en tripode (vanaf 11/2009 continue) hebben een uitgesproken seizoenaal signaal. Evenwel worden ook niet harmonische en kortere variaties waargenomen, die niet gecorreleerd zijn met seizoenen. Het doel van deze taak is om deze variaties te onderzoeken en te linken aan typische meteorologische, klimatologische en getijcondities

en dit zowel in functie van de tijd als in een groter geografisch gebied (zuidelijke Noordzee). De bevindingen hieruit laten toe om de verschillende processen te identificeren en te herkennen die SPM concentratie beïnvloeden voor de Belgische kust. Dit is nodig om bijvoorbeeld de lange termijn evolutie van het systeem te begrijpen, de effecten van klimaatsverandering te voorspellen en/of de beste stortlocatie in functie van weersomstandigheden te kiezen.

Taak 3.2: Flocculatie

De correlatie tussen biomassa (zoals o.a. POC en chlorophyl) en vlok grootte en vorm wordt dikwijls aangehaald in de literatuur, maar dit bleek sterk plaatsgebonden te zijn en dikwijls gebaseerd op korte meetperioden. Wij willen daarom de lange tijdsreeks te MOW1 systematisch en kwantitatief analyseren in combinatie met satelliet en andere in situ data om een meer algemeen en fundamenteel verband tussen biomassa en vlok grootte te kunnen opstellen. Meer specifiek zijn de doelstellingen:

- 1) de invloed van algenbloei op de flocculatie dynamica te bestuderen door gebruik te maken van in situ en remote sensing data van SPM concentratie, partikelgrootteverdeling en gehalte aan organisch materiaal in het SPM;
- 2) het effect van de samenstelling van het SPM (mineralogisch en organisch) op flocculatie te bepalen. Hiervoor werden eerste contacten gelegd met Prof N Vandenberghe (KUL) voor de mineralogische analyse;
- 3) een flocculatiemodel te ontwikkelen dat rekening kan houden met verschillende vlok groottes en de hierboven aangehaalde effecten.

Taak 3.3: Validatie van het slibtransportmodel

Het tijdens de voorbije jaren verbeterde en aangepaste slibtransportmodel zal worden gevalideerd met behulp van de langdurige meetreeksen en de satellietbeelden. Hierbij zal dezelfde methode als in Baeye et al. (2011) en zoals in taak 3.1 worden gebruikt om de modelresultaten te groeperen en te klasseren volgens windrichting, weertype en getij. Het voordeel van deze werkwijze is dat niet zozeer gekeken wordt of de correlatie tussen meting en modelresultaat in één of meerder punt goed is, maar dat globaal nagegaan wordt of het model de SPM dynamica op het BCP goed kan reproduceren.

1.4. Publicaties (januari 2012 – december 2013)

Hieronder is een lijst met rapporten, publicaties en deelnamen aan workshops en conferenties waar resultaten en data uit het MOMO project: werden voorgesteld

Activiteits-, Meet- en Syntheserapporten

Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Francken F, Nechad B, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2013. MOMO activiteitsrapport (1 juli 2012 - 31 december 2012). BMM-rapport MOMO/6/MF/201301/NL/AR/2, 37pp + app.

Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2012. MOMO activiteitsrapport (1 januari 2012 - 30 juni 2012). BMM-rapport MOMO/6/MF/201207/NL/AR/1, 27pp + app

Conferenties/Workshops:

Fettweis M, Lee BJ, Toorman E, Francken F, Van den Eynde D. 2012. Flocculation in a eutrophic coastal turbidity maximum zone. Particles in Europe, 17-19 October, Barcelona. (appendix 2)

Fettweis M, Baeye M, Francken F, Houziaux J-S, Lee BJ, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2012. Recent anoxic cohesive sediment deposits in the Belgian near-shore area: sedimentological context and anthropogenic impact. 4th Int.Geologica Belgica Meeting, 11-14 September, Brussel. (appendix 1)

- Martens C, Fettweis M. 2012. Optimalisatie van de efficiëntie van de baggerstortplaatsen - sedimentbeheer in de Noordzee. 9^{de} Waterforum: De verdoken schakel in het waterbeleid. Sediment samen aanpakken biedt vele kansen. 1 Juni, Brussel.
- Fettweis M, Monbaliu J, Nechad B, Baeye M, Van den Eynde D. 2012. Weather and climate related spatial variability of high turbidity areas in the North Sea and the English Channel. Int. Liège Colloquium on Ocean Dynamics, 7-11 Mei, Liège.
- Fettweis M, Vanhellefont Q., Francken F. 2012. Very high SPM concentrations in the southern Bight of the North Sea detected from space. VLIZ Young Scientists' Day, 24 Februari, Brugge.
- Lee BJ, Fettweis M, Toorman EA. 2012. Heterogeneous flocculation combining the biological and mineralogical populations in a marine and coastal environment: Literature study for a conceptual model. VLIZ Young Scientists' Day, 24 Februari, Brugge.
- Van den Eynde D, Fettweis M. 2012. Towards an operational sediment transport model for optimizing dredging works in the Belgian Coastal Zone. VLIZ Young Scientists' Day, 24 Februari, Brugge.
- Van Hoey G, Derweduwen J, Devriese L, Fettweis M, Hostens K, Martens C, Robbens J, Van Lancker V. 2012. Dredged material disposal: Does it substantially affect the ecosystem? VLIZ Young Scientists' Day, 24 Februari, Brugge.

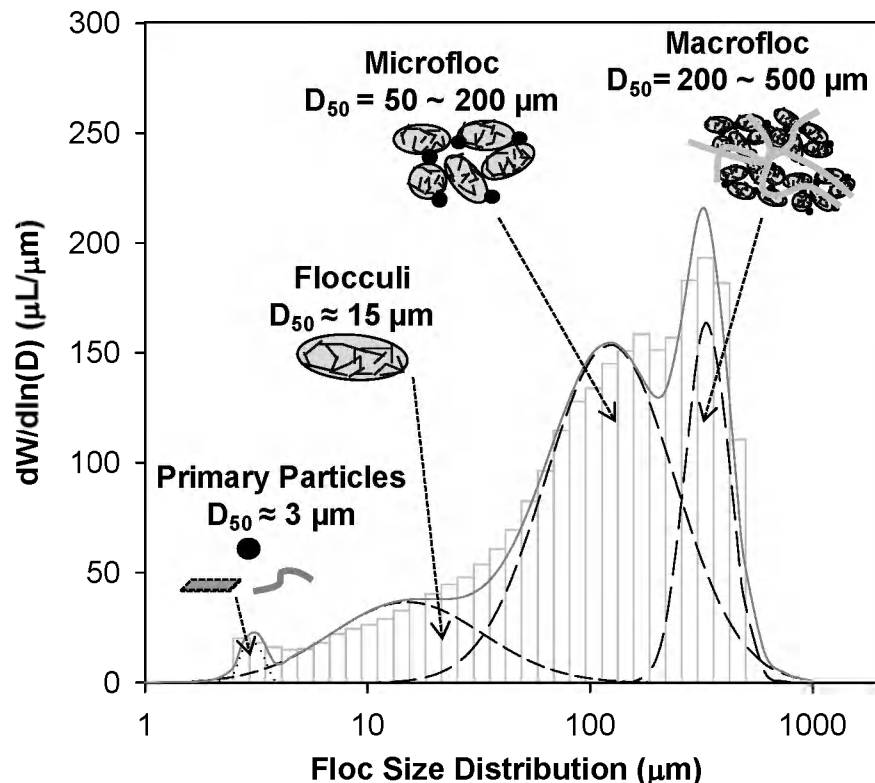
Publicaties (tijdschriften, boeken)

- Baeye M, Fettweis M, Legrand S, Dupont Y, Van Lancker V. 2012. Mine burial in the seabed of high-turbidity area - Findings of a first experiment. *Continental Shelf Research* 43, 107–119. doi:10.1016/j.csr.2012.05.009
- Fettweis M, Monbaliu J, Nechad B, Baeye M, Van den Eynde D. Weather and climate related spatial variability of high turbidity areas in the North Sea and the English Channel. *Methods in Oceanography*. doi:10.1016/j.mio.2012.11.001 (in press)
- Lee BJ, Fettweis M, Toorman E, Molz F. 2012. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research* 117, C03014. doi:10.1029/2011JC007552

2. Modelling van de flocculatie van cohesieve sedimenten met multimodale vloggrootteverdelingen: Implementatie in COHERENS

Fijnkorrelige cohesieve sedimenten zijn tijdens hun transport onderworpen aan tal van fysische, scheikundige en biologische processen. De fysische processen bestaan onder meer uit advectie, dispersie, sedimentatie, resuspensie en flocculatie. De scheikundige processen omvatten chemische reacties met het zoet-, brak- of zoutwater en reacties die plaatsvinden op de partikels zelf. De biologische processen zijn gerelateerd aan de aanwezigheid van micro-organismen, planten, algen en dieren. Van deze fysische, chemische en biologische processen heeft flocculatie de belangrijkste invloed op grootte, valsnelheid en afzetting van cohesieve sedimenten in een mariene en kustnabije omgeving (Manning et al. 2006; Fettweis 2008).

Flocculatie combineert processen die de grootte van de deeltjes verandert tengevolge van aggregatie en het uiteenvallen van vlokken in een turbulente stromingsomgeving. Dit heeft een rechtstreeks gevolg op de valsnelheid (van Leussen 1994; Winterwerp & van Kesteren 2004). Tijdens lagere turbulente stroming wordt aggregatie bevorderd en neemt de grootte en de valsnelheid van de partikels toe. Tijdens hoge turbulente stroming treedt het omgekeerde op, vlokken vallen uiteen en de valsnelheid neemt af. Flocculatie in een mariene en kustnabije omgeving doet een multimodale partikelgrootteverdeling (PGV) ontstaan die uit een vierdelige structuur bestaat, met name primaire deeltjes, flocculi, microvlokken en macrovlokken (Fettweis et al. 2012; Lee et al. 2012b), zie figuur 2.1.



Figuur 2.1: Een schematische voorstelling van de vierledige multimodale partikelgrootteverdeling van suspensiemateriaal uit de Belgische kustzone (Lee et al. 2012b).

Valsnelheid is een belangrijke parameter in sedimenttransportmodellering. Om dit nauwkeurige te kunnen doen zijn flocculatiemodellen nodig. In de literatuur worden vele numerieke flocculatiemodellen voor cohesieve sedimenten in mariene en kustnabije omgevingen beschreven (Winterwerp 1998, Winterwerp et al. 2006; Xu et al. 2008; Maggi 2009; Maerz et al. 2011; Verney et al. 2011). Sommige modellen beschrijven de fysische processen op een realistische manier, terwijl anderen de processen op een meer empirische wijze proberen te benaderen. Bijvoorbeeld, het gebruik van een ‘multi-class population balance equation’ (MCPBE) model is een realistische manier om flocculatie te simuleren (multimodale flocculatie). Deze methode gebruikt vele vloggroottegroepen en vergt een koppeling van een groot aantal differentiaalvergelijkingen (Verney et al 2011; Xu et al. 2008). Een ‘single-class PBE’ (SCPBE) model, met enkel één vloggroottegroep, is mathematisch eenvoudig en robust, maar is niet in staat om de flocculatie van multimodale partikelgrootteverdelingen nauwkeurig te simuleren. Een goed compromis tussen realisme en efficiëntie is het recent ontwikkelde ‘two-class PBE’ (TCPBE) model dat gebruik maakt van twee discrete groepen (bimodale flocculatie), met name flocculi en vlokken (Lee et al. 2011).

Het flocculatiemodel moet gekoppeld worden met een hydrodynamisch en een sedimenttransportmodel. De schuifspanning bepaalt de flocculatiedynamica en aldus ook de valsnelheid en afzetting van cohesieve sedimenten. Hydrodynamica bepaalt anderzijds ook het sedimenttransport via advectie en dispersie van de sedimentdeeltjes en de erosie of resuspensie van bodemsedimenten. Damping van de turbulentie tengevolge van de vorming van hooggeconcentreerde sliedlagen geeft een mogelijke koppeling weer van het sedimenttransportmodel naar de hydrodynamische processen.

Een 1-dimensionaal verticaal (1-DV) TCPBE model, dat de Navier-Stokes vergelijking met $k-\varepsilon$ turbulentiemodel, de sediment massabalansvergelijking en het TCPBE model combineert, werd geïmplementeerd in de sedimenttransportmodule van COHERENS. Dit model werd gebruikt om de turbulente stroming, het sedimenttransport en de flocculatiekinetica te simuleren. In dit hoofdstuk zullen resultaten getoond worden over het gedrag van multimodale PGV van fijnkorrelige cohesieve sedimenten tijdens een getijcyclus. Verder zal het model geëvalueerd en gevalideerd worden met betrekking tot zijn capaciteit om multimodale flocculatie en het cohesive sedimenttransport te simuleren.

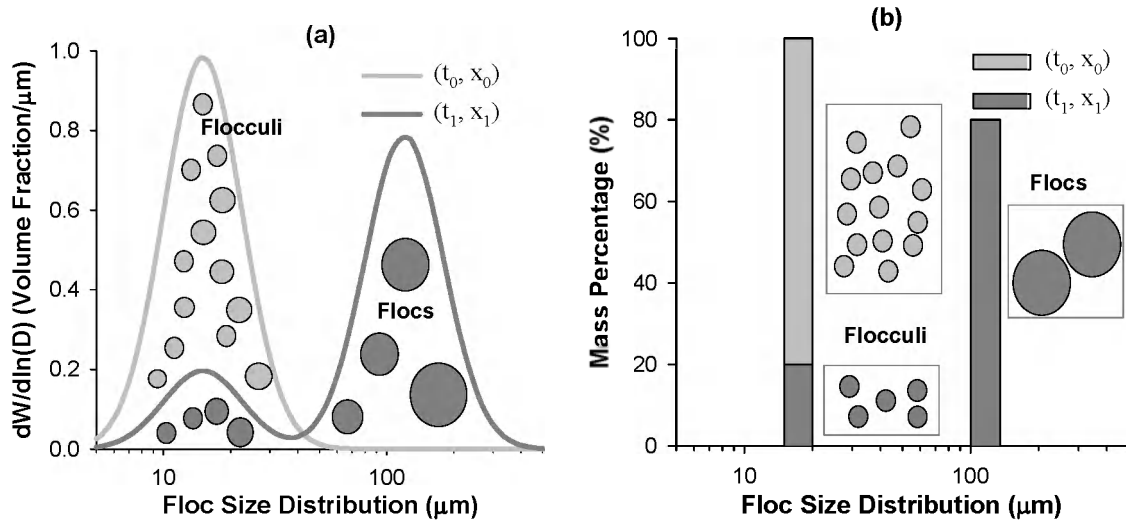
2.1. Beschrijving van het sedimenttransportmodel

De constante korrelgrootte van de flocculi samen met de variërende korrelgrootte van de vlokken benaderen een in tijd en ruimte variabele bimodale PGV (figuur 3.2) (Lee et al. 2011). De sediment massabalansvergelijking, die werd gebruikt om het 1D verticaal flocculi- en vloktransport te simuleren in een waterkolom, is:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right) - w_{s,i} \frac{\partial N_i}{\partial z} + (A_i + B_i) \quad (2.1)$$

waarbij $N_i = N_i(z, t)$ de aantallen-concentratie (number concentration) voorstelt, de subscript i verwijst naar de flocculi en vlokken in suspensie (N_p and N_f) en de flocculi gebonden in een vlok ($N_{pf} = N_c \times N_f$), N_c is een vloggrootte index die het aantal flocculi gebonden in een vlok weergeeft, C'_μ is een stabiliteitsconstante, $(A_i + B_i)$ is de groei en vervalsnelheid van N_i door aggregatie en het uiteenbreken van vlokken, en $w_{s,i}$ is de valsnelheid van de flocculi en vlokken. Om de in tijd en ruimte veranderende variabelen, zijnde de aantallen-concentratie aan flocculi (N_p) en vlokken (N_f) en de grootte van de vlokken (D_f) te kunnen berekenen, moet de sediment massabalansvergelijking uit drie differentiaalvergelijkingen bestaan: de aantallen-concentratie aan flocculi (dN_p/dt) en vlokken (dN_f/dt) in suspensie en de aantallen-concentratie aan flocculi gebonden in

vlokken (dN_{PF}/dt). De termen aan de rechterkant van vergelijking (2.2) stellen respectievelijk de door turbulentie veroorzaakte dispersie, de bezinking tengevolge van zwaartekracht en de flocculatiekinetica weer. Het TCPBE model simuleert de bimodale flocculatie en maakt deel uit van de flocculatiekinetica ($A_i + B_i$), zie §2.2.



Figuur 2.2: Schematische afbeelding van (a) een continue partikelgrootteverdeling en (b) de discrete groepen van flocculi en vlokken voor en na flocculatie, van (t_0, x_0) naar (t_1, x_1) . In (b) wordt ook de flocculatiestrategie van het TCPBE voorgesteld.

De Stokes vergelijking, die ook steunt op de fractale theorie voor de geometrie en vorm van de vlokken en de correctie factor (Φ_{HS}) voor hindered settling in een hooggeconcentreerde benthische suspensie laag (Winterwerp & van Kesteren 2004), werd gebruikt om de valsnelheid ($w_{s,i}$) (vgl. 2.2 en 2.3) te berekenen. Deze valsnelheidsvergelijking werd in COHERENS aangepast om rekening te houden met andere processen:

$$w_{s,i} = \Phi_{HS} \left(\frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p \right) \quad (2.2)$$

$$\Phi_{HS} = \frac{(1 - \phi_s)(1 - \phi_p)}{1 + 2.5\phi} \quad (2.3)$$

met ρ_s de dichtheid van de deeltjes, ρ_w de dichtheid van water, g de zwaartekracht, μ de viscositeit, Φ_{HS} de correctiefactor voor hindered settling, Φ_p de volume concentratie aan deeltjes (m^3 deeltjes / m^3), Φ de volume concentratie aan vlokken (m^3 vlokken / m^3), $\phi_s = \min\{1, \Phi\}$, en D_p primaire partikelgrootte. De valsnelheid voor vlokken met een fractale dimensie wordt als volgt geschreven (Winterwerp, 1998):

$$w_s = \frac{a}{18b} \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\mu} g D_p^{3-nf} \frac{D_f^{nf-1}}{1 + 0.15 Re^{0.687}} \quad (2.4)$$

met Re het vlok Reynolds getalnummer, g is de gravitationale acceleratie en a en b vormfactoren.

De bovenrand voor de aantallen-concentratie van flocculi in suspensie, vlokken in suspensie en flocculi gebonden in vlokken (N_p , N_f and N_{PF}) is gesloten, terwijl de bodemrand open is om rekening te kunnen houden met erosie en afzetting volgens vergelijkingen (2.5) en (2.6) (Ariathurai 1974; Le Hir et al. 2011):

$$E_p = \frac{M}{(\pi/6)D_p^3\rho_p} (\tau/\tau_c - 1) \quad \text{if } \tau > \tau_c \quad (2.5)$$

$$D_i = w_{s,i} N_i \quad (2.6)$$

De subscript i verwijst naar de flocculi en vlokken in suspensie en de flocculi gebonden in een vlokken (P , F of PF). M is een empirische erosieparameter, τ de bodemschuifspanning, τ_c de kritische schuifspanning voor erosie. In de noemer onder M wordt de massa-concentratie omgezet in aantallen-concentratie. In het 1-DV TCPBE model zijn zowel flocculi als vlokken onderworpen aan afzetting, maar enkel flocculi kunnen worden geërodeerd. Erosie van flocculi (E_p) gebeurt enkel indien er fijnkorrelige sedimenten op de bodem aanwezig zijn en indien de bodemschuifspanning groter is dan een kritische schuifspanning ($\tau > \tau_c$).

2.2. Beschrijving van het 'Two Class Flocculation model'

Het 'two-class PBE' model omvat de in grootte constante flocculi als bouwstenen en de in grootte variabele vlokken om bimodale flocculatie te simuleren (figuur 2.2). Het aantal flocculi gebonden in een vlok (N_C) wordt gebruikt als een index voor vloggrootte in de TCPBE. Deze nieuwe grootte index is initieel gelijk aan één flocculi ($N_C = 1$). Het TCPBE model bestaat uit drie gekoppelde differentiaalvergelijkingen die verandering in de tijd beschrijven van: (1) de aantallen-concentratie aan flocculi (dN_P/dt), (2) de aantallen-concentratie aan vlokken (dN_F/dt) en (3) de aantallen-concentratie aan flocculi gebonden in vlokken (dN_{PF}/dt , met $N_{PF} = N_C \times N_F$) (vgl. 2.7). Deze vergelijkingen worden ingevoegd in de groei en vervalsnelheid ($A_i + B_i$) uit vergelijking (2.1) (Lee et al. 2011):

$$\begin{aligned} (A_P + B_P) &= \frac{dN_P}{dt} = -\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) - \alpha \beta_{PF} N_P N_F + f N_C a_F N_F \\ (A_F + B_F) &= \frac{dN_F}{dt} = +\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{1}{N_C - 1} \right) - \frac{1}{2} \alpha \beta_{FF} N_F N_F + a_F N_F \\ (A_{PF} + B_{PF}) &= \frac{dN_{PF}}{dt} = +\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) + \alpha \beta_{PF} N_P N_F - f N_C a_F N_F \end{aligned} \quad (2.7)$$

met f de fractie flocculi ontstaan door uiteenvallen van vlokken, α de botsings-efficiëntiefactor (collision efficiency), β de botsingsfrequentiefactor (collision frequency) en a de kinetische constante voor het uiteenvallen van vlokken (breakage kinetic constant). De botsingsefficiëntiefactor (α) wordt over het algemeen gebruikt als toepassings-specifieke calibratieparameter. De botsingsfrequentiefactor (β) wordt uitgedrukt als een theoretische functie die gecorreleerd is met Brownse beweging, turbulente schuifspanning en differentiële bezinking. In tabel 2.1 worden de aggregatie- en uiteenvall- (breakage) kernels voor de botsingsfrequentiefactor (β) en de kinetische constante voor uiteenvallen van vlokken (a) bijeengebracht (Burd & Jackson 2001; Lee et al. 2011). De aggregatiekernel bestaat uit de theoretische functie van Brownse beweging, de differentiële bezinking en de turbulente schuifspanning, terwijl de uiteenvalkernel enkel bestaat uit de schuifspanningsafhankelijke functie voor de kinetika van het uiteenvallen van vlokken.

2.3. Discretisatie en implementatie van TCPBE in COHERENS

De eindige differentiemethode werd toegepast om de TCPBE op te lossen, waarbij een expliciete discretisatie in de tijd werd gebruikt, zie vergelijking (2.8). Een preliminaire numerieke test heeft aangetoond dat een expliciet en een impliciet schema bijna gelijke resultaten opleveren bij een kleine tijdstap (hier 12 seconden). Het expliciete schema is dus gelijkwaardig aan het impliciete, maar dan met een geringere computertijd. Merk op dat sedimentatie een snel proces is waarbij binnen enkele minuten een rekencel kan

'doorkruist' worden, terwijl flocculatie een relatief traag proces is dat uren kan duren vooraleer evenwicht (of steady state) bereikt is. Dus, zolang een numeriek model een korte tijdstap nodig heeft om sedimentatie te berekenen, is een expliciet schema voldoende voor flocculatie.

Tabel 2.1: Aggregatie en uiteenva (breakage) kernels in het 1-DV TCPBE (Lee et al. 2011).

Aggregatie Kernel	Breakage Kernel
$\beta_{BR,ij} = \frac{2kT}{3\mu} \left(\frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_j} \right) (D_i + D_j)$ $\beta_{SH,ij} = \frac{1}{6} (D_i + D_j)^3 G$ $\beta_{DS,ij} = 2\pi D_i^2 w_{s,i} - w_{s,j} $ <p> D_i = diameter van partikelgrootteklasse i β_{BR} = botsingsfrequentiefactor Brownse beweging β_{SH} = botsingsfrequentiefactor turbulente schuifspanning β_{DS} = botsingsfrequentiefactor differentiele bezinking k = Boltzmann's constante T = absolute temperatuur (K) </p>	$a_i = E_b G \left(\frac{D_i - D_p}{D_p} \right)^p \left(\frac{\mu G}{F_y / D_i^2} \right)^q$ <p> p, q = empirische parameter μ = absolute viscositeit G = turbulent schuifspanning (s^{-1}) w_i = valsnelheid per klasse i E_b = uiteenva efficiëntie factor F_y = Yield strength van vlokken (Pa) </p>

$$\begin{aligned}
 N_p^{n+1} &= N_p^n + \Delta t \left(-\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_p^n N_p^n \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) - \alpha \beta_{PF} N_p^n N_p^n + f N_C^n a_F N_p^n \right) \\
 N_F^{n+1} &= N_F^n + \Delta t \left(\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_p^n N_p^n \left(\frac{1}{N_C - 1} \right) - \frac{1}{2} \alpha \beta_{FF} N_F^n N_F^n + a_F N_F^n \right) \\
 N_{PF}^{n+1} &= N_{PF}^n + \Delta t \left(\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_p^n N_p^n \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) + \alpha \beta_{PF} N_p^n N_F^n - f N_C^n \alpha_F N_F^n \right)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

In de subroutine "**twoclass_flocculation**" worden vergelijkingen (2.8) opgelost. Het werd geïmplementeerd in de subroutine "**sediment_equations**", waar het de subroutine "**settling_velocity**" vervangt. In de subroutine "**twoclass_flocculation**" worden de volume concentraties ($C_{V,p}$ en $C_{V,pf}$; globale variabelen) eerst omgezet naar aantallen-concentraties (N_p en N_{pf} ; locale variabelen). Echter, de aantallen-concentratie van vlokken (N_f) heeft hetzelfde formaat in heel het programma en geeft informatie over de vloggrootte ($D_f = f(N_f, N_{pf})$). Nadien wordt de gediscretiseerde TCPBE (vgl. 2.8) ge-update met de aantallen-concentraties (N_p , N_f en N_{pf}), de grootte en de valsnelheid van de vlokken (D_f en $w_{s,f}$). De aantallen-concentraties (N_p en N_{pf}) worden uiteindelijk terug geconverteerd naar volumeconcentraties ($C_{V,p}$ en $C_{V,pf}$) om in het hoofdprogramma te kunnen worden gebruikt.

2.4. Handleiding van TCPBE in COHERENS

De X- en Y-componenten van de drukgradiënt, die de gebruikers kunnen vinden en veranderen in de subroutine "**usrdef_1dsur_data**" van de subroutine "**usrdef_model**", zijn de belangrijkste aandrijvende krachten voor de stroming. De hier voorgestelde simulatie gebruikt een cyclische drukgradiëntsfunctie om de vloed- en ebstroming te simuleren (vgl. 2.9). Deze methode werd ontworpen om gemeten data van wrijvingssnelheid toe te passen; merk op dat er ook andere drukgradiëntformuleringen bestaan (Burchard 1999; Luyten et al. 2002).

$$\frac{dP}{dx} = \frac{U_*^2}{h} = \frac{(0.035 - 0.015 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi / (12.4) \cdot t[\text{hr}] + 1.5))^2}{h} \quad (2.9)$$

In het TCPBE model worden heel wat parameters gebruikt (tabel 2.2) maar niet alle parameters zijn even belangrijk. Er wordt aangeraden om simulaties met verschillende waarden voor de flocculatiekineticaparameters uit te voeren zodat het model gecalibreerd en gevalideerd wordt. Er kan bijvoorbeeld geopteerd worden om enkel de botsings- en de uiteenval-efficiëntiefactor (α en E_b) en de fractale dimensie (n_f) te laten variëren (aangeduid in tabel 2.2). Alle parameters van het TCPBE model kunnen gevonden en veranderd worden in de nieuwe subroutine "twoclass_flocculation". Het is de bedoeling dat deze parameters in de toekomst opgenomen zullen worden in de user-defined subroutine "usrdef_sediment". Flocculatie, erosie en afzetting controleren het cohesieve sedimenttransport. Er dient dus de nodige aandacht besteed te worden om een optimale keuze te maken voor de erosieconstante (M) en de kritische erosieschuifspanning (τ_c) in de Ariathurai-Partheniades vergelijking (Ariathurai 1974). Deze parameters kunnen aangepast worden in de subroutine "usrdef_sediment".

Tabel 2.2: Parameter en initiële condities van het 1-DV TCPBE.

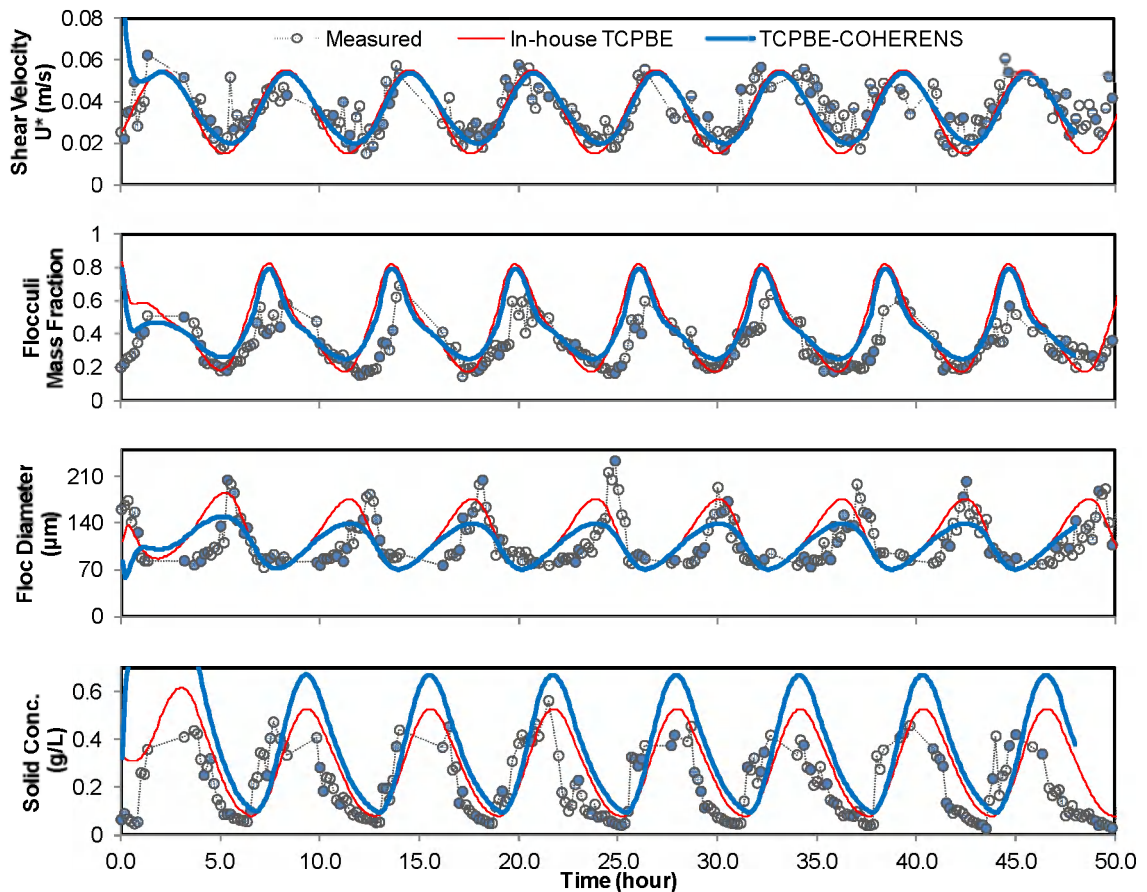
Kinetische Parameter en Physicochemische Constanten			
	Symbol	Default	Beschrijving
Flocculatiekinetica	α	0.1	botsingsefficiëntiefactor [-]
	E_b	2.0e-5	breakage efficiency factor [$s^{0.5}/m$]
	n_f	2.2	fractale dimensie van vlokken [-]
	f	1.0	fractie van flocculi uit uiteenvallen van vlokken [-]
	F_y	1.0e-10	yield strength van vlokken [Pa]
	$^a p$	1.0	empirische parameter voor uiteenvalkinetica
Erosie en depositie	M	1.0e-3	erosie constante [$kg/m^2/s$]
	τ_c	1.5	kritische erosieschuifspanning [Pa]
Sediment- en water-eigenschappen	ρ_p	1800	densiteit van flocculi [kg/m^3]
	ρ_w	1050	densiteit van zeewater [kg/m^3]
	D_p	15.0	diameter van flocculi [μm]
Beginvoorwaarde (t = 0)			
Sedimentconcentratie	$C_{V,P}$	16.02e-5	volume concentratie flocculi [m^3/m^3]
	$C_{n,F}$	2.015e+8	aantallen-concentratie vlokken [m^3/m^3]
	$C_{V,PF}$	1.78e-5	aantallen-concentratie flocculi in vlokken [m^3/m^3]

^a p werd als 1.0 ingesteld in plaats van 0.5 zoals in Winterwerp & van Kesteren (2004), om de breedte van de partikelgrootteverdelingen te beperken.

2.5. Validatie van TCPBE-COHERENS

Flocculatie en het transport van cohesieve sedimenten werden gesimuleerd in 1DV tijdens een getijcyclus. Het TCPBE-COHERENS model en een 'in-house' TCPBE versie werden getest en de resultaten met elkaar vergeleken en vergeleken met tripode metingen te Blankenberge, zie figuur 2.3. We kunnen zien dat beide modellen een gelijkaardige op- en neerwaartse trend vertonen, maar dat de vloggrootte in TCPBE-COHERENS kleiner en de sedimentconcentratie omstreeks kentering hoger is dan in het 'in-house' TCPBE model. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat in beide modellen verschillende turbulentiemodellen gebruikt worden, met name het $k-\epsilon$ model in het COHERENS model t.o.v. een analytische vergelijking in het 'in house' TCPBE model.

De verticale profielen van TCPBE-COHERENS en 'in-house' TCPBE zijn zeer gelijkaardig, zie figuur 2.4. Verschillen kunnen gevonden worden omstreeks maximale stroming en kentering. Tijdens maximale stroming (b.v. $t = 27$ uur) heeft het TCPBE-COHERENS model een lagere eddy viscositeit, en een hogere SPM concentratie dan het 'in-house' TCPBE model. Omstreeks kentering (b.v. $t = 30$ uur) zien we dat TCPBE-COHERENS kleinere vlok grootte heeft dan het 'in-house' TCPBE model. Ondanks de verschillen, kunnen we concluderen dat TCPBE-COHERENS in staat is om gelijkaardige resultaten te geven dan het 'in-house' TCPBE model.



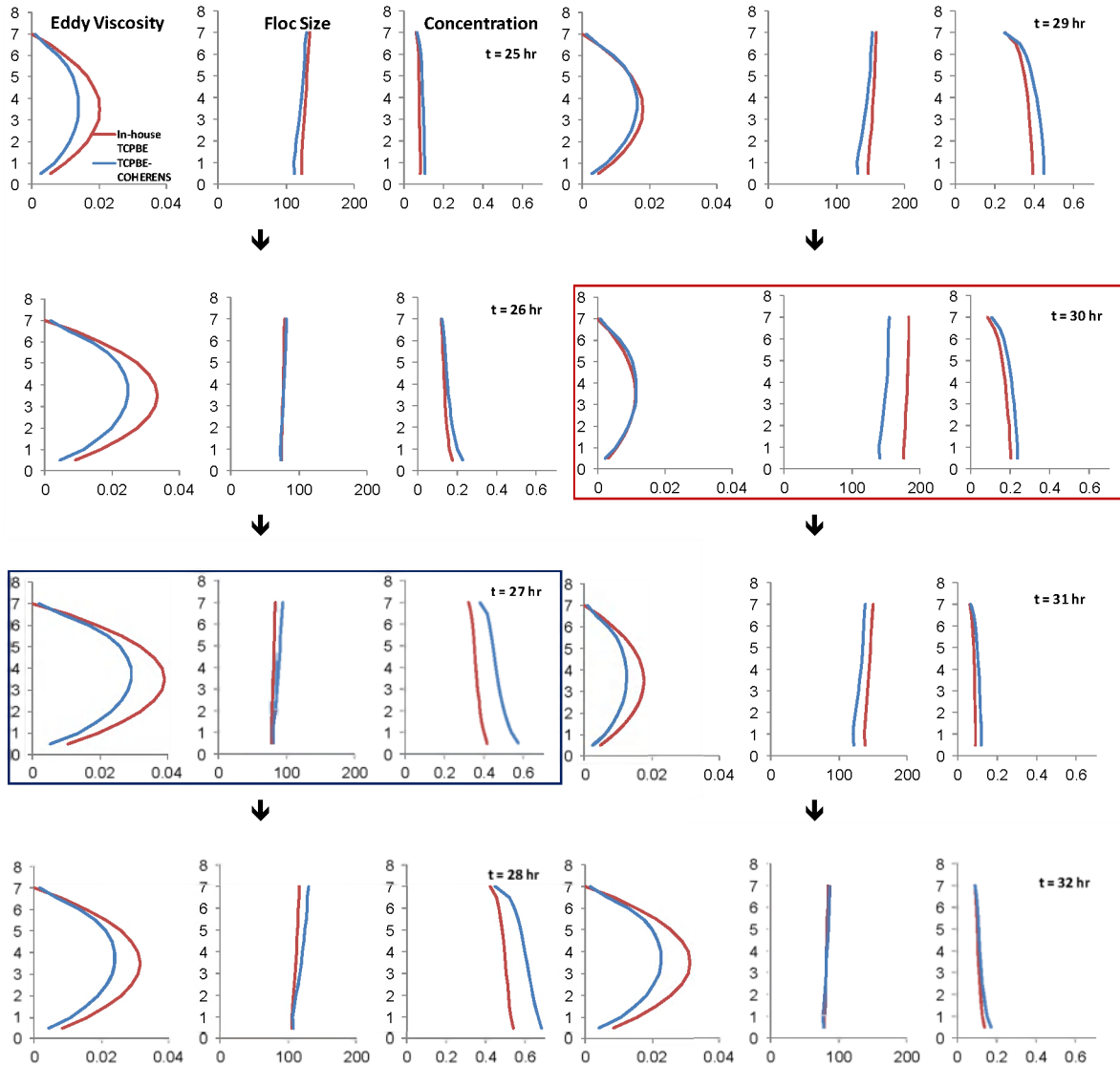
Figuur 2.3: Tijdserie van enkele modelvariabelen, vergelijking tussen TCPBE-Coherens, de 'in-house' versie ervan en in situ metingen te Blankenberge.

2.6. Conclusies en aanbevelingen

In situ metingen van vlok grootte in de Belgische kustzone duiden op een multimodale PGV opgebouwd uit primaire deeltjes, flocculi, microvlokken en macrovlokken. Deze vier modi kunnen verder vereenvoudigd worden tot twee discrete groepen, met name flocculi en vlokken. Hieruit ontstond het idee om een TCPBE model te ontwikkelen. Het 1-DV TCPBE model, dat gecombineerd werd met de Navier-Stokes vergelijkingen, een $k-\epsilon$ turbulentiemodel en een sediment massabalansvergelijking, heeft bewezen in staat te zijn om multimodale flocculatie en cohesief sedimenttransport te simuleren in een getijomgeving. In het bijzonder kon aangetoond worden dat het gebruik van twee discrete partikelgrootten (flocculi en vlokken) in het 1-DV TCPBE een goede benadering is om multimodale PGV te modelleren en te simuleren. Deze werkwijze is veelbelovend om het 1-DV TCPBE te gebruiken in reële toepassingen, en dit vooral omdat het eenvoudig is en

toch in staat is om multimodale flocculatie te simuleren.

Het gecombineerde TCPBE-COHERENS model is in staat om flocculatie en sedimenttransport te simuleren en dit tijdens een getijcyclus. Het model volgt, anders dan empirische flocculatiemodellen, een mechanistisch benadering en heeft een theoretische basis over flocculatie. Het TCPBE-COHERENS model laat aldus toe om op een meer systematische manier studies uit te voeren over flocculatie van cohesive sedimenten.



Figuur 2.4: Verticale profielen van enkele modelvariabele, vergelijking tussen TCPBE-Coherens en de 'in-house' versie ervan.

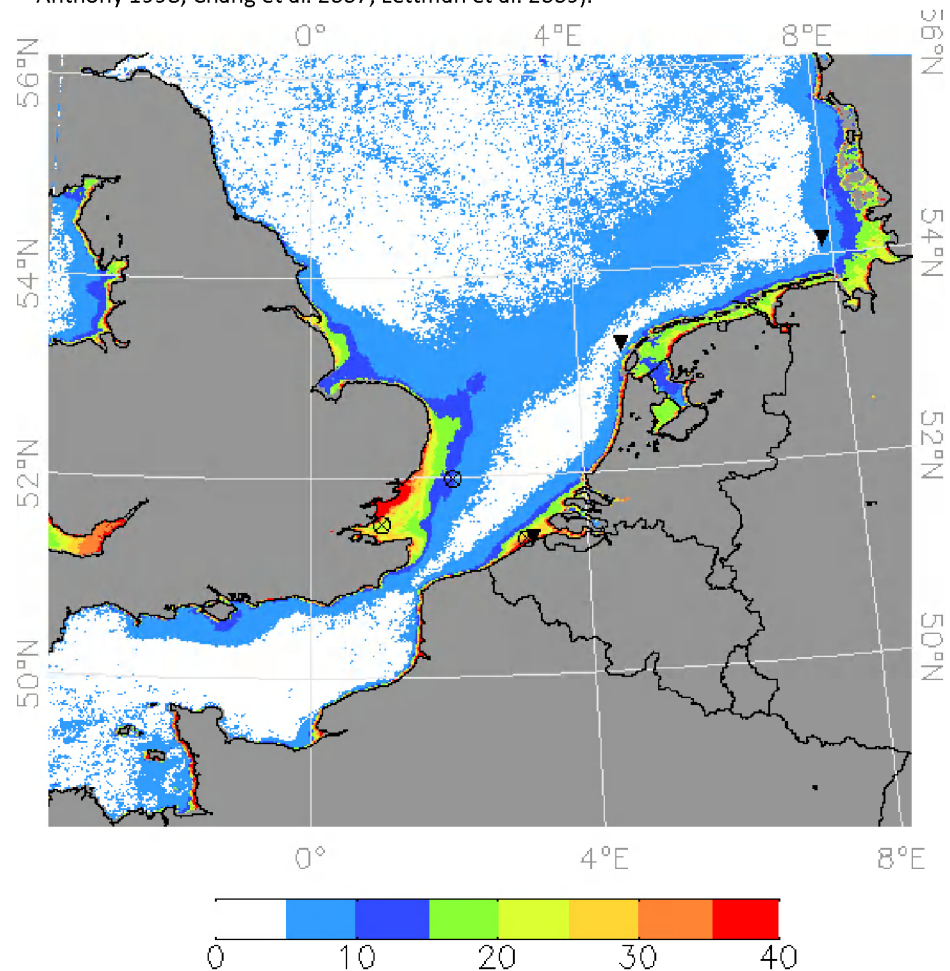
3. Invloed van weer en klimaat op de geografische variabiliteit van SPM concentratie

SPM (suspended particulate matter) concentratie varieert in ruimte en tijd. Op korte tijdschalen bepalen vooral getij en de doortij-springtij cyclus (Baeye et al. 2011), en lokaal de stratificatie door rivierpluimen deze variaties die ontstaan door resuspensie, menging, bezinking en afzetting van fijnkorrelige sedimenten, alsook advectie tengevolge van residuele transporten. (Pietrzak et al. 2011). Op langere en of onregelmatige tijdschalen zijn meteorologische en klimatologische variaties significant. Meteorologische patronen zijn verantwoordelijk voor de resuspensie tengevolge van golven en bepalen de advectie van watermassas. Jaarlijkse variaties worden veroorzaakt door seizoensgebonden windpatronen en windsterkte en resulteren b.v. in hogere SPM concentraties tijdens de winter en lagere tijdens de zomer. Klimatologische effecten zijn gelinkt aan de frequentie van bepaalde weerspatronen, zoals de Noord Atlantische Oscillatie (NAO) die verantwoordelijk is voor een belangrijk deel van de waargenomen weers- en klimaatsvariabiliteit in de Noordzee (Hurrell 1995; Schwierz et al. 2006) en dus ook een belangrijk effect heeft op de SPM concentratie. De meteorologie van de Noordzee wordt gekarakteriseerd door depressies die zich van west naar oost verplaatsen en door het ontstaan en verdwijnen van hoge drukgebieden. Deze fluctuaties in windvelden en luchtdrukpatronen hebben een tijdschaal van enkele dagen tot een week, terwijl de klimaatsvariabiliteit op een langere tijdschaal werkzaam is (seizoenen en langer). De winter NAO index vertoont een variabiliteit van enkele tientallen jaren. Een positieve NAO index wijst op een hogere frequentie aan westelijke winden en meer neerslag over Noordwest Europa, terwijl in een winter met negatieve NAO index de westelijke winden zwakker zijn, de neerslag geringer is en een intrusie van koude polaire lucht overheerst (Hurrell 1995).

Meteorologische en klimaatsstudies hebben het nut van atmosferische stromingspatronen of weerpatronen aangetoond (Demuzere et al. 2009; Ullman & Monbaliu 2010). De geografische en temporele veranderingen van weerpatronen in de Noordzee beïnvloeden sterk de hydrodynamica. De invloed van weer en klimaat op de hydrodynamica is gekend (Holt et al. 2010); echter hun invloed op de SPM concentratie is dikwijls beperkt tot het vermelden van seizoenale patronen (b.v. Fettweis et al. 2007). Het onderzoek hier beschreven vestigt daarom de aandacht op de grootschalige geografische variabiliteit van de hoge turbiditeitszones in de Noordzee en het Engels Kanaal, veroorzaakt door meteorologische en klimatologische variaties. We zullen hiervoor gebruik maken van remote sensing, in situ en modeldata.

In figuur 3.1 wordt de gemiddelde oppervlakte SPM concentratie getoond voor de Noordzee en het Engels Kanaal. De zuidelijke Noordzee, met zijn sterkere stromingen en ondieper water, heeft hogere SPM concentraties dan de noordelijke Noordzee. De hoge turbiditeitsgebieden zijn de Belgisch-Nederlandse kustzone; de Thames pluim die overgaat in de East-Anglian pluim; de Humber kust, de Waddenzee en de kust van de Friesische eilanden. De belangrijkste bronnen van fijnkorrelige suspensiemateriaal zijn kusterosie (Holderness kust, kliffen van Dover en Calais), lokale erosie van fijnkorrelige sedimenten (b.v. Belgische kustzone), rivieren en de Atlantische Oceaan (Eisma 1981; Fettweis et al. 2007). Het geërodeerde fijnkorrelig materiaal afkomstig van de Holderness kliff wordt in de East Anglian pluim naar het oosten getransporteerd, waar het deels afgezet wordt in de Oestergronden (Zuo et al. 1989). De Doverstraat en de lokale erosie van fijnkorrelige

sedimenten in de Belgische kustzone zijn de belangrijkste bron van SPM in de zuidelijke Noordzee en verklaren de aanwezigheid van de hoge turbiditeitsgebieden langsheen de continentale en Engelse kusten van de Zuidelijke Bocht (Velegrakis et al., 1999; Gerritsen et al., 2001; Fettweis et al., 2007). Zandhoudend slib en slib komen voor in de centrale Noordzee, langsheen de Belgisch-Nederlandse kust, in de Oestergronden, de Duitse Bocht, de Waddenzee, een gebied zeewaarts van de Thamesmondning en de kust van East Anglia (Eisma 1983; OSPAR 2000). De Waddenzee wordt gekenmerkt door een evenwicht tussen lokale erosie en afzetting en transport, met een netto import van SPM tijdens goede weersomstandigheden en een netto export ervan tijdens stormperiodes (Bartholdy & Anthony 1998; Chang et al. 2007; Lettman et al. 2009).



Figuur 3.1: Gemiddelde SPM concentratie (mg/l) voor alle MODIS data (2002-2009). Driehoekjes duiden de locatie van de golfboeien aan te Bol van Heist (51.38°N, 3.21°E), Eierlandse Gat (53.28°N, 4.66°E) en Helgoland (54.16°N, 7.87°E); de kruisjes tonen de in situ SPM concentratie meetlocaties Warp Anchorage (51.53°N, 1.03°E), West Gabbard (51.98°N, 2.08°E) en MOW1 (51.36°N, 3.11°E) aan.

Verschillende studies over SPM concentratie in de Noordzee hebben oceanografische data (golven, stromingen, getij, wind, temperatuur, stratificatie) afkomstig van in situ en remote sensing metingen en numerieke modellen gebruikt om de verdeling en de variabiliteit van SPM concentratie te verklaren (e.g. Gerritsen et al. 2001; Pleskachevsky et al. 2005; Fettweis et al. 2007; Eleveld et al. 2008; Stanev et al. 2009; Dobrynin et al. 2010; Pietrzak et al. 2011; Rivier et al. 2012). De methode hier voorgesteld is anders, omdat er gebruik gemaakt wordt van weertypes om de SPM concentratie te bepalen voor typische

meteorologische en klimatologische situaties. Wegens de lage staalnamefrequentie van een orbitale satelliet en omdat wolken dikwijls de data verstoren – gemiddeld zijn er een 60 tal goede beelden per jaar – kunnen deze niet gebruikt worden om kortstondige variaties te detecteren. Echter, door de data te groeperen en te middelen volgens een bepaald classificatieschema, kunnen synoptische kaarten opgesteld worden die representatief zijn voor de gemiddelde SPM concentratie tijdens bepaalde weerpatronen (Fettweis & Nechad 2011).

De recent in voege zijnde EU Kaderrichtlijn Mariene Strategie heeft als belangrijkste doel het behoud/bekomen van een goede milieutoestand gebruikmakend van een ecosysteem benadering. Dit impliceert een goed begrip en kwantificatie van de belangrijkste processen, zodat de natuurlijke variabiliteit onderscheiden kan worden van de door menselijke ingrepen veroorzaakte. Tijdens de voorbije jaren werd veel aandacht besteed aan de mogelijke veranderingen in de Noordzee door klimaatveranderingen. Met onze benadering wordt een middel aangereikt om de processen in de kustzone en op de continentale shelf beter te begrijpen, in het bijzonder wat de variaties in SPM concentratieverdeling betreft tengevolge van weersomstandigheden, hoe dit in de toekomst zal veranderen en wat de gevolgen kunnen zijn voor het mariene ecosysteem.

3.1. Data en methoden

3.1.1. *Weertypes en classificatie van data*

De meteorologische data voor 2002-2009 zijn afkomstig van het UK Met Office en bestaan uit 6 uurlijkse wind en luchtdrukvelen. Om de invloed van het weer op de oppervlakte SPM concentratie te bestuderen in een groter gebied, werd het classificatiesysteem zoals voorgesteld door Demuzere et al. (2009) toegepast. Deze classificatie is gebaseerd op de methode voorgesteld door Lamb (1972), welke verder ontwikkeld (Jenkinson & Collins 1977) en gevalideerd werd (Jones et al. 1993). Een reeks indices geassocieerd met de richting en de vorticeit van de geostrofische stroming bepalen het weertype. Het rooster van Demuzere et al. (2009) is gecentreerd boven België en kan als representatief beschouwd worden voor de atmosferische circulatiepatronen van West en Centraal Europa. Wij hebben gebruik gemaakt van 11 weertypes (WT), met name 2 zuivere vorticeits- (Anticyclonisch, Cyclonisch), 8 directionele (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) en een niet classeerbaar type (U). De klimatologische impact werd in rekening gebracht met behulp van de NAO index, door SPM concentratiekaarten voor bepaalde winterperiodes op te stellen. De NAO index is afkomstig van de Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, USA. In de NAO-winter (december tot en met maart) tijdserie (2002-2009) werden twee opeenvolgende winters geïdentificeerd met een tegengestelde NAO index: -1.09 tijdens de winter 2005/2006; en 2.79 tijdens deze van 2006/2007. De MODIS beelden werden gemiddeld over deze perioden.

Figuur 3.2a toont dat de weertypes A, SW, W en NW een hogere frequentie hebben dan de anderen, die in minder dan 8% van de tijd voorkomen. Verder zijn enkele weertypes gelijkmatiger verdeeld over een jaar (C, A, NE), terwijl andere frequenter zijn in de herfst en winter (S, SW, W) of lente en zomer (U). De gemiddeld duur van een weertype is tussen de 1.5 en 2 dagen. De gemiddelde frequentie van de weertypes tijdens de winters van 2002-2009 wordt in figuur 3.4a vergeleken met de frequentie ervan tijdens de winter van 2005-2006 (negatieve NAO index) en 2006-2007 (positieve NAO index). Er zijn significante verschillen in frequentie voor weertypes N, NE, SW en W. Weertypes N en NE komen meer (minder) frequent voor tijdens een winter met een negatieve (positieve) NAO index dan tijdens een gemiddelde wintersituatie. Het tegenovergestelde kan opgemerkt worden voor de andere twee weertypes: zij komen meer (minder) frequent voor tijdens een

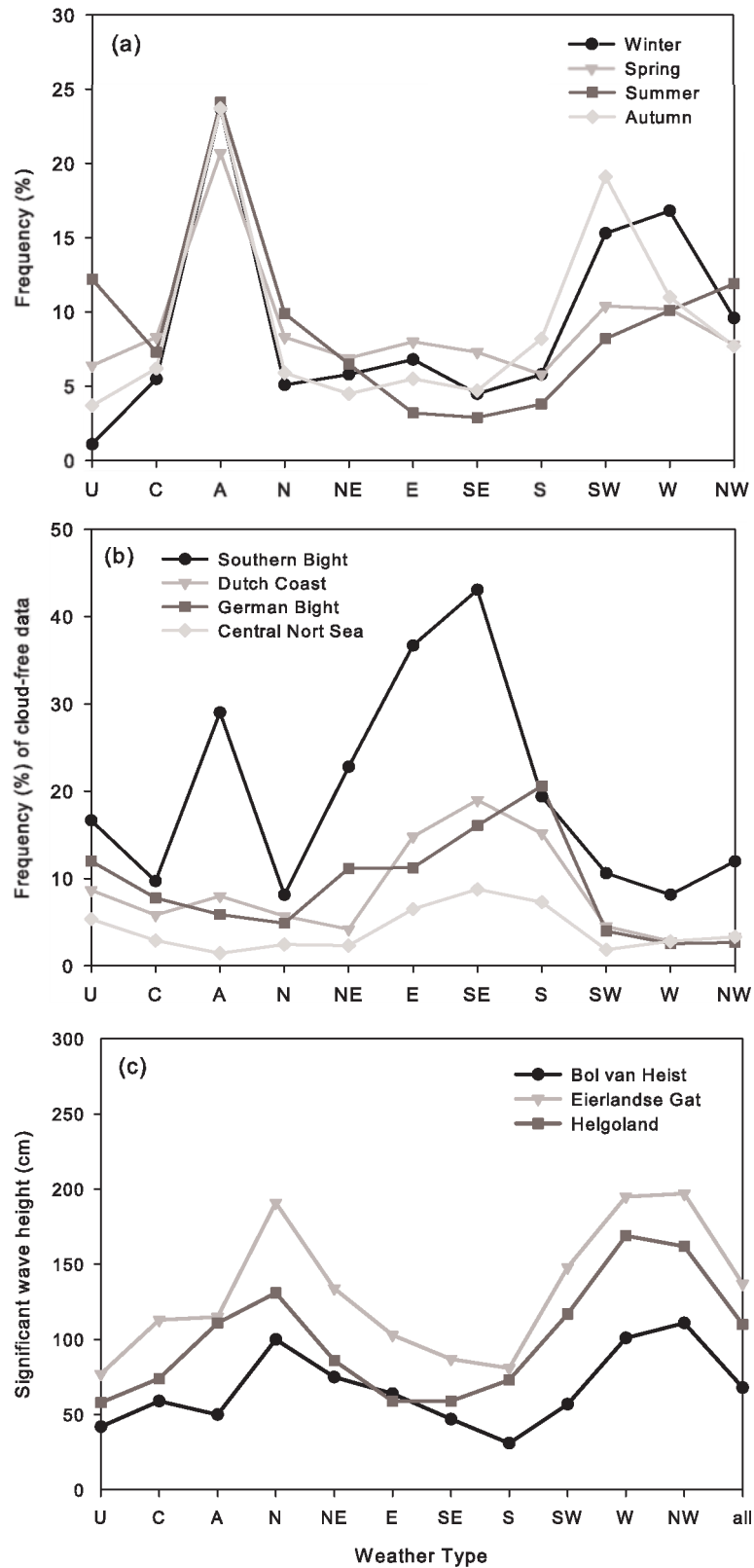
winter met een positieve (negatieve) NAO index. Deze resultaten bevestigen de algemene klimaatcondities tijdens een positieve (sterkere westwinden) en een negatieve NAO index (zwakkere westwinden en intrusie van koudere polaire lucht), zie Hurrell (1995).

De meteorologische en klimatologische effecten werden bestudeerd door de in situ, remote sensing en modeldata data te classeren volgens NAO index of weertype, gevolgd door het berekenen van een gemiddelde. Satellieten kunnen enkel SPM concentratie detecteren als er geen wolken zijn; dit is uiteraard ook gecorreleerd met het weertype en de breedtegraad. Meer wolkenvrije data zijn er in de zuidelijke Noordzee; noordelijk van 55°N is het aantal wolkenvrije data beperkt (<10 goede pixel per WT), zie figuur 3.2b en 3.3. Verschillen bestaan ook tussen de weertypes onderling; gemiddeld is het aantal goede pixels hoger bij weertypes NE, E, SE en S. Om met deze verschillen rekening te houden, werden de data eerst gemiddeld over een maand en dan over een jaar. Het belang van advectie en resuspensie werd bestudeerd door de per weertype gemiddelde SPM concentratiekaarten te vergelijken met de significante golfhoogtes, de in situ SPM concentraties en de stromingegegevens afkomstig van een numeriek model.

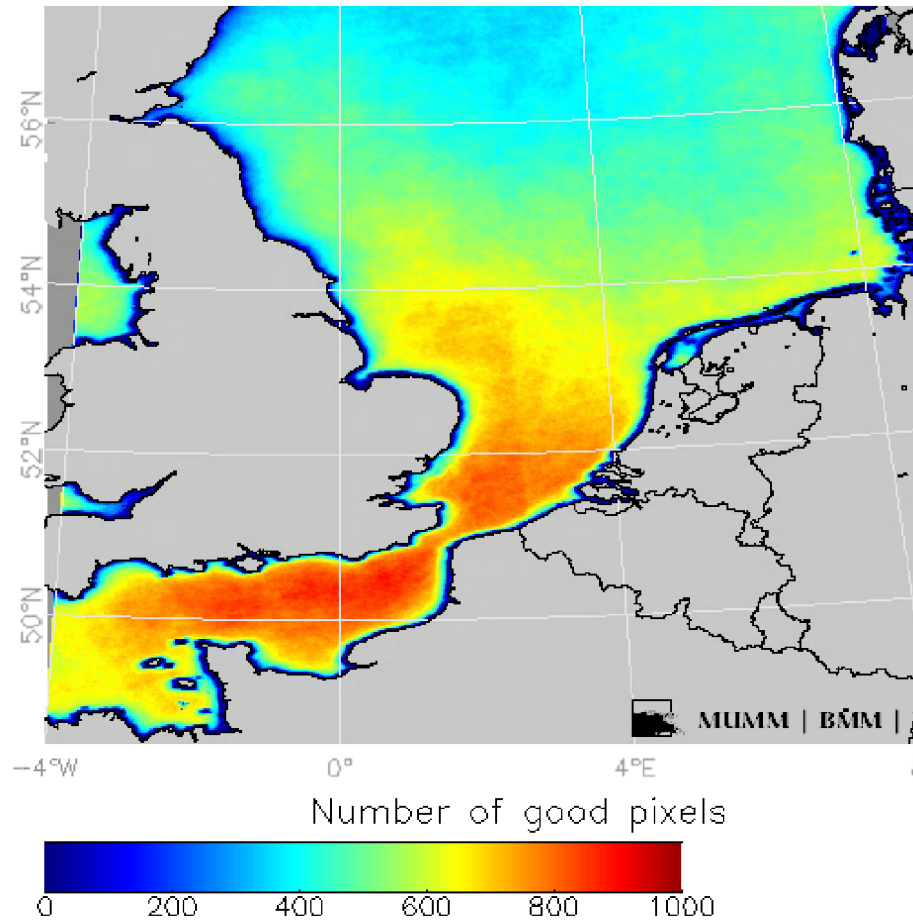
3.1.2. Remote sensing data

De Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aan boord van de Aqua satelliet geeft 1 tot 2 keer per dag een beeld van de Noordzee. 3097 MODIS beelden tussen juli 2002 en december 2009, werden geïntegreerd van Level 1A (NASA/Ocean Biology Processing Group: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>) naar Level 2, met behulp van de SeaDAS software (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). Deze verwerking omvat twee stappen. Eerst worden Level 1B data aangemaakt door de Level 1A data te geo-refereren en de atmosferische bijdrage van lucht moleculen en aerosols, gemeten door de sensor aan de top van de atmosfeer, af te trekken. Uit deze Level 2 data, kan de mariene weerkaatsing in de verschillende golflengtebanden van MODIS worden afgeleid. Oppervlakte SPM concentratie wordt bekomen door de remote sensing weerkaatsing in de centrale MODIS band met golflengte 667 nm, te berekenen met het algoritme van Nechad et al. (2010). De Level 2 processing flags (Patt et al. 2003) worden nadien gebruikt om land, wolken en andere slechte pixels te maskeren.

De nauwkeurigheid van SPM concentraties afkomstig van satellietdata werd berekend voor fouten veroorzaakt door het optische model gebruikt om mariene weerkaatsing om te rekenen naar SPM concentraties. Dit model parametreert de inherente optische eigenschappen van de deeltjes in suspensie als een locatie-specifieke coëfficiënt. Fouten in SPM concentraties kunnen ontstaan indien de deeltjes significant van korrelgrootte of samenstelling veranderen tengevolge van getij en weer (Nechad et al. 2010), waardoor de inherente optische eigenschappen veranderen. De nauwkeurigheid van SPM concentratie afkomstig van fouten in de bepaling van de mariene weerkaatsing werd geëvalueerd op basis van 29 match ups (in situ data op hetzelfde moment als satellietbeeld) in helder tot middelmatig troebel water (3–80 mg/l). De totale gemiddelde fout op SPM concentratie voor MODIS beelden bedraagt ongeveer 37%. Voor water met een SPM concentratie >10 mg/l, is de relatieve fout op SPM concentratie significant lager dan in helder water. Dit komt doordat er hogere relatieve fouten optreden in het weerkaatste signaal en ook omdat het SPM concentratie algoritme opgesteld is voor turbide wateren. Daarenboven zijn de zichtbare MODIS banden verzadigd in heel turbide wateren (Doxaran et al. 2002). Het golflengteband van 667 nm, dat hier gebruikt werd om SPM concentraties te bekomen, bereikt zijn detectielimiet rond 80 mg/l. De nauwkeurigheid is aanvaardbaar voor waarden tussen 3 en 80 mg/l. In de verdere verwerking werden enkel pixels gebruikt met een SPM concentratie uit deze range.



Figuur 3.2: (a) Frequentie van weertypes per seizoen; (b) frequentie van wolkenvrije data op vier locaties (zuidelijke Noordzee: 51.50°N, 3.10°E; Nederlandse kust: 53.30°N 4.40°E, Duitse Bocht: 54.15°N, 7.50°E en centrale Noordzee: 55.00°N, 4.00°E) en (c) de gemiddelde significante golfhoogte in drie meetstations (Bol van Heist, Eierlandse Gat, Helgoland).

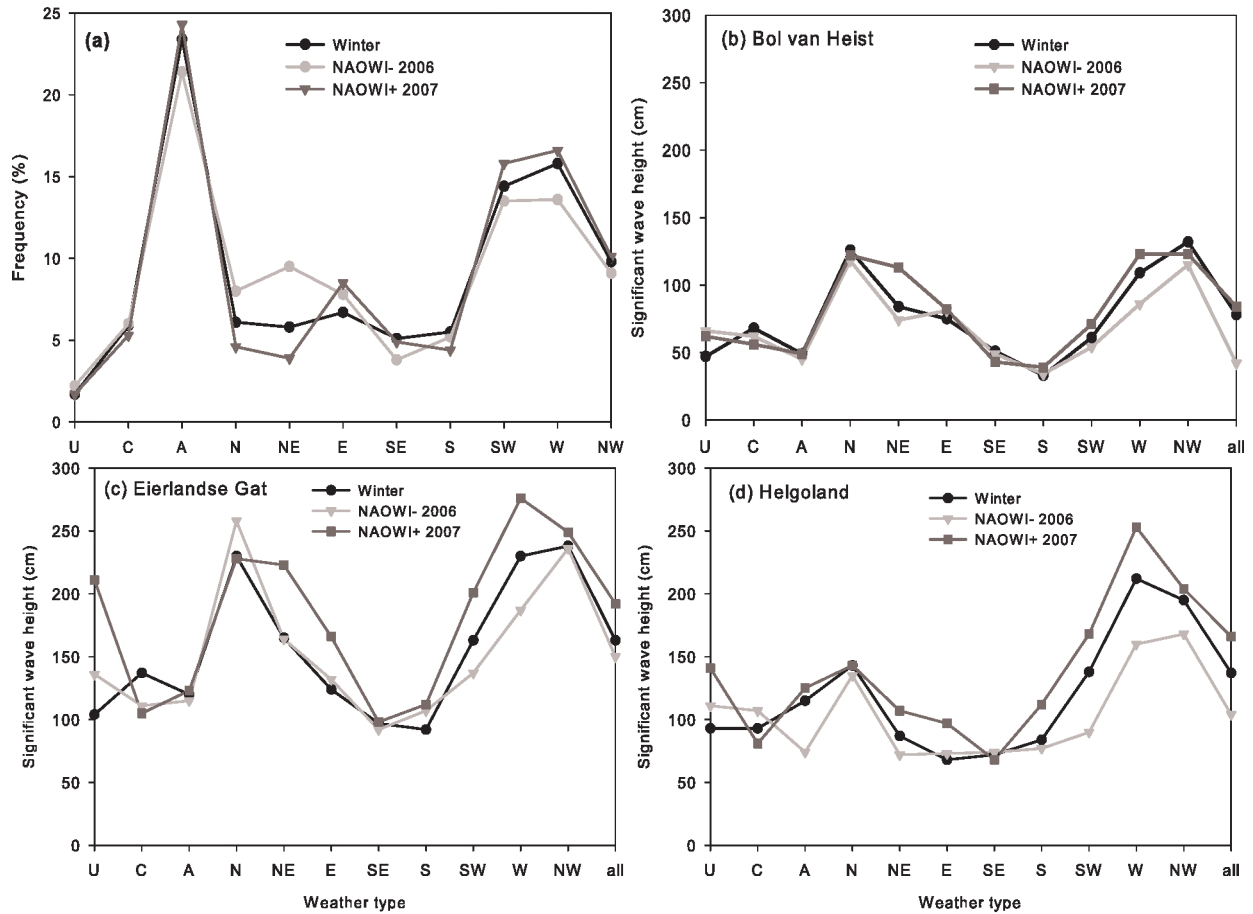


Figuur 3.3: Aantal goede pixels in de MODIS datareeks 2002-2009.

3.1.3. In situ data

Met de in situ SPM concentraties te Warp Anchorage (WA), West Gabbard (WG) en Zeebrugge (MOW1) werden de satellietresultaten gevalideerd. WA ligt in de Thamesmondning, WG langsheen de Humberkust en MOW1 in de Belgische kustzone (figuur 3.1). Te WA (waterdiepte 15 m) en WG (waterdiepte 25 m) werden voor de periode 2002-2009 oppervlakte SmartBuoys ingezet, met optische backscatter sensoren (OBS) van het type Seapoint turbidity meter en een acquisitietijdstap van 30 minuten (Mills et al. 2003). Te MOW1 (waterdiepte 10 m) werd de SPM concentratie gemeten gedurende ongeveer 340 dagen tijdens de periode 2005-2009 op 2 m boven de bodem en dit met zowel akoestische als optische backscatter sensoren (ADV, ADP, OBS) met een tijdstap van 10 minuten (Fettweis et al. 2010; Fettweis & Nechad 2011; Fettweis et al. 2012).

In situ golfdata (significante golfhoogte) gemeten te Bol van Heist (Vlaamse Hydrografie), Eierlandse Gat (Rijkswaterstaat) en Helgoland (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) werden per weertype gemiddeld, zie figuur 3.2c. De resultaten zijn over het algemeen vergelijkbaar voor de drie stations. De hoogste golven treden op bij weertypes N, NW en W en de laagste bij S, SE, E, U en C. Verschillen tussen de drie stations worden vooral veroorzaakt door de verschillende fetch lengte. Hierdoor zijn bijvoorbeeld de golfhoogtes lager te Bol van Heist (Helgoland) bij weertypes SW (NE, E, SE) en hoger bij weertypes NE, E en SE (SW). De gemiddelde golfhoogte is ook een functie van de NAO index (figuur 3.4b-d). Winter met een positieve NAO index hebben over het algemeen hogere golfhoogtes dan winters met een negatieve NAO index.



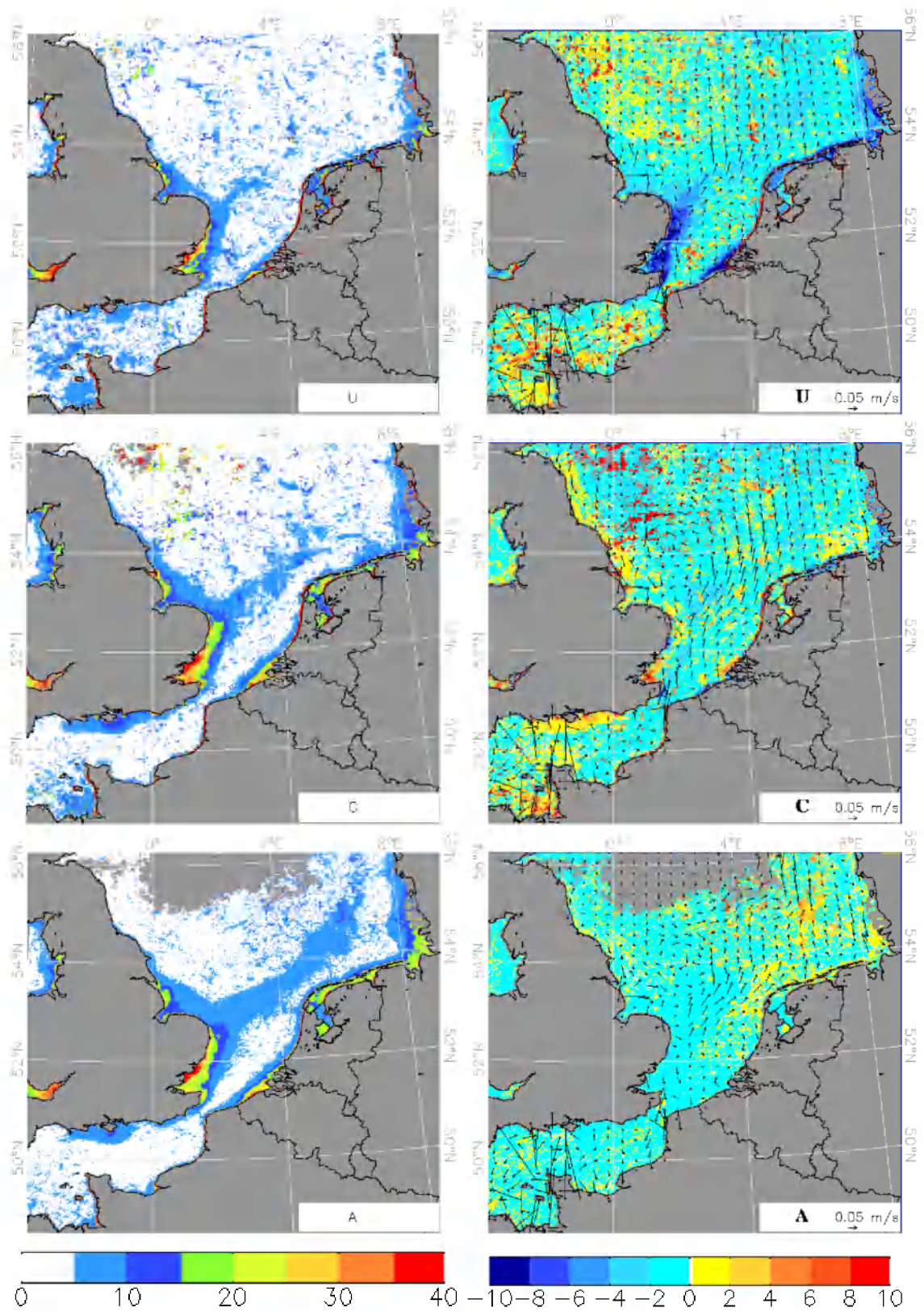
Figuur 3.4: (a) Frequentie (%) van voorkomen van weertypes tijdens de winters van 2002-2009, de winter van 2005-2006 (NAOWI- 2006) en de winter van 2006-2007 (NAOWI+ 2007); en de gemiddelde significante golfhoogte te (b) Bol van Heist, (c) Eierlandse Gat en (d) Helgoland voor dezelfde periodes.

3.1.4. Numerieke model data

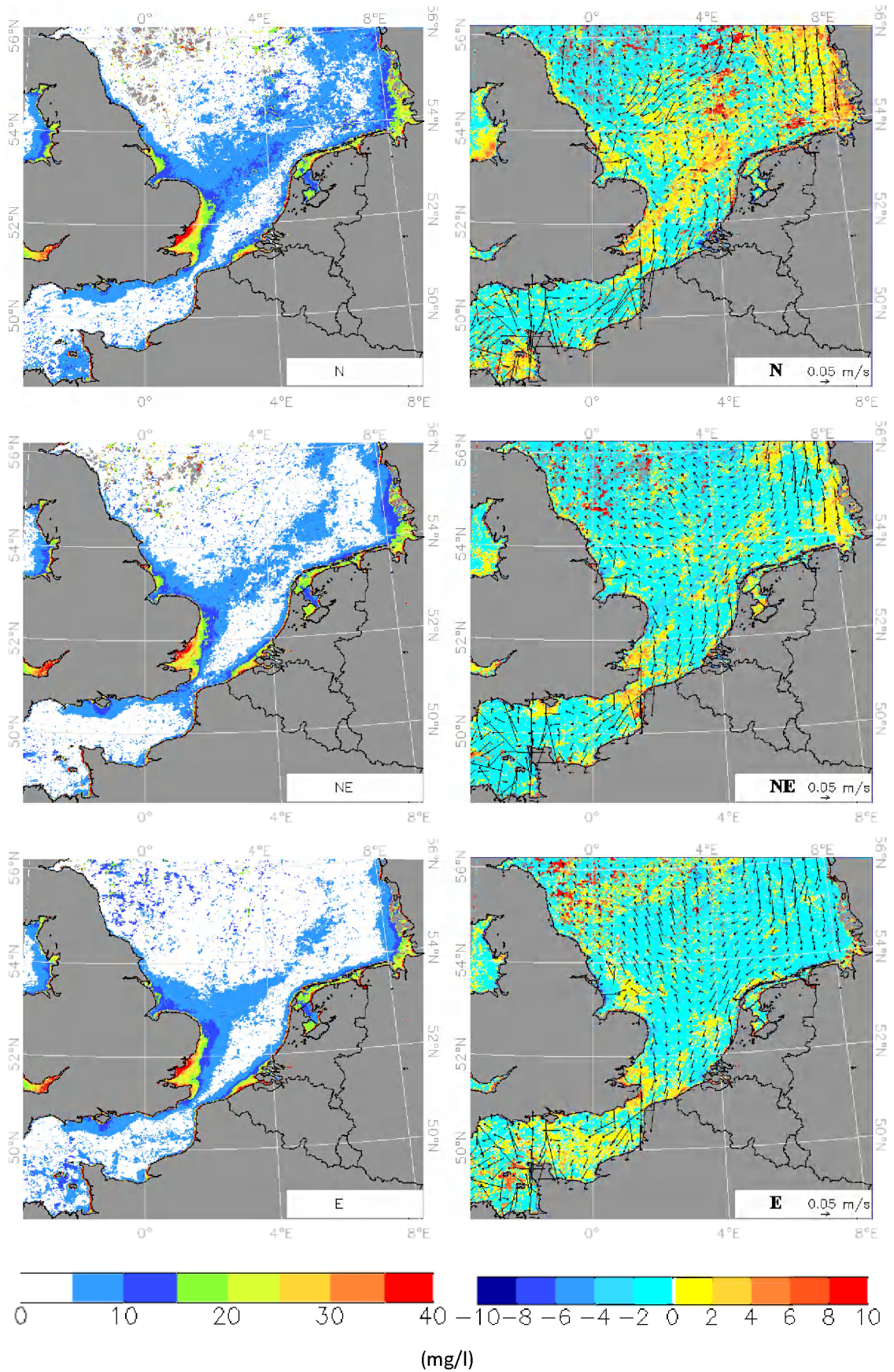
De stroomsnelheid tengevolge van getij en wind werd berekend voor de periode 2002 tot 2009 met het 3D hydrodynamic model COHERENS (Luyten et al. 1999). Het OPTOS-NOS model omvat de Noordzee en het Engels Kanaal (4°W - 9°E, 48°N - 57°N). De horizontale resolutie is 5' (longitude) en 2.5' (latitude). Randvoorwaarden zijn waterstand en dieptegemiddelde stroming; deze worden berekend met OPTOS-CSM, dat de Noordwest Europese continentale shelf omvat. Het OPTOS-CSM model is 2D en wordt aangedreven aan de open rand door de waterstand samengesteld uit vier halfdagelijkse (M2, S2, N2, K2) en vier dagelijkse (O1, K1, P1, Q1) harmonische constanten. De 6 uurlijkse wind en luchtdrukdata van het UK Met Office werden gebruikt als meteorologische forcing voor beide modellen. De stromingsgegevens werden geïntegreerd volgens weertypes of NAO index en gemiddeld als volgt:

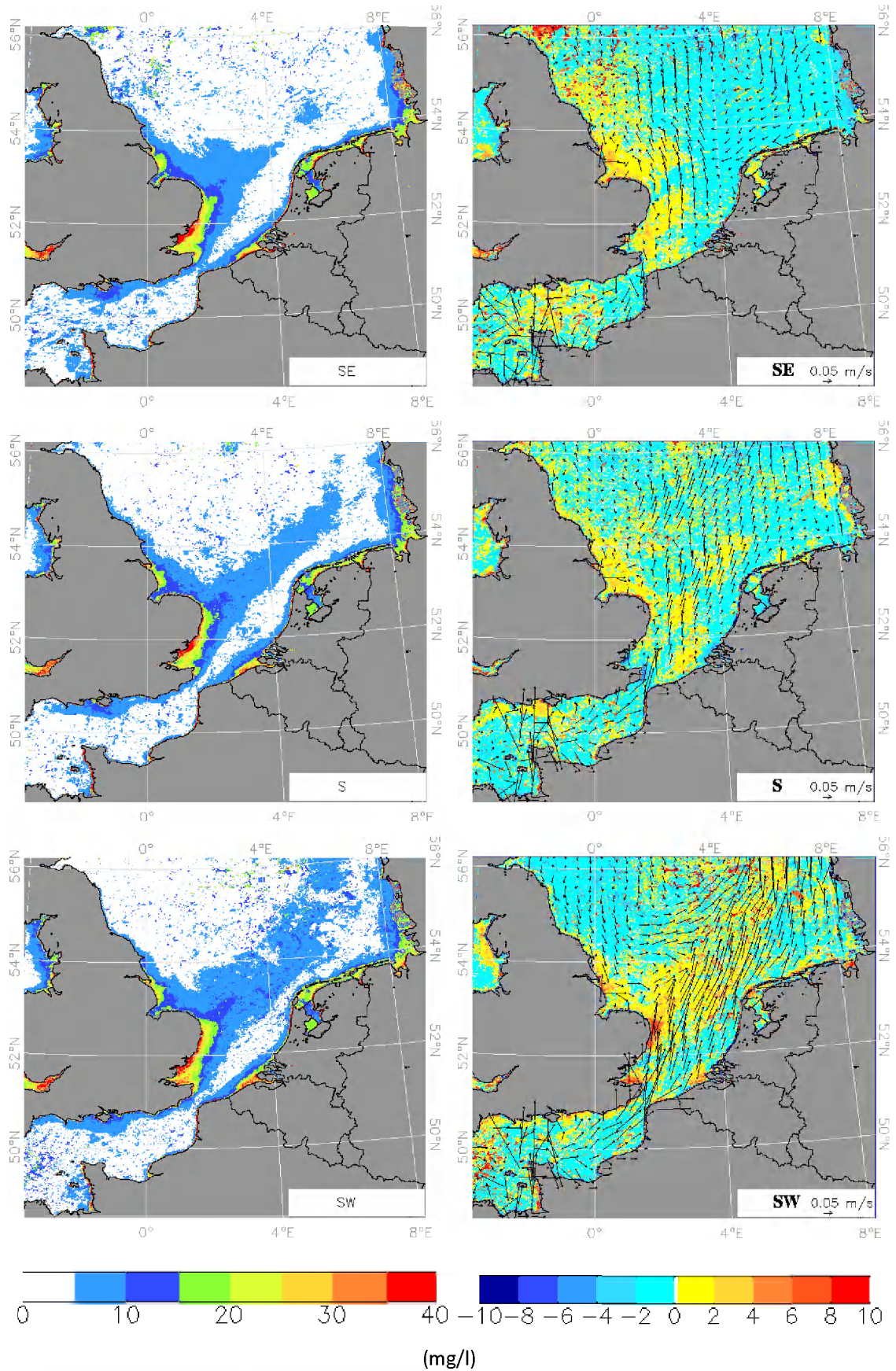
$$u_{res-wt} = \sum_{i=1}^{nwt} u_i / nwt \quad (3.1)$$

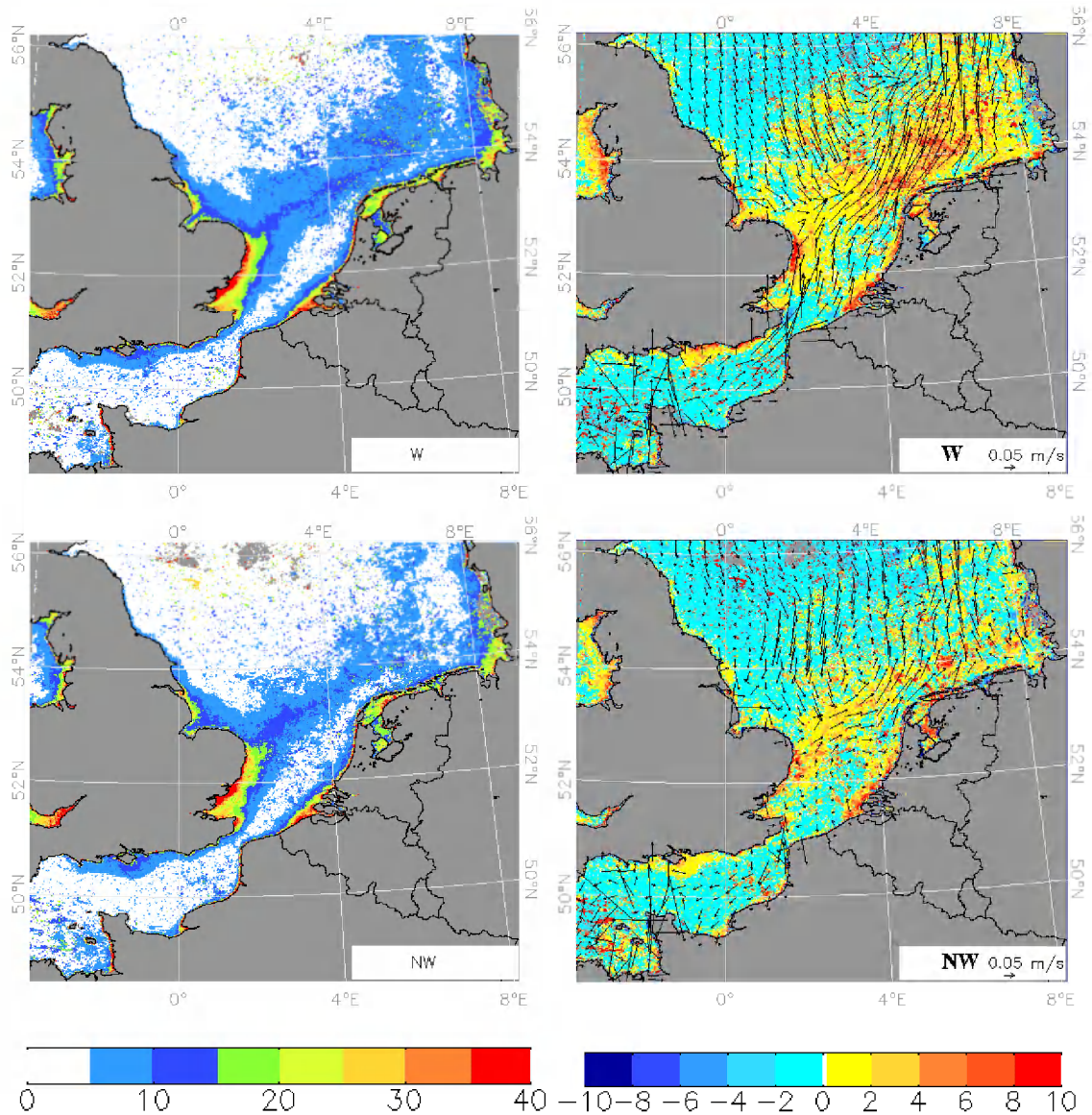
met u_{res-wt} de residuële oppervlaktestromingsvector, u_i de individuele stromingsvector en nwt het aantal stromingsvectoren per weertype.



Figuur 3.5: (links) Gemiddelde SPM concentratie (mg/l) tijdens de zuivere weertypes (U, C, A) en (rechts) het verschil met de jaarlijks gemiddelde data (mg/l, negatieve waarde: lager dan, positieve waarde: hoger dan het jaarlijks gemiddelde). In de rechtse figuren wordt tevens de residuele stroming getoond.







Figuur 3.6: (links) Gemiddelde SPM concentratie (mg/l) tijdens de zuivere weertypes (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) en (rechts) het verschil met de jaarlijks gemiddelde data (mg/l, negatieve waarde: lager dan, positieve waarde: hoger dan het jaarlijks gemiddelde. In de rechtse figuren wordt tevens de residuele stroming getoond.

3.2. Resultaten en bespreking

3.2.1. SPM concentratiepatronen

De per weertype gemiddelde oppervlakte SPM concentratie en het verschil met het jaarlijks gemiddelde kan gevonden worden in figuren 3.5 en 3.6, samen met de residuele stroming per weertype. Merk op dat lokaal enkele pixels hoge waarden vertonen. Deze pixels kunnen gelinkt worden aan het voorkomen van hoge en foutieve SPM concentraties rond wolken.

Verschillen in SPM concentraties worden waargenomen op regionale en lokale schaal en kunnen gelinkt worden aan advectie en resuspensie. In weertype U is er globaal een vermindering en in weertype S een lichte verhoging in SPM concentratie in vergelijking

met de gemiddelde situatie. Deze verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door seizoenale effecten. Weertype U is meer frequent tijdens het lagere SPM concentratie lente-zomer seizoen, terwijl weertype S frequenter voorkomt tijdens het hogere SPM concentratie herfst-winter seizoen. De lage gemiddelde significante golfhoogten tijdens beide weertypes duiden aan dat de SPM concentratiepatronen voornamelijk veroorzaakt worden door getij. A is het meest voorkomende weertype, het is nagenoeg gelijkmatig verdeeld over een jaar en komt goed overeen met de jaarlijks gemiddelde situatie. De lichte stijging in SPM concentratie vanaf de Zuidelijke tot de Duitse Bocht is gecorreleerd met een gelijkaardige trend in golfhoogte. De andere weertypes vertonen allen regionale en locale verschillen zonder dat er, op schaal van de Noordzee, een trend te zien is in resuspensie en advection.

De SPM concentratiekaarten bevestigen dat weertypes de verdeling van de oppervlakte SPM concentratie in de Noordzee beïnvloeden en dat dit veroorzaakt wordt door hun invloed op de hydrodynamica en dus ook op het transport en de resuspensie van cohesieve sedimenten. Daarenboven treden er significante verschillen op tussen de verschillende hoge turbiditeitsgebieden, deze kunnen gecorreleerd worden met advection en/of resuspensie. Resuspensie (door golven) is afhankelijk van de waterdiepte en de golfhoogte. Omdat de golven hoger zijn langsheen de Nederlandse kust dan in de Duitse en Zuidelijke Bocht (figuur 3.2b) en dit bij eenzelfde waterdiepte (10-20 m), zal resuspensie aldaar potentieel belangrijker zijn.

De residuele stromingen per weertype geven een indicatie van de advection van SPM aan het oppervlakte. We kunnen significant verschillen opmerken in zowel grootte als richting van de residuele stroming bij de verschillende weertypes. Advection is over het algemeen naar het zuidwest tot west gericht gedurende weertypes N, NE en E. Het tegenovergestelde treedt op bij weertypes C, E, S, SW, W en NW. Naar de kust toe worden de stromingsellipsen langwerpiger en wordt de residuele stroming gedomineerd door de richting van de kustlijn (alongshore flow). Deze richting kan lokaal verschillen van het algemeen residueel stromingspatroon, zie Baeye et al. (2011).

De hoger dan gemiddelde SPM concentratie die vastgesteld wordt in de East Anglia pluim, de Thames en/of de Duitse Bocht tijdens weertypes NE, N, NW, W en SW correleert goed met de hogere significante golfhoogtes tijdens deze weertypes en kan aldus toegeschreven worden aan lokale resuspensie van fijnkorrelig materiaal. Dit wordt ook aangehaald door Pleskachevsky et al. (2005) en Pietrzak et al. (2011). Lokaal kunnen verschillen waargenomen worden tussen deze weertypes die gelinkt zijn aan een sterkere invloed van advection, zie b.v. het gebied rond Dover, de Belgisch-Nederlandse en Noord-Friese kust. Zo is b.v. het hoge turbiditeitsgebied rond Dover en langsheen de Belgisch-Nederlandse kust verschoven naar het noordoosten tijdens weertypes SW en W, terwijl bij weertypes NE en E het tegenovergestelde kan vastgesteld worden, met name hogere concentraties naar het zuidwesten toe. Dit wordt veroorzaakt door een ommekeer van de residuele alongshore flow tijdens bepaalde windcondities (Baeye et al. 2011).

De schuifspanning veroorzaakt door golven tijdens de andere directionele weertypes (E, SE, S) is beperkt en de veranderingen in SPM concentratiepatronen t.o.v. de jaarlijks gemiddelde situatie kunnen dus niet veroorzaakt worden door resuspensie. Merk op dat bij weertype NE de golfhoogten relatief hoog zijn in de Zuidelijke t.o.v. de Duitse Bocht (figuur 3.2b). Dit samen met de zuidwestwaarts gerichte residuele stroming langsheen de kustlijn verklaart de hogere SPM concentratie in de Doverstraat. Tijdens weertypes E en SE merken we een algemene vermindering in SPM concentratie op in de Noordzee, uitgezonderd in de Straat van Dover. Deze weertypes hebben geen uitgesproken seizoenaal signaal en hebben een lage gemiddelde golfhoogte. Het waargenomen patroon

kan daarom uitgelegd worden door de lager dan gemiddelde resuspensie in de Noordzee, terwijl de verhoging aan SPM concentratie het gevolg is van een residueel transport richting Engels Kanaal.

3.2.2. *Beperkingen van satellietbeelden*

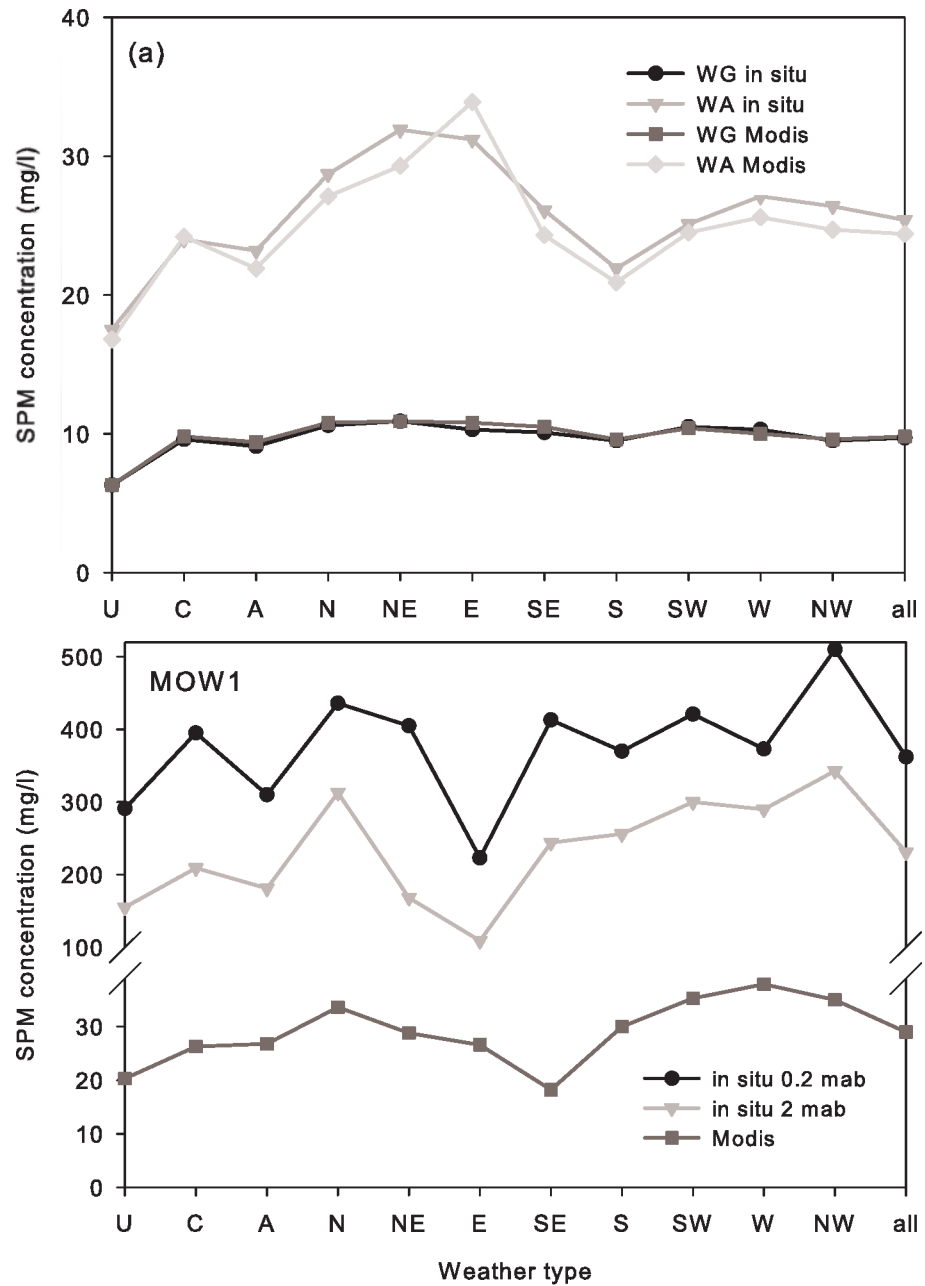
Een belangrijk nadeel van satellietbeelden is de lage sampling frequentie en de aanwezigheid van wolken. De frequentie van wolkenvrije data is het hoogst in de Zuidelijke Bocht en het Engels Kanaal en neemt af richting Noorden en Oosten (figuren 3.2b en 3.3). Dit is niet noodzakelijk gecorreleerd met de frequentie van weertypes, zoals kan gezien worden in weertypes SW, W en NW, die relatief veel voorkomen (>10% van de tijd), maar slechts relatief weinig goede data opleveren (figuren 3.2a en 3.2b). Anders is het voor weertypes NE, E en SE die minder frequent voorkomen ($\pm 5\%$ van de tijd), maar een relatief hoge frequentie hebben aan wolkenvrije data.

Andere beperkingen zijn het gevolg van het feit dat SPM processen beheerst worden door de bodemnabije dynamica (resuspensie, afzetting) en deze zijn niet noodzakelijk gekoppeld met processen die zich in de waterkolom afspelen (Fettweis & Nechad 2011). Een mooi voorbeeld hiervan is het gebied onder invloed van de zoetwaterpluim van de Rijn en de delen van de Noordzee die seizoenaal thermisch gestratificeerd zijn. Beide gebieden kennen een verminderde verticale menging. De oppervlakte SPM concentratie onderschat in deze gebieden dus significant de totale SPM concentratie in het water (McCandliss et al. 2002; Pietrzak et al. 2011). Stratificatie door zoetwaterpluimen komt ook voor in de Duitse Bocht (Elbe pluim) en in het Skagerrak (Huthnance 1991). De East Anglia turbiditeitspluim strekt zich uit tot in gebieden met een thermale stratificatie tijdens de vroege zomer.

De per weertype gemiddelde SPM concentratie en de verschillen met de jaarlijks gemiddelde concentratie worden getoond voor de meetstations WA, WG en MOW1 in figuur 3.7. De in situ data te WA en WG bevestigen dat de SPM concentratie in de Zuidelijk Bocht over het algemeen lager is tijdens weertypes U, C, A, S en SE; en hoger tijdens weertypes N, NE, SW, W en NW. Tijdens weertype SE vermindert de SPM concentratie te WA en verhoogt te WG, wat overeenstemt met bevindingen uit de satellietbeelden. De vergelijking tussen de in situ data dicht tegen de bodem en de MODIS oppervlakte data is minder goed bij weertypes C, SE en NE, waar we opmerken dat de SPM concentratie – t.o.v. het jaarlijks gemiddelde – toeneemt dicht tegen de bodem en afneemt aan de oppervlakte. Een afname in oppervlakte SPM concentratie t.o.v. het jaarlijks gemiddelde, merken we ook op in de satellietbeelden ter hoogte van de Elbemonding en Denemarken bij weertypes W en SW, in de Duitse en Deense Waddenzee bij weertypes E en SE, en langsheen de Belgisch-Nederlandse kust in weertypes C, SE en NE. In het laatste geval kan de afname in oppervlakte SPM concentratie verklaard worden door de omkering van de residuele stroming parallel aan de kust naar het zuidwesten. Hiedoor stroomt er meer water en SPM uit de Schelde, neemt de verticale menging af en worden er hooggeconcentreerde sliblagen gevormd (HCMS) (Baeye et al. 2011). Het is niet zeker of gelijkaardige processen verantwoordelijk zijn voor de relatief lagere SPM concentraties langsheen de Duits-Deense kust of dat - tijdens weertypes SW en W – een groter import van SPM naar de Waddenzee de SPM concentratie op zee doet afnemen. De lagere SPM concentratie zou daarenboven ook veroorzaakt kunnen worden de geringere golfwerking, de thermohaline stratificatie geassocieerd met westelijke winden in de Elbemonding en oostelijk winden ter hoogte van de Duitse en Deense Waddenzee (Schrum 1997).

HCMS of vloeibare sliblagen laten een tweelagen stroming ontstaan, met als gevolg een demping van de turbulentie en een reductie van de verticale menging (Winterwerp 2001). De lage oppervlakte SPM concentratie in satellietbeelden langsheen de Belgisch-Neder-

landse kust tijdens weertypes C, SE, NE en ook NW weerspiegelt dus niet een afname van de hoeveelheid SPM in de waterkolom, maar onderstreept dat de bodem nabije SPM dynamica deels losgekoppeld is van de processen hogerop in de waterkolom (Fettweis & Nechad 2011; Pietrzak et al. 2011). De consequentie hiervan is dat oppervlakte SPM concentratie enkel als proxy kan gebruikt worden voor het SPM transport indien de waterkolom goed gemengd is of indien er geen HCMS of vloeibare sliblagen aanwezig zijn. Vloeibaar slib of HCMS worden vaak teruggevonden in estuaria, baaien en kustzones. Zover wij weten werd het voorkomen van HCMS in de Noordzee enkel bevestigd voor de Belgische kust (Baeye et al. 2011).



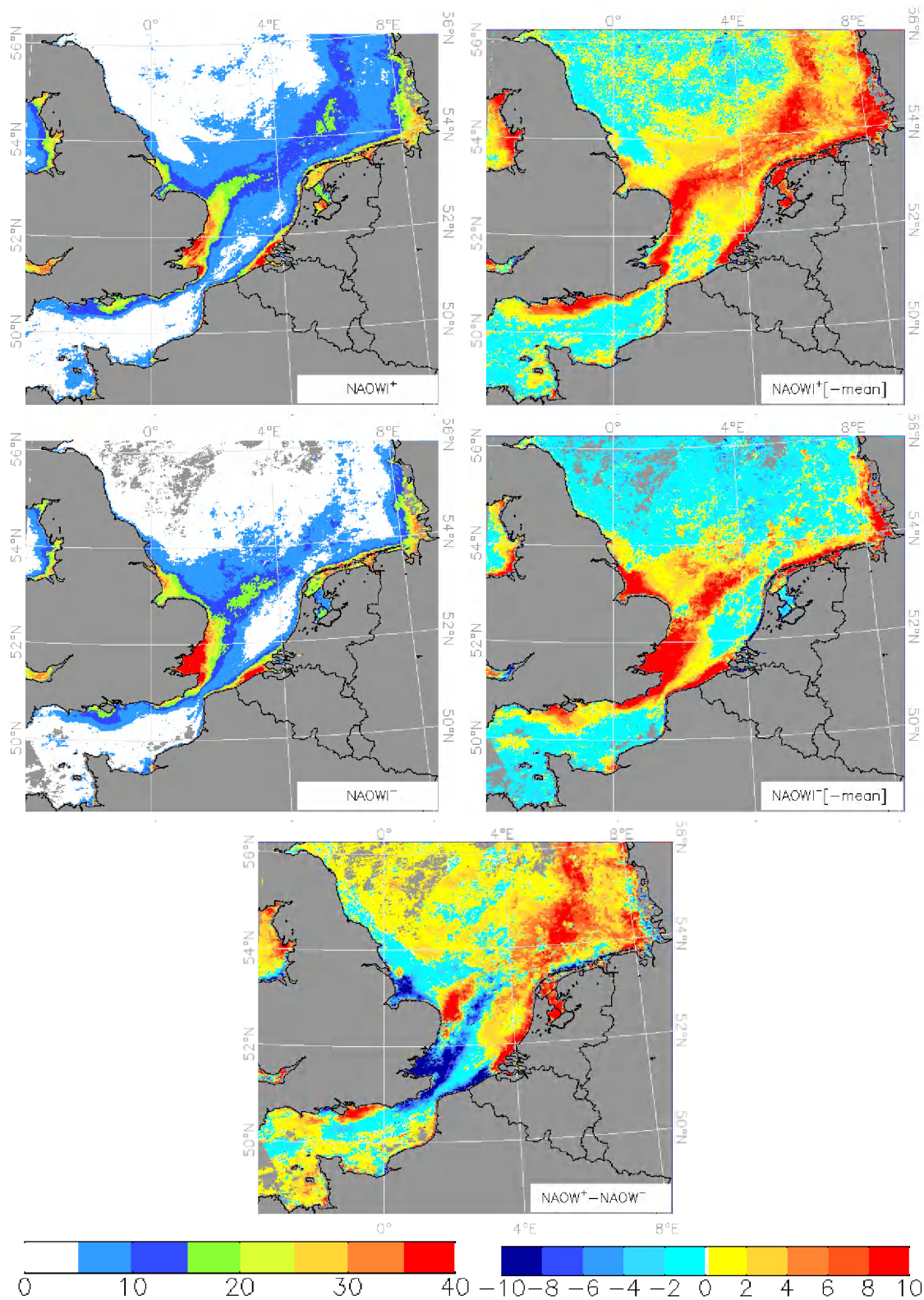
Figuur 3.7: In situ SPM concentratie (mg/l) te (a) WA, WG en (b) MOW1 (WA+WG: oppervlakte, MOW1: 0.2 en 2 m boven bodem) en de remote sensing oppervlakte SPM concentratie volgens weertype en het jaarlijks gemiddelde (all).

3.2.3. Weers- en klimaatsinvloeden op SPM concentratie

De NAO oefent een sterke invloed uit op de verdeling van SPM concentratie in de winter, zie figuur 3.8. Tijdens een winter met een negatieve NAO index is de SPM concentratie gemiddeld hoger in de Zuidelijk Bocht terwijl tijdens een winter met een positieve NAO index hogere SPM concentraties aangetroffen worden in de Duitse Bocht, de centrale Noordzee en langsheen de Nederlandse kust (uitgezonderd Westfrisische kust). Winters met positieve NAO index hebben een hogere frequentie aan SW winden, gemiddeld hogere golven en een noordoostelijk gerichte residuele stroming. De verschillen tussen beide wintersituaties worden aldus verklaard door een combinatie van advectie en lokale resuspensie tengevolge van hogere golven.

Siegismund & Schrum (2001) hebben met behulp van een trendanalyse op windrichting over de laatste decaden aangetoond, dat er meer zuidwestelijke winden voorkwamen tijdens de periode 1988-1997 dan tijdens de periode 1958-1967; gelijkaardige resultaten worden vermeld door Van den Eynde et al. (2012). Dit betekent dus dat weertypes S, SW en W nu frequenter zijn met als gevolg een gemiddeld gezien sterkere verplaatsing van het SPM vanuit de Zuidelijk Bocht naar de rest van de Noordzee. Het turbiditeitsgebied ter hoogte van de Belgisch-Nederlandse kust zou dus nu meer naar het noordoosten verschoven zijn dan vroeger. Houziaux et al. (2011) hebben een gelijkaardige opmerking geformuleerd, gebaseerd op historische (100 jaar geleden) en recente bodemstalen. Deze auteurs hebben de veranderingen voornamelijk toegeschreven aan de veranderingen in het cohesieve sedimenttransport veroorzaakt door haven- en baggerwerken. De hier beschreven data suggereren daarenboven dat deze veranderingen ook verklaard kunnen worden of versterkt werden door de verandering in frequentie van weertypes.

Veranderingen in circulatiepatronen over de Noordatlantische Oceaan zijn gekoppeld aan veranderingen in stormtrajecten. Benniston et al. (2007) voorspellen b.v. in de komende decaden een toename van winterstormen boven de Noordzee met meer extreme windsnelheden en dit meer uit noordwestelijke richting dan actueel het geval is. Dit zou als gevolg hebben dat hogere golven frequenter optreden en er dus een hoger resuspensiepotentieel zal heersen. Effecten veroorzaakt door het klimaatsveranderings-scenario A1B uit het IPCC 2001 rapport worden beschreven door Demuzere et al. (2009). Zij voorspellen dat de frequentie van weertype W zal toenemen, terwijl weertypes C en de oostelijke types (SE, E, NE) lichtjes zullen afnemen. Toename in frequentie van weertype W en afname van weertypes N en NE is geassocieerd met een positieve winter NAO index. Deze voorspellingen dienen met voorzicht te worden geïnterpreteerd gezien de grote onzekerheid van simulatiemodellen voor klimaatscenarios (Benniston et al. 2007, Demuzere et al. 2009). Deze onzekerheid verklaart mogelijks ook de verschillen in voorspelling. Andere studies leggen een correlatie tussen een afname van de Arctische ijsbedeking in de zomer ende koudere winters in Europa (Pethoukov & Semenov 2011; Jaiser et al. 2012). Deze auteurs verwachten, indien de ijsbedeking tijdens de zomer stelsmatig blijft afnemen, dat de waarschijnlijkheid van koude winters in Europa met een factor drie zal toenemen. Deze koude perioden, zoals b.v. in Februari 2012, worden gekenmerkt door een negatieve NAO index. Voor de Noordzee betekent dit dus dat de oppervlakte SPM concentratie gemiddelde hoger is in de Duitse Bocht en de Doverstraat en lager is langsheen de Belgisch-Nederlandse kustzone. Gebaseerd op de bovenvermelde literatuur kunnen we dus verwachten dat de herfst en winters meer extreem weer zullen hebben, met over het algemeen een toename van zuidwestelijke winden tijdens periodes met positieve NAO index en een toename van winters met meer negatieve NAO index. Deze klimaatsveranderingen zullen de frequentie van de weertypes veranderen en dus ook de verdeling van SPM concentratie.



Figuur 3.8: (Boven) winter 2006 met positieve en (midden) winter 2007 met negatieve NAO index: Gemiddelde SPM concentratie (mg/l) tijdens de winter (links) en het verschil met de gemiddelde situatie (rechts). (Onder) het verschil tussen winter 2006 en 2007 (in mg/l; negatieve waarden: hoger in NAOI+; positieve waarden: hoger in NAOI-).

3.3. Conclusies

De MODIS oppervlakte SPM concentratiekaarten werden gemiddeld over 11 weertypes en 2 klimatologische condities. Elk weertype en elke klimatologische conditie worden gekenmerkt door een specifieke verdeling van de SPM oppervlakteconcentratie, wat door verschillen in advectie en golfhoogtes verklaard wordt. Het voorkomen van stormen heeft vooral een impact in de ondiepere kustregionen door een verhoogde resuspensie van bodemmateriaal. Aanhoudende winden zullen, daarenboven, het residueel stromingspatroon en dus het residueel SPM transport in de Noordzee veranderen. De veranderingen in SPM concentratie in de meer beschutte Zuideijke Bocht kunnen vooral toegeschreven worden aan de invloed van advectie, terwijl in de centrale Noordzee en de Duitse Bocht resuspensie meer bepalend is voor de SPM concentratie. Dit resulteert in hogere (lagere) SPM concentraties in de Zuidelijke Bocht en het Engels Kanaal (Duitse Bocht) tijdens E-SE weertypes. Het tegengestelde geldt tijdens weertypes W-SW, waar de SPM concentratie hoger is in de centrale Noordzee en lager in het Engels Kanaal en de Straat van Dover.

Beperkingen in satellietbeelden werden toegeschreven aan zoetwaterstratificatie (Pietrzak et al. 2011). Onze data suggereren verder dat stratificatie door hooggeconcentreerde sliedlagen (HCMS) een gelijkaardig effect heeft in de hoge turbiditeitszone langs de Belgisch-Nederlandse kust. Het gevolg hiervan is dat oppervlakte SPM concentratie met voorzigt dient gebruikt te worden als proxy voor het SPM transport in gebieden met een thermohaline of HCMS stratificatie.

4. Referenties

- Ariathurai C. 1974. A finite element model for sediment transport in estuaries, PhD Dissertation, University of California, Davis
- Baeye M, Fettweis M, Voulgaris G, Van Lancker V. 2011. Sediment mobility in response to tidal and wind-driven flows along the Belgian inner shelf, southern North Sea. *Ocean Dynamics* 61, 611-622.
- Bartholdy J, Anthony D (1998) Tidal dynamics and seasonal dependent import and export of fine-grained sediment through a backbarrier tidal channel of the Danish Wadden Sea. In: *Tidalites: processes and products*, SEPM special publication 61, 43–52.
- Beniston M, Stephenson D, Christensen O, Ferro C, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Jylhä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T, Woth K. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81, 71-95.
- Burchard H. 1999., Recalculation of surface slopes as forcing for numerical water column models of tidal flow. *Applied Mathematical Modelling* 23, 737–755.
- Burd A, Jackson G. 2002. Modeling steady-state particle size spectra. *Environmental Science and Technology* 36, 323–327.
- Chang TS, Joerdel O, Flemming BW, Bartholomä A. 2006. Importance of flocs and aggregates in muddy sediment dynamics and seasonal sediment turnover in a back-barrier tidal basin of the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). *Marine Geology* 235, 49–61.
- Demuzere M, Werner M, van Lipzig NPM, Roeckner E. 2009. An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *International Journal of Climatology* 29, 1796-1810.
- Dobrynin M, Gayer G, Pleskachevsky A, Günther H, 2010. Effect of waves and currents on the dynamics and seasonal variations of suspended particulate matter in the North Sea. *Journal of Marine Systems* 82, 1-20.
- Doxaran D, Froidefond J-M, Lavender S, Castaing P. 2002. Spectral signatures of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment* 81, 149–161.
- Eisma D. 1981. Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. In: Nio DD, Shuttenhelm RTE, van Weering TCE (Eds.), *Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin*. International Association of Sedimentology, Special Publication 5. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 415–428.
- Eleveld MA, Pasterkamp R, van der Woerd HJ, Pietrzak J. 2008. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 80, 103–113.
- Fettweis M, Nechad B, Van den Eynde D. 2007. An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in situ measurements and numerical model results. *Continental Shelf Research* 27, 1568-1583.
- Fettweis M. 2008. Uncertainty of excess density and settling velocity of mud flocs derived from in situ measurements. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 78, 428-436.
- Fettweis M, Francken F, Van den Eynde D, Verwaest T, Janssens J, Van Lancker V. 2010. Storm influence on SPM concentrations in a coastal turbidity maximum area (southern North Sea) with high anthropogenic impact. *Continental Shelf Research* 30, 1417-1427.
- Fettweis M, Nechad B. 2011. Evaluation of in situ and remote sensing sampling methods for SPM concentrations, Belgian continental shelf (southern North Sea). *Ocean Dynam-*

- ics 61, 157-171.
- Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Chen P, Yu JCR. 2012. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Marine Letters* 32, 123-137.
- Gerritsen H, Boon JG, van der Kaaij T, Vos RJ. 2001. Integrated modelling of suspended matter in the North Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences* 53, 581-594.
- Holt J, Wakelin S, Lowe J, Tinker J. 2010. The potential impacts of climate change on the hydrography of the northwest European continental shelf. *Progress in Oceanography* 86, 361-379.
- Houziaux J-S, Fettweis M, Francken F, Van Lancker V. 2011. Historical (1900) seafloor composition in the Belgian-Dutch part of the North Sea: A reconstruction based on calibrated visual sediment descriptions. *Continental Shelf Research* 31, 1043-1056.
- Hurrell JW. 1995. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation. *Science* 269, 676-679.
- Huthnance JM. 1991. Physical Oceanography of the North Sea. *Ocean and Shoreline Management* 16, 199-231.
- Jaiser R, Dethloff K, Handorf D, Rinke A, Cohen J. 2012. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A* 64, 11595.
- Jenkinson AF, Collison FP. 1977. An initial climatology of gales over the North Sea; Synoptic Climatology Branch Memorandum, 62, Meteorological Office, London.
- Jones PD, Hulme M, Briffa KR. 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology* 13, 655-663.
- Lamb HH. 1972. British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861-1971. *Geophysical Memoir* 116, HMSO, London, 85pp.
- Lauwaert B, Fettweis M, Cooreman K, Hillewaert H, Moulaert I, Raemaekers M, Mergaert K, De Brauwer D. 2004. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen. BMM, DVZ & aMT rapport, BL/2004/01, 52pp.
- Lauwaert B, De Brauwer D, Fettweis M, Hillewaert H, Hostens K, Mergaert K, Moulaert I, Parmentier K, Verstraeten J. 2006. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen (vergunningperiode 2004-2006). BMM, ILVO & aMT rapport, BL/2006/01, 87pp.
- Lauwaert B, Bekaert K, Berteloot M, De Brauwer D, Fettweis M, Hillewaert H, Hoffman S, Hostens K, Mergaert K, Moulaert I, Parmentier K, Vanhoey G, Verstraeten J. 2008. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen (vergunningperiode 2006-2008). BMM, ILVO, aK & aMT rapport, BL/2008/01, 128pp.
- Lauwaert B, Bekaert K, Berteloot M, De Backer A, Derweduwen J, Dujardin A, Fettweis M, Hillewaert H, Hoffman S, Hostens K, Ides S, Janssens J, Martens C, Michielsen T, Parmentier K, Van Hoey G, Verwaest T. 2009a. Synthesis report on the effects of dredged material disposal on the marine environment (licensing period 2008-2009) Report by MUMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2009/01. 73pp.
- Lauwaert B, Bekaert K, Berteloot M, De Backer A, Derweduwen J, Dujardin A, Fettweis M, Hillewaert H, Hoffman S, Hostens K, Ides S, Janssens J, Martens C, Michielsen T, Parmentier K, Van Hoey G, Verwaest T. 2009b. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen (vergunningperiode 2008-2009). Rapport uitgevoerd door BMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2009/01. 18pp.
- Lauwaert B, Delgado R, Derweduwen J, Devriese L, Fettweis M, Hostens K, Janssens J, Robbens J, Timmermans S, Van Hoey G, Verwaest T. 2011a. Synthesis report on the effects of dredged material disposal on the marine environment (licensing period 2010-2011). Report by MUMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2011/12, 85pp.

- Lauwaert B, Delgado R, Derweduwen J, Devriese L, Fettweis M, Hostens K, Janssens J, Robbens J, Timmermans S, Van Hoey G, Verwaest T. 2011b. Synthese rapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciastortingen (vergunningperiode 2010-2011). Rapport uitgevoerd BMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2011/12, 16pp.
- Lee B, Toorman E, Molz F, Wang J. 2011. A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments. *Water Research* 45, 2131–2145.
- Lee BJ, Fettweis M, Toorman EA. 2012a. Heterogeneous flocculation combining the biological and mineralogical populations in a marine and coastal environment. VLIZ Young Scientists' Day, February 24, Brugge.
- Lee BJ, Fettweis M, Toorman E, Molz F. 2012b. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research* 117 (C03014).
- Le Hir P, Cayocca F, Waeles B. 2011. Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. *Continental Shelf Research* 31, S135–S149.
- Lettman KA, Wolff J-O, Badewien TH (2009) Modeling the impact of wind and waves on suspended particulate matter fluxes in the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). *Ocean Dynamics* 59, 239-262.
- Luyten PJ, Jones JE, Proctor R, Tabor A, Wild-Allen K. 1999. COHERENS – A coupled hydrodynamical-ecological model for regional shelf seas. MUMM, 911pp.
- Luyten P, Carniel S, Umgiesser G. 2002. Validation of turbulence closure parameterisations for stably stratified flows using the PROVESS turbulence measurements in the North Sea. *Journal of Sea Research* 47, 239–267.
- Maerz J, Verney R, Wirtz K, Feudel U. 2010. Modeling flocculation processes: Intercomparison of a size class-based model and a distribution-based model. *Continental Shelf Research* 31, S84–S93,
- Maggi F. 2009. Biological flocculation of suspended particles in nutrient-rich aqueous ecosystems. *Journal of Hydrology* 376 116-125.
- Manning AJ, Bass SJ, Dyer KR. 2006. Floc properties in the turbidity maximum of a meso-tidal estuary during neap and spring tidal conditions. *Marine Geology* 235,193–211.
- McCandliss RR, Jones SE, Hearn M, Latter R, Jago CF. 2002. Dynamics of suspended particles in coastal waters (southern North Sea) during a spring bloom. *Journal of Sea Research* 47, 285-302.
- Mills DK, Laane RWPM, Rees JM, Loeff MRVD, Suylen JM, Pearce DJ, Sivyer DJ, Heins C, Platt K, Rawlingson M. 2003. Smartbuoy: a marine environmental monitoring buoy with a difference. In: Dahlin H, Flemming NC, Nittis K, Peterson SE (eds) Building the European capacity in operational oceanography. Proceedings 3rd International Conference on EuroGOOS, Elsevier Oceanography Series 19, 311–316.
- Nechad B, Ruddick KG, Park Y. 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens Environ* 114: 854–866. doi:10.1016/j.rse.2009.11.022
- OSPAR. 2010. Quality Status Report 2000, Region II - Greater North Sea. OSPAR Commission, London, 136pp.
- Patt, F.S., Barnes, R.A., Eplee, R.E., Franz, B.A., Robinson, W.D., 2003. Algorithm updates for the Fourth SeaWiFS data reprocessing, NASA.
- Petoukhov V, Semenov VA. 2010. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *Journal of Geophysical Research* 115, D21111.
- Pietrzak JD, de Boer GJ, Eleveld MA. 2011. Mechanisms controlling the intra-annual

- mesoscale variability of SST and SPM in the southern North Sea. *Continental Shelf Research* 31, 594-610.
- Pleskachevsky A, Gayer G, Horstmann J, Rosenthal W. 2005. Synergy of Satellite Remote Sensing and Numerical Modeling for Monitoring of Suspended Particulate Matter. *Ocean Dynamics* 55, 2–9.
- Rivier A, Gohin F, Bryère P, Petus C, Guillou N, Chapalain G. 2012 Observed vs. predicted variability in non-algal suspended particulate matter concentration in the English Channel in relation to tides and waves. *Geo-Marine Letters* 32, 139-151.
- Schrum C. 1997. Thermohaline stratification and instabilities at tidal mixing fronts: results of an eddy resolving model for the German Bight. *Continental Shelf Research* 17, 689-716.
- Schwierz C, Appenzeller C, Davies H, Liniger M, Müller W, Stocker T, Yoshimori M. 2006. Challenges posed by and approaches to the study of seasonal-to-decadal climate variability. *Climatic Change* 79, 31-79.
- Siegismund F, Schrum C. 2001. Decadal changes in the wind forcing over the North Sea. *Climate Research* 18, 39-45.
- Stanev EV, Dobrynin M, Pleskachevsky A, Grayek S, Günther H. 2009. Bed shear stress in the southern North Sea as an important driver for suspended sediment dynamics. *Ocean Dynamics* 59, 183-194.
- Ullmann A, Monbaliu J. 2010. Changes in atmospheric circulation over the North Atlantic and sea-surge variations along the Belgian coast during the twentieth century. *International Journal of Climatology* 30, 558–568.
- Van den Eynde, D., De Sutter, R., Haerens, P. 2012 Evolution of the marine storminess in the Belgian part of the North Sea. *Natural Hazards Earth System Science* 12, 305–312.
- Van Leussen, W., 1994. Estuarine macroflocs and their role in fine-grained sediment transport. PhD thesis Univ. Utrecht, The Netherlands. 488 pp.
- Velegrakis AF, Michel D, Collins MB, Lafite R, Oikonomou EK, Dupont JP, Huault MF, Lecourtier M, Salomon JC, Bishop C. 1999. Sources, sinks and resuspension of suspended particulate matter in the eastern English Channel. *Continental Shelf Research* 19, 1933-1957.
- Verney R, Lafite R., Brun-Cottan JC, Le Hir P. 2011. Behaviour of a flocculation population during a tidal cycle: Laboratory experiments and numerical modelling. *Continental Shelf Research* 31, S64-S83.
- Winterwerp J. 1998. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Engineering* 36, 309-326.
- Winterwerp JC. 2001. Stratification effects by cohesive and non-cohesive sediment. *Journal of Geophysical Research*, 106, C10, 22559-22574.
- Winterwerp J, van Kesteren W. 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment, Elsevier B.V., Amsterdam, The Netherlands
- Winterwerp J, Manning A, Martens C, de Mulder T, Vanlede J. 2006. A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 68, 195-207.
- Xu F, Wang D-P, Riemer N. 2008. Modeling flocculation processes of fine-grained particles using a size-resolved method: Comparison with published laboratory experiments. *Continental Shelf Research* 28, 2668–2677.
- Zuo Z, Eisma D, Berger GW. 1989. Recent sediment deposition rates in the oyster ground, North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 23, 263-269.

COLOPHON

Dit rapport werd voorbereid door de BMM in januari 2013
Zijn referentiecode is MOMO/6/MF/201301/NL/AR/2

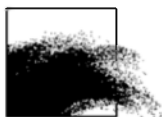
Status finale versie

Beschikbaar in het Nederlands

Indien u vragen hebt of bijkomende copies van dit document wenst te verkrijgen, gelieve een e-mail te zenden naar m.fettweis@mumm.ac.be, met vermelding van de referentie, of te schrijven naar:

BMM
100 Gulledelle
B-1200 Brussel
België
Tel: +32 2 773 2111
Fax: +32 2 770 6972
<http://www.mumm.ac.be/>

BEHEERSEENHEID VAN HET
MATHEMATISCH MODEL VAN DE NOORDZEE
SUMO GROEP



APPENDIX 1

Bijdrage "4th International Geologica Belgica Meeting", 11-14 September, Brussel:

- Fettweis M, Baeye M, Francken F, Houziaux J-S, Lee BJ, Van den Eynde D, Van Lancker V. Recent anoxic cohesive sediment deposits in the Belgian near-shore area: sedimentological context and anthropogenic impact

Recent anoxic cohesive sediment deposits in the Belgian near-shore area: sedimentological context and anthropogenic impact

Fettweis M.¹, Baeye M.², Francken F.¹, Houziaux J.-S.¹, Lee B.J.³, Van den Eynde D.¹ & Van Lancker V.¹

¹ Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Belgium

² University of Gent, Renard Center of Marine Geology, Belgium

³ Catholic University of Leuven, Department of Civil Engineering, Hydraulics Laboratory, Belgium

The recent cohesive sediments of the Belgian nearshore zone consist of Holocene back-barrier black *muddy deposits dating back to 3000 years ago (Mathys, 2009) and freshly deposited grey or black* muds occurring as ephemeral fluid mud layers or, locally, as increasingly more consolidated, thicker anoxic packages (>0.3 m). These deposits are associated with the occurrence of elevated concentration of suspended particulate matter (SPM). The distribution of muddy deposits depends on hydrodynamics, meteorological condition, climate, biological activity (primary production) and – in our case – anthropogenic influence. The latter is related to engineering works such as deepening of navigation channels, construction of harbours, dredging and disposal activities, and the anthropogenic induced eutrophication of the near-shore area. As a consequence SPM concentration, mud deposits, primary production and benthic life has changed during the last 100 years (Borges and Gypens, 2010; Fettweis et al., 2009, Houziaux et al., 2011).

The aim of the research is to show the effects of human impact on the SPM dynamics and on the deposition of anoxic cohesive sediments. In the beginning of the 20th century the freshly deposited mud layers were the result of natural morphological processes. Today, they are more concentrated in areas affected by engineering works. These changes have resulted in a larger extent of the turbidity maximum zone and in higher SPM concentrations. Organic matter and biogenic particles influence flocculation and thus SPM dynamics. Changes in nutrient loads of rivers has a strong influence on the primary production and thus on the carbon cycle in coastal areas (Borges and Gypens, 2010). The increase of organic matter concentration during spring algae bloom has an effect on the partitioning of sticky organic molecules to mineral flocs and thus on the settling of organic rich flocs and the formation of organic rich deposits. The changes associated with climate are related to variations in the North Atlantic Oscillation (NAO). As a consequence, the mud content of the sediment may vary considerably according to meteorological and climate condition.

References:

- Baeye, M., Fettweis, M., Voulgaris, G., Van Lancker, V., 2011. Sediment mobility in response to tidal and wind-driven flows along the Belgian inner shelf, southern North Sea. *Ocean Dynamics*, 61: 611-622.
- Borges, A.V., Gypens, N., 2010. Carbonate chemistry responds more strongly to eutrophication than ocean acidification in the coastal zone. *Limnology and Oceanography*, 55: 346-353.
- Fettweis, M., Houziaux, J.-S., Du Four, I., Van Lancker, V., Baeteman, C., Mathys, M., Van den Eynde, D., Francken, F., Wartel, S., 2009. Long-term influence of maritime access works on the distribution of cohesive sediment: Analysis of historical and recent data from the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Marine Letters*, 29: 321-330.
- Houziaux, J.-S., Fettweis, M., Francken, F., Van Lancker, V., 2011. Historical (1900) seafloor composition in the Belgian-Dutch part of the North Sea: A reconstruction based on calibrated visual sediment descriptions. *Continental Shelf Research*, 31: 1043-1056.
- Mathys, M., 2009. The quaternary geological evolution of the Belgian Continental Shelf, southern North Sea. PhD thesis, Ghent University, Belgium. 382 pp.

APPENDIX 2

Bijdrage "Particles in Europe workshop", 17-19 October 2012, Barcelona:

- Fettweis M, Lee BJ, Toorman E, Francken F, Van den Eynde D.
Flocculation in a eutrophic coastal turbidity maximum zone

Flocculation in a eutrophic coastal turbidity maximum zone

Michael Fettweis¹, Byung Joon Lee^{1,2}, Erik Toorman², Frederic Francken¹, Dries Van den Eynde¹

¹*Management Unit of the North Sea Mathematical Models (MUMM), Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Gulledele 100, 1200 Brussels, Belgium*

²*Katholieke Universiteit Leuven, Hydraulics Laboratory, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee, Belgium*

Suspended Particulate Matter (SPM) mediates many bio-physico-chemical processes in marine environments (Lee et al. 2011; 2012). A wide variety of biomass and sediment particles, including clays, silts, sands, phytoplankton, microorganisms and biological debris, composes SPM (Droppo 2001). Such biomass and sediment particles interact each other, and flocculation combines them into larger aggregate (Maggi 2009). The biomass-sediment interactions and SPM dynamics are important as they control the sediment, carbon and nitrogen storage capacity of coastal marine systems (Herbert 1999). They are of particular interest in relation to ecosystem functions and eutrophication (Cloern 2001; Simon et al. 2002). Human activities cause excess supply of nutrient to coastal zones and thus alter the carbon cycle and the ecosystem functioning (Borges and Gypens 2010).

Notwithstanding their importance, the biomass-sediment interactions and SPM dynamics has not been fully understood in coastal and marine area. This research, therefore, has been purposed to elucidate the biomass-sediment interactions and their impact on SPM dynamics in the Belgian coastal zone. The Belgian coastal zone is eutrophic and characterized by high SPM concentrations. The major part of nutrients is delivered in the Belgian coastal zone by the Scheldt estuary (Brion et al. 2008). The yearly cycle of phytoplankton bloom starts in early spring with a diatom bloom (Rousseau et al. 2002) and shifts towards a phaeocystis bloom in April and May (Lancelot et al. 1987). Diatoms and phaeocystis are disappearing in the water column in June, probably caused by a shortage in nutrients and an increased predation pressure of heterotrophic plankton species (Rousseau et al. 2002, Daro et al. 2006). The most important sources of SPM are the French rivers discharging into the English Channel, coastal erosion of the Cretaceous cliffs at Cap Gris-Nez and Cap Blanc-Nez (France) and the erosion of nearshore Holocene mud deposits (Fettweis et al. 2007).

We compared variation of SPM dynamics in a coastal turbidity maximum zone (CTM) and an off-shore zone (low SPM concentration), with paying attention to the biomass-sediment interactions. The CTM is characterized by a relative lower concentration of Particulate Organic Carbon (POC) vs. SPM concentration than in the off-shore zone (Fettweis et al. 2006). Particle size distribution (PSD) in the CTM skewed towards smaller sizes at high flow intensity and to a larger size at low flow intensity. However, PSDs in the off-shore area remained constant during an entire tidal cycle, while consistently skewing toward a larger size. The aggregates in the off-shore zone are large but light, fluffy marine snow rather than dense, spherical bio-mineral aggregates in TMZ.

The seasonal variation of SPM dynamics in the coastal CTM was purposed to assess how the seasonal change of biological activity, especially during algae bloom periods, affects the biomass-sediment interactions and SPM dynamics. Enhanced biological activity in an algae bloom period has been reported to reduce erosion and resuspension of mud deposits (Vos et al.

1988). Therefore, we presume that most of sediments might be kept in a fluid-mud layer or a consolidated mud deposit (Fettweis et al. 2012). The SPM and POC concentrations during an algae bloom period did not show a clear up-and-down trend (Figure 1a). Aggregates found in the CTM during the algae bloom period were found to be 2 to 3 times larger than aggregates measured at the same site four month months later (Figure 1b). Irrespective of large size, aggregates in the algae bloom period of CTM seemed floating around without a clear sign of downward settling, like those in offshore zones. This observation indicates that aggregates in an algae bloom period of the CTM or the offshore areas are light, less settleable than aggregates in a regular period of CTM. Therefore, we propose two different types of aggregates, (1) sediment-enriched, dense and settleable bio-mineral aggregates in CTM and (2) biomass-enriched, light and hardly settleable marine snow in an algal bloom period of CTM or in offshore zones (Figure 2).

To the authors' opinion, heterogeneous composition of marine aggregates should be considered for setting up a rigorous aggregate-organizing model for bio-mineral aggregates and marine snow and for correctly simulating the fate and transport of biomass and sediments in a marine and coastal environment.

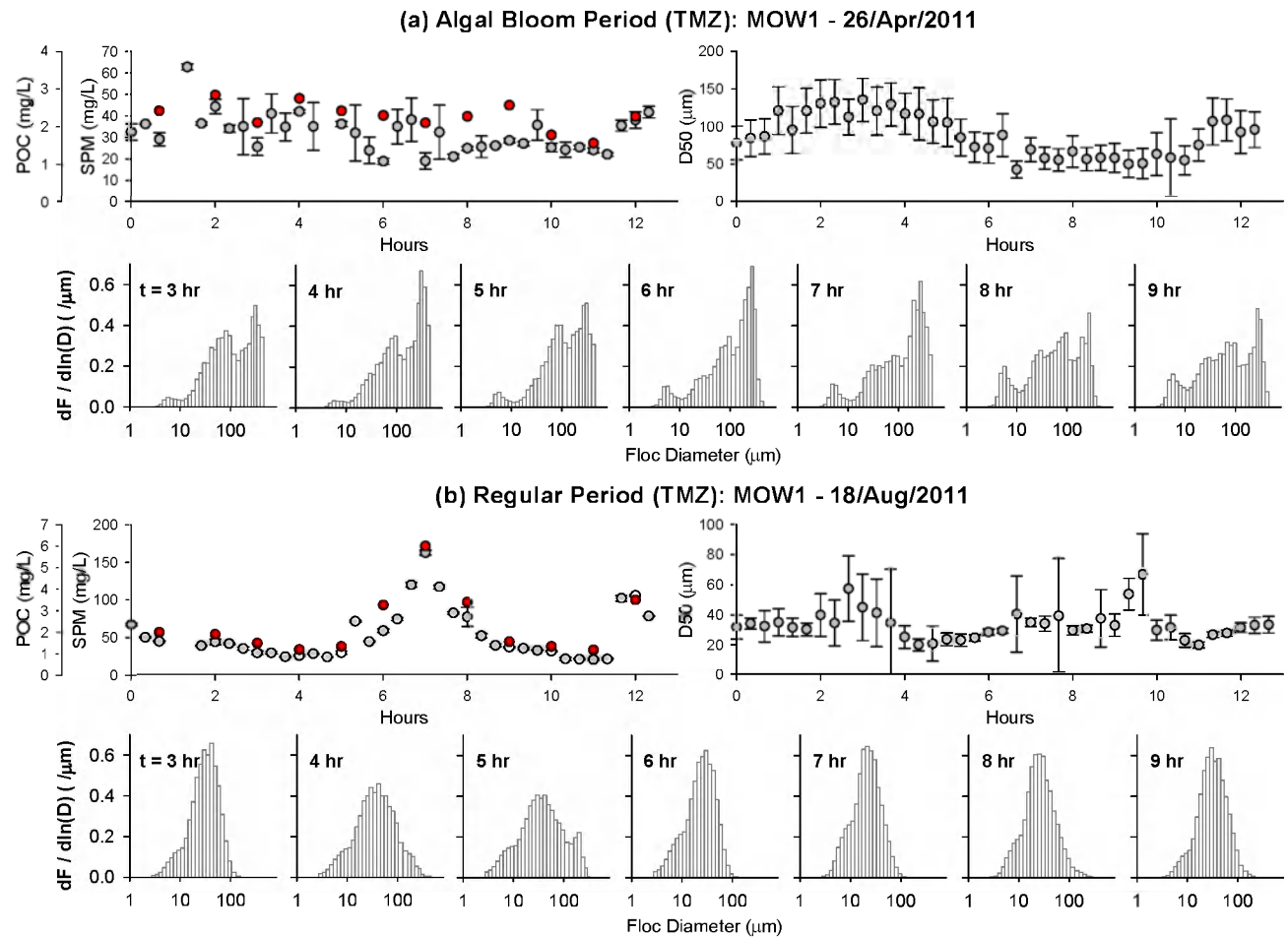


Figure 1. Dynamic behaviors of SPM, POC, median particle size (D50) and PSD during a tidal cycle. PSD and D50 was measured with a LISST 100C.

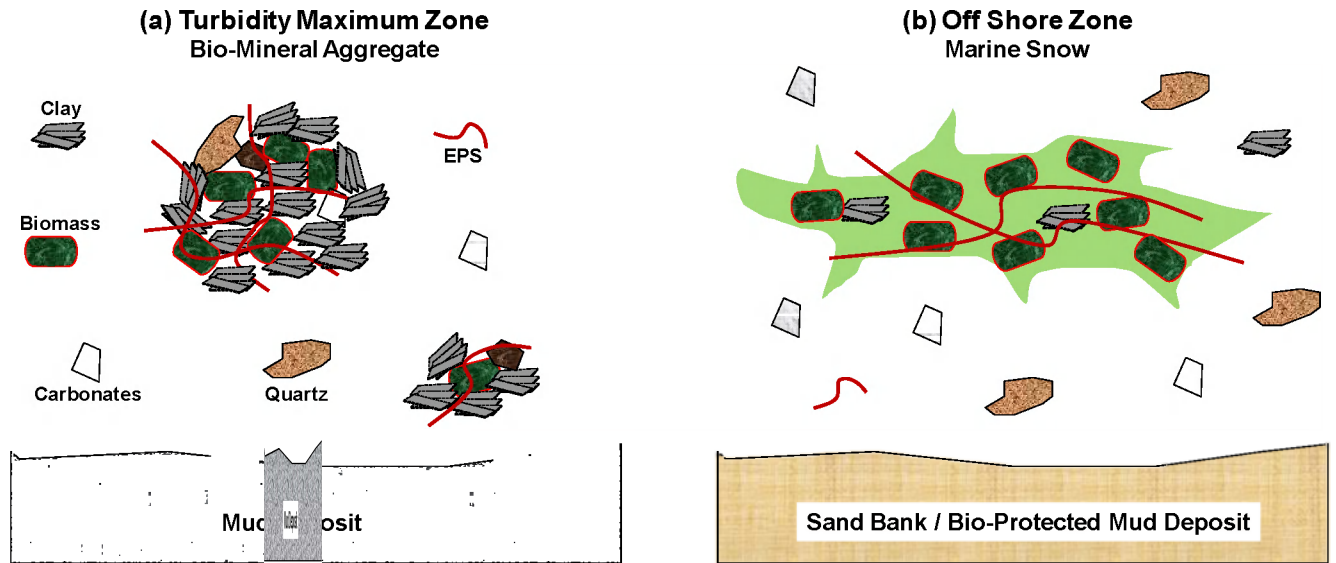


Figure 2. Schematic diagrams of bio-mineral aggregates and biological marine snow.

References

- Borges AV, Gypens N. 2010. Carbonate chemistry responds more strongly to eutrophication than ocean acidification in the coastal zone. *Limnology and Oceanography* 55, 346–353.
- Brion N, Andersson MGI, Elskens M, Diaconu C, Baeyens W, Dehairs F, Middelburg JJ. 2008. Nitrogen cycling, retention and export in a eutrophic temperate macrotidal estuary *Marine Ecology Progress Series* 357, 87-99.
- Cloern JE. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series* 210, 223–253.
- Daro M-H, Breton E, Antajan E, Gasparini S, Rousseau V. 2006. Do Phaeocystis colony blooms affect zooplankton in the Belgian Coastal Zone? In: Rousseau V, Lancelot C, Cox D (Eds.), *Current status of Eutrophication in the Belgian Coastal Zone*. Presses Universitaires de Bruxelles, 61–72.
- Droppo I. 2001. Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrological Processes* 15, 1551–1564.
- Fettweis M, Francken F, Pison V, Ven den Eynde D. 2006. Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Marine Geology* 235, 63–74.
- Fettweis M, Nechad B, Van den Eynde D. 2007. An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in-situ measurements and numerical model results. *Continental Shelf Research*, 27, 1568-1583.
- Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Chen P, Yu JCR. 2012. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Marine Letters* 32, 123-137.
- Lancelot C, Billen G, Sourmia A, Weisse T, Colijn F, Veldhuis M.J.W., Davies A. & Wassman P. (1987). Phaeocystis blooms and nutrient enrichment in the continental coastal zones of the North Sea. *Ambio* 16, 38–46.
- Lee B, Fettweis M, Toorman E, Molz F. 2012. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *Journal of Geophysical Research* 117, C03014.
- Lee B, Toorman E, Molz F, Wang J. 2011. A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments. *Water Research* 45, 2131–2145.
- Maggi F. 2009. Biological flocculation of suspended particles in nutrient-rich aqueous ecosystems. *Journal of Hydrology* 376, 116–125.

- Rousseau V, Leynaert A, Daoud N, Lancelot C. 2002. Diatom succession, silicification and silicic acid availability in Belgian coastal waters (southern North Sea). *Marine Ecology Progress Series* 236, 61–73.
- Simon M, Grossart HP, Schweitzer B, Ploug H. 2002. Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology* 28, 175–211.
- Vos P, De Boer P, Misdorp R. 1988. Sediment stabilization by benthic diatoms in intertidal sandy shoals: Qualitative and quantitative observations. In: de Boer PL et al. (Eds.). *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*, D. Reidel Publishing Company, 511–526.