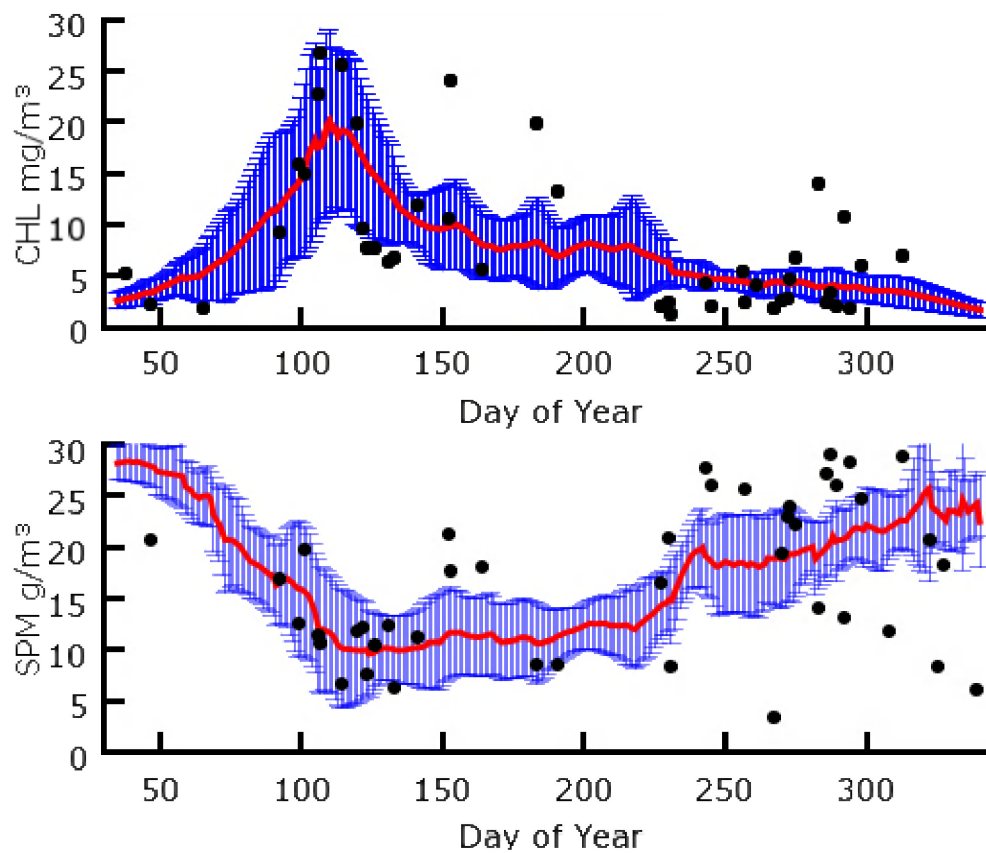


MONitoring en MOdelling van het cohesieve sedimenttransport en evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperatie (MOMO)



Activiteitsrapport (1 januari 2013 -30 juni 2013)

Michael Fettweis, Matthias Baeye, Frederic Francken, Dries Van den Eynde, Dimitri Van der Zande, Vera Van Lancker

MOMO/6/MF/201308/NL/AR/3

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. | Kleverig materiaal in suspensie tijdens de lente en de zomer: Gevolgen voor turbiditeit en aanslibbing | 9 |
| 2.1. | De Belgische kustzone in het kort | 11 |
| 2.2. | Methodologie | 12 |
| 2.2.1. | In situ metingen | 12 |
| 2.2.2. | Golfdata | 13 |
| 2.2.3. | Remote sensing metingen | 13 |
| 2.2.4. | Data reductiemethoden voor PGV | 14 |
| 2.3. | Resultaten | 18 |
| 2.4. | Discussie | 20 |
| 2.4.1. | Fysische factoren | 21 |
| 2.4.2. | Biologische factoren | 22 |
| 2.5. | Besluit | 24 |
| 3. | Referenties | 26 |

Appendix 1: Bijdragen "VLIZ Young Scientists' Day, February 15, Brugge"

Appendix 2: Bijdrage "ASLO Aquatic Sciences Meeting, 18-22 February, New Orleans"

Appendix 3: Bijdrage "Marine and River Dunes, 14-16 April, Brugge"

Appendix 4: 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. *Methods in Oceanography* 3-4, 25-39. doi:10.1016/j.mio.2012.11.001

1. Inleiding

1.1. Voorwerp van deze opdracht

Het MOMO-project (MONitoring en MODellering van het cohesieve sedimenttransport en de evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperatie) 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, Francken F, Van den Eynde D, Van der Zande D, Van Lancker V. 2013. MOMO activiteitsrapport (1 januari 2013 - 30 juni 2013). BMM-rapport MOMO/6/MF/201308/NL/AR/3, 30pp + app.

Backers J, Francken F, Hindryckx K. 2012. Rapport van de RV Belgica Meetcampagnes en Verankering van Meetsystemen MOMO – 2011. BMM-rapport BMM-MDO/2012-17/MOMO/2011, 129pp.

Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Francken F, Nechad B, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2012. 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:

- Baeye M, Fettweis M, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2013. Conceptual model of object burial in turbid waters on a sandy seabed. 4th Int. Conf. on Marine and River Dune Dynamic, 15-16 April, Brugge. (poster)
- Fettweis M, Lee BJ, Baeye M, Van den Eynde D, Chen P, Yu JCS. 2013. Biological effects on flocculation and deposition of fine grained sediments in a coastal turbidity maximum. ASLO Aquatic Sciences Meeting, 18-22 February, New Orleans.
- Backers J, Hyndrickx K, Naudts L, Fettweis M, Baeye M, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2013. The coastal observatory near MOW1: Technical aspects. VLIZ Young Scientists' Day, 15 February, Brugge. (poster)
- Francken F, Baeye M, Fettweis M, Van den Eynde D, Van Lancker V, Backers J, Hyndrickx K, Naudts L. 2013. A large synoptic dataset of coastal observations. VLIZ Young Scientists' Day, 15 February, Brugge. (poster)
- Baeye M, Fettweis M. 2013. Fine-grained sediment dynamics in response to tidal and wind-driven flows in the mouth of the Scheldt estuary. Ems-Scheldt Workshop, 14-15 February, Delmenhorst.
- 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.
- 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.
- 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)

- Lee BJ, Toorman E, Fettweis M. Flocculation of Fine-Grained Cohesive Sediments Developing Multimodal Particle Size Distributions: Field Investigation and Mathematical Modeling. *Ocean Dynamics* (submitted April 2012).
- 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. *Methods in Oceanography* 3-4, 25-39. doi:10.1016/j.mio.2012.11.001.
- 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

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. Kleverig materiaal in suspensie tijdens de lente en de zomer: Gevolgen voor turbiditeit en aanslibbing

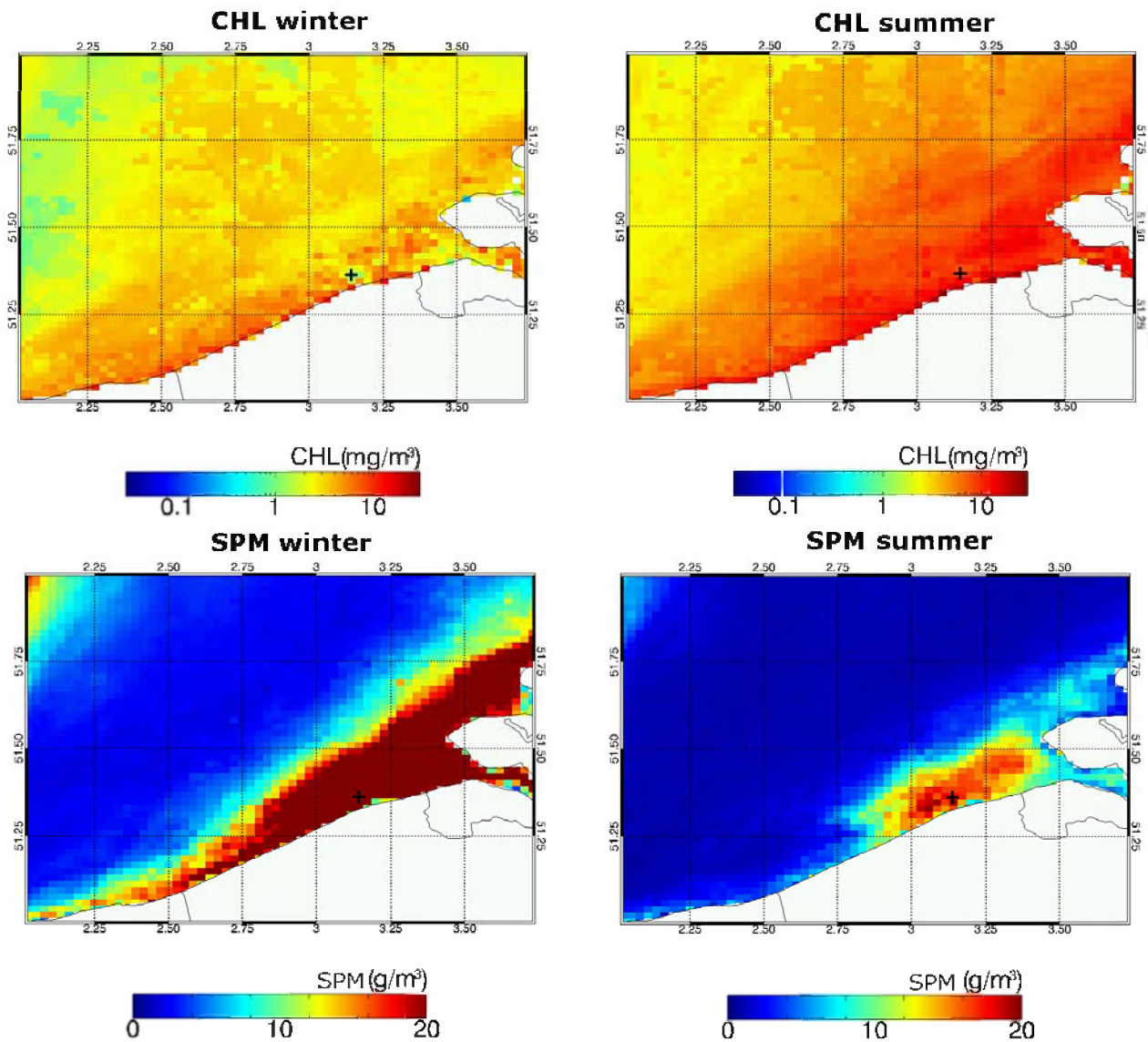
Seizoenale variaties zijn kenmerkend voor veel biogeochemische processen in getijdedomineerde kustzones, zoals de Belgische kustzone en worden veroorzaakt door de seizoenaliteit van de zonnestraling die fysische (b.v. weersomstandigheden, thermische stratificatie, licht) en biologische (b.v. primaire productie) processen stuurt. De SPM (suspended particulate matter) concentratie in de Noordzee kent een typische seizoensgebonden variatie met hoge waarden in de winter en lage in de zomer (b.v. Howarth et al. 1993). Het seizoenale patroon van winden en golven, met meer stormen in de winter dan de zomer, wordt dikwijls aangehaald om deze seizoenaliteit in SPM concentratie te verklaren (Eleveld et al. 2008; Dobrynin et al. 2010). De lente en zomer phytoplanktonbloei werd ook geassocieerd met het seizoenale karakter van de SPM concentratie, doordat er tijdens deze periodes grotere vlokken kunnen ontstaan, de bezinking van suspensiemateriaal dus verhoogt (Jago et al. 2007; Borsje et al. 2008; Van Beusekom et al. 2012) en de erosiegevoeligheid van de bodemsedimenten afneemt (Black et al. 2002). Menselijke activiteiten veroorzaken een grote toevoer aan nutriënten naar de kustnabije zone, met als gevolg eutrofiëring, verandering van de ecosysteemfuncties en een intensifiëring van algenbloei (Lenhart et al. 2010).

Flocculatie omvat zowel de processen van groei van de partikelgrootte als het opbreken ervan in kleinere bestanddelen tengevolge van turbulentie in de waterkolom. Hierdoor wordt zowel de grootte als de valsnelheid van het suspensiemateriaal beïnvloed. Een lage turbulentie stimuleert de aggregatie van kleinere deeltjes en verhoogt de partikelgrootte alsook de valsnelheid. Een hoge turbulentie heeft een omgekeerd effect, vlokken breken uiteen en de valsnelheid neemt af. Flocculatie zorgt ook ervoor dat biomassa en minerale deeltjes gecombineerd worden in grotere aggregaten met dikwijls een multimodale partikelgrootteverdeling (PGV) en verschillende vloksterktes (Verney et al. 2009, Lee et al. 2012). Flocculatie hangt af van de aantrekkingskrachten die ingrijpen op de partikels. De microbiologische producten bestaan uit kleverige organische molekulen (TEP, Transparent Extracellular Polymers) die interageren met de minerale deeltjes en de eigenschappen van het SPM veranderen (Passow et al. 2001). In kustnabije zones is het SPM vooral samengesteld uit minerale partikel en de aanwezigheid van het biologisch materiaal fungeert als een bijkomend bindingsmiddel (Hamm 2002; Fettweis et al. 2006; Maggi 2009; Bainbridge et al. 2012).

Ondanks onze goed zicht op flocculatiodynamica en haar interacties met turbulentie en bio-mineralogische samenstelling, is onze kennis nog steeds onvoldoende om de impact te beschrijven van een hoge primaire productie in de lente en de zomer op de vloggrootte. Deze biologische activiteit induceert veranderingen in afzetting, vorming van vloeibare sliblagen en de resuspensie van cohesieve sedimenten. Zal de afname in SPM concentratie de start van de phytoplankton bloei bepalen in een hoge turbiditeitszoen of zal de algenbloei de SPM concentratie doen verminderen door een verhoging van de flocculatie en de afzetting. De Belgische kustzone is heel troebel en wordt gekenmerkt door intense algenbloeien, het is een relevante locatie om biomassa, SPM concentratie en hydro-meteo condities te koppeln aan seizoenale variaties. Chl-a (CHL) concentratie gemeten met satellieten wordt gebruikt als proxy voor het organisch materiaal. Het doel van dit werk is om de vloggrootte en de concentratie van het suspensiemateriaal te correleren met de seizoenale veranderingen en dit door het gebruik van langdurige in situ

en remote sensing data.

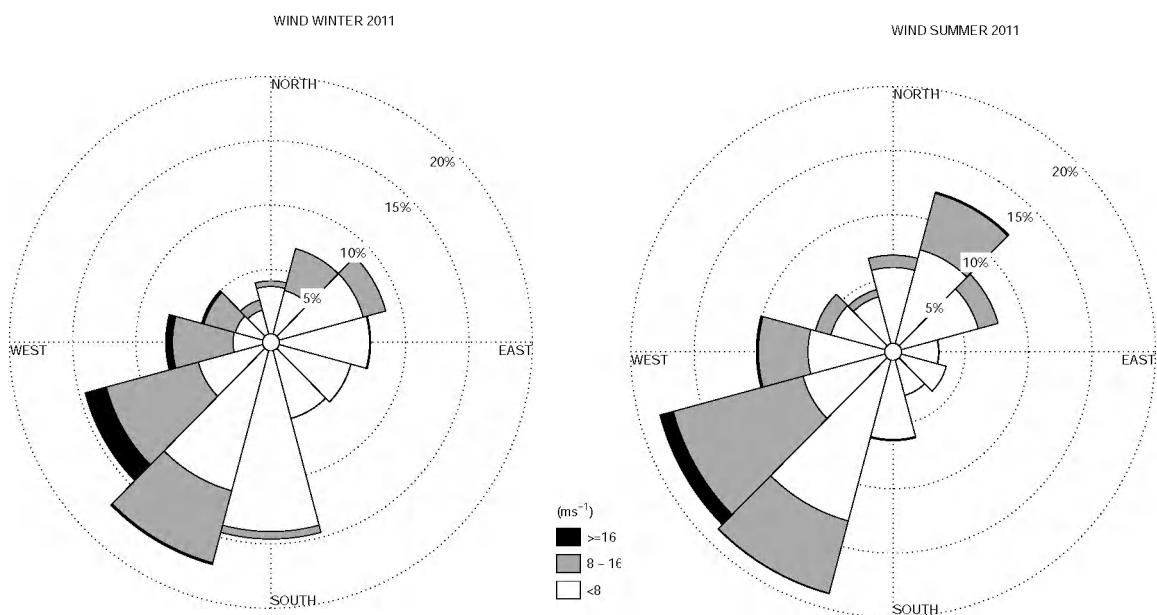
Alhoewel vrij theoretisch is deze studie relevant voor het beheren van de bagger en stortoperaties op lange termijn. We denken in eerste instantie aan de (te) hoge concentratie aan nutriënten in de kustzone en de gevolgen hiervan voor de aanwezigheid van fijkorrelige sedimenten. Is de hoge concentratie aan biomassa mee verantwoordelijk voor de langere verblijftijden van het slib in onze kustzone? Zal een vermindering van de eutrofiëring leiden tot een vermindering van de hoeveelheid slib in de kustzoen en aldus tot een vermindering van de baggerwerkzaamheden? Om deze vragen te kunnen beantwoorden is het absoluut noodzakelijk om de langdurige metingen voort te zetten en om nauwkeurige informatie te verzamelen over de samenstelling van het organisch materiaal, de intensiteit van de algenbloei en de aanwezigheid en aanvoer van nutriënten.



Figur 2.1: De gemiddelde oppervlakte SPM en CHL concentratie in de winter (Januari tot Maart en Oktober tot December) en de zomer (April tot September) van 2011. Data zijn afkomstig van de MERIS satelliet. Het kruisje geeft de ligging van MOW1 weer.

2.1. De Belgische kustzone in het kort

De Belgische kustzone is gelegen in de zuidelijke Noordzee (Figuur 2.1) en is gekenmerkt door hoge SPM concentraties. SPM concentraties liggen tussen 20-100 mg/l aan het oppervlakte en bereiken 100 tot meer dan 3000 mg/l dicht tegen de bodem. In situ metingen zijn beschikbaar voor het station MOW1 (51°21.63' N, 3°7.41' E) gelegen in het turbiditeitsmaximum (waterdiepte bedraagt ongeveer 10 m GLLWS). De zeebodem ter hoogte van MOW1 bestaat uit Holoceen slib met een middelmatige consolidatiegraad, dat bedekt is met een efemere fluffy sliblaag (vloeibaar slib) of een slibhoudende zandlaag met een mediane korrelgrootte van 170 μm . Het suspensiemateriaal vormt vlokken die bestaan uit partikels met een klei-silt grootte, CaCO_3 en organisch materiaal; de mediane partikelgrootte is $<2 \mu\text{m}$. Het getijregime is halfdagelijks en de gemiddelde getijamplitude nabij MOW1 is 4.3 en 2.8 m tijdens respectievelijk spring en doottij. De stromingsellipsen zijn langgerekt in de kustzone en worden stelselmatig ronder naar zee toe. De stroming gemeten te MOW1 varieert tussen 0.2–1.5 m/s tijdens springtij en 0.2–0.6 m/s tijdens doottij. De sterke getijstromingen en de lage zoetwaterafvoer van de Schelde (jaarlijks gemiddelde is 100 m^3/s) zorgen voor een goed gemegde waterkolom met verwaarloosbare verticale stratificatie in temperatuur en saliniteit gedurende het hele jaar. Zuidwestelijke winden domineren het windklimaat gevolgd door winden uit noordoostelijke richtingen (Figuur 2.2). Maximale windsnelheden komen overeen met zuidwestelijke winden, niettemin komen de hoogste golven voor tijdens noordwestelijke winden. De jaarlijkse fytoplanktonbloei start in de vroege lente met een bloei van diatomëen gevolgd door een bloei in april en mei van phaeocystis (Lancelot et al. 1987). Diatomëen en phaeocystis verdwijnen uit de waterkolom in juni, waarschijnlijk veroorzaakt door een tekort aan nutriënten en een verhoogde predatiedruk door heterotrofe planktonsoorten (Rousseau et al. 2002).



Figuur 2.2: Windrozen voor de winter (links) en de zomer (rechts) van 2011.

2.2. Methodologie

2.2.1. *In situ metingen*

Stroming, saliniteit, temperatuur, SPM concentratie en partikelgrootteverdeling (PGV) werden gemeten met een tripode, zie Figuur 2.3. De gemonteerde instrumentatie bestond, onder andere uit drie D&A optical backscatter point sensoren (OBSen), een Sea-bird SBE37 CT en een Sequoia Scientific LISST (laser in situ scattering and transmissometry) 100 X type C. De LISST-100C meet de PGVen in 32 logarithmische verdeelde partikelgrootteklassen gespreid over een range van 2.5 - 500 μm (Agrawal & Pottsmith 2000). De volume concentratie van iedere partikelgrootteklasse werd berekend met een empirische volumecalibratieconstante, die veronderstelt dat de deeltjes sferisch zijn. De onzekerheid op de metingen van een LISST-100C detector kan verschillende oorzaken hebben (Mikkelsen et al. 2007). In het studiegebied zijn deze hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door niet sferische deeltjes, deeltjes met een grootte die buiten het meetbereik van het instrument vallen of een te hoge SPM concentratie. Alle data (uitgezonderd van de LISST) worden opgeslagen in twee SonTek Hydra data logging systemen. De LISST werd gemonteerd op ongeveer 2 meter boven de bodem (verder afgekort als mbb) en de OBSen op 0.2, 1 en 2 mbb. Het OBS signaal werd gebruikt om de SPM concentratie te berekenen. De OBS voltage werd omgezet naar SPM concentratie met behulp van gefilterde waterstalen tijdens verschillende meetcampagnes. Hiaten in de PGV dataserie zijn het gevolg van biofouling (vooral in de zomer), te lage transmissie, te korte batterijspanning of defecten van het instrument. De OBS werden afgeijkt om concentraties te meten tot ongeveer 3 g/l. Tijdens periodes met hoge turbulentie was de SPM concentratie regelmatig hoger dan 3 g/l, de OBS is dan gesatureerd en onderschat aldus de reële SPM concentratie.



Figuur 2.3: Tripode meetsysteem.

De tripode werd verankerd te MOW1 gedurende 3-6 weken, waarna ze terug opgehaald en vervangen werd met een gelijkaardig tripodesysteem. Tien verankeringen werden uitgevoerd tussen 15 December 2010 en 18 Januari 2012. Voor 2011 bleven 208 dagen aan goede LISST data over na kwaliteitscontrole. Hiervan zijn ongeveer 2/3 tijdens de winter (Januari-Maart en October-December) en 1/3 tijdens de zomer (April – September). Door deze langdurige verankering beschikken we over een representatief overzicht dat de natuurlijke variaties, zoals springtij-doodtij en meteorologische gebeurtenissen, weergeeft

2.2.2. *Golfdata*

De golfdata zijn afkomstig van de A2-boei (Meetnet Vlaamse Banken). MOW1 is gelegen in een ondiep gebied waar golfeffecten belangrijk zijn. Door de data van de tripode te groeperen volgens de orbitale golfsnelheid aan de bodem, U_w , kan het geometrisch gemiddelde en de multiplicatieve standaardafwijking van een aantal grootheden berekend worden voor bepaalde omstandigheden, zoals stormcondities of condities met goed weer. De orbitale golfsnelheid aan de bodem werd berekend uit de significante golfhoogte (H_s), door gebruik te maken van de lineaire dispersierelatie van oppervlaktegolven. Een U_w van 0.05 en 0.2 m/s komt overeen met een significante golfhoogte van ongeveer 0.75 en 1.5 m respectievelijk bij een waterdiepte van 10 m.

2.2.3. *Remote sensing metingen*

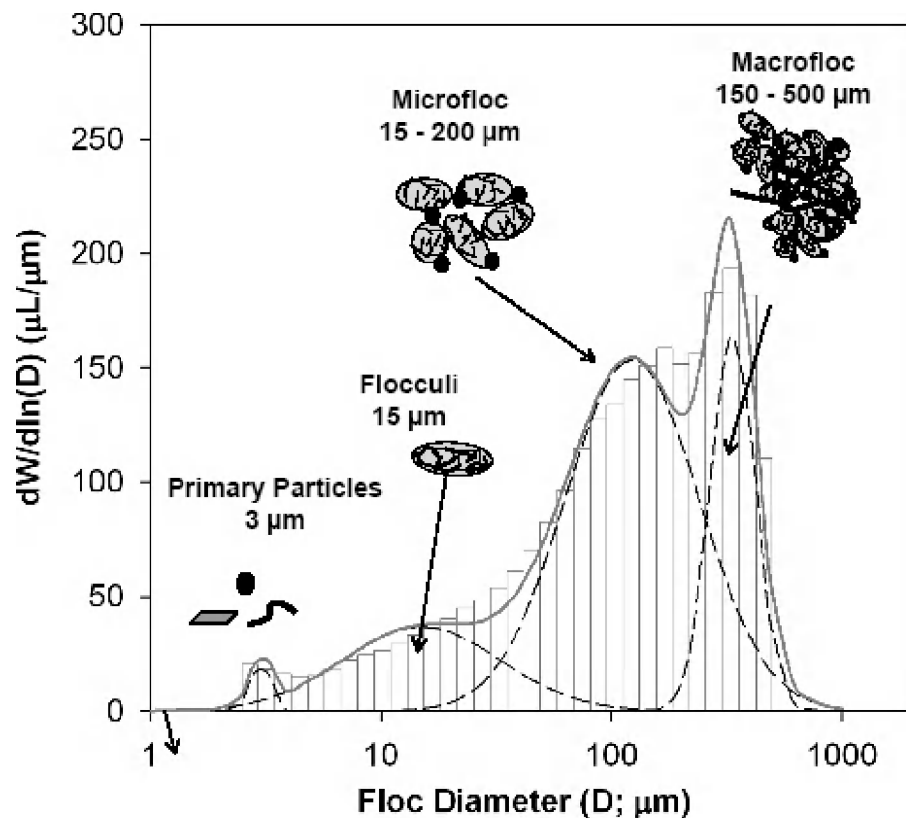
De satellietbeelden gebruikt in deze studie zijn afkomstig van de Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS, <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/meris>). Deze multi-spectrale sensor was aan boord van de ENVISAT, een satelliet met een polaire orbit die gelanceerd werd in 2002 en data leverde tot April 2012. MERIS beelden zijn dagelijks beschikbaar (resolutie is 2 km x 2 km) en geven informatie van de reflectantie over 15 banden gelegen tussen 390 nm en 1040 nm. Oceanografische parameters gerelateerd aan de kleur van de oceaan, zoals chlorophyll-a (CHL) en SPM concentratie werden gehaald uit de reflectantie in specifieke spectrale banden. CHL concentratie werd geschat met behulp van het MERIS case 2 algoritme (versie MEGS 7.5) zoals beschreven in Doerffer & Schiller (2006). Een kwaliteitscontrole werd toegepast die gebaseerd was op de standaard MERIS product confidence flags. De remote sensing SPM concentratie werd berekend uit de reflectantie in de 667 nm band waarbij gebruik gemaakt werd van het generisch multisensor algoritme beschreven in Nechad et al. (2010). In het geval van kwaliteitverlies door fouten in de atmosferische correctie, verstrooid licht of zonneglimmer werden de pixels gemarkeerd als onbetrouwbaar en niet verder gebruikt. Voor zowel CHL als SPM concentratie werden multi-temporele samengestelde kaarten aangemaakt voor de winter en de zomer 2011 (Figuur 2.1). Bijkomend werden CHL en SPM concentratietijdseries opgesteld voor een 5 x 5 kernel ter hoogte van het MOW1 meetstation voor 2011, zie Figuur 2.9. Een CHL en SPM concentratie klimatologie voor de periode 2003 tot 2011 werd opgesteld door de beschikbare data op jaarbasis lineair te interpoleren, zodat een interannueel dagelijks gemiddelde kon berekend worden. De interannuele variatie van CHL en SPM dynamica worden voorgesteld door de gemiddelde waarde \pm standaardafwijking.

Satellieten omvatten grote gebieden, maar hebben een lage resolutie in de tijd en zijn beperkt tot de oppervlakte van oceanen. Hiaten in de serie zijn veelvuldig aanwezig en toe te schrijven aan de aanwezigheid van wolken. Ze komen frequent voor tijdens stormen; zodat dikwijls de hoge SPM concentraties niet gemeten worden door de sensor. Satellieten kunnen daarom gezien worden als een random sampler die gebiased is naar

goede weersomstandigheden (wolkenvrije condities) en ook tot data die onder de saturatiedrempel van het algoritme liggen. Fettweis & Nechad (2011) hebben aangetoond dat 60 satellietbeelden per jaar representatief zijn voor de gemiddelde SPM concentratie gedurende goede weersomstandigheden. Voor 2011 beschikken we te MOW1 over 67 goede SPM concentratie data (46 % in de winter, 54 % in de zomer) en 37 goede CHL concentratiedata (38 % in de winter, 62 % in de summer).

2.2.4. Data reductie methoden voor PGV

De PGV tijdserie weerspiegelt de flocculatie en sedimentdynamica en laat aldus toe om de mogelijke oorzaken van veranderingen in PGV gedurende lange periodes te bestuderen. Een curve-fitting techniek en een statistische methode (entropieanalyse) werden toegepast om de grote hoeveelheid aan data te analyseren en om de seizoensaliteit op een kwantitatieve manier te bestuderen. Door de data te groeperen in een zomer (April tot September) en een winter (October tot Maart) periode wordt rekening gehouden met de seizoensaliteit.



Figuur 2.4: Voorstelling van een multimodale PGV bestaande uit vier lognormale PGVen van primaire deeltjes, flocculi, microvlokken en macrovlokken (Lee et al. 2012).

Door flocculatie van fijnkorrelige minerale deeltjes in kustgebieden, zoals in de zuidelijke Noordzee, ontstaat er een vierledige conceptuele partikelgrootteverdeling, opgebouwd uit primaire deeltjes, flocculi, microvlokken en macrovlokken (Van Leussen 1994; Lee et al. 2012), zie Figuur 2.4. Primaire deeltjes bestaan uit organische en minerale deeltjes (klei en andere mineralen, kalkhoudende deeltjes, picophytoplankton, bacteriën). Flocculi zijn aggregaten die goed gewapend zijn tegen uiteenbreken en bestaan uit vooral kleimineralen. Microvlokken zijn de aggregaten van gemiddelde grootte en macrovlokken

de zeer grote aggregaten die enkele honderden tot duizenden micrometer kunnen bereiken in omgevingen met lage energie en hoog gehalte aan organisch materiaal, maar beperkt blijven tot enkele honderden micrometer in omgevingen met minder organisch materiaal en hogere energie (Fettweis et al. 2006). Primaire deeltjes en flocculi alsook microvlokken komen veel voor tijdens hoogenergetische omstandigheden. Tijdens periodes met lage turbulentie worden macrovlokken gevormd door aggregatie van microvlokken, flocculi en primaire deeltjes. Een curve fitting software (DistFit™, Chimera Technologies Inc., USA) werd gebruikt om uit de multimodale PGVen de vier lognormale curves te extraheren samen met hun geometrisch gemiddelde diameter, standaardafwijking en volumefractie. Aldus kan de statistiek van een grote en ingewikkelde tijdserie op een kwantitatieve en systematische geanalyseerd worden. Een lognormale functie beschrijft een verdeling die scheefgetrokken is naar de kleinere groottes en een multimodale functie is een verdeling die bestaat uit de som van een aantal lognormale verdelingen:

$$\frac{dW}{dD} = \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{W}_i}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_i)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D/\bar{D}_i)}{\ln(\sigma_i)} \right)^2 \right]$$

waarbij D de partikeldiameter, W de volumeconcentratie, \bar{D}_i de geometrisch gemiddelde diameter, σ_i de multiplicatieve standaardafwijking en \bar{W}_i de volumetrische fractie van de i -de unimodale PGV. De DistFit™ software (Chimera Technologies) werd toegepast om de best mogelijke fit, zijnde deze met een minimale afwijking tussen de gefitte en de gemeten PGVen, te berekenen (Whitby 1978). Voor twee modale pieken werden vaste partikelgrootten gedefinieerd van respectievelijk 3 μm (laagste partikelgrootteklasse van de LISST) en 15 μm . De modale pieken van de grotere fracties waren variabel (15–200 μm en 150–500 μm) en de standaardafwijking beperkt tot de range 1 - 2.5, zie Lee et al. (2012). In de gemeten PGV van de LISST kan regelmatig een 'rising tail' waargenomen worden in de kleinste partikelgrootteklassen. Deze wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van deeltjes die tot tien keer kleiner zijn dan de meetrange van de LISST (i.e. 0.25–2.5 μm). Andrews et al. (2010) hebben vastgesteld dat deze fijne out of range deeltjes de gehele PGV kunnen beïnvloeden, met een verhoging van de volumecconcentratie in de eerste twee partikelgrootteklassen van de LISST, een verlaging in de volgende klassen en - verrassend – een verhoging in de grootste klassen. De gefitte curve voor de 3 μm mode geeft waarschijnlijk deels deze onnauwkeurigheid van de LISST weer om kleine deeltjes te meten. De volumefractie berekend voor deze modus moet daarom geïnterpreteerd worden als een aanduiding voor de aanwezigheid van zeer kleine deeltjes of primaire partikels. Deze onnauwkeurigheid kan het onderscheid tussen de pieken van de primaire deeltjes en de flocculi vergroten en kan ervoor zorgen dat er een kleine piek ontstaat in de macrovlokken tijdens maximale stroming.

De entropieanalyse evalueert de lukraakheid van een gebeurtenis (zoals een PGV) en kent deze toe aan een groep met gelijkaardige karakteristieken. Entropieanalyse is een vorm van multivariate statistiek. Omdat gebruik gemaakt wordt van het volledige spectrum, zonder een vooraf gedefinieerde verdeling te veronderstellen, is deze methode geschikt voor zowel uni-, bi- als multimodale verdelingen (Woolfe et al. 1998). Entropie analyse werd met succes toegepast op partikel en vloggrootte van het SPM (Mikkelsen et al. 2007; Fettweis et al. 2012). Vooraleer de analyse te starten, werd het getijsignaal in de PGV tijdserie eruitgefiltered met behulp van een lowpass filter. Op deze manier kunnen de langdurige variaties in PGV geëvalueerd worden t.o.v. de langdurige variaties in hydro-meteorologie en seizoenaliteit. De analyse werd uitgevoerd met de FORTRAN routine van

Johnston & Semple (1983) die uitgebreid was met de Calinski-Harabasz pseudo F-statistiek module om het optimale aantal groepen te berekenen (Orpin & Kostylev 2006).

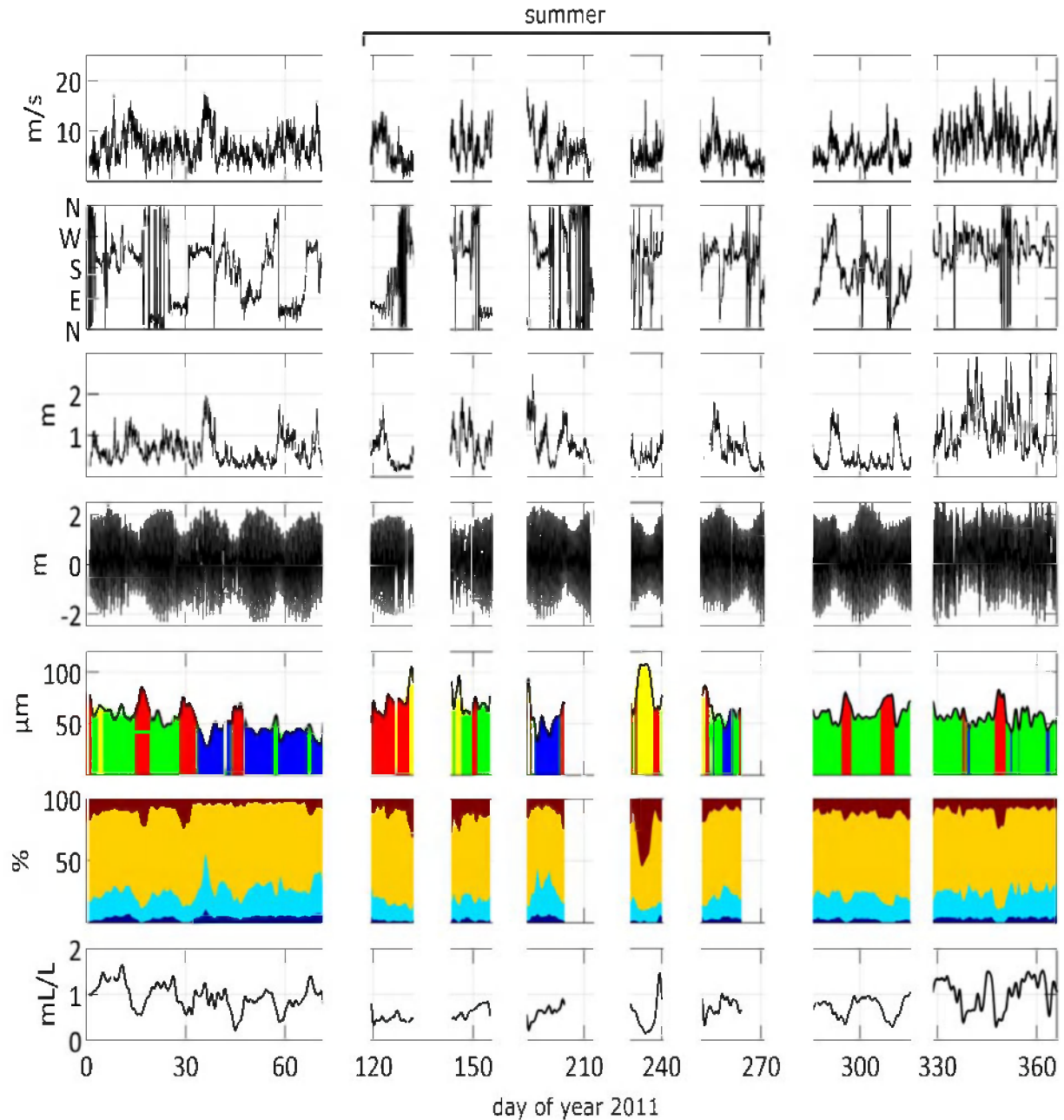
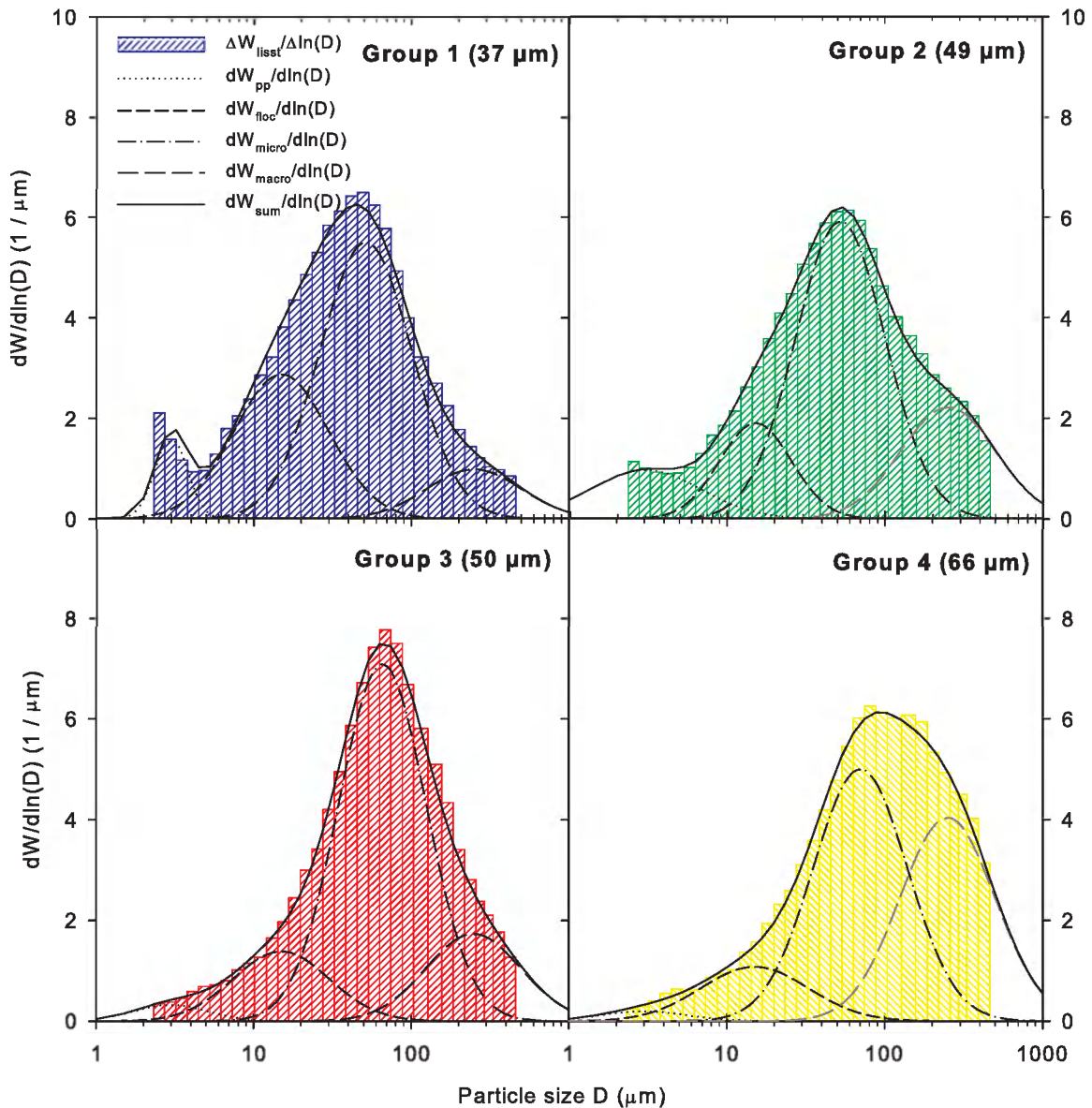


Figure 2.5: 2011 tijdserie (in dagen) voor (van boven naar onder) windsnelheid; windrichting; significante golghoogte; getijhoogte; low-passed gefilterde mediane vloggrootte samen met de entropie groepen (groep 1: blauw, groep 2: groen, groep 3: rood, groep 4: geel, zie Figuur 2.6); frequentie van de vier SPM bestanddelen bekomen door curve-fitting: primaire deeltjes (donker blauw, flocculi (licht blauw), microvlokken (geel) en macrovlokken (bruin) en de volumeconcentratie van het SPM.



Figuur 2.6: De PGV van de vier entropiegroepen van de low-pass gefilterde data. De vier lognormale functies die de primaire deeltjes, flocculi, microvlokken en macrovlokken voorstellen, worden eveneens getoond.

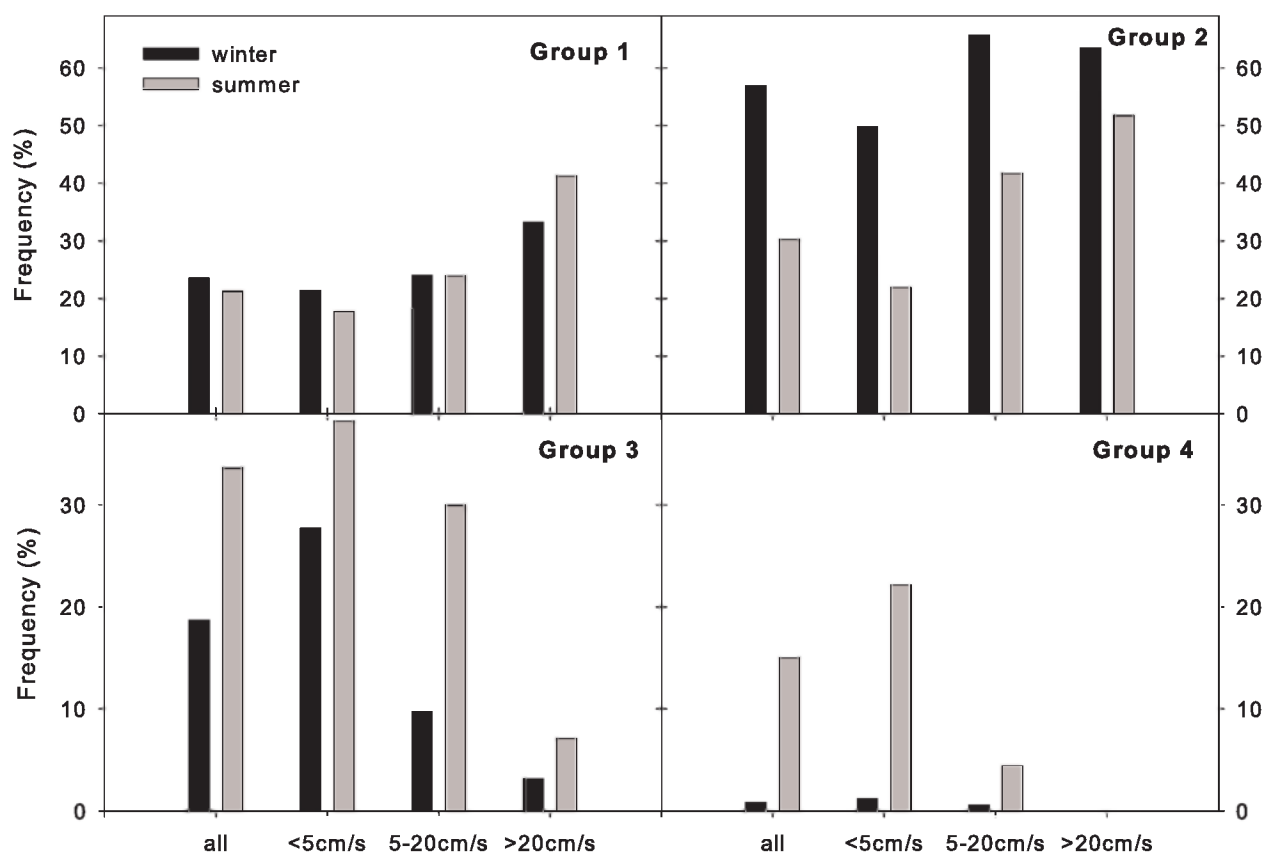
Tabel 2.1: Frequentie (%) van primaire deeltjes (PD), flocculi, microvlokken en macrovlokken voor de vier entropiegroepen (Figuur 2.6). De geometrisch gemiddelde vlok grootte wordt tussen haakjes weergegeven voor de micro- en macrovlokken. Primaire deeltjes en flocculi hebben een constante grootte van respectievelijk 3 μm en 15 μm .

| | PD | Flocculi | Microvlokken | Macrovlokken |
|---------|------|----------|--------------------------|---------------------------|
| Groep 1 | 5.6 | 29.5 | 54.9 (52 μm) | 10.1 (250 μm) |
| Groep 2 | 10.7 | 13.9 | 54.1 (52 μm) | 21.4 (250 μm) |
| Groep 3 | 2.3 | 14.1 | 66.0 (66 μm) | 17.4 (249 μm) |
| Groep 4 | 1.7 | 11.7 | 47.7 (70 μm) | 38.8 (249 μm) |

2.3. Resultaten

De PGV tijdreeks geeft een zicht op flocculatie en het transport van de samenstellende deeltjes en aggregaten doorheen een jaar. De verdeling in de tijd van de vierledige structuur van de suspensiemateriaal (primaire deeltjes, flocculi, micro- en macrovlokken) wordt getoond in Figuur 2.5 samen met de resultaten van de entropie analyse van de low-pass gefilterde PGVen, de low passe gefilterde SPM volumeconcentratie, de significante golfhoogte, getijhoogte, windrichting en -snelheid. De curve-fitting analyse werd toegepast op de 10 minuten gemiddelde PGVen; voor de figuur werden deze resultaten na analyse low-pass gefilterd. De PGV van de vier entropie groepen wordt getoond in Figuur 2.6. De groepen zijn gerangschikt in stijgende lijn van mediane partikelgrootte. De entropieanalyse was uitgevoerd op de low-passed gefilterde data. De bekomen classificatie in vier groepen weerspiegelt de doortij-springtij en de meteorologische variaties en dus niet de getijgebonden variaties. De PGV van deze vier groepen werd ook geanalyseerd met de curve-fitting software, zie Figuur 2.6 en Tabel 2.1. Het verschil tussen groep 1 en 2 is niet zo groot, maar toch significant. In de winter komen groepen 1 en 2 vooral tijdens tijdens stormperiodes en/of springtij voor. Uit de resultaten blijkt dat er een verschuiving van groep 2 in Januari naar groep 1 in Februari en Maart optreedt. Deze verandering kan gecorreleerd worden met veranderingen in windrichting van S-SW naar oostelijke richtingen (SE-E-NE). Groep 3 is vooral geassocieerd met doortij en lage golven, alhoewel het in Mei ook veelvuldig aanwezig was tijdens springtij. De turbulentie tijdens de periode in Mei 2011 met groep 3 was blijkbaar niet hoog genoeg om de vlokken op te breken in de bouwstenen zodat er ondanks springtij een hogere frequentie aan micro- en macrovlokken aanwezig was. Groep 4 komt vooral voor in de zomer en wordt gekenmerkt door de aanwezigheid van veel macrovlokken. Deze vertegenwoordigen ongeveer 40% van de totale volumeconcentratie. Figuur 2.7 toont de frequentie van de vier entropie groepen als een functie van de seizoenen en de orbitale golfsnelheid. Tijdens periodes met hoge golven komen groepen 1 en 2 meer voor, terwijl de frequentie van groep 3 beduidend lager en groep 4 afwezig is. Seizoensvariëaties in de verdeling van de groepen is zichtbaar. Groep 2 is het meest frequent aanwezig in de winter (57 %), gevolgd door groep 1 (24 %), 3 (19 %) en 4 (1 %). Groep 3 kan geassocieerd worden met doortij en groep 2 met springtij bij kalm weer. Tijdens de zomer is groep 3 de meest frequente (34 %) gevolgd door groep 2 (30 %), 1 (21 %) en 4 (15 %), waarbij groep 4 typisch geassocieerd kan worden met doortij en groep 3 met springtij en kalm weer.

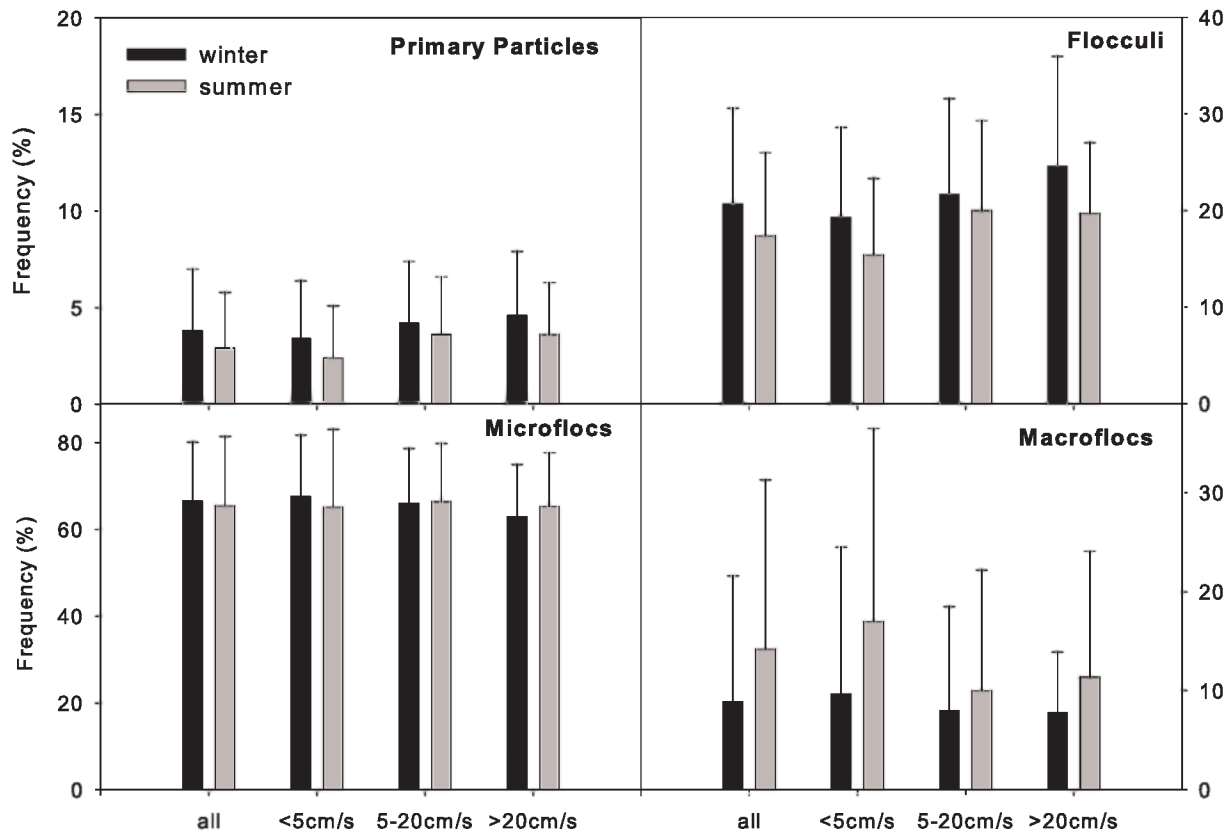
De classificatie met behulp van de curve-fitting is gebaseerd op fysische en niet wiskundige criteria, zoals het geval is bij de entropieanalyse. De resultaten tonen dat de microvlokken het meest voorkomen in termen van volumeconcentratie, gevolgd door flocculi, macrovlokken en primaire deeltjes. De jaarlijks gemiddelde frequenties van deze vier componenten zijn 3 % primaire deeltjes, 20 % flocculi, 66 % microvlokken en 11 % macrovlokken. De geometrisch gemiddelde grootte van de microvlokken is $67 \pm 5 \mu\text{m}$ (alle data), $64 \pm 6 \mu\text{m}$ (winter) en $72 \pm 3 \mu\text{m}$ (zomer), en van de macrovlokken $222 \pm 4 \mu\text{m}$ (alle data), $221 \pm 6 \mu\text{m}$ (winter) en $224 \pm 10 \mu\text{m}$ (zomer). In tegenstelling met microvlokken, waar de frequentie geen seizoenaal signaal heeft, kent de frequentie van macrovlokken duidelijk een seizoenaal signaal. Macrovlokken komen meer voor in de zomer dan in de winter (14.2 t.o.v. 8.9 %, zie Figuur 2.8). De frequentie aan macrovlokken in het SPM gedurende een stormperiode ($U_w > 0.20 \text{ m/s}$), bedraagt gemiddeld 10.8 % in de zomer en 6.9 % in de winter. Tijdens kalm weer zijn macrovlokken bijna dubbel zo frequent aanwezig in de zomer dan in de winter (17.3 vs. 9.4 %). De hogere/lagere frequentie aan macrovlokken in de zomer/winter wordt gecompenseerd door de lagere/hogere frequentie aan primaire deeltjes en flocculi.



Figuur 2.7: Frequentie (%) van de vier entropiegroepen voor de zomer en de winter en di in functie van de orbitale golfsnelheid aan de bodem.

Tabel 2.2: Geometrisch gemiddelde SPM concentratie en standaardafwijking (mg/l en $\mu\text{l/l}$) geklasseerd volgens seizoen en golfcondities. De SPM concentraties werden gemeten met een OBS op 0.2 en 1 m boven de bodem (mbb) en een LISST op 2 mmb.

| Winter 2011 | | | |
|---------------------------|----------------|--------------|---------------------------|
| | 0.2 mab (mg/l) | 1 mab (mg/l) | 2 mab ($\mu\text{l/l}$) |
| all | 474 */ 2.2 | 145 */ 2.6 | 668 */ 1.9 |
| $U_w < 5\text{cm/s}$ | 444 */ 2.0 | 129 */ 2.7 | 654 */ 1.9 |
| $5 < U_w < 20\text{cm/s}$ | 486 */ 2.3 | 157 */ 2.5 | 702 */ 2.0 |
| $U_w > 20\text{cm/s}$ | 489 */ 2.5 | 172 */ 2.0 | 685 */ 2.0 |
| Summer 2011 | | | |
| all | 377 */ 2.6 | 117 */ 2.2 | 414 */ 2.2 |
| $U_w < 5\text{cm/s}$ | 372 */ 2.7 | 116 */ 2.2 | 410 */ 2.1 |
| $5 < U_w < 20\text{cm/s}$ | 427 */ 2.5 | 128 */ 2.1 | 490 */ 2.1 |
| $U_w > 20\text{cm/s}$ | 472 */ 2.4 | 121 */ 1.8 | 334 */ 2.0 |



Figuur 2.8: Frequentie van de primaire deeltjes, flocculi, micro- en macrovlokken tijdens de zomer en de winter van 2011 en in functie van de orbitale golfsnelheid. De geometrisch gemiddelde grootte van de microvlokken is $64 \pm 6 \mu\text{m}$ (winter) en $72 \pm 3 \mu\text{m}$ (zomer), en $221 \pm 6 \mu\text{m}$ (winter) en $224 \pm 10 \mu\text{m}$ (zomer) voor de macrovlokken. Primaire deeltjes en flocculi hebben een constante grootte van $3 \mu\text{m}$ en $15 \mu\text{m}$ respectievelijk.

De oppervlakte en bodem nabije SPM concentraties hebben een seizoenale variatie (Figuur 2.1 en 2.5, Tabel 2.2). Dicht tegen de bodem is de concentratie ongeveer 20 % hoger in de winter dan in de zomer bij kalm weer. Met toenemende golfwerking verminderen deze verschillen tot 14 % ($0.05 < U_w < 0.2 \text{ m/s}$) en 4 % ($U_w > 0.2 \text{ m/s}$) op 0.2 mbb. Hoger in de waterkolom (1 mbb) worden gelijkaardige trends waargenomen, uitgezonderd bij hoge golven ($U_w > 0.2 \text{ m/s}$), waar de SPM concentratie daalt tijdens de zomer. Dit laatste is waarschijnlijk het gevolg van de beperkte hoeveelheid aan data tijdens de zomer. Oppervlakte SPM concentraties te MOW1 zijn ongeveer 100 % hoger in de winter dan in de zomer.

2.4. Discussie

Seizoenaliteit van SPM en CHL concentratie is duidelijk zichtbaar in de satellietbeelden (Figuur 2.1), met een lagere/hogere oppervlakte SPM concentratie en een hogere/lagere oppervlakte CHL concentratie tijdens respectievelijk de zomer/winter. SPM dynamica wordt gecontroleerd door flocculatie, wat de partikelgrootte en afzetting van het SPM beïnvloed. Flocculatie hangt af van de turbulentie door getij, wind en golven en van de oppervlakte eigenschappen van de gesuspendeerde deeltjes die zowel van electrochemische als microbiële oorsprong zijn. Microbiële producten, zoals TEP, worden uitgescheiden door algen en bacteriën en beïnvloeden de aggregatie (Logan et al. 1995; Engel 2000). In dit hoofdstuk wordt besproken in hoeverre de seizoenaliteit in vloggrootte veroorzaakt

wordt door fysische en/of biologische factoren.

2.4.1. Fysische factoren

De hydrodynamica (i.e. stroomsnelheid en turbulentie) varieert met de meteorologische condities, doottij-springtij en getij. Gezien getijden seizoenafhankelijk zijn, zullen we hier enkel kijken naar meteorologie. Het windklimaat in het studiegebied wordt gekenmerkt door vooral SW en NE winden (Figuur 2.2). Deze veranderen de richting en de sterkte van het 'alongshore' watertransport. Tijdens de zomer zijn de belangrijkste windsectoren WSW en NNE, terwijl tijdens de winter S tot SW en NE overheersen. Deze kleine shifts in de belangrijkste windsectoren worden vermoedelijk veroorzaakt door de zomerlijke zeebries, maar hebben hoogstwaarschijnlijk geen significant effect op het residuele alongshore transport. Veranderingen in het residuele alongshore transport beïnvloeden de positie van het turbiditeitsmaximum en dus ook van de SPM concentratie in de meetlocatie (Baeye et al. 2011). De invloed van deze alongshore advectie weerspiegelt zich in de verschuiving van entropie groepen 2 en 3 naar groepen 1 en 2 gedurende de eerste drie maanden van 2011 (Figuur 2.5). De verschillen zijn gecorreleerd met veranderingen in windrichting van zuid-zuidwestelijke richtingen naar meer oostelijke richtingen (SE tot NE) en duiden dus ook op een andere bron van het SPM op de meetlocatie. Tijdens SW winden wordt het suspensiemateriaal getransporteerd naar het NE en komen de PGVen overeen met deze van groep 2 (springtij) en groep 3 (doottij), terwijl gedurende oostelijke windrichtingen het SPM uit het Scheldeestuarium afkomstig is en naar het SW wordt getransporteerd. Tijdens deze omstandigheden overheerst groep 1 bij springtij en stormen de PGVen en groepen 2 en 3 bij doottij.

De frequentie van de twee dominante windrichtingen heeft geen significante seizoenale variatie en dit kan dus niet de seizoenaliteit van de SPM concentratie verklaren. De data tonen dat de verschillen in windrichting en –sterkte tussen de seizoenen klein zijn. Windsnelheden kleiner dan 8 m/s komen meer voor in de zomer (55 % t.o.v. 46 %), terwijl de windsnelheden tussen 8 m/s en 16 m/s frequenter voorkomen in de winter (49 % t.o.v. 42 %). Stormen (>16 m/s) zijn frequenter in de winter (5 %) dan in de zomer (3 %). Gelijkaardige resultaten werden bekomen voor de golven (Tabel 2.3). De gemiddelde significante golfhoogte (H_s) in de winter 2011 was 0.55 m en in de zomer 0.50 m. De gemiddelde H_s tijdens de LISST metingen te MOW1 bedroeg 0.56 m in de zomer en 0.63 m in de winter. Het gemiddelde tijdens de metingen was dus iets hoger dan het jaarlijks gemiddelde. Significante golfhoogten groter dan 1.5 m tijdens de LISST metingen kwamen iets minder frequent voor in de zomer dan in de winter (2 % t.o.v. 7 %), terwijl perioden met lage golven (< 0.75 m) minder frequent voorkwamen in de winter (60 % t.o.v. 65 %). Een duidelijker seizoenaal signaal is aanwezig voor de golfhoogten groter dan 1.5 m met 84% ervan in de winter. De gemiddelde van deze groep golven was ook hoger in de winter dan de zomer (1.89 t.o.v. 1.60 m).

Tabel 2.3: Gemiddelde significante golfhoogte (m) */ multiplicatieve standaardafwijking voor 2011 te MOW1. Het percentage geeft de frequentie van voorkomen weer.

| | Winter 2011 | Summer 2011 |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| all | 0.55 */ 2.0 | 0.50 */ 1.9 |
| $h_s < 0.75$ m | 0.37 */ 1.6 (65%) | 0.37 */ 1.6 (70%) |
| $0.75 \text{ m} < h_s < 1.50$ m | 1.03 */ 1.2 (27%) | 1.01 */ 1.2 (28%) |
| $h_s > 1.50$ m | 1.89 */ 1.2 (7%) | 1.60 */ 1.1 (2%) |

Vlokgrootte en SPM concentratie werden geëvalueerd in functie van de orbitale golfsnelheid. De geometrisch gemiddelde SPM concentratie te MOW1 neemt toe van 377 mg/l (117 mg/l) in de zomer naar 474 mg/l (145 mg/l) in de winter en dit op 0.2 mbb (1 mbb). De invloed van de golven is significant (Tabel 2.2): de geometrisch gemiddelde SPM concentratie is in de winter tijdens kalm weer ongeveer 50 mg/l lager dan tijdens stormperiodes. Tijdens de zomer is de invloed van de golven minder uitgesproken, mogelijk is dit het gevolg van het relatief gering aantal data met een $U_w > 0.2$ m/s. De SPM volumeconcentratie vertoont een ander patroon dan de SPM massaconcentratie. De hoogste volumeconcentratie treedt op bij middelmatige golfcondities. Gedurende hogere golven vermindert de volumeconcentratie (Tabel 2.2). Dit is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van het feit dat de volumeconcentratie afhankelijk is van de effectieve dichtheid en de vlokgrootte. Bij hoge golven wordt een groot deel van de macrovlokken, die een lage effectieve dichtheid hebben, opgebroken in kleinere deeltjes met een hogere dichtheid, waardoor de volumeconcentratie daalt.

SPM (massa en volume) concentratie zijn duidelijk gecorreleerd met golfhoogtes en wind. De invloed van een storm op de SPM concentratie is niet beperkt tot de duur van de storm, maar ook nog tot een zekere periode na de storm. De duur van deze storminvloed hangt af van de windrichting en -sterkte en de golfhoogte en kan tot enkele dagen na de storm duren (Fettweis et al. 2010). De invloedperiode is langer bij hogere golven, omdat dan meer sedimenten geresuspendeerd of gefluidiseerd worden. Deze invloed is vooral zichtbaar in de bodemlaag en neemt naar het wateroppervlakte af. Vooral stormen met golfhoogtes groter dan 2 m veranderen de SPM concentratie gedurende een langere periode (Fettweis et al. 2010). Deze gebeurtenissen blijven niettemin uitzonderingen. Golfhoogtes boven de 2 m kwamen in 2011 vooral voor in de winter en dit gedurende 2.8 dagen. Indien we aannemen dat de storminvloed 5 keer langer duurt dan de storm zelf, dan zijn er ongeveer 14 dagen met hogere SPM concentraties opgetreden in de winter. Dit is 8% van de tijd en verklaard niet de 25% hogere SPM concentratie en de 60 % hogere SPM volumeconcentratie nabij de bodem en de bijna 100 % hogere oppervlakte SPM concentratie in de winter dan in de zomer.

OBS werden ontworpen om vooral gevoelig te zijn voor SPM massaconcentratie; effecten van partikelgrootte zijn een factor 10 minder uitgesproken en deze van flocculatie nog minder (Downing 2006). OBS zijn het meest gevoelig voor fijnkorrelig materiaal. Indien de samenstelling van het SPM verandert van zeer fijn materiaal (klei en silt deeltjes en hun vlokken) naar silt- of zanddeeltjes zonder dat de concentratie verandert, dan zal de SPM concentratie schijnbaar dalen omdat de optische backscatter daalt. Zo'n een schijnbare vermindering in SPM concentratie werd waargenomen in de omgeving tijdens een NE storm, wanneer zandkorrels geresuspendeerd werden (Fettweis et al. 2012). Echter, omdat NE stormen zelden optreden, zullen deze onnauwkeurigheden in SPM concentratie de gemiddelde waarde niet beduidend beïnvloeden.

2.4.2. Biologische factoren

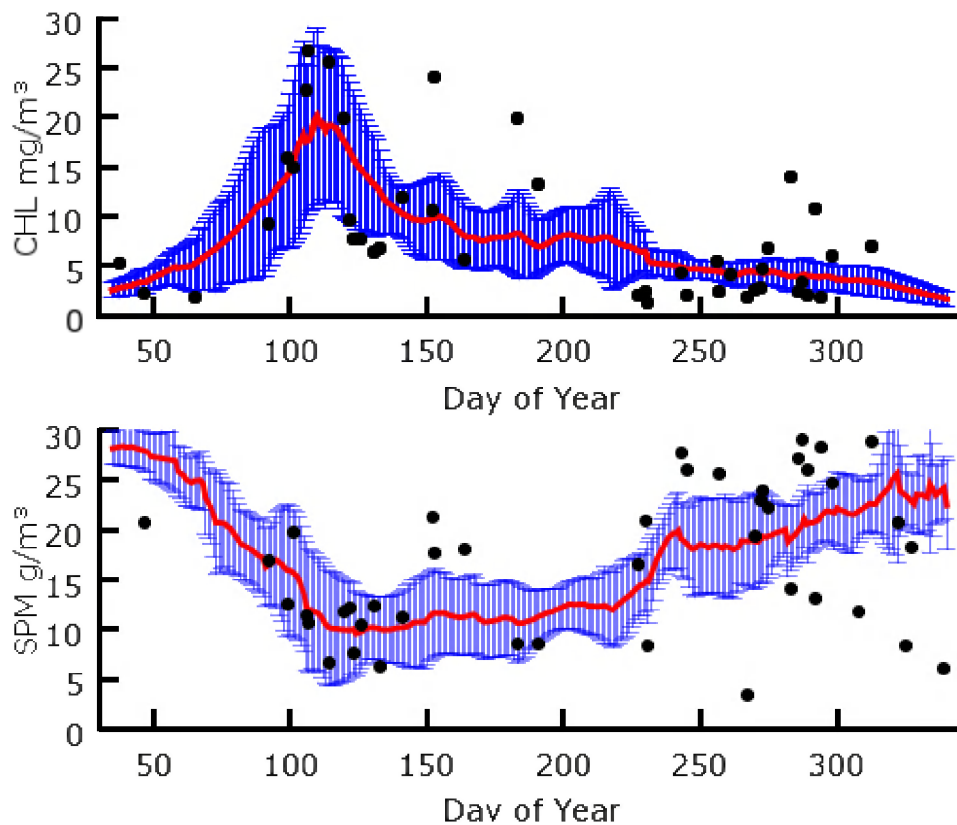
Flocculatie in kustgebieden hangt af van de aantrekkingskrachten tussen de gesupendeerde deeltjes. Deze krachten zijn een functie van de oppervlakte-eigenschappen van de deeltjes, welke op hun beurt een fysicochemische en/of microbiologische oorsprong hebben. De microbiële stoffen bestaan uit kleverige organische moleculen (TEP) die reageren met de minerale deeltjes en die de eigenschappen van het SPM veranderen (Passow et al. 2001). De toename in CHL concentratie in de lente (Figuur 2.9) geeft de start van de algenbloeiperiode aan en hiermee dus ook de start van het biologisch productieve seizoen. De oppervlakte CHL concentratie daalt na de lente algenbloei om dan terug toe te nemen tijdens een zomerbloei tussen dag 150 en 190. Deze zomerbloei is

minder uitgesproken dan deze in de lente, maar het resulteert in voldoende hoge CHL concentratie om samen met de TEP productie van bacteriën en macrobenthos, de hoge frequentie aan macrovlokken te behouden. Door de opdeling van de PGVen in vier lognormale curves in de samenstellende constituenten voorstellen, kan er men zien dat – ondanks een seizoensgebonden signaal in de mediane vloggrootte (D50-zomer: 64 μm , D50-winter: 51 μm) - de grootte van de macrovlokken enkel weinig verschilt tijdens de seizoenen (zomer: 224 μm , winter: 221 μm). Het gehalte aan macrovlokken (of de frequentie) in het SPM heeft daarentegen een seizoenaal signaal. Macrovlakken komen meer voor in de zomer dan in de winter en dit los van de hydrodynamische of golfcondities (Figuur 2.8). Gelijkaardige resultaten komen voort uit de low-pass gefilterde entropiedata. Gedurende doortij en lage golven is groep 4 dominant in de zomer en groep 3 in de winter. Groep 4 wordt gekenmerkt door 39 % macro- en 48 % microvlokken, terwijl groep 3 uit 17 % macro- en 66 % microvlokken bestaat.

Deze bevinding is ietwat in contrast met de bevindingen van anderen, die argumenteren dat voor een bepaald turbulentieniveau de vlokken groter worden indien er meer organisch materiaal aanwezig is (Lunau et al. 2006; Cross et al. 2013). De productie van TEP in de oceanen kan gecorreleerd worden met de algenbloei en de aanwezigheid van bacteriën, omdat de vorming van grote aggregaten na een algenbloei vooral gecontroleerd werd door de TEP concentratie (Logan et al. 1995; Mari & Burd 1998; Passow et al. 2001). Onze PGV metingen uit een turbiditeitsmaximum suggereren dat de maximale vloggrootte vooral gecontroleerd wordt door turbulentie (Kolmogorov microschaal) en de flocculatietijd. De snelheid van het uiteenvallen van de grote vlokken en de evenwichtsgrootte van deze vlokken in een turbulente omgeving hangen af van hun sterkte (Kranenburg 1999; Winterwerp 2002). De getijellipsen in de kustzone zijn langgerekt en de tijd van vlokvorming is beperkt tot kentering. Tijdens deze relatief korte perioden kunnen de vlokken niet hun evenwichtsgrootte bereiken. De mineralogische samenstelling van het SPM vertoont enkel kleine veranderingen (Zeelmaekers 2011). De data wijzen dus erop dat de TEP, die gevormd worden tijdens de lente en de zomer, de sterkte van de macrovlokken vergroot eerder dan hun grootte. In onze data kunnen we zien dat groep 3, die heel typisch voorkomt in de winter tijdens doortij, dominant aanwezig was in Mei 2011 tijdens eens springtij (omstreeks dag 120 in Figuur 2.5). Turbulentie was duidelijk toen niet sterk genoeg om de vlokken op te breken en om de PGV te veranderen in deze van groep 2. Anders gesteld de vlokken waren te sterk om tijdens een springtij opgebroken te worden, iets wat wel gebeurt in de winter. Gelijkaardige resultaten worden beschreven door Lee et al. (2012) die vonden dat aggregaten beter bestand waren tegen uiteenvallen gedurende een getijcyclus in April 2008 dan in de winter. Zelf tijdens een storm in de zomer is de turbulentie niet sterk genoeg om alle grote vlokken op te breken, zie b.v. omstreeks dag 150 en 200 wanneer de golfhoogtes meer dan 2 m zijn, iets wat wel gebeurde in de winter. Door de aanwezigheid van sterkere en dus grotere vlokken is de bezinkssnelheid groter en daalt de SPM concentratie.

De hogere frequentie aan macrovlokken in de zomer wordt gecompenseerd door een lagere frequentie aan primaire deeltjes en flocculi. De grootte en frequentie van de microvlokkenpopulatie in de PGVen, waaruit het grootste deel van het SPM bestaat, heeft bijna geen seizoenaal signaal (Figuur 2.8). De overheersing van microvlokken kan mogelijk verkaald worden door de te lage TEP concentratie ten opzichte van de concentratie aan minerale deeltjes. Het kleverige organisch materiaal zal snel gesatureerd worden door de minerale deeltjes en zal dus enkel een beperkt deel van het SPM kunnen omvormen in sterke vlokken die beter resistent zijn tegen uiteenbreken.

Variaties in vlok grootte beïnvloeden afzetting en dus ook de sedimentdynamica. De vermindering van de erosie en resuspensie van slibrijke sedimenten door biostabilisatie werd veelvuldig vermeld (Droppo et al. 2001; Black et al. 2002; Gerbersdorf et al. 2008; Maerz & Wirtz 2009). Dit onderstreept het vermoeden dat in de zomer een groter deel van de cohesieve sedimenten op de bodem zijn onder de vorm van geconsolideerde afzetting, vloeibare sliblaag of hoogeconcentreerde slibsuspensie (HCMS). De aanwezigheid van vloeibare sliblagen of HCMS verminderd de bodemschuifspanning en reduceert dus verder de erosiegevoeligheid (Geyer et al. 1996). In de winter daarentegen zal de erosiegevoeligheid van deze afzettingen toenemen en zijn de vlokken minder sterk en dus gemakkelijker in suspensie te houden, waardoor de SPM concentratie hoger is. HCMS lagen werden waargenomen gedurende een algenbloeiperiode in April 2008 in de nabijheid van de meetlocatie en dit in tegenstelling met een winterperiode waar HCMS afwezig was (Fettweis et al., 2012). De sterkere afname in oppervlakte SPM concentratie t.o.v. de SPM concentratie dicht tegen de bodem in de zomer is ook een argument voor de sterkere bezinking in de zomer. Aan het wateroppervlakte daalde de SPM concentratie met een factor 2 en dicht tegen de bodem enkel met een factor 1.2.



Figuur 2.9: Oppervlakte CHL en SPM concentratie voor de periode 2003-2011 (gemiddelde \pm standaardafwijking) zoals afgeleid uit MERIS. De zwarte punten zijn de data voor 2011.

2.5. Besluit

De jaarlijkse cyclus van SPM concentratie in het turbiditeitsmaximum ter hoogte van de Belgische kust wordt voornamelijk veroorzaakt door de seizoensgebonden biologische cyclus. Onze data komen overeen met data uit de literatuur, die het stabiliserend effect van biomassa op bodmerosie en vloksterkte aanhalen. In de tij-gedomineerde zuidelijke Noordzee verhoogt de biomassa de frequentie aan macrovlokken en dus ook de

vloksterkte, eerder dan de vloggrootte, zoals voor andere locaties wordt vermeld. Onze resultaten onderstrepen de transformatie van vooral microvlokken en flocculi in de winter naar meer slibrijk marine snow met een hoger percentage aan macrovlokken in de zomer. De grotere hoeveelheid aan macrovlokken zal de SPM concentratie in het turbiditeitsmaximum verminderen doordat deze sneller bezinken. Het feit dat macrovlokken meer frequent voorkomen en de SPM concentratie afneemt verhoogt de lichthoeveelheid in de oppervlaktelaag wat bevorderend is voor de algengroei. Het is dus eerder de algenbloei in de lente die de SPM concentratie doet afnemen, dan omgekeerd.

Onze metingen hebben duidelijk het belang van microbiele activiteit op de cohesieve sedimentdynamica aangetoond. Het mechanisme kan echter verschillend zijn in een ander gebied. Het zou dus heel interessant zijn om onze resultaten te vergelijken met data uit gebieden die minder of niet geaffecteerd zijn door eutrofiëring.

3. Referenties

- Agrawal Y, Pottsmith H. 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology* 168, 89–114.
- Andrews S, Nover D, Schladow S. 2010. Using laser diffraction data to obtain accurate particle size distributions: The role of particle composition. *Limnology and Oceanography Methods* 8, 507–526.
- 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.
- Borsje BW, de Vries MB, Hulscher SJMH, de Boer GJ. 2008. Modeling large-scale cohesive sediment transport affected by small-scale biological activity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78, 468-480.
- Black KS, Tolhurst TJ, Paterson DM, Hagerthey SE. 2002. Working with natural cohesive sediments. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 128, 2–8.
- Cross J, Nimmo-Smith WAM, Torres R, Hosegood PJ. 2013. Biological controls on resuspension and the relationship between particle size and the Kolmogorov length scale in a shallow coastal sea, *Marine Geology* (in press).
- 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.
- Doerffer R, Schille H. 2007. The MERIS case 2 water algorithm. *International Journal of Remote Sensing* 28, 517-535.
- Downing J. 2006. Twenty-five years with OBS sensors: the good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research* 26, 2299–2318.
- Droppo IG, Lau YL, Mitchell C. 2001. The effect of depositional history on contaminated bed sediment stability. *The Science of the Total Environment* 266, 7-13.
- Eleveld MA, Pasterkamp R, van der Woerd HJ, Pietrzak JD. 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.
- Engel A. 2000. The role of transparent exopolymer particles (TEP) in the increase in apparent particle stickiness during the decline of a diatom bloom. *Journal of Plankton Research* 22, 485–497.
- Fettweis M, Francken F, Pison V, Van den Eynde D. 2006. Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Marine Geology* 235, 63–74.
- 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 with high anthropogenic impact (southern North Sea). *Continental Shelf Research* 30, 1417–1427.
- Fettweis M, Nechad B. 2011. Evaluation of in situ and remote sensing sampling methods for SPM concentrations on the Belgian continental shelf (southern North Sea). *Ocean Dynamics* 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.
- Gerbersdorf SU, Jancke T, Westrich P, Paterson DM. 2008. Microbial stabilization of riverine sediments by extracellular polymeric substances. *Geobiology* 6, 57-69.
- Geyer WR, Beardsley RC, Lentz SJ, Candela J, Limeburner R, Johns WE, Castro BM, Soares

- ID. 1996. Physical oceanography of the Amazon shelf. *Continental Shelf Research* 16, 575–616.
- Hamm CE. 2002. Interactive aggregation and sedimentation of diatoms and clay-sized lithogenic material. *Limnology and Oceanography* 47, 1790–1795.
- Howarth MJ, Dyer KR, Joint IR, Hydes DJ, Purdie DA, Edmunds H, Jones SE, Lowey RK, Moffat TJ, Pomroy AJ, Proctor R. 1993. Seasonal cycles and their spatial variability. In: *Understanding the North Sea system* (eds Charnock H, Dyer KR, Huthnance JM, Liss PS, Simpson JH, Tett PB). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Physical Sciences and Engineering* 343, 383-403.
- Jago CF, Kennaway GM, Novarino G, Jones SE. 2007. Size and settling velocity of suspended flocs during a phaeocystis bloom in the tidally stirred Irish Sea, NW European Shelf. *Marine Ecology Progress Series* 345, 51–62.
- Johnston RJ, Semple RK. 1983. Classification using information statistics. *Concepts and Techniques in Modern Geography* 37, GeoBooks, Norwich.
- Jonasz M, Fournier G. 1996. Approximation of the size distribution of marine particles by a sum of log-normal functions. *Limnology and Oceanography* 41, 744–754.
- Kranenburg C. 1999. Effects of floc strength on viscosity and deposition of cohesive sediment suspensions. *Continental Shelf Research* 19, 1665-1680.
- Lancelot C, Billen G, Sournia A, Weisse T, Colijin F, Veldhuis MJW, Davies A, Wassman P. 1987. Phaeocystis blooms and nutrient enrichment in the continental coastal zones of the North Sea. *Ambio* 16, 38–46.
- 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 baggerspeciestorringen. 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 baggerspeciestorringen (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 baggerspeciestorringen (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, Michielsens 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, Michielsens T, Parmentier K, Van Hoey G, Verwaest T. 2009b. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestorringen (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 baggerspeciestorringen (vergunningperiode 2010-

- 2011). Rapport uitgevoerd BMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2011/12, 16pp.
- 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 - Ocean* 117, C03014.
- Lenhart H-J, Mills DK, Baretta-Bekker H, van Leeuwen SM, van der Molen J, Baretta JW, Blaas M, Desmit X, Kühn W, Lacroix G, Los HJ, Ménesguen A, Neves R, Proctor R, Ruardij P, Skogen MD, Vanhoutte-Brunier A, Villars MT, Wakelin SL. 2010. Predicting the consequences of nutrient reduction on the eutrophication status of the North Sea. *Journal of Marine Systems* 81, 148–170.
- Logan BE, Passow U, Alldredge AL, Grossartt H-P, Simon M. 1995. Rapid formation and sedimentation of large aggregates is predictable from coagulation rates (half-lives) of Transparent Exopolymer Particles (TEP). *Deep Sea Research II* 42, 203–214.
- Lunau M, Lemke A, Dellwig O, Simon M. 2006. Physical and biogeochemical controls of microaggregate dynamics in a tidally affected coastal ecosystem. *Limnology and Oceanography* 51, 847–859.
- Maerz J, Wirtz K. 2009. Resolving physically and biologically driven suspended particulate matter dynamics in a tidal basin with a distribution-based model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 84, 128–138.
- Maggi F. 2009. Biological flocculation of suspended particles in nutrient-rich aqueous ecosystems, *Journal of Hydrology* 376, 116–125.
- Mari X, Burd A. 1998. Seasonal size spectra of transparent exopolymeric particles (TEP) in a coastal sea and comparison with those predicted using coagulation theory. *Marine Ecology Progress Series* 163, 53-76.
- Mikkelsen O, Curran K, Hill P, Milligan T. 2007. Entropy analysis of in situ particle size spectra. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72, 615–625.
- Nechad B, Ruddick K, Park Y. 2010. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment* 114, 854–866.
- Orpin AR, Kostylev VE. 2006. Towards a statistically valid method of textural sea floor characterization of benthic habitats. *Marine Geology* 225, 209–222.
- Passow U, Shipe RF, Murray A, Pak DK, Brzezinski MA, Alldredge AL. 2001. The origin of Transparent Exopolymer Particles (TEP) and their role in the sedimentation of particulate matter. *Continental Shelf Research* 21, 327–346.
- 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.
- Van Beusekom JEE, Buschbaum C, Reise K. 2012. Wadden Sea tidal basins and the mediating role of the North Sea in ecological processes: Scaling up of management? *Ocean and Coastal Management* 68, 69–78.
- van Leussen W. 1994. Estuarine macroflocs: Their role in fine-grained sediment transport. PhD thesis, Utrecht University, The Netherlands.
- Verney R, Lafite R, Brun-Cottan J-C. 2009. Flocculation potential of estuarine particles: The importance of environmental factors and of the spatial and seasonal variability of suspended particulate matter. *Estuaries and Coasts* 32, 678–693.
- Whitby K. 1978. The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment* 41, 25–49.
- Winterwerp JC. 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research* 22, 1339-1360.
- Woolfe KJ, Fielding CR, Howe JA, Lavelle M, Lally JH. 1998. Laser-derived particle size char-

acterisation of CRP-1, McMurdo Sound, Antarctica. *Terra Antarctica* 5, 383–391.

Zeelmaekers E. 2011. Computerized qualitative and quantitative clay mineralogy: Introduction and application to known geological cases, PhD Dissertation, Catholic University Leuven, Belgium.

COLOPHON

Dit rapport werd voorbereid door de BMM in augustus 2013
Zijn referentiecode is MOMO/6/MF/201308/NL/AR/3

| | |
|--------------------|---------------|
| 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

Bijdragen "VLIZ Young Scientists' Day, February 15, Brugge"

- Backers J, Hyndrickx K, Naudts L, Fettweis M, Baeye M, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. The coastal observatory near MOW1: Technical aspects
- Fettweis M, Baeye M, Francken F, Houziaux J-S, Lee BJ, Van den Eynde D, Van Lancker V. A large synoptic dataset of coastal in situ observations

The coastal observatory near MOW1: Technical aspects

Joan Backers¹, Kevin Hyndrickx¹, Lieven Naudts¹, Michael Fettweis², Matthias Baeye², Frederic Francken², Dries Van den Eynde², Vera Van Lancker²

Management Unit of the North Sea Mathematical Model (MUMM), Royal Belgian Institute of Natural Sciences (RBINS)

¹ MUMM-Measuring Services, 3de en 23ste Linierregimentsplein, 8400 Ostend, Belgium
E-mail: J.Backers@mumm.ac.be

² MUMM-SUMO group, Gulledelle 100, 1200 Brussels, Belgium

Since autumn 2009, a permanent measuring station is installed near the MOW1 measuring pile of the Meetnet Vlaamse Banken at a water depth of about 9 m MLLWS. The main goal is to understand, through effective continuous measurements, the response of the coastal marine ecosystem to natural and anthropogenic forcing. The observatory is part of the general and permanent duties of monitoring and evaluation of the effects of all human activities on the marine ecosystem to which Belgium is committed following the OSPAR-convention (MOMO project). During a 1 year field experiment (2013-2014) on the optimizing of disposal operations a second tripod will be deployed near Zeebrugge (Fettweis et al. 2010). The coastal observatory at MOW1 will from 2014 on be part of the monitoring system in the framework of the national obligation for the EU Marine Strategy Framework Directive.

The observatory consists of a tripod with a width of ca. 3 m and a height of ca. 2.5 m on which different sensors and data storage systems are attached. A SonTek 3MHz Acoustic Doppler Profiler (2.25 m above bed (mab)), a SonTek 5MHz Acoustic Doppler Velocimeter (0.35 mab), three D&A Optical Backscatter Sensors (2.25, 1.00, 0.25 mab), a LISST 100 X suspended particle sizer, a Sea-Bird SBE37 CT system, a passive Cetacean monitoring device (C-PoD, see Haelters et al. 2012) and a passive sampling device for chemical monitoring (see Monteyne et al. 2013) are mounted on the tripod. All data except those from LISST are stored in two SonTek Hydra data logging systems. The tripod is deployed on the seafloor for periods of 3 to 6 weeks after which it is replaced with a fresh duplicate one. The data are downloaded, processed and quality checked (Francken et al. 2013). Technical maintenance and calibration of instruments are carried out in order to guarantee high quality data. The goal is to have 100% of good data; however, due to collision with vessels that are not respecting a safety distance to the mooring, biofouling during summer and other disturbances, this goal is a real challenge. The technical equipment will be enlarged and will evolve in order to maintain this state-of-the-art coastal observatory and this in correspondence to the available financial resources and technological developments. From beginning of 2013 four tripod systems will be available for monitoring purposes (OSPAR, MFSD) and scientific research.

References

- Fettweis M, Van den Eynde D, Martens C. 2010. Optimalisatie stortbeleid: Voorstel voor een terreinproef. BMM rapport MOMO/5/MF/201107/NL/AR/3. 22pp.
- Francken F, Baeye M, Fettweis M, Van den Eynde D, Van Lancker V, Backers J, Hyndrickx K, Naudts L. 2013 A large synoptic dataset of coastal observations. VLIZ Young Scientist day 15/02/2013, Brugge.
- Haelters J, Van Roy W, Vigin L, Degraer S. 2012. The effect of pile driving on harbour porpoises in Belgian waters. In: Degraer S, Brabant R, Rumes B (Eds.): Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea. RBINS-MUMM, 127-143.
- Monteyne E, Roose P, Janssen C. Application of a silicone rubber passive sampling technique for monitoring PAHs and PCBs at three Belgian coastal harbours. Chemosphere (in press)

A large synoptic dataset of coastal in situ observations

Frederic Francken, Michael Fettweis, Dries Van den Eynde, Matthias Baye, Vera Van Lancker¹,

Joan Backers, Kevin Hindryckx and Lieven Naudts²

Management Unit of the North Sea Mathematical Model (MUMM), Royal Belgian Institute of Natural Sciences (RBINS)

¹ MUMM-SUMO group, Gulledele 100, 1200 Brussels, Belgium

E-mail: F.Francken@mumm.ac.be

² MUMM-Measuring Services, 3de en 23ste Linierregimentsplein, 8400 Ostend, Belgium

Since the beginning of 2004 MUMM has performed a series of moorings in the Belgian Coastal Zone with a tripod or benthic lander, equipped with a series of oceanographic sensors. Current meters such as an Acoustic Doppler Profiler (ADP) and an Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), a CT-sensor capable of measuring temperature and salinity, optical (OBS) and acoustic backscatter sensors (ADP and ADV) to measure suspended sediment concentration, a LISST 100 suspended particle sizer, a passive Cetacean monitoring device (C-PoD, Haelters *et al.* 2012) and a passive sampling device for chemical monitoring (Monteyne *et al.* 2013) have ever since been moored for more than 1750 days. From autumn 2009 a permanent coastal observatory has been installed at MOW1, located to the west of the entrance to the Zeebrugge harbor (Backers *et al.* 2013). Other moorings have been carried out at more offshore locations, such as the Kwintebank, Gootebank, MOW0 and the offshore windmill farms and a very nearshore location (Blankenberge). The data collected have increased our understanding of cohesive sediment dynamics in response to tidal and wind-driven flow and this during both good and bad weather conditions and from short (turbulence) to long-term scales (seasonal variations).

The instruments have already recorded several GB worth of data files, but the data need to be processed before they can lead to a large synoptic dataset. This processing includes the transformation from a binary file to a readable ASCII format and is done by proprietary software. The subsequent step consists of the actual processing of the data, the quality control to identify instrument failure or biofouling and calculation of derivative parameters (such as bottom shear stress, turbulent kinetic energy and settling velocity). For this goal a series of MatLab scripts have been created which automate the task. Datasets will be made available through the BMDC website: <http://www.mumm.ac.be/datacentre/>

References

Backers J, Hindryckx K, Naudts L, Fettweis M, Baeye M, Francken F, Van den Eynde D & Van Lancker V. The coastal observatory near MOW1: Technical aspects. VLIZ Young Scientist day 15/02/2013, Brugge.

Haelters J, Van Roy W, Vigin L & Degraer S. 2012. The effect of pile driving on harbour porpoises in Belgian waters. In: Degraer S, Brabant R & Rumes B (Eds.): Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea. RBINS-MUMM, 127-143.

Monteyne E, Roose P & Janssen C. Application of a silicone rubber passive sampling technique for monitoring PAHs and PCBs at three Belgian coastal harbours. *Chemosphere* (in press)

APPENDIX 2

Bijdrage "ASLO Aquatic Sciences Meeting, 18-22 February, New Orleans (USA)"

Fettweis M, Lee BJ, Baeye M, Van den Eynde D, Chen P, Yu JCS. Biological effects on flocculation and deposition of fine-grained sediments in a coastal turbidity maximum

BIOLOGICAL EFFECTS ON FLOCCULATION AND DEPOSITION OF FINE-GRAINED SEDIMENTS IN A COASTAL TURBIDITY MAXIMUM

Michael Fettweis¹, Byung Joon Lee², Matthias Baeye¹, Dries Van den Eynde¹, Peihung Chen³, Jason CS Yu³

¹Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Royal Belgian Institute of Natural Science
Gulledelle 100, 1200 Brussels, Belgium

²International Marine and Dredging Consultants
Coveliersstraat 15, 2600 Antwerp, Belgium

³Department of Marine Environment and Engineering, National Sun Yat-Sen University
Lien-Hai Road 70, 80424 Kaohsiung, Taiwan

Biological-physical-chemical processes control suspended particulate matter (SPM) dynamics in near-shore areas. There exist still an insufficient understanding of processes that relates the organic matter content and composition, more specifically the high biomass concentration during algae blooms, to flocculation, settling, formation of fluid mud and anoxic mud layers. We have investigated the biomass-sediment interactions in a eutrophied coastal turbidity maximum zone (southern North Sea) using long time series of in situ and remote sensing data (particle size distribution, SPM and Chlorophyll concentration). The organic matter composition varies during seasons; primary production is high in spring (algae bloom). This correlates with generally larger aggregates in spring than in winter during similar meteorological condition. Larger flocs have higher settling velocity and thus enhanced deposition of fine-grained sediments and formation of fluid mud is observed during spring. The SPM dynamics has changed in the recent decades due to human activity (harbor construction, dredging activities). Our data show that eutrophication has also changed SPM dynamics.

APPENDIX 3

Bijdrage "Marine and River Dunes, 14-16 April, Brugge"

Baeye M, Fettweis M, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2013. Conceptual model of object burial in turbid waters on a sandy seabed

EPHEMERAL BED FORMS CAUSED BY FLUID MUD DYNAMICS

THEME 1: BEDFORM EVOLUTION

Matthias Baeye, Michael Fettweis, Dries Van den Eynde, Vera Van Lancker

Royal Belgian Institute of Natural Sciences
Management Unit of the North Sea Mathematical Models (MUMM)
Gulledelle 100, B-1200 Brussels, Belgium
E-mail: m.baeye@mumm.ac.be

Fluid mud is a high concentrated suspension of fine-grained sediments. The dynamics of these layers have been studied in the very turbid Belgian nearshore area using an instrumented tripod and a test mine. The tripod measured currents and suspended particulate matter (SPM) concentration using optic (OBS) and acoustic devices (ADP, ADV). Besides time series of current velocities and acoustic amplitude, the ADV (5MHz) and ADP (3MHz) was configured to also measure and store the distance between sensor and the sea bed or the lutocline (altimetry). Further, a test mine was deployed to investigate mine burial processes as a function of hydrodynamic and meteorological conditions.

Near-bed hydrodynamics and suspended particulate matter (SPM) dynamics are predominantly driven by tidal forcing. Results of the test mine showed cyclic and ephemeral burial and exposure events that were linked to the local hydrodynamic regime (tidal and neap-spring cycle). During slack water the SPM settles towards the sea bed and a fluid mud layer can be formed; after slack tide resuspension of this layer occurs. The temporal pattern of this burial mechanism mimics the cyclicity of the SPM concentration as recorded by ADV and ADP altimetry. A significant modification of the tidal forcing results from alongshore advection due to wind-induced flows and wave-induced resuspension (Baeye et al., 2011); these modifications can cause the fluid mud layer to be present during several tides. The tripod data suggest further that enhanced biological activity together with less frequent storms in spring and summer, result in an increase of SPM deposition and thus an increase of fluid mud occurrence during these periods as compared to winter and autumn.

References

- 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
- 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. doi:10.1007/s10236-010-0370-7.

APPENDIX 4

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. *Methods in Oceanography* 3-4, 25-39. doi:10.1016/j.mio.2012.11.001



ELSEVIER

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Methods in Oceanography

journal homepage: www.elsevier.com/locate/mio



Full length article

Weather and climate induced spatial variability of surface suspended particulate matter concentration in the North Sea and the English Channel

Michael Fettweis^{a,*}, Jaak Monbaliu^b, Matthias Baeye^a, Bouchra Nechad^a, Dries Van den Eynde^a

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

^b Katholieke Universiteit Leuven, Hydraulics Laboratory, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee, Belgium

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 June 2012

Received in revised form

11 September 2012

Accepted 13 November 2012

Available online 21 December 2012

ABSTRACT

Images from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite have been used to investigate the meteorological and climate induced variability of suspended particulate matter (SPM) concentration in the North Sea. The meteorology has been characterized by the 11 weather types deduced from a refined system of Lamb's classification of synoptic weather charts. Climatological effects have been related to the North Atlantic Oscillation index. The surface SPM concentration maps from MODIS have been ensemble averaged according to these weather types or climatological conditions. The data show that each type has a distinct distribution of surface SPM concentration in the North Sea. The differences are explained by different hydrodynamic and wave conditions. The occurrence of storms will impact the shallow regions by increasing the resuspension of bottom material. Prevailing winds will, on the other hand, change the residual transport of SPM in the North Sea. The more protected Southern Bight exhibits relatively stronger influences of advection, whereas in the central North Sea and the German Bight resuspension is more pronounced. This patterns result in an alternation of relatively high SPM concentration in the Southern Bight and in the rest of the southern North Sea during certain weather conditions. Limitations in satellite images have been assigned to stratification effects due to the occurrence of highly concentrated mud suspensions during certain

* Corresponding author. Tel.: +32 2 7732132; fax: +32 2 7706972.
E-mail address: m.fettweis@mumm.ac.be (M. Fettweis).

weather types. The approach provides a tool to improve our understanding of coastal and shelf sea processes, especially with respect to variations of SPM concentration distribution according to weather, climate and climate change.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Various processes may induce variations of suspended particulate matter (SPM) concentration on temporal and spatial scales. On short time scales, the predominant forcing is related to tides, waves and atmospheric circulation (Baeye et al., 2011), and locally to stratification by fresh water input (Pietrzak et al., 2011). These variations are caused by resuspension, mixing, settling and deposition of fine-grained sediments, as well as by advection due to subtidal flows. On longer time scales neap–spring cycles and meteorological and climatological variations become significant. Meteorological patterns, acting on regional and global scales, are responsible for wave induced resuspension and determine the advection of water masses. Annual variations are caused by seasonal changes in wind pattern and strength and result in high SPM concentration during winter and low concentrations during summer. Climatological effects are linked to the frequency of occurrence of certain weather patterns, e.g. the North Atlantic Oscillation (NAO) is responsible for much of the observed weather and climate variability in the North Sea, especially during winter months (Hurrell, 1995; Schwierz et al., 2006) and this has thus a pronounced effect on SPM concentration. The meteorology of the southern North Sea is characterized by the west to east passage of depressions, and by the development or weakening of high pressure systems. These fluctuations of the wind field occur at time scales of a few days to one week, whereas the climate variability acts on seasonal and longer time scales. The winter NAO exhibits significant multi-decadal variability with positive values indicating anomalously strong westerly winds and wet conditions over north-western Europe, whereas negative values indicate weaker westerly flow, less precipitation and intrusion of colder arctic air (Hurrell, 1995).

The use of atmospheric circulation patterns to describe different situations has proven to be very useful in meteorological and climate change studies (Demuzere et al., 2009; Ullmann and Monbaliu, 2010). For the North Sea region, spatial and temporal changes of weather pattern strongly influence the climatic conditions and the hydrodynamic circulation patterns. The effect of weather and climate on hydrodynamics are well described for the North Sea (Holt et al., 2010), however, their influence on SPM concentration is often limited to the description of seasonal SPM concentration patterns (e.g. Fettweis et al., 2007). The present research focuses therefore on large scale geographical variability of high turbidity zones in the North Sea and the English Channel induced by meteorological and climatological variations using remote sensing data. The southern North Sea, with stronger tidal currents and shallower water, has higher SPM concentrations than the northern North Sea. The most important high turbidity areas are the Belgian Dutch Coastal zone (Flemish Banks); the Thames plume extending eastward into the East Anglian plume; the Humber coast; the Wadden Sea and the coastline along the West Frisian (The Netherlands), East Frisian (Germany) and North Frisian (Germany and Denmark) Islands, see Fig. 1. The main sources of the SPM are coastal erosion (Holderness coast; cliffs of Dover and Calais), local erosion of fine-grained sediments (e.g. Flemish Banks), rivers and the Atlantic (Eisma, 1981). Eroded fine-grained sediments from the Holderness cliffs are transported in the East Anglian plume towards the east and are partly deposited as muddy sediments in the Oyster Ground (Zuo et al., 1989). The Strait of Dover functions as the major source of SPM to the southern North Sea, resulting in high turbidity areas along the continental and UK coasts of the Southern Bight, further enhanced locally by erosion of fine-grained cohesive sediments (Fettweis et al., 2007; Velegrakis et al., 1999; Gerritsen et al., 2001). Sandy mud and mud occurs in the central North Sea, along the Belgian–Dutch coastal area, in the Oyster Grounds, the German Bight, the Wadden Sea, an area off the Thames estuary and the East Anglian coast (Eisma, 1981; OSPAR, Quality Status Report, 2000). The Wadden Sea is characterized by a quasi-equilibrium between local erosion and deposition and transport, with net import of SPM during good weather conditions and net export of sediment out

of the tidal basins to the North Sea during storm surges (Bartholdy and Anthony, 1998; Chang et al., 2006; Lettmann et al., 2009).

Many studies on SPM concentration in the North Sea use oceanographic (wave, currents, tides, wind, temperature, stratification) and SPM concentration data from *in situ*, remote sensing measurements and numerical models (e.g. Pietrzak et al., 2011, Fettweis et al., 2007, Gerritsen et al., 2001, Pleskachevsky et al., 2005, Eleveld et al., 2008, Stanev et al., 2009, Dobrynin et al., 2010, Rivier et al., 2012) to explain distribution and variability. The method proposed here is different as it is based on weather types to produce ensemble averages of SPM concentration maps from satellite for typical meteorological and climatological conditions. Polar orbital satellite images alone cannot be used to assess SPM concentration variations on short time scales because sampling frequency is too low and clouds often obscure the ocean surface; on average 60 cloud-free images have been acquired per year for the southern North Sea. However, averaging of the data according to well defined classifications will result in synoptic maps that are representative of the mean SPM concentration during specific conditions (Fettweis and Nechad, 2011).

The recently adopted EU Marine Strategy Framework Directive has as its main objective to maintain a good environmental status using an ecosystem-based approach. Good-quality waters are needed to sustain a fully-functioning healthy ecosystem. The latter implies the understanding and quantification of major processes in order to identify the natural vs. human induced variability of processes. In recent years, many studies considered potential changes in the North Sea due to climate change. Our approach provides a tool to improve understanding of coastal and shelf sea processes, especially with respect to variations of SPM concentration distribution according to weather; how it may change under enhanced greenhouse gas conditions and how this could affect marine ecosystems.

2. Data and methods

2.1. Weather types and classification of satellite images

Meteorological data over the period 2002–2009 were received from the UK Met Office and consist of 6 hourly wind and pressure fields. In order to investigate the weather related influence on surface SPM concentration in a larger area, the weather classification as proposed by Demuzere et al. (2009) has been used to summarize the atmospheric circulation. This classification is based on the method proposed by Lamb (1972), which was further developed into an objective classification scheme (Jenkinson and Collison, 1977) and validated (Jones et al., 1993). The automatic weather type scheme grid is described using the locations of high- and low-pressure centers that determine the geostrophic flow. A set of indices associated with the direction and the vorticity of the geostrophic flow defines the weather type. The grid is centered above Belgium and is representative for the circulation patterns of the larger Western and Central European Regions (Demuzere et al., 2009). We have used 11 weather types (WT), consisting of 2 pure vorticity types (Anticyclonic, Cyclonic), 8 directional types (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) and an unclassified type (U). Furthermore, climatological impact has been investigated using the NAO indices in order to classify the winter SPM concentration maps. The NAO Index data were provided by the Climate Analysis Section, NCAR, Boulder, CO, USA. The NAO-winter (December through March) time series exhibits two consecutive winters with opposite NAO-winter index within the period of MODIS data collection; -1.09 in winter 2005/2006; and 2.79 in winter 2006/2007. MODIS images have been averaged according to these periods.

Fig. 2(a) shows that weather types A, SW, W and NW have higher frequencies of occurrence than the other, which occur less than 8% of the time. Furthermore, some weather types are more equally distributed over the year (C, A, NE), whereas others are more frequent during autumn–winter (S, SW, W) or spring–summer (U). The average duration of each weather type is between 1.5 to 2 days. The averaged frequency of occurrence of all weather types during the winters of 2002–2009 is compared in Fig. 3(a) with their frequency during the winter of 2005–2006 (negative NAO index) and the winter of 2006–2007 (positive NAO index). Significant differences occur in the frequency of weather types N, NE, SW and W. Weather types N and NE are more (less) frequently occurring during a winter with negative (positive) NAO index as compared to the mean winter frequency. The opposite holds for the other three weather types: they occur more (less) often during a winter with positive (negative) NAO

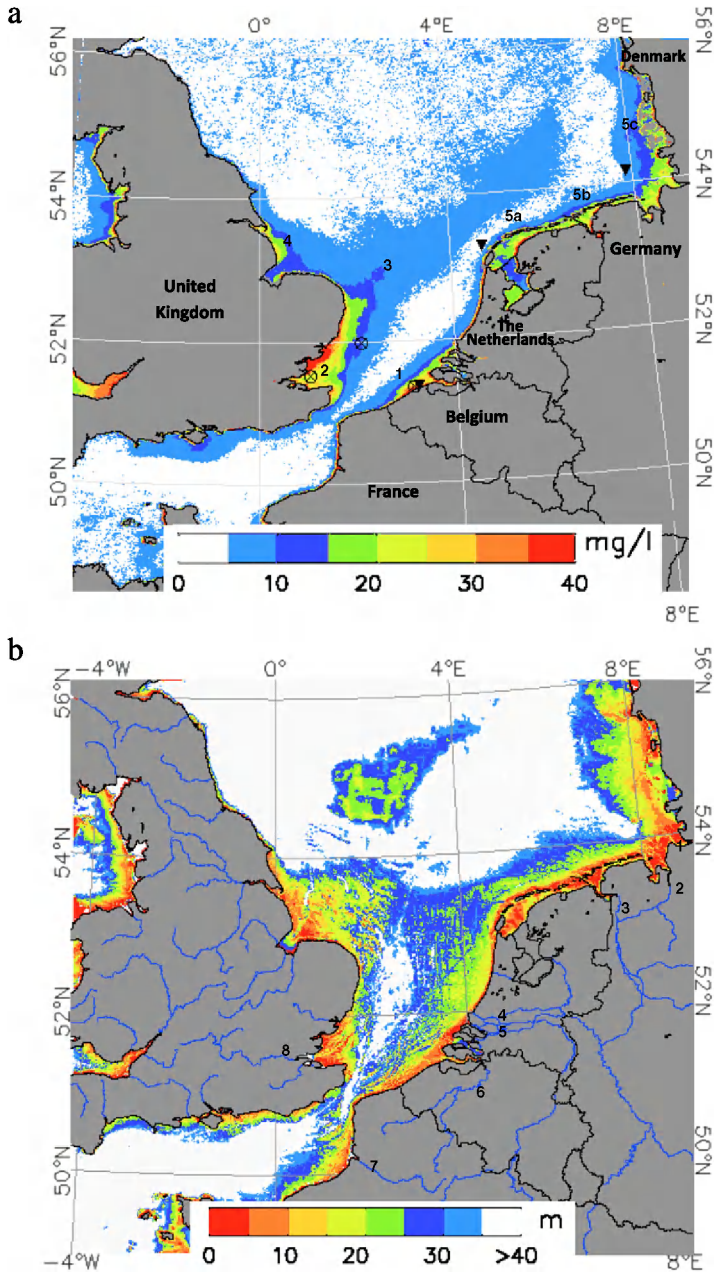


Fig. 1. (a) Mean SPM concentration (mg/l) for all data (2002–2009). Triangles indicate wave rider buoys at Bol van Heist (51.38°N, 3.21°E), Eierlandse Gat (53.28°N, 4.66°E) and Helgoland (54.16°N, 7.87°E); the crosses show the *in situ* SPM concentration measurement stations Warp Anchorage (51.53°N, 1.03°E), West Gabbard (51.98°N, 2.08°E) and MOW1 (51.36°N, 3.11°E). 1 = Flemish Bank area, 2 = Thames, 3 = East Anglian plume; 4 = Humber coast; 5(a–c) = West, East and North Frisian coast. (b) Bathymetry of the North Sea and the English Channel (from Smith and Sandwell, 1997) and the major river basins, the discharge is the yearly averaged value: 1 = Elbe (870 m³/s), 2 = Weser (327 m³/s), 3 = Ems (80 m³/s), 4 = Rhine (2200 m³/s), 5 = Meuse (250 m³/s), 6 = Schelde (120 m³/s), 7 = Seine (500 m³/s), and 8 = Thames (66 m³/s).

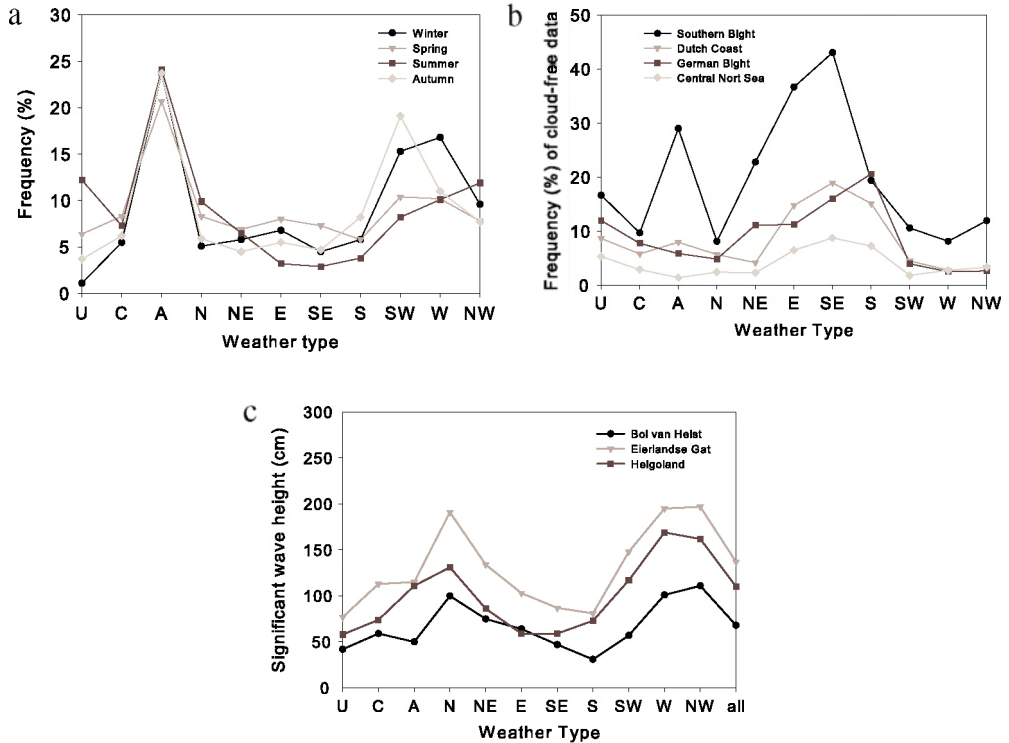


Fig. 2. (a) Frequency of weather types by seasons. (b) Frequency of cloud-free data in the Southern Bight (51.50°N, 3.10°E), along the Dutch coast (53.30°N, 4.40°E), in the German Bight (54.15°N, 7.50°E) and in the central North Sea (55.00°N, 4.00°E). (c) Mean significant wave height at three stations.

index. These results confirm the general climate conditions during positive (strong westerly winds) and negative NAO index (weaker westerly flow and intrusion of colder arctic air) (Hurrell, 1995).

The meteorological effects have been addressed by classifying and ensemble averaging the satellite maps according to the weather type at the moment of MODIS Aqua overpass. Satellite images record SPM concentration only during cloud-free conditions and this depends on weather type and latitude (Fig. 2(b)). More cloud-free data exist for the southern North Sea; north of 58°N the number of good data is low (<10 good pixels per WT). There are also differences between the weather types; on average the number of good pixels is higher in weather types NE, E, SE and S. In order to take into account these difference the satellite images classified per weather type have first been averaged per month and then over the year. The ensemble averaged SPM concentration maps according to weather types are further analyzed using *in situ* data of significant wave height and SPM concentration and water transport data from numerical model simulation in order to assess the importance of resuspension and advection of SPM.

2.2. Remote sensing data

The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) onboard the Aqua satellite, part of the NASA Earth Observation System, provides 1 to 2 daily images over the North Sea area. These data are used to build up daily maps of SPM concentration. In total 3097 MODIS images, covering the period between July 2002 and December 2009, have been processed from Level 1A (NASA/Ocean Biology Processing Group website, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>) to Level 2, using the SeaDAS software (available at <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). This consists of 2

steps: producing the Level 1B data by geo-referencing Level 1A data, and subtracting the atmospheric contributions by air molecules and aerosols from the radiances measured by the sensor at the top of the atmosphere; these yield Level 2 data, where the marine reflectance at MODIS bands may be obtained. Surface SPM concentration is then retrieved from remote sensing reflectance at the MODIS band centered at wavelength 667 nm, using the algorithm of Nechad et al. (2010). Finally, Level 2 processing flags (Patt et al., 2003) are used to mask out the land and cloud pixels and any bad quality pixels (e.g. due to atmospheric correction failure, negative reflectance, neighboring clouds, adjacency effects).

The accuracy of satellite derived SPM concentration has been assessed for errors that may arise from the optical model used to convert marine reflectances to SPM concentrations. The model parameterizes the inherent optical properties of particles in suspension as site-averaged coefficients. This induces errors in SPM estimation when a significant change in particle size and composition occurs under tidal and wind effects (Nechad et al., 2010), changing significantly their mass specific inherent optical properties. The uncertainty in SPM concentration propagating from errors in the water-leaving reflectance retrieval has been evaluated on the basis of 29 match ups taken in clear to moderately turbid waters (3–80 mg/l). A bulk mean relative error of about 37% has been found in SPM concentration retrieval from MODIS imagery. For waters with SPM concentration > 10 mg/l, the relative errors in MODIS-derived SPM concentrations are significantly lower than in clearer waters. This comes from the fact that there are higher relative errors in water-leaving reflectance retrieved in clearer waters and also because the SPM concentration algorithm is adapted to turbid waters. On the other hand, satellite-visible bands usually saturate in very turbid waters (Doxaran et al., 2002). The band centered at wavelength 667 nm used here in the retrieval of SPM concentration reaches its maximum limit of detection around 80 mg/l. Acceptable accuracy is given for values between 3 and 80 mg/l; in the data treatment only pixels with SPM concentration in this range have been selected for further analysis.

2.3. *In situ* data

In situ measurements of SPM concentration from Warp Anchorage (WA), West Gabbard (WG) and Zeebrugge (MOW1) have been used to validate the remote sensing results. WA is located in the mouth of the Thames, WG along the Humber coast and MOW1 in the Belgian coastal turbidity maximum zone (Fig. 1). At WA (15 m depth) and WG (25 m depth) optical backscatter measurements have been collected during 2002–2009 by Seapoint turbidity meters on surface SmartBuoys with a time step of 30 min (Mill et al., 2003). Near-bed SPM concentration from acoustic and optical backscatter sensors (ADP, OBS) in the first 2 m above bed (mab) have been collected during about 340 days with a time step of 1 s to 10 min in the period 2005–2009 at MOW1 (water depth 10 m) (Fettweis and Nechad, 2011; Fettweis et al., 2012).

In situ wave data (significant wave height) have been used from Bol van Heist (Flemish Bank area), Eierlandse Gat (Dutch Coast) and Helgoland (German Bight). The averaged significant wave height is shown for the 11 weather types in Fig. 2(c). The results exhibit generally similar behavior in all stations, i.e. highest waves during N, NW and W and lowest during S, SE, E, U and C weather types. Differences in wave height between the three stations are related to fetch length, resulting for instance in relatively low wave heights at Bol van Heist (Helgoland) during SW (NE, E, SE) winds and relatively high wave heights during NE, E and SE (SW) weather types. Differences in wave height for different weather types exist depending on NAO index (Fig. 3(b)–(d)). Winters with positive NAO index have generally higher wave heights than winter with negative NAO index.

2.4. Numerical model data

The current velocities due to tide and wind forcings for the period 2002–2009 have been obtained using the 3D hydrodynamic model COHERENS (Luyten et al., 1999) for the North Sea and part of the English Channel (4°W–9°E, 48°N–57°N), termed hereafter OPTOS-NOS. The 3D model solves the continuity and momentum equations on a staggered sigma coordinate grid with an explicit mode-splitting treatment of the barotropic and baroclinic modes. The horizontal resolution is 5' (longitude)

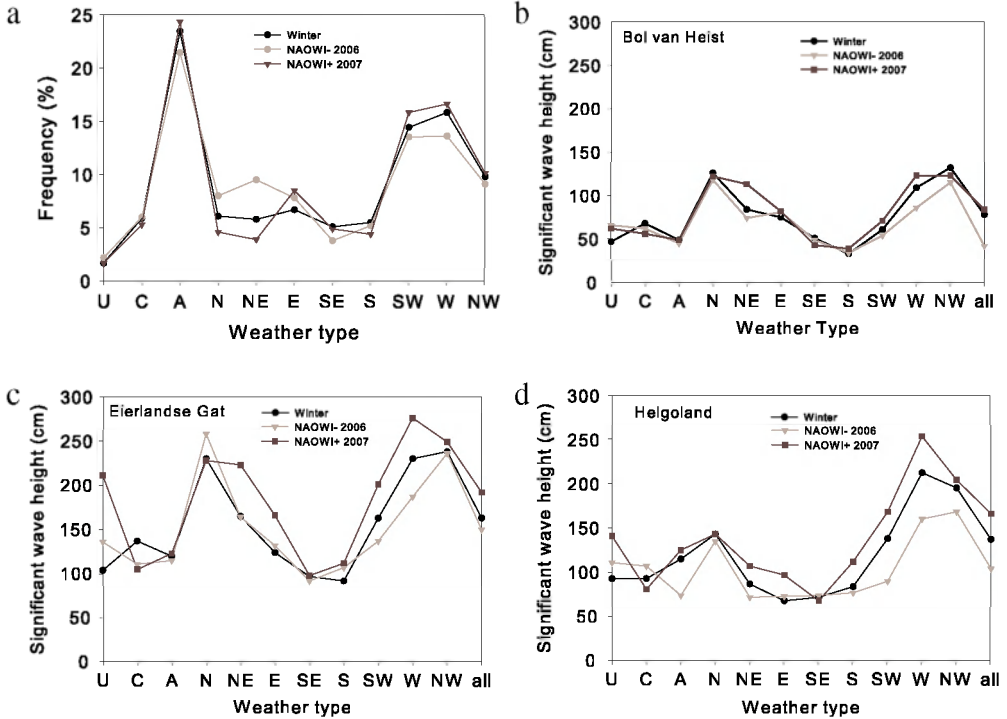


Fig. 3. (a) Frequency (%) of weather types during winters of 2002–2009, winter of 2005–2006 (NAOWI– 2006) and winter 2006–2007 (NAOWI+ 2007). Mean significant wave height at (b) Bol van Heist, (c) Eierlandse Gat and (d) Helgoland for the same periods.

and 2.5' (latitude). Boundary conditions are water elevation and depth-averaged currents; these are provided by OPTOS-CSM, which comprises the Northwest European continental shelf. The OPTOS-CSM model runs in 2D and is driven by the elevation at the open boundaries, governed by four semi-diurnal (M2, S2, N2, K2) and four diurnal (O1, K1, P1, Q1) harmonic constituents. The 6 hourly wind and pressure field from the UK Met Office have been used as meteorological forcing of both models. The current data have been ensemble averaged according to the above described 11 weather types using:

$$\bar{u}_{res-wt} = \sum_{i=1}^{nwt} \bar{u}_i / nwt$$

where \bar{u}_{res-wt} is the residual surface current, \bar{u}_i the i th surface current vector and nwt the number of surface current vectors for a certain weather type.

3. Results and discussion

3.1. General patterns

The difference between the mean surface SPM concentration per weather type and the yearly average data is shown in Figs. 4 (pure weather types) and 5 (directional weather types) together with the residual surface currents during the corresponding weather type. The SPM concentration is not spatially homogeneous and some pixels show anomalously high values. These pixels can be traced back to the occurrence of erroneously high SPM concentration around clouds. Differences in

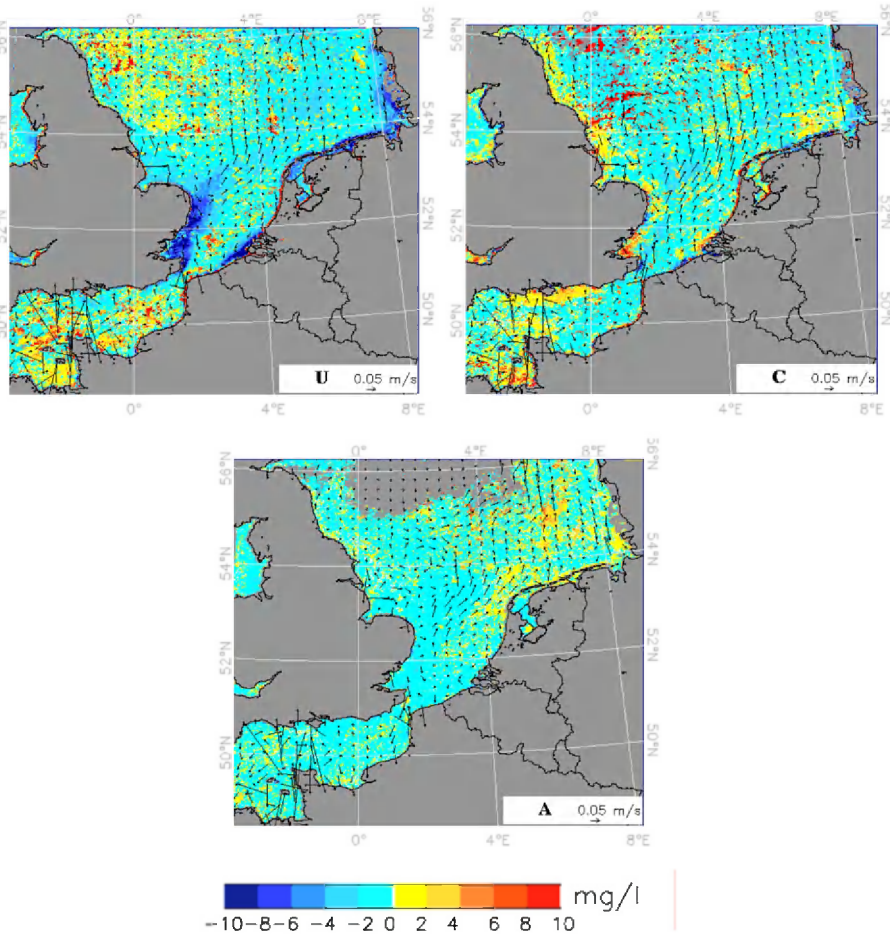


Fig. 4. Difference between mean SPM concentration according to pure weather types (U, C, A) and yearly average data (negative values: lower than, and positive values higher than, yearly average values; the arrows are the residual current vectors).

SPM concentration between the 11 weather types and the yearly average data occur on regional and local scales. They can be related to changes in advection and resuspension.

Weather type U has generally a lower and weather type S a globally (slightly) higher SPM concentration in the North Sea compared with the average situation. This is mainly caused by seasonal effects, with U more frequent during the low SPM concentration spring–summer season and S more frequent during the high SPM concentration autumn–winter season. The low significant wave heights during both weather types indicate that the patterns are caused by mainly tidal forcing. Weather type A is the most frequently occurring; it is almost equally distributed throughout the year and thus reflects nearly the average situation. The slight increase in SPM concentration as compared with the average situation from the Southern Bight towards the German Bight can be linked with a similar trend in wave heights. The other weather types all exhibit regional and local changes with no global trends that can be attributed to resuspension and advection processes.

The SPM concentration maps confirm that changes in weather type affect the distribution of surface SPM concentration in the North Sea as they have an influence on hydrodynamics, and consequently on the transport and resuspension of cohesive sediments. Furthermore significant differences in behavior exist between the high turbidity areas, which can be linked to advection and/or resuspension events. Resuspension depends on the water depth and the wave height. As the waves are higher along the

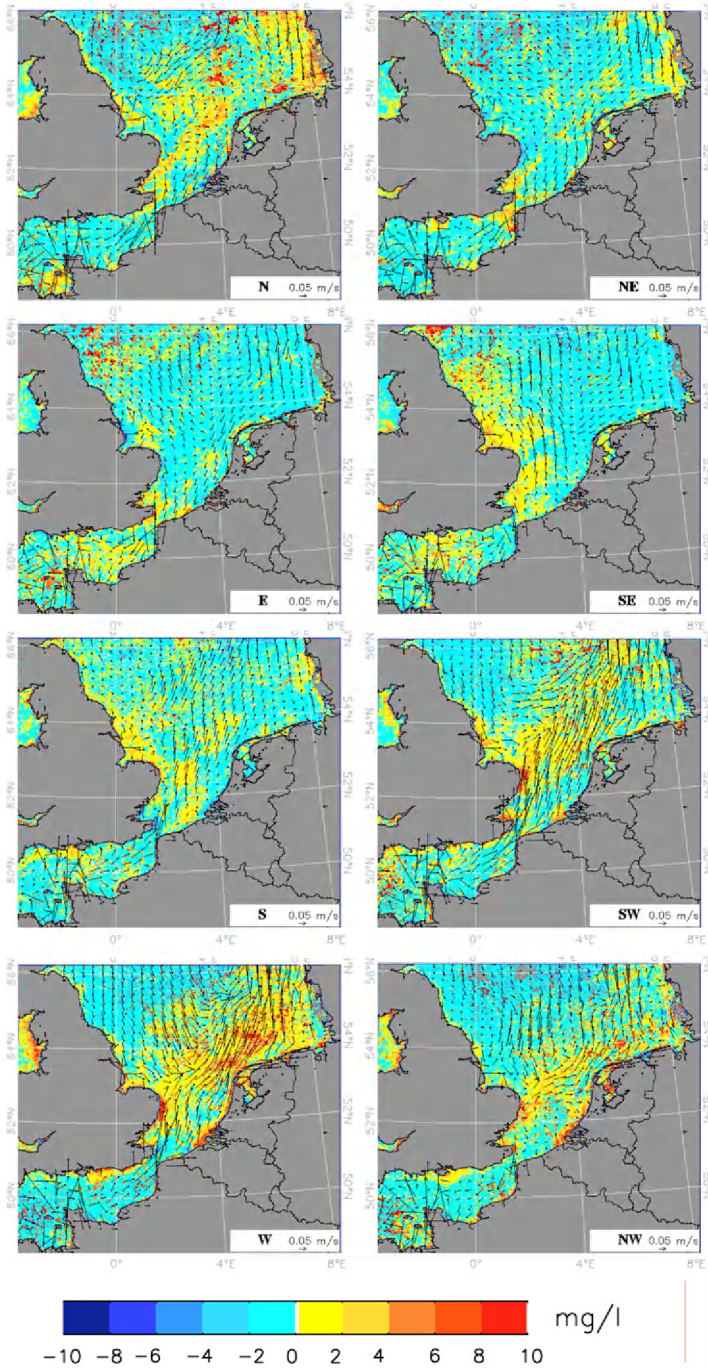


Fig. 5. Difference between mean SPM concentration according to directional weather types (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW) and yearly average data (negative values: lower than, and positive values: higher than, yearly average values; the arrows are the residual current vectors).

Dutch coast and the German Bight than in the Southern Bight (Fig. 2(c)) and as water depth is similar (10–20 m) (Fig. 1(b)), resuspension will in these areas be more important than in the Southern Bight.

The residual currents per weather type are an indication of the advection of SPM in the surface layer. We see that significant differences occur in magnitude and direction depending on weather type. The advection is generally southwest to westward during weather types N, NE and E. The opposite was found for weather types C, E, S, SW, W and NW. Towards the coastline current ellipses are more elongated and residual flow is dominated by alongshore flow and the direction of the flow can locally be different from the general residual circulation.

The higher than average SPM concentrations observed in the East Anglian plume, Thames and/or the German Bight during weather types NE, N, NW, W and SW correlate well with the higher significant wave heights during these weather types and are thus the result of mainly local resuspension, as confirmed by Pietrzak et al. (2011) and Pleskachevsky et al. (2005). Locally differences can be seen during these weather types that are linked to a stronger influence of advection especially around Dover, and along the Belgian–Dutch and North Frisian coast. The high turbidity around Dover and along the Belgian–Dutch coast for example, has shifted towards the northeast during weather types SW and W whereas during weather types NE and E the opposite occurs with generally higher concentrations towards the southwest. This has been correlated with the occurrence of an increased subtidal alongshore flow towards the northeast induced by the wind patterns (Baeye et al., 2011).

The shear stresses due to waves during the other directional weather types (E, SE, S) are low and the changes in SPM concentration relative to the yearly average situation are thus not caused by significant resuspension events. Wave height is relatively high in the Southern Bight as compared to the German Bight for weather type NE (Fig. 2(c)); this together with the southwestward directed subtidal alongshore currents explains the enhanced SPM concentration in the Strait of Dover. We observe a general decrease in SPM concentration in the North Sea during weather types E and SE, except in the Strait of Dover. These two weather types have no typical seasonal signal, and as a consequence the pattern is explained by a low resuspension of fine-grained sediments in the North Sea, whereas the increase in the Strait of Dover area is caused by advection of SPM towards the English Channel.

3.2. Limitation of satellite imagery

The main drawback of satellite images is related to the low sampling frequency and the occurrence of clouds. The frequency of cloud-free data is highest in the Southern Bight and the English Channel and decreases towards the North and East (Fig. 2(b)). It is not necessarily correlated with WT frequency, as can be seen from weather types SW, W and NW, which are relatively abundant (>10%) but have only relatively few good data. In contrast weather types NE, E and SE are less abundant ($\pm 5\%$), but have higher frequency of cloud-free data. Further shortcomings exist as SPM processes are governed by near-bed dynamics (resuspension, deposition) and are not necessarily coupled with surface processes (Fettweis and Nechad, 2011). A nice example is the Rhine region of freshwater influence and the seasonal thermal stratification of central North Sea waters, as these stratified waters reduce vertical mixing and surface SPM concentration underestimates significantly the depth-integrated SPM concentration (Pietrzak et al., 2011; McCandliss et al., 2002). Salinity stratification associated with the inflow of fresh water occurs also in the inner German Bight (Elbe plume) and the Skagerrak (Huthnance, 1991) (Fig. 1(b)). The East Anglian plume extends eastward to areas with thermal stratification in early summer.

The average SPM concentration per weather types and the difference with the yearly average SPM concentration are shown in Fig. 6 for the three measuring locations (WA, WG, MOW1). The *in situ* data at WA and WG confirm that the SPM concentration in the southern Bight is generally lower during weather types U, C, A, S and SE, and higher during weather types N, NE, SW, W and NW.

The comparison is less good between the near-bed *in situ* data and the MODIS derived surface data at MOW1 for the weather types C, SE and NE, where the SPM concentration relative to the yearly averages increases near the bed but decreases at the surface. A decrease in surface SPM concentration can also be seen in the satellite maps along the German coast between the Elbe and Denmark during weather types W and SW, along the German and Danish Wadden Sea during weather types E and SE,

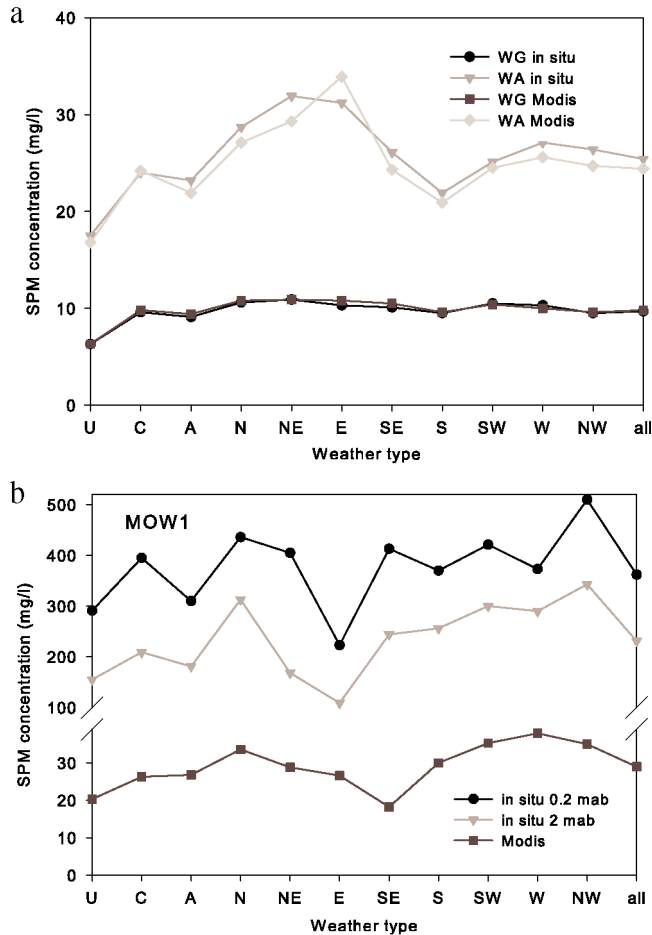


Fig. 6. SPM concentration at WA, WG (a) and MOW1 (b) from *in situ* data (WA + WG: surface, MOW1: 0.2 and 2 mab) and MODIS (surface) ensemble averaged according to weather types and for the mean for all years (all).

and along the Belgian–Dutch coast in weather types C, SE and NE. In the Belgian–Dutch coastal area the decrease in surface SPM concentration is explained by the reversal of the sub-tidal alongshore flow towards the southwest, which enhances the outflow of the Scheldt estuary, reduces the vertical mixing and results in the formation of highly concentrated mud suspensions (HCMS) (Baeye et al., 2011). It is not sure if similar processes are responsible for the lower SPM concentration along the German–Danish coast or if, during weather types SW and W, the stronger import of water and thus SPM into the back-barrier basin resulted in a decrease of the SPM concentration off the islands. The lower SPM concentration could also be caused, in addition to the low wave activity, by thermohaline stratification associated with westerly winds in the Elbe region and with easterly winds along the German and Danish Wadden Sea (Schrum, 1997).

HCMS or fluid mud layers are formed when the carrying capacity of cohesive sediments is exceeded, leading to a two-layer fluid with significant damping of the turbulence flow field and the vertical mixing (Winterwerp, 2006). The low surface SPM concentration in the satellite images along the Belgian–Dutch coastal zone during weather types C, SE, NE and also NW is due to HCMS formation and reflects thus the reduced vertical mixing rather than a decrease of the depth-integrated SPM concentration. It highlights the fact that near-bed SPM concentration dynamics are partially

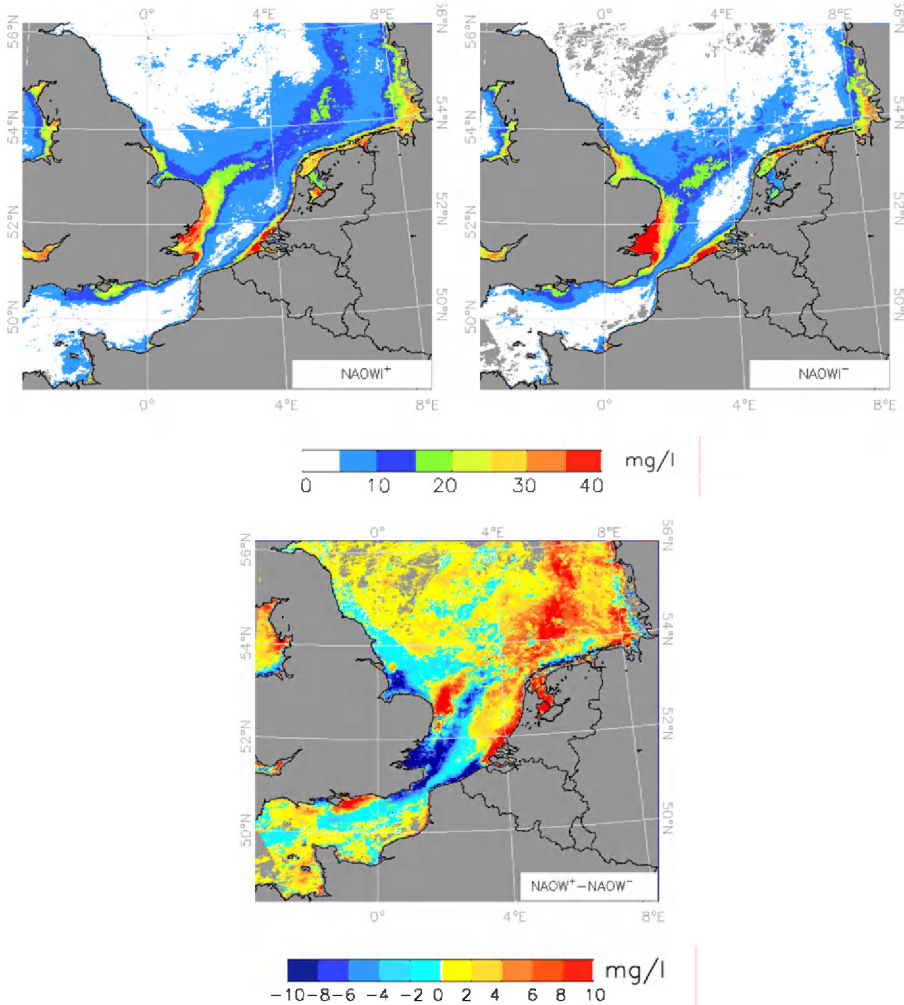


Fig. 7. Mean SPM concentration according to NAO index. (a) Winter 2006 with strong positive NAO index. (b) Winter 2007 with strong negative NAO index. (c) Difference between NAOWI– and NAOWI+ SPM concentration maps (negative values: higher in NAOWI+; positive values: higher during NAOWI–).

uncoupled from processes higher up in the water column (Pietrzak et al., 2011; Fettweis and Nechad, 2011). Consequently, surface SPM concentrations measured by satellites can only be used as a proxy for SPM transport when the water column is well mixed or when near-bed or fluid mud layers are absent. Fluid mud or HCMS are often found in estuaries, bays and coastal zones; their occurrence in the North Sea has been confirmed for the Belgian–Dutch coastal zone (Baeye et al., 2011). Possibly they occur in other high turbidity areas, such as the English coast or the inner German Bight.

3.3. Weather and climate influence on SPM concentrations

The NAO exerts a dominant influence on the distribution of wintertime SPM concentration as shown in Fig. 7. The difference between both situations shows that during winters with negative NAO index the SPM concentration is on average higher in the Strait of Dover and the Belgian–French and

English coastal areas. During a winter with positive NAO index, higher SPM concentrations are found in the German Bight, the central North Sea and along the Dutch coast (except the West Frisian coast). Positive NAO winters are associated with higher frequency of SW winds, generally higher waves and an enhanced northeastward directed residual water transport. The observed differences between both winter situations are thus explained by a combination of transport of SPM out of the Southern Bight and local resuspension due to higher waves in the rest of the North Sea.

Siegismund and Schrum (2001) have found, based on a trend analysis of wind directions, that southwesterly winds in the Southern Bight have increased during the period 1988–1997 as compared to the period 1958–1967. Similar results were reported by Van den Eynde et al. (2012). This would imply higher frequency of weather types S, SW and W and thus a general increase of SPM concentration in the North Sea and a decrease in the Strait of Dover. The geographical extension of the high turbidity zone along the Belgian–Dutch and coastal zone was thus more often advected towards the northeast as before. Houziaux et al. (2011) reported similar results, based on a comparison of historical (100 year) and recent bed samples. These authors have related the changes mainly to port and dredging works that have severely altered the fine-grained sediment dynamics. Our data suggest that changes in weather type frequency explain partially the observed changes in SPM concentration distribution.

The changes in the mean circulation pattern over the North Atlantic are accompanied by pronounced shifts in the storm tracks. Benniston et al. (2007) predict, e.g. in forthcoming decades, an increase of winter storms with more extreme wind speeds over the North Sea that become more north-westerly than at present, resulting in higher waves and higher resuspension potential. Other results are presented by Demuzere et al. (2009), who calculated the climate change following the IPCC 2001 report scenario A1B. They found an increase in frequency of the W weather type, balanced by a smaller decrease of C and all eastern (SE, E, NE) weather types. Increase of weather type W and decrease of N and NE types are associated with a positive winter NAO index. The high uncertainties of general circulation models for simulating climate scenarios could explain the different predictions. Other studies describe a correlation between decreasing summer ice in the Arctic and cold weather in Europe (Petoukhov and Semenov, 2010; Jaiser et al., 2012). Given the fact that sea ice cover in the Arctic is steadily decreasing in summer during the last decade, these authors expect a threefold increase in the probability of cold winters in Europe in the future. These cold periods, e.g. as in February 2012, are characterized by a negative NAO index, corresponding with a low difference in air pressure between the Azores high and the Icelandic low. Further decrease of sea ice extent in the Arctic is thus projected to increase the frequency of weather types N and NE and decrease the frequency of weather types SW and W during the winter season. For the North Sea this will mean that surface SPM concentration will on average be higher in the German Bight and the Strait of Dover and lower along the Belgian–Dutch coastal zone. Based on the above literature we could thus conclude that future autumns and winters will have more extreme weather resulting in an increase of southwesterly winds when the NAO index is positive and an increase in frequency of winters with a more negative NAO index. These will change the distribution of SPM concentration as they will influence the frequency of weather types.

4. Conclusions

The surface SPM concentration maps from MODIS have been ensemble averaged according to 11 weather types and climatological conditions. Each weather type has a distinct distribution of surface SPM concentrations, which is explained by differences in hydrodynamic and wave conditions. The occurrence of storms especially has an impact in shallow coastal regions through an increased resuspension of bottom material. Prevailing winds will, on the other hand, change the residual transport of SPM in North Sea. The more protected Southern Bight exhibits relatively stronger influences of advection, whereas in the central North Sea and the German Bight resuspension is more pronounced. This results in higher (lower) SPM concentration in the Southern Bight and the English Channel (German Bight) during E–SE weather types. The opposite occurs during weather types W–SW, when SPM concentration is higher in the central North Sea and lower in the English Channel and the Strait of Dover.

Shortcomings in satellite images have been assigned to fresh water stratification effects (Pietrzak et al., 2011). Our data suggest further that stratification due to highly concentrated mud suspensions also limits vertical mixing in the high turbidity area along the Belgian–Dutch coastal zone. Consequently, surface SPM concentrations as a proxy for the depth-integrated SPM concentration should be used with care in regions with thermohaline stratification or with near-bed or fluid mud layers.

The approach provides a tool to improve our understanding of coastal and shelf sea processes, especially with respect to variations of SPM concentration distribution forced by weather, climate and climate change. Furthermore, the method could be useful for synoptic estimation of SPM concentration distribution when no satellite data are available.

Acknowledgments

The study was partly funded by the Maritime Access Division of the Ministry of the Flemish Community (MOMO project) and by the Belgian Science Policy within the framework of the BELCOLOUR-2 (SR/00/104) project. The wave data have been obtained from Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Helgoland), Rijkswaterstaat (Eierlandse Gat) and Flemish Hydrography (Bol van Heist). The SPM data at Warp Anchorage and West Gabbard are from CEFAS. We wish to acknowledge the crew of RV Belgica for their skillful mooring and recovery of the tripod at MOW1. The measurements at this location would not have been possible without the technical assistance of L. Naudts and his team (Measuring Service of MUMM, Oostende).

Appendix. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found online at <http://dx.doi.org/10.1016/j.mio.2012.11.001>.

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 Dyn.* 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: Alexander, C.R., Davis, R.A., Henry, V.J. (Eds.), *SEPM Spec. Publ.*, vol. 61, pp. 43–52.
- Benniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woith, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Clim. Change* 81, 71–95.
- Chang, T.S., Joerdel, O., Flemming, B.W., Bartholomä, A., 2006. The role of particle aggregation/disaggregation in muddy sediment dynamics and seasonal sediment turnover in a back-barrier tidal basin, East Frisian Wadden Sea, southern North Sea. *Mar. Geol.* 235, 49–61.
- Demuzere, M., Werner, M., van Lipzig, N.P.M., Roeckner, E., 2009. An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *Int. J. Climatol.* 29, 1796–1810.
- Dobrynin, M., Gayler, 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. *J. Mar. Syst.* 82, 1–20.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Lavender, S., Castaing, P., 2002. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sens. Environ.* 81, 149–161.
- Eisma, D., 1981. Supply and deposition of suspended matter in the North Sea. In: Nio, D.D., Shuttenthelm, R.T.E., van Weering, T.C.E. (Eds.), *Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin*. Blackwell Scientific Publ., Oxford, pp. 415–428.
- Eleveld, M.A., Pasterkamp, R., van der Woerd, H.J., Pietrzak, J.D., 2008. Remotely sensed seasonality in the spatial distribution of sea-surface suspended particulate matter in the southern North Sea. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 80, 103–113.
- Fettweis, M., Baeye, M., Lee, B.J., Chen, P., Yu, J.C.S., 2012. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Mar. Lett.* 32, 123–137.
- Fettweis, M., Nechad, B., 2011. Evaluation of in situ and remote sensing sampling methods for SPM concentrations, Belgian continental shelf (southern North Sea). *Ocean Dyn.* 61, 157–171.
- 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. *Cont. Shelf Res.* 27, 1568–1583.
- Gerritsen, H., Boon, J.G., van der Kaaij, T., Vos, R.J., 2001. Integrated modelling of suspended matter in the North Sea. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 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. *Prog. Oceanogr.* 86, 361–379.

- Houziaux, J.-S., Fettweis, M., Francken, F., Van Lancker, V., 2011. Historic (1900) seafloor composition in the Belgian–Dutch part of the North Sea: a reconstruction based on calibrated visual sediment descriptions. *Cont. Shelf Res.* 31, 1043–1056.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676–679.
- Huthnance, J.M., 1991. Physical oceanography of the North Sea. *Ocean Shoreline Manag.* 16, 199–231.
- Jaiser, R., Dethloff, K., Handorf, D., Rinke, H., Cohen, J., 2012. Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A* 64, 1159–1175.
- Jenkinson, A.F., Collison, F.P., 1977. An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology*. Branch Memorandum 62. Meteorological Office, London.
- Jones, P.D., Hulme, M., Briffa, K.R., 1993. A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *Int. J. Climatol.* 13, 655–663.
- Lamb, H.H., 1972. British Isles Weather Types and a Register of Daily Sequence of Circulation Patterns, 1861–1971. In: *Geophysical Memoir*, vol. 116. HMSO, London.
- Lettmann, K.A., Wolff, J.-O., Badewien, T.H., 2009. Modeling the impact of wind and waves on suspended particulate matter fluxes in the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). *Ocean Dyn.* 59, 239–262.
- Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P., Wild-Allen, K., 1999. COHERENS a coupled hydrodynamical–ecological model for regional and shelf seas: user documentation. MUMM. Brussels, p. 911.
- McCandliss, R.R., Jones, S.E., Hearn, M.R., Latter, R.J., Jago, C.F., 2002. Dynamics of suspended particles in coastal waters (southern North Sea) during a spring bloom. *J. Sea Res.* 47, 285–302.
- Mill, D.K., Laane, R.W.P.M., Rees, J.M., Loeff, M.R.V.D., Suylen, J.M., Pearce, D.J., Sivyer, D., Heins, C., Platt, K., Rawlingson, M., 2003. Smartbuoy: a marine environmental monitoring buoy with a difference. In: Dahlin, H., Flemming, N.C., Nittis, K., Peterson, S.E. (Eds.), *Building the European Capacity in Operational Oceanography*, EuroGOOS. In: *Elsevier Oceanography Series*, vol. 19. pp. 311–316.
- Nechad, B., Ruddick, K., 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.
- OSPAR, Quality Status Report 2000, 2000. Region II—greater North Sea. OSPAR Commission, London, p. 136.
- 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 Technical Memorandum 22.
- Petoukhov, V., Semenov, V.A., 2010. A link between reduced Barents–Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *J. Geophys. Res.* 115, D21111.
- Pietrzak, J.D., de Boer, G.J., Eleveld, M.A., 2011. Mechanisms controlling the intra-annual mesoscale variability of SST and SPM in the southern North Sea. *Cont. Shelf Res.* 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 Dyn.* 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-Mar. Lett.* 32, 139–151.
- Schrum, C., 1997. Thermohaline stratification and instabilities at tidal mixing fronts: results of an eddy resolving model for the German Bight. *Cont. Shelf Res.* 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. *Clim. Change* 79, 31–79.
- Siegismund, F., Schrum, C., 2001. Decadal changes in the wind forcing over the North Sea. *Clim. Res.* 18, 39–45.
- Smith, W.H., Sandwell, D.T., 1997. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1956–1962.
- Stanev, E.V., 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 Dyn.* 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. *Int. J. Climatol.* 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. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 305–312.
- Velegrakis, A.F., Michel, D., Collins, M.B., Lafite, R., Oikonomou, E.K., Dupont, J.P., Huault, M.F., Lecouturier, M., Salomon, J.C., Bishop, C., 1999. Sources, sinks and resuspension of suspended particulate matter in the eastern English Channel. *Cont. Shelf Res.* 19, 1933–1957.
- Winterwerp, J., 2006. Stratification effects by fine suspended sediment at low, medium and very high concentrations. *J. Geophys. Res.* 111, C05012.
- Zuo, Z., Eisma, D., Berger, G.W., 1989. Recent sediment deposition rates in the Oyster ground North Sea. *Neth. J. Sea Res.* 23, 263–269.