

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 juli 2013 -31 december 2013)

Michael Fettweis, Matthias Baeye, Frederic Francken

MOMO/6/MF/201401/NL/AR/4

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.	Langdurige metingen te MOW1: 2005-2012	9
2.1.	Inleiding	9
2.2.	Meetapparatuur	11
2.3.	Overzicht verankeringen: ADP en LISST	11
2.3.1.	ADP	11
2.3.1.	LISST100 C	14
3.	Classificatie van de data	17
3.1.	Hydro-meteo en seizoenale groepering	17
3.2.	Entropie groepering van vlokgrooteverdelingen	20
4.	Bodemnabije SPM dynamica te MOW1	21
4.1.	SPM concentratie en stroomsnelheid (ADP)	21
4.1.1.	SPM concentratie: Alle data	21
4.1.2.	SPM concentratie: Seizoenen	23
4.1.3.	SPM concentratie: Getijamplitude	28
4.1.4.	SPM concentratie: Seizoenen en getijamplitude	29
4.1.5.	SPM concentratie: Seizoenen, getijamplitude en alongshore stroming	29
4.2.	SPM flux: Seizoenen, getijamplitude en alongshore stroming (ADP)	32
4.3.	Partikelgrootte, SPM volume- en massa concentratie (LISST)	34
4.3.1.	Partikelgrootteverdeling: Alle data	34
4.3.2.	Partikelgrootteverdeling: Seizoenen	34
4.3.3.	Partikelgrootteverdeling: Entropieanalyse	38
4.3.4.	SPM volume en massa concentratie: Seizoenen	42
5.	Conclusies	43
6.	Referenties	44

Appendix 1: Bijdrage INTERCOH conference 21-24 October 2013, Gainesville.

Appendix 2: Lee BJ, Toorman E, Fettweis M. 2014. Multimodal particle size distribution of fine-grained sediments: Mathematical modeling and field investigations. *Ocean Dynamics* 64, 429-441. doi:10.1007/s10236-014-0692-y

Foto op titelpagina genomen door Jorn Urbain, Belgische Marine

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 beleidsondersteunend 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 zeebodemaltimetrie 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 vlok grootte.

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 T0 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 vloggrootte 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 fundamenteeler verband tussen biomassa en vloggrootte 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 vloggroottes 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- en Meetrapporten

Fettweis M, Baeye M, Francken F, Van den Eynde D, Van Lancker V. 2014. MOMO activiteitsrapport (1 juli 2013 - 31 december 2013). BMM-rapport MOMO/6/MF/201401/NL/AR/4, 47pp + app.

- Backers J, Francken F, Hindryckx K, Vanaverbeke W. 2013. Rapport van de RV Belgica Meetcampagnes en Verankering van Meetsystemen MOMO – 2012. BMM-rapport BMM-MDO/2013-24/MOMO/2012, 123pp.
- 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/Seminaries (presentatie of poster):
- Fettweis M, Chen P, Yu JCS. 2013. Seasonal variability of SPM concentration in the southern North Sea: measurements and modelling. Invited lecture at National Cheng Kung University - Tainan Hydraulics Laboratory, 18 December, Tainan (Taiwan).
- Fettweis M. 2013. Weather and climate induced spatial variability of surface suspended particulate matter concentration in the North Sea and the English Channel. Invited lecture at National Central University – College of Earth Sciences, 17 December, Taoyuan (Taiwan).
- Van Hoey G, Devriese L, Dewitte B, Fettweis M, Martens C. 2013. Sustainable disposal of dredged material? An analysis of the Belgian situation. 8th International SedNet conference, 6-9 November 2013, Lisbon (Portugal).
- Fettweis M, Baeye M, Van den Eynde D, Kumar N. Long-term variability of SPM concentration and floc-size associated with residual flows in the Belgian coastal zone. 2013. INTERCOH, 21-24 October 24, Gainesville (USA).
- 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 (USA).
- 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 (Germany).
- Fettweis M, Lee BJ, Toorman E, Francken F, Van den Eynde D. 2012. Flocculation in a eu-

- trophic coastal turbidity maximum zone. Particles in Europe, 17-19 October, Barcelona (Spain).
- 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, Brussels.
- 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. (poster)
- 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)
- Fettweis L, Baeye M, Van der Zande D, Van den Eynde D, Lee BJ. Seasonality of flocculation strength in the southern North Sea. (submitted to Journal of Geophysical Research in December 2013).
- Lee BJ, Toorman E, Fettweis M. 2014. Multimodal particle size distribution of fine-grained sediments: Mathematical modeling and field investigations. *Ocean Dynamics* 64, 429-441. doi:10.1007/s10236-014-0692-y
- 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
- 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. doi:10.1007/s00367-011-0266-7

2. Langdurige metingen te MOW1: 2005-2012

2.1. Inleiding

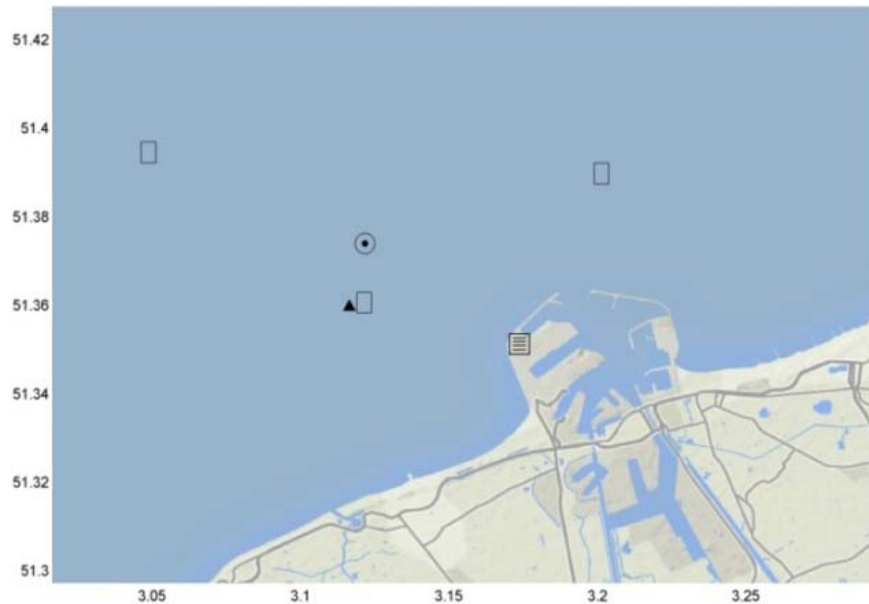
Er bestaan tal van wetenschappelijke rapporten en artikels over het gedrag en de dynamica van het SPM (Suspended Particulate Matter) in kustgebieden. Wat betreft de Belgische kustzone verwijzen we hier naar het MOMO project, waarin door het uitvoeren van in situ metingen een beter inzicht verworven kon worden in de SPM concentratie variabiliteit tengevolge van getij, weersomstandigheden, klimaat, biologie en bagger- en stortoperaties (Baeye et al. 2011, 2012; Fettweis & Van den Eynde 2003; Fettweis et al. 2010, 2011, 2012a, 2013). De geografische variabiliteit werd onderzocht met behulp van remote sensing data afkomstig van satellieten zoals SeaWiFs, MODIS en MERIS (Fettweis et al. 2007, 2012b; Fettweis & Nechad 2011; Van den Eynde et al. 2007). Door historische data te vergelijken met recente werd duidelijk dat de concentratie aan en de verdeling van het fijnkorrelig materiaal in onze kustzone sterk is veranderd gedurende de laatste 100 jaar en dit tengevolge van menselijke activiteiten zoals havenbouw, verdiepingswerken en visserij (Fettweis et al. 2009; Houziaux et al. 2011). Deze lange termijnsveranderingen werden afgeleid uit kwalitatieve beschrijvingen van zeebodemstalen en uit korrelgrootteanalyses uitgevoerd op historische stalen.

Vele turbiditeitsmetingen in kustzones zijn ook vandaag nog steeds gekoppeld aan een monitoringsprogramma in het kader van een specifiek project (b.v. offshore windmolenpark) en zijn daardoor in de tijd beperkt. Deze monitoring is dikwijls gebaseerd op de BACI (Before-After-Control-Impact) strategie. Hiermee wordt bedoeld dat er een zekere tijd voor en na de geplande operaties metingen uitgevoerd worden en dat er op een andere locatie controlemetingen gebeuren. Uiteraard worden tijdens de werkzaamheden ook metingen uitgevoerd op de impactlocatie om tenslotte deze impact te kunnen kwantificeren (zie Guerra et al. 2009). Dit is een meetstrategie die ontwikkeld werd om de milieueffecten van menselijke ingrepen op de densiteit en structuur van soorten te kunnen inschatten (Underwood 1994). Het nut van deze strategie voor turbiditeitsmonitoring is echter beperkt, zoals bv bleek uit de resultaten van de monitoring voor de impact van offshore windmolenparken (Van den Eynde et al. 2010) en dit vooral door het feit dat er geen twee locaties bestaan in kustgebieden die wat SPM concentratie en dynamica betreft, volledig gelijk zijn. Het nut van controle metingen op één andere locatie is daardoor beperkt en dient ofwel uitgebreid te worden naar een groot aantal locaties, waarbij de duur van de metingen beperkt zal zijn ofwel door het aantal locaties te beperken maar de meettijd per locatie op te voeren. De duur van de meetperiode wordt bepaald door de variabiliteit, die wat SPM concentratie betreft, gaat van seconden tot seizoenen (en mogelijk langer). Enkel zo kan de natuurlijke variabiliteit in SPM concentratie afgewogen worden t.o.v. de door menselijke ingrepen veroorzaakte. Een voorbeeld waar deze strategie werd toegepast is de bagger- en stortproef die uitgevoerd werd in het Albert 2 dok te Zeebrugge (Fettweis et al. 2011) en de terreinproef voor een alternatieve stortlocatie voor de onderhoudsbaggerwerken in de voorhaven van Zeebrugge (zie taak 2 in Inleiding).

Voor vele kustzones is er een gebrek aan langdurige en hoogfrequente data over sleutelparameters die de milieutoestand beschrijven, zoals turbiditeit en SPM concen-

tratie. Nochtans zijn het dit soort data die nodig zijn om de 'Goede Milieutoestand' gedefiniëerd in de Kaderrichtlijn Mariene Strategie (Belgische Staat 2012a, 2012b) te kunnen evalueren. Gibbs (2013) stelt dit vrij duidelijk en vermeld bovendien dat de uitgevoerde monitoringsprogramma's dikwijls te doelgericht zijn op specifieke effecten (bv van stortoperaties) en te weinig gericht zijn op het grotere geheel, zijnde het begrijpen van de processen zelf. Hij ziet hierin in zoverre een gevaar dat de natuurlijke variabiliteit gehaald wordt uit de metingen uitgevoerd tijdens specifieke operaties, terwijl de natuurlijke achtergrondwaarde en variabiliteit niet gekend is omdat ze niet gemeten wordt. Een fenomeen dat gekend staat als 'shifting baseline'. Doordat monitoring niet gericht is op het begrijpen van processen kan de waargenomen variabiliteit dikwijls niet in een correcte kader geplaatst worden.

De tripodemetingen in het kader van het MOMO project te MOW1 (Figuur 2.1) vormen een uitzondering hierop gezien hun langdurig karakter en het feit dat in de nabije omgeving tal van andere metingen worden uitgevoerd (golven en waterstand, meteogegevens, zie Meetnet Vlaamse Banken) en sinds oktober 2013 een OBS5 aan de AW boei (Baeye et al. 2014). De eerste tripod verankeringen te MOW1 werden in 2004 uitgevoerd. Aanvankelijk werden ongeveer 50 meetdagen per jaar voorzien, stelselmatig werd het aantal meetdagen verhoogd en vanaf november 2009 worden er continue metingen uitgevoerd. Deze data zijn een belangrijke bron aan informatie om zowel de natuurlijke variabiliteit, de langdurige trends en de effecten van menselijke ingrepen op de turbiditeit te kunnen achterhalen. In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van alle tripodemetingen uit het MOMO project. De verwerking van de data wordt beschreven in hoofdstuk 3 en de resultaten besproken in hoofdstuk 4.



Figuur 2.1: Positie van de MOW1 tripod (▲), AW boei met OBS5+ (⊙), MOW0 (links □), MOW1 (midden □), MOW3 meetpaal (rechts □) en het Zeebrugge meteostation (▢).

2.2. Meetapparatuur

Stroming, saliniteit, temperatuur, SPM concentratie en partikelgrootteverdeling (PGV) werden gemeten met een tripode, zie figuur 2.2. De gemonteerde instrumentatie bestaat, onder andere uit drie D&A optical backscatter point sensoren (OBSen), een Seabird SBE37 CT, een SonTek® ADP current profiler en een Sequoia Scientific LISST (laser in situ scattering and transmissometry) 100 X type C. Alle data (uitgezonderd van de LISST) worden opgeslaan 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 backscatter van de ADP om te zetten naar SPM concentratie. De OBS voltage werd omgezet naar SPM concentratie met behulp van gefiltreerde waterstalen genomen tijdens verschillende meetcampagnes. 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.

De tripode werd verankerd te MOW1 gedurende 3-6 weken, waarna ze terug opgehaald en vervangen werd met een gelijkaardig tripodesysteem. Door deze langdurige verankering beschikken we over een representatief overzicht dat de natuurlijke variaties, zoals springtij-doodtij en meteorologische gebeurtenissen, weergeeft. De golfdata zijn afkomstig van de A2-boei (Meetnet Vlaamse Banken), zie figuur 2.1.



Figuur 2.2: Tripode meetsysteem klaar voor verankering te MOW1 op 28/11/2013. (foto genomen door Jorn Urbain, Belgische Marine).

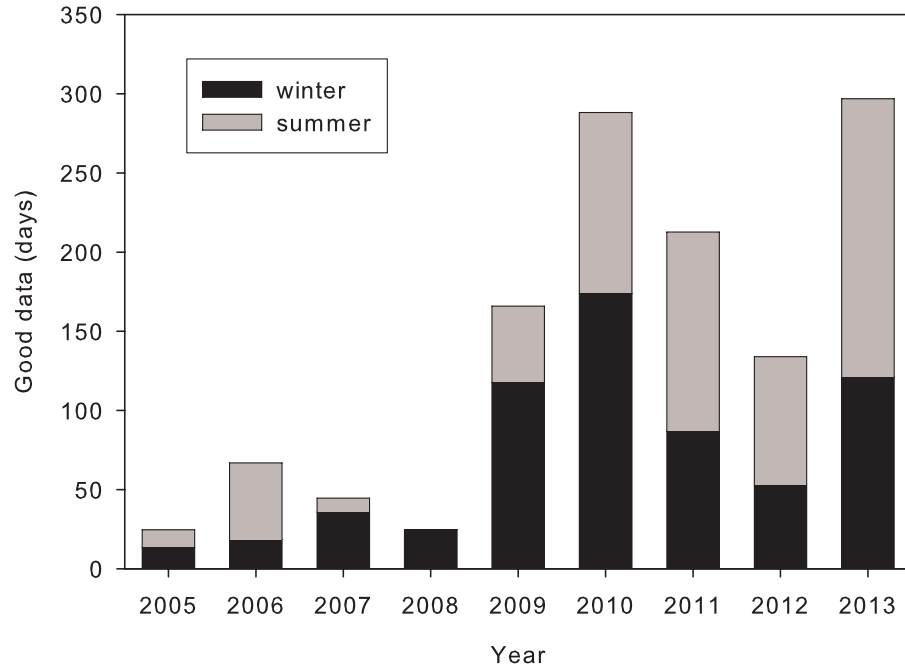
2.3. Overzicht verankeringen: ADP en LISST

2.3.1. ADP

Er werden verschillende ADP settings gebruikt tijdens de verankeringen. Het meetinterval varieerde tussen 1 en 30 minuten, maar was meestal 15 minuten. De bin size werd op 25 cm gezet voor de periode 2005 - 2010; vanaf 2011 werd een bin size van

15 cm gekozen. Het aantal bins was meestal was 12; en vanaf 2013 werd het aantal verhoogt tot 16, dit om informatie tot in de bodem te verkrijgen. In totaal werden 1258 dagen aan data verzameld gedurende de 43 verankeringen te MOW1. Een overzicht van de ADP data kan gevonden worden in Figuur 2.3 en tabel 2.1-2.2.

Het teruggekaatste ADP signaal (backscatter) werd gebruikt om SPM concentratie te bepalen. Na omvorming naar decibels, werd de signaalsterkte gecorrigeerd voor geometrische spreiding en afzwakking (attenuation) in het water. Nadien werd gebruik gemaakt van een iteratieve benadering (Kim et al. 2004) om het signaal te corrigeren. SPM concentratie afgeleid uit de bovenste OBS (OBS2) werd gebruikt om de eerste bin van de ADP te calibreren.



Figuur 2.3: Goede ADP data (goede dagen per jaar) voor de periode 2005-2013 (2013: enkel tot 09/12).

Tabel 2.1: Aantal goede ADP data te MOW1 per jaar en seizoen (winter: januari-maart+oktober-december, zomer: april-september).

	Jaar	Winter	Zomer
MOW1			
2005	24.64	13.80	10.84
2006	66.81	18.50	48.31
2007	44.69	35.88	8.81
2008	24.80	24.80	0
2009	165.87	117.90	47.97
2010	288.20	173.89	114.31
2011	212.67	87.04	125.63
2012	133.95	53.27	80.68
2013 (tot 9/12)	296.73	120.93	175.80
2006-2013	1258.36	646.01	612.35

Tabel 2.2: Overzicht van ADP metingen te MOW1.

Nr	year	goede data (julian day)	aantal	bin size (m)	Nr of bins	interval (min)	opmerkingen
5	07/02/2005-08/02/2005	38.51-39.30	0.78	0.25	12	2.5	
6	04/04/2005-15/04/2005	94.46-105.31	10.84	0.25	12	1.0	
8	22/11/2005-05/12/2005	326.35-339.37	13.02	0.25	12	30.0	
9	13/02/2006-27/02/2006	44.48-58.44	13.96	0.25	12	30.0	
10	27/03/2006-18/04/2006	86.46-108.37	21.92	0.25	12	30.0	
11	15/05/2006-15/06/2006	135.49-166.42	30.94	0.25	12	30.0	
15	10/07/2007-19/07/2007	191.75-200.56	8.81	0.25	12	10.0	
16	23/10/2007-28/11/2007	296.53-332.41	35.88	0.25	12	10.0	
21	17/11/2008-12/12/2008	322.58-347.38	24.80	0.25	12	10.0	
22	09/02/2009-19/03/2009	40.49-78.32	37.83	0.25	12	10.0	
23	26/03/2009-29/04/2009	85.34-119.33	33.99	0.25	12	10.0	
27	10/09/2009-21/10/2009	253.36-294.49	41.12	0.25	12	1.0	
30	06/11/2009-08/12/2009	310.36-342.63	32.27	0.25	12	10.0	
31	11/12/2009-25/01/2010	345.35-25.25	44.90	0.25	12	10.0	
32	25/01/2010-25/03/2010	25.65-84.43	58.78	0.15	13	10.0	
33	25/03/2010-20/05/2010	84.46-140.60	56.13	0.25	12	10.0	
34	20/05/2010-31/05/2010	140.68-151.73	11.05	0.25	12	10.0	
35	31/05/2010-01/07/2010	151.75-182.00	30.26	0.25	12	10.0	
37	06/09/2010-18/10/2010	249.60-291.47	41.87	0.15	12	2.0	
38	18/10/2010-08/11/2010	291.55-312.99	21.43	0.25	12	15.0	
39	17/11/2010-15/12/2010	321.50-349.61	28.11	0.15	12	15.0	
40	15/12/2010-31/01/2011	349.68-365.99	16.31	0.25	12	15.0	
41	31/01/2011-21/03/2011	-	0				geen data
44	29/04/2011-23/05/2011	119.43-143.68	24.25	0.15	12	15.0	
45	23/05/2011-19/06/2011	143.64-170.59	26.94	0.25	12	15.0	
46	11/07/2011-12/08/2011	192.68-224.73	32.05	0.15	12	15.0	
47	18/08/2011-09/09/2011	230.65-252.39	21.74	0.25	12	10.0	
48	09/09/2011-12/10/2011	252.35-285.64	33.29	0.15	12	15.0	
49	12/10/2011-24/11/2011	285.77-322.55	36.78	0.15	12	15.0	
50	24/11/2011-18/01/2012	328.38-18.96	55.58	0.15	12	15.0	
51	24/02/2012-19/03/2012	55.64-79.60	23.96	0.15	12	15.0	geen data
52	19/03/2012-25/04/2012	79.65-116.52	36.86	0.15	12	15.0	
54	07/05/2012-28/06/2012	-	0				geen data
55	29/06-2012-23/08/2012	181.45-236.60	55.16	0.15	12	15.0	
56	23/08/2012-15/10/2012	-	0				geen data
57	25/10/2012-05/12/2012	-	0				tripode op zij
58	05/12/2012-24/01/2013	-	0				geen data
59	24/01/2013-07/03/2013	24.59-66.39	41.80	0.15	12	4.0	
60	07/03/2013-28/03/2013	66.43-87.64	21.21	0.15	12	15.0	
62	28/03/2013-22/04/2013	87.68-112.50	24.82	0.15	12	15.0	
63	22/04/2013-17/05/2013	112.54-137.30	24.76	0.15	12	15.0	
65	17/05/2013-27/06/2013	137.34-178.49	41.14	0.15	16	15.0	
67	27/06/2013-24/07/2013	178.54-205.39	26.85	0.15	12	15.0	
69	24/07/2013-21/08/2013	205.43-233.61	28.19	0.15	16	15.0	
71	21/08/2013-17/09/2013	233.65-260.49	26.84	0.15	12	15.0	
73	23/09/2013-16/10/2013	266.48-289.49	23.01	0.15	16	15.0	
75	16/10/2013-12/11/2013	289.53-316.55	27.02	0.15	16	15.0	
78	28/11/2013-09/12/2013	332.49-343.58	11.09	0.15	16	15.0	

2.3.1. LISST100 C

De LISST-100C meet de PGVen in 32 logaritmische 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 verondersteld dat de deeltjes sferisch zijn. De gemiddelde partikelgrootte van een verdeling kan op verschillende manieren gedefinieerd worden afhankelijk van hoe de verdeling werd gemeten. Laserdiffractie (en dus ook de LISST) geeft de volume gemiddelde partikelgrootte weer. Een overzicht van de LISST data te MOW1 kan gevonden worden in tabellen 2.3-2.4 en figuur 2.4.

De data werden aan een grondige kwaliteitscontrole onderworpen, en enkel de goede data werden weerhouden voor analyse. Hiaten in de dataserie zijn het gevolg van biofouling (vooral in de zomer), te lage transmissie (te hoge SPM concentratie, eerder in de winter), te lage batterijspanning of defecten van het instrument. Onvolledige tijdseries met bv enkel data tijdens kentering, wanneer de SPM concentraties iets lager zijn, werden ook weggelaten, omdat zij niet representatief zijn voor een volledig getij. De kwaliteitscontrole werd uitgevoerd op de volumeconcentratie, transmissie en de gemiddelde vlok grootte, alsook op de korrelgrootteverdelingen zelf. Hierbij zijn we conservatief tewerkgegaan, indien er enige twijfel bestond over de kwaliteit van de data werden ze niet weerhouden. Door een niet perfect uitgelijnde laser (dit kan bv tijdens de verankering gebeuren), een verstoring van het glas op het instrument (krassen, begroeing), kan een piek in een bepaalde klasse optreden die consistent aanwezig is tijdens de verankering. Dit soort verstoring is niet zichtbaar in de gemiddelde grootte of in de transmissie, maar verstoort de PGV en maakt de data onbruikbaar voor de hier gebruikte analyse. Enkele van deze data zouden na correctie (door bv de verstoorte klasse weg te laten) nog gebruikt kunnen worden, maar dit werd hier niet gedaan.

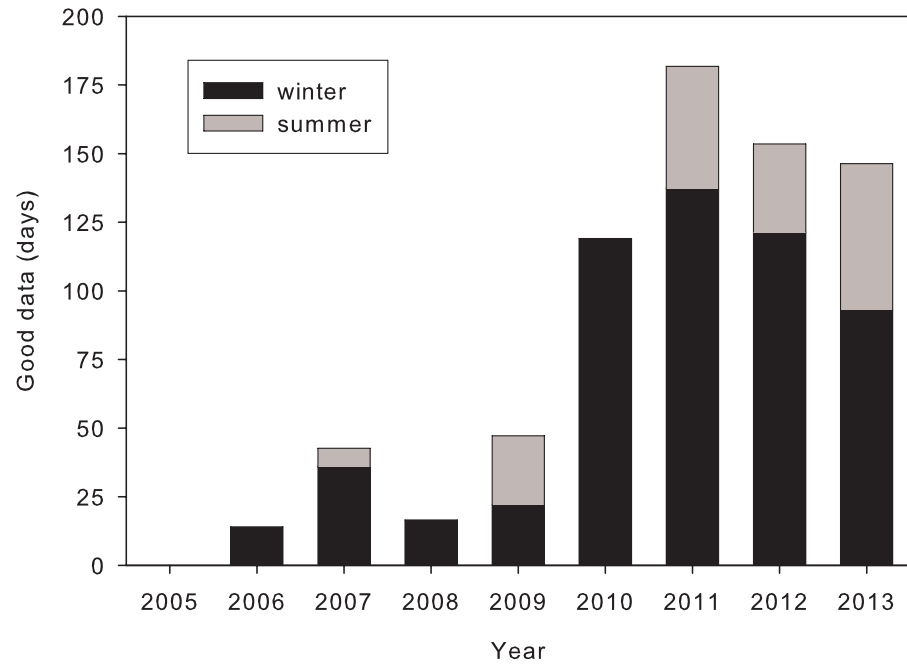
De data werden gemiddeld om de 15 minuten en geresampled op eenzelfde tijdstip (op het uur, 15, 30 en 45 minuten erna). Vooral de entropie analyse werd uitgevoerd, werd een low-pass filter toegepast om het getijsignaal eruit te filteren. Deze low-pass gefilterde data werden dan ingevoerd in het Fortran programma uit Johnston & Semple (1983). Het aantal groepen werd beperkt tot vier, in overeenstemming met de procedure gevolgd in Fettweis et al. (2013).

Tabel 2.3: Aantal goede LISST data te MOW1 per jaar en seizoen (winter: januari-maart+oktober-december, zomer: april-september).

	Jaar	Winter	Zomer
	MOW1		
2006	14.01	14.01	0
2007	42.66	35.90	6.76
2008	16.58	16.58	0
2009	47.19	22.07	25.12
2010	119.03	119.03	0
2011	181.79	137.14	44.65
2012	153.52	121.39	32.13
2013 (tot 9/12)	136.87	93.03	43.84
2006-2013	721.15	559.15	153.41

Tabel 2.4: Overzicht van LISST metingen te MOW1.

Nr	Begin - einde	Meet-dagen	Goede dagen	Goede data (julian day)	Opmerking
005	07/02/2005-18/02/2005	10.89	0	-	transmissie te laag, niet representatief
007	22/06/2005-11/07/2005	19.26	0	-	geen realistische PGVen: slechte uitlijning?
009	13/02/2006-27/02/2006	14.01	14.01	44.47-58.48	alle data ok
010	27/03/2006-18/04/2006	21.94	0	-	transmissie te laag, niet representatieve data
011	15/05/2006-15/06/2006	30.92	0	-	geen realistische PGVen: slechte uitlijning?
015	10/07/2007-19/07/2007	8.82	6.67	191.74-198.5	na 198.5 verstoorte data
016	23/10/2007-28/11/2007	35.90	35.90	296.52-332.42	alle data ok
021	17/11/2008-04/12/2008	16.58	16.58	322.57-339.15	alle data ok
022	09/02/2009-25/02/2009	16.41	16.41	40.46-56.87	alle data ok
023	26/03/2009-29/04/2009	34.02	28.67	85.33-114.	na 114. verstoorte data
027	10/09/2009-17/10/2009	37.49	2.12	253.38-255.5	op 12/09 werd tripode omver geduwd
030	06/11/2009-08/12/2009	32.24	0	-	geen realistische PGVen: slecht uitgelijnd (?)
031	11/12/2009-25/01/2010	45.29	0	geen	geen realistische PGVen: slecht uitgelijnd (?)
032	25/01/2010-28/02/2010	34.31	34.31	25.64-59.95	alle data ok
033	25/03/2010-07/04/2010	12.75	0	-	geen realistische PGVen: slecht uitgelijnd (?)
034	20/05/2010-31/05/2010	11.06	0	-	geen realistische PGVen: slecht uitgelijnd
035	31/05/2010-23/07/2010	52.58	0	-	geen realistische PGVen: slecht uitgelijnd
037	06/09/2010-18/10/2010	41.88	10.33	249.67-260.	vanaf 260: te lage transmissie
038	18/10/2010-17/11/2010	29.90	29.90	291.62-321.52	alle data ok
039	17/11/2010-15/12/2010	28.16	28.16	321.51-349.67	alle data ok
040	15/12/2010-31/01/2011	46.87	46.87	349.67-31.54	alle data ok
041	31/01/2011-21/03/2011	49.12	39.93	31.57-71.5	na 71.5: verstoorte data
044	29/04/2011-23/05/2011	23.85	12.58	119.42-132.	na 132: verstoorte data
045	23/05/2011-11/07/2011	48.92	11.37	143.63-155.	na 155: verstoorte data
046	11/07/2011-26/07/2011	14.37	11.34	192.66-204.	na 204: verstoorte data
047	18/08/2011-09/09/2011	21.75	9.36	230.64-240.	na 240: verstoorte data
048	09/09/2011-23/09/2011	14.29	11.67	252.33-264.	na 264: verstoorte data
049	12/10/2011-24/11/2011	42.73	29.25	285.75-315.	na 315: verstoorte data
050	24/11/2011-18/01/2012	57.38	41.48	328.58-5.06	na 5.06: batterij leeg
051	24/02/2012-19/03/2012	24.15	24.15	55.47-79.62	alle data ok
052	19/03/2012-25/04/2012	36.87	36.87	79.64-116.52	alle data ok
054	07/05/2012-28/06/2012	52.25	0	-	te hoge volume concentraties
055	29/06/2012-20/08/2012	51.72	7.61	181.39-189.	na 189: verstoorte data
056	23/08/2012-15/10/2012	52.80	0	-	te hoge volume concentraties
057	25/10/2012-05/12/2012	41.03	31.13	299.27-330.4	na 330.4: tripode omver geduwd door storm
058	05/12/2012-24/01/2013	50.20	4.38	340.32-344.7	na 344.7: water insijpeling, verdachte data
059	24/01/2013-07/03/2013	41.80	5.61	24.59-30.20	na 30.20: verstoorte data
060	07/03/2013-28/03/2013	21.47	21.47	66.42-87.89	alle data ok
062	28/03/2013-22/04/2013	24.85	0	-	verstoorte data
063	22/04/2013-17/05/2013	24.78	24.78	112.53-137.31	alle data ok
067	27/06/2013-24/07/2013	28.87	2.97	178.53-181.5	na 181.5: verstoorte data
071	21/08/2013-23/09/2013	32.80	8.56	233.64-242.2	na 242.2: verstoorte data
073	23/09/2013-16/10/2013	23.02	23.02	266.47-289.49	alle data ok
075	16/10/2013-28/11/2013	42.93	42.93	289.52-332.45	alle data ok
078	28/11/2013-09/12/2013	10.76	7.53	332.47-340.	op 340: omver geduwd door storm



Figuur 2.4: Goede LISST data (goede dagen per jaar) voor de periode 2005-2013 (2013: enkel tot 09/12).

3. Classificatie van de data

3.1. Hydro-meteo en seizoenale groepering

Een uitdaging bij het verwerken van PGV afkomstig van langdurige verankeringen vormt de grote hoeveelheid aan data. Een classificatie van de data dringt zich op, omdat zij de interpretatie van de data volgens bepaalde criteria vergemakkelijkt. De metingen omvatten 2299 getijcycli (ADP) en 1235 getijcycle (LISST) die geklasseerd werden in verschillende groepen naargelang de getijamplitude, de hydrodynamische condities (alongshore residuele stroming) en de seizoenen (winter, zomer).

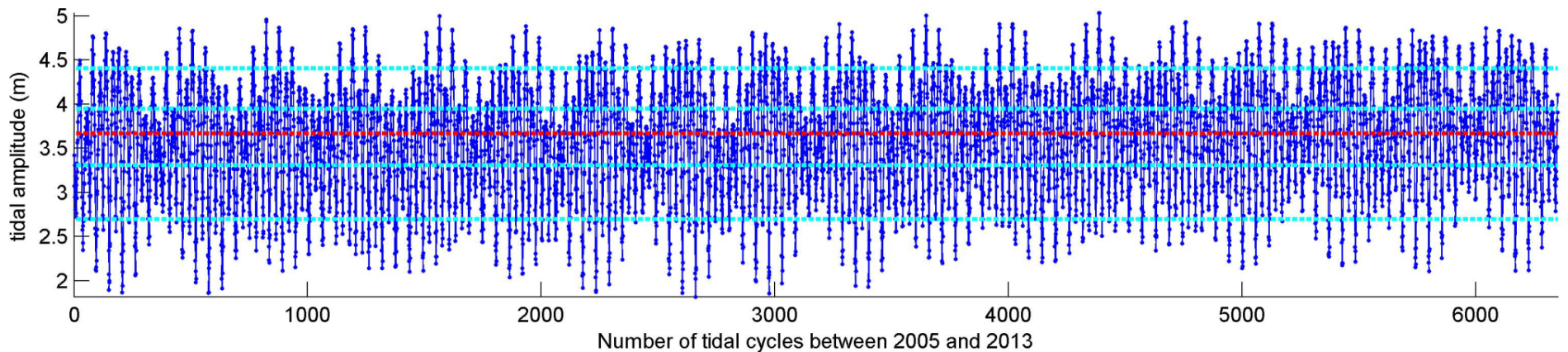
Aan elke getijcyclus werd een getijamplitude (verschil tussen hoogwater (HW) en laagwater (LW)) toegekend, en werden de getijcycli gegroepeerd volgens getijamplitudes. Hiervoor werd gebruik gemaakt van het harmonisch getijsignaal en dus niet van het gemeten getij. De data werden gegroepeerd als superspringtij, springtij, gemiddeld tij, doodtij en superdoodtij. Deze indeling komt overeen met de P90 (4.41 m), P66 (3.95 m), P33 (3.31 m) en P10 (2.70 m) percentielen in getijamplitude, zie Tabel 3.1. In Figuur 3.1 wordt de getijamplitude over een periode van 9 jaar getoond en worden de boven vermelde percentiele aangeduid. In Figuur 3.2 wordt de variatie in getijamplitude getoond voor één specifiek jaar (2005). Opvallend is dat de getijamplitude een halfjaarlijkse (seizoenale) cycliciteit heeft. De extreme getijamplituden (superspring en superdood) zijn vooral geconcentreerd rond de equinoxen (Maart en September). In de tussenliggende periodes (Juli en December) zijn de getijamplitudes minder extreem en gelegen tussen de P90 en de P10.

Tabel 3.1: Indeling van de data in vijf categoriën volgens getijamplitude.

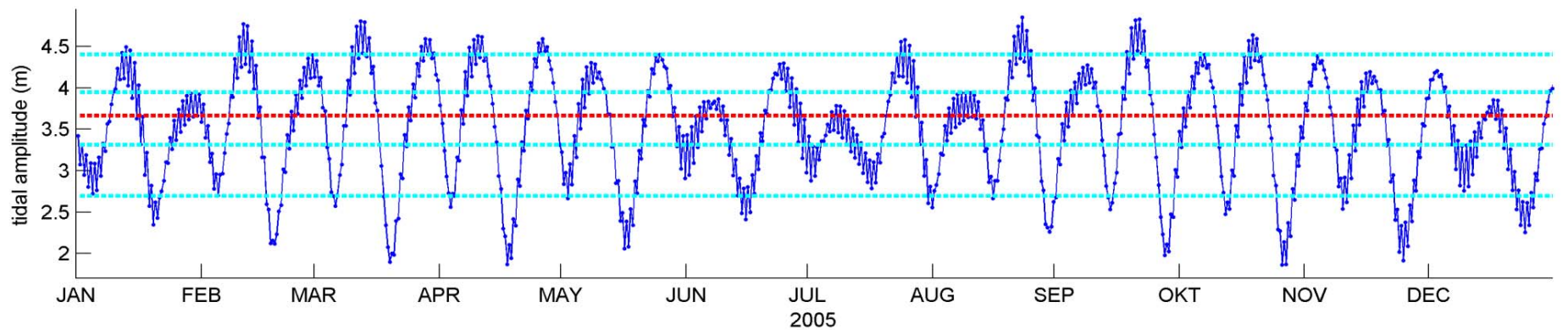
type getij	Amplitude	Frequentie
superspringtij	>4.41 m	10%
springtij	>3.95 m	33%
gemiddeld getij	3.31 – 3.95 m	33%
doodtij	<3.31 m	33%
superdoodtij	<2.70 m	10%

Indeling in seizoenen werd beperkt tot twee seizoenen: een periode met lage en hoge oppervlakte SPM concentratie (Fettweis et al. 2013, 2014). De zomer is de periode van April tot September en is gekarakteriseerd door lage SPM concentraties in de waterkolom. De winter omvat de periode van Oktober tot Maart en wordt gekarakteriseerd door hogere SPM concentraties in de waterkolom.

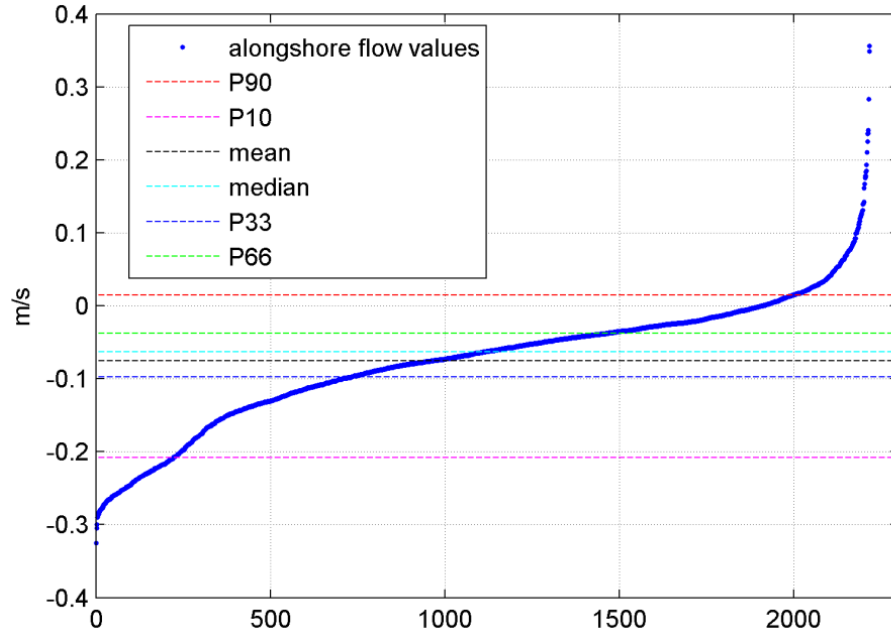
Voor de classificatie volgens hydro-meteo condities werden de ADP stroomsnelheden opgesplitst in een alongshore en een cross-shore component. Op de alongshore component werd het getijsignaal eruit gefilterd met behulp van een low-pass filter (PL64) (Flagg et al. 1976). In functie van de richting van deze residuele stroming werden de getijcycli gegroepeerd in 2 groepen: SW en NE. Negatieve waarden hebben een naar het WSW gerichte residuele stroming, positieve een naar ENE gerichte. De gesorteerde verdeling van getijcyclus volgens residuele alongshore stroming wordt getoond in Figuur 3.3 samen met de percentielen (zie ook Tabel 3.2).



Figuur 3.1: Getijamplituden tussen 2005 en 2013. De lijnen geven van boven naar onder de P90 (4.41 m), P66 (3.95 m), P50 (3.67 m), P33 (3.31 m) en P10 (2.70 m) weer.



Figuur 3.2: Getijamplituden in 2005. De lijnen geven van boven naar onder P90 (4.41 m), P66 (3.95 m), P50 (3.67 m), P33 (3.31 m) en P10 (2.70 m) weer voor de periode 2005-2013.



Figuur 3.3: Gesorteerde verdeling van residuele alongshore stroming. Tevens worden enkele percentielen aangeduid.

Tabel 3.2: Percentielen in residuele alongshore stroming.

Percentiel	Stroming (m/s)	Richting
P90	0.02	NE
P85	0.00	-
P66	-0.04	SW
P50	-0.06	SW
P33	-0.10	SW
P10	-0.21	SW

De data tonen aan dat de residuele alongshore stroming te MOW1 in 85% van de tijd naar het SW is gericht, dus in ebrichting. Dit is enigszins verrassend en verschilt met de residuele stromingsrichting te Blankenberge, die meestal naar het NE is gericht (Baeye et al. 2011) en met de algemene richting van de residuele stroming in de zuidelijke Noordzee (Fettweis et al., 2012b). Mogelijks is deze omkering in residuele stroming een lokaal fenomeen en te wijten aan de te MOW1 nog steeds belangrijke invloed van de Westerschelde. De drempelwaarde voor de groepering van de getijcycli is P85 (SW gerichte stroming) en P33 (NE gerichte stroming).

Door deze classering, worden aldus 20 klassen of groepen bekomen. Voor elke klasse werd dan een gemiddeld verloop berekend. Een getijcyclus start met hoogwater (HW) en eindigt op het volgende HW. Elke getijcyclus werd geresampled om 50 datapunten (om de 15 minuten) per cyclus te bekomen. Voor elke gemiddelde getijcyclus worden fouten aangeduid die de standaardfout weergeven, dit is de standaardafwijking, s op het gemiddelde gedeeld door de vierkantswortel van het aantal getijden, n in de groep:

$$\text{standaardfout} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

3.2. Entropie groepering van vloggrootteverdelingen

Twee methoden voor classificatie van partikelgroottespectra werden toegepast. De eerste maakt gebruik van de stroomsnelheidsdata en getijdata om de LISST spectra in verschillende groepen op te delen in overeenstemming met de hydro-meteocondities (zie boven). Entropie analyse werd gebruikt als tweede classificatiemethode; hiermee kan de lukraakheid van een gebeurtenis (zoals een PGV) geëvalueerd worden en kan deze gebeurtenis aan een groep toegekend worden met een zelfde lukraakheid of geplaatst worden in een nieuwe groep. Zodoende kan het aantal parameters verminderd worden wat de classificatie van data vereenvoudigd. Entropie analyse is een vorm van multivariate statistiek (informatie statistiek). Entropie analyse werd gebruikt als tweede classificatiemethode; hiermee kan de lukraakheid van een gebeurtenis (zoals een PGV) geëvalueerd worden en kan deze gebeurtenis aan een groep toegekend worden met een zelfde lukraakheid of geplaatst worden in een nieuwe groep. Zodoende kan het aantal parameters verminderd worden wat de classificatie van data vereenvoudigd. Entropie analyse is een vorm van multivariate statistiek (informatie statistiek). Omdat gebruik gemaakt wordt van het volledige spectra, 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 vlokken (Mikkelsen et al. 2007, Fettweis et al. 2012a). Voor elk partikelgrootteverdeling van de LISST 100 met 32 klassen wordt de entropie, E , berekend als:

$$E = -\sum_{i=1}^{32} p_i \log p_i$$

met p_i de fractie van deeltjes in klasse i (Johnston & Semple 1983). De entropie varieert tussen $E = \log n$ (i.e. alle $p_i=1/n$) en $E = 0$ ($p_i=1$ in één klasse en 0 in alle andere klassen). Door een optimale indeling in groepen te maken, wordt de ongelijkheid, I , tussen groepen gemaximaliseerd en in een groep geminimaliseerd. De partikelgrootteverdelingen die toebehoren aan een groep hebben dan een gelijkaardige verdeling, terwijl tussen de groepen de vorm van de verdeling meer verschilt. Een eerste stap bij de berekening is om de volumeconcentratie per klasse en voor elk PGV te normaliseren. De ongelijkheid tussen alle verdelingen wordt dan berekend als volgt (Johnston & Semple 1983):

$$I = \sum_{j=1}^J Y_j \sum_{i=1}^N Y_i \log_2 NY_i \quad (3.3)$$

met J het aantal partikelgrootteklassen, N het aantal partikelgrootteverdelingen, $Y_j = \sum_{i=1}^N Y_{ij}$, $Y_i = Y_{ij}/Y_j$ en Y_{ij} de genormaliseerde volumeconcentratie t.o.v. de totale volumeconcentratie van partikelgrootteverdeling i en klasse j .

Vooraleer de entropie analyse werd uitgevoerd, werden alle PGV per jaar gegroepeerd en werd de PL64 low-pass filter (Flagg et al. 1976) toegepast om het getijsignaal eruit te halen. Deze low-pass gefilterde data werden dan ingevoerd in het Fortran programma uit Johnston & Semple (1983). Het aantal groepen werd beperkt tot vier, zie Fettweis et al. (2013).

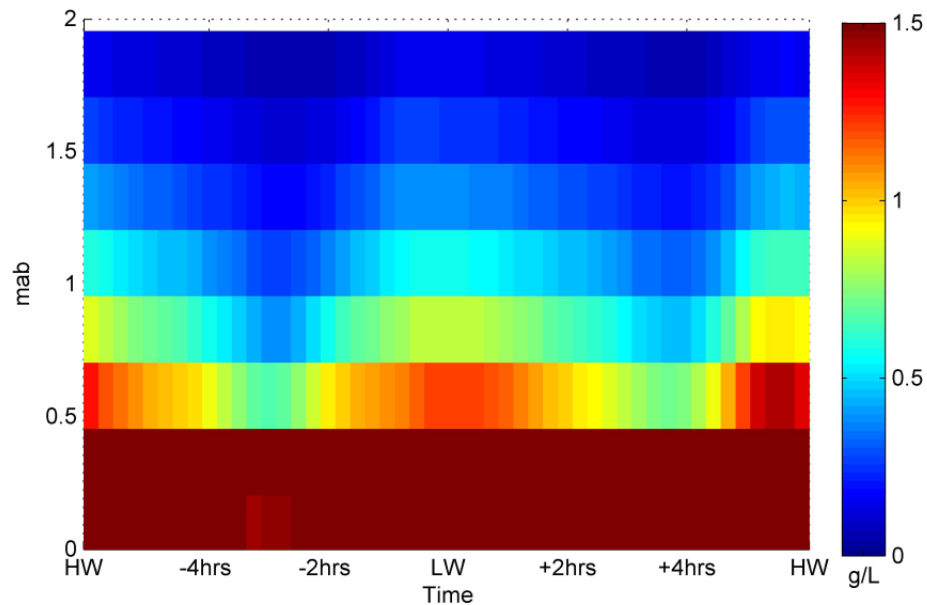
4. Bodem nabije SPM dynamica te MOW1

4.1. SPM concentratie en stroomsnelheid (ADP)

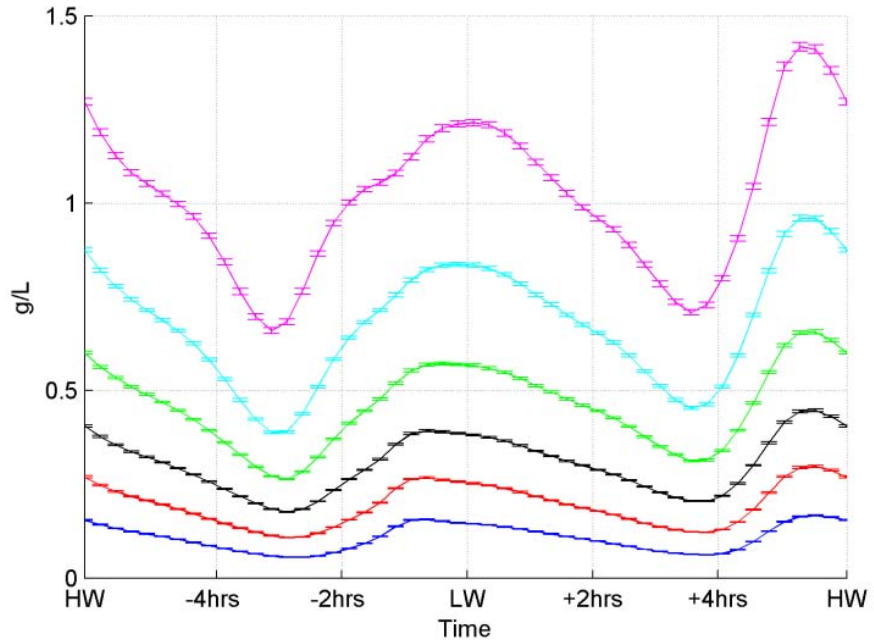
4.1.1. SPM concentratie: Alle data

De gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor alle data van de ADP wordt getoond in Figuur 4.1. Deze figuur geeft een representatief verloop van de SPM concentratie weer tijdens een getij zonder toepassing van een groepering zoals in §3.1 wordt beschreven. Alle condities (spring, gemiddeld en doortij, seizoenen, meteo) zijn (min of meer) gelijk verdeeld en worden aldus uitgemiddeld. De waterkolom is gelegen tussen 1.95 en 0.5 m boven de bodem. In de onderste twee lagen is het backscatter signaal sterk verstoord door akoestische reflecties vanuit de vaste bodem of een vloeibare sliblaag. Het is in deze lagen niet mogelijk om een kwalitatief goed signaal voor de SPM concentratie (alsook de snelheid) te bekomen. De hoogste SPM concentratie treden op rond HW (± 1.4 g/l) en LW (± 1.2 g/l). Hetzelfde verloop van de SPM concentratie wordt in een scatter plot in Figuur 4.2 voor deze 6 bins van de ADP getoond samen met de standaardfout. Minima in SPM concentratie treden op rond 3 uur voor en ongeveer 4 uur na LW. Maxima in SPM concentration maxima zijn er rond ongeveer 1 uur voor LW en HW. De piek rond HW is iets hoger dan de piek rond LW. Merk op dat in bin 6 (0.58 m) omstreeks LW twee pieken optreden, met name een kleinere rond 2 uur voor LW en een grotere rond LW. Het verticaal gemiddelde verloop in de eerste 6 bins wordt getoond in Figuur 4.3.

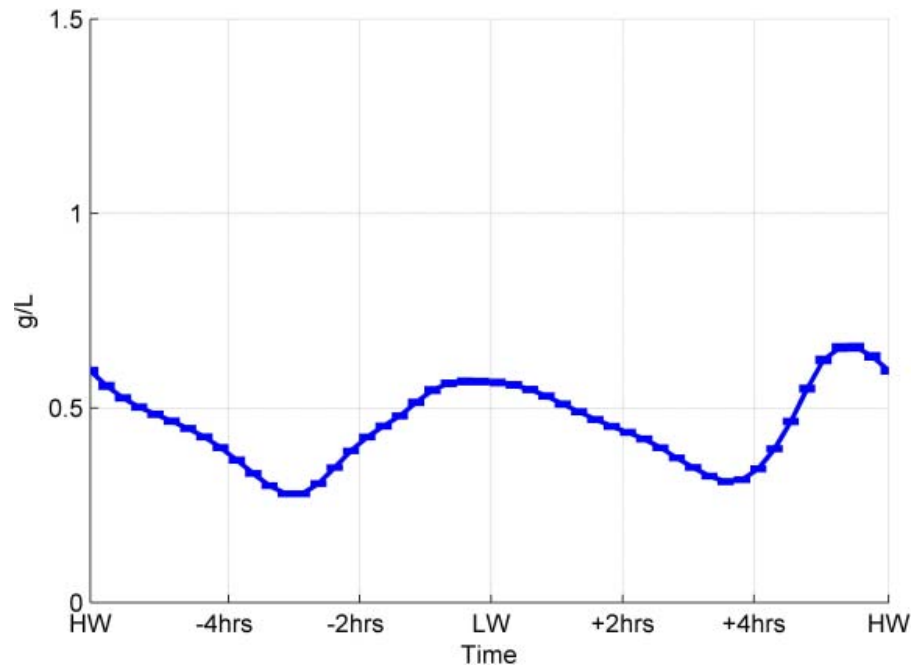
Het profiel in Figuur 4.4 geeft de over een getijcyclus gemiddelde SPM concentratie weer voor alle data. Men kan duidelijk het logaritmisch profiel in concentratie erkennen met waarden groter dan 1.5 g/l op 0.58 m boven de bodem en van 0.1 g/l op 1.83 m boven de bodem.



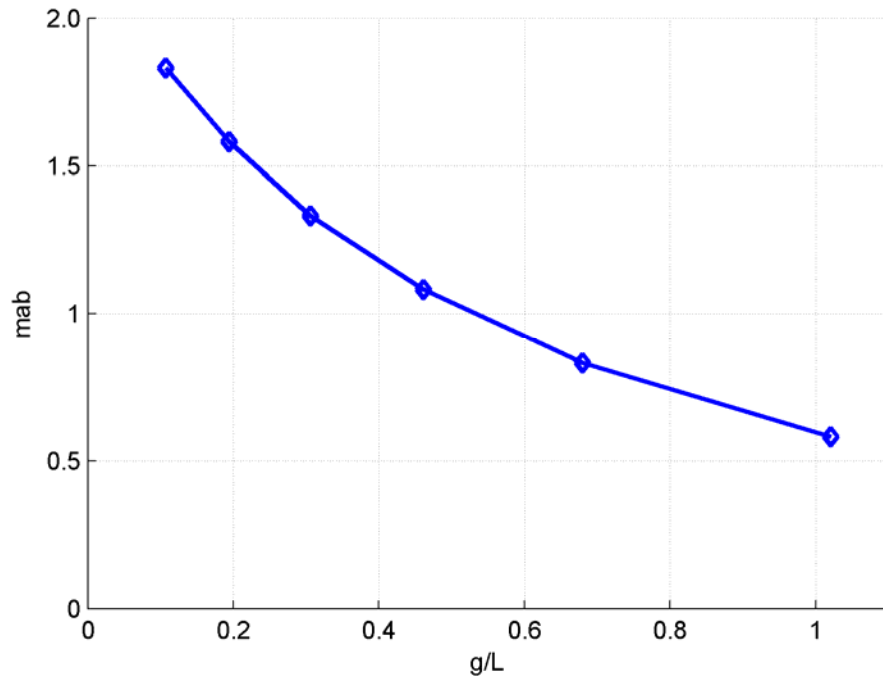
Figuur 4.1: Gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor alle data. (mab, meter above bed). De onderste twee cellen zijn in de bodem.



Figuur 4.2: Gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor alle data op 1.83 (blauw), 1.58 (rood), 1.33 (zwart), 1.08 (groen), 0.83 (cyaan) en 0.58 (magenta) boven de bodem.

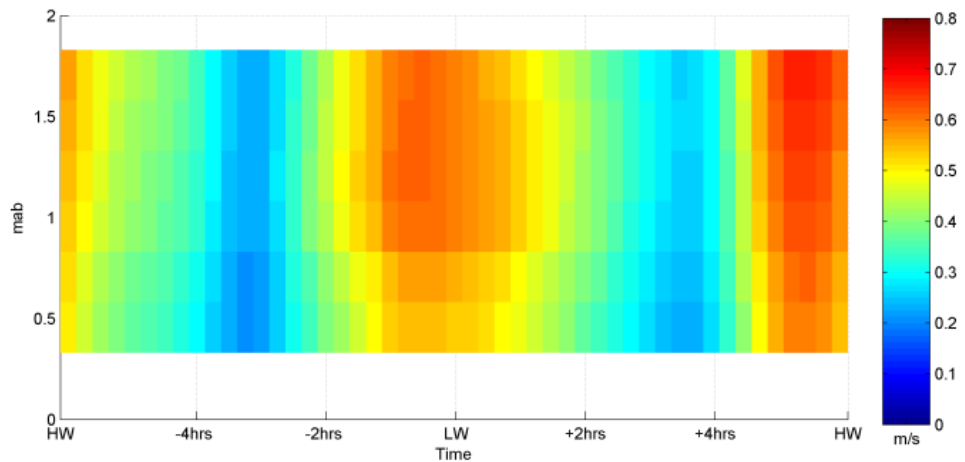


Figuur 4.3: Gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor alle data en gemiddeld over de eerste 6 bins.



Figuur 4.4: Getijgemiddelde SPM concentratieprofiel voor alle data.

De gemiddelde variaties in stroomsnelheid gedurende een getij wordt getoond in Figuur 4.5. We kunnen zien dat de stroming tijdens vloed sterker is, maar dat vloed iets korter duurt dan eb. De maximale stroomsnelheid treedt op op ongeveer 1 uur voor HW en LW tijdens vloed en eb respectievelijk. Er is een duidelijke correlatie tussen SPM concentratie en stroomsnelheid. De onderste twee lagen werden ook hier, wegens verstoring, weggelaten.



Figuur 4.5: Gemiddelde stroomsnelheid (m/s) tijdens een getij voor alle data.

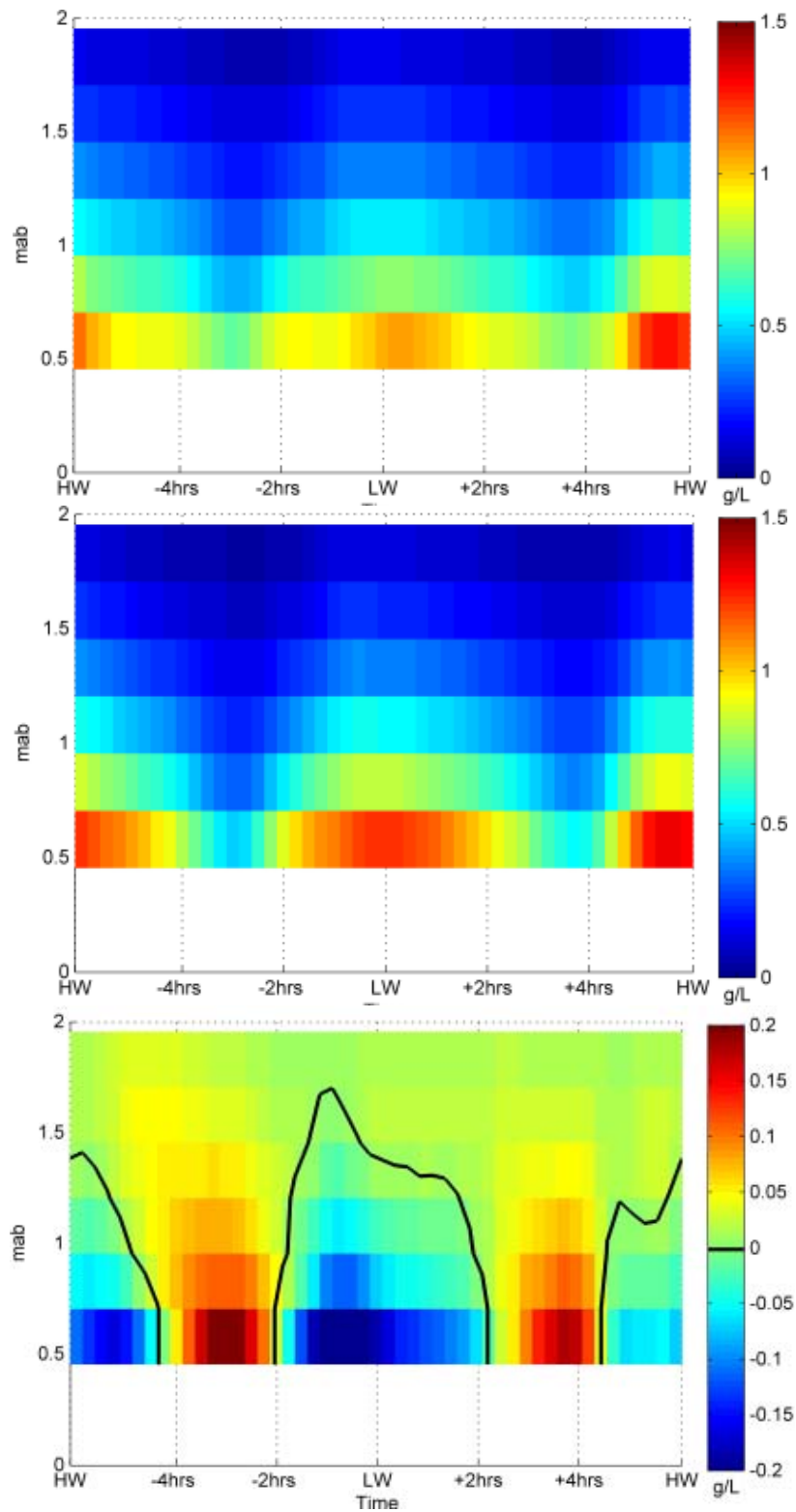
4.1.2. SPM concentratie: Seizoenen

Door de getijcycli te groeperen volgens seizoenen worden twee figuren bekomen representatief voor de winter en de zomer (Figuur 4.6, Figuur 4.7). In tegenstelling met de oppervlakte SPM concentratie afkomstig van satellietbeelden waar een zeer duidelijk seizoenaal signaal zichtbaar is (Fettweis et al. 2013, 2014), lijken de verschillen dicht tegen

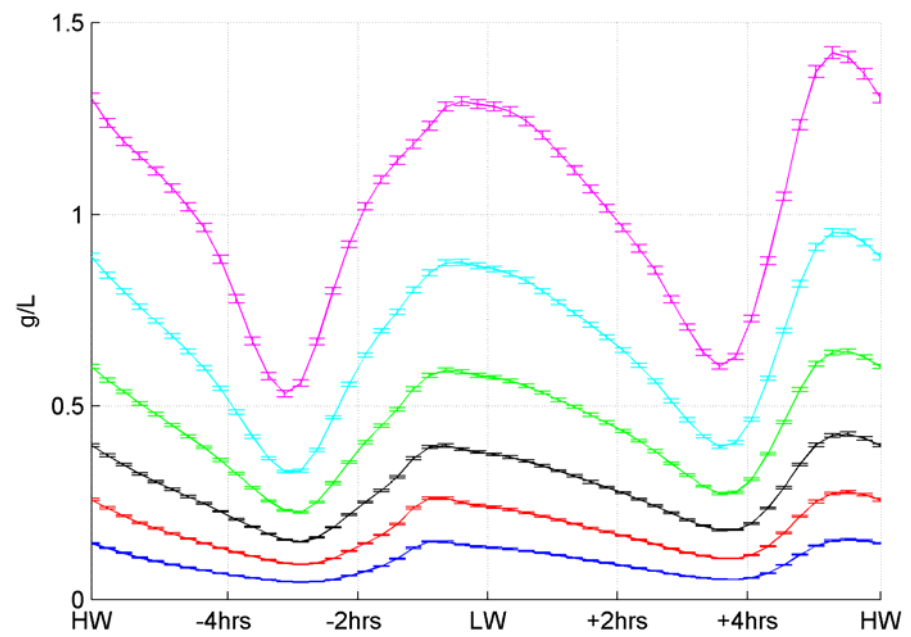
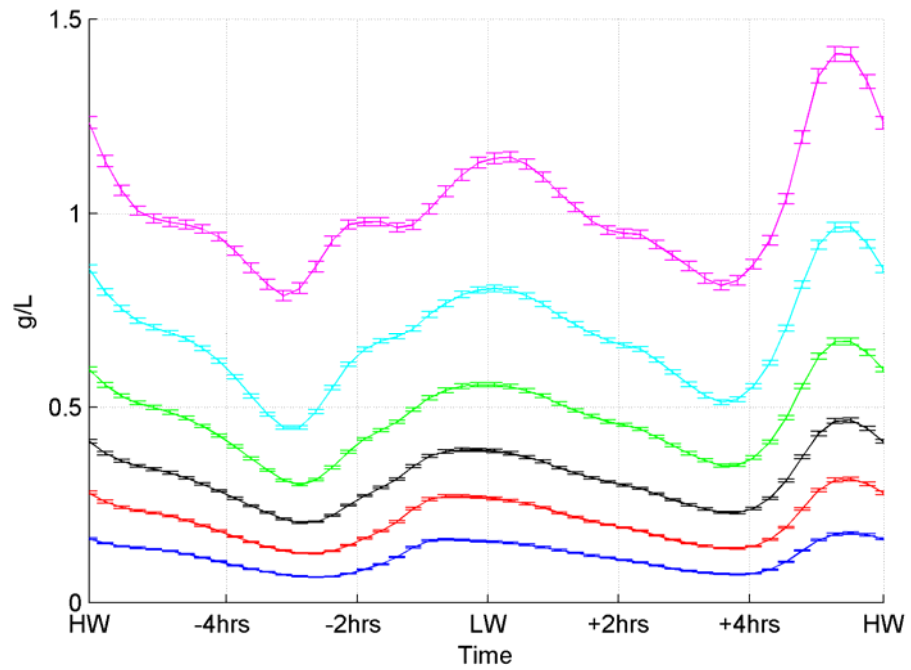
de bodem op het eerste zicht gering. Wel merken we op dat de SPM concentraties hoger zijn in de winter rond kentering en in de zomer rond maximale stroming.

Het verschil tussen de twee seizoenen wordt geïllustreerd in Figuren 4.6-4.8. De over een getijcyclus gemiddelde SPM concentratie tijdens beide seizoenen (Figuur 4.8) toont duidelijk het logaritmisch profiel in concentratie tijdens beide seizoenen. We merken op dat de SPM concentratie dicht tegen de bodem groter is in de zomer, maar met toenemende afstand van de bodem neemt dit verschil af en wordt de concentratie in de zomer lager dan in de winter. In de verschilplot (Figuur 4.6) tussen winter (hoge turbiditeit) en zomer (lager turbiditeit) wordt deze bevinding nog beter verduidelijkt. In het zomerseizoen (lage turbiditeitsperiode) is de SPM concentratie hoger tijdens periodes met maximale stroming (dit is omstreeks HW en LW) met uitzondering van de hoogste bin (1.83 mab), waar de SPM concentratie altijd hoger is in de winter. Tijdens kentering zien we het omgekeerde, de SPM concentratie is nu altijd hoger in de winter dan in de zomer. De SPM concentratie in functie van de tijd heeft een ander verloop in de winter dan de zomer en dit vooral tijdens eb. Dicht tegen de bodem zien we dat tijdens eb in de winter de SPM concentratie stijgt, dan constant blijft om dan een maximum te hebben rond LW. In de zomer is dit verloop veel gelijdelijker.

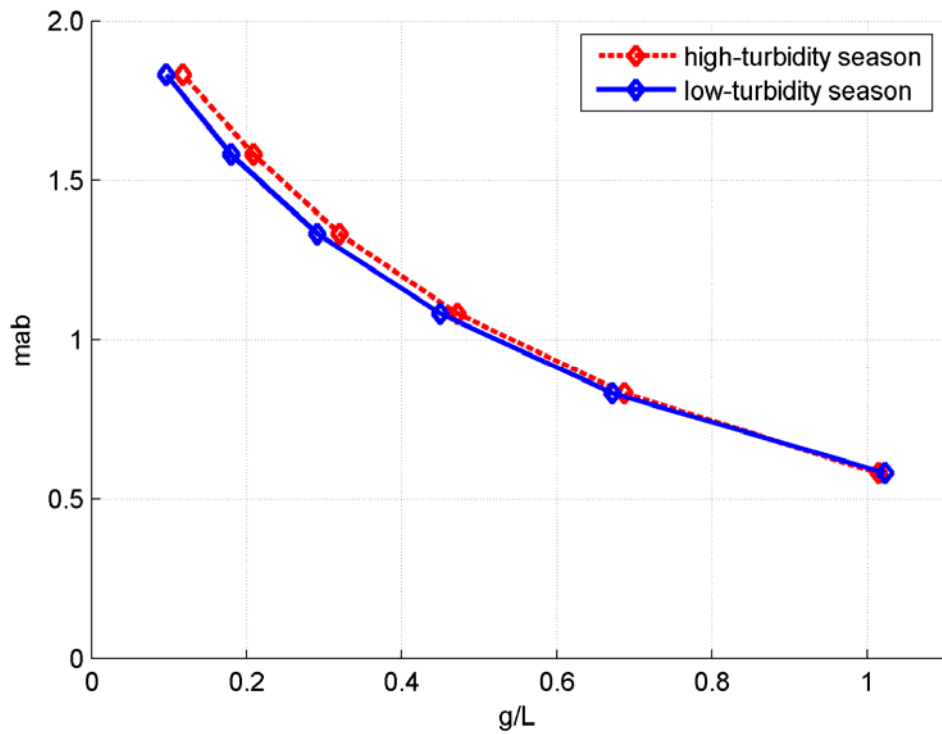
Mogelijke verklaringen sluiten aan en ondersteunen de bevindingen uit Fettweis et al. (2013, 2014) betreffende seizoenale variaties in SPM concentratie, waarin aangehaald wordt dat de biologische activiteit in de zomer voor een hoge concentratie aan kleverige organische molekulen (TEP) zorgt. Deze maken de macrovlokken sterker en verhogen hun frequentie in de zomer met als gevolg een snellere bezinking en meer kans op voorkomen van HCMS en/of vloeibare sliblagen. De hier getoonde resultaten laten zien dat de lagere SPM concentraties in de waterkolom tijdens de zomer (deels) gecompenseerd worden door de hogere SPM concentraties dicht tegen de bodem. In de literatuur wordt vermeld dat TEPs en andere bio-stabilizatoren de erosie en resuspensie van de sliblagen verminderen (Droppo et al. 2001; Black et al. 2002; Gerbersdorf et al. 2008; Maerz & Wirtz 2009). Fettweis et al. (2013, 2014) argumenteren dat in de winter de erosieweerstand van de slibafzetting verminderd ten gevolge van het wegvallen van het stabiliserend effect van de TEPs, waardoor het materiaal gemakkelijker geresuspendeerd kan worden en de SPM concentratie dus hoger is. De hier getoonde resultaten bevestigen dit enkel ten dele, doordat er ook nog een getijafhankelijkheid optreedt in dit signaal. De hogere SPM concentraties tijdens maximale stroming in de zomer kunnen verklaard worden door de hogere valsnelheden van de vlokken (de frequentie aan macrovlokken is hoger in de zomer) en de aldus grotere concentratie aan slib dicht tegen de bodem. De hogere valsnelheden werken de verticale vermenging van het SPM tegen, het geresuspendeerde materiaal blijft dicht tegen de bodem en wordt minder goed gemengd in de waterkolom, met als gevolg lagere SPM concentraties in de waterkolom in de zomer. De aanwezigheid van meer slib dicht tegen de bodem in de zomer zorgt er ook voor dat er meer materiaal kan geresuspendeerd tijdens maximale stroming, wat een hogere SPM concentratie tot gevolg heeft. De lagere SPM concentraties tijdens kentering in de zomer, kunnen dan verklaard worden door de snelle bezinking en afzetting van het slib. Er is meer SPM aanwezig dicht tegen de bodem, dit materiaal wordt sneller afgezet waardoor de SPM concentratie snel daalt. Tijdens de winter moet het slib uit heel de waterkolom uitzakken en zal de SPM concentratie dicht tegen de bodem dus minder snel afnemen. Mogelijks spelen hierbij ook hydrodynamische effecten een rol, zie in Figuur 4.9 de verschillen tijdens vooral vloed waar de stroming in de zomer hoger is en tijdens kentering na LW waar de stroming in de winter hoger is.



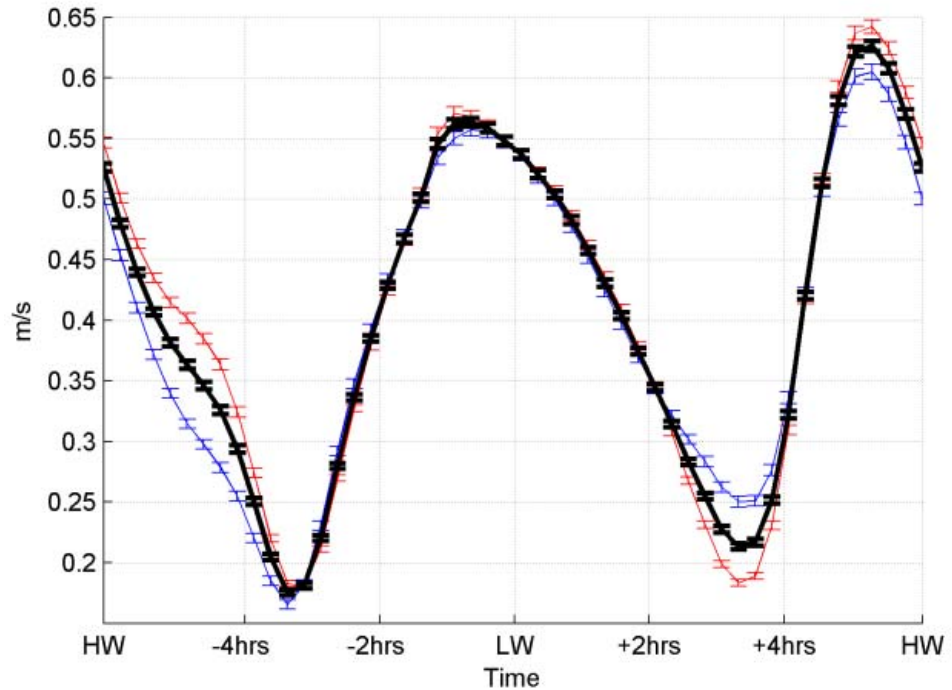
Figuur 4.6: Gemiddelde SPM concentratie (g/l) tijdens een getij voor de winter (boven), de zomer (midden) en het verschil tussen beiden. Negatieve waarden duiden op een hogere concentratie in de zomer, positieve op een hogere tijdens de winter. De zwarte lijn geeft aan waar het verschil 0 g/l is.



Figuur 4.7: Gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor de winter (boven) en de zomer data (onder) op 1.83 (blauw), 1.58 (rood), 1.33 (zwart), 1.08 (groen), 0.83 (cyaan) en 0.58 (magenta) boven de bodem.



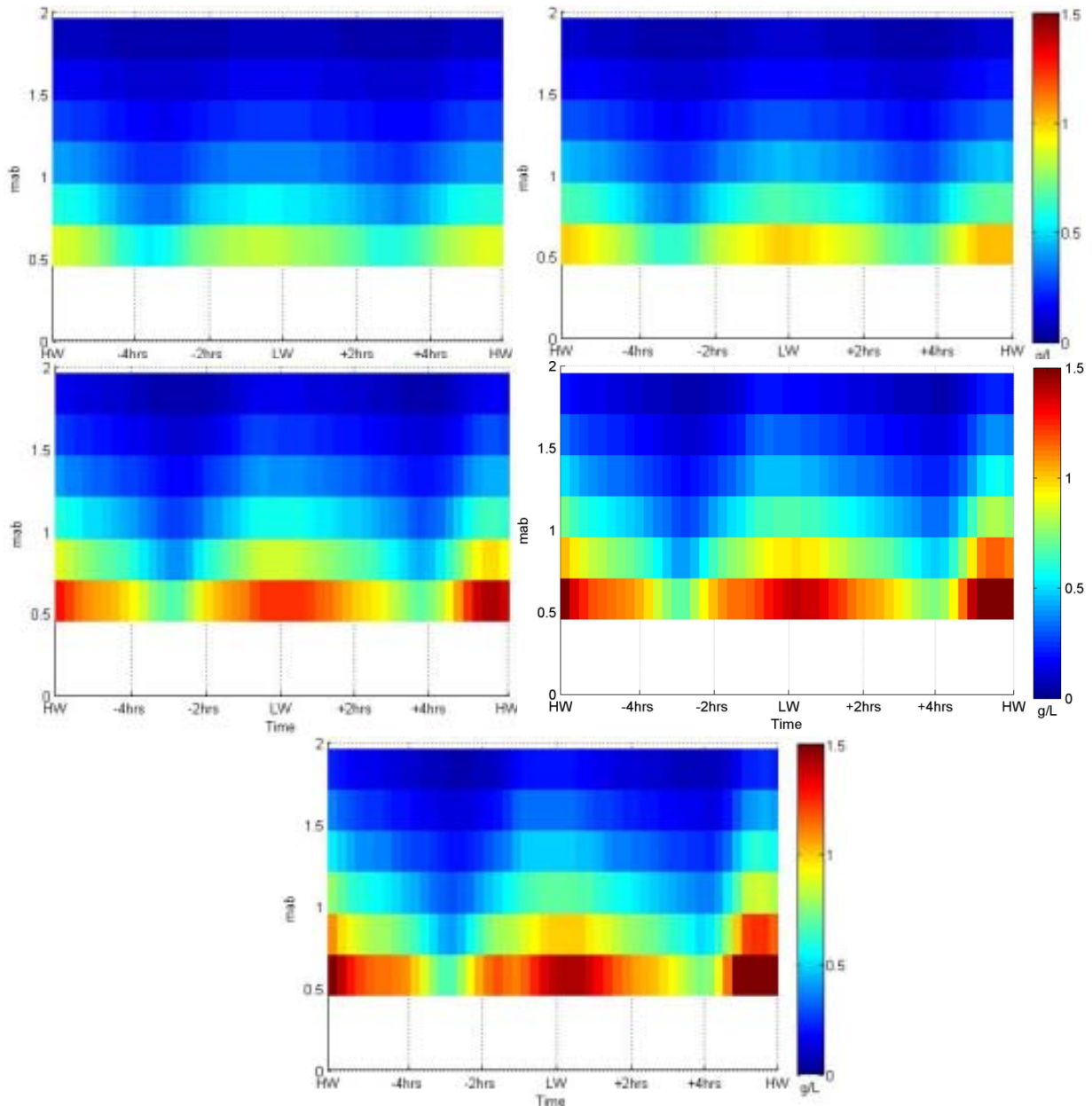
Figuur 4.8: Getijgemiddelde SPM concentratieprofiel voor de zomer (lage turbiditeitsperiode, blauw) en de winter (hoge turbiditeitsperiode, rood).



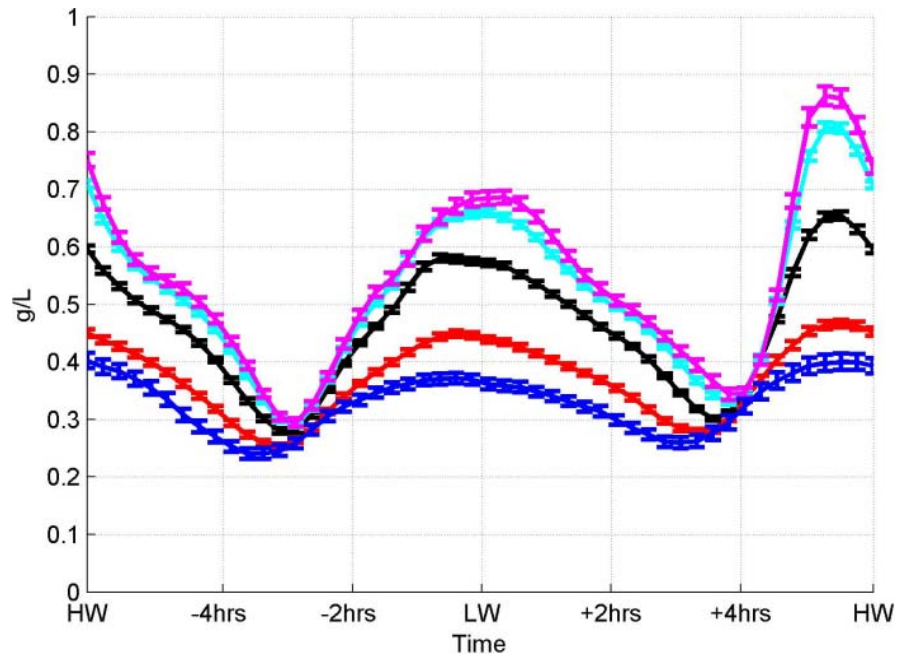
Figuur 4.9: Verticaal gemiddelde stroming tijdens de winter (blauw), de zomer (rood) en alle data (zwart).

4.1.3. SPM concentratie: Getijamplitude

Getijamplitude heeft een groot effect op het verloop van de gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij, zie Figuren 4.10 en 4.11. Naast een verschil in concentratie is er ook een verschuiving zichtbaar van ongeveer één uur in het tijdstip van de maximale SPM concentratie tijdens eb bij een superspringtij t.o.v. een superdoodtij, terwijl er nauwelijks iets veranderd bij vloed. Kentering is ongeveer één uur later tijdens een superspringtij dan een superdoodtij.



Figuur 4.10: Gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor een superdoodtij (links boven), doodtij (rechts boven), gemiddeld tij (midden links), springtij (midden rechts) en superspringtij (onderaan).



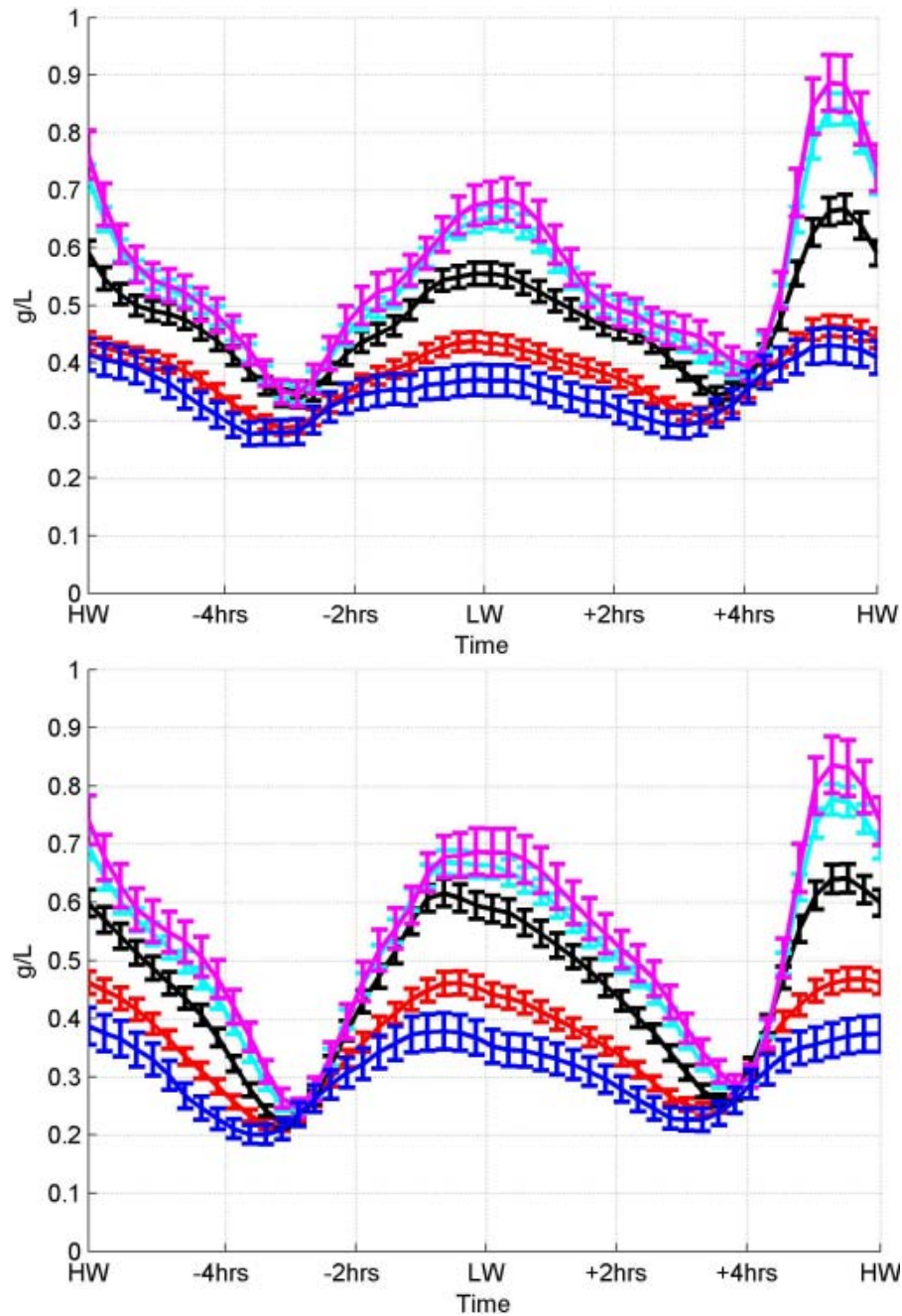
Figuur 4.11: Verticaal gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor verschillende getijamplitudes (magenta: superspringtij, cyaan: springtij, zwart: gemiddeld getij, rood: dootij, blauw: superdoodtij).

4.1.4. SPM concentratie: Seizoenen en getijamplitude

Door de data, gegroepeerd volgens getijamplitude, verder op te splitsen in een winter en een zomerperiode, worden seizoenale effecten duidelijk, zie Figuur 4.12. De seizoenale effecten werden reeds beschreven in §4.1.2, samenvattend zien we ook hier dat SPM concentraties tijdens kentering hoger zijn in de winter. Tijdens eb en vloed zijn er nu wel verschillen zichtbaar (zie ook Figuur 4.7). Tijdens eb zijn de SPM concentraties hoger in de zomer en is het verloop van de concentratiecurve verschillend. Tijdens de winter zien we met toenemende getijamplitude een duidelijke piek in de SPM concentratie optreden rond LW gevolgd door een snelle afname. In de zomer is deze piek breder uitgesmeerd in de tijd. Dit ander gedrag kan verklaard worden doordat in de winter tijdens springtij al het materiaal snel geresuspendeerd wordt, de snelle daling duidt dan het moment aan wanneer er geen materiaal meer beschikbaar is voor resuspensie. Dit is wel nog het geval in de zomer en onderstreept dus de argumentatie in §4.1.2 waar gezegd wordt dat er in de zomer meer slib aanwezig is op de bodem dan in de winter. Tijdens vloed zijn de verschillen minder uitgesproken: De piek SPM concentratie is iets hoger in de winter (uitgezonderd voor dootij), maar ook hier daalt de SPM concentratie na de piek sneller dan in de zomer.

4.1.5. SPM concentratie: Seizoenen, getijamplitude en alongshore stroming

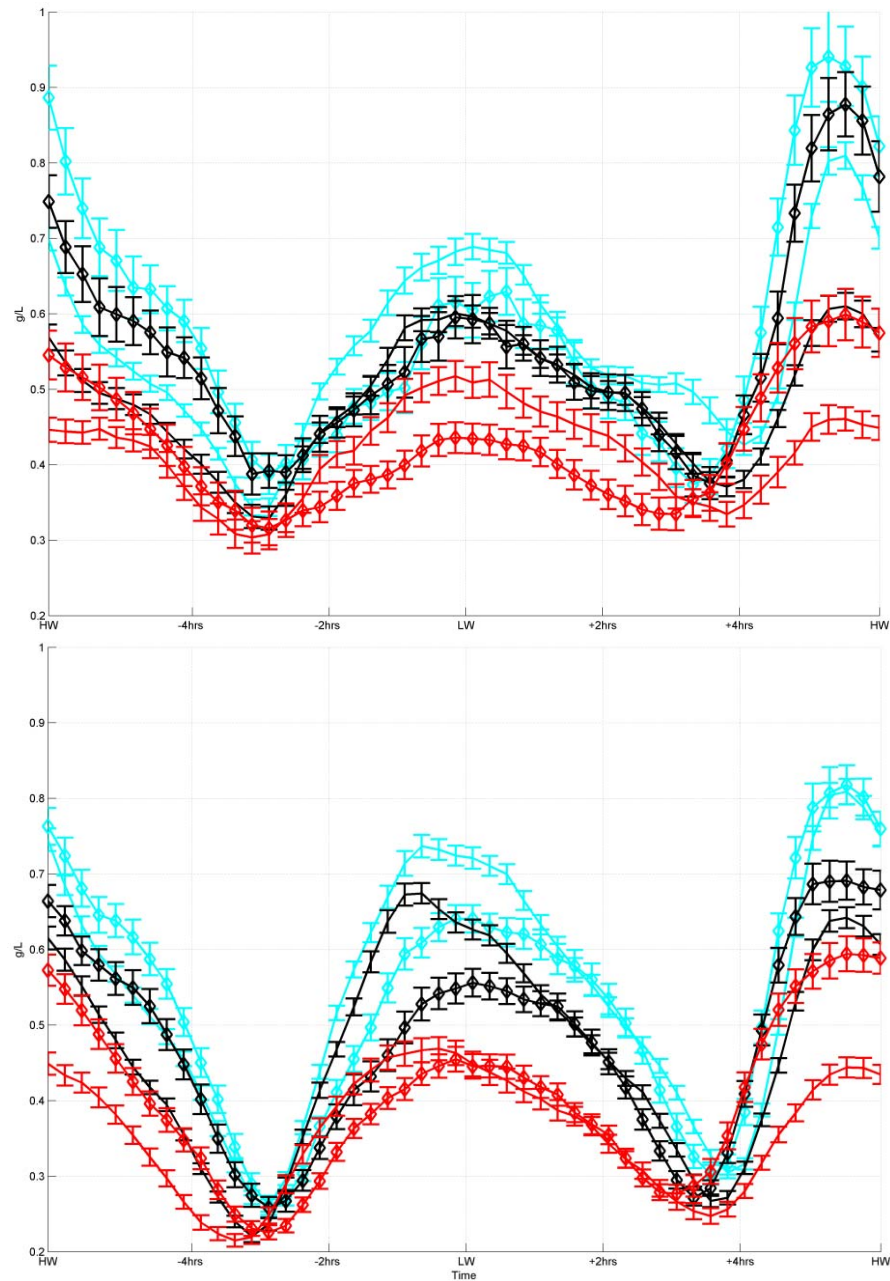
De effecten van de residuele alongshore stroming, seizoenen en getijamplitude zijn gebundeld in Figuur 4.13. De SPM concentratie is groter tijdens vloed en een NE gerichte stroming dan bij een SW gerichte stroming. Deze verschillen zijn meer uitgesproken in de winter dan de zomer. Tijdens de eerste helft van de eb is de SPM concentratie hoger bij een SW gerichte stroming dan een NE gerichte stroming. Vanaf LW zien we een verandering optreden en is er nauwelijks nog verschil te zien tussen beide signalen.



Figuur 4.12: : Verticaal gemiddelde SPM concentratie tijdens een getij voor verschillende getijamplitudes (magenta: superspringtij, cyaan: springtij, zwart: gemiddeld getij, rood: dootij, blauw: superdoodtij) en seizoenen (boven: winter, onder: zomer).

De verschillen in SPM concentratie in functie van de richting van de alongshore stroming kunnen worden verklaard door advectie. De SPM concentratie is groter als de stromingsrichting in dezelfde richting wijst als de residuele alongshore stroming. Bij eb is dit het geval bij een SW-waarts gerichte residuele stroming en bij vloed is dit bij een NE-waarts gerichte residuele stroming. De resultaten tonen aan dat te MOW1 het materiaal uit de Westerschelde komt tijdens eb, en naar de Westerschelde getransporteerd wordt tijdens vloed. Het feit dat de verschillen tussen NE en SW gerichte alongshore stroming

minder uitgesproken zijn in de zomer tijdens vloed is vermoedelijk deels het gevolg van verschillen in SPM concentratie dicht tegen bodem (Figuur 4.8), maar waarschijnlijk ook het gevolg van de iets grotere vloedstroming in de zomer (Figuur 4.9). Gezien de sterke invloed van de Westerschelde op de residuele stroming te MOW1 kunnen de waargenomen verschillen moeilijker in het groter geheel geplaatst worden.



Figuur 4.13: SPM concentratie voor 6 verschillende klassen tijdens de winter (boven en de zomer (onder). Springtij + NE-gerichte residuele stroming (cyan, diamant), springtij + SW-gerichte stroming (cyan), gemiddel getij + NE-gerichte residuele stroming (zwart, diamant), gemiddel getij + SW-gerichte residuele stroming (zwart), doortij + NE-gerichte residuele stroming (rood, diamant), doortij + SW-gerichte residuele stroming (rood).

4.2. SPM flux: Seizoenen, getijamplitude en alongshore stroming (ADP)

De gemiddelde SPM flux tijdens een getij voor verschillende getijamplituden en voor de twee seizoenen wordt voorgesteld in Figuur 4.14. Merk op dat de SPM flux dicht tegen de bodem hoger is in de zomer dan in de winter. Dit is in overeenstemming met Figuur 4.6-4.8, waar men kan zien dat de SPM concentratie tijdens eb en vloed hoger is in de zomer. Enkel tijdens kentering werden hogere SPM concentraties waargenomen in de winter, maar gezien de lage stroomsbelheid, dragen deze weinig bij tot de netto SPM flux. De gemiddelde SPM flux en de netto getransporteerde massa aan SPM is (Tabel 4.1), zoals de residuele stroming, negatief met uitzondering voor het geval superdoodtij tijdens de winter. Ook kunnen we in de tabel zien dat in tegenstelling met de totaal getransporteerde SPM massa, er geen duidelijk verband aanwezig is tussen getijamplitude en gemiddelde SPM flux en netto getransporteerde SPM massa. Dit toont aan dat het berekenen van nettofluxen sterk onderhevig is aan lokale effecten veroorzaakt door bv wind.

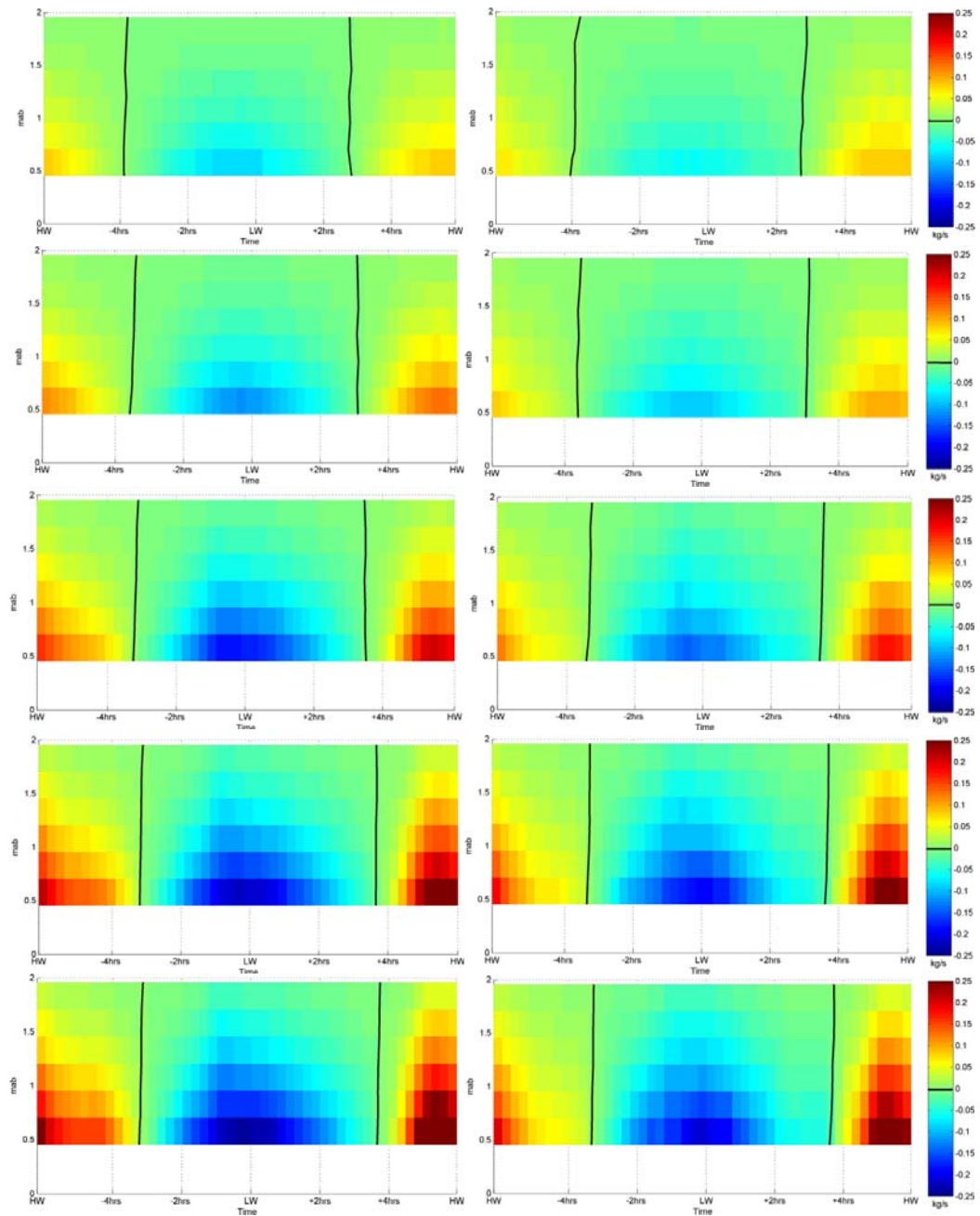
Verder werd de flux berekend voor de getijcyclus met een positieve (NE) en een negatieve (SW) residuele alongshore stroming (Tabel 4.2). Hierbij werden de superspring- en doodtij niet gebruikt, wegens onvoldoende aantal data. Uit de tabel blijkt dat er in de onderste 1.8 m van de waterkolom meer SPM wordt getransporteerd in de zomer dan in de winter en dit voor de SW en NE case (uitzondering NE gemiddeld getij). Dit is duidelijk in contrast met bevindingen hoger in de waterkolom, waar een omgekeerd signaal wordt waargenomen: lage concentraties in de zomer en hoge in de winter. Uit deze en de voorgaande bevindingen kunnen we dus besluiten dat er een duidelijke seizoenale variatie optreedt in SPM concentratie en dat deze verschillend is in de waterkolom en in de onderste laag.

Tabel 4.1: Gemiddelde SPM flux (kg/s), netto en totaal getransporteerde SPM massa (kg) tijdens de zomer en de winter en voor verschillende getijomstandigheden. Negatieve waarden zijn naar het SW gericht, positieve naar het NE.

Getij	Gem. flux (kg/s)		Netto massa (kg)		Totale massa (kg)	
	zomer	winter	zomer	winter	zomer	winter
Superdoodtij	-1.28	1.44	-385	432	6201	6000
Doodtij	-0.05	-1.04	-16	-312	8740	7437
Gemiddeld tij	-2.42	-3.03	-726	-909	13395	11382
Springtij	-1.67	-3.00	-502	-901	17290	15803
Superspringtij	-0.69	-4.00	-207	-1201	19489	16713

Tabel 4.2: Gemiddelde SPM flux (kg/s), netto en totaal getransporteerde SPM massa (kg) tijdens de zomer en de winter, voor verschillende getijomstandigheden en residuele alongshore stroming. Negatieve waarden zijn naar het SW gericht, positieve naar het NE.

Resid.	Getij	Gem. flux (kg/s)		Netto massa (kg)		Totale massa (kg)	
		zomer	winter	zomer	winter	zomer	winter
SW	Doodtij	-5.88	-6.87	-1764	-2062	8241	4740
	Gemiddeld tij	-10.34	-8.97	-3101	-2692	13857	7433
	Springtij	-9.07	-11.61	-2721	-3483	19092	14146
NE	Doodtij	11.84	10.20	3551	3060	9993	9153
	Gemiddeld tij	11.81	10.94	3544	3283	13790	15632
	Springtij	13.55	19.11	4065	5733	18324	17604



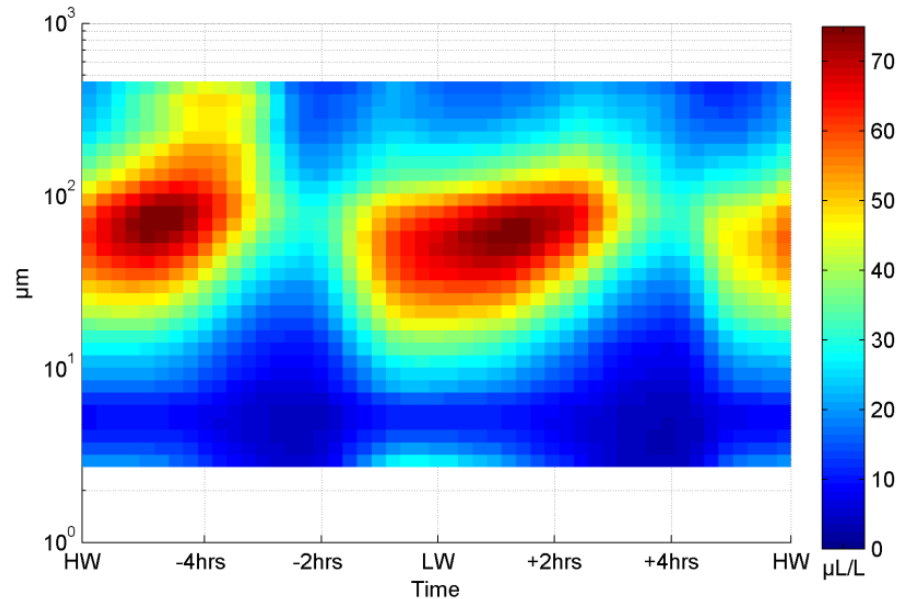
Figuur 4.14: Gemiddelde SPM flux (kg/s) tijdens een getij voor de zomer (links) en de winter (rechts) en dit voor (van boven naar onder) een superdoodtij, doodtij, gemiddeld tij, springtij en superspringtij.

4.3. Partikelgrootte, SPM volume- en massa concentratie (LISST)

4.3.1. Partikelgrootteverdeling: Alle data

De partikelgrootteverdeling (PGV) tijdreeks geeft een zicht op flocculatie en het transport van de samenstellende deeltjes en aggregaten doorheen de meetperiode. De gemiddelde PGV tijdens een getij voor alle data gemeten met de LISST op ongeveer 2 m boven de bodem in de periode 2006-2013 te MOW1 wordt getoond in Figuur 4.15. Deze figuur geeft de PGV tijdens een getij weer zonder dat een groepering zoals in §3.1 werd besproken toegepast werd. Omdat er in de zomer (n=321) minder data aanwezig zijn dan in de winter (n=914), is deze figuur echter niet representatief voor een gemiddeld getij tijdens een jaar. De data komen best overeen met de SPM concentratie in de hoogste bin van de ADP (zie Figuur 4.1 en 4.2).

We kunnen duidelijk zien dat de partikelgrootte ten gevolge van flocculatie sterk varieert tijdens een getij. Flocculatie omvat zowel 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. Uit Figuur 4.15 blijkt dat de grootste vlokken optreden omstreeks kentering, de kleinste omstreeks maximale stroming. Grootste SPM volumeconcentraties treden op omstreek 1 uur na HW en LW.



Figuur 4.15: Gemiddelde SPM volumeconcentratie ($\mu\text{L/l}$) in de 32 LISST klassen tijdens een getij voor alle data.

4.3.2. Partikelgrootteverdeling: Seizoenen

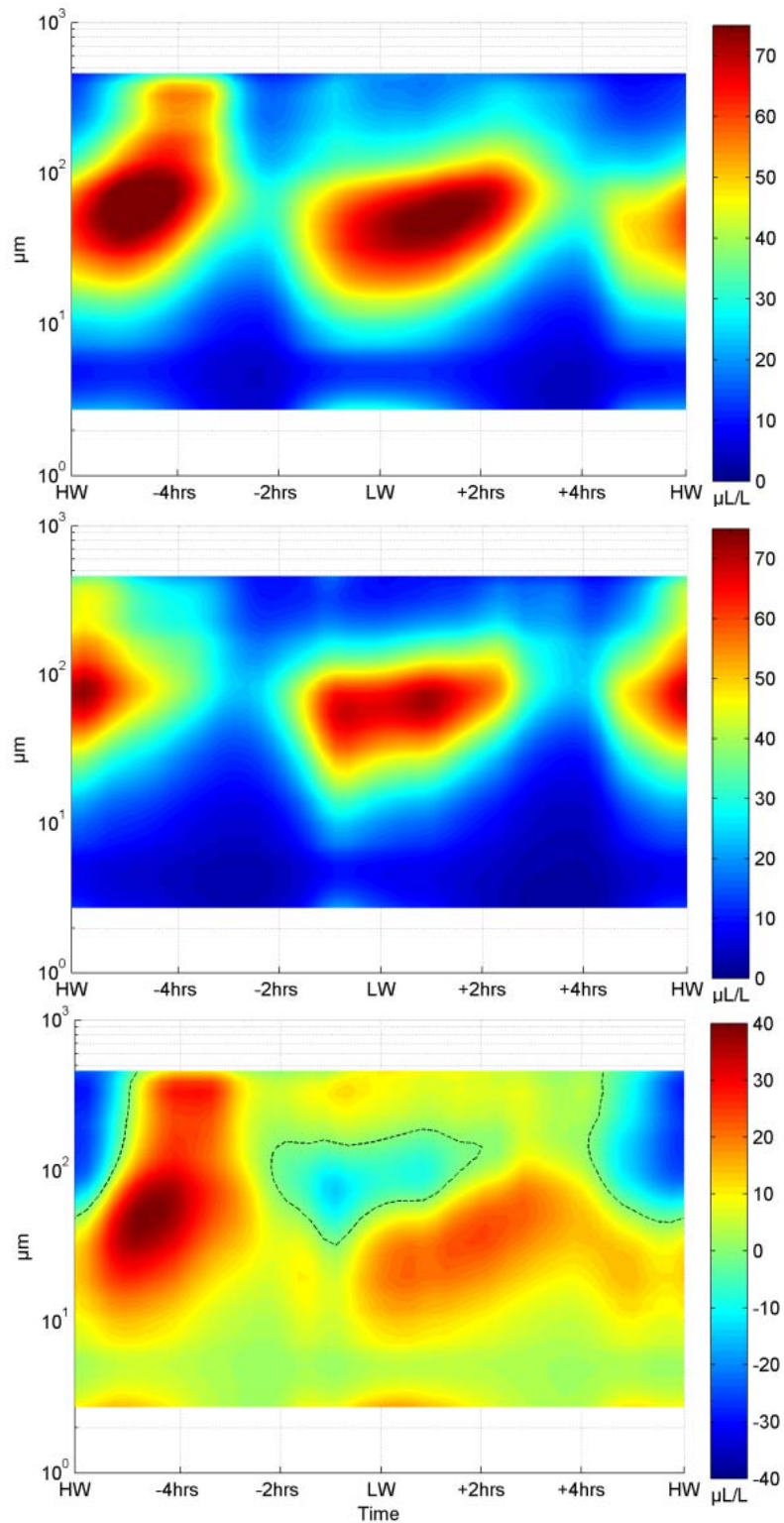
In het vorige rapport (Fettweis et al. 2013) werd in detail ingegaan op de seizoensaliteit in SPM concentratie in 2011. Er werd toen geconcludeerd dat de jaarlijkse cyclus van SPM concentratie in het turbiditeitsmaximum ter hoogte van de Belgische kust voornamelijk veroorzaakt wordt door de seizoensgebonden biologische cyclus. Belangrijk is hier het stabiliserend effect van biomassa op bodemerosie en vloksterkte. Uit de analyse bleek dat

de biomassa de frequentie aan macrovlokken en dus ook de vloksterkte verhoogt. Vloggrootte is een cruciale parameter die deze seizoenaliteit bepaald. Immers de grotere hoeveelheid aan macrovlokken in de zomer zal de SPM concentratie in het turbiditeitsmaximum verminderen doordat deze sneller bezinken. In dit hoofdstuk gaan we eenzelfde analyse uitvoeren, maar nu voor een veel grotere dataset en door een andere analysemethode (namelijk groepering van de getijcyclus).

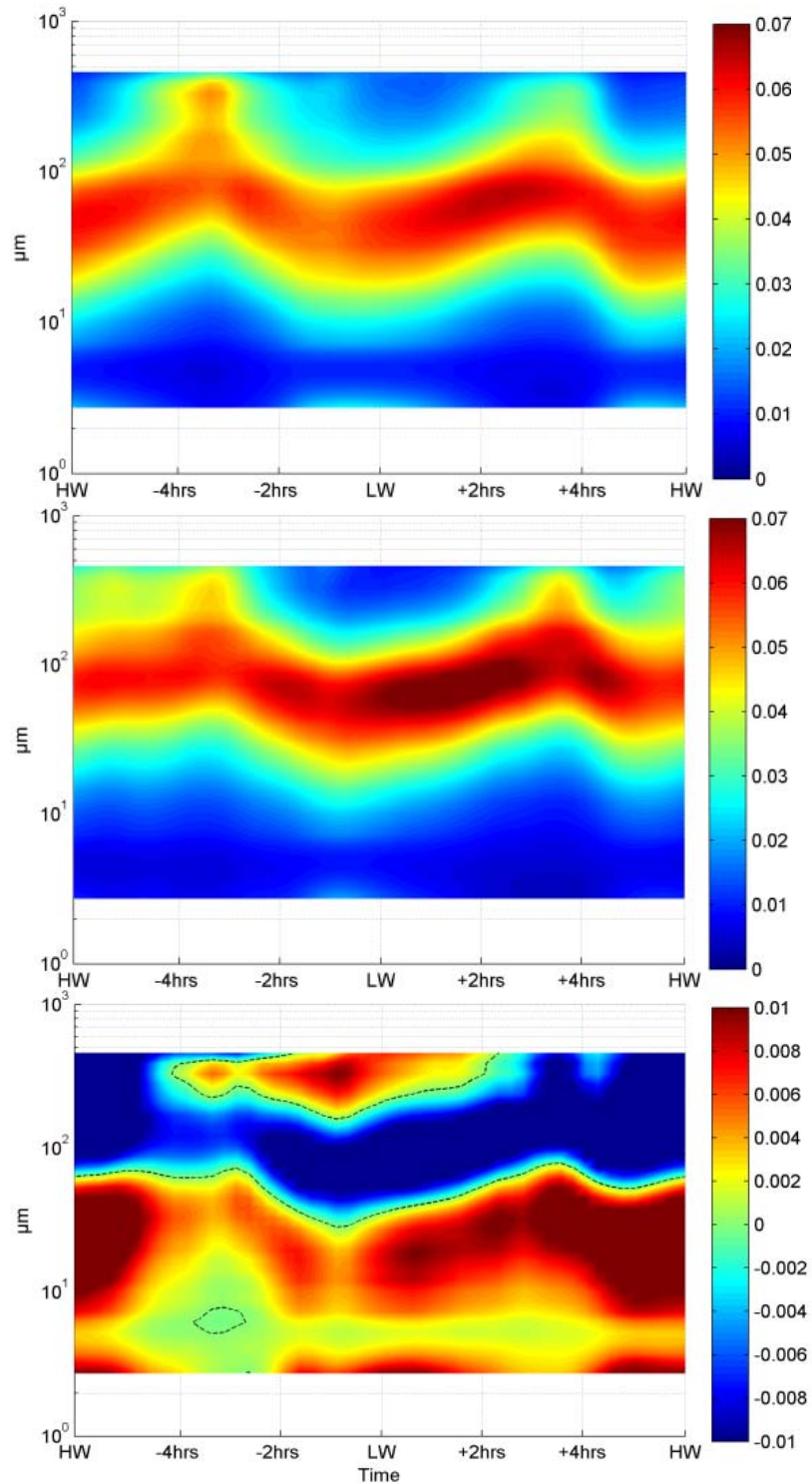
In Figuur 4.16 wordt de gemiddelde SPM volumeconcentratie ($\mu\text{l/l}$) in de 32 LISST klassen tijdens een getij voor de winter en de zomer getoond. We zien op het eerste zicht dat de volumeconcentraties hoger zijn in de winter dan de zomer en dat de band met de hoogste volumeconcentratie in de zomer bij een hogere partikelgrootte voorkomt. Grotere vlokken zijn meer frequent tijdens vloed dan eb.

In Figuur 4.17 wordt een gelijkaardige plot getoond, maar nu werd de PGV genormaliseerd met de totale volumeconcentratie in de verdeling. De data weerspiegelen dus het percentage van elke LISST klasse aan het totale volume. We zien hier duidelijk dat de grootste frequentie aan grote deeltjes voorkomt tijdens kentering, wat te verwachten is. Er is een duidelijk verschil tussen winter en zomer te zien. In de winter is het verschil tussen eb en vloed minder uitgesproken dan in de zomer. Zo is in de zomer duidelijk een grote frequentie aan grote deeltjes (macrovlokken) aanwezig tijdens de vloed, terwijl dit niet het geval is tijdens eb, waar de middelgrote deeltjes (microvlokken) overheersen. We zien dan ook in de verschilplot dat er in de winter duidelijk meer kleinere deeltjes in het water aanwezig en dat er minder grote deeltjes aanwezig zijn, met uitzondering tijdens de kentering van vloed naar eb en tijdens eb, waar meer grote deeltjes aanwezig zijn in de winter. Deze bevinding komt ook tot uiting in de getijgemiddelde partikelgrootteverdeling in Figuur 4.18. De belangrijkste piek in de verdeling heeft een grotere modus in de zomer ($75 \mu\text{m}$) dan in de winter ($55 \mu\text{m}$), maar in de winter is de modus rond $300 \mu\text{m}$ pertinent aanwezig dan in de zomer. Dit is enigszins in tegenspraak met wat we zouden verwachten, met name een grotere fractie aan grote partikels in de zomer. Waarom treedt dit verschil in frequentie van de partikelgrootte op tijdens de eb tussen winter en zomer? Er zijn op dit moment nog geen sluitende verklaringen hiervoor te vinden. Waarschijnlijk heeft dit te maken met het feit dat alle getijcycli samen werden gegroepeerd en dat er dus geen rekening gehouden wordt met advectie, meteo- en golfinvloeden. In de entropiegroepen (zie §4.3.3) zien we dat de PGV van groep 3 (Figuur 4.21) gekarakteriseerd wordt door het voorkomen van zowel kleine als grote partikels. Deze groep representeert 22% van de data en verklaard mogelijks de piek in de PGV van Figuren 4.16-1.18.

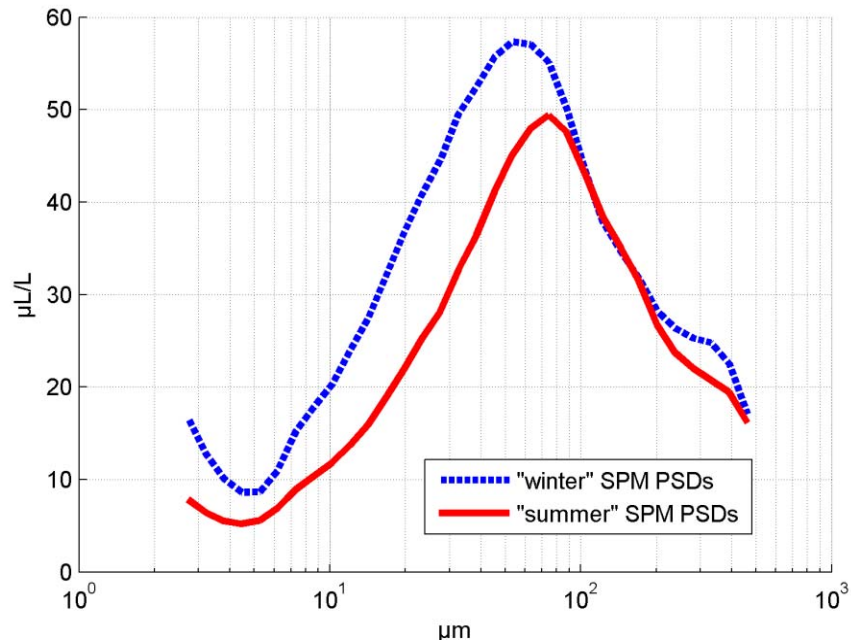
De bijkomende piek in de grotere klassen tijdens vloed is (uiteraard) enkel in de PGV te zien en dit vertaalt zich niet in de volume gemiddelde partikelgrootte (D_{vol}), die altijd lager is in de winter dan in de zomer (Figuur 4.19). Het verschil in D_{vol} tussen winter en zomer is groter tijdens vloed dan eb. De D_{vol} bij maximale vloedstroming is $70 \mu\text{m}$ (zomer) en $42 \mu\text{m}$ (winter) en bij maximale ebstroming $47 \mu\text{m}$ (zomer) en $42 \mu\text{m}$ (winter). Wat de D_{vol} tijdens kentering betreft kunnen we opmerken dat deze zowel bij vloed-eb als eb-vloed kentering nagenoeg constant is ($95 \mu\text{m}$) in de zomer, maar verschilt in de winter (vloed-->eb: $85 \mu\text{m}$, eb-vloed: $70 \mu\text{m}$).



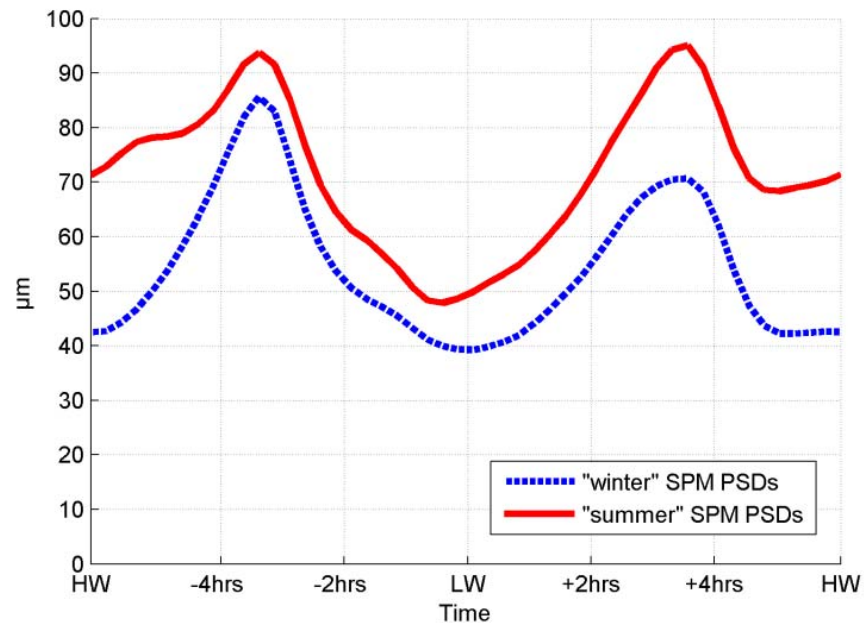
Figuur 4.16: Gemiddelde SPM volumeconcentratie ($\mu\text{l/l}$) in de 32 LISST klassen tijdens een getij voor de winter (boven) en de zomer data (midden) en het verschil tussen beiden (onder). Negatieve waarden duiden op een hogere concentratie in de zomer, positieve op een hogere in de winter. De zwarte lijn geeft aan waar het verschil 0 $\mu\text{l/l}$ is.



Figuur 4.17: Gemormaliseerde volume concentratie (%) in elk van de 32 LISST klassen tijdens een getij voor de winter (boven), de zomer data (midden) en het verschil tussen beiden (onder). Negatieve waarden duiden op een relatief hogere concentratie in de zomer, positieve op een relatief hogere in de winter. De zwarte lijn geeft aan waar het verschil 0 % is.



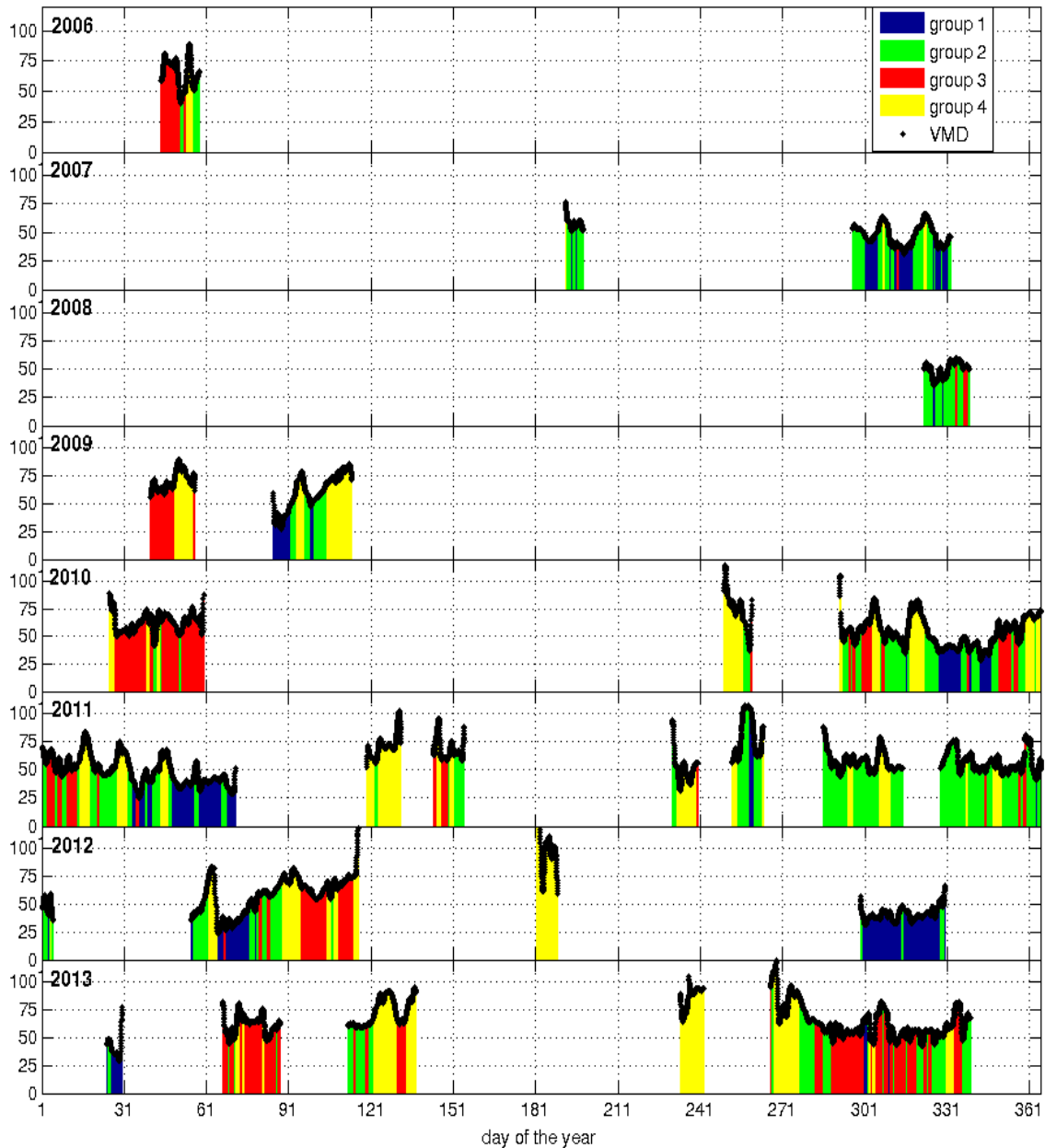
Figuur 4.18: Getij-gemiddelde partikelgrootteverdeling in de winter en in de zomer.



Figuur 4.19: Volume gemiddelde partikelgrootte tijdens de winter en de zomer.

4.3.3. Partikelgrootteverdeling: Entropieanalyse

Het verloop van de entropiegroepen in functie van de tijd is te vinden in Figuur 4.20. De PGV van de vier entropie groepen wordt getoond in Figuur 4.21. De entropieanalyse is uitgevoerd op de low-passed gefilterde data. De bekomen classificatie in vier groepen weerspiegelt de dootij-springtij, de meteorologische en seizoenale variaties en dus niet de getijgebonden variaties. De groepen zijn gerangschikt in stijgende lijn van mediane partikelgrootte. De frequentie van de groepen tijdens de zomer en winter kan gevonden worden in Tabel 4.3.



Figuur 4.20: Verdeling van de entropiegroepen over de jaren 2006-2013. De kleur geeft de groep weer, de zwarte lijn de volume gemiddelde partikelgrootte (in μm).

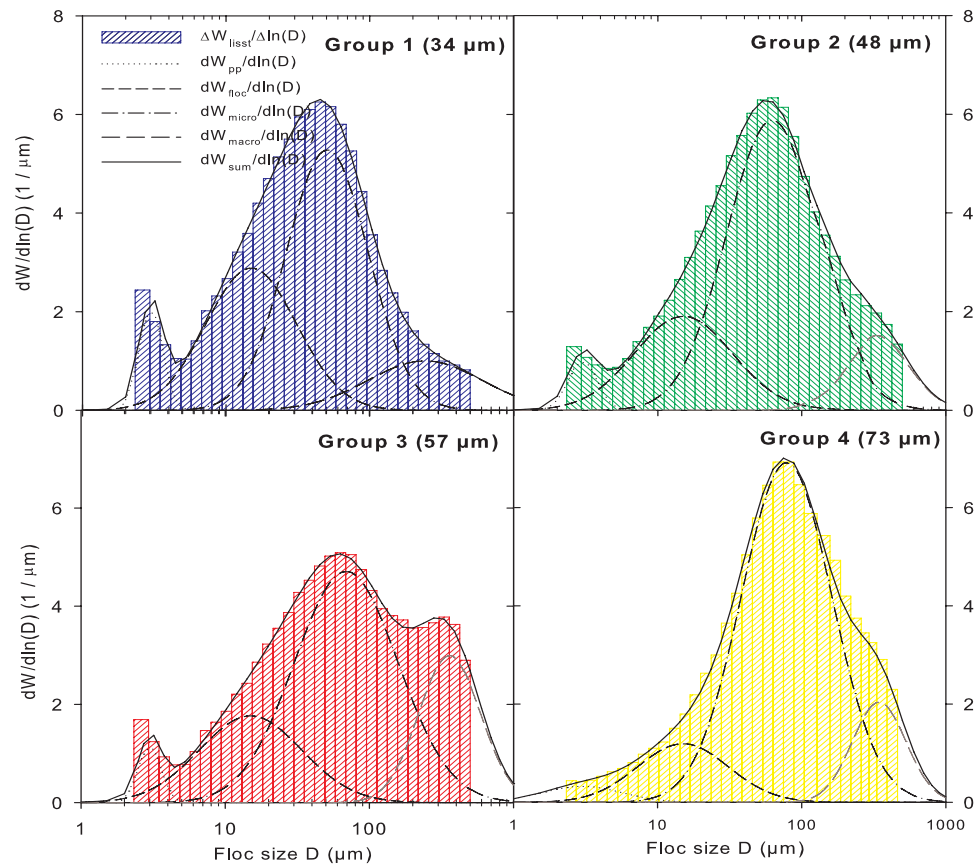
Op de 4 groepen werd een curve-fitting toegepast (zie Lee et al. 2012 en Fettweis et al 2013 voor een beschrijving van de methode) om de percentages aan primaire deeltjes, flocculi, micro- en macrovlokken te bepalen (zie Figuur 4.21 en Tabel 4.4). Het verschil tussen groep 1 en 2 is niet zo groot, maar toch significant. Groep 1 komt bijna uitsluitend in de winter voor, terwijl groep 2 tijdens beide seizoenen aanwezig is. Deze groepen zijn karakteristiek voor springtij of stormcondities. Groep 4 is dominant aanwezig in de zomer. Groep 3 is een buitenbeentje en wordt gekarakteriseerd door zowel de aanwezigheid van kleine als grote deeltjes.

Tabel 4.3: Frequentie van voorkomen van de vier entropiegroepen (in %) voor alle data, de winter data en de zomer data.

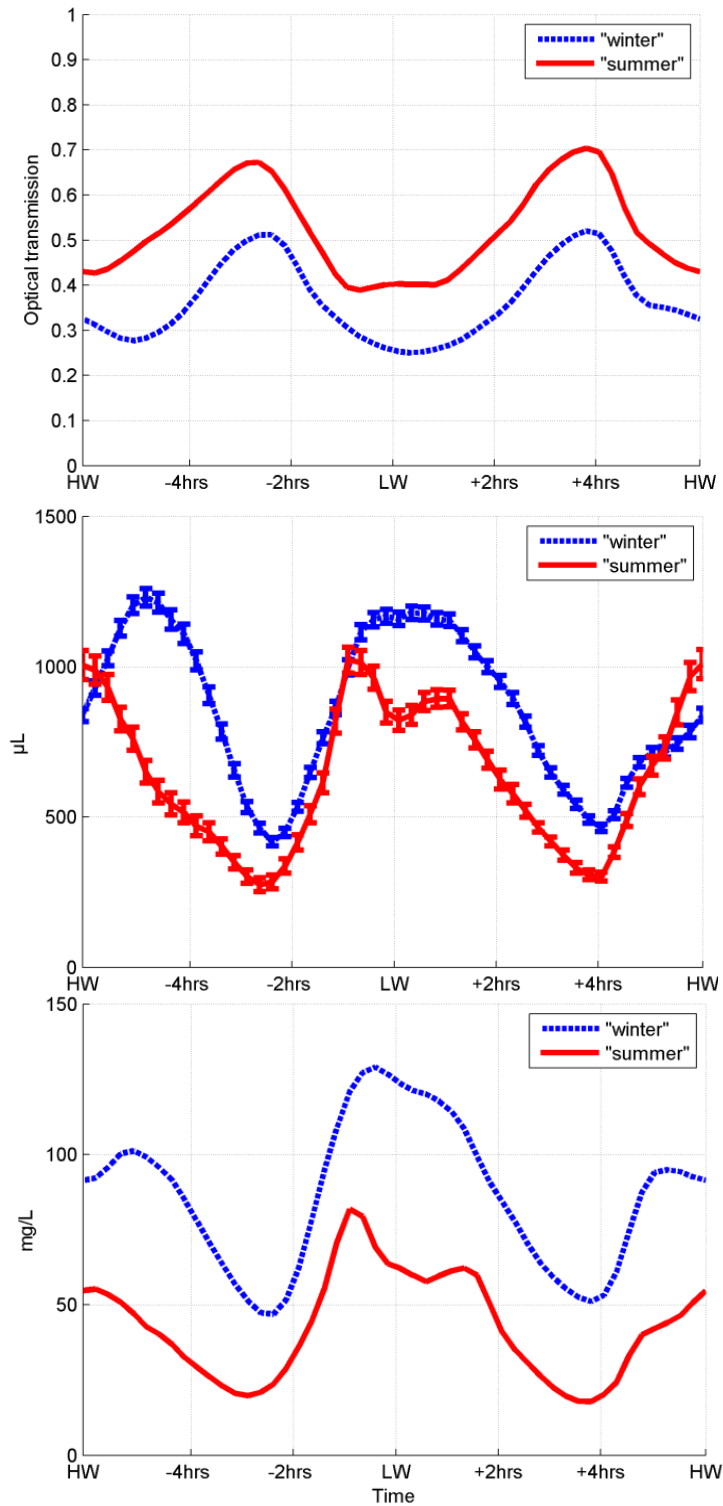
Groep en D50	Jaar	Winter	Zomer
1: 34 μ m	19.9	24.9	3.8
2: 48 μ m	36.0	39.1	26.5
3: 57 μ m	22.1	23.6	17.2
4: 73 μ m	21.9	12.3	52.5

Tabel 4.4: Frequentie van voorkomen van de primaire deeltjes, flocculi, micro- en macrovlokken in de vier entropiegroepen (in %).

Groep en D50	PP	Flocculi	Microflocs	Macroflocs
1: 34 μ m	5.6	30.5	50.5	13.3
2: 48 μ m	3.3	21.8	63.4	11.5
3: 57 μ m	2.9	20.6	55.4	21.0
4: 73 μ m	3.3	13.1	86.5	13.5



Figuur 4.21: PGV van de vier entropiegroepen.



Figuur 4.22: Optische transmissie (%) van de LISST, SPM volume concentratie (midden) en SPM massa concentratie gemeetn met een OBS (onder).

4.3.4. SPM volume en massa concentratie: Seizoenen

De SPM volume concentratie, de transmissometer en de aan de LISST gekoppelde OBS meten allen de troebelheid van het water, zie Figuur 4.22. De SPM concentratie van de OBS en de transmissie hebben een vrij gelijkaardig verloop. Verschillen zijn er wel tussen de seizoenen betreffende de SPM massa en volume concentratie. Zo zien we dat de SPM massa concentratie hoger is tijdens eb dan vloed in beide seizoenen, terwijl in de volume concentratie er weinig verschil te zien is. De volume concentratie is tijdens vloed zelf groter in de zomer dan de winter. Deze resultaten zijn (uiteraard) vergelijkbaar met deze van Figuur 4.16 en kunnen verklaard worden door een wijziging in vlokstructuur. De resultaten wijzen op lossere vlokken met een lagere densiteit. Hierdoor stijgt hun volume, maar niet hun massa.

De resultaten voor SPM volume en massa concentratie en transmissie hebben een duidelijk seizoenaal signaal: de troebelheid (transmissie) is hoger (lager) in de winter dan de zomer en geven aldus eenzelfde trend als de ADP data op 1.83 m.

5. Conclusies

Bodemnabije SPM concentratie uit het turbiditeitsmaximum ter hoogte van de Belgische kust werd geanalyseerd over de periode 2005-2013. De belangrijkste bevindingen zijn:

1. De residuele alongshore stroming te MOW1 is gedurende 85% van de tijd gericht naar het SW, dit is in tegenstelling met het gehele gebied, waar er vooral een naar het NE gerichte residuele stroming heerst. Dit toont aan dat de hydrodynamica te MOW1 beïnvloed wordt door de Westerschelde.
2. Gemiddeld is de SPM concentratie in de waterkolom lager in de zomer dan de winter. Dit is in overeenstemming met andere data (vb satellietgegevens). In de onderste 1.5 meter van de waterkolom echter is er een ander verloop zichtbaar, met name een hogere SPM concentratie in de zomer dan de winter. Met toenemende afstand van de bodem neemt dit verschil af en vanaf ongeveer 1.8 m boven de bodem wordt de concentratie in de zomer lager dan in de winter.
3. Tijdens de zomer is de SPM concentratie dicht tegen de bodem hoger tijdens de periodes met maximale stroming. Tijdens kentering zien we het omgekeerde, de SPM concentratie is dan hoger in de winter dan in de zomer. De hoogste SPM concentraties treden op bij maximale stroming in de zomer. Dit zou veroorzaakt worden door de hoge biologische activiteit in de zomer, die voor een hoge concentratie aan kleverige organische molekulen (TEP) zorgt. Deze maken de macrovlokken sterker en verhogen hun frequentie in de zomer met als gevolg een snellere bezinking en meer kans op voorkomen van HCMS en/of vloeibare sliblagen.
4. De lagere SPM concentraties in de waterkolom tijdens de zomer worden (deels) gecompenseerd worden door de hogere SPM concentraties dicht tegen de bodem, zodat de SPM concentratie in zijn geheel vermoedelijk vrij weinig varieert tijdens de seizoenen.
5. In de onderste 1.8 m van de waterkolom wordt er meer SPM getransporteerd in de zomer dan in de winter. In hoeverre dit een effect heeft op aanslibbing van het Pas van het Zand en de haven van Zeebrugge dient onderzocht te worden.

6. Referenties

- Agrawal Y, Pottsmith H. 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology* 168, 89–114.
- 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.
- 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.
- Baeye M, Francken F, Fettweis M, Van den Eynde D, Naudts L. 2014. The first buoy for continuous surface suspended particulate matter concentration on the Belgian inner shelf. In: *Book of Abstracts – VLIZ Young Scientists' Day* (eds. Mees J, Seys J), VLIZ Special Publication 67, 16.
- Belgische Staat. 2012a. Initiële beoordeling van het Belgisch marien ecosysteem voor de Kaderrichtlijn Mariene Strategie. – Art 8 lid 1a & 1b. BMM, Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu, Brussel, België, 81pp.
- Belgische Staat 2012b. Omschrijving van Goede Milieutoestand en vaststelling van Milieudoelen voor de Belgische mariene wateren. Kaderrichtlijn Mariene Strategie – Art 9 & 10. BMM, Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu, Brussel, België, 34pp.
- Black KS, Tolhurst TJ, Paterson DM, Hagerthey SE. 2002 Working with natural cohesive sediments. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 128, 2–8.
- Droppo IG, Lau YL, Mitchell C. 2001 The effect of depositional history on contaminated bed sediment stability. *Science of the Total Environment* 266, 7-13.
- Fettweis M, Van den Eynde D. 2003. The mud deposits and the high turbidity maximum in the Belgian-Dutch coastal zone, southern Bight of the North Sea. *Continental Shelf Research* 23, 669-691.
- Fettweis M, Nechad B, Van den Eynde D. 2007. An estimate of the suspended particulate matter (SPM) transport in the southern North Sea using SeaWiFS images, in-situ measurements and numerical model results. *Continental Shelf Research* 27, 1568-1583.
- Fettweis M, Houziaux J-S, Du Four I, Van Lancker V, Baeteman C, Mathys M, Van den Eynde D, Francken F, Wartel S. 2009. Long-term influence of maritime access works on the distribution of cohesive sediment: Analysis of historical and recent data from the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Marine Letters* 29, 321-330.
- Fettweis M, Francken F, Van den Eynde D, Verwaest T, Janssens J, Van Lancker V. 2010. Storm influence on SPM concentrations in a coastal turbidity maximum area (southern North Sea) with high anthropogenic impact. *Continental Shelf Research* 30, 1417-1427.
- Fettweis M, Baeye M, Francken F, Lauwaert B, Van den Eynde D, Van Lancker V, Martens C, Michielsen T. 2011. Monitoring the effects of disposal of fine sediments from maintenance dredging on suspended particulate matter concentration in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Marine Pollution Bulletin* 62, 258-269.
- 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. 2012a. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (south-

- ern North Sea). *Geo-Marine Letters* 32, 123-137.
- Fettweis M, Monbaliu J, Nechad B, Baeye M, Van den Eynde D. 2012b. Weather and climate related spatial variability of high turbidity areas in the North Sea and the English Channel. *Methods in Oceanography* 3-4, 25-29.
- 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.
- Fettweis M, Baeye M, Van der Zande D, Van den Eynde D, Lee BJ. 2014. Seasonality of floc strength in the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 118, doi:10.1002/2013JC009750.
- Flagg CN, Vermersch JA, Beardsley RC. 1976. 1974 MIT New England shelf dynamic experiment (March 1974) data report, part II: The moored array. Report 76-1, Massachusetts Institute of Technology.
- Gerbersdorf SU, Jancke T, Westrich P, Paterson DM. 2008. Microbial stabilization of riverine sediments by extracellular polymeric substances. *Geobiology* 6, 57-69.
- Gibbs MT. 2013. Environmental perverse incentives in coastal monitoring. *Marine Pollution Bulletin* 73, 7-10.
- Guerra R, Pasteris A, Ponti M. 2009. Impacts of maintenance channel dredging in a northern Adriatic coastal lagoon. I: Effects on sediment properties, contamination and toxicity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 85, 134-142.
- Houziaux J-S, Fettweis M, Francken F, Van Lancker V. 2011. Historical (1900) seafloor composition in the Belgian-Dutch part of the North Sea: A reconstruction based on calibrated visual sediment descriptions. *Continental Shelf Research* 31, 1043-1056.
- Johnston RJ, Semple RK. 1983. Classification using information statistics. *Concepts and Techniques in Modern Geography*, vol. 37, GeoBooks, Norwich, U. K., 43pp.
- Kim HY, Gutierrez B, Nelson T, Dumars A, Maza M, Perales H, Voulgaris G (2004) Using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) to estimate suspended sediment concentration. Technical Report CPSD #04-01.
- 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 baggerspeciëstortingen. 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 baggerspeciëstortingen (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 baggerspeciëstortingen (vergunningperiode 2006-2008). BMM, ILVO, aK & aMT rapport, BL/2008/01, 128pp.
- Lauwaert B, Bekaert K, Berteloot M, De Backer A, Derweduwen J, Dujardin A, Fettweis M, Hillewaert H, Hoffman S, Hostens K, Ides S, Janssens J, Martens C, Michielsen T, Parmentier K, Van Hoey G, Verwaest T. 2009a. Synthesis report on the effects of dredged material disposal on the marine environment (licensing period 2008-2009) Report by MUMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2009/01. 73pp.
- Lauwaert B, Bekaert K, Berteloot M, De Backer A, Derweduwen J, Dujardin A, Fettweis M, Hillewaert H, Hoffman S, Hostens K, Ides S, Janssens J, Martens C, Michielsen T, Parmentier K, Van Hoey G, Verwaest T. 2009b. Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciëstortingen (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 baggerspeciéstortingen (vergunningperiode 2010-2011). Rapport uitgevoerd BMM, ILVO, CD, aMT & WL, BL/2011/12, 16pp.
- 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.
- Mikkelsen OA, Curran KJ, Hill PS, Milligan TG. 2007. Entropy analysis of in situ particle size spectra. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72, 615-625. doi:10.1016/j.ecss.2006.11.027
- Underwood AJ. 1992. Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 161, 145–178.
- Van den Eynde D, Nechad B, Fettweis M, Francken F. 2007. SPM dynamics in the southern North Sea derived from SeaWifs imagery, in situ measurements and numerical modelling. In: *Estuarine and Coastal Fine Sediment Dynamics* (Maa J, Sanford L, Schoelhamer D eds.). *Proceedings in Marine Science* 8, 282-302.
- Van den Eynde D, Brabant R, Fettweis M, Francken F, Melotte J, Sas M, Van Lancker V. 2010. Monitoring of hydrodynamic and morphological changes at the C-Power and the Belwind offshore wind farm sites – A synthesis. In: *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea. Early environmental impact assessment and spatio-temporal variability* (Degraer S, Brabant R, Rumes B eds.). Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Brussels, 19-36.
- Woolfe KJ, Fielding CR, Howe JA, Lavelle M, Lally JH. 1998. Laser-derived particle size characterisation of CRP- 1, McMurdo Sound, Antarctica. *Terra Antarctica* 5, 383-391.

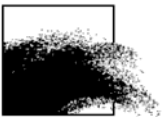
COLOPHON

Dit rapport werd voorbereid door de BMM in maart 2014
Zijn referentiecode is: MOMO/6/MF/201401/NL/AR/4

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:

Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen
OD Natuurlijk Milieu - BMM
100 Gulledele
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



APPENDIX 1

Bijdrage INTERCOH conference 21-24 October 2013, Gainesville.

Fettweis M, Baeye M, Van den Eynde D, Kumar N. Long-term variability of SPM concentration and floc-size associated with residual flows in the Belgian coastal zone.

Long-term variability of SPM concentration and floc-size associated with residual flows in the Belgian coastal zone

Michael Fettweis¹, Matthias Baeye¹, Dries Van den Eynde¹, Nirnimesh Kumar²

¹ Royal Belgian Institute of Natural Sciences – Dir. Natural Environment, Brussels, Belgium

² University of South Carolina · Earth and Ocean Sciences, Columbia, USA

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. 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, seasonal 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 biological activity and are obvious from obvious from satellite images, where we clearly see the lower/higher surface SPM concentration and higher/lower surface Chl-a concentration during summer/winter.

The geographical variability of the SPM concentration in the North Sea and specifically the Belgian coastal zone has been linked to wind, weather and climate (Baeye et al. 2011, Fettweis et al. 2012). Based on the alongshore flow direction, two flow regimes in the Belgian coastal zone were characterized in terms of sediment flux and vertical mixing. The southwestward directed flow regime corresponds to decreasing salinity and increasing SPM concentration. The higher waves result in the largest extent of the coastal turbidity maximum and enhance the erosion of the seabed and the mixing capacity. The northeastward directed flow readily shows increasing salinity, but decreasing SPM concentration. Turbulent shear and SPM concentration, which vary according to hydrodynamics, control the flocculation. Flocculation combines biomass and minerals particles together into a larger aggregate with often different floc strength. The seasonality of biological activity significantly influences flocculation and thus controls deposition/erosion and sediment dynamics. How can the changes in SPM concentration, floc size and floc strength that have been observed be correlated with the seasonality of the biological (spring and summer algae bloom) and hydro-meteorological conditions?

Despite the improved understanding of flocculation dynamics, our knowledge is still insufficient to describe the impact of the organic matter and residual flow regimes. More specifically the impact of high primary production in spring and summer on flocculation, settling, formation of high concentrated mud suspensions and the resuspension of fine-grained sediments during different wind regimes is not yet fully unravelled. The Belgian near-shore area, located in the southern North Sea, is a relevant site to investigate links between biomass, SPM concentration and hydro-meteorological forcing. The aim of this work is to link the flocculation dynamics to the seasonality of hydro-meteo and biological processes using long term in situ data of SPM concentration, turbulence, and floc size. Wind- and seasonal driven SPM and floc dynamics have been studied using a combination of in-situ bottom-mounted sensors (ADCP, ADP, OBS, LISST) that gives data over the entire water column. Flow profiles, SPM concentration and near-bed sediment dynamics are discussed, and a vertical mixing parameter is introduced in order to evaluate the vertical mixing of the SPM in the water column. The results allowed us to separate and recognize processes that control the variability of SPM concentration and floc size and that can be used as an attempt for understanding the long-term evolution of the system.

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

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, 25-29. doi:10.1016/j.mio.2012.11.001

APPENDIX 2

Lee BJ, Toorman E, Fettweis M. 2014. Multimodal particle size distribution of fine-grained sediments: Mathematical modeling and field investigations. *Ocean Dynamics* 64, 429-441. doi:10.1007/s10236-014-0692-y

Multimodal particle size distributions of fine-grained sediments: mathematical modeling and field investigation

Byung Joon Lee · Erik Toorman · Michael Fettweis

Received: 21 January 2013 / Accepted: 16 January 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract Multimodal particle size distributions (PSDs) of fine-grained cohesive sediments are common in marine and coastal environments. The curve-fitting software in this study decomposed such multimodal PSDs into subordinate log-normal PSDs. Four modal peaks, consisting of four-level ordered structures of primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs, were identified and found to alternately rise and sink in a flow-varying tidal cycle due to shear-dependent flocculation. The four modal PSD could be simplified further into two discrete size groups of flocculi and flocs. This allowed the development of a two-class population balance equation (TCPBE) model with flocculi and flocs to simulate flocculation involving multimodal PSDs. The one-dimensional vertical (1-DV) TCPBE model further incorporated the Navier-Stokes equation with the k - ε turbulence closure and the sediment mass balance equations. Multimodal flocculation as well as turbulent flow and sediment transport in a flow-varying tidal cycle could be simulated well using the proposed model. The 1-DV TCPBE was concluded to be the simplest model that is capable of simulating multimodal

flocculation in the turbulent flow field of marine and coastal zones.

Keywords Cohesive sediments · Flocculation · Multimodal · Particle size distribution · Population balance equations

1 Introduction

Fine-grained cohesive sediments undergo a range of physical, chemical, and biological processes while traveling from an upstream river to a downstream estuary or coast. The physical processes include advection, dispersion, sedimentation, flocculation, etc. The chemical processes include chemical reactions occurring in solution and on the sediment surface, and biological processes involve a range of activities of microorganisms, plants, and animals. Among the many physical, chemical, and biological processes, flocculation has been reported to be the most important process for determining the size, settling velocity, and deposition rate of fine-grained cohesive sediment particles in a marine and coastal environment (e.g., Krone 1962; Gibbs 1985; Fettweis 2008; Manning et al. 2006).

Flocculation is the combined process of particle size growth and decay by aggregation and breakage in a turbulent flow field, and can determine the size and settling velocity of the cohesive sediment particles (van Leussen 1994; Winterwerp and van Kesteren 2004). Low turbulent flow enhances particle aggregation and increases the size and settling velocity of cohesive sediment particles, but high turbulent flow enhances floc breakage and decreases the size and settling velocity. Moreover, flocculation in the marine and coastal environment develops a multimodal particle size distribution (PSD) with four-level ordered aggregate structures of primary particles, flocculi (a compound word of floc and nuclei), microflocs, and macroflocs (Fig. 1) (Michaels and

Responsible Editor: Han Winterwerp

This article is part of the Topical Collection on the *11th International Conference on Cohesive Sediment Transport*

B. J. Lee (✉)
School of Constructional and Environmental Engineering,
Kyungpook National University, 2559 Gyeongsang-daero, Sangju,
Gyeongbuk 742-711, South Korea
e-mail: bjlee@knu.ac.kr

E. Toorman
Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, KU
Leuven, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Leuven, Belgium

M. Fettweis
OD Natural Environment, Royal Belgian Institute of Natural
Sciences, Gulledele 100, 1200 Brussels, Belgium

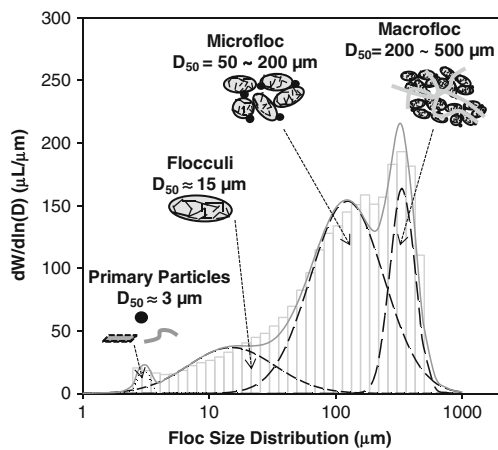


Fig. 1 Multimodal PSD and schematic diagrams of the four-level ordered aggregate structures of primary particles, flocculi, microflocs and macroflocs, modified from Lee et al. (2011)

Bolger 1962; Firth and Hunter 1976; Francois 1985; van Leussen 1994). Multimodal particle size distributions have been reported to determine the fate of sediments by controlling settling (e.g., Fettweis et al. 2012; Lee et al. 2012) and erosion/deposition (e.g., Letter and Mehta 2011).

Many mathematical models have been developed to simulate the flocculation of cohesive sediments in marine and coastal environments. Some flocculation models are realistic with substantial computations, whereas others are approximate with relatively small computations. For example, a multi-class population balance equation (PBE) is realistic for simulating the flocculation of many particles and floc size groups but it is mathematically complicated with many coupled differential equations (e.g., Verney et al. 2011; Xu et al. 2008). A single-class PBE is mathematically simple and robust with only one floc size group but is unable to simulate flocculation involving multimodal PSDs, which is referred to as multimodal flocculation. Therefore, a two-class PBE (TCPBE) consisting of the discrete size groups of flocculi and flocs was developed recently to simulate multimodal flocculation, particularly bimodal flocculation, with a minimum number of equations and computations (Lee et al. 2011, 2012). Sophisticated flocculation models with many discrete floc size classes (e.g., Verney et al. 2011; Xu et al. 2008) or a continuous size distribution (e.g., Maerz and Wirtz 2009) would be more accurate and precise than the TCPBE for simulating multimodal flocculation. On the other hand, the TCPBE can be a practical alternative to such sophisticated models with less computational cost, considering that a combination of two discrete size groups of flocculi and flocs can approximate a multimodal PSD. The TCPBE is at least better for simulating multimodal flocculation than many contemporary flocculation models with a single floc size group (e.g., Son and Hsu 2009; Winterwerp 1998).

To simulate the fate of fine-grained cohesive sediments in a marine and coastal environment correctly, a flocculation

model must be solved in a coupled manner with hydrodynamic and sediment transport models. For example, hydrodynamics controls the flocculation kinetics for determining the floc size growth and decay rates by shear-dependent flocculation in a turbulent flow field. The flocculation kinetics then controls sediment transport because it determines the size, settling velocity, and deposition rate of cohesive sediment particles. Hydrodynamics also controls the sediment transport for determining the advection and dispersion of cohesive sediment particles. Sediment transport gives a feedback to hydrodynamics, such as a turbulence reduction due to stratification of the sediment concentration.

In this study, a one-dimensional vertical (1-DV) TCPBE, combining the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equation with the $k-\varepsilon$ turbulence closure, sediment mass balance equation, and TCPBE, was developed to simulate the interactive processes shown above. The RANS equation with the $k-\varepsilon$ turbulence closure, sediment mass balance equation and TCPBE were used to simulate turbulent flow, sediment transport, and the flocculation kinetics, respectively. This paper reports the behavior of multimodal PSDs of fine-grained cohesive sediments in a flow-varying tidal cycle and validates the capability of the 1-DV TCPBE for simulating multimodal flocculation and cohesive sediment transport.

2 Mathematical models

2.1 Fluid mechanics and sediment transport equations

The RANS equations were used to simulate flow movement. For a one-dimensional vertical water column, the RANS equations were simplified to a streamwise momentum conservation equation, neglecting advection, as shown in Eq. (1). The equation incorporated the eddy viscosity but discarded the molecular viscosity because (far enough from the bed) the former is several orders higher than the latter in a marine and coastal zone.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

In Eq. (1), U is the time averaged velocity component, t and z are time and space, ρ is the fluid density, p is the piezometric pressure, C_μ is an empirical scaling parameter, k is the turbulent kinetic energy, and ε is the turbulent energy dissipation rate. Assuming local equilibrium of the flow field, the horizontal pressure gradient term (the last term of Eq. (1)) is approximated by U_*^2/H , where U_* and H are the measured friction velocity and water height, respectively. Only the friction velocity (U_*) and water height (H)

were available for calculating the horizontal pressure gradient term (see Section 3.1).

The sediment mass balance equation was used to simulate the one-dimensional vertical transport of flocculi and flocs in the water column (Eq. (2)). As shown in Fig. 2, size-fixed flocculi and size-varying flocs approximate a bimodal PSD varying in time and space. To track the three time- and space-dependent variables, the number concentration of flocculi (N_P) and the size and number concentration of flocs (D_F and N_F), the sediment mass balance equation incorporates three differential equations for the time rate of change in the following: (1) the number concentration of flocculi in suspension (dN_P/dt), (2) the number concentration of flocs in suspension (dN_F/dt), and (3) the number concentration of flocculi bound in flocs (dN_{PF}/dt). On the right-hand side of Eq. (2), the respective terms represent turbulence-mediated dispersion, gravity-driven sedimentation, and flocculation kinetics. The

flocculation kinetics (A_i+B_i) incorporates the TCPBE, which can simulate bimodal flocculation (see also Section 2.3).

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

In Eq. (2), $N_i=N_i(z, t)$ represents the number concentration, subscript i represents flocculi and flocs in suspension (N_P and N_F) and the flocculi bound in flocs ($N_{PF}=N_C \times N_F$), N_C is the floc size index representing the number of flocculi bound in a floc, C'_μ is an empirical scaling parameter (A_i+B_i) is the respective growth and decay rates of N_i by aggregation and breakage, and $w_{s,i}$ is the settling velocity of flocculi or flocs.

The modified Stokes equation, including the use of fractal theory for floc packing and shaping, and the Schiller's equation for the turbulent drag correction, was used to calculate the floc settling velocity ($w_{s,i}$) (Schiller 1932). The Richardson-Zaki equation was also included to calculate the correction factor (Φ_{HS}) for hindered settling in a highly concentrated near-bottom mud layer (Eqs. (3) and (4)) (Richardson and Zaki 1954; Winterwerp 1998), even though it was only valid for relatively low concentrations (Toorman 1999).

$$w_{s,i} = \Phi_{HS} \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_w)g}{\mu} D_p^{3-n_f} \frac{D_i^{n_f-1}}{1 + 0.15 Re_i^{0.687}} \quad (3)$$

$$\Phi_{HS} = (1-\phi)^a \quad \phi \ll \phi_{max} \approx 0.7 \quad (4)$$

In Eqs. (3) and (4), D_p =size (diameter) of flocculi (i.e., the group of primary particles and flocculi), D_i is the size of i th class particles or flocs, D_F is the size of flocs (i.e., the group of microflocs and macroflocs), replacing D_i in Eq. (3), n_f is the fractal dimension for describing the particle-organizing scheme in a floc, ρ_s is the particle density, ρ_w is the fluid density, g is the gravitational acceleration, μ is the fluid viscosity, Φ_{HS} is the correction factor for hindered settling, Φ is the volumetric concentration of flocs (cubic meter flocs per cubic meter), and Re_i is the Reynolds number of a particle or floc ($=D_i \cdot w_{s,i} \cdot \rho_w / \mu$).

2.2 Turbulence closure

The two-equation $k-\varepsilon$ turbulence closure was selected to simulate the fluid turbulence, which consequently controls the turbulence-mediated sediment dispersion and flocculation (Eqs. (5) and (6)). The two-equation model has the two differential equations for the conservation of turbulent kinetic energy and its dissipation rate (k and ε), and incorporates the

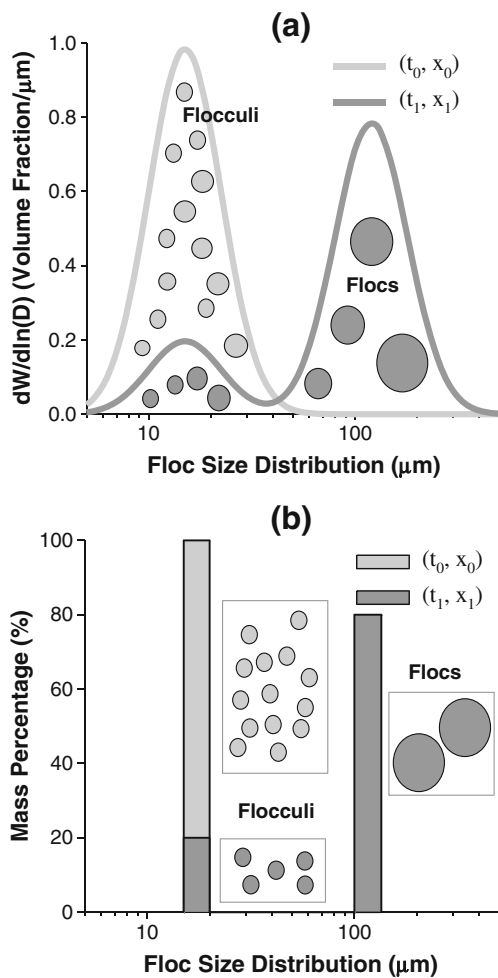


Fig. 2 Schematic diagrams of **a** continuous particle size distributions and **b** discrete size groups of flocculi and flocs before and after flocculation, from (t_0, x_0) to (t_1, x_1) . **b** also represents the flocculation strategy of the TCPBE

turbulent kinetic energy production and buoyancy destruction terms (P and G). In particular, the buoyancy destruction term (G) is incorporated to simulate the particle-fluid interactions, considering the damping effect of sediment stratification on the fluid turbulence. The buoyancy by stable sediment stratification can destroy or dampen the flow turbulence (Burchard and Baumert 1998; Rodi 1980; Toorman 2003).

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + P + G - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (P + C_3 G) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

In Eqs. (5) and (6), the standard model coefficients were applied: $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_1=1.44$, $C_2=1.92$ and $C_3=-1.4$ (Burchard and Baumert 1998; Conley et al. 2008).

The turbulent kinetic energy production term (P) and the buoyancy destruction term (G) are expressed in Eqs. (7) and (8), respectively. The turbulent Schmidt number is closed with the Munk-Anderson damping functions, Eq. (9) (Munk and Anderson 1948). The gradient Richardson number (Ri) is a dimensionless measure of the stability of stratification (Eq. (10)). Under the stratification effect ($Ri>0$), the damping effect on turbulence will be considered by the buoyancy destruction term (G) and the stability coefficient of the eddy viscosity (C'_μ).

$$P = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (7)$$

$$G = C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (8)$$

$$C'_\mu = C_\mu \frac{(1 + 10Ri)^{1/2}}{(1 + 1.33Ri)^{3/2}} \quad \text{for } Ri \geq 0$$

$$= C_\mu = 0.09 \quad \text{for } Ri < 0 \quad (9)$$

$$Ri = - \left(\frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Table 1 lists the boundary conditions of the time- and space-dependent variables. The top boundary conditions of flow velocity (U) and turbulent kinetic energy and dissipation rate (k and ε) were treated as a closed boundary (i.e., zero-flux boundary), but the bottom boundary conditions incorporated the friction velocity (U_*) describing flow over a rough bottom boundary. The top boundaries of the number concentrations of flocculi in suspension, flocs in suspension and flocculi bound in flocs (N_B , N_F and N_{PF}) were set to be a closed boundary, but the bottom boundaries were open for erosion and deposition, following the formulations of shear-dependent erosion and continuous deposition (Eqs. (11) and (12)) (Ariathurai 1974; Le Hir et al. 2011; Winterwerp 1998). In the 1-DV TCPBE model, both flocculi and flocs were subject to deposition, but only flocculi to erosion, which may be referred to as entrainment or disruption (Winterwerp and van Kesteren 2004).

$$E_P = \frac{M}{(\pi/6)D_P^3 \rho_P} (\tau/\tau_c - 1) \quad \text{if } B > 0 \text{ and } \tau > \tau_c \quad (11)$$

$$D_i = w_{s,i} N_i \quad (12)$$

In Eq. (12), subscript i is P , F or PF , representing flocculi in a suspension, flocs in suspension and flocculi bound in flocs, respectively. M is the empirical erosion rate parameter, τ is the bottom shear stress, and τ_c is the critical shear stress for erosion. The denominator over M is used to convert the mass concentration to the number concentration. The erosion of flocculi (E_P) is effective only when a pool of erodible sediments is available on the bottom ($B>0$) and the bottom shear stress is over the critical shear stress ($\tau>\tau_c$), according to the Ariathurai-Partheniades equation (Ariathurai 1974).

2.3 Flocculation Kinetic Model

The two-class PBE includes size-fixed flocculi and size-varying flocs as building blocks and buildings, respectively, to simulate bimodal flocculation (Fig. 2). The number of flocculi bound in a floc (N_C) is used as an index of the floc size in the TCPBE. As this new size index becomes one for flocculi ($N_C=1$), it gives the simplicity of the TCPBE. The TCPBE incorporates three coupled differential equations describing the time rate of change in: (1) the number concentration of microflocs (dN_P/dt), (2) the number concentration of macroflocs

Table 1 Top and bottom boundary conditions of the Navier-Stokes equation with the $k-\varepsilon$ turbulence closure and sediment mass balance equation

Boundary conditions at the bottom	$U_b = \frac{U_* \ln z_b}{z_0}$	$k_b = \frac{U_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\varepsilon_b = \frac{U_*^3}{\kappa \cdot z_0}$	$\left(w_{s,i} N_i - C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right)_{z=z_b} = E_i - D_i$
Boundary conditions at the top	$\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_{z=z_s} = 0$	$\left(\frac{\partial k}{\partial z} \right)_{z=z_s} = 0$	$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)_{z=z_s} = 0$	$\left(w_{s,i} N_i - C'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial N_i}{\partial z} \right)_{z=z_s} = 0$

(dN_F/dt), and (3) the total number concentration of microflocs bound in macroflocs (dN_{PF}/dt) ($N_{PF}=N_C \times N_F$) (Eq. (13)), and

they were incorporated to the growth and decay rates (A_i+B_i) of Eq. (2). Lee et al. (2011) explained the TCPBE in depth.

$$\begin{aligned}
 (A_P + B_P) &= -\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) - \alpha \beta_{PF} N_P N_F + f N_C a_F N_F \\
 (A_F + B_F) &= +\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{1}{N_C - 1} \right) - \frac{1}{2} \alpha \beta_{FF} N_F N_F + a_F N_F \\
 (A_{PF} + B_{PF}) &= +\frac{1}{2} \alpha \beta_{PP} N_P N_P \left(\frac{N_C}{N_C - 1} \right) + \alpha \beta_{PF} N_P N_F - f N_C a_F N_F
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

In Eq. (13), f is the fraction of flocculi generated by floc breakage. α is the collision efficiency factor, β is the collision frequency factor, and a is the breakage kinetic constant. The collision efficiency factor (α) is generally used as an application-specific fitting parameter, and the collision frequency factor (β) is applied as a theoretical function correlated with Brownian motion, turbulent shear rate, and differential settling. Table 2 lists the aggregation and breakage kernels for the collision frequency factor (β) and the breakage kinetic constant (a) (Burd and Jackson 2002; Lee et al. 2011). The aggregation kernels consist of the theoretical functions of Brownian motion, differential settling and turbulent shear, but the breakage kernel is composed of only the shear-dependent breakage kinetics function.

Table 2 Aggregation and breakage kernels of the 1-DV TCPBE modified from Lee et al. (2011)

Aggregation kernel	Breakage kernel
$\beta_{BR,ij} = \frac{2kT}{3\mu} \left(\frac{1}{D_i} + \frac{1}{D_j} \right) (D_i + D_j)$	$a_i = E_b G \left(\frac{D_i - D_p}{D_p} \right)^p \left(\frac{\mu G}{F_y / D_i^2} \right)^q$
$\beta_{SH,ij} = \frac{1}{6} (D_i + D_j)^3 G$	
$\beta_{DS,ij} = 2\pi D_i^2 w_{s,i} - w_{s,j} $	

D_i diameter of a particle size class i , β_{BR} collision frequency factor by Brownian motion, β_{SH} collision frequency factor by fluid shear, β_{DS} Collision frequency factor by differential settling, k Boltzmann's constant, T absolute temperature (K), p, q Empirical parameters, μ Absolute viscosity of the fluid, G fluid turbulent shear rate (per second), w_i sedimentation velocity of size class i , E_b breakage efficiency factor, F_y yield strength of flocs (10^{-10} Pa)

2.4 Numerical methods

The operator splitting algorithm and Gauss-Seidel iteration were applied to solve the nonlinear partial differential equations of the 1-DV TCPBE model (Eqs. (1)–(13)). According to the operator splitting algorithm, the flocculation kinetic equations (Eq. (13)) were decoupled and solved explicitly in each time step, to cope with the complexity and nonlinearity (Aro et al. 1999; Winterwerp et al. 2006). Each operator was solved using the Gauss-Seidel iterative method, in which the dependent variables are updated iteratively until the convergence limit in each time step is satisfied. The converged values were then used as the seeding values of the next time step.

Tide equations (Eqs. (14) and (15)) that fit a time series of the measured friction velocity (U_*) and water height (H) in a flood-ebb tidal cycle were used as the input of the momentum conservation equation for driving turbulent flow.

$$U_* = 0.035 - 0.015 \cdot \text{COS}(2 \cdot 2\pi / (12.4) \cdot t[\text{h}] + 0.5) \tag{14}$$

$$H = 7.4 - 2.0 \cdot \text{COS}(2 \cdot 2\pi / (24.8) \cdot t[\text{h}] + 4.0) \tag{15}$$

Note that the water height changes during a tidal cycle. To account for the change in water height, the equally spaced grid cells along the water column were set to change their size with

increasing time. Each transport equation (i.e. Eqs. (1), (2), (5), (6); $X=U, N_p, k, \varepsilon$) was corrected with an additional advection term (Eq. (16)) based on the Arbitrary Euler-Lagrange (ALE) method (Huerta and Liu 1988).

$$\left(\frac{\Delta z(t)-\Delta z(t-\Delta t)}{\Delta t}\right)\frac{\partial X(z,t)}{\partial z} \tag{16}$$

where $z(t)$ is the elevation of a node at time t .

3 Material and methods

3.1 Field Measurements

The study area was located in the Belgian coastal zone facing the southern North Sea. This area is of interest because of the occurrence of a coastal high turbidity area. The measurements indicated variations in the SPM concentration near the shore area of 20–70 mg l⁻¹ and reaching 100 to >3,000 mg l⁻¹ near the bed (Fettweis et al. 2010). Because substantial mud deposition formed over a broad area near the measuring site, the effect of horizontal advection and dispersion, rather than 1-DV processes, was assumed to be minor. The SPM is characterized by the development of multimodal PSD (Fettweis et al. 2012; Lee et al. 2012). Grain size analysis found that the suspended matter in the study area consisted mostly of clay (41 %) and silt (57 %) with a small amount of sand (2 %) (Fettweis 2008). Therefore, flocculation was supposed to be the major contributor for developing a multimodal PSD of such fine-grained cohesive sediments. Tides are semi-diurnal with a mean tidal range at Zeebrugge of 4.3 m (2.8 m) at the spring (neap) tide and maximum current velocities of more than 1 m s⁻¹. Tidal ellipses are commonly well-aligned with the coastline orientation. A tripod was deployed approximately 1 km from the shore line in a water depth of 5.5 m below MLLWS (mean lowest low water at spring tide), and the current velocity, turbulent shear, salinity and suspended sediment were measured in the field measurement campaign from the 15th of April 2008 to the 30th of April 2008. Sediment samples near the tripod showed variable sediment characteristics (fine sand, silt/clay) with a D_{50} grain size of the sand fraction of approximately 150 μm. The measuring instruments on the tripod were a 5 MHz SonTek^R Acoustic Doppler Velocimeter (ADV Ocean), a 3 MHz SonTek^R Acoustic Doppler Profiler (ADP), two D&A^R optical backscatter sensors (OBS), a Sea-bird^R SBE37 CT system, a Sequoia Scientific^R Laser In Situ Scattering & Transmissometer 100C (LISST-100C), and two SonTek^R Hydra systems for data storage and batteries. The values measured from OBS, LISST, and ADV were averaged over each 10-min period and recorded. Two OBSs measured the SPM concentrations at 0.2

and 2 m above the bed (mab). The ADV measured a time series of flow velocity and turbulent intensity at 0.2 mab. The respective horizontal x and y velocity components (U and V) were projected to the alongshore axis directed to the northeast (65°) and the cross-shore axis directed to the southeast (155°) (Baeye et al. 2011). The high frequency ADV (25 Hz) measurements allowed the velocity to be decomposed in terms of a mean and fluctuating part and to calculate the turbulent kinetic energy (TKE) and bottom friction velocity (U_*) with the inertial dissipation method (Fettweis et al. 2010; Sherwood et al. 2006; Trowbridge and Elgar 2001). The LISST-100C, which was attached to the tripod at 2 mab measured the size distribution of the volume-equivalent spherical particle/flocs in 32 logarithmically spaced size groups over the range of 2.5–500 μm (Agrawal and Pottsmith 2000).

3.2 Decomposition of a Multimodal PSD

The observed multimodal (four-peaked) PSD was assumed to be formed by four overlapping unimodal log-normal PSDs of the primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs (Fig. 1). The data was used as the input to the selected software (DistFitTM; Chimera Technologies, USA) which performed curve-fitting analysis and the decomposition of the observed PSD into the subordinate log-normal PSDs (Eq. (17)) (Lee et al. 2012; Whitby 1978).

$$\frac{dV}{dD} = \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{V}_i}{\sqrt{2\pi}\ln(\sigma_i)} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\ln(D/\bar{D}_i)^2}{\ln(\sigma_i)}\right] \tag{17}$$

In Eq. (17), V and D are the volumetric concentration and diameter of each size interval of the LISST-100C measured PSD, respectively. dV/dD is the normalized volumetric fraction by the width of the size interval and is used for curve-fitting to a log-normal distribution (Hinds 1999). \bar{D}_i is the geometric mean diameter ($\bar{D}_{g,i}$), which is equivalent to the median diameter ($D_{50,i}$) for a log-normal distribution (Weisstein 2006), σ_i is the geometrical standard deviation, and \bar{V}_i is the volumetric concentration of an i th unimodal PSD. Eq. (17) has twelve fitting parameters for \bar{D}_i , σ_i and \bar{V}_i of primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs. Based on the observation, the mean diameters of the primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs were limited to 3, 15, 20~200 and 200~500 μm, respectively, in curve-fitting analysis. The best-quality PSD provided parameter values (\bar{D}_i , σ_i and \bar{V}_i) for the subordinate log-normal PSDs of the primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs. The resulting parameter values were then used as indicators of cohesive sediment flocculation and transport dynamics. The

smaller and larger two fractions of the decomposed four-class distribution (i.e., primary particles+floculi and microflocs+macroflocs) were summed up further to a two-class distribution (i.e., floculi and flocs), and the two volume-weighted mean diameters were calculated for the smaller and larger fractions. The volume fractions and volume-weighted mean diameters were then used for model calibration and validation of 1-DV TCPBE.

3.3 Model calibration and validation

The best-quality simulation of the 1-DV TCPBE, which was fitted to the experimental data, was obtained while changing the adjustable fitting parameters of the collision and breakage efficiency factors (α and E_b), erosion constants (M and τ_e) and floc characteristics (ρ_p and n_p). On the other hand, the other kinetic and physicochemical constants and the initial conditions were fixed at the standard values, which have been found in previous studies (Table 3) (Burchard and Baumert 1998; Lee et al. 2011; Luyten et al. 2002; Winterwerp and van Kesteren 2004). The simulated results of the 1-DV TCPBE were compared with the experimental data from field measurements.

4 Results and discussion

4.1 Field observation on multimodal PSDs

The flood and ebb tidal flows were almost symmetrical during the entire measuring period and were characterized by the similar magnitude of the flow velocities but with opposite alongshore directions. The median floc size (D_{50}) and particle size distribution (PSD) of the cohesive sediments varied as a function of the flood-ebb tidal flows (Fig. 3). During the slack water, the D_{50} reached a maximum and the PSDs were skewed towards the larger size classes with a substantial amount of microflocs and macroflocs (e.g., $t=7.00$ and 14.50 hours). During peak flow, the D_{50} was minimal and the PSDs were skewed towards the smaller sized classes with a substantial number of primary particles and floculi (e.g., $t=4.33$ and 10.17 hours).

Flocculation is controlled mainly by fluid turbulent shear that determines the D_{50} and PSDs during a tidal cycle (Fettweis et al. 2006). Low turbulence during slack water enhances aggregation and reduces breakage, whereas the opposite occurs during peak flow conditions. This behavior agrees well with the findings of the present study, and points to the occurrence of mainly fine-grained cohesive sediments in suspension at the measuring site (e.g., clay and silt) (see Section 3.1), rather than sand particles. The latter would not affect D_{50} or PSDs in the observed way.

The height of the four modal peaks of the primary particles, floculi, microflocs, and macroflocs changed as a function of the turbulence intensity during the tide, resulting in different multimodal PSDs (Fig. 3c). During the peak flow condition, the peaks of the primary particles and floculi (the first and second peaks from the left of a PSD) increased, whereas the peaks of micro- and macroflocs (the third and fourth peaks) (e.g., 4.33 and 10.17 hours) decreased. The opposite was observed during slack water (e.g., 7.00 and 14.50 hours). For many PSDs, peaks recurred at approximately 3 and 15 μm with small variations, which were defined as the modal peaks of the primary particles and floculi, respectively. The other peaks were defined as the modal peaks of microflocs and macroflocs, and recurred at 50~200 and 200~500 μm , respectively, with large variations in the floc size caused by aggregation and breakage (see also Fig. 1). These four-level ordered aggregate structures of primary particles, floculi, microflocs, and macroflocs are common in marine and coastal environments (Lee et al. 2012; van Leussen 1994). The primary particles are fine particles consisting of fragmented clay particles, organic and calcareous particles, picophytoplankton and bacteria. The primary particles are often smaller than the size range of the LISST 100C; these fine “out of range” particles affect the entire PSD, with a significant increase in the volume concentration of the smallest two size classes (Andrews et al. 2010) explaining the rising tail in Fig. 3c during peak flow (e.g., 4.33 and 10.17 hours). Floculi, which are seldom broken down to the lowest-level primary particles, are considered the major building blocks of flocs rather than primary particles in a marine and coastal environment. Microflocs and macroflocs form with floculi and primary particles because of the physicochemically and biologically mediated flocculation in the salt- and biomass-enriched sea water (Eisma 1986; van Leussen 1994).

4.2 Numerical Simulation of Multimodal Flocculation

The four-level ordered aggregate structures of the primary particles, floculi, microflocs and macroflocs may be simplified further to a two-level structure of floculi (primary particles and floculi) and flocs (microflocs and macroflocs) for modeling and simulation (Lee et al. 2012). The sharp peak of the primary particles, which in reality consists mostly of out-of-range particles below the lowest measurable size, can merge to the peak of floculi. Furthermore, settling flux analysis of the multimodal PSDs showed the two discrete size groups of floculi and flocs could approximate a continuous multimodal PSD with a relatively small error less than 9.5 % (Lee et al. 2012). Therefore, the TCPBE with size-fixed floculi and size-varying flocs has been proposed as the simplest model that is capable of simulating multimodal flocculation (see also Fig. 2b) (Lee et al. 2011).

Table 3 Parameters and initial conditions of the 1-DV TCPBE for the best-quality simulation

Kinetic parameters and physicochemical constants				
Classification	Symbol	Value	Description	
Flocculation kinetics	α	0.2	Collision efficiency factor [-]	
	E_b	3.0e-5	Efficiency factor for breakage [$s^{0.5}/m$]	
	F_y	1.0e-10	Yield strength of flocs [Pa]	
	f	1.0	Fraction of flocculi by breakage [-]	
	p^a	1.0	Empirical parameter of breakage kinetics	
	q	3.0 - n_f	Empirical parameter of breakage kinetics	
Turbulent flow	C_μ	0.09	Model fitting coefficients [-]	
	C_1	1.44		
	C_2	1.92		
	C_3	-1.4		
	σ_k	1.0		
	σ_ϵ	1.3		
	κ	0.4		Von Karmen's coefficient [-]
	z_o	0.001		Bottom roughness length [m]
	z_b	0.01		Distance from the bottom [m]
Erosion deposition	M	1.0e-3	Empirical erosion parameter [$kg/m^2/s$]	
	t_c	1.5	Critical shear stress for erosion [pa]	
	B	2.24	Total mass of erodible sediments [kg/m^2]	
Sediment property	ρ_p	1800	Density of flocculi [kg/m^3]	
	ρ_w	1050	Density of sea water [kg/m^3]	
	D_p	15.0	Diameter of flocculi [μm]	
	n_f	2.3	Fractal dimension of flocs [-]	
	a	4.0	Exponent of Richardson-Zaki eqn [Pa]	
Initial conditions (at $t=0$)				
Sediment concentration	c	0.32	Total mass conc. of sediments [g/L]	
	N_{PT}^b	1.004e+11	No. conc. of flocculi [$/m^3$]	
Seeding flocs	D_{F0}	100	Diameter of seeded flocs [μm]	
	$Frac_{F0}$	0.1	Mass fraction of seeded flocs [-]	
TCPBE	N_{F0}	$(1 - Frac_{F0}) N_{PT}$	No. conc. of flocculi [$/m^3$]	
	N_{f0}	$(D_{F0}/D_p)^{-n_f} (Frac_{F0}) N_{PT}$	No. conc. of flocs [$/m^3$]	
	N_{PF0}	$(Frac_{F0}) N_{PT}$	No. conc. of flocculi bound in Flocs [$/m^3$]	

^a p was set as 1.0 to narrow FSDs, instead of 0.5 of Winterwerp and van Kasteren (2004)

^b $N_{PT} = c / (0.167 \cdot \pi \cdot D_p^3) / \rho_s$, assuming that flocculi are spherical

The collision and breakage efficiency factors (α and E_b), erosion constants (M and τ_c) and floc characteristics (ρ_p and n_f) were selected as the adjustable fitting parameters to identify the best-quality simulation. The collision efficiency factor (α) of the best-quality simulation was 0.2 within the theoretical range between 0 and 1, and the breakage efficiency factor (E_b) was 3.0×10^{-5} close to 2.0×10^{-5} of the earlier 1-DV simulation of Winterwerp (1998). The empirical erosion constant (M) was estimated to be $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$, which is slightly larger than the typical value of mud deposits ($0.01 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3}$) (Winterwerp and van Kesteren 2004). The critical shear stress for erosion was set to 1.5 Pa, which is also larger than those of typical mud deposits (0.2~0.8 Pa) (Winterwerp and van Kesteren 2004). Considering the high erosion rate and critical shear stress, cohesive sediments at the

measuring site appear to be more resistant to erosion, but they undergo massive erosion once the shear stress exceeds a critical value. The floc characteristic parameters ρ_p and n_f were set to 1,800 kg/m^3 and 2.3, respectively. Remarkably, the fractal dimension corresponds to the maximum of the typical values for mud flocs (1.8~2.3), pointing to the formation of dense and fast-settling flocs at the measuring site. The remaining parameters for hydrodynamics, sediment transport and flocculation kinetics were fixed according to reference values, as shown in Table 3 (Burchard and Baumert 1998; Le Hir et al. 2011; Lee et al. 2011; Winterwerp and van Kesteren 2004). Future research should examine these values more closely.

Simulations of the 1-DV TCPBE were carried out during different tidal cycles using a curve fitted to the measured

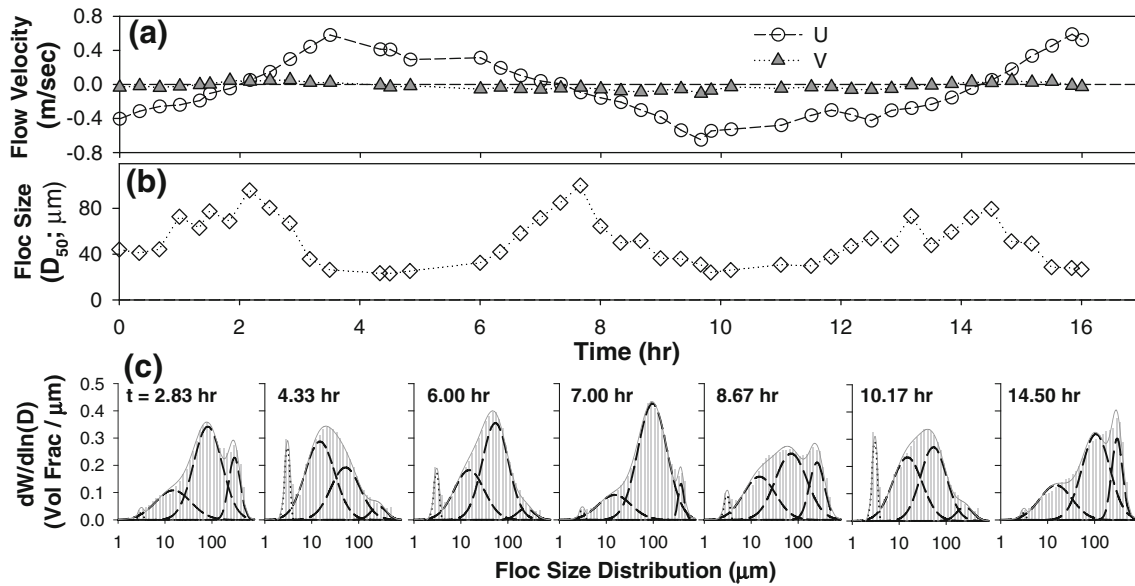


Fig. 3 Time series of **a** the alongshore and cross-shore flow velocities (U , V) at 2 m above the bed (mab) and **b** median floc sizes (D_{50}) at 2 mab, during the time period of Julian day 133.57~114.03. **c** Particle size

distributions (PSDs) at different times. The lines inside the envelope of a PSD represent the subordinate PSDs of primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs, from the right to the left of a PSD

friction velocity (U_*) and water height (H) to drive turbulent flow (Fig. 4a). In Fig. 4b, the eddy viscosity represents the flow turbulence and particle/floc resuspension capability in the 1-DV water column. The eddy viscosity of the best-quality simulation was maximal with a bell-shaped profile around the peak flow (e.g., $t=4.33$ and 10.17 hours). Immediately after slack water, the eddy viscosity reached a minimum and developed a bell-shaped profile skewed towards the bottom (e.g., $t=7.00$, 8.67 and 14.50 hours). Buoyancy destruction due to the high-rate settling of large flocs and the resulting sediment concentration stratification might explain the form of the profile around slack water. On the other hand, sediment concentration stratification and turbulence destruction were lower than in the other 1-DV simulations (Winterwerp 2011; Winterwerp et al. 2006), probably because erosion and deposition without a fully developed, high concentrated near-bottom mud layer was possible in the bottom boundary of the 1-DV TCPBE.

The simulated profiles of the suspended sediment concentration depend on the fluid turbulence during the tidal cycle (Fig. 4c). For example, the sediment concentration increased during peak flow (e.g., $t=4.33$ and 10.17 hours), and decreased around slack water (e.g., $t=8.67$ and 14.50 hours). This suggests that the high turbulence around peak flow enhances erosion and resuspension, thereby bringing sediments upward into the water column. A low turbulence, however, enhances flocculation, settling, and deposition, bringing sediments down to the bottom. The sediment concentration profiles of the best-quality simulation fitted the measured data reasonably, except that they lagged behind the measured data, particularly around slack

water (e.g., $t=7.00$ and 10.17 hours; see also Fig. 5e). This will be discussed later in this section.

The 1-DV TCPBE could simulate the flocculation kinetics during a flow-varying tidal cycle. The simulated profiles of the mean floc size (D_F) were close to the measured data, and increased in size at slack water and decreased during peak flow (Fig. 4d). More importantly, the simulated discrete peaks of flocculi and flocs are an approximation of the measured multimodal PSDs (Fig. 4e). The measured PSDs of flocculi with a high concentration ($N_P \uparrow$) and flocs with a small size and low concentration ($D_F \downarrow$, $N_F \downarrow$) are skewed toward the smaller sizes during peak flow (e.g., $t=4.33$ and 10.17 hour). During slack water, the measured PSDs are skewed towards a larger size (e.g., $t=8.67$ and 14.50 hour), which is reflected in the low concentration of flocculi ($N_P \downarrow$) and the high concentration of flocs with a large size ($D_F \uparrow$, $N_F \uparrow$). The results from the 1-DV TCPBE simulation (inverse triangles) followed closely the measured and averaged trajectories of the flocculi and flocs (circles), as shown in Fig. 4e. The 1-DV TCPBE could approximately simulate a multimodal PSD by adjusting the two discrete peaks of the flocculi and flocs, although it could not simulate the entire domain of a multimodal PSD. On the other hand, the 1-DV TCPBE was unable to simulate the floc size growth and sediment accumulation near the bottom, particularly during slack water, because of the open-bottom boundary condition of the 1-DV TCPBE (see Eqs. (11) and (12)) that allows large flocs to settle quickly from the water column. This problem might be solved by combining the model with one that takes near-bottom processes into account.

The best-quality simulation of the 1-DV TCPBE model was reasonably close to the measured data during the entire

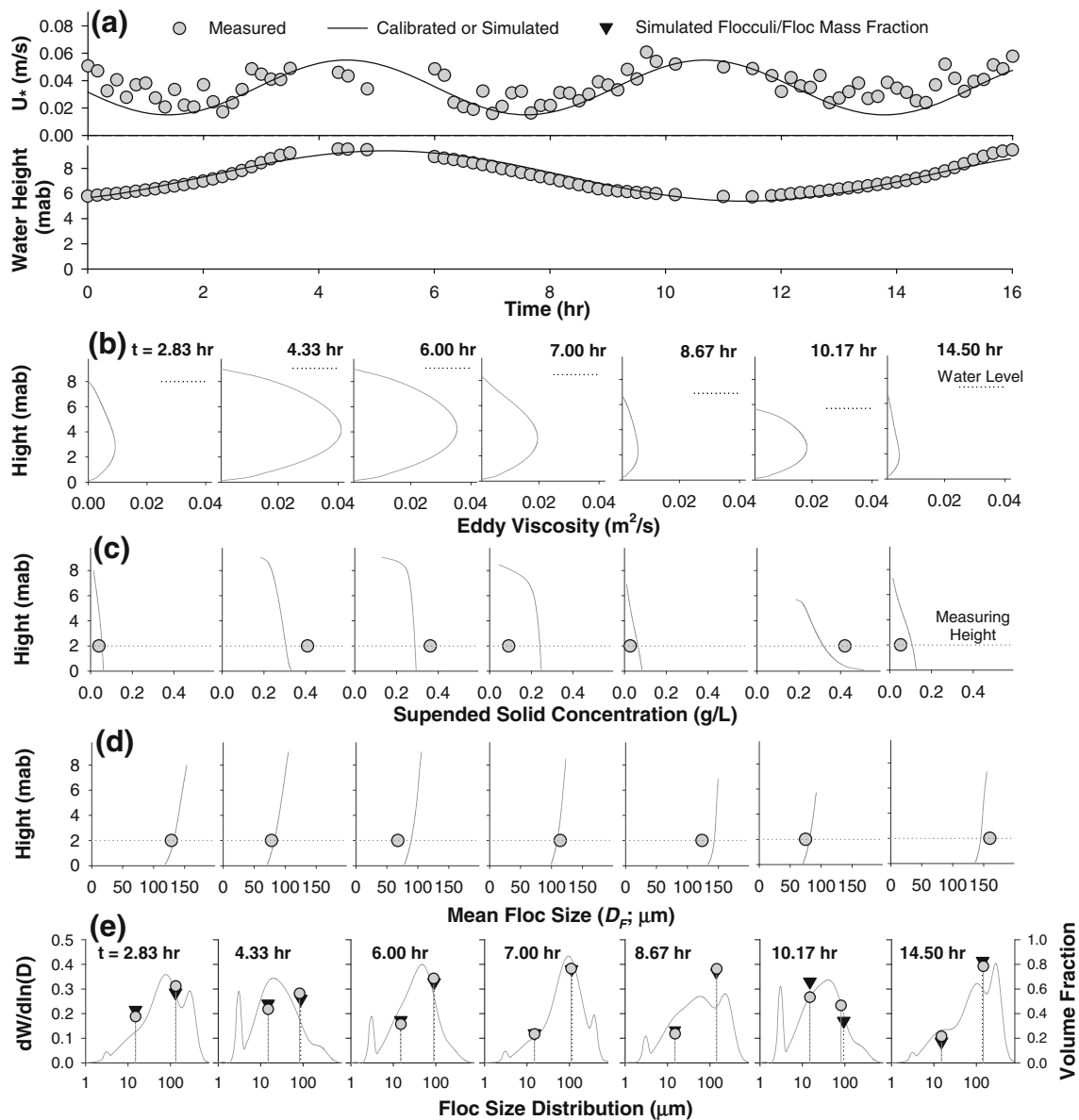


Fig. 4 Time series of **a** measured bottom shear velocities (U_*) and water height (H) and their best-fit tidal equations, during the time period of Julian day 133.57~114.03. **b** Simulated depth profiles of eddy viscosities at different time. Simulated depth profiles and measured data of **c**

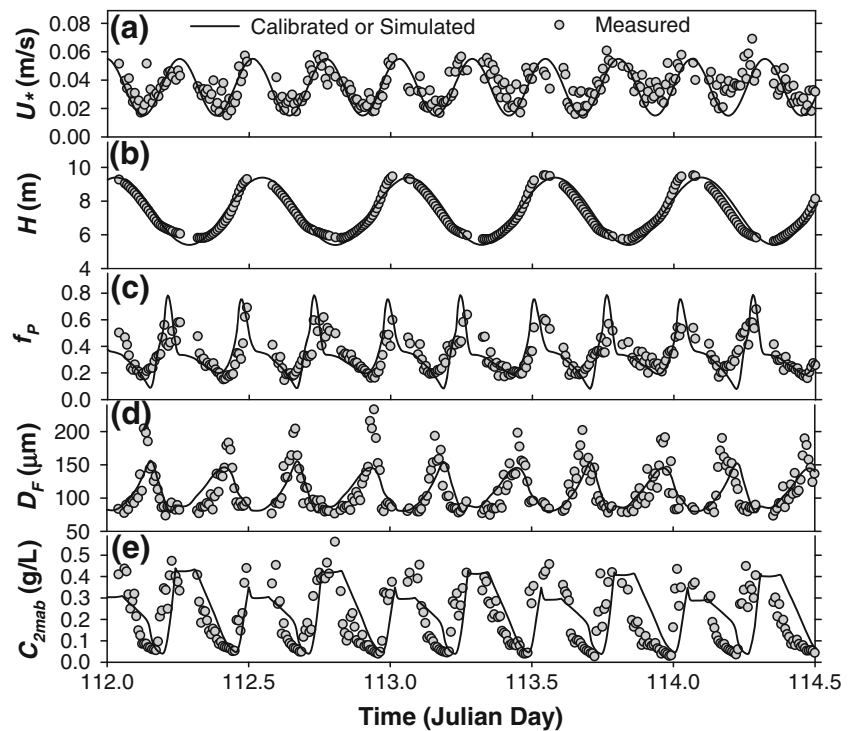
suspended solid concentrations and **d** volume-mean floc sizes (D_F) at different times. **e** Measured and simulated particle size distributions at different times

measuring period, following the typical up-and-down patterns (Fig. 5). The flocculi mass fraction (f_p) increased to 70 % and the floc size (D_F), which is defined as the mean diameter of flocs, but not of the entire PSD, decreased to 80 μm around peak flow (Fig. 5c, d). This suggests that a high fluid turbulence enhances the breakage of flocs into flocculi and smaller flocs, resulting in the entrainment of flocculi into the water column (see 2.2. Turbulence Closure and Eq. (11)). After peak flow, the flocculi mass fraction (f_p) dropped below 40 % (the floc mass fraction (f_F) increased suddenly to 60 %) but the floc size (D_F) remained small (approximately 80 μm). This behavior suggests that a large number of flocculi, which are

entrained from the bed into the water column, aggregated rapidly to small-sized flocs after peak flow, but that the time was insufficient to form large flocs.

Around slack water, the flocculi mass fraction (f_p) decreased to 20 % and the floc size (D_F) increased sharply to 200 μm , indicating that the flocculi aggregated to large flocs during the low fluid turbulence at slack water. The 1-DV TCPBE model could simulate these up-and-down trends of the flocculi mass fraction (f_p) and floc size (D_F) during the entire flood-ebb tidal cycles, but it could not simulate the sharp increase in floc size up to 200 μm around slack water (Fig. 5c). According to Maggi (2009), biologically mediated

Fig. 5 Time series of the measured and simulated **a** bottom shear velocity (U_*), **b** water height (H), **c** flocculi mass fraction (f_p), **d** volume-mean floc diameter (D_F), and **e** suspended sediment concentration at 2 m above the bed ($C_{2\text{mab}}$)



flocculation accelerates floc size growth, which can explain the sharp increase in floc size around slack water; biologically mediated flocculation is not incorporated in the 1-DV TCPBE. Another possible explanation for the sharp increase in floc size is the damping of turbulence by the formation of highly concentrated near-bottom sediment suspension layers, which increases the aggregation capability and floc size (Winterwerp 2011). On the other hand, the 1-DV TCPBE model cannot simulate properly the formation of highly concentrated near-bottom suspension layers and the turbulence damping because of the open-bottom boundary for erosion/deposition.

The simulated sediment concentrations are different at high and low water, in contrast to the measured data (see Fig. 5e). As described in Section 2, a change in the water level results in the dilution of cohesive sediments in the water column during high water. Expansion to 2- or 3-D transport models, which take horizontal sediment transport into account, should solve this problem. In addition, it is important to note that the 1-DV TCPBE model resulted in a lag of the simulated sediment concentration behind the measured, particularly around slack water (Fig. 5e; see also Fig. 4c). The measured sediment concentrations decreased and increased faster than the simulated ones, while approaching and leaving the slack water period, respectively. In other words, the measurements showed faster deposition and erosion behavior than the simulations. This possibly points to the occurrence of other processes than the ones incorporated in the 1-DV model (i.e., flocculation, sedimentation, erosion and deposition). Biologically mediated

flocculation could be one of the missing processes in the 1-DV TCPBE. Therefore, it is important to know what else is missing in the 1-DV TCPBE model.

The model cannot simulate correctly the formation and disruption of the highly concentrated near-bottom suspension layer and its damping effects on turbulence. Highly concentrated near-bottom suspension layers are formed during low-energy moments around slack water (e.g., Baeye et al. 2011). The measurements, however, were carried out above this expected layer. Therefore, there was no direct evidence for this hypothesis. On the other hand, the present model, like other currently used sediment transport models, has no correlation with the near-bottom boundary conditions in the turbulence model, resulting in an underestimation of turbulence damping, an incorrect bottom shear stress estimation (based on traditional assumptions that ignore drag modulation), and erroneous sediment fluxes in both the horizontal and vertical directions (i.e., transport and erosion, respectively). The model results can only be improved by including these phenomena.

5 Conclusion and recommendations

The results from field measurements and curve-fitting analyses indicated the occurrence of a multimodal PSD consisting of four-level ordered aggregate structures of primary particles, flocculi, microflocs, and macroflocs. The four modal PSDs

could be simplified further into two discrete groups of flocculi and flocs, which led to the idea of developing the TCPBE. The 1-DV TCPBE, combined with the Navier-Stokes equation with the $k-\varepsilon$ turbulence closure and sediment mass balance equation, demonstrated its ability to simulate multimodal flocculation and transport of fine-grained cohesive sediments in a marine and coastal environment. In particular, the discrete size groups (i.e., flocculi and flocs) of the 1-DV TCPBE were proven to be a reasonable approximation of a continuous multimodal PSD in modeling and simulation. Because the 1-DV TCPBE model is simple but can simulate multimodal flocculation, it is a promising candidate for modeling flocculation in large-scale multi-dimensional simulations. On the other hand, the 1-DV TCPBE would need to include a high-resolution sediment-fluid interaction model to provide accurate simulations of the formation and disruption of highly concentrated, near-bottom mud suspension layers.

Acknowledgments The authors wish to acknowledge the Flemish Science Foundation (FWO Vlaanderen) for funding the FWO project no. G.0263.08 and the Royal Belgian Institute of Natural Sciences—MUMM for funding the OMFLOC project. This study was funded partly by the Maritime Access Division of the Ministry of the Flemish Community (MOMO project). The mooring and recuperation of the tripod was carried out with the RV Belgica funded by the Belgian Science Policy. The measurements would not have been possible without the technical assistance of L. Naudts and his team (Measuring Service of RBINS-OD Nature, Oostende).

References

- Agrawal Y, Pottsmith H (2000) Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Mar Geol* 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. *Limnol Oceanogr Methods* 8:507–526
- Ariathurai, C. (1974), A finite element model for sediment transport in estuaries, PhD Dissertation, University of California, Davis
- Aro C, Rodrigue G, Rotman D (1999) A high performance chemical kinetics algorithm for 3-D atmospheric models. *Int J High Perform Comput Appl* 13(1):3–15
- 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(5):611–622
- Burchard H, Baumert H (1998) The formation of estuarine turbidity maxima due to density effects in the salt wedge. A hydrodynamic process study. *J Phys Oceanogr* 28:309–321
- Burd A, Jackson G (2002) Modeling steady-state particle size spectra. *Environ Sci Technol* 36:323–327
- Conley D, Falchetti S, Lohmann I, Brocchini M (2008) The effects of flow stratification by non-cohesive sediment on transport in high-energy wave-driven flows. *J Fluid Mech* 610:43–67
- Eisma D (1986) Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Neth J Sea Res* 20:183–199
- Fettweis M (2008) Uncertainty of excess density and settling velocity of mud flocs derived from in situ measurements. *Estuar Coast Shelf Sci* 78(2):426–436
- Fettweis M, Francken F, Pison V, Van den Eynde D (2006) Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area. *Mar Geol* 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). *Cont Shelf Res* 30:1417–1427
- Fettweis M, Baeye M, Lee B, Chen P, Yu J (2012) Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distribution in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Mar Lett* 32(2): 123–137
- Firth B, Hunter R (1976) Flow properties of coagulated colloidal suspensions. *J Colloid Interface Sci* 57:248–275
- Francois R (1985) Studie van de uitvloeking van kaolinietsuspensies met behulp van aluminiumsulfaat. PhD Thesis, University of Leuven, Belgium (in Dutch)
- Gibbs R (1985) Estuarine flocs: Their size, settling velocity and density. *J Geophys Res* 90(c2):3249–3251
- Hinds W (1999) *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd edn. Wiley, New York, NY
- Huerta A, Liu W (1988) Viscous flow with large free surface motion. *Comput Methods Appl Mech Eng* 69:277–324
- Krone R (1962) Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes. Technical Report, Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley California, USA
- Le Hir P, Cayocca F, Waeles B (2011) Dynamics of sand and mud mixtures: a multiprocess-based modelling strategy. *Cont Shelf Res*. doi:10.1016/j.csr.2010.12.009
- Lee B, Toorman E, Molz F, Wang J (2011) A two-class population balance equation yielding bimodal flocculation of marine or estuarine sediments. *Water Res* 45(5):2131–2145
- Lee B, Fettweis M, Toorman E, Molz F (2012) Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *J Geophys Res - Ocean* 117, C03014. doi:10.1029/2011JC007552
- Letter J, Mehta A (2011) A heuristic examination of cohesive sediment bed exchange in turbulent flows. *Coast Eng* 58(8):779–789
- Luyten P, Carniel S, Umgiesser G (2002) Validation of turbulence closure parameterisations for stably stratified flows using the PROVESS turbulence measurements in the North Sea. *J Sea Res* 47:239–267
- Maerz J, Wirtz K (2009) Resolving physically and biologically driven suspended particulate matter dynamics in a tidal basin with a distribution-based model. *Estuar Coast Shelf Sci* 84: 128–138
- Maggi F (2009) Biological flocculation of suspended particles in nutrient-rich aqueous ecosystems. *J Hydrol* 376:116–125
- Manning A, Bass S, Dyer K (2006) Floc properties in the turbidity maximum of a mesotidal estuary during neap and spring tidal conditions. *Mar Geol* 235:193–211
- Michaels A, Bolger J (1962) Settling rates and sediment volumes of flocculated kaoline suspensions. *Indian Eng Chem Fund* 1:24–33
- Munk W, Anderson E (1948) Notes on a theory of the thermocline. *J Mar Res* 3(1):276–295
- Richardson J, Zaki W (1954) Sedimentation and fluidisation, part I. *Trans Inst Chem Engrs* 2:35–53
- Rodi W (1980) Turbulence models and their application in hydraulics, IAHR State-of-the-Art Paper
- Schiller L (1932) Fallversuche mit kugeln und scheiben in Handbuch der experimental-Physik, IV., Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig
- Sherwood C, Lacy J, Voulgaris G (2006) Shear velocity estimates on the inner shelf off Grays Harbor, Washington, USA. *Continental Shelf Res* 26:1995–2018
- Son M, Hsu T (2009) The effect of variable yield strength and variable fractal dimension on flocculation of cohesive sediment. *Water Res* 43:3582–3592

- Toorman E (1999) Sedimentation and self-weight consolidation: constitutive equations and numerical modelling. *Geotechnique* 49(6):709–726
- Toorman E (2003) Validation of macroscopic modelling of particle-laden turbulent flows, in Proceedings 6th Belgian National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Gent
- Trowbridge J, Elgar S (2001) Turbulence measurements in the surf zone. *J Phys Oceanogr* 31:2403–2417
- van Leussen W (1994) Estuarine macroflocs: their role in fine-grained sediment transport. Universiteit van Utrecht, The Netherlands
- Verney R, Lafite R, Claude Brun-Cottan J, Le Hir P (2011) Behaviour of a floc population during a tidal cycle: laboratory experiments and numerical modelling. *Cont Shelf Res* 31(10):S64–S83
- Weisstein, E. (2006), Log normal distribution, MathWorld—a Wolfram Web Resources. [online] Available from: <http://mathworld.wolfram.com/LogNormalDistribution.html> (Accessed 22 March 2011).
- Whitby K (1978) The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos Environ* 41:S25–S49
- Winterwerp J (1998) A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *J Hydraul Eng* 36(3):309–326
- Winterwerp J (2011) Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening. *Ocean Dyn* 61(2–3):203–215
- Winterwerp J, van Kesteren W (2004) Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. Elsevier B.V, Amsterdam, The Netherlands
- Winterwerp J, Manning A, Martens C, de Mulder T, Vanlede J (2006) A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment. *Estuar Coast Shelf Sci* 68:195–207
- Xu F, Wang D, Riemer N (2008) Modeling flocculation processes of fine-grained particles using a size-resolved method: comparison with published laboratory experiments. *Cont Shelf Res* 28:2668–2677