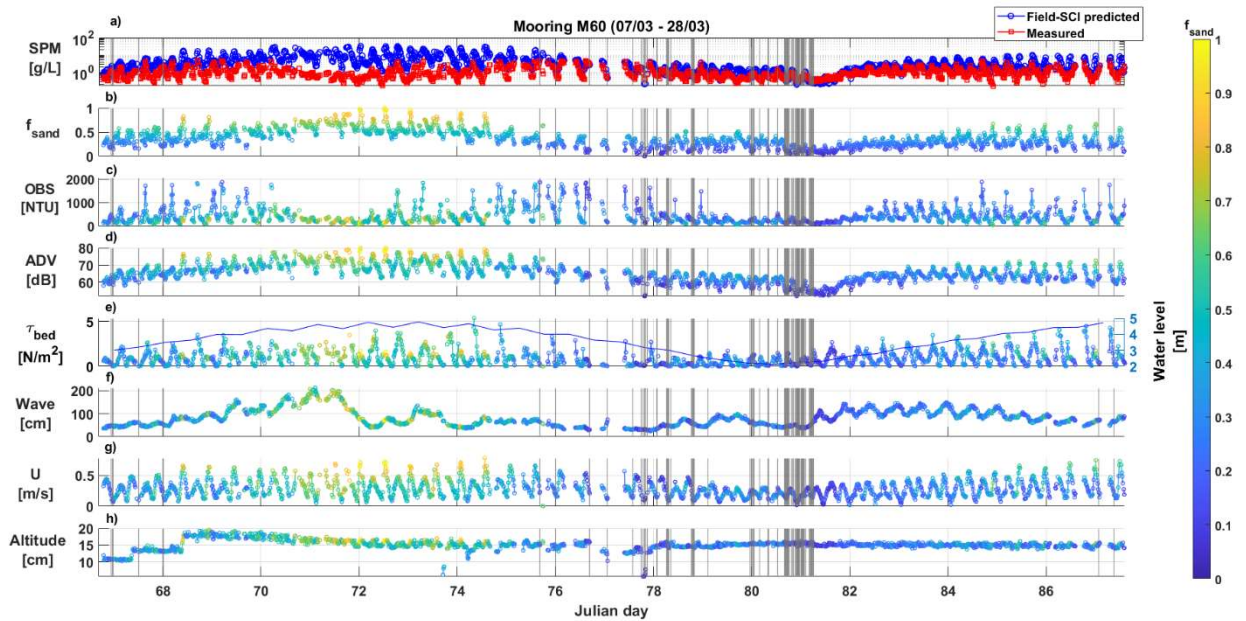


## MONitoring en MOdelling van het cohesieve sedimenttransport en evaluatie van de effecten op het mariene ecosysteem ten gevolge van bagger- en stortoperatie (MOMO)



### Activiteitsrapport (1 januari - 30 juni 2024)

Michael Fettweis, Duc Tran, Marc Knockaert, Xavier Desmit

MOMO/10/MF/202410/NL/AR/5

## Inhoudstafel

<b>1.</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1.	Voorwerp van deze opdracht	3
1.2.	Algemene doelstellingen	3
1.3.	Algemeen Onderzoek 2012-2026	4
1.4.	Onderzoek Januari 2022 – December 2024	4
1.5.	Gerapporteerde en uitgevoerde taken	8
1.6.	Publicaties	9
<b>2.</b>	<b>The near bed SPM sand/mud fraction derived from acoustic and optical sensors</b>	<b>12</b>
2.1.	Sediment Composition Index - Method	12
2.1.1.	Laboratory experiments	12
2.1.1.1.	Experimental setup and procedure	12
2.1.1.2.	Data processing and water sample	14
2.2.	Lab-derived SCI functions: Wetlabs-ADV	15
2.2.1.	Field-derived SCI functions: OBS-ADV	18
2.2.1.1.	Study site	18
2.2.1.2.	Pure mud calibration	19
2.3.	Results	19
2.3.1.	Short-term monitoring	19
2.3.2.	Medium and long-term monitoring	20
<b>3.</b>	<b>Nieuwe methode voor de analyse van transparant exopolymeric particles (TEP) in zeewater</b>	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>Referenties</b>	<b>25</b>

# 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 Joint Assessment and Monitoring Programme (JAMP) gedefinieerd tot 2021 met de publicatie van een holistisch “quality status report” van de 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 vergunningsperioden 2017-2021 kan gevonden worden in het “Vooruitgangsrapport (juni 2019) over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen” (Lauwaert et al. 2019) en het Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen” (Lauwaert et al., 2021) die gepubliceerd werden 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, om de effecten van het storten van baggerspecie te kwantificeren 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 vernieuwend onderzoek noodzakelijk om beter de effecten van het storten van baggerspecie in te schatten. Dit onderzoek is specifiek gericht op het dynamische gedrag van slib in de waterkolom en op de bodem en de interacties tussen fysische en biologische processen en zal uitgevoerd worden met behulp van modellen, in situ metingen en remote sensing data.

De specifieke acties die binnen dit onderzoek uitgevoerd worden om de algemene doelstellingen in te vullen zijn:

**1. Streven naar een efficiënter stortbeleid** door een optimalisatie van de stortlocaties.

**2. Continue monitoring van het fysisch en biogeochemisch milieu** waarbinnen de baggerwerken worden uitgevoerd (Taak 1) 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 van het onderzoek (Taak 2.1).

### 1.3. Algemeen Onderzoek 2012-2026

Het onderzoek heeft als doel om de effecten van baggerspeciestortingen op het mariene ecosysteem (fysische en biogeochemische aspecten) te onderzoeken. Hiervoor worden in situ metingen verzameld, gebruik gemaakt van remote sensing data en worden numerieke modellen ingezet. Voor de vergunningsperiode 2022-2026 worden volgende taken voorzien:

#### 1) In situ en remote sensing metingen en data-analyse

De monitoring van effecten van baggerspeciestortingen gebeurt met behulp van een vast meetstation in de nabijheid van MOW1, en met meetcampagnes met de RV Belgica (een 10-tal meetcampagnes voor het verzamelen van traject informatie, profielen en de calibratie van sensoren; en een 10-tal campagnes voor het onderhoud van het meetstation te MOW1). De geplande monitoring is gericht op het begrijpen van processen, zodoende dat de waargenomen variabiliteit en de effecten van baggerspeciestortingen in een correct kader geplaatst kunnen worden. Een belangrijk deel is daarom gericht op zowel het uitvoeren van de in situ metingen, het garanderen van kwalitatief hoogwaardige data en het archiveren, rapporteren en interpreteren ervan. Remote sensing data afkomstig van onder andere satellieten worden gebruikt om een ruimtelijk beeld te bekomen.

#### 2) Uitbouw en optimalisatie van het modelinstrumentarium

Het tijdens de voorbije jaren verbeterde en aangepaste slibtransportmodel zal verder worden ontwikkeld. Dit zal parallel gebeuren met de nieuwe inzichten die voortvloeien uit de metingen en de procesgerichte interpretatie van de metingen.

#### 3) Ondersteunend wetenschappelijke onderzoek

Monitoring gebaseerd op wetenschappelijke kennis is essentieel om de effecten van menselijke activiteiten (hier het storten van baggerspecie) te kunnen inschatten en beheren. Om te kunnen voldoen aan de door OSPAR opgelegde verplichtingen van monitoring en evaluatie van de effecten van menselijke activiteiten is het ontwikkelen van nieuwe monitorings- en modelleractiviteiten nodig. Dit houdt in dat onderzoek dat de actuele stand van de wetenschappelijke kennis weerspiegelt wordt uitgevoerd en dat de hieruit voortvloeiende nieuwe ontwikkelingen geïntegreerd zullen worden in zowel de verbetering van het modelinstrumentarium als voor het beter begrijpen van het kustnabije ecosysteem.

### 1.4. Onderzoek Januari 2022 – December 2024

Voor de periode 2019-2021 werd rekening gehouden met de aanbevelingen voor de minister ter ondersteuning van de ontwikkeling van een versterkt milieubeleid zoals geformuleerd in het "Syntheserapport over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen (2021)" 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.

## **Taak 1: In situ en remote sensing metingen en data-analyse**

### Taak 1.1 Langdurige metingen te MOW1 en W05

Sinds eind 2009 worden er continue metingen uitgevoerd te MOW1 met behulp van een meetframe (tripode). Met dit frame worden stromingen, slibconcentratie, korrelgrootteverdeling van het suspensiemateriaal, saliniteit, temperatuur, waterdiepte en zeebodem altimetrie gemeten. Om een continue tijdreeks te hebben, 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. Op de meetdata wordt een kwaliteitsanalyse uitgevoerd, zodat de goede data onderscheiden kunnen worden van slechte of niet betrouwbare data.

Veranderingen in kustnabije ecosystemen zijn dikwijls gecorreleerd met veranderingen van de helderheid van het water of de concentratie aan particulier suspensiemateriaal (SPM) en dus ook met het gehalte aan particulier organisch materiaal. De zone waar de invloed van het minerale en kustnabij suspensiemateriaal overgaat in een zone met dominantie van organisch suspensiemateriaal van mariene origine is van bijzonder belang. De monitoring wordt uitgebreid met de verankering van een meetboei in locatie W05 (51°N 24.96', 2°E 48.7'). W05 is één van de drie monitoringspunten waar waterstalen en sensormetingen maandelijks worden uitgevoerd.

### Taak 1.2 Calibratie van sensoren tijdens in situ metingen

Tijdens meetcampagnes met de R/V Belgica zullen een voldoende aantal 13-uursmetingen uitgevoerd worden met als hoofddoel het kalibreren van optische of akoestische sensoren en het verzamelen van verticale profielen. De metingen zullen plaatsvinden in het kustgebied van het BCP (MOW1, W05). De optische metingen (Optical Backscatter Sensor) zullen gekalibreerd worden met de opgemeten hoeveelheid materie in suspensie (gravimetrische bepalingen na filtratie) om te komen tot massa concentraties

### Taak 1.3 Bio-geo-chemische monitoring van het SPM (BGCMonit)

SPM bestaat uit minerale deeltjes van fysicochemische (b.v. kleimineralen, kwarts, veldspaat) en biogene oorsprong (b.v. calciet, aragoniet, opaal), levend (bacteriën, fyto- en zoöplankton) en niet-levend organisch materiaal (b.v. fecale pellets, detritus, exopolymeren), en partikels van menselijke oorsprong (microplastiek). Het SPM kan door hydrofobe organische pollutanten of metalen gecontamineerd zijn. De samenstelling en concentratie van het SPM inclusief de hydrofobe pollutanten verandert in functie van de tijd en de locatie. Deze variaties worden beïnvloed door de interacties tussen de fysische processen (getij, meteo, klimaat), biologische cycli (algenbloei), chemische processen (koolstofcyclus) en menselijke activiteiten (aanvoer van nutriënten, bagger- en stortactiviteiten, offshore constructies). De samenstelling van het particulier en opgelost suspensiemateriaal zal bepaald worden tijdens meetcampagnes met de RV Belgica tijdens een 10-tal campagnes per jaar. Naast de totale hoeveelheid aan SPM worden ook de concentraties aan verschillende organische bestanddelen (POC, PON, TEP, chlorofyl en phaeofytine) bepaald. De opgeloste stoffen zijn inorganische nutriënten, DOC, DIC en alkaliniteit. Stalen van suspensiemateriaal zullen genomen worden met de centrifuge om de samenstelling ervan te bepalen.

### Taak 1.4: Archivering en verwerking van de data

De meetdata worden gearchiveerd en er wordt een kwaliteitsanalyse uitgevoerd, zodat de goede data onderscheiden kunnen worden van slechte of niet betrouwbare data. Slechte data kunnen bv optreden doordat het instrument slecht heeft gewerkt en verkeerd werd ingesteld. Niet betrouwbare data zijn typisch geassocieerd met bv biofouling. De data en metadata worden gearchiveerd. De metingen worden verwerkt en geïnterpreteerd. En

zullen dienen als basis voor het verder gebruik bij wetenschappelijke vraagstellingen.

## **Taak 2: Uitbouw en optimalisatie van het modelinstrumentarium**

### Taak 2.1: Opstellen van een slibtransportmodel voor het BCP met Coherens V2

Een slibtransportmodel zal worden geïmplementeerd met de software Coherens V2. De software laat toe om rekening te houden met gemengde sedimenten en dus met de interactie tussen zand en slib en laat morfologische berekeningen toe door een verbeterde implementatie van het schema voor het massabehoud en gebruik van lagen met gemengde sedimenten. Verdere aanpassingen en verbeteringen aan het model zullen worden uitgevoerd, meer bepaald:

- Kritische bodemschuifspanning voor erosie van gemengde sedimenten,
- Formulering voor de bodemschuifspanning,
- Koppeling van het model met het TILES voxel model voor een betere voorstelling van de bodemkarakteristieken.

### Taak 2.2: Validatie van het slibtransportmodel voor het jaar 2013 (stortproef)

Een eerste toepassing van het model kan het jaar 2013 zijn, waarin de terreinproef voor alternatieve stortplaats alsook een intensieve monitoring plaatsvond. Deze laatste zal gebruikt worden voor de validatie van het model. Verder zal het model vergeleken worden met andere modellen van het BCP.

### Taak 2.3: Optimalisatie baggerwerken

Een operationeel stortmodel zal worden opgezet in overleg met aMT. Dit model zal geïntegreerd worden in de binnen BMM-OD Natuur 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. Een eerste test hiervoor werd uitgevoerd in Van den Eynde en Fettweis (2011) waarin werd aangetoond dat door een optimale positie te kiezen voor het storten van baggerspecie in functie van de meteorologische omstandigheden, een vermindering van de aanslibbing van de vaargeulen en haven van Zeebrugge kan worden verwacht.

Het model zal worden gebruikt voor de optimalisatie van de baggerwerken. Verschillende simulaties kunnen worden uitgeoefend waarbij de invloed van de verschillende mogelijke stortplaatsen kunnen worden geëvalueerd.

### Taak 2.4: Flocculatiemodel

De inzichten die voortvloeien uit de in situ data (Taken 1.4, 3.1 en 3.2) zullen worden geïntegreerd in een numeriek model dat het verband tussen SPM, TEP en flocculatie langsheen temporele (getij, seizoenen) en geografische (waterkolom, onshore-offshore) schalen combineert. Het model zal worden opgezet als 1D verticaal en zal gekoppeld worden met het 2 klassen populatie model van Lee et al. (2011). Hierdoor zal de verticale verdeling van de minerale en de organische fractie van het SPM en hun interactie kunnen worden voorspeld.

## **Taak 3: Ondersteunend wetenschappelijk onderzoek**

Monitoring gebaseerd op wetenschappelijke kennis is essentieel om de effecten van menselijke activiteiten (hier het storten van baggerspecie) te kunnen inschatten en beheren. Om te kunnen voldoen aan de door OSPAR opgelegde verplichtingen van monitoring en evaluatie van de effecten van menselijke activiteiten is een verdere implementatie van huidige en het ontwikkelen van nieuwe monitoringsactiviteiten nodig. Meer specifiek gericht op de activiteit 'storten van baggerspecie' worden hier – wat het fysische milieu betreft - turbiditeit, samenstelling van de zeebodem, bathymetrie en

hydrografische condities beoogt. Deze taak speelt hierop in door de ontwikkeling en de implementatie van nieuwe tools die de actuele stand van de wetenschappelijke kennis weerspiegelen teneinde de mathematische modellen te optimaliseren en verfijnen.

### Taak 3.1: SPM samenstelling - minerale fractie

Door de aanwezigheid van gemengde sedimenten in de zeebodem (zand en slib) zal tijdens sterke stroming en of hoge golven ook een gemengde minerale fractie in suspensie komen. Dit heeft twee consequenties voor monitoring. Ten eerste reageren akoestische en optische sensoren verschillend op zand en slib, zodat de verzamelde tijdreeksen een grotere onnauwkeurigheid hebben tijdens zo'n momenten (Fugate & Friedrichs, 2002; Baschek et al., 2017; Schwarz et al., 2017; Fettweis et al., 2019). Ten tweede bevatten zandkorrels geen mineraal-gebonden organisch materiaal en stalen genomen tijdens dit soort momenten kunnen dus de onzekerheid van het SPM-POM model vergroten. Indien er geen rekening gehouden wordt hiermee zal de SPM concentratie onder- of overschat worden alsook de afgeleid organische fracties. Doel is om de zand en slibfractie te identificeren door gebruik te maken van innovatieve meettechnieken (Pearsons et al., 2021) die optische en akoestische sensoren combineren. Het ultieme doel is om te komen tot tijdreeksen van zand- en slibconcentratie te MOW1.

Uit visuele inspecties van de bodemsamenstelling te MOW1 tijdens de laatste jaren blijkt dat het sediment zandiger is geworden. De hypothese is, dat dit verband houdt met erosie van de vooroever na de strandopspuitingen die de voorbije jaren werden uitgevoerd. Aan de hand van de boven aangehaalde methode zal nagegaan worden of er een trend naar zandaanrijking kan vastgesteld worden in de omgeving van MOW1.

### Taak 3.2: SPM samenstelling - organische fractie

Het semi-empirisch POM-SPM model (Fettweis et al., 2022) zal verfijnd worden met de nieuwe data verzameld in taak 1.3. Hierdoor zal de inschatting van de minerale en de vers en mineraal-gebonden organische fractie nauwkeuriger kunnen worden gedaan.

Op basis van dit POM-SPM model kan de samenstelling van het suspensiemateriaal (minerale fractie, vers en mineraal gebonden POC, PON en TEP) worden berekend voor de tijdreeksen te MOW (vanaf 2005) en voor de satellietdata (vanaf 1997). Dit zal toelaten om de geografische en temporele variabiliteit van de transitiezone tussen het kustgebonden turbiditeitsmaximum en de offshore wateren te kwantificeren. De dynamica van het suspensiemateriaal in beide gebieden is verschillend, wat consequenties heeft naar de modellering ervan. Verder kan uit de lange tijdsreeksen gekeken worden of het gebruik van de stortplaatsen, meer bepaald S1, geleid heeft tot een zeewaartse uitbreiding van het turbiditeitsmaximum.

### Taak 3.3: Trends in SPM concentratie

Om significante statistische trends te kunnen documenteren in SPM concentratie over de laatste decades, zijn metingen nodig die een lange tijdspanne omvatten en een groot gebied omvatten. Deze data zijn helaas niet beschikbaar. Wat er wel beschikbaar is zijn de tripode metingen te MOW1 (vanaf 2005) en op andere locaties, de puntmetingen verzameld met onderzoeksschepen in het Belgisch Deel van de Noordzee sinds ongeveer 1970 (cf. Belspo 4DEMON project) en satellietbeelden (vanaf 1997). De tripode data geven de temporele variabiliteit weer, maar zijn heel beperkt wat ruimtelijke spreiding betreft. De 4DEMON en satellietbeelden zijn beschikbaar over een lange periode en over een groot gebied, maar kunnen de temporele schaal niet oplossen. Om deze heterogene datasets samen te kunnen gebruiken, zal gekeken worden naar de statistische verschillen tussen de datasets en naar een manier om deze te combineren. Doel is om mogelijke trends in de SPM concentratie te identificeren en deze te linken aan natuurlijke veranderingen of aan menselijke activiteiten.

De trendanalyse van de historische data zal de basis vormen om de verandering van de SPM concentratie in de nabijheid van de nieuwe stortplaats ZBW te kwantificeren.

#### **Taak 4: Rapportage en outreach**

Om de zes maanden zal er een activiteitenrapport worden opgesteld dat de onderzoeksresultaten beschrijft. Jaarlijks wordt er een 'factual data' rapport opgesteld van de verzamelde meetgegevens. De resultaten uit het onderzoek zullen tevens worden voorgesteld op workshops, conferenties en in de wetenschappelijke literatuur.

#### **1.5. Gerapporteerde en uitgevoerde taken**

##### Periode Januari 2022 - Juni 2022

- Taak 1.1: De meetreeks te MOW1 werd verdergezet.
- Taak 1.2: Calibratie van OBS sensoren werd uitgevoerd tijdens RV Begica campagnes 2022/01, 2022/03, 2022/06, 2022/09 en 2022/14.
- Taak 3.1: De akoestische en optische sensoren werden gebruikt om veranderingen in sedimentsamenstelling te zien te MOW1. Eerste resultaten worden getoond in hoofdstuk 2.
- Taak 3.2: Intensieve bio-geochemische monitoring werd uitgevoerd te MOW1, W05 en W08 tijdens RV Belgica campagnes 2022/01, 2022/03, 2022/07, 2022/11, 2022/14). Eerste resultaten worden besproken in hoofdstuk 3.

##### Periode Juli 2022 - December 2022

- Taak 1.1: De meetreeks te MOW1 werd verdergezet.
- Taak 1.2: Calibratie van OBS sensoren werd uitgevoerd tijdens RV Begica campagnes 2022/17, 2022/19, 2022/21, 2022/24, 2022/28 en 2022/32.
- Taak 2.4: De interactie van phytoplankton en SPM resulteert in de vorming van grotere vlokken met hogere valsnelheden. In een labo experiment werd de flocculatie bestudeerd tussen klei en phytoplankton deeltjes. Een twee-classes flocculatiemodel werd opgesteld om de experimentele data kwantitatief te analyseren, zie paper in appendix 1.
- Taak 3.2: Intensieve bio-geochemische monitoring werd uitgevoerd te MOW1, W05 en W08 tijdens RV Belgica campagnes 2022/17, 2022/19, 2022/21, 2022/24, 2022/28 en 2022/32). Eerste resultaten worden besproken in hoofdstuk 3.
- Taak 3.3: Het informatieverlies van niet continue tijdreeksen werd bepaald. Dit zal de basis vormen voor de trendanalyse in SPM concentratie over een langere periode, zie hoofdstuk 2.

##### Periode Januari 2023 - Juni 2023

- Taak 1.1: De meetreeks te MOW1 werd verdergezet.
- Taak 1.2: Calibratie van OBS sensoren werd uitgevoerd tijdens RV Begica campagnes 2023/01, 2023/04, 2023/06, 2023/08 en 2023/10.
- Taak 2.4: Een 2D horizontaal flocculatiemodel werd gevalideerd voor het BCP (zie appendix 3). De resultaten tonen het nut van een flocculatiemodel voor grootschalig SPM transport modellering. Tegelijkertijd onderstrepen ze tekortkomingen die het gevolg zijn van de transitie tussen kust en offshore en die zich uiten in verschillende SPM dynamica (zie ook hoofdstuk 2). Dit dient opgenomen te worden in toekomstige modelleringen.
- Taak 3: De resultaten beschreven in hoofdstuk 2 hebben mogelijks consequenties voor het storten van baggerspecie. Zij tonen immers aan dat er een duidelijk verschil tussen een kustnabije zone die gedomineerd wordt door minerale deeltjes en een offshore zone die vooral uit organische deeltjes bestaat. Er is geen (of weinig) uitwisseling tussen deze twee zones, zie hoofdstuk 3.
- Taak 3.1: Analyses werden uitgevoerd gebaseerd op akoestische en optische sensoren van de tripode te MOW1 om de slib en zand fractie van het SPM te bepalen.
- Taak 3.2: De biogeochemische monitoring werd verdergezet te MOW1, W05 en W08 tijdens RV Belgica campagnes 2023/01, 2023/04, 2023/06, 2023/08 en 2023/10.



### Periode Juli 2023 – December 2023

- Taak 1.1: De meetreeks te MOW1 werd verdergezet.
- Taak 1.2: Calibratie van OBS sensoren werd uitgevoerd tijdens RV Belgica campagnes 2023/17 en 2023/25.
- Taak 1.3: De biogeochemische monitoring werd verdergezet te MOW1, W05 en W08 tijdens RV Belgica campagnes 2023/17 en 2023/25.
- Taak 2.4: De interactie tussen phytoplankton en minerale partikels werd verdergezet, resultaten werden voorgesteld op de INTERCOH conferentie (zie Appendix 1).
- Taak 3.1: De analyses gebaseerd op akoestische en optische sensoren van de tripode te MOW1 om de slib en zand fractie van het SPM te bepalen, werden verdergezet. Eerste resultaten werden op de INTERCOH conferentie voorgesteld (zie Appendix 1)
- Taak 3.2: De verandering in samenstelling van het SPM werd bestudeerd over de waterkolom, conclusies met betrekking tot de gehele waterkolom in turbide gebieden worden besproken in hoofdstuk 2 (en Appendices 2-12) en werden voorgesteld op de INTERCOH conferentie (zie Appendix 1).

### Periode Januari 2024 – Juni 2024

- Taak 1.1: De meetreeks te MOW1 werd verdergezet.
- Taak 1.2: Calibratie van OBS sensoren werd uitgevoerd tijdens RV Belgica campagnes 2024/01 en 2024/03.
- Taak 1.3: De biogeochemische monitoring werd verdergezet te MOW1, W05 en W08 tijdens RV Belgica campagnes 2024/01 en 2024/03.
- Taak 3.1: De analyses gebaseerd op akoestische en optische sensoren van de tripode te MOW1 om de slib en zand fractie van het SPM te bepalen worden besproken in hoofdstuk 2 voor de langdurige meetreeks te MOW1. De mineralogische samenstelling van het SPM werd bepaald in 4 locaties (MOW1, W03, W05 en W08).
- Taak 3.2: Er werd gewerkt aan een klimatologie van de biogeochemische parameters (particulair en opgelost) langsheen de kust-offshore gradiënt.

## 1.6. Publicaties

Hieronder wordt een overzicht gegeven van publicaties met directe betrokkenheid van het KBIN waar resultaten en data uit het MOMO project in worden gebruikt.

### Activiteits-, Meet- en Syntheserapporten

- Fettweis M, Tran D, Knockaert M, Desmit X. 2024. MOMO activiteitsrapport (1 januari - 30 juni 2024). BMM-rapport MOMO/10/MF/202410/NL/AR/5, 27pp.
- Fettweis M, Silori S, Desmit X. 2024. MOMO activiteitsrapport (1 juli - 31 december 2023). BMM-rapport MOMO/10/MF/202403/NL/AR/4, 29pp + app.
- Fettweis M, Desmit X. 2023 MOMO activiteitsrapport (1 januari - 30 juni 2023). BMM-rapport MOMO/10/MF/202310/NL/AR/3, 28pp + app.
- Fettweis M, Desmit X. 2023 MOMO activiteitsrapport (1 juli – 31 december 2022). BMM-rapport MOMO/10/MF/202303/NL/AR/2, 27pp + app.
- Fettweis M, Baeye M, Desmit X. 2022 MOMO activiteitsrapport (1 januari – 30 juni 2022). BMM-rapport MOMO/10/MF/202210/NL/AR/1, 21pp + app.

### Thesis

- Bryse F. 2024. Optimalisatie en validatie van de 'Multiskan Skyhigh spectrofotometer' voor analyse van transparante exopolymeerpartikels (TEP) in zeewater. VIVES Hogeschool Campus Roeselare, Bachelor thesis in de agro- en biotechnologie, 55pp + app.

### Conferenties/Workshops

- Fettweis M. 2024. A universe of particles in a sip of water: Composition, concentration and size along the land-ocean transition. Geo-Colloquium University Kiel, 18 June, Kiel (Germany).
- Fettweis M. 2024. Jerico Research Infrastructure @ RBINS. Conference on EU Research Infrastructures – Belgian Presidency EU2024. 4-5 June, Brussels (Belgium).
- Desmit X, Terseleer Lillo N, Fettweis M, Kallend A, Sabbe K, Dujardin J, De Rijcke M. 2024

- Impact of plankton-mineral interactions on the carbon cycle in the Southern North Sea. Particles in Belgium workshop, 3 May, VLIZ, Ostend.
- Silori S, Fettweis M, Desmit X, Terseleer N, Riethmüller R, Schartau M. 2024. Vertical profiles of Chlorophyll and SPM at seasonal and tidal scales in a turbid, well-mixed coastal zone. Particles in Belgium workshop, 3 May, VLIZ, Ostend.
- Tran D, Fettweis M. 2024 Characterizing the composition of sand and mud suspension in coastal and estuarine environments using combined optical and acoustic measurements. Particles in Belgium workshop, 3 May, VLIZ, Ostend.
- Fettweis M, Delhaye L, Lee BJ, Riethmüller R, Schartau M, Silori S, Desmit X. 2023. Vertical variations of suspended particle composition reflect particle dynamics. INTERCOH, 18-22 September, Inha University, Incheon (Korea).
- Ho QN, Fettweis M, Hur J, Lee SD, Lee BJ. 2023. The role of microalgae in cohesive sediment flocculation: Insights from stochastic modeling and laboratory experiments. INTERCOH, 18-22 September, Inha University, Incheon (Korea).
- Huynh TT, Fettweis M, Lee BJ. 2023. Application of an 1-DV TCPBE model with Bayesian calibration to diagnose the flocculation potential in the laboratory experiments and field measurement. INTERCOH, 18-22 September, Inha University, Incheon (Korea).
- Pham TTTP, Ho QN, Lee SD, Fettweis M, Lee BJ. 2023. Isolation and characterization of the molecular composition of algal dissolved organic matter. INTERCOH, 18-22 September, Inha University, Incheon (Korea).
- Tran D, Desmit X, Verney R, Fettweis M. 2023. Application of sediment composition index to predict suspended particulate matter concentration in the North Sea. INTERCOH, 18-22 September, Inha University, Incheon (Korea).
- Kallend A, Dujardin J, De Rijcke M, Fettweis M, Sabbe K, Vyverman W, Desmit X. 2023. Interactions between phytoplankton, marine gels and suspended particulate matter in a dynamic, shallow coastal system before and during the phytoplankton spring bloom. ASLO Aquatic Sciences Meeting, 4–9 June, Palma de Mallorca (Spain).
- Schartau M, Fettweis M, Desmit X, Terseleer N, Riethmüller R. 2023. From brown to blue water: Unraveling spatio-temporal variations in organic matter composition of suspended particulate matter. ASLO Aquatic Sciences Meeting, 4–9 June, Palma de Mallorca (Spain).
- Baeye M, Delhaye L, Fettweis M. 2022. Acoustic and optical turbidity response to altering particle size distribution during extreme events. EuroSea/OceanPredict workshop, 29 June – 1 July, Exeter (UK).
- Fettweis M, Desmit X, Terseleer N, Parmentier K, Van der Zande D, Schartau M, Lee BJ, Riethmüller R. 2022. The characteristics of the organic matter in biomineral flocs. Ocean Science Meeting, 24 February – 4 March, Honolulu (USA).
- Peer reviewed artikels
- Fettweis M, Silori S, Adriaens R, Desmit X. Clay minerals and the stability of organic carbon in suspension on the North Sea shelf. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (September 2024).
- Silori S, Desmit X, Schartau M, Terseleer N, Riethmüller R, Fettweis M. Interaction of phytoplankton and mineral particles in a turbid coastal zone: How important is water clarity? *Journal of Geophysical Research Ocean* (July 2024)
- Desmit X, Schartau M, Terseleer N, Van der Zande D, Riethmüller R, Fettweis M. 2024. The transition between coastal and offshore areas in the North Sea unraveled by the suspended particle composition. *Science of the Total Environment* 915, 169966. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.169966
- Escobar S, Bi Q, Fettweis M, Monbaliu J, Wongsoredjo S, Toorman E. 2023. A 2DH flocculation model for coastal domains. *Ocean Dynamics* 73, 333-358. doi:10.1007/s10236-023-01554-y
- Fettweis M, Riethmüller R, Van der Zande D, Desmit X. Water quality monitoring in coastal seas: How significant is the information loss of patchy time series? *Science of the Total Environment* 873, 162273. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.162273.
- Fettweis M, Schartau M, Desmit X, Lee BJ, Terseleer N, Van der Zande D, Parmentier K, Riethmüller R. 2022. Organic matter composition of biomineral flocs and its influence

- on suspended particulate matter dynamics along a nearshore to offshore transect. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 126, e2021JG006332. doi:10.1029/2021JG006332
- Ho NQ, Fettweis M, Hur J, Desmit X, Kim JI, Jung DW, Lee SD, Lee S, Choi YY, Lee BJ. 2022. Flocculation kinetics and mechanisms of microalgae- and clay-containing suspension in different microalgae growth phases. *Water Research* 226, 119300. doi:10.1016/j.watres.2022.119300
- Ho QN, Fettweis M, Spencer KL, Lee BJ. 2022. Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*. 118147. doi:10.1016/j.watres.2022.118147

## 2. The near bed SPM sand/mud fraction derived from acoustic and optical sensors

The acoustic and optical sensor output depends on variability of the inherent optical and acoustical properties of the suspended particulate matter (SPM), e.g. Slade et al. (2011), Woźniak et al. (2011), Sahin et al. (2017). Optical sensors, such as OBS or nephelometers, rely on the interaction of SPM with light at a given wavelength through absorption and scattering. For long-term measurements, the attenuation or the scattering at a given angle are mainly used to obtain the SPM concentrations. Some acoustics devices commonly used in coastal areas, such as ADVs or ADCPs are primarily designed for current velocity measurement, while others (ABS) are specifically designed for measuring SPM concentration at a single point (Guerrero & Di Federico 2018) or in a vertical profile (Hay & Sheng 1992). Analogously to optical devices, the emitted acoustic wave, at a given frequency, interacts with particles in suspension while propagating in the medium and are backscattered to the receivers (Thorne & Hanes 2002). The recorded volume backscattering strength ( $S_v$ , in dB) is a proxy of the SPM concentration, but is also strongly modulated by SPM features such as size, density and shape, depending on the acoustic wavelength. Similar the output of optical sensors is dependent on particles shape (Slade et al., 2013), particles size and density, refractive index (Mishchenko et al. 2002; Boss et al. 2004), and colour (Sutherland et al., 2000; Hatcher et al., 2000; Bright et al., 2018).

The fact that both types of sensor have different sensitivities to particle characteristics can be used to investigate the composition (mud-sand) of the SPM. The objectives of this study is to apply the Sediment Composition Index method to a one year time-series at MOW1.

### 2.1. Sediment Composition Index - Method

The concept and application of Sediment Composition Index (SCI), defined as  $SCI = 10\log_{10}(OBS) - ADV$ , were introduced and verified through a series of laboratory experiments and in situ measurements in (Pearson et al., 2021; Tran et al., 2024). This section briefly summarizes how the SCI functions were obtained from laboratory experiments and then calibrated to make them applicable to field monitoring.

#### 2.1.1. *Laboratory experiments*

##### 2.1.1.1. *Experimental setup and procedure*

Tran et al. (2024) conducted 54 laboratory experiments, the Quantification set  $Q_{set}$ , to derive SCI functions for 30 pairs of optical wavelengths and acoustic frequencies based on different mixtures of Bentonite and two sand particle sizes, sand S1 with  $d_{50} = 110 \mu\text{m}$  and sand S2 with  $d_{50} = 240 \mu\text{m}$ , respectively. The DEXMES tank (Dispositif EXperimental de quantification des Matières En Suspension), a novel device which was particularly designed for SPM experiments (Tran et al., 2021), was used for all experiments. The DEXMES tank provides sufficient volume, approximately  $1 \text{ m}^3$ , for several sensors to function concurrently (Figure 2.1). In all experiments, the impeller was set at speed of 175 rotations per minute to provide high turbulent shear rate  $G = 30 - 100 \text{ s}^{-1}$  in the tank (Tran et al., 2021). Table 2.1 shows five ratios of sand/mud fractions,  $f_{sand}$ , i.e., pure Bentonite ( $f_{sand} = 0\%$ ), pure sand ( $f_{sand} = 100\%$ ), and three intermediate mixtures: 75, 50, 25%. Hereafter, the suffixes 1 and 2 refer to the sand particle sizes of S1 ( $d_{50} = 110 \mu\text{m}$ ) and S2 ( $d_{50} = 240 \mu\text{m}$ ), respectively. The suffixes  $_{100}$ ,  $_{75}$ ,  $_{50}$ ,  $_{25}$ ,  $_0$  refer to the fraction of sand in suspension, or  $f_{sand}$ . For example,  $Q1_{75}$  indicates the experiment in which the suspension consists of sand S1 and Bentonite with the ratio of sand/mud,  $f_{sand}$ , is 75%. For each SPM content condition, 6

concentrations were tested stepwise from 15 to 200 mg/L (Table 2.1).

Table 2.1: Experimental conditions and procedure of the quantification set,  $Q_{set}$ . S1: sand particle size  $d_{50} = 110 \mu\text{m}$ . S2: sand particle size  $d_{50} = 240 \mu\text{m}$ . The notation 1 or 2 indicates sand S1 or S2 in the mixture.

C (mg/l)	Sand/Bentonite fraction ( $f_{\text{sand}}$ )			Task	Time (min)
	100	75, 50, 25	0		
15	pure mud	mixed	pure sand	1 Bentonite stabilized in a beaker	0-30
25				2 Bentonite stabilized in DEXMES	30-60
50	Q1_0	Q1_75,50,25	Q1_100	3. Introduction of sand in DEXMES	55
100	or	or	or	4 Data recording	60-70
150	Q2_0	Q275,50,25	Q2_100	5 Water sampling	71-73
200				6 New sediment for next step	repeat tasks

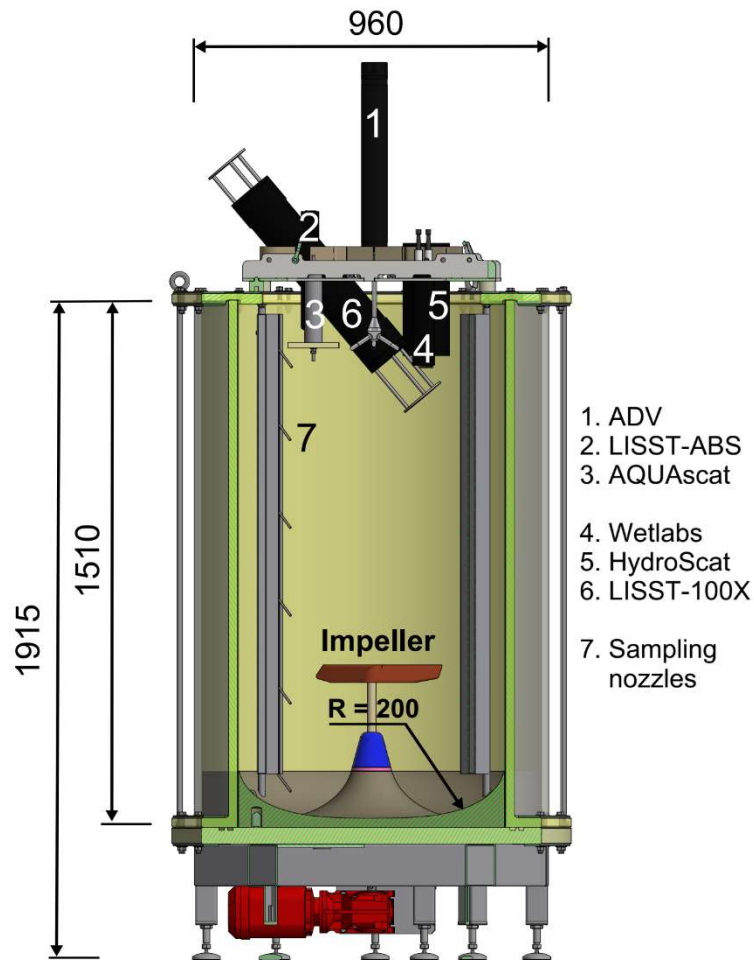


Figure 2.1: Experimental setup of the DEXMES tank (not to scale). Measuring volumes of all sensors were set at similar level as of water sampling nozzle,  $\approx 25\text{-}26 \text{ cm}$  below the water surface.

Table 2.2 summarizes all the optical and acoustic sensors used in this study. Specifically, the sensors are HydroScat-4 with four channels 852, 620, 532, 420 nm, Wetlabs\_FLNTU 700 nm, Laser In-Situ Scattering and Transmissometer - Acoustic Backscatter Sensor (LISST-ABS) 8 MHz, Nortek Vector Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) 6 MHz, AQUAScat-1000R with four transducers 4, 2, 1, and 0.5 MHz. In this study, the sensors were setup so that the measuring volume of each sensor was at a similar level, around 26-33 cm below the water

surface (Figure 2.1). We consider each transducer of the AQUAscat-1000R and each channel of the HydroScat-4 as individual sensors (Table 2.2).

In general, the tank was filled with fresh water and left overnight to reach room temperature. An experiment was started with 30 min of high shearing to remove bubbles inside the tank. For mud, Bentonite was stabilized in suspension for 30 min in a 5 L beaker with a mixer before being introduced into DEXMES. Next, a 30 min mixing was applied to provide enough time for Bentonite particles, of the lowest concentration  $C = 15 \text{ mg/L}$ , to reach equilibrium floc size. Then, sand was added to the DEXMES tank, 5 min before data collection, to evenly distributed throughout the tank and reach the targeted concentration. At the end of the 10 min recording step, one 1 L water sample was collected using a nozzle located at  $\approx 25 \text{ cm}$  below the water surface and 12 cm away from the wall of the tank. This procedure was repeated for all concentration levels (Table 2.1 and Figure 2.1).

*Table 2.2: A summary of working conditions of all sensors used in this study. Data from LISST-100X (not shown here) is used to verify the particle size distribution in suspension, but is not paired with other sensors during the data analysis process.*

	Sensor	Frequency (MHz)	Sampling frequency (Hz)	Output units	Notation
		Wavelength(nm)			
Acoustic	LISST-ABS	8	1	mg/l	A <sub>8</sub>
	ADV Vector	6	32	SBR-dB	A <sub>6</sub>
	AQUAscat 1000 (4MHz)	4	32	count	A <sub>4</sub>
	AQUAscat 1000 (2MHz)	2	32	count	A <sub>2</sub>
	AQUAscat 1000 (1MHz)	1	32	count	A <sub>1</sub>
	AQUAscat 1000 (0.5MHz)	0.5	32	count	A <sub>0.5</sub>
Optical	HydoScat-4 (Ch 4)	852	1	m <sup>-1</sup>	O <sub>852</sub>
	Wetlabs_FLNTU	700	1	count --> NTU	O <sub>700</sub>
	HydoScat-4 (Ch 3)	620	1	m <sup>-1</sup>	O <sub>620</sub>
	HydoScat-4 (Ch 2)	532	1	m <sup>-1</sup>	O <sub>532</sub>
	HydoScat-4 (Ch 1)	420	1	m <sup>-1</sup>	O <sub>420</sub>

#### 2.1.1.2. Data processing and water sample

All sensors started recording in real-time, continuous mode before any sediment was introduced into the tank until the last water sample was collected. For each examined condition, 10 min data was averaged and utilized in the analysis (Table 2.1). Preliminary experiments suggested that the numbers of spike/bad data points are negligible. Hence, there was no further transformation and/or correction of the output signals, except for Wetlabs\_FLNTU where the output signal was converted from count to NTU as recommended by the Sea-Bird Scientific:  $\text{NTU} = 0.0484 (\text{count} - 50)$ . It is also noted that due to the nature of signal recording mechanisms, the relationships of ADV (dB) signal and SPMC or optical signal is a log-linear. Hence, in order to pair with ADV signals the concentration or optical data is converted via a  $10\log_{10}(\ )$  function (Hoitink & Hoekstra 2005; Salehi & Strom 2011; Chmiel et al. 2018).

There are a few notes regarding water sample data. First, there were only two types of sediment, Bentonite and either S1 or S2, therefore we did not separate sand/mud in quantifying  $f_{\text{sand}}$  and total concentration. Rather, the fraction and concentration of S1 or S2 are acquired by subtracting the  $f_{\text{sand}}$  from the total concentration. This is because Bentonite never deposited within the DEXMES tank. Hence, what have left on the glass fiber filter must

contain Bentonite and sand. Since we know exactly how much Bentonite we put into the tank and it always stayed in suspension, we assumed that mass of Bentonite should be constant in each run. Any changes in terms of concentration and/or fraction of sand/mud were due to the deposition of sand. Therefore, we subtract the amount of mud from the total mass to obtain  $f_{\text{sand}}$ . Second, mass concentration data showed that the true values of concentration for Bentonite and sand S1 are 5-10% lower than the target values or sometimes even 40%, for S2. This is because 1) the turbulence in the tank was not high enough to keep all the sand in suspension, particularly S2 and 2) we later found that the mesh size of the glass fiber filter (0.7  $\mu\text{m}$ ) was slightly bigger than the smallest particle sizes of the clay. Subsequently, for simplicity and convenience, the term  $f_{\text{sand}}$ , e.g., 100, 75, 50, 25, and 0%, actually refers to a very loose range, and sometimes even overlap, of sand/mud fraction, rather than indicating an absolute number. For example,  $f_{\text{sand}} = 75\%$  implies a range of  $f_{\text{sand}}$  from around 65 to 85% instead of exact 75%. Even without reaching exact targets, we still have a broad range representative of sand/mud-dominant environments. All calculations, data analysis, and figures are based on the true values of  $f_{\text{sand}}$ , mass of Bentonite, S1, and S2 in the mixture and total concentrations obtaining from physical water samples.

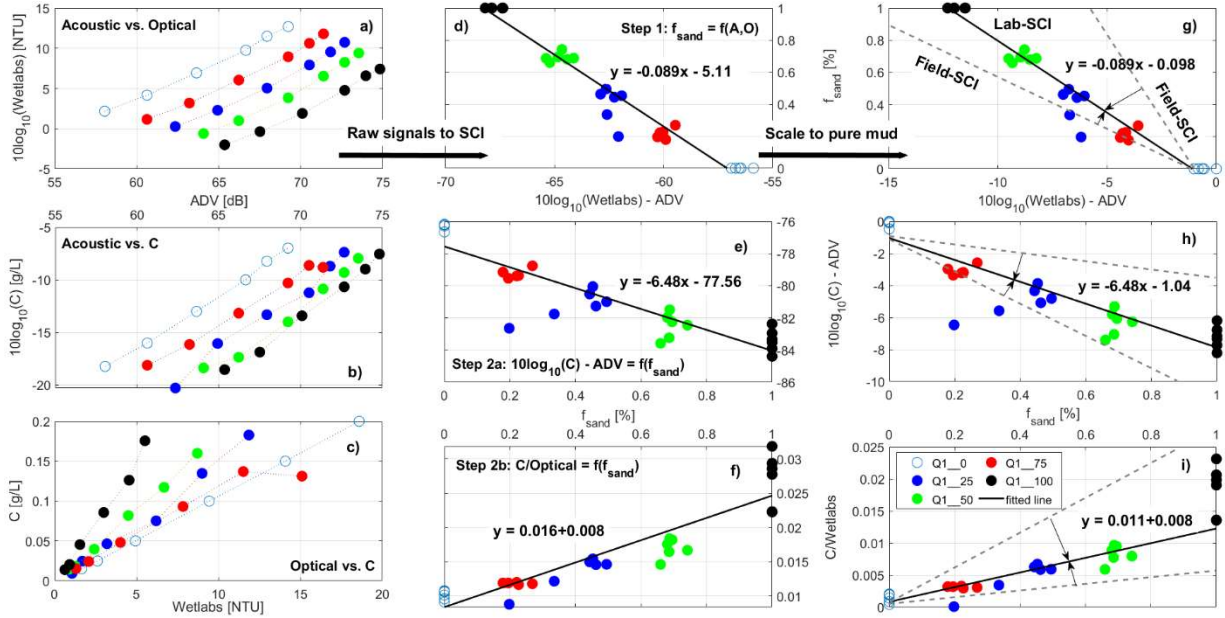


Figure 2.2: An example of relationships between Wetlabs, ADV,  $f_{\text{sand}}$  and total concentrations,  $C$ . Only quantification set for sand S1 (Q1) data were used in this demonstration. Step 1, 2a, 2b: please refer to equations 1, 2, and 3. g,h,i) pure mud calibrations are to find a correction coefficient to make lab-SCI functions (solid black lines) applicable to field-SCI functions (gray dashed lines).

## 2.2. Lab-derived SCI functions: Wetlabs-ADV

In Pearson et al. (2021) and Tran et al. (2024), we tested and validated a new concept, the Sediment Composition Index, in which the fraction of sand/mud in suspension could be derived from optical and acoustic measurements, i.e.,  $\text{SCI} = 10\log_{10}(\text{Wetlabs}_{\text{signal}}) - \text{ADV}_{\text{signal}}$ . The present paper further develops the SCI concept, aiming to quantify sand/mud fraction and the SPM concentration. This section uses laboratory experiment data from  $Q_{\text{set}}$  to demonstrate how  $f_{\text{sand}}$  and total concentration can be obtained from one pair of raw, uncalibrated optical (Wetlabs) and acoustic (ADV) signals. Then, based on the lab-derived-SCI functions the field-SCI functions are developed for in situ, long-term monitoring.

Figure 2.2 reveals the relationships of signal-signal and signal-concentration from one

pair of acoustic/optical sensors, Wetlabs\_FLNTU and ADV. Three observations are in order. First, in Figure 2.2a, d, g (the left column) pure sand (Q1\_100) and pure mud (Q1\_0) conditions are always the boundaries of mixed sand/mud conditions and lean toward the acoustic/optical axes, confirming that acoustic/optical sensors indeed respond better to coarser/finer sediments, respectively. Second, there is a log-linear relationship between signal-signal (Figure 2.2a) and  $ADV_{\text{signal}}$  - concentration (Figure 2.2d) of the same  $f_{\text{sand}}$ . Each line is parallel to the other lines and has one intercept value, uniquely associated with a certain sand/mud ratio,  $f_{\text{sand}}$ . Third, the relationship between  $Wetlabs_{\text{signal}}$  - concentration is a linear relationship (Figure 2.2g) in which one slope represents only one  $f_{\text{sand}}$  condition. These observations suggest that there are strong and unique relationships among raw signals, concentrations, and  $f_{\text{sand}}$ . We adopted the Curve Fitting Tool, provided by Matlab, to derive the relationship between signals, concentrations and  $f_{\text{sand}}$ , shown in Figure 2.2b, e, h (the center column).

More specifically, Figure 2.2b was produced by plotting  $f_{\text{sand}}$  against the  $SCI = 10\log_{10}(Wetlabs_{\text{signal}}) - ADV_{\text{signal}}$  to obtain Equation 2.1, which demonstrates that the fraction of sand/mud in a suspension can be estimated from raw signals of Wetlabs and ADV sensors. Figure 2.2e shows the results when applying a similar procedure to ADV signals and concentrations. A log-linear relationship between ADV signals and concentrations is also seen. Equation 2.2 is then achieved based on the relationship between  $10\log_{10}(C) - ADV_{\text{signal}}$  and  $f_{\text{sand}}$ , where C is the total concentration (mg/L). The same approach is applied to suspended concentrations and Wetlabs signals to get Equation 2.3 (Figure 2.2g, h).

$$f_{\text{sand}} = -0.0895 (10 \log_{10}(Wetlabs) - ADV) - 5.11, (R^2 = 0.95) \quad (2.1)$$

$$\log_{10}(C) - ADV = -6.48f_{\text{sand}} - 77.56, (R^2 = 0.80) \quad (2.2)$$

$$C/Wetlabs = 0.016f_{\text{sand}} + 0.008, (R^2 = 0.83) \quad (2.3)$$

Equations 2.1, 2.2, and 2.3, offer two ways to calculate total concentration. Starting with one pair of raw acoustic/optical signals:

- **Step 1:** obtain  $f_{\text{sand}}$  via Eq. 2.1.
- **Step 2:**  $f_{\text{sand}}$  then can be substituted to

$$\text{Step 2a: Eq. 2.2 to obtain } C_a = 10^{(-6.48f_{\text{sand}} - 77.56 + ADV)/10}$$

$$\text{Step 2b: Eq. 2.3 to obtain } C_o = (0.016f_{\text{sand}} + 0.008)Wetlabs$$

In this manuscript, **Step 1** and **2a** refer to a procedure in which the concentration,  $C_a$  is calculated based on  $f_{\text{sand}}$  and the acoustic signal of the pair. For example, equations 2.1 and 2.2 are the application of such procedure to the pair (Wetlabs, ADV). Likewise, steps 1 and 2b refer to a similar procedure using  $f_{\text{sand}}$  and the optical signal of the pair (Wetlabs, ADV) to calculate the concentration,  $C_o$ , as in equations 2.1 and 2.3.



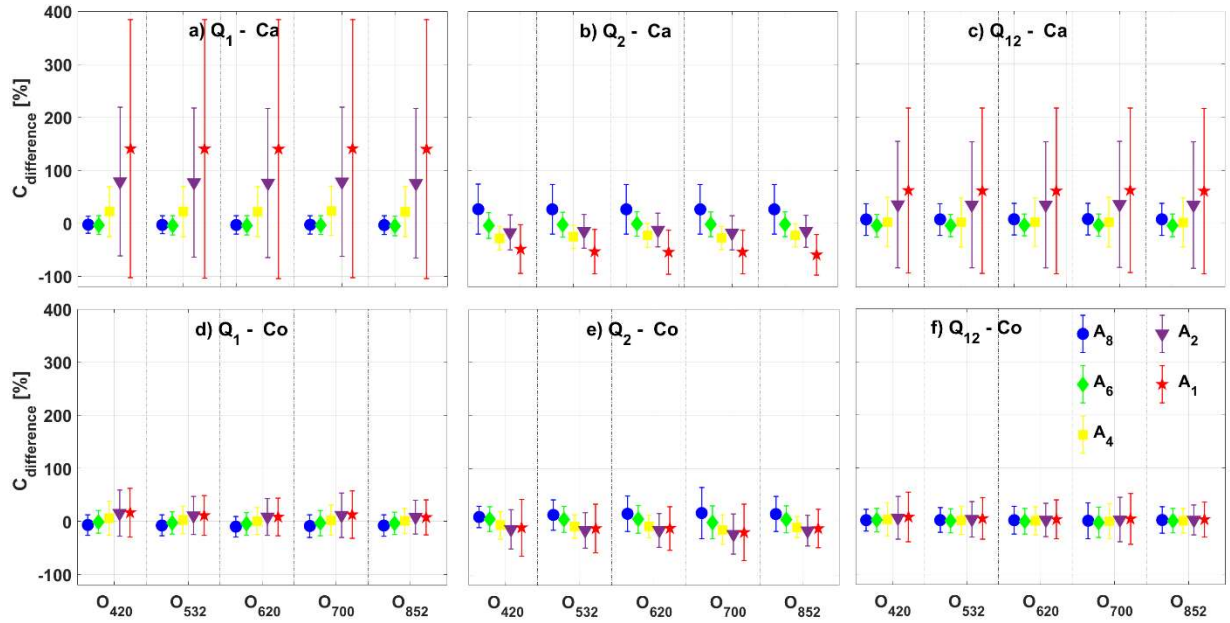


Figure 2.3: Comparison of all pairs when applying SCI-Q1 (a, d), SCI-Q2 (b, e), and SCI-Q12 (c, f) functions to estimate Ca (steps 1 & 2a) and Co (steps 1 & 2b). Concentration differences, in %, between Ca, Co and  $C_{measured}$ .  $C_{difference} = (C_{estimated} - C_{measured})/C_{measured} 100\%$ . Markers: mean values, error bars: one standard deviation.

Figure 2.3 examines the reliability and accuracy of the SCI functions. In this figure, we processed the data from Qset as three populations which are 1) **Q1**: pure Bentonite and all S1-related experiments 2) **Q2**: pure Bentonite and all S2-related experiments and 3) combination of Q1 and Q2 called **Q12**. Figure 2.3 illustrates the difference,  $C_{difference} = (C_{estimated} - C_{measured})/C_{measured}$ , between true and estimated concentrations, i.e., between  $C_a$ ,  $C_o$ , and  $C_{measured}$  obtained by SCI functions derived from Q1 (Figure 2.3a, d), Q2 (Figure 2.3b, e), and Q12 (Figure 2.3c, f), respectively. In Figure 2.3,  $A_x$  denotes for an acoustic sensor with the frequency of x MHz and  $O_y$  denotes for an optical sensor with the wavelength of y nm. In Figure 2.3, the markers represent the mean values and the error bars represent one standard deviation of the population. The lower panel (SCI- $C_o$ ) is plot in the same scale of the upper panel (SCI- $C_a$ ) for easier comparison; yet, note that the absolute values of the error bars sometimes reach to 50% or more. Figure 2.3 reveals that SCI- $C_o$  method across all pairs is more consistent and accurate than that of SCI- $C_a$ . In other words, there is no remarkable difference between different optical turbidity sensors, and thus wavelengths are not a critical parameter in our case (Figure 2.3 lower panel). In contrast, the choice of acoustic frequencies dictates the accuracy substantially, e.g., at 1, 2 MHz (Figure 2.3 upper panel). This is also the reason why Optical- $A_{0.5}$  pairs were not included in Figure 2.3: they over/under-estimated  $f_{sand}$  and concentration in several orders of magnitude. According to Rayleigh regime, this is expected because lower frequencies are much less sensitive to the sands used in the experiments ( $d_{50} = 110 \mu m$  and  $240 \mu m$ ). It also explain why the performance of SCI-Ca\_ $A_2$  and SCI-Ca\_ $A_1$  are considerably better when they were calibrated with bigger sand size in Q2 (Figure 2.3b) rather than with smaller sand size in Q1 (Figure 2.3a).

Two prominent benefits make the SCI method stand out in comparison with other field measurement practices (Downing 2006; Thorne & Hurther 2014; Agrawal et al. 2019). First, it allows researchers to take advantage of the historical data to acquire new meaningful information, i.e., the fraction and concentration of sand/mud in suspension. In long-term sediment dynamics monitoring, both optical turbidity and acoustic sensors are often used

together (Fugate & Friedrichs 2002; Voulgaris & Meyers 2004; Sahin et al. 2017; Fettweis et al. 2019; Pearson et al. 2021). However, they are treated as individual measurements and are calibrated separately for different purposes. For example, an ADV or ADCP is often deployed to measure flow conditions. On the other hand, OBS is used for SPM concentrations. As shown previously, the SCI method is able to provide the percentage of sand/mud, and hence, the proportion of mud and sand concentrations in suspension, respectively. Such information will provide crucial input and validation data to improve the performance of current sediment transport models, e.g., for 2D models relying on data obtained from profilers like ADCP. Projects related to port dredging and beach nourishment also directly benefit from long-term sand/mud dynamics data.

Second, the SCI method allows the use of customized paired sensors. Using five different instruments with different wavelengths and frequencies, this paper showcased the procedure of how SCI functions can be derived and applied. In practice, SCI functions can be directly obtained from field measurements with the pair of optical turbidity/acoustic sensors of interest. Although integrated optical-acoustic sensors, e.g., (Agrawal et al. 2019), have been developed, a key advantage of the SCI calculation is that it can rely on pairs of existing sensors that are already frequently deployed together in the field, without requiring a dedicated additional instrument. Specifically, at least three, preferably five, water samples from a deployment which covers the spring-neap tidal cycle should be used to provide detailed data on sand/mud fraction and total mass concentration. For pure mud conditions, one should take water samples at a calm period, e.g., minimum wave and current during the neap tide (Pearson et al. 2021). The other samples should be taken at mild and energetic conditions when sand is more likely to be resuspended. These five data points can then be utilized to find the SCI functions as in Step 1 and Step 2a, 2b (Figure 2.2b, d, f). If the water sample data is already available from previous deployments, the SCI functions can be formulated with ease.

### *2.2.1. Field-derived SCI functions: OBS-ADV*

This section further discusses the applications of SCI functions in the context of field measurements where the contents of particle size and SPM are often unknown. More specifically, we derived the SCI functions for a pair of (OBS, ADV) sensors and then applied the functions to the historical data from station MOW1 in the North Sea, on the Belgian coastline.

#### *2.2.1.1. Study site*

The station MOW1, situated about 5 km south-west of the port of Zeebrugge, Belgium, is one of a long-term, high-frequency monitoring of hydro-sedimentary dynamics stations in the North Sea, see Figure 2.4. The MOW1 station is within the turbidity maximum zone with the near bed SPM concentration ranges from 20 to >3000 mg/L (Baeye et al. 2011; Fettweis et al. 2012). The tidal regime is semi-diurnal with the tidal range from 4.3 to 2.8 m at spring and neap tide, respectively (Baeye et al. 2011; Fettweis et al. 2012). The data being used in this study were collected in 2013, using a tripod with the attached instruments including 5MHz SonTek ADV Ocean-Hydra (0.2 mab), 3 MHz SonTek Acoustic Doppler Profiler (ADP) (2 mab), two OBSs (2 and 0.2 mab), and a LISST-100x type C (2 mab). The data from the tripods covered up to 319 days of the year 2013 with 11 field campaigns to deploy/recuperate the tripods. During these 11 field campaigns water samples collected by Niskin bottles every 1.5 hours during a 13 hour tidal cycle were also used for particle size distribution and SPM concentration calibration purposes.

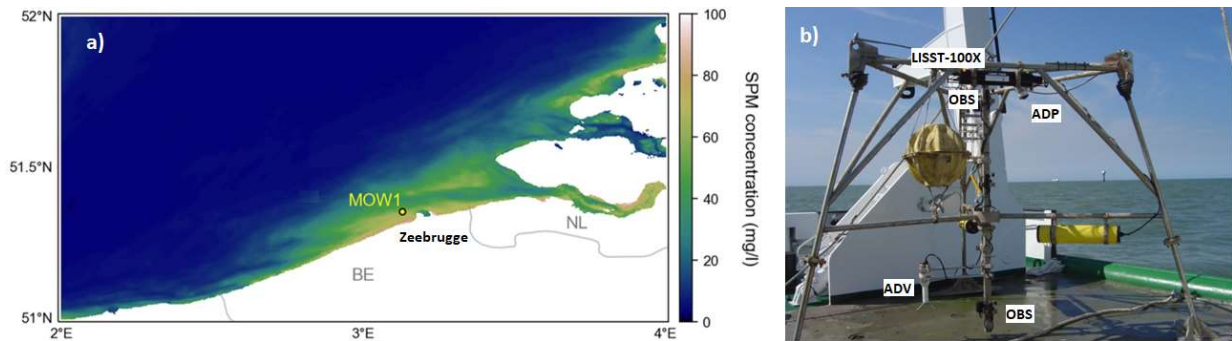


Figure 2.4: a) Study site, MOW1, 5 km south-west of Zeebrugge. b) A typical tripod installation for 2013 deployments.

### 2.2.1.2. Pure mud calibration

The main objective of this study is to explore the feasibility of applying the lab-derived SCI functions to field measurements. The experiments already provided the mathematical forms of the SCI functions, derived for several combinations of the most used commercial optical/acoustic sensors. Calibrations with in situ data help to find a new set of coefficients and/or a correction coefficient to obtain the field-SCI functions for a study site. Alternatively, SCI functions can be directly derived with water samples. However, current practice often uses Niskin bottles for water sampling which known to leave out majority of sand in suspension (citation). We, therefore, propose to use pure mud calibration for this derivation process.

Pure mud conditions usually occur under very low turbulence when sands already deposit and only muds stay in suspension. In this study, we define pure mud by setting thresholds as (wave < 0.75 m, current < 0.25 m/s and  $f_{sand} < 0.25$ ), preferable under slack water in a neap tide period. The term “pure mud calibration” refers to the use of pure mud conditions to find a correction coefficient to make lab-derived SCI functions applicable to field measurements. As the first step to reduce the complexity and make the lab-SCI and field-SCI comparable and interchangeable we propose to normalize SCI such that  $SCI = 0$  in pure mud conditions (Figure 2.2g, h, i). Since the relationships between signal-signal and signal-concentration are log-linear and linear, pure mud calibrations can be seen as the process to find a correction coefficient, e.g., the differences between slopes in Figure 2.2g, h, i, so that the lab-SCI can be transformed to field-SCI.

Figure 2.5 illustrates one example of pure mud calibration for one tidal cycle deployment, M59 from January 24th to March 07, 2013 at MOW1. In our case, water samples collected from Niskin bottles were used to obtain SPMC (top panel). Therefore, the SPMC values should be interpreted as the concentration of only mud in suspension. In other words, the predicted and measured SPMC at pure mud conditions (grey, vertical lines) should be the same. That explains why during pure mud conditions and ebb tides the measured and predicted SPMC were very similar. In this study, we took the average of  $C_{predicted}/C_{measured}$  of all pure mud conditions in one deployment as the correction coefficient of that deployment. Such correction coefficient was then applied for all other conditions within the deployment.

## 2.3. Results

### 2.3.1. Short-term monitoring

Figure 2.5 also shows the results from field-SCI functions of one tidal cycle in deployment M59. A few notes regarding Figure 5 are in order. First, as mentioned previously, during ebb tides the predicted and measured SPMC values are close. However, during flood tides Niskin bottles failed to capture sand and still provided SPMC of only mud which is not the total

concentration. In fact, SPMC predicted from the field-SCI functions suggests that during flood tides the fraction of sand increased significantly, resulting in a considerably higher total concentration (Figure 2.5a, b). Second, the synchronization between OBS and ADV signals is an important indicator of the SPM compositions. For example, around the time 26.2 Julian day, OBS signal increased while ADV signal remained unchanged. That means that the proportion of mud relatively increased in comparison to the proportion of sand in suspension. On the contrary, during flood tide (between 26.4 and 26.6 Julian day) the current velocity increased, causing resuspension of sands and hence, sand-dominant environment. In this case, even a small amount of sand could lead to a noticeable change in SPMC, which shown in Figure 2.5a. Finally, we do not have the fraction of sand data for calibration of the field-SCI functions. Hence, the fraction of sand actually refers to the relative changes of the amount of sand within one deployment, rather than an absolute number for all cases.

### *2.3.2. Medium and long-term monitoring*

The same procedure was applied for a longer field data set. Figure 2.6 shows the application of field-SCI to the deployment M60, from March 7th to March 28th, 2013 at MOW1 and Figure 2.7 to all data of 2013. A similar pattern as in Figure 2.5 can also be seen in Figure 2.6 and 2.7, that is a strong correlation between  $f_{\text{sand}}$  and the degree of turbulence, or the bed shear stress. The results suggest that there might be an advection transport of sand during the spring tide. First, the OBS signal gradually decreased whereas ADV signals slowly increased, implying that the environment changed from muddy to sandy near the bed. Second, the wave became milder after the 71 Julian day along with a slight deposition (last panel - Altitude). That means that the increase of  $f_{\text{sand}}$  was not from resuspension rather the sand was transported from adjacent area to deposit at the point of measurement. During neap tide, there was not much of activities and the total concentration as well as  $f_{\text{sand}}$  remained stable.

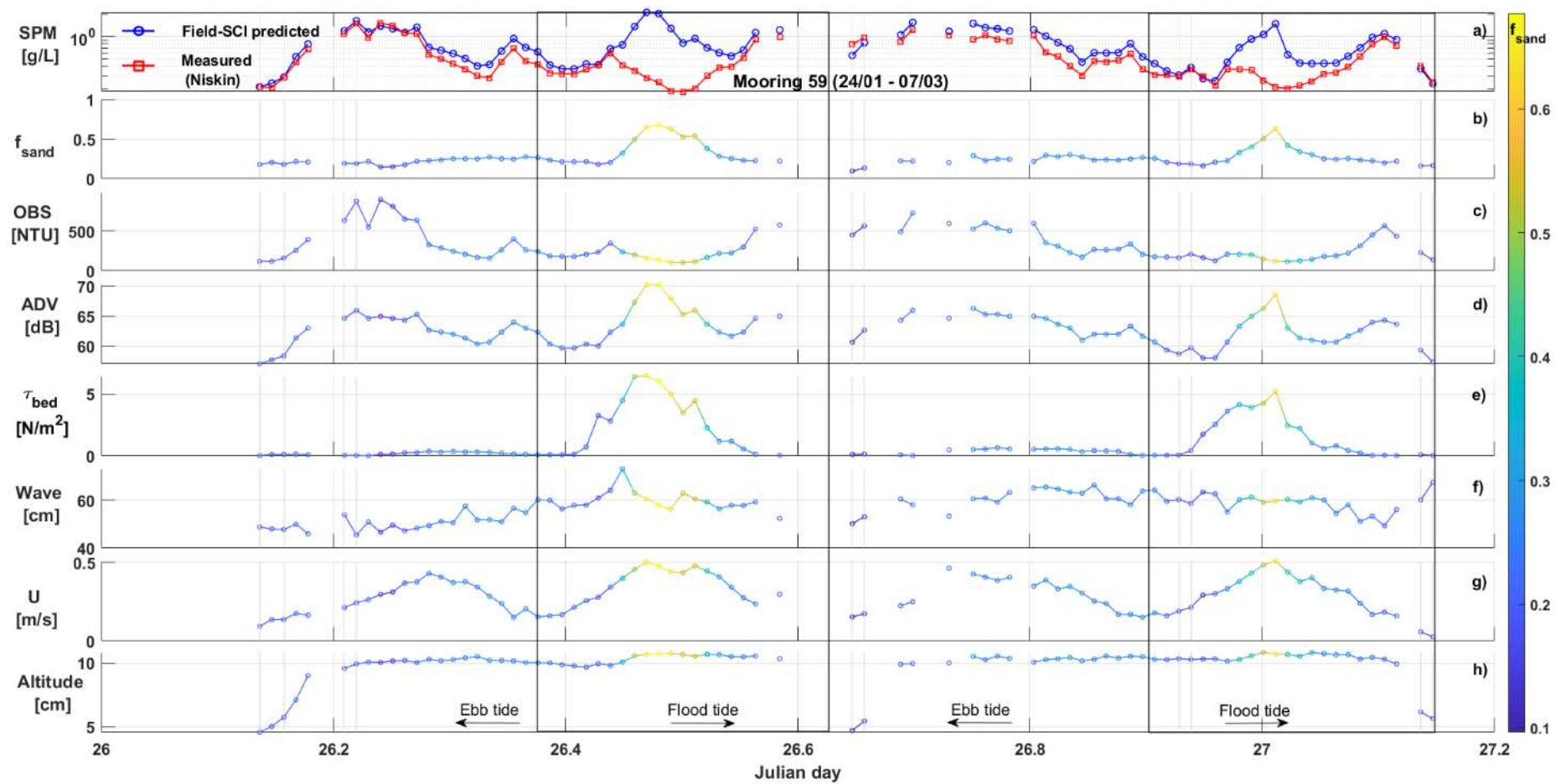


Figure 2.5: Pure mud calibrations to find a correction coefficient for field-derived SCI functions. Pure mud conditions - the gray, vertical lines - were defined as wave <0.70 m, current <0.25m/s and  $f_{sand}$  <0.2.

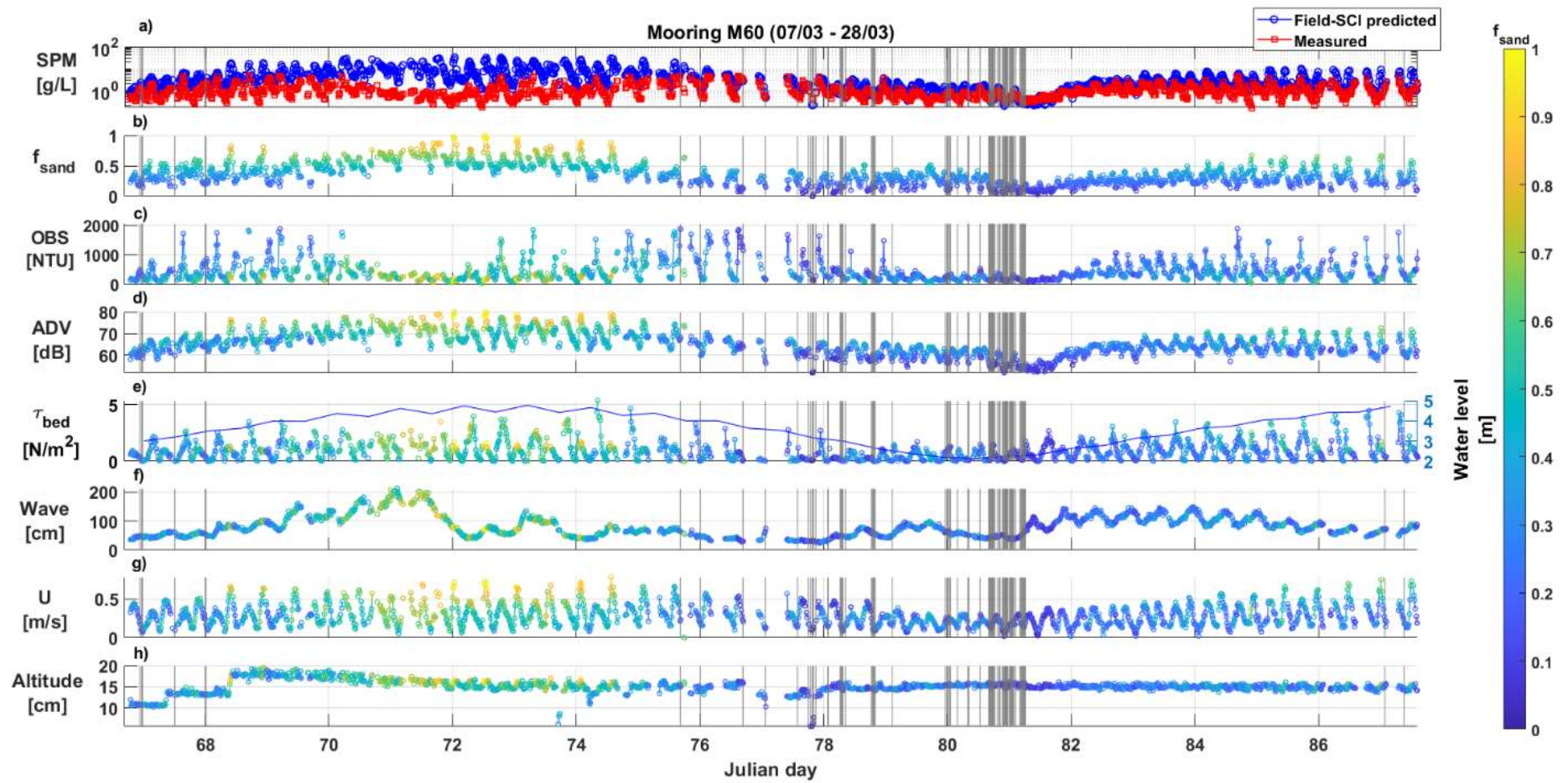


Figure 2.6: Application of field-derived SCI functions to longer deployment, M60 from March 07 to March 28, 2013.

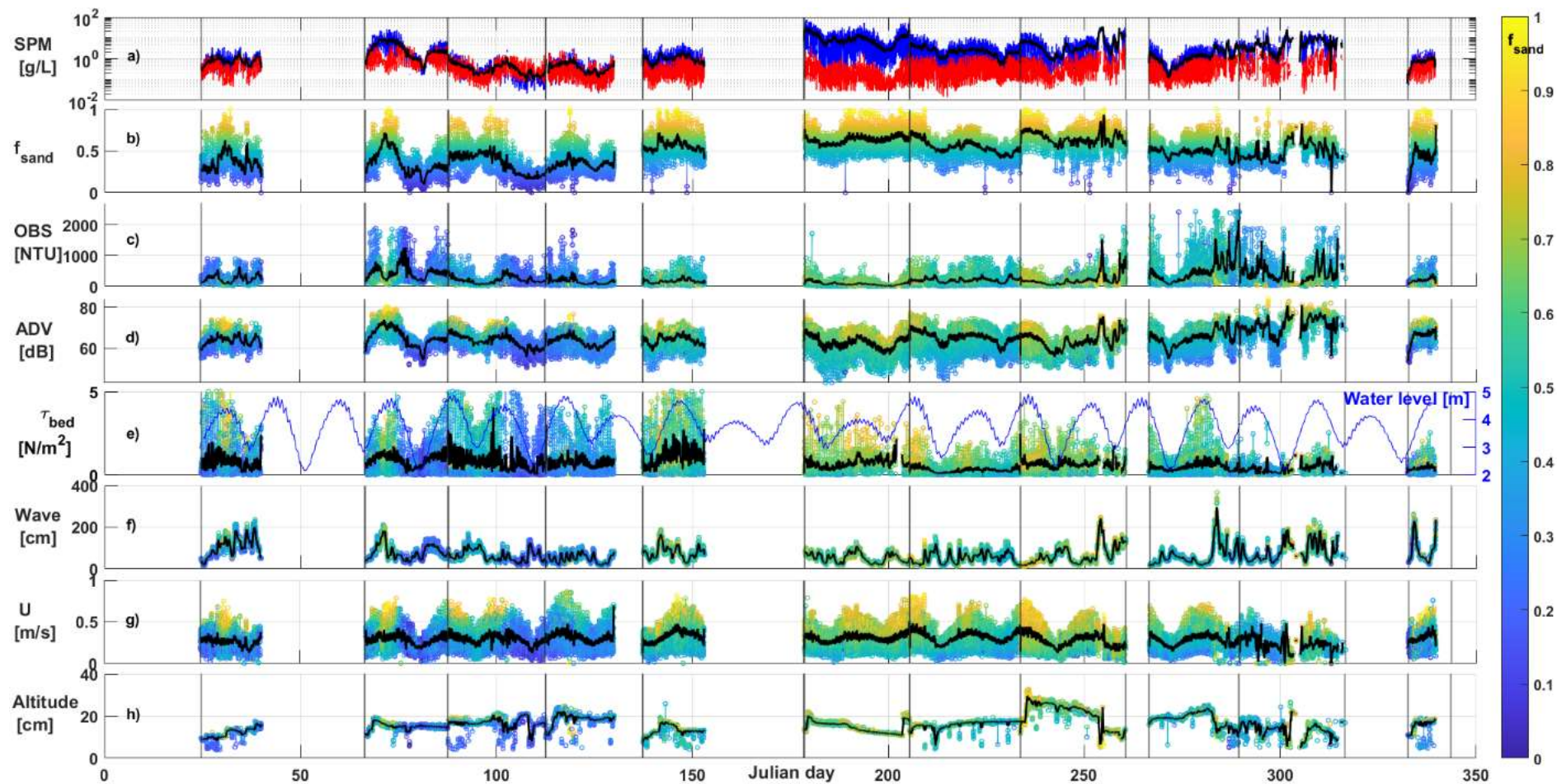


Figure 2.7: Application of field-derived SCI functions to all deployment of 2013.

### 3. Nieuwe methode voor de analyse van transparant exopolymeric particles (TEP) in zeewater

Het onderzoek was gericht op het verbeteren en valideren van een methode met de 'Multiskan Skyhigh spectrofotometer' voor de analyse van transparante exopolymeerpartikels (TEP) in zeewater (Brysse 2024). TEP vertonen namelijk oppervlakte-actieve eigenschappen waardoor ze organische koolstof aggregatie bevorderen. Ook dienen TEP als voedselbron voor diverse mariene organismen en bevorderen ze de ontwikkeling van biofilms, alsook de uitwisseling van gassen tussen de zee en de atmosfeer. Gezien hun cruciale rol in mariene ecosystemen is het van essentieel belang om een gevalideerde en geoptimaliseerde analysemethode te ontwikkelen, zoals beoogd in deze studie, met als primair doel de TEP-analyse routinematig op de Multiskan Skyhigh spectrofotometer uit te voeren om zo een snellere en meer nauwkeurige analyse te kunnen volstrekken. Er wordt een systematische aanpak gehanteerd waarbij de methode zorgvuldig wordt geoptimaliseerd, gevalideerd en ook vergeleken met een bestaande methode binnen Ecochem voor de colorimetrische kwantificatie met behulp van de klassieke spectrofotometer. De uitkomsten van deze vergelijking zullen dienen om de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de Multiskan Skyhigh spectrofotometer en de geoptimaliseerde methode voor TEP-analyse te beoordelen. Naast het optimaliseren, leidt verder onderzoek naar onderzoekspaden, zoals seizoensgebonden dynamiek van TEP geproduceerd door fytoplankton, de interactie van TEP met SPM (Gesuspendeerd Particulair Materiaal) en potentiële toepassingen in waterzuivering, tot waardevolle inzichten voor toekomstig onderzoek op dit gebied.

Na deze aanpassingen worden de prestaties van beide toestellen vergeleken. Ze moeten namelijk gelijke resultaten opleveren. Hiervoor worden stalen zeewater, met TEP, zowel op het oude als het nieuwe toestel gemeten. Als de resultaten nauw overeenkomen of vrijwel identiek zijn, wordt de geoptimaliseerde methode voor het nieuwe toestel als succesvol beschouwd.

Tot slot wordt een validatie uitgevoerd om te bevestigen dat de nieuwe methode en het nieuwe toestel correct functioneren en betrouwbare resultaten leveren. Dit validatieproces controleert of het toestel voldoet aan de gespecificeerde eisen en verwachtingen, waardoor de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van het nieuwe systeem wordt gegarandeerd.



## 4. Referenties

- Agrawal Y, Pottsmith H, Dana D, Mikkelsen O. 2019. Super-turbidity meter: Lissat-AOBS combines optical turbidity with acoustics. Proc. 38<sup>th</sup> IAHR World Congress, 260 38:1–6.
- Chmiel O, Baselt I, Malcherek A. 2018. Applicability of acoustic concentration measurements in suspensions of artificial and natural sediments using an acoustic doppler velocimeter. *Acoustics* 1, 59–77.
- Downing J. 2006. Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Cont. Shelf Res.* 26(17):2299–2318.
- Baeye M, Fettweis M, Voulgaris G, Van Lancker V. 2011. Sediment mobility in response to tidal and wind-driven flows along the Belgian inner shelf, southern North Sea. *Ocean Dyn.* 61, 611-622. doi:10.1007/s10236-010-0370-7
- Boss E, Pegau WS, Lee M, Twardowski MS, Shybanov E, Korotaev G, Baratange F. 2004. The particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution. *J. Geophys. Res.* 109, C01014. <https://doi.org/10.1029/2002JC001514>.
- Bright CE, Mager SM, Horton SL. 2018. Predicting suspended sediment concentration from nephelometric turbidity in organic-rich waters. *River Res. Appl.* 34, 629–639. <https://doi.org/10.1002/rra.3305>
- Brysse F. 2024. Optimalisatie en validatie van de 'Multiskan Skyhigh spectrofotometer' voor analyse van transparante exopolymeerpartikels (TEP) in zeewater. VIVES Hogeschool Campus Roeselare, Bachelor thesis in de agro- en biotechnologie, 55pp + app.
- Fettweis M, Baeye M, Lee BJ, Chen P, Yu JCS. 2012. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Marine Lett.* 32, 123-137. doi:10.1007/s00367-011-0266-7
- Fettweis M, Riethmüller R, Verney R, Becker M, Backers J, Baeye M, Chapalain M, Claeys S, Claus J, Cox T, Deloffre J, Depreiter D, Druine F, Flöser G, Grünler S, Jourdin F, Lafite R, Nauw J, Nechad B, Röttgers R, Sotollichio A, Vanhaverbeke W, Vereecken H. 2019. Uncertainties associated with in situ long-term observations of suspended particulate matter concentration using optical and acoustic sensors. *Progr. Oceanogr.* 178, 102162. doi:10.1016/j.pocean.2019.102162
- Fettweis M, Schartau M, Desmit X, Lee BJ, Terseleer N, Van der Zande D, Parmentier K, Riethmüller R. 2022. Organic matter composition of biomineral flocs and its influence on suspended particulate matter dynamics along a nearshore to offshore transect. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 126, e2021JG006332. doi:10.1029/2021JG006332
- Fugate DC, Friedrichs CT. 2002. Determining concentration and fall velocity of estuarine particle populations using ADV, OBS and LISST. *Cont. Shelf Res.* 22, 1867–1886
- Guerrero M, Di Federico V. 2018. Suspended sediment assessment by combining sound attenuation and backscatter measurements - analytical method and experimental validation. *Adv. Water Res.* 113, 167–179. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.020>
- Hatcher A, Hill P, Grant J, Macpherson P, 2000. Spectral optical backscatter of sand in suspension: effects of particle size, composition and colour. *Mar. Geol.* 168, 115–128. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00042-6)
- Hay AE, Sheng J. 1992. Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter. *J. Geophys. Res.* 97, 15661–15677.
- Hoitink, A. and Hoekstra, P. (2005). Observation of suspended sediment from adcp and obs measurements in a mud-dominated environment. *Coast. Eng.* 52, 103–118.
- Lauwaert B, Fettweis M, De Witte B, Van Hoei G, Timmermans S, Hermans L. 2019. Vooruitgangsrapport (juni 2019) over de effecten op het mariene milieu van baggerspeciestortingen (Vergunningsperiode 01/01/2017 – 31/12/2021). RBINS-ILVO-AMT-CD rapport. BL/2019/01, 28pp.
- Lauwaert B, De Witte B, Festjens F, Fettweis M, Hermans L, Lesuisse A, Le H-M, Seghers S, Timmermans S, Vanavermaete D, Van Hoey G. 2021. Synthesis report on the effects of dredged material dumping on the marine environment (licensing period 2017-2021). RBINS-ILVO-AMT-AMCS-FHR report BL/2021/10, 67pp.
- Mishchenko MI, Travis LD, Lasis AA. 2002. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles. Cambridge University Press, Cambridge.

- Pearson SG, Verney R, van Prooijen BC, Tran D, Hendriks EC, Jacquet M, Wang ZB. 2021. Characterizing the composition of sand and mud suspensions in coastal and estuarine environments using combined optical and acoustic measurements. *J. Geophysic. Res. Oceans* 126, e2021JC017354.
- Sahin C, Verney R, Sheremet A, Voulgaris G. 2017. Acoustic backscatter by suspended cohesive sediments: field observations, Seine Estuary, France. *Cont. Shelf Res.* 134, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.003>
- Salehi M, Strom K. 2011. Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration. *Cont. Shelf Res.* 31, 1020–1032.
- Slade WH, Boss E, Russo C. 2011. Effects of particle aggregation and disaggregation on their inherent optical properties. *Opt. Express* 19, 7945–7959. <https://doi.org/10.1364/OE.19.007945>
- Sutherland TF, Lane PM, Amos CL, Downing J. 2000. The calibration of optical backscatter sensors for suspended sediment of varying darkness levels. *Mar. Geol.* 162, 587–597. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00080-8)
- Thorne PD, Hanes DM. 2002. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Cont. Shelf Res.* 22, 603–632. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00101-7)
- Thorne PD, Hurther D. 2014. An overview on the use of backscattered sound for measuring suspended particle size and concentration profiles in non-cohesive inorganic sediment transport studies. *Cont. Shelf Res.* 73, 97–118.
- Tran D, Jacquet M, Pearson S, van Prooijen B, Verney R. 2024. Estimation of mud and sand fractions and total concentration from coupled optical-acoustic sensors. [Dataset]. Zenodo. <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.12819148>.
- Tran D, Jacquet M, Pearson S, Verney R. 2021. Investigating suspended particulate matters from multi-wavelength optical and multi-frequency acoustic measurements. EGU 2021, 13022.
- Voulgaris G, Meyers ST. 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and settling velocity in a tidal creek. *Cont. Shelf Res.* 24, 1659–1683.
- Woźniak SB, Meler J, Lednicka B, Zdun A, Stoń-Egiert J. 2011. Inherent optical properties of suspended particulate matter in the southern Baltic Sea. *Oceanologia* 53, 691–729. <https://doi.org/10.5697/oc.53-3.691>

## COLOPHON

Dit rapport werd voorbereid door de BMM in oktober 2024  
Zijn referentiecode is MOMO/10/MF/202410/NL/AR/5

De scheepstijd met de RV Belgica werd voorzien door BELSPO en KBIN-OD Natuur

Indien u vragen hebt of bijkomende copies van dit document wenst te verkrijgen, gelieve een e-mail te zenden naar [mfettweis@naturalsciences.be](mailto:mfettweis@naturalsciences.be), met vermelding van de referentie, of te schrijven naar:

Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen  
OD Natuur – BMM  
t.a.v. Michael Fettweis  
Vautierstraat 29  
B-1000 Brussel  
België  
Tel: +32 2 627 41 83

BEHEERSEENHEID VAN HET  
MATHEMATISCH MODEL VAN DE NOORDZEE

