

2. Effecten van mariene aggregaatextractie op zeebodemintegriteit en hydrografische condities. Nieuwe inzichten en ontwikkelingen

Van Lancker Vera¹, Baeye Matthias¹, Francken Frederic¹, Kint Lars¹, Montereale Gavazzi Giacomo¹, Terseleer Nathan¹, Van den Eynde Dries¹

¹Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, OD Natuur, Vautierstraat 29, 1000 Brussel

2.1. Introductie

Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen is verantwoordelijk voor de opvolging van de effecten van de winning van aggregaten op de hydrodynamica en het sediment (transport) van het mariene milieu. Kwantificering van de effecten van zandwinning is echter ook nodig om de vooruitgang in de richting van een goede milieutoestand (GES) van het mariene milieu op te volgen zoals opgelegd door de Europese Kaderrichtlijn Mariene Strategie (KRMS; 2008/56/EG). Met betrekking tot de fysische impact van aggregaatextractie noodzaakt dit een opvolging van de GES descriptors zeebodemintegriteit en hydrografische condities. De integriteit van de zeebodem heeft betrekking op de structuur en de functies die de zeebodem aan het ecosysteem levert (bijvoorbeeld de toevoer van zuurstof en voedingsstoffen), terwijl de hydrografische omstandigheden betrekking hebben op stromingen, troebelheid en/of andere oceanografische parameters waarvan veranderingen een negatieve invloed kunnen hebben op de benthische ecosystemen. Kritisch bij het bestuderen van veranderingen is goede basisinformatie waarbij de kenmerken van het geologisch substraat belangrijke randvoorwaarden geven voor meer duurzame extractiepraktijken.

Het monitoringskader omvat dan ook drie hoofddoelstellingen:

- (1) Kwantificering van natuurlijke en door de mens veroorzaakte variabiliteit van sedimentkarakteristieken en -processen, met focus op zand.
- (2) Proces- en systeemmodellering van de keten activiteit-druk-effecten op het mariene milieu: in het nabije en verafgelegen veld.
- (3) Aanbevelingen voor een meer duurzaam gebruik van mariene grondstoffen (i.e., zand), in overeenstemming met de KRMS, en invulling gevend aan het milieuprogramma van de Verenigde Naties inzake een meer collectief beheer van minerale hulpbronnen.

Een grotere proces- en systeemkennis is nodig om de impact van zandwinning op het milieu beter te kunnen duiden, en de natuurlijke variabiliteit te karakteriseren. In het nabije veld is een betere inschatting van het herstelpotentieel na abrasie van de zeebodem van belang, alsook kennis van de processen die de verspreiding van, de door extractie geïnduceerde, zwevende deeltjes bepalen. Dit is belangrijk om de kans van afzetting van deze deeltjes in de door grind gedomineerde gebieden, met potentieel een rijke biodiversiteit, beter te kunnen voorspellen. Hierbij is ook een beter inzicht nodig in de mobiliteit van de zeebodem en de zanddynamiek in het bijzonder. Dergelijke kennisopbouw is des te meer kritisch wanneer exploitatie plaatsvindt binnen of in de buurt van een Habitatrichtlijngebied, zoals toenemend het geval is in het Belgische deel van de Noordzee (BDNZ). Deze richtlijn noodzaakt passende beoordelingen van alle stressoren (HD, 92/43/EEG).

Naast het streven naar een minimale impact van de activiteit op het milieu blijft een goede kennis van de geologische hulpbron cruciaal, in kwaliteit en kwantiteit, wat pleit voor een verdere digitalisering van de geologische kennisbasis. Het combineren van al deze facetten blijft een uitdaging, maar is nodig om inzicht te krijgen in de oorzaak-gevolgrelaties en herstel op systeemniveau beter in te kunnen schatten.

Het dient beklemtoont dat de monitoring deel uitmaakt van een groter geheel. Vooreerst door afstemming met het onderzoek van FOD Economie en ILVO (zie Barette et al. (2020) en Wyns et al. (2020), respectievelijk). Voorts leidt het KRMS kader tot een meer coherente milieumonitoring op (inter)nationaal niveau (e.g., MONIT.be).

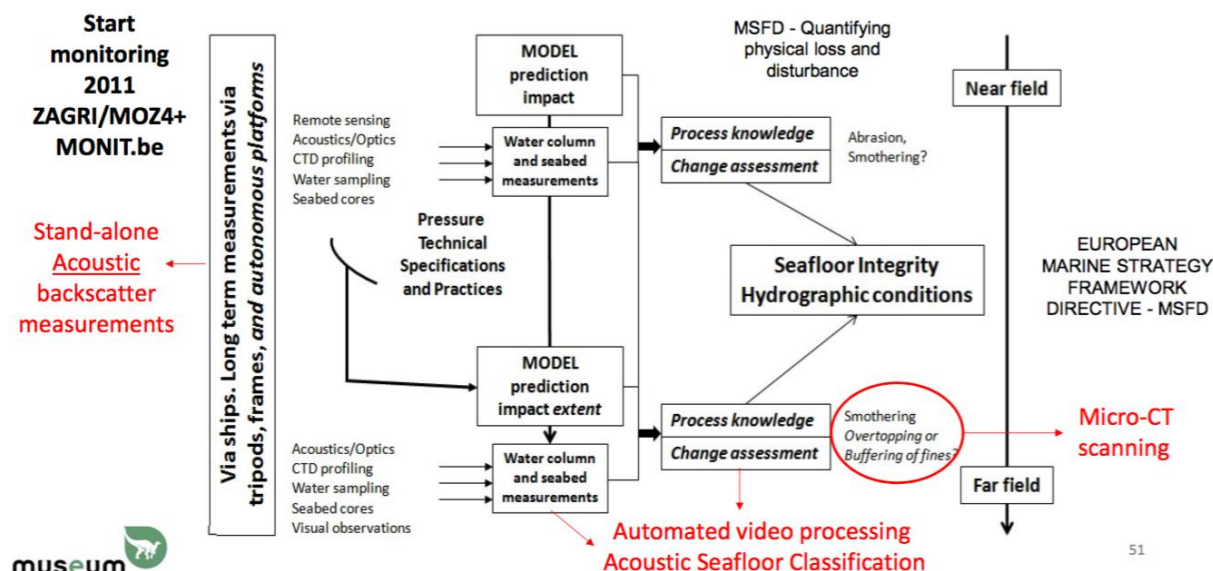
2.2. Methodologie

2.2.1. Kwantificeren van natuurlijke en door de mens-gestuurde veranderingen in sedimentkarakteristieken en -processen

Metingen zijn essentieel voor de kwantificering van de natuurlijke en door de mens veroorzaakte variabiliteit van sedimentkenmerken en -processen. Deze worden momenteel vooral uitgevoerd in de regio van de Hinderbanken onder de koepel van het monitoringprogramma MOZ4 (Vlaamse Overheid) gezien van dit gebied weinig basisinformatie voorhanden is, maar toch intensief zand wordt gewonnen. De metingen zijn in overeenstemming met de doelstellingen van de KRMS, i.e. de beoordeling van veranderingen in de integriteit van de zeebodem en hydrografische condities (Belgische Staat, 2018). Ze omvatten: (1) het karakteriseren van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de aard van de zeebodem; (2) het opbouwen van kennis over sedimentprocessen in de Hinderbanken; en (3) het testen van impacthypothese (Van Lancker et al., 2016).

Figuur 1. Geïntegreerde monitoringsbenadering teneinde de effecten van de winning van mariene aggregaten op hydrodynamica en sediment(transport) te bestuderen.

De monitoring is gericht op de naleving van de Kaderrichtlijn Mariene Strategie, met focus op zeebodemintegriteit en hydrografische condities, twee belangrijke beschrijvende elementen van een goede milieutoestand. In rood worden enkele innovaties benadrukt die in de periode 2017-2020 zijn uitgewerkt.



M.b.t aggregaatextractie zijn metingen van de waterkolom belangrijk om veranderingen van de zeebodem te voorspellen. Hiertoe werden verschillende instrumenten ingezet waaronder optische en akoestische sensoren, in combinatie met waterbemonstering. Sedimentstalen werden tevens bekomen van een sleehopperzuiger (TSHD) waarvan de korrelgrootteverdelingen in een laboratorium werden gemeten. Zeegaande campagnes werden georganiseerd met RV Belgica waarbij metingen typisch over een periode van 13 uur worden uitgevoerd om mede de getijdegeïnduceerde variabiliteit te bepalen. Twee strategieën werden hierbij gevolgd: (1) Het schip gaat voor anker en metingen worden uitgevoerd over de waterkolom; (2) Er wordt heen en weer langs eenzelfde zandbanktransect gevaren. In beide gevallen wordt de concentratie aan zwevende deeltjes gemeten; in het eerste geval plaatsgebonden en aan een hogere tijdsresolutie; in het tweede geval kan tevens de ruimtelijke variabiliteit, t.t.z. zandbank versus geul worden meegenomen. Deze metingen worden vaak gecombineerd met de inzet van bodemframes uitgerust met verschillende optische en akoestische sensoren en die ter plaatse meten over een langere periode. Optische backscattersensoren zijn typisch performanter om het fijnkorrelige materiaal te karakteriseren, terwijl akoestische backscattersensoren beter zijn voor zandmetingen. Het doel is om de variatie over een reeks van opeenvolgende getijdencycli vast te leggen. In de periode 2017-

2020 zijn op die manier langetermijnsreeksen bekomen die toelaten om ook springtij-doodtij variatie te bestuderen (bijvoorbeeld ten zuiden van Sector 4a, Noordhinder, in 2019).

Zeebodemeigenschappen werden bestudeerd met behulp van meerdere methodologieën. In het nabije veld van de aggregaatsectoren werden Reineck boxcores genomen in de zandige sedimenten van de zandbanken. Het doel was om in detail de bovenste zeebodem te bemonsteren om aldus de kans op het detecteren van veranderingen in sedimenteigenschappen te verhogen. Ondiepe kernen werden genomen die aan boord op 1--cm resolutie werden bemonsterd en vervolgens werden ingevroren. In het laboratorium werden korrelgrootteanalyses uitgevoerd met een laserdiffractometer, evenals werden organisch materiaal en carbonaatgehalte gemeten aan de hand van de 'Loss-on-ignition' methode. In het Habitatrichtlijngebied, ten zuiden van concessiezone 4, werd verder ingezet op de kartering van het substraat m.b.v. multibeamtechnologie (diepte en terugverstrooiingswaarden of 'backscatter'). De verdere vertaling van deze gegevens in sedimenttypes maakte deel uit van promotieonderzoek dat specifiek gericht was op zeebodemclassificatie in een monitoringscontext en een geautomatiseerde detectie van sedimentveranderingen (Montereale Gavazzi, 2019). Dit proces gaat hand in hand met een gerichte terreinverificatie waarvoor per substraattype de meest geschikte bemonsteringstechniek dient gekozen te worden. Dit is het meest kritisch voor grindgebieden, waar alleen Hamongrijpers, die toelaten een volume aan sediment te bemonsteren, het mogelijk maken om alle sedimentfracties te vangen, doch deze monsters zijn volledig verstoord. Bijkomende videowaarnemingen waren cruciaal om de variabiliteit van de zeebodem aan het oppervlakte te valideren. Hierbij werden automatische videoprocedures ontwikkeld om de verhouding tussen harde en zachte substraten te kwantificeren (Montereale Gavazzi, 2019). Om zanddikte en -samenstelling kwantitatief te duiden, werden ondiepe kernen genomen door duikers (KBIN Wetenschappelijk duikersteam onder leiding van A. Norro). Hierbij werd microcomputertomografie (UGCT lab, UGent) gebruikt voor een gedetailleerde analyse van de verdeling van de sedimentfracties over de sedimentkolom.

Voor een gedetailleerde beschrijving van alle gebruikte technieken en analyses, zie Van Lancker et al. (2020). De verschillende zeegaande campagnes werden gerapporteerd in Van Lancker et al. (2017, 2020), en Van den Eynde et al. (2019a).

2.2.2. Proces- en systeemmodellering voor een beter begrip van de keten activiteit-druk en effecten

Modellering van hydrodynamica en golven

In Degrendele (2016) en Degrendele et al. (2017) is een nieuwe ontginningslimiet voor extractie voorgesteld, gebaseerd op wetenschappelijke en economische criteria. In Van den Eynde (2017) en Van den Eynde et al. (2017) werd deze nieuwe limiet geëvalueerd op basis van de Belgische implementatie van de KRMS. In deze richtlijn werd gesteld dat er rekening moet worden gehouden met de gevolgen van veranderingen in bodemschuifspanning; deze mag namelijk niet meer dan 10 % veranderen (buiten een buffergebied) ten gevolge van een menselijke activiteit. Gezien de expliciete vermelding dat dit dient te gebeuren met een gevalideerd numeriek model, werd de nauwkeurigheid van de metingen van bodemschuifspanning bestudeerd op een bekende meetlocatie (MOW1) (Van den Eynde, 2016).

In een volgende stap werd de nieuwe voorgestelde extractielimiet (Degrendele et al., 2017) verder geëvalueerd, meer specifiek gericht op de aanzienlijke verlaging van de zandbanken en de mogelijke gevolgen op de kust. Hiertoe werd het SWAN-model (Ris, 1997; Booij et al., 1999; Holthuijsen et al., 1989, 1993, 2003) ingezet met focus op veranderingen nabij de kust en stranden. Modelaanpassingen waren nodig waarbij het model werd uitgebreid om de Hinderbanken volledig te omvatten. Voor een winning van 597 Mm³ werden scenario's berekend die drie verschillende significante golfhoogten omvatten, met bijbehorende golfperiode en windsnelheid, negen verschillende wind- en golfrichtingen, voor hoog- en laagwaterstanden, voor een totaal van 108 simulaties. Simulaties werden ook uitgevoerd voor een 1000-jarige storm. Zie Van den Eynde et al. (2019b) voor een uitgebreide beschrijving.

Sedimentpluimmodellering

Het modelleren van sedimentdynamiek is essentieel om de effecten van zandwinning op het verre veld te kwantificeren. Met name het ontstaan, de verspreiding en het afzetten van sedimentpluimen moet beter worden begrepen. Op basis van metingen in sleepopperzuigers en erbuiten (Baeye et al., 2019; Van Lancker et al., 2020) zijn nieuwe randvoorwaarden gegenereerd die de verdere ontwikkeling en validatie van zandtransport- en advectie-diffusiemodellen moeten toelaten en zo beter de verspreiding van sedimentpluimen te simuleren. Eerder werden reeds rapporten vrijgegeven m.b.t. de validatie van het tweedimensionale hydrodynamische model (resolutie van 250 m x 250 m), het zandtransportmodel <mu-STM> en het tweedimensionale slibtransportmodel <mu-SEDIM> (Van Lancker et al., 2014, 2015; Van den Eynde et al., 2014). De nieuwe ontwikkelingen hebben betrekking op het incorporeren van de modellering van gemengde sedimenten (Bi en Toorman, 2015), flocculatiemodellering (e.g., Lee et al., 2019; Shen et al., 2019a, 2019b), en het incorporeren van driedimensionale effecten. Dit laatste is vooral van belang voor de modellering van nabije en verre veldeffecten van zandwinning en de modellering van sedimentpluimen (e.g., Spearman et al., 2011; Decrop, 2016). Bovendien zijn er nu betere zeebodemmodellen beschikbaar (Belpo TILES, Van Lancker et al., 2019) die nieuwe geologische randvoorwaarden genereren (zie paragraaf 1.3.3).

COHERENS V2-software (Luyten, 2016) werd gebruikt voor de ontwikkeling en validatie van het driedimensionale sedimenttransportmodel. Een nieuwe modeltrein werd ontwikkeld met vier gekoppelde modellen, resulterende in een model voor het hele BDNZ met een resolutie van ongeveer 250 m x 270 m (Dulière, 2017). De validatie van deze nieuwe hydrodynamische modellering is nu in de laatste fase. Het sedimenttransportmodel werd verbeterd, waarbij het zand- en het slibtransport afzonderlijk werd meegenomen. Voorts werd er vooruitgang geboekt met de modellering van sedimentinteracties en werd een flocculatiemodule in het model opgenomen. Verdere verbeteringen en validatie van dit nieuwe sedimenttransportmodel is gepland voor de volgende periode waardoor de resultaten later gerapporteerd zullen worden.

Geautomatiseerde analyse van duinmigratie voor een betere systeemkennis

Geïnitieerd in het Belpo TILES project (Van Lancker et al., 2019), en verder onderzocht in het kader van het ZAGRI monitoringprogramma, werden alle multibeam diepte-datasets van FOD Economie geanalyseerd. In totaal werden 180+ MBES-campagnes behandeld, verdeeld over 10 verschillende gebieden over een monitoringperiode van 20 jaar. Via een geautomatiseerde aanpak werden 1000+

waarnemingen op 100+ duinen geëxtraheerd en werden morfodynamische parameters zoals duinmigratie, golflengten en hoogtes berekend.

2.2.3. Naar een meer duurzaam gebruik van mariene grondstoffen

Focus is de verbetering van de kennis van het zeebodemmilieu door: (i) uitbreiding zeebodemkartering en terreinvalidatie; (ii) het compileren van databases over zeebodemsedimenten (i.e., korrelgrootteverdelingscurves); en (iii) verdere valorisatie van de geologische ondergrond. Aldus, wordt gestreefd naar een verdere digitalisering van mariene grondstoffen verderbouwend op de resultaten van het Belpo-project TILES (Transnational and Integrated Long-term marine Exploitation Strategies, Van Lancker et al., 2019). Verder wordt ingezet op een betere educatie en communicatie van duurzaamheidsaspecten van mariene zandwinning (Belpo valorisatieproject Seabed4U: *Seabed CommUnity Initiative: communicating sustainability challenges of marine sand use in a changing world*). Een gemeenschapsinitiatief wordt hierbij geïnitieerd, gealigneerd met de visie van de Verenigde Naties rond een meer collectief beheer van minerale grondstoffen (UNEP, 2019).

Synthese van resultaten m.b.t. de Kaderrichtlijn Mariene Strategie

Uiteindelijk worden de resultaten gevaloriseerd ten aanzien van de milieudoelstellingen van de Europese KRMS, met de nadruk op de beschrijvende elementen van een goede milieutoestand (GES): integriteit van de zeebodem en hydrografische omstandigheden. Met betrekking tot hydrografische omstandigheden worden twee indicatoren meegenomen in de monitoring: (1) veranderingen in de bodemschuifspanning; en (2) veranderingen in de troebelheid, gezien beide een negatieve invloed kunnen hebben op de benthische biodiversiteit. Voor zeebodemintegriteit diende een methodologie te worden ontwikkeld om tijdreeksen van multibeam diepte en terugverstrooiingswaarden te gebruiken om veranderingen in de grote sedimenttypes slib, zand en grind te beoordelen (zie Van Lancker et al., 2018, voor een onderbouwing). Het dient benadrukt dat op Europees niveau de opvolgingsmethodologieën en de beoordeling van de GES-descriptoren in continue ontwikkeling zijn. Wat de integriteit van de zeebodem betreft, heeft de Internationale Raad van de Zee (ICES) het mandaat gekregen om de aanpak van fysiek verlies en verstoring te herzien. Dit wordt nu onder andere verder uitgewerkt in de technische groep Zeebodem (TG Seabed) van de Europese Commissie. KBIN is bij deze groepen betrokken. Tot nu toe is bij de kwantificering van fysisch verlies en verstoring een rigoureuze aanpak gevolgd die gebaseerd is op de activiteiten zelf en waarbij rekening wordt gehouden met op literatuur gebaseerde impactbuffers rond de activiteiten (Kint et al., 2018). In de toekomst zal dit in toenemende mate gebaseerd zijn op procesmatige modellering van effecten op het verre veld waaraan het huidige onderzoek zal bijdragen.

2.3. Resultaten

In de volgende secties wordt een selectie getoond van de belangrijkste resultaten van het monitoringprogramma 2016-2019. Zie Van Lancker et al. (2020) voor een grondiger overzicht.

2.3.1. Kwantificeren van natuurlijke en door de mens-gestuurde veranderingen in sedimentkarakteristieken en -processen

Waterkolomeigenschappen in het nabije veld van extracties

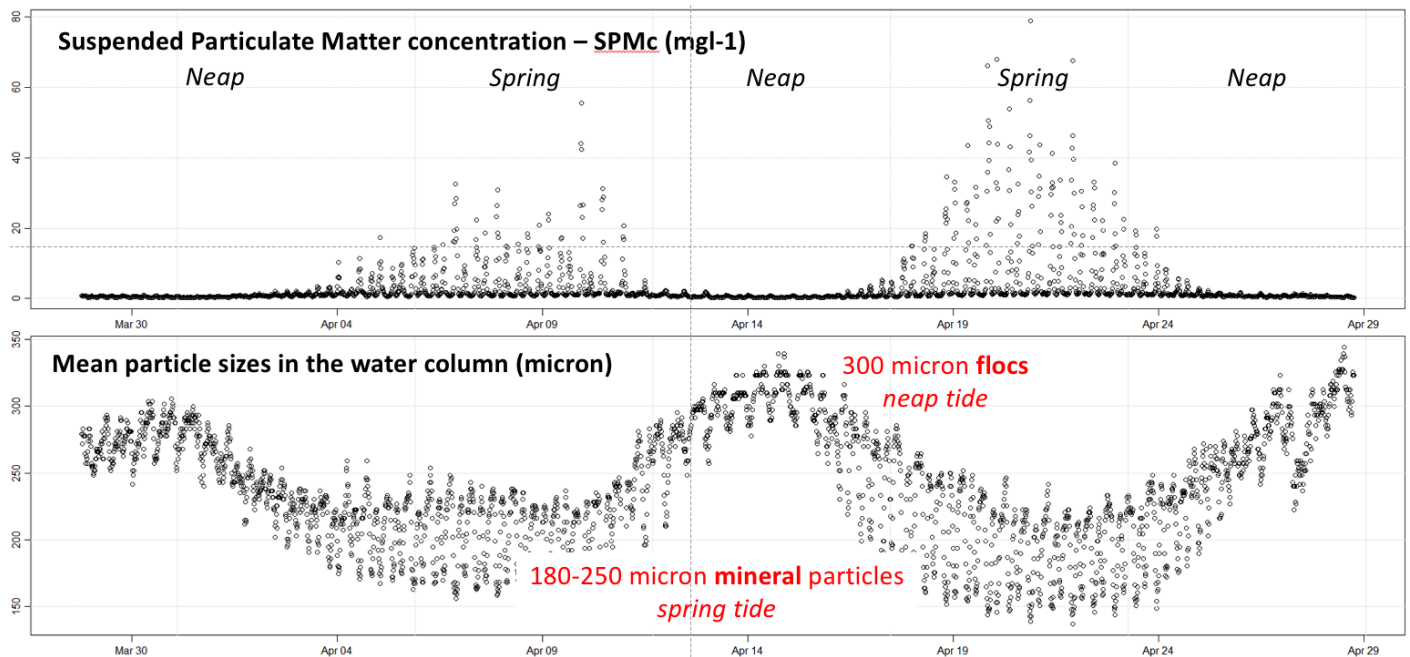
De korrelgrootteverdelingen van de sedimentmonsters genomen in een sleepopperzuiger toonden systematisch bimodale populaties met een piek van ongeveer 25 μm en één van ongeveer 300 μm , respectievelijk overeenkomende met de fractie die in het water verder zal worden verspreid en met de zeebodemfractie. Recentste berekeningen schatten dat per extractie-event voor een schip van $\pm 12000 \text{ m}^3$ rond 16 ton fijnkorrelig materiaal in het zeewater wordt gebracht (Baeye et al., 2019). In 2019 opereerden in Sector 4a, per dag, tot drie schepen die tweemaal per dag extraheerden.

Figuur 2 is de langste tijdsreeks die werd bekomen met het meetframe dat werd uitgezet aan de rand van Sector 4a. Resultaten wijzen op een sterke variatie van de concentratie van zwevende deeltjes (SPMc) met geen resuspensie van materiaal tijdens doottij, en concentraties van meer dan 0.04 gl^{-1} tijdens springtij. De tijdsreeks toont een grote variatie in de gemiddelde deeltjesgrootte, waarbij het duidelijk is

dat de fijne zandfractie (125-250 μm) het gemakkelijkst transporteerbaar is onder het huidige getijderegime.

Figuur 2. Tijdreeks (43 dagen) van SPMc en gemiddelde deeltjesgrootte op 1.5 meter boven de bodem.

De variatie over verschillende doottij-springtijcycli (maart-april 2019) wordt getoond. De metingen zijn afkomstig van een akoestische backscattersensor gemonteerd in een bodemframe op een zandbanklocatie aan de rand van Sector 4a, Noordhinder. Opvallend zijn de hoogste gemiddelde deeltjesgroottes nabij de bodem tijdens doottij, als gevolg van flocculatie, terwijl kleinere afmetingen worden gevonden bij hoge stroomsnelheden. Dit wijst op een proces van afbreken van vlokken bij hoge stroomsnelheden en aggregatie in vlokken bij lage stroomsnelheden.



De vorming van vlokken (grootste deeltjesgrootte) tijdens doottij duidt tevens het belang aan om flocculatie mee te nemen bij het modelleren van de verspreiding van sedimentpluimen. De metingen lieten niet toe om een systematische verhoging in SPMc aan te tonen ten gevolge van extractie, wellicht door sterke variaties in ruimte (horizontaal en verticaal) en tijd. Minimaal zijn de nieuwe metingen kritisch om sedimentpluimmodellen te verbeteren en referentiemateriaal voor toekomstige evaluaties op te bouwen.

Zeebodemsedimentkarakteristieken in het nabije veld van extracties

De gedetailleerde bodemmonsters die via de korte kernen (en 1-cm snedes) op de zandbanken werden verkregen, lieten een verrijking zien van organisch materiaal op locaties waar extractie plaatsvindt, en dit zowel in Sector 4a en Sector 4c (Noordhinder respectievelijk Oosthinder). Verder werd een afname van het carbonaatgehalte gemeten door vergelijking van tijdsreeksmonsters van Sector 4c van 2014, 2018 en 2019 (Tabel 1). Zie Kint & Van Lancker (2020) voor een uitvoerige weergave van de resultaten.

Tabel 1. Gemiddelde (maximum) gehalte aan organisch materiaal (OM, %), en calciumcarbonaat (CC, %, grijs) in het sediment van de bovenste centimeters voor acht locaties in Sector 4c, Oosthinder zandbank, in 2014, 2018 en 2019.

Locaties zijn ingekleurd volgens relatief belang van extractiedruk (van groen, geel, oranje naar rood). In 2019 werd niet ontgonnen in Sector 4c.

	Loc1	Loc2	Loc3	Loc4	Loc5	Loc6	Loc7	Loc8
2014*	0.80 (1.20) 6.55 (35.00)	1.08 (1.40) 6.72 (15.00)	1.10 (1.45) 7.68 (13.00)	/	/	/	1.59 (2.10)	1.13 (1.75) 9.74 (22.50)
2018**	1.13 (1.84)	1.99 (2.47)	2.59 (3.93)	1.76 (2.41)	3.06 (4.04)	1.86 (3.27)	1.34 (1.96)	0.95 (2.05)
2019***	2.53 (5.69)	0.98 (1.51)	3.78 (11.29)	1.23 (2.52)	1.52 (1.77)	1.98 (3.17)	1.47 (1.95)	1.39 (4.39)
	1.59 (2.13)	2.02 (3.80)	2.11 (3.60)	1.28 (2.04)	1.20 (2.17)	1.50 (2.24)	1.09 (1.57)	1.17 (2.26)
	0.82 (1.08)	2.07 (5.91)	6.26 (10.69)	1.89 (2.39)	1.76 (2.20)	2.02 (2.65)	1.77 (3.10)	2.93 (3.92)

Grootteorde precisie van de metingen: *0.05 %, 1.75 %; ** 0.35 %, 0.22 %; ***0.18 %, 0.18 %, voor OM en CC respectievelijk.

Uitgaande van deze stalen kon geen systematische aanrijking van fijn zand worden aangetoond. Het is aannemelijk dat dergelijk proces zich wel degelijk voordoet omwille van segregatie van de sedimentfracties tijdens de extractie. De fijne zandfractie is sowieso het meeste mobiel (zie hoger) en wordt actief getransporteerd door het getij. Verdere analyse van de invloed van de ruimtelijke variatie kan meer inzicht geven.

Zeebodemsedimentkarakteristieken in het verveld van extracties

Het Habitatrictlijngebied ten zuiden van de extractiesectoren is gekend als zijnde een belangrijk grindgebied, althans wat de geulen betreft. Multibeammetingen en kartering uit het verleden (Van Lancker et al., 2007) toonden een akoestische signatuur die met het voorkomen van grind geassocieerd werd. Recente akoestische metingen en visuele observaties tonen echter ook het voorkomen van zandribbelsvelden wat wijst op een zanddynamiek en een zekere zandbeschikbaarheid om deze bodemvormen te ontwikkelen. Kritisch hierbij is de zanddikte, en in te kunnen schatten of deze toeneemt en zou kunnen leiden tot begraving van de grindbedden. Een langdurige begraving is nefast voor de ontwikkeling van de biodiversiteit die met deze grindbedden gepaard gaat. De meeste pogingen om de zanddikte te bepalen, via bemonstering, falen, gezien er wel degelijk grind aanwezig is. Het grind blokkeerde hierbij het staalnametuig (Van Veen en boxcorers) waardoor geen representatief beeld van de zeebodemsamenstelling kon worden bekomen. Het gebruik van een Hamon grijper is wel succesvol, maar deze kan enkel de aanwezigheid van zand en grind bevestigen zonder duiding van zanddiktes. Voorts werd ingezet op het nemen van videobeelden. Deze tonen zand en grind, maar laten ook niet toe de dikte te bepalen. Wel werden deze gebruikt, in combinatie met bemonsteringen, om multibeamtijdsreeksen te valideren naar sedimenttype toe (zeven campagnes in de periode 2004-2015) in een zone die de hotspots van grindbiodiversiteit omvatten (zie Montereale Gavazzi et al. (2018) voor uitgebreide resultaten). Deze komen voor in de troggen van barchaanduinen (zie ook Van Lancker et al. (2016) voor het procesonderzoek uitgevoerd in 2011-2016). De resultaten lieten veranderingen zien in de verhouding hard/zachte substraten met een minimum van het grindoppervlak in 2014, de piekperiode van de winning, maar ook een uitzonderlijk jaar in sedimentdynamiek (Francken et al., 2017). Na 2014, veranderde de ratio hard/zacht opnieuw ten gunste van het grindvoorkomen. De resultaten waren echter vooral indicatief voor de natuurlijke dynamiek en toonden ook een belangrijke bodemvormmigratie aan. Verticale diepteverschillen vielen binnen de foutenmarge van de metingen. De verdere doorgedreven analyse van de multibeamterugverstrooiingswaarden in Montereale Gavazzi et al. (2018) wezen eerder op een verlies van grind ten gunste van zand, maar tot hiertoe is de systematiek en de significantie van dit proces nog niet aangetoond. De korte kernen die door wetenschappelijke duikers werden genomen in gebieden waar duikers vroeger geen zanddiktes hadden gemeten toonden een zanddikte van 8-10 cm (2019), en voor het eerst werd aangetoond dat in de accumulatie van zand tevens een fijne fractie aanwezig was. Micro-CT scans toonden dat de poriën van de permeabele middelgrove tot grove zanden gevuld zijn met dit fijnkorrelig materiaal (zie Van Lancker et al., 2020). Of dit nadelige gevolgen kan hebben voor de grindgerelateerde fauna en flora dient verder onderzocht.

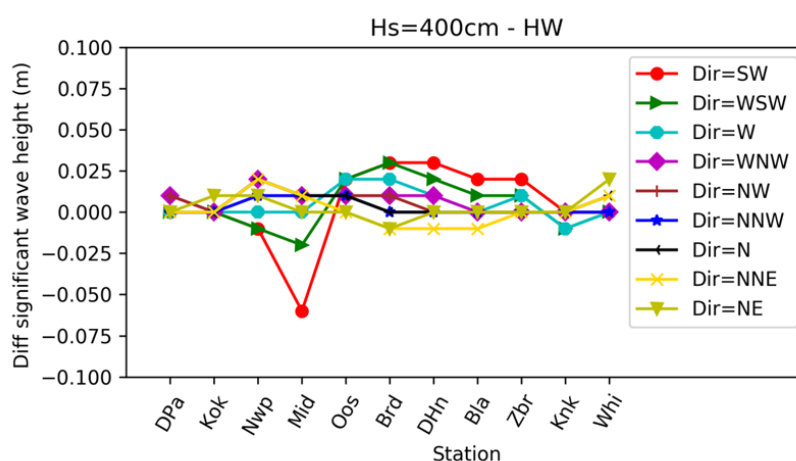
2.3.2. Proces- en systeemmodellering voor een beter begrip van de keten activiteit-druk en effecten

Modellering van hydrodynamica en golven

Om de effecten op de kustbescherming te evalueren zijn zowel het normale golfklimaat als de golfcondities tijdens een 1000-jarige storm in beschouwing genomen. De waterstanden zijn bij de extractiescenario's gelijk gebleven omwille van de geringe omvang van de winningszones in vergelijking met het zuidelijke Noordzeegebied. Algemeen gezien is het normale golfklimaat bepalend voor de positie van de kustlijn. Verschillen kunnen optreden in het kustnabij golfgedreven sedimenttransport en leiden tot meer erosie, evenals kan het golfgedreven zeewaarts sedimenttransport versterkt worden, wat ook kan resulteren in erosie van de kustlijn. De intensiteiten van deze transporten zijn evenredig met de significante golfhoogte. Uit de resultaten van het SWAN-model werden echter zeer kleine veranderingen van de significante golfhoogte langs de kust berekend en waren deze gemiddeld minder dan $\pm 1\%$ (Figuur 3). De effecten nabij de extractie zelf kunnen aanzienlijk zijn, maar het effect van de extractie op het kustnabije golfklimaat en dus de relatie met mogelijke kusterosie kunnen als verwaarloosbaar worden beschouwd.

Figuur 3. Modellering van verschillen in golfhoogte m.b.t. scenario's van extractie.

Toename van significante golfhoogte bij verschillende kuststations (DPA: De Panne tot Knk: Knokke) en bij de Westhinder, gesimuleerd met de nieuwe voorgestelde extractielimiet ten opzichte van een 'zonder extractie'-scenario. Golven aan de grens hebben een significante golfhoogte van 4.0 m, windsnelheid = 22 ms^{-1} , en rekening houdend met verschillende golf- en windrichtingen en met een hoogwatersituatie (gemiddeld zeeniveau +2.33 m).



De omstandigheden van een 1000-jarige extreme storm bepalen het veiligheidsniveau aan de kust. Hogere golfhoogtes zullen leiden tot grotere erosie van duinen en stranden en tot een grotere kans op overstroming van zeedijken en constructies in de havens. Uit de resultaten van het SWAN-model werd een zeer kleine toename van de golfhoogte waargenomen, namelijk maximaal 0,05 m. Deze toename is echter zo klein dat deze voor de beoordeling van het veiligheidsniveau aan de kust als verwaarloosbaar werd beschouwd. Deze conclusie werd toegeschreven aan de grote afstand van de winningssectoren tot de kustlijn, namelijk meer dan 10 km.

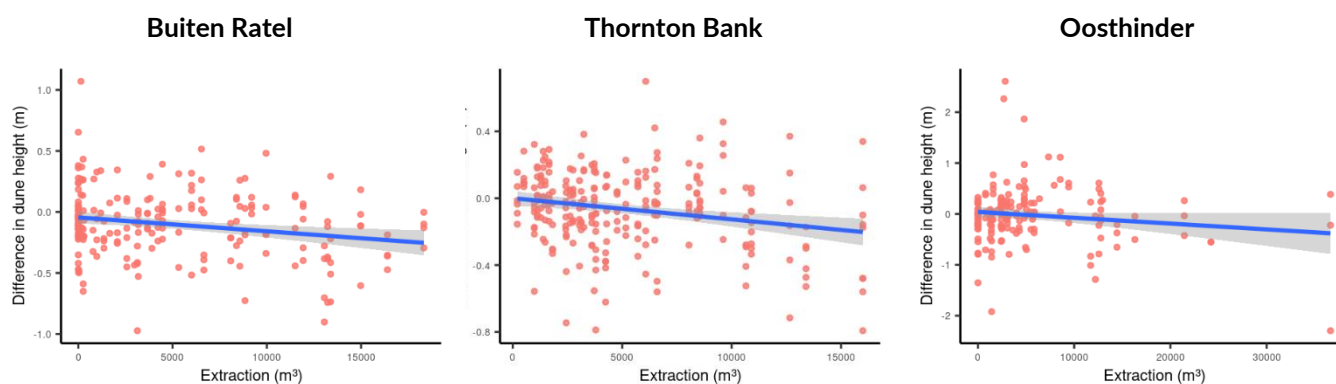
Karakterisering duinendynamiek voor een beter systeembegrip

Door de geautomatiseerde analyse van alle duinen in de ontginningsgebieden (datasets FOD Economie) konden verschillende parameters worden berekend en verder onderzocht in relatie tot andere datasets. Eén figuur wordt hier getoond (Figuur 4) betrekking hebbende op de onderzoeksvraag of de duinontwikkeling wordt beïnvloed door de zandwinning. De procedure bestaat uit: (1) het toekennen van een extractiehoeveelheid aan elke duin, in een buffer van 25 m (d.w.z. de hoeveelheid tussen twee opeenvolgende campagnes) door de duinendataset te koppelen aan de database met informatie uit het

elektronisch monitoringsysteem van de schepen (EMS); (2) het herstellen van de duinen met het geëxtraheerde volume; (3) visualisatie van het verschil in (herstelde) duinhoogte tussen de opeenvolgende campagnes ten opzichte van het onttrokken volume; (4) evaluatie van de residuele evolutie in duinhoogte. Hierbij wordt een afnemende trend in de duinhoogte bekomen die toeneemt naarmate de ontginning in een gebied intensiever wordt. Dit wijst op een langzamer herstel en betekent ook dat langetermijnsvoorspellingen van de afname van sedimentvolumes op gewonnen zandbanken meer erosie moeten verrekenen dan wat op basis van alleen de onttrekkingssnelheid zou worden voorspeld. Alhoewel deze bevindingen consistent zijn, dient het beklemtoond te worden dat onnauwkeurigheden op de EMS-geëxtraheerde hoeveelheden (over- en onderschattingen), de verticale fout op de multibeamdatasets en de geautomatiseerde procedure zelf, de resultaten kunnen beïnvloeden.

Figuur 4. Residuele hoogte-evolutie van zandduinen in de aggregaatextractiezones.

Evolutie in het verschil in duinhoogte tussen alle opeenvolgende campagnes en voor alle onderzochte duinen (X-as), na restauratie van de duinhoogte op basis van EMS gegevens, en dit geplot t.o.v. de cumulatieve extractiehoeveelheden. Hier getoond voor drie meetgebieden. Zie tekst voor verdere uitleg.



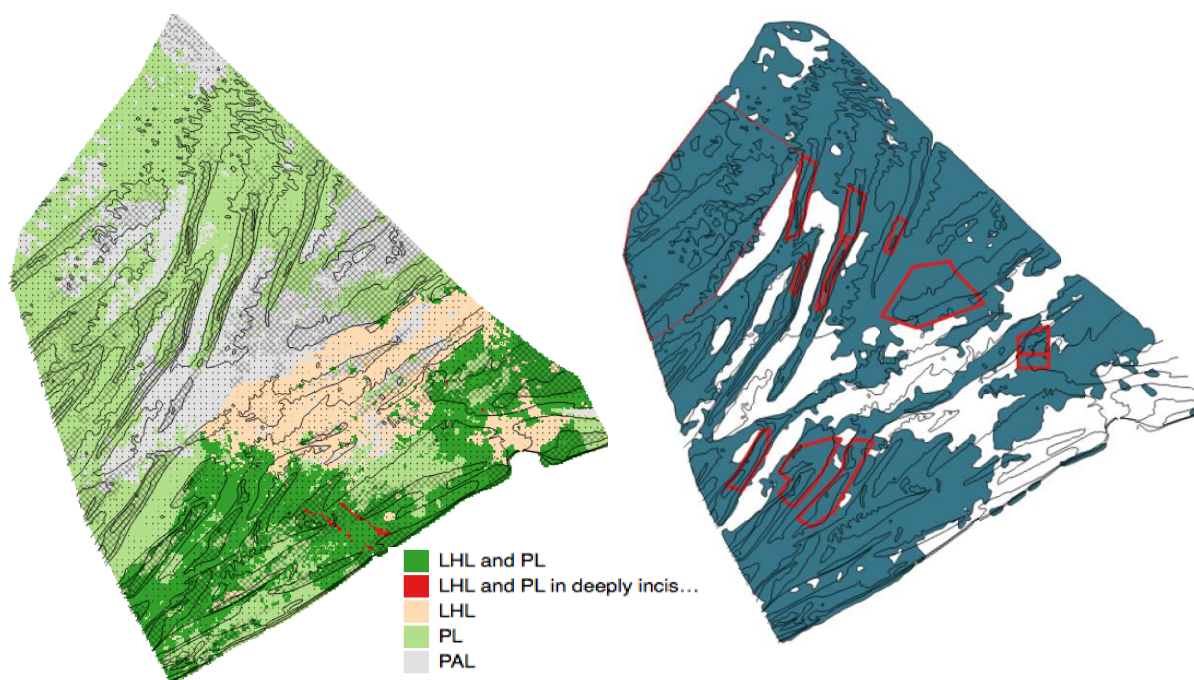
2.3.3. Naar een meer duurzaam gebruik van mariene grondstoffen

Toename van de kennisbasis van de zeebodem

Twee voorbeelden worden hier gegeven over de manier waarop de kennisbank voor geologische hulpbronnen, zoals die in het TILES-project is opgebouwd, verder wordt gevaloriseerd (Figuur 5). De basis is het op voxels gebaseerde geologische ondergrondmodel (downloadbaar via het online beschikbaar gemaakte beslissingsondersteunend systeem (afmetingen XYZ: 200 x 200 x 1 m) (<http://www.bmdc.be/tiles-dss/#>; TILES Consortium, 2018; zie Van Lancker et al. (2019) voor een onderbouwing). Voorts zijn de procedures voor het kwantificeren en kwalificeren van alle lithologische beschrijvingen die, samen met de uitgebreide seismische databank van de Universiteit Gent, de basis vormden voor het voxelmodelleringsproces, gepubliceerd (Kint et al., 2020). Zie Hademenos et al. (2018) voor het voxelmodelleringsproces en het resulterende ondergrondmodel. Voor een uitgebreide discussie over het belang van onzekerheid in beslissingsondersteunende instrumenten wordt verwezen naar De Mol (2019).

Figuur 5. Voorbeelden van de verdere digitalisering van de geologische kennisbasis.

Links: Profielkaart van de opbouw van het Kwartair boven de top van het Paleogeen (PAL): geeft een indicatie van de opeenvolging van geologische lagen onder het Boven-Holoceen (LHL en PL: Onder-Holoceen en het Pleistoceen); rood geeft aan dat de Pleistoceenafzettingen in diep ingesneden dalen voorkomen; LHL: alleen het Onder-Holoceen komt voor onder het Boven-Holoceen; vergelijkbaar voor PL: hier Boven-Holoceen direct op de Pleistoceenafzettingen. PAL is waar het Paleogeen (meestal klei) zich direct onder het Boven-Holoceen bevindt. De overlappende arcering en stippelpunten wijzen op respectievelijk een dikke en een dunne Kwartaire bedekking. In de rechterfiguur wordt dit nog explicieter gemaakt. Hier is het TILES ondergrondmodel bevroegd om alle gebieden aan te geven waar per voxel zand, als hoofdgrondsoort, over de eerste vijf meter consequent gemodelleerd is. In dit geval wordt geen onderscheid gemaakt tussen de ouderdom van de geologische lagen. De witte gebieden komen ruwweg overeen met de door slibgedomineerde gebieden in de kustzone, en de door grindgedomineerde gebieden voor de meer zeewaartse zone (afgeleid van <http://www.bmdc.be/tiles-dss/#>; TILES Consortium, 2018).



Synthese van resultaten m.b.t. de Kaderrichtlijn Mariene Strategie

Hydrografische condities

Het beoordelen van veranderingen in de bodemschuifspanning is een praktische aanpak gebleken bij het modelleren van scenario's van grootschalige extractiepraktijken en werd ook gebruikt bij de evaluatie van de impact van het nieuw referentieoppervlak (Degrendele et al., 2017) voor de winning op de kust (Van den Eynde et al., 2019b voor details) (zie 1.3.2). Het nut om veranderingen in troebelheid te gebruiken als indicator van goede milieutoestand werd vooral onderzocht in het Belspo-project INDI67 (Fettweis et al., 2020). De conclusie was dat alleen trends in SPMc kunnen beoordeeld worden wat aangeeft dat metingen van troebelheid, een optische maatstaf, eerst dienen omgezet te worden naar massaconcentraties (Fettweis et al., 2019). Uit de monitoring is echter nogmaals gebleken dat de ruimtelijke en temporele variabiliteit van SPMc zeer variabel is en vooral in gebieden met lage concentraties is de onzekerheid op de metingen heel groot wat trendanalyses sterk bemoeilijkt. Het INDI67 rapport geeft een overzicht van een aantal nieuw gepubliceerde meet- en analyseprotocollen (Fettweis et al., 2020) die verder worden gebruikt in de effectbeoordeling. De metingen, zoals beschreven in sectie 1.2.1, zijn heel nieuw voor de Hinderbankenregio waardoor het in eerste instantie basisdatasets blijven waartegenover toekomstige datasets kunnen vergeleken worden.

Zeebodemintegriteit

Significante vooruitgang werd geboekt in de methodologische procedures voor de detectie en het beoordelen van veranderingen in de grote sedimenttypen aan de hand van multibeamdiepte en terugverstrooiingswaarden (zie Montereale Gavazzi, 2019 voor diepgaande analyses en discussies). Het onderzoek toonde ook het blijvend belang aan van een goede terreinverificatie, zowel inzake bemonstering én visuele waarnemingen, alsook het belang van kortetermijnsprocessen die het terugverstrooiingssignaal beïnvloeden (Montereale Gavazzi et al., 2019).

Naar veranderingen in zeebodemintegriteit toe zijn in het nabije veld geen veranderingen in de grote sedimenttypes waargenomen. Voor de sedimentbemonsteringstijdreeks op Sector 4c werd wel een afname van het carbonaatgehalte gemeten wat op een homogenisatieproces zou kunnen duiden. Dit blijkt ook uit de monitoring van FOD economie (Barette et al., 2020) en ILVO (Wyns et al., 2020).

In het Habitatrichtlijngebied werden lokaal, in de gekende hotspots van biodiversiteit (Houziaux et al., 2008), veranderingen waargenomen in de GES indicator 'ratio hard versus zacht substraat', waarvan de trend positief dient te evolueren volgens de Belgische implementatie van de KRMS. De tijdsreeksdataset, op basis van multibeam diepte en terugverstrooiingswaarden, toonde een fluctuatie die aan natuurlijke en door de mens-gestuurde invloeden kan worden toegeschreven (Montereale Gavazzi et al., 2018). Van de recente observaties die een toename in zanddikte, inclusief slibaanrijking in deze permeabele zanden, aantoonde, dienen verder de implicaties naar de structuur en functies van dergelijke zeebodems te worden aangetoond. Dergelijk onderzoek wordt momenteel uitgevoerd in het Belpo project FaCE-It¹.

Tot slot, zijn ook de morfologische veranderingen van belang bij de evaluatie van zeebodemintegriteit, doch hiervoor zijn nog geen richtlijnen uitgewerkt binnen de KRMS. Eens overeenstemming op Europees niveau is bereikt, zullen de automatische duinanalyseprocedures verder gevaloriseerd worden.

2.4. Conclusies

Het KBIN monitoringskader, afgestemd op de beoordeling van veranderingen in zeebodemintegriteit en hydrografische condities (KRMS), werd verder succesvol uitgebouwd. In de fase 2017-2020 werd vooral ingezet op methodologische vooruitgang om veranderingen in deze descriptoren van goede milieutoestand beter te kwantificeren. Het dient beklemtoond dat veranderingsdetectie een complexe aangelegenheid blijft en gevoelig is aan vele factoren die onderzoek en ruimere samenwerking vereisen. Veranderingen zijn vaak gering, maar kunnen toch nefast blijken voor het zeebodemmilieu. Daarom is het van belang dat metingen, in combinatie met modellen, leiden tot een beter begrip van de processen, de schaalgrootte waarop ze werken, en de systematiek. Foutmarges dienen gekend te zijn van de instrumenten die bij het toezicht worden gebruikt, wat een onderzoek op zich is. Des te meer is dit van belang bij het beoordelen van veranderingen in de watereigenschappen van gebieden met een lage sedimentconcentratie. De concentraties zijn vaak te laag voor herhaalbare, goede metingen. Het ontwikkelen van robuuste meetprotocollen en kwaliteitsstandaarden stond dan ook voorop, evenals instrumentkalibratie. Bijkomend zijn sedimentprocessen in zandbankomgevingen ruimtelijk en in de tijd zeer variabel wat noopt tot flexibiliteit van het monitoringprogramma. Sinds 2011 worden dan ook op verschillende locaties metingen uitgevoerd, worden er vergelijkende datasets samengesteld, en wordt de basisinformatie en systeemkennis vergroot om beter inzicht te krijgen in de oorzaak-gevolgrelaties.

Tot nu toe waren veranderingen in watereigenschappen alleen zichtbaar in het nabije veld van de winningsactiviteiten. Deeltjesgroottespectra tonen zowel een waterkolom- als een zeebodem-gerelateerde component. Het zand dat bij extractie vrijkomt zet zich af in het nabije veld terwijl de fijnere deeltjes zich verder verspreiden. Organische aanrijking werd aangetoond in gebieden met winningsactiviteiten wat ook het verspreidingsgedrag van de fijnere deeltjes kan beïnvloeden. Kritisch blijft het voorspellen waar de fijnkorrelige deeltjes zich vestigen en hoe dit het zeebodemmilieu beïnvloedt, vooral in gebieden met grindbedden met een rijkere biodiversiteit. In de hotspots van grindbiodiversiteit waar in 2006-2007 door duikers geen zanddikte werd gemeten, werd in 2019 een zandbedekking van 8-10 cm gemeten. Het zand bestond vooral uit permeabel middelgrof tot grof materiaal dat in de omgeving aanwezig is. De poriën van de zandlaag bevatten echter

¹<https://www.researchgate.net/project/FaCE-It-Functional-biodiversity-in-a-Changing-sedimentary-Environment-Implications-for-biogeochemistry-and-food-webs-in-a-managerial-setting>.

fijnkorrelig materiaal wat nu voor het eerst duidelijk werd aangetoond door middel van micro-CT scans. Of dit leidt tot poriënverstopping die de functies die de zeebodem aan het ecosysteem levert kan verminderen, moet verder worden onderzocht. In vergelijking met historische data, wijzen zeebodemkartering en visuele waarnemingen eerder op een toenemende aanwezigheid van zand. Vanuit dieptemetingen is dit echter moeilijk af te leiden temeer dergelijke veranderingen binnen de foutenmarge van de dieptemetingen vallen (+/- 30 cm in 30 m waterdiepte). Een zandverbreding over grindgebieden leidt tot een homogenisering van de zeebodem, waardoor er minder structuur is voor benthische en epibenthische soorten. De zanddikte is echter nauwelijks gekend, en, indien dit gering is en blijft, bestaat de mogelijkheid dat grindfauna hier geen adverse effecten van ondervindt. In de volgende fase van de monitoring zullen historische multibeamdatasets opnieuw worden geanalyseerd, met vooral aandacht voor patroonveranderingen. Ook zullen verschillende bron-tot-afzettingsscenario's worden onderzocht, rekening houdend met verschillende menselijke activiteiten, in een poging om typische sedimentbronsignatures te vinden. Op basis hiervan worden nieuwe inzichten verwacht in cumulatieve, en in-combinatie-effecten.

Tot slot zijn er, voor verschillende ontginningsgebieden, aanwijzingen dat ondanks het herstel van duinstructuren na extractie, de ontwikkeling van de duinhoogte licht negatief blijft. Over het geheel genomen zijn de duinhoogtes lager dan op basis van de golfenlengte zou verwacht worden. De significantie hiervan dient in een ruimer kader te worden bestudeerd waarbij de gedetailleerde en vernieuwde multibeam-EMS analyses van FOD Economie leidend zullen zijn.

2.5. Aanbevelingen

De aanbevelingen hebben betrekking op: (1) Streven naar een snel herstel van de zeebodem na verstoring (veerkracht van het systeem), d.w.z. geen significante verstoring van natuurlijke processen; (2) Voorkomen van veranderingen in de habitattypen (sedimentgerelateerd); (3) Voorkomen van onnatuurlijke fragmentatie van de zeebodem; en (4) Voorkomen van permanente verandering van de hydrografische omstandigheden.

(1) en (2) geven het belang aan om de winning te beperken tot gebieden waar voldoende zand met vergelijkbare kenmerken aanwezig is, met name het vermijden van gebieden met kleiachtige, slib- of grindlagen. Dit kan het best worden bereikt door de winning te beperken tot het recentst afgezette geologische laagpakket (Boven-Holoceen). Dit kan nu worden opgevraagd met behulp van het vrij toegankelijke voxel-gebaseerde grondstoffenmodel (TILES Consortium, 2018). In gebieden met een dunne deklaag van het Boven-Holoceen is het waarschijnlijker dat er veranderingen in de sedimenttypes zullen optreden wat ook is gebleken uit de monitoring van KBIN, FOD Economie en ILVO. De verandering kan permanent worden en leiden tot fysisch verlies van een habitat.

Om sedimentveranderingen in het verre veld van de winningsactiviteiten te vermijden, wordt geadviseerd om de activiteit te spreiden over verschillende sectoren en de timing van de winning te spreiden over de getijdencyclus, waar mogelijk. Voortdurende winning in één sector en consequent tijdens de eb fase van het getij leidt tot preferentiële afzetting van door winning geïnduceerd fijnkorrelig materiaal in de richting van het Habitatrichtlijngebied. Bij het combineren van winningsactiviteiten met havenonderhoudswerkzaamheden in de door slibgedomineerde kustzone (Baeye et al., 2019) dient de beun na de onderhoudswerkzaamheden goed te worden schoongemaakt om geen kustslib naar de offshore-zone te brengen.

(3) Bij het plannen van grootschalige winningsactiviteiten moet rekening worden gehouden met veranderingen in bodemschuifspanning. Hoewel de berekening en modellering van deze indicator van goede milieutoestand nog veel onzekerheden kent, geven de modelleerresultaten inzicht in waar de meeste veranderingen in de sedimentverdeling waarschijnlijk zullen optreden en hoe hierop beter kan worden geanticipeerd. Ook is de golfmodellering onder verschillende winningsscenario's een leidraad om de hoogteverlaging van de zandbanken te beperken en zo cascade-effecten in de richting van de kust te voorkomen.

Dankwoord:

De studies worden financieel gesteund door het ZAGRI-programma, betaald uit de opbrengsten van de winningsactiviteiten, en de Vlaamse overheid, Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, Kust (MOZ4: Contract 211.177). De BELSPO Brain-be projecten TILES (contract BR/121/A2/TILES) en INDI67 (contract BR/143/A2/INDI67) lieten significant nieuw onderzoek toe m.b.t. tot de kwantificering van de natuurlijke variabiliteit met inbegrip van het geologische substraat; en de modellering van de bodemschuifspanning en de

kwantificering van sedimentveranderingen op basis van multibeamgegevens. RV Belgica scheepstijd werd toegekend door KBIN OD Natuur en BELSPO. De commandant en de bemanning worden erkend voor hun steun tijdens de meetcampagnes. Lieven Naudts, en andere teamleden van de Meetdienst Oostende (MSO) (OD Nature) worden bedankt voor hun logistieke ondersteuning, vooral tijdens de inzet van de meetframes. Een speciaal woord van dank gaat uit naar Reinhilde Van den Branden voor haar continue ondersteuning tijdens alle metingen, en voor het samen met Gregory De Schepper verwerken van de gegevens over de baggeractiviteiten. Het Vlaams Instituut van de Zee, VLIZ, wordt bedankt voor het gebruik van bijkomende meetinstrumentatie. Sedimentanalyses werden uitgevoerd door de Universiteit Gent, Departement Geologie (Prof. S. Bertrand); de micro-CT scans werden uitgevoerd door de 'Pore-scale Processes in Geomaterials Research group' (Prof. V. Cnudde) aan de UGCT. Bovendien worden verschillende OD Nature-teams bedankt voor hun bijdragen: ECOCHEM voor de analyses van de waterfiltraties en participatie aan de campagnes; MFC, Sébastien Legrand, voor gemodelleerde hydro-meteorologische gegevens. Voorts werden metingen gebruikt van de Vlaamse overheid, IVA MDK, afdeling Kust, 'Meetnet Vlaamse Banken' en het bathymetrieportaal. De FOD Economie, Dienst voor het Continentaal Plat (COPCO) wordt bedankt voor de hulp bij de verwerking van multibeamgegevens en de actieve samenwerking in het algemeen. COPCO en ILVO worden bedankt voor het delen van gegevens en ideeën.

Referenties:

Baeye, M., Van den Eynde, D., Van Lancker, V., Francken, F. (2019). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder banks. Data report Year 2017. Report ZAGRI-MOZ4/X/MB/201905/EN/TR01. Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, Brussels, 28 pp.

Barette, F., Degrendele, K., Roche, M. (2020, dit volume). Monitoring van de zandwinning en de impact op de zeebodem.

Belgian State (2018). Actualisatie van de initiële beoordeling voor de Belgische mariene wateren. Kaderrichtlijn Mariene Strategie – Art. 8 lid 1a & 1b. BMM, Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu, Brussel, België, 243 pp.

Bi, Q., Toorman, E.A. (2015). Mixed-sediment transport modelling in the Scheldt estuary with a physics based bottom friction law. *Ocean Dynamics*, 65, 555-587.

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, *Journal of Geophysical Research*, C4, 104, 7649-7666.

Decrop, B. (2016) Numerical and experimental modelling of near-field overflow dredging plumes. PhD, Universiteit Gent and Katholieke Universiteit Leuven, 335 pp.

Dulière, V. (2017). Model bathymetries for the new North Sea COHERENS set up. Technical Report, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, 5 pp.

Degrendele, K. (2016). Bepalen van een nieuw referentieoppervlak. Tussentijds rapport. FOD Economie, K.M.O., Middenstand en Energie, Kwaliteit en Veiligheid, Kwaliteit en Innovatie, Continentaal Plat, 19 pp.

Degrendele, K., Roche, M., Vandereyken, H. (2017). New limits for the sand extraction on the Belgian part of the North Sea? Proceedings Study day, Belgian marine sand: a scarce resource? 9 June 2017, Ostend, K. Degrendele and H. Vandereyken (eds), FPS Economy, S.M.E.s, Self-employed and Energy, 135-146.

De Mol, R. (2019). Handling imperfect information in practical applications. University of Ghent, Department of Telecommunications and information processing. Unpublished PhD, 176 pp.

Fettweis, M., Riethmüller, R., Verney, R., Becker, M., Backers, J., Baeye, M., ... & Deloffre, J. (2019). Uncertainties associated with in situ high-frequency long-term observations of suspended particulate matter concentration using optical and acoustic sensors. *Progress in Oceanography*, 178, 102162.

Fettweis, M., Toorman, E., Verney, R., Chapalain, M., Legrand, S., Lurton, X., Montereale Gavazzi, G., Roche, M., Shen, X., Van den Eynde, D., Van Lancker, V. (2020). INDI67: Developments of Indicators to improve monitoring of MSFD descriptors 6 and 7. Contract – BR/143/A2. Final Report. Brussels: Belgian Science Policy Office 2020, Brain-be, Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks, 53 pp.

Francken, F., Van den Eynde, D., Van Lancker, V. (2017). Application of a large dataset of sediment transport parameters: variability in sediment transport in the HBMC area. Report MOZ4/X/FF/201706/EN/TR01, 19 pp

Hademenos, V., Stafleu, J., Missiaen, T., Kint, L., Van Lancker, V. (2018). 3D subsurface characterisation of the Belgian Continental Shelf: a new voxel modelling approach. *Netherlands Journal of Geosciences*, 98. <https://doi.org/10.1017/njg.2018.18>

Holthuijsen, L.H., Booij, N., Herbers, T.H.C. (1989). A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. *Coastal Engineering*, 13, 23-54.

- Holthuijsen, L.H., Booij, N., Ris, R.C. (1993). A spectral wave model for the coastal zone. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, USA, 630-641.
- Holthuijsen, L.H., Herman, A., Booij, N. (2003). Phase-decoupled refraction-diffraction for spectral wave models, *Coastal Engineering*, 49, 291-305.
- Houziaux, J.-S., Kerckhof, F., Degrendele, K., Roche, M.F., Norro, A. (2008). The Hinder banks: yet an important area for the Belgian marine biodiversity? Brussels: Belgian Science Policy, 248 pp.
- Kint, L., Van Lancker, V. (2020). Sediment analyses of ST1407, ST1807 and ST1909. Scientific report. Brussels, RBINS-OD Nature. Report ZAGRI-MOZ4/2/LK/2020/EN/SR01, 29 pp.
- Kint, L., Montereale Gavazzi, G., Van Lancker, V. (2018). Kaderrichtlijn Mariene Strategie. Beschrijvend element 6: Zeebodintegriteit. Ruimtelijke analyse fysisch verlies en fysische verstoring. Brussel, Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, 40 pp.
- Kint, L., Hademenos, V., De Mol, R., Stafleu, J., van Heteren, S., Van Lancker, V. (2020). Uncertainty assessment applied to marine subsurface datasets. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. <https://doi.org/10.1144/qjegh2020-028>.
- Lee, B.J., Kim, J., Hur, J., Choi, I.H., Toorman, E., Fettweis, M., Choi, J.W. (2019). Seasonal dynamics of organic matter composition and its effects on suspended sediment flocculation in river water. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2018WR024486>.
- Luyten, P. (Ed.) (2016). Coherens – A coupled hydrodynamic-ecological model for regional and shelf seas: user documentation. Version 2.6. RBINS Report, Operational Directorate Natural Environment, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Brussels, Belgium, 1554 pp.
- Montereale Gavazzi, G.O.A. (2019). Development of seafloor mapping strategies supporting integrated marine management: application of seafloor backscatter by multibeam echosounders. PhD Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 392 pp.
- Montereale Gavazzi, Roche, M., Lurton, X., Degrendele, K., Terseleer, N., Van Lancker, V. (2018). Seafloor change detection using multibeam echosounder backscatter: case study on the Belgian part of the North Sea. *Marine Geophysical Research*, 39(1-2), 229-247.
- Montereale Gavazzi, G., Roche, M., Degrendele, K., Lurton, X., Terseleer, N., Baeye, M., Francken, F., Van Lancker, V. (2019). Insights into the Short-Term Tidal Variability of Multibeam Backscatter from Field Experiments on Different Seafloor Types. *Geosciences*, 9(1), 34. <https://doi.org/10.3390/geosciences9010034>.
- Ris, R.C., 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. PhD Dissertation, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering. Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4. Delft, The Netherlands.
- Shen, X., Toorman, E.A., Fettweis, M., Lee, B.J., He, Q. (2019a). Simulating multimodal floc size distributions of suspended cohesive sediments with lognormal subordinates: Comparison with mixing jar and settling column experiments. *Coastal Engineering*, 148, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.03.002>.
- Shen, X., Toorman, E., Lee, B.J., Fettweis, M. (2019b). Effects of aquatic biofilms on flocculation processes of cohesive sediments: A modeling approach. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/2018JC014493>.
- Spearman, J.R., De Heer, A., Aarninkhof, S., Van Koningsveld, M. (2011). Validation of the TASS system for predicting the environmental effects of trailing suction hopper dredgers. *Terra et Aqua*, 125, 14-22.
- TILES Consortium (2018). Aggregate Resource Decision-support Tool: <http://www.bmdc.be/tiles-dss/#>. Brain-be project TILES (Transnational and Integrated Long-term Marine Exploitation Strategies, BR/121/A2/TILES), Belgian Science Policy, Brussels.
- UNEP (2019). Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland, 54 pp.
- Van den Eynde, D. (2016). Measuring, using ADV and ADP sensors, and modelling bottom shear stresses at the MOW1 site (Belgian continental shelf). Report MOMO-INDI67/1/DVDE/201608/EN/TR01, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, Brussels, 47 pp.
- Van den Eynde, D. (2017). The impact of extraction on the bottom shear stress using the proposed new extraction limit levels. Report ZAGRI-MOZ4-INDI67/1/DVDE/201706/EN/TR02, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, 37 pp.
- Van den Eynde, D., Baeye, M., Van Lancker, V. (2014). Validation of the OPTOS-FIN model in marine aggregate extraction zone4, Hinder Banks. Brussels, RBINS-OD Nature. Report ZAGRI-MOZ4/X/DVDE/201401/EN/TR/1, 40 pp.

Van den Eynde, D., Francken, F., Van Lancker, V. (2017). Effect of extraction of sand on the bottom shear stress on the Belgian Continental Shelf. Proceedings Study day, Belgian marine sand: a scarce resource? 9 June 2017, Ostend, K. Degrendele and H. Vandereyken (eds), FPS Economy, S.M.E.s, Self-employed and Energy, 67-86.

Van den Eynde D., Baeye, M., Francken, F., Montereale Gavazzi, G., Terseleer, N., Van Lancker, V. (2019a). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Period 1/1 – 31/12 2018. Brussels, RBINS-OD Nature. Report MOZ4-ZAGRI/X/DVDE/2019/EN/SR05, 23 pp. + 4 Annexes.

Van den Eynde, D., Verwaest, T., Trouw, K. (2019b). The impact of sand extraction on the wave height near the Belgian coast. Report MOZ4-ZAGRI/X/DVDE/201906/EN/TR03, RBINS-OD Nature and MUMM, Brussels, 44 pp.

Van Lancker, V., Du Four, I., Verfaillie, E., Deleu, S., Schelfaut, K., Fettweis, M., Van den Eynde, D., Francken, F., Monbaliu, J., Giardino, A., Portilla, J., Lanckneus, J., Moerkerke, G. and Degraer, S. (2007). Management, research and budgetting of aggregates in shelf seas related to end-users (Marebasse). Final Scientific Report + GIS@SEA DVD. Belgian Science Policy, 133 pp.

Van Lancker, V., Baeye, M., Fettweis, M., Francken, F., Van den Eynde, D. (2014). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Brussels, RBINS-OD Nature. Report <MOZ4-ZAGRI/X/VVL/201401/EN/SR01>, 384 pp. (9 Annexes).

Van Lancker, V., Baeye, M., Evangelinos, D., Van den Eynde, D. (2015). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Period 1/1 – 31/12 2014. Brussels, RBINS-OD Nature. Report <MOZ4-ZAGRI/I/VVL/201502/EN/SR01>, 74 pp. (+5 Annexes, 109 pp).

Van Lancker, V., Baeye, M., Montereale Gavazzi, G., Van den Eynde, D. (2016). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Scientific Report 3 – January-December 2015 and Synthesis for the period 2011-2015. Report MOZ4-ZAGRI/I/VVL/2016/EN/SR01, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, Brussels, Belgium, 276 pp.

Van Lancker, V., Francken, F., Montereale Gavazzi, G., Van den Eynde, D. (2017). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Scientific Report 4 – January-December 2016. Report MOZ4-ZAGRI/I/VVL/201712/EN/SR01, Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment, Brussels, Belgium, 107 pp.

Van Lancker, V., Kint, L. & Montereale Gavazzi, G. (2018). Fysische verstoring en verlies van de zeebodem (D6). In: Belgische Staat. Evaluatie van de goede milieutoestand van de Belgische mariene wateren. Kaderrichtlijn Mariene Strategie. BMM, Federale Overheidsdienst Volksgezondheid, Veiligheid van de Voedselketen en Leefmilieu, Brussel, België. (<https://odnature.naturalsciences.be/msfd/nl/assessments/2018/page-d6>).

Van Lancker, V., Francken, F., Kapel, M., Kint, L., Terseleer, N., Van den Eynde, D., Hademenos, V., Missiaen, T., De Mol, R., De Tré, G., Appleton, R., van Heteren, S., van Maanen, P.P., Stafleu, J., Stam, J., Degrendele, K., Roche, M. (2019). Transnational and Integrated Long-term Marine Exploitation Strategies (TILES). Final Report. Brussels: Belgian Science Policy, BRAIN-be - Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks, 75 pp.

Van Lancker, V., Baeye, M., Montereale Gavazzi, G., Kint, L., Terseleer, N., Van den Eynde, D. (2020). Monitoring of the impact of the extraction of marine aggregates, in casu sand, in the zone of the Hinder Banks. Period 1/1 – 31/12 2019 and Synthesis of results 2016-2019. Brussels, RBINS-OD Nature. Report <MOZ4-ZAGRI/I/VVL/2020/EN/SR01>.

Wyns L., Hostens K., De Backer A. (2020, dit volume). Het effect van zandwinning op het bodemleven in het Belgisch deel van de Noordzee.