

Monitoringsplan voor Meerjarige monitoring Fytoplanktensamenstelling en Primaire Productie

ID4 MONS no-regret actie primaire productie



Dick van Oevelen¹, Karline Soetaert¹, Louis Peperzak¹, Anouk Blauw² & Willem Stolte², Nicole
Dijkman³, Machteld Rijkeboer³

¹ Koninklijk Nederlands Instituut voor Zee Onderzoek, Yerseke ²

Deltares, Delft

³ Rijkswaterstaat-CIV, Lelystad

Datum oplevering 1^e versie: 1-Dec-2021

Datum oplevering 2e versie: 11-Feb-2022

Datum vastgesteld:

Inhoudsopgave

1. Inleiding	6
2. Informatiebehoefte vanuit MONS met betrekking tot fytoplankton en primaire productie	7
3. Wat wordt er al gemeten?	9
4. Randvoorwaarden en uitgangspunten	10
5. Monitoring van fytoplanktensamenstelling en pelagische primaire productie	12
Fytoplanktensamenstelling	12
Pelagische primaire productie.....	13
6. Aanvullingen op het MWTL-programma ten behoeve van fytoplanktensamenstelling en primaire productie	18
7. Vastemeetstations	20
Rationale	20
Locaties	21
Metingen, variabelen en instrumenten	25
Kosteninschatting	26
8. Ruimtelijkdekking	28
Satellietdata	28
Ferrybox	29
Kosteninschatting	31
9. Bentische primaire productie	32
Plan van aanpak	32
Fase 1. Regio's met potentiële bentische primaire productie en groei in de Noordzee: data- analyse	33
Fase 2. <i>In situ</i> metingen van bentische primaire productie.....	33

Fase 3. Mechanistische modellen.....	34
Fase 4. Bentische primaire productie.	35
Kosteninschatting	35
10. Referenties.....	36

Samenvatting

Het programma Monitoring-Onderzoek-Natuurherstel-Soortbescherming (MONS) heeft als doel de centrale vraag te beantwoorden of en hoe het veranderende gebruik van de Noordzee past binnen de ecologische draagkracht. Om te bepalen wat de ecologische draagkracht van het systeem is en hoe veranderend gebruik hierop effect gaat hebben is een breed, integraal en systematisch monitoringsprogramma nodig. In dit deelrapport worden aanbevelingen voor dit monitoringsprogramma gedaan om de vraag te kunnen beantwoorden "Wat zijn de (verwachte) regionale en temporele trends in fytoplankton samenstelling en primaire productie in een veranderende Noordzee?". In hoofdstuk 2 wordt de informatiebehoefte vanuit MONS geïnventariseerd ten aanzien van fytoplankton en (pelagische en bentische) primaire productie. Met name blijkt er vraag te zijn naar betere kennis van de fytoplanktonsamenstelling op hogere temporele en ruimtelijke resolutie en kennis van de primaire productie. In Hoofdstuk 3 wordt een kort overzicht gegeven van wat er al aan relevante metingen wordt gedaan en blijkt dat er onvoldoende data worden verzameld om aan de informatiebehoefte te voldoen. In Hoofdstuk 4 worden de uitgangspunten en randvoorwaarden beschreven waarmee is gewerkt. In Hoofdstuk 5 worden methoden beschreven waarmee de fytoplanktonsamenstelling en pelagisch primaire productie kunnen worden bepaald en waaruit gekozen kan worden voor het monitoringsprogramma. In de hoofdstukken 6, 7 en 8 worden aanbevelingen gedaan voor de monitoring van fytoplanktonsamenstelling en primaire productie via de huidige MWTL-campagnes, via het installeren van vaste meetstations t.b.v. hogere temporele resolutie en hoe de 'Ruimtelijke dekking' kan worden vergroot door gebruik te maken van FerryBoxen en satellietbeelden. Voor de bepaling van de bentische primaire productie, een specifieke vraag in MONS, is aanvullend onderzoek nodig dat in Hoofdstuk 9 wordt voorgesteld.

1. Inleiding

De druk op de Noordzee neemt toe. Nu al vraagt het mariene ecosysteem om bescherming en herstel op basis van bestaand gebruik en in de nabije toekomst worden er drie grote transitieën verwacht. Een energietransitie, waarbij op de Noordzee-beschikbare duurzame energiebronnen zoals wind en zon voor een belangrijk deel in de energiebehoefte van Nederland moeten voorzien, een voedseltransitie, waarbij mariene aquacultuur opgezet gaat worden t.b.v. de voedselvoorziening en een natuurtransitie, waarbij delen van de Noordzee als beschermde gebieden ingericht zullen worden. Gecombineerd met factoren als klimaatverandering, verzuring en autonome veranderingen zullen deze ontwikkelingen leiden tot veranderingen in het ecosysteem van de Noordzee (Asjes et al. 2021).

Het NZA (Noordzeeakkoord) wil de uitdagingen van een veranderend gebruik oppakken en een nieuwe balans vinden die binnen de ecologisch draagkracht van het ecosysteem valt. Het NZA schetst daarom een grote behoefte aan een integraal en systematisch onderzoeks- en monitoringsprogramma dat de basis vormt voor kennis over het functioneren van de Noordzee. Het programma Monitoring-Onderzoek-Natuurherstel-Soortbescherming (MONS) heeft als doel de centrale vraag te beantwoorden of en hoe het veranderende gebruik van de Noordzee past binnen de ecologische draagkracht van de Noordzee (Asjes et al. 2021). Daarbij staan twee vragen centraal, namelijk:

- *“Wat is de ecologische draagkracht van het Noordzee-ecosysteem?”*
- *Wat zijn de effecten van de verschillende gebruiksfuncties op de ecologische draagkracht?”*

Om deze vragen te beantwoorden is een breed, integraal en systematisch monitoringsprogramma nodig dat zich richt op de fysische, chemische en biologische basisparameters voor het functioneren van het ecosysteem en op (de variatie in) het voorkomen van vogels, vleermuizen, bodemdieren, vissen en zeezoogdieren (Asjes et al. 2021).

Het MONS-programma geeft een eerste uitwerking van het onderzoek dat de komende tien jaar vanaf 2022 zal worden uitgevoerd om de kennisvragen zoals die geformuleerd zijn in het NZA te kunnen beantwoorden. In de eerste fase is een lijst met 'no regret' onderzoeksprojecten opgesteld waarvoor het onderzoek al op korte termijn kan worden uitgevoerd en waarbij de resultaten aan de basis staan van ander onderzoek later in MONS. Dit rapport is het product van de “no regret” actie 'ID4 Monitoringsplan primaire productie', zoals vastgesteld in het Noordzee-Overleg (NZO) op 9 juni 2021, waarbij specifiek gevraagd wordt om het 'Opstellen monitoring fytoplankton en primaire productie Noordzee'.

2. Informatiebehoefte vanuit MONS met betrekking tot fytoplankton en primaire productie

In MONS is gesteld dat 'Primaire productie - het vastleggen van anorganische nutriënten in levende materie door algen - de basis vormt van het mariene voedselweb en daarmee ten grondslag ligt aan de draagkracht van het ecosysteem Noordzee' en 'Gedegen kennis van de draagkracht van de Noordzee vergt dus in eerste plaats een goed inzicht in het functioneren van de basis van het voedselweb, met name de fysische condities, de nutriëntencycli, de rol van het bodemecosysteem en de primaire productie'. In kustgebieden vindt primaire productie plaats in de waterkolom door het fytoplankton, maar in ondiepere gedeeltes kan ook fotosynthese op de zeebodem plaatsvinden in de vorm van bentische primaire productie (Glud 2008). Daarom worden in dit rapport voorstellen gedaan voor metingen van pelagische en bentische primaire productie.

In hoofdstuk 4 van het MONS rapport (Asjes et al. 2021) worden 3 kennisvragen geformuleerd die betrekking hebben op de basis van het voedselweb:

[1] Welke ontwikkelingen in de hydrodynamiek zijn van belang in een veranderende Noordzee?

[2] Hoe ontwikkelt de nutriëntenhuishouding (C, N, P en Si) zich in de verschillende hydrodynamische regimes van de Noordzee onder invloed van klimaatverandering en de energie- en voedseltransities?

[3] "Wat zijn de verwachte regionale en temporele trends in fytoplankton samenstelling en primaire productie in een veranderende Noordzee?"

Binnen de 'no regret' actie MONS abiotiek (Blauw et al. 2022) is een monitoringsplan opgesteld waarmee de eerste 2 kennisvragen kunnen worden beantwoord. In dit rapport staat de 3^e kennisvraag centraal die is geformuleerd vanuit de volgende geïdentificeerde kennisleemtes (Asjes et al. 2021):

- Primaire productie en fytoplankton samenstelling worden op dit moment niet (primaire productie) en niet meer (fytoplankton samenstelling) routinematig gemeten in de Noordzee. De focus van huidige monitoringsprogramma's wat betreft de nutriëntenhuishouding is gericht op het meten van de nutriëntconcentraties en chlorofyl A in de waterkolom en niet op het proces van primaire productie zelf.

- Gericht procesmatig onderzoek ter ondersteuning van modellen gebeurt weinig. Dit beperkt ons inzicht in de impact van huidige en toekomstige veranderingen in de Noordzee.

Verder wordt in Appendix 8 van het MONS rapport een lijst met prioritaire projecten genoemd. Uit deze Appendix is een opsomming (zie Tabel 1) gemaakt van de projecten die behoefte hebben monitoringsinformatie over de fytoplanktensamenstelling en primaire productie in de Noordzee. Voor verdere details wordt verwezen naar het MONS rapport, maar duidelijk is dat er een kennisbehoefte is vanuit MONS naar de temporele en ruimtelijke trends in de fytoplanktensamenstelling en primaire productie van de Noordzee.

Tabel 1: Overzicht van MONS deelonderzoeken die behoefte hebben aan abiotische monitoringdata.

ID	Paragraaf	Beschrijving van onderzoek
3	4.1	Primaire productie processen: onderzoek richt zich op het gebruik van de nutriënten door pelagische en benthische primaire producenten en hoe die productie wordt gereguleerd door de algensamenstelling en slib- en nutriëntenhuishouding. De impact van infrastructuur en maricultuur op de pelagische productie wordt gemeten.
4	4.1	Monitoring Primaire productie: Dit betreft de basale monitoring van de primaire productie op de Noordzee
7	4.1	Karakterisering van biomassa en soorten fyto- en zooplankton bovenstrooms, binnen en benedenstrooms van WMP, over verschillende seizoenen. Metingen worden zodanig uitgevoerd dat effecten van windparken onderscheiden kunnen worden van effecten van maricultuur of natuurstimuleringsmaatregelen.
11	4.1	Effecten op primaire productie en (phyto)plankton compositie

De fytoplanktensamenstelling en primaire productie van de Noordzee kan in de nabije toekomst door verschillende oorzaken veranderen. Een recente Engelse studie laat zien dat de primaire productie door het fytoplankton in de afgelopen jaren significant is afgenomen (Capuzzo et al. 2018), waarbij een afname van het doorzicht, een hogere temperatuur van het zeewater en een afname van nutriënten van de rivieren als belangrijkste redenen worden aangegeven. Toekomstige aanleg van windparken kan de fytoplanktonconcentratie en primaire productie op verschillende manieren beïnvloeden, b.v. door een toename van slib in de waterkolom waardoor de lichtbeschikbaarheid afneemt. Aan de andere kant laten modelstudies zien dat de stratificatie kan afnemen waardoor de aanvoer van nutriënten uit diepere waterlagen kan toenemen wat de primaire productie kan verhogen. Het gebruik van delen van de Noordzee voor zeevierkweek kan leiden tot afname van de beschikbaarheid van nutriënten in de waterkolom, waardoor primaire productie zal afnemen.

Ook klimaatverandering kan de primaire productie van het systeem beïnvloeden. Naast opwarming en toename van menging door stormen leidt een hogere concentraties aan CO₂ in de atmosfeer tot een hogere pCO₂ in het oppervlaktewater. Verschillende studies laten zien dat dit kan leiden tot een verschuiving in de grootteklassen van algen naar kleinere soorten, met mogelijk een lagere efficiëntie van de trofische transfer tot gevolg (Raven and Beardall 2021). De uiteindelijke optelsom van al deze

verschillende effecten is zeer moeilijk in te schatten en daarom zijn metingen van het fytoplankton en de primaire productie essentieel om een vinger aan de pols te houden en om modelstudies waarmee cumulatieve effecten kunnen worden onderzocht te valideren.

3. Wat wordt er al gemeten?

In het rapport MONS-Abiotiek (Blauw et al. 2022) wordt een opsomming gegeven van variabelen die relevant zijn voor fytoplankton en primaire productie, zoals lichtinstraling, watertemperatuur, verdeling van lichtintensiteit over de waterkolom, nutriënten (N, P, Si), zuurstof en de carbonaatchemie met daarbij waar en hoe vaak deze data worden gemeten. Kort samengevat zijn er meetprogramma's binnen KNMI en MWTL om lichtinstraling en waterkolom parameters op de MWTL-locaties veel plaatsen met regelmaat te meten.

In Tabel 2 wordt opgesomd wat er gemeten is en wordt op de Noordzee met betrekking tot fytoplankton en primaire productie. Duidelijk is dat de meetserie voor fytoplankton slechts geschikt is voor schattingen van totale biomassa op basis van pigmentconcentratie en dat pelagische primaire productie, met uitzondering van Marsdiep bij het NIOZ, alleen op projectmatige basis wordt gemeten. Kennis over de bentische primaire productie ontbreekt volledig. We kunnen concluderen dat er onvoldoende monitoringsgegevens voorhanden zijn en verzameld worden om in de informatiebehoefte van MONS te voorzien.

Tabel 2: Overzicht van metingen op de Noordzee aan fytoplankton en primaire productie.

	Kader	Tijdsreeks	Frequentie
Fytoplankton:			
Fytoplanktonsoortensamenstelling	Zwemwaterkwal.	lopend	Monitoring op 3 kuststations i.v.m. zwemwaterkwaliteit
Pigmenten (chl-a/b, feofytine-a/b)	MWTL	1990-loopt nog	Monitoring (4-18x per jaar, afh. locatie)
Fytoplanktonsoortensamenstelling	MWTL	1990-2018	Monitoring (4-18x per jaar, afh. locatie)
Pigmentensamenstelling	Project	Regelmatig, geen tijdreeks	Afhankelijk van project
Pigmenten (chl-a)	NIOZ-jetty	1974-	Monitoring, 40x per jaar
Fytoplanktonsoortensamenstelling	NIOZ-jetty	1974-	Monitoring, 40x per jaar
Continuous Plankton Recorder	CPR programma	Gestart ±1950 en loopt nog	Regelmatige transecten met koopvaardij schepen met maaswijdte van 270 um en niet geschikt op fytoplankton. Data betreffen de relatieve dichtheden.
Primaire productie:			
Pelagische productie	Project	Regelmatig, geen tijdreeks	Afhankelijk van project
Pelagische productie	NIOZ-jetty	2015-	Continue metingen met FRRF
Bentische productie	-	-	Geen schattingen beschikbaar

4. Randvoorwaarden en uitgangspunten

In de opdrachtbeschrijving werd aangegeven dat bij het opstellen van het monitoringsplan de huidige MWTL-maatstations en -frequentie als basis kon worden genomen. De huidige MWTL-monitoring wordt door RWS met name gebruikt om de eutrofiëringstatus te bepalen in het kader van de Europese Kaderrichtlijn Mariene Strategie (KRM). Om metingen van de chlorofyl-a concentratie en daarmee eutrofiëring coherent te beoordelen binnen Europa, zijn er plannen om de MWTL-maatstrategie in de nabije toekomst aan te passen. Dit kan gevolgen hebben voor de huidige MWTL-monitoring aangezien de reguliere metingen op zee grotendeels vervangen worden door een combinatie van Ferryboxen, satellietbeeld analyse en zgn. match-up monsternames ter validatie van de satellietbeelden (Blauw et al. 2019). Met deze nieuwe strategie wordt beter aan de KRM eisen voldaan, wordt een betere ruimtelijke en temporele dekking bereikt en wordt een universele beoordeling van de eutrofiëringstatus op Europese schaal bereikt. Dit nieuwe programma is echter specifiek gericht op bepaling van de chlorofyl-a concentratie en is daarmee onvoldoende voor de bredere informatiebehoefte t.a.v. draagkracht vanuit MONS. Voordat overgegaan wordt tot het omvormen van de MWTL-maatstrategie zou het daarom goed zijn volgende overwegingen mee te nemen:

- De MONS plannen voor in ieder geval de no-regret acties abiotiek, fytoplankton en primaire productie en zoöplankton zijn grotendeels gebaseerd op het feit dat er een MWTL-programma is waarop voortgebouwd kan worden. In de vraagspecificatie wordt expliciet opgemerkt: "De voorgestelde monitoring van het MONS-project bouwt voort op huidige monitoring ..., i.c. de MWTL-monitoring. Voor het op te stellen monitoringsplan wordt gebruik gemaakt van de inhoud van het MONS-programma over dit onderwerp." en "Voor een permanente uitbreiding van het RWS-MWTL monitoringsprogramma (i.i.g. periode 2021-2030), zowel qua ruimtelijke dekking als te meten water- en bodemparameters, verwijzen we naar het document dat innovatieve monitoring behandelt (deze bijlage wordt aan de offerteaanvraag". Bij de opstelling van onderstaand monitoringsplan is dus uitgegaan van het huidige MWTL-programma.
- De MWTL-data worden veelvuldig gebruikt als validatie voor modellen van de Noordzee (door b.v. Deltares). Deze validatie komt te vervallen als MWTL wordt afgebouwd.
- De inrichting en het gebruik van de Noordzee staat voor een transitie. De bestaande MWTL-tijdserie van 30 jaar is daarom juist zeer waardevol om de gevolgen van deze veranderingen in de komende jaren/decennia te kunnen bepalen. Voortzetting van deze meetserie is dan essentieel.

In het vorige hoofdstuk is vastgesteld dat er onvoldoende monitoringsgegevens voorhanden zijn of

worden verzameld om in de informatiebehoefte van MONS te voorzien, waarbij als uitgangspunten zijn genomen:

- De fytoplanktensamenstelling op de Noordzee wordt niet (meer) bepaald, terwijl er in deelonderzoeken expliciet naar gevraagd wordt. Methoden om de fytoplanktensamenstelling te bepalen worden in hoofdstuk 5 besproken.
- Er worden geen metingen van pelagische primaire productie gedaan, welke essentieel zijn om de draagkracht van het ecosysteem te bepalen. Methoden om primaire productie te bepalen worden in hoofdstuk 5 besproken.
- Zoals aangegeven in de vraagspecificatie: "de monitoring van fytoplanktensamenstelling en primaire productie bouwt voort op huidige monitoring ..., i.c. de MWTL-monitoring." In hoofdstuk 6 worden suggesties gedaan voor aanvullende metingen tijdens de MWTL-campagnes t.b.v. de monitoring van fytoplanktensamenstelling en primaire productie.
- Aangegeven wordt dat metingen met een hoge-temporele resolutie ontbreken, waardoor verandering op korte tijdschalen (uren, dagen) en tijdens 'extreme events' (b.v. storm) niet opgepikt kunnen worden. In de vraagspecificatie wordt daarom gevraagd om 2 vaste monitoringsstations, waar met hoge tijdsresolutie gemonitord kan worden. In hoofdstuk 7 beschrijven we hoe de fytoplanktensamenstelling en primaire productie op deze stations kan worden gemeten. In MONS-abiotiek wordt geadviseerd om deze stations te gebruiken voor licht- en turbiditeitsmetingen in de hele waterkolom, deze data zijn essentieel voor het bepalen van de diepte-geïntegreerde primaire productie (zie Figuur 1 hieronder).
- Bij aanleg van windmolenparken, oesterbedden, Marine Protected Areas, en zeewierboerderijen is het zeer aannemelijk dat er een meer heterogene verdeling van de nutriënten zal zijn, dus het is van belang om daar ook de ruimtelijke dekking van de van fytoplanktensamenstelling en primaire productie metingen op aan te passen. In hoofdstuk 8 worden hier aanbevelingen voor gedaan, waarbij de meeste voorstellen aansluiten bij de nieuwe plannen om de eutrofiëringstatus van de Nederlands Noordzee in kader van de KRM te bepalen.
- De bentische primaire productie in de Noordzee is onbekend en daarom wordt er in de vraagspecificatie expliciet om gerichte campagnes gevraagd in met name de ondiepere en/of heldere gedeeltes van de Noordzee. In hoofdstuk 9 wordt een voorstel beschreven waarmee dit gat ingevuld kan worden.

5. Monitoring van fytoplanktensamenstelling en pelagische primaire productie

Fytoplanktensamenstelling

Er kan op verschillende manieren inzicht verkregen worden in de fytoplanktensamenstelling van de Noordzee, waarvan in Tabel 3 een overzicht wordt gegeven met voor- en nadelen.

Tabel 3: Overzicht van methoden om de samenstelling van het fytoplankton te meten met voor- en nadelen.

Methode	Pros	Cons
Pigmentensamenstelling waarbij een watermonster wordt gefilterd en concentraties van alle pigmenten via HPLC wordt bepaald. Uit de samenstelling kan samenstelling van belangrijkste fytoplankton groepen worden afgeleid.	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief eenvoudige en robuuste methode • Snel • Beproefde methode 	<ul style="list-style-type: none"> • Alleen geschikt voor grove indeling van het fytoplankton • Validatie van pigmentensamenstelling met soortentelling is nodig • Resultaten niet altijd eenduidig • Beperkte mogelijkheden om biomassa bepaling te doen
Soortentellingen onder microscoop waarbij een watermonster wordt gefixeerd met Lugol en dan onder de microscoop op soort worden gebracht.	<ul style="list-style-type: none"> • Accuraat • Hoge taxonomische resolutie • Door combinatie met groottebepalingen kan biomassa bepaald worden • Identificatie van invasieve soorten en schadelijke algen • Methode was tot voor kort operationeel binnen MWTL 	<ul style="list-style-type: none"> • Duur en tijdrovend • Nodig om met fixatieven aan boord te werken • Specialistenwerk
Flow cytometry (bv Cytosense) waarbij watermonster aan boord, in het laboratorium (na fixatie) of <i>in situ</i> door een flow cytometer wordt geleid en waarbij fysische en optische karakteristieken van cellen en deeltjes worden bepaald. Op basis van de karakteristieken worden cellen/deeltjes ingedeeld in clusters. Moderne flow cytometers nemen foto's van representatieve deeltjes/cellen zodat vastgesteld kan worden welke algen in de clusters vertegenwoordigd zijn en of er relatieve veranderingen in de cluster zijn.	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief eenvoudige bemonstering en gevorderde automatische dataverwerking • Door groottebepaling kan er ook biomassa bepaald worden • Ervaring aanwezig binnen RWS met o.a. projecten op Markermeer en op Noordzee (Zirfaea) 	<ul style="list-style-type: none"> • Taxonomische resolutie is beperkt • Gebruik in het lab en aan boord is relatief eenvoudig en al getest, maar <i>in situ</i> toepassing lijkt zeker haalbaar maar is uitdagend en behoeft onderzoek voor NI situatie • Accuraatheid van analyse van gefixeerde monsters behoeft nog nader onderzoek
Analyse van environmental DNA (eDNA)	<ul style="list-style-type: none"> • Eenvoudige bemonstering • Hoge taxonomische resolutie (operational taxonomic units) • Geschikt voor monitoring van invasieve soorten en schadelijke algen 	<ul style="list-style-type: none"> • Onmogelijk om biomassa of abundantiebepalingen te doen • Methode nog niet ontwikkeld voor Noordzee • Analyse van datasets is complex

Voor het MONS programma zijn de methoden pigmentensamenstelling, soortentellingen onder de microscoop en flow cytometry voor de hand liggende kandidaten, waarbij informatie over samenstelling en biomassa kan worden verkregen. In de volgende hoofdstukken stellen we voor welke methoden in welke situatie toegepast kan worden. eDNA is als methode zeer beloftevol maar nog niet genoeg gevalideerd om in reguliere monitoring een rol te spelen.

Voor pigmentensamenstelling en soortentellingen onder de microscoop worden de kosten met name

bepaald door het aantal monsters en in minder mate door benodigde investeringen in apparatuur. Aan flow cytometry zijn ook kosten verbonden door investeringen in apparatuur. Flow cytometers die ook foto's maken van de deeltjes, zoals de Cytosense waarmee ervaring is op het Markermeer en Noordzee, zijn ongeveer per instrument 150k€.

Pelagische primaire productie

De klassieke methode om pelagische primaire productie te meten is door middel van de ^{14}C -techniek, waarbij de opname van gelabeld $^{14}\text{CO}_2$ door het fytoplankton in een incubatie als maat wordt gebruikt voor de primaire productie (Underwood and Kromkamp, 1999; Marra et al. 2021). Deze methode meet direct de fixatie van anorganisch koolstof (C), wat belangrijk is aangezien C de eenheid is die voor het ecosysteem van belang is. Het is echter ook een dure en omslachtige methode, met name vanwege de voorzorgsmaatregelen die genomen moeten worden omdat er met radioactief materiaal gewerkt wordt. Ook duurt een ^{14}C -incubatie relatief lang (enkele uren), waardoor de primaire productie metingen een beperkte ruimtelijke en temporele dekking hebben. Al met al worden ^{14}C meetseries wereldwijd afgebouwd en is er grote behoefte aan een alternatieve methode om primaire productie te meten (Tabel 4).

Nadelen:

- Gebruik van radioactief ^{14}C vereist wettelijke voorzorgsmaatregelen
- Vrij prijzig door gebruik en afvoer van radioactief materiaal
- Als particulaire productie wordt bepaald (dus op filters) worden door algen uitgescheiden

producten gemist, maar in onze wateren is dit geen groot probleem

- Of netto of bruto C-fixatie wordt bepaald lijkt af te hangen van de groeisnelheid, zelfs bij

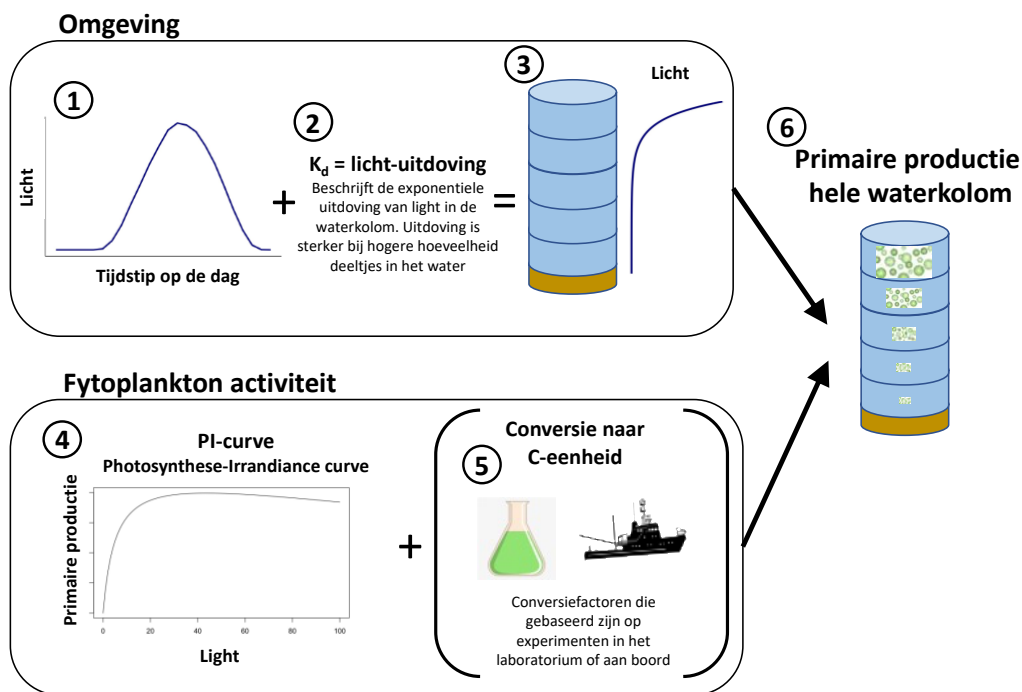
kortdurende (2 uur) incubaties (Halsey et al. 2001); overigens speelt dit in troebele systemen niet zo'n grote rol omdat de respiratie vooral beheerst wordt door de lange tijd dat de algen in het donker zijn (ook gedurende de dag)

¹⁴C-methode waarbij ¹⁴ C wordt gebruikt in incubaties van zeewater bij verschillende lichtintensiteiten voor het maken van een PI-curve (Photosynthesis-Irradiance curve)	<ul style="list-style-type: none"> • Zeer gevoelige methode • Uitgebreid getest 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebruik van radioactief ¹⁴C vereist wettelijke voorzorgsmaatregelen • Prijzig door gebruik en afvoer van radioactief materiaal • Onduidelijk of bruto of netto C-fixatie wordt gemeten • Gevaar van 'bottle effect'
¹³C-methode waarbij het stabiele isotoop ¹³ C wordt gebruikt als alternatief voor ¹⁴ C bij incubaties van zeewater bij verschillende lichtintensiteiten voor het maken van een PI-curve (Photosynthesis-Irradiance curve)	<ul style="list-style-type: none"> • Veilig te gebruiken • Relatief eenvoudige methode • Vergelijkbaar met klassieke ¹⁴C methode • Directe meting van C-fixatie 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewerkelijk methode, niet geschikt voor veel stations • Onduidelijk of bruto of netto C-fixatie wordt gemeten • Gevaar van 'bottle effect' • Lagere gevoeligheid dan ¹⁴C, met name relevant voor oligotrofe systemen.
Donker-licht methode waarbij water in donker en verschillende lichtniveaus (voor de PI-curve) wordt geïncubeerd en het verschil in zuurstofdynamiek wordt gemeten om de netto C-fixatie te berekenen	<ul style="list-style-type: none"> • Directe meting van bruto en netto C-fixatie • Gevoelige methode 	<ul style="list-style-type: none"> • Bewerkelijk, niet geschikt voor veel stations • Gevaar van 'bottle effect' • Aanname dat respiratie in het licht = respiratie in het donker
¹⁸O methode waarbij productie van ¹⁸ O uit H ₂ ¹⁸ O wordt gemeten en een PI-curve wordt opgesteld.	<ul style="list-style-type: none"> • Meting van bruto C-fixatie • Hoge precisie 	<ul style="list-style-type: none"> • Gevaar van 'bottle effect' • Complexe en bewerkelijke methode • Nog niet uitgebreid op de Noordzee getest • Dure methode t.g.v. gebruik van H₂¹⁸O • Specialistische analyse van ¹⁸O
Fast-Repetition Rate Fluorometry (FRRF) waarbij een PI-curve wordt bepaald op basis van actieve fluorescentie (e.g. Silsbe et al., 2015; Silsbe and Kromkamp, 2012; Aardema et al. 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Methode voor bepaling bruto primaire productie • Mogelijkheid tot gestandaardiseerde en geautomatiseerde metingen • Kan aan boord (onderzoeksschip of Ferrybox) en <i>in situ</i> worden gebruikt • Ervaring met metingen aan boord bij RWS op o.a. Markermeer, Deltagebied en op de Noordzee • Meting aan natuurlijke fytoplanktongemeenschap en geen gevaar van 'bottle effect' • Meet elke ±15 minuten een PI-curve en kan daarom gebruikt worden om hoge ruimtelijke dekking te krijgen 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmatig onderhoud is nodig • Geen ervaring met continue <i>in situ</i> metingen • FRRF meet een PI-curve als elektrontransport en er moet een conversiefactor gebruikt worden om C-fixatie te bepalen
Decompositie van O₂ tijdserie waarbij uit een O ₂ -tijdserie door 'complex demodulation' de bruto primaire productie wordt afgeleid (Cox et al. 2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Goedkope methode die relatief eenvoudig kan worden ingezet • Direct bepaling van bruto C-fixatie 	<ul style="list-style-type: none"> • Proof-of-concept op basis van modelvoorspellingen, maar methode is nog nauwelijks in het veld getest • Door interferentie van O₂-dynamiek met getijdendynamiek wordt een 15-daags gemiddelde productie verkregen • Hoewel er een softwarepakket in R beschikbaar is, blijft complexe post-processing van de data nodig

De meeste methodes meten niet direct de primaire productie over de gehele waterkolom. Aangezien de lichtbeschikbaarheid in het water afneemt met toenemende diepte moet dit in rekening worden gebracht. Een schematisch stappenplan daarvoor is weergegeven in Figuur 1. Stap 1 is de lichtinstraling op het water gedurende de dag, welke samen met de lichtuitdoving (stap 2) de beschikbaarheid van het licht in de waterkolom (stap 3) beschrijft op basis waarvan fotosynthese kan plaatsvinden. De PI-curve (stap 4) wordt meestal aan boord of in het laboratorium bepaald met een van de methoden uit Tabel 4.

Specifiek voor de FRRF-methode is een conversie naar C-eenheden nodig (stap 5) aangezien de FRRF de PI-curve meet in elektronentransport. Deze conversiefactor kan in het laboratorium of aan boord worden bepaald. Met de combinatie van lichtbeschikbaarheid in de waterkolom en licht-afhankelijke fotosynthese kan de primaire productie in de hele waterkolom op een tijdstip van de dag worden bepaald (stap 6). Door integratie over de gehele dag wordt de dagelijkse primaire productie berekend.

Zoals uit Tabel 4 af te lezen valt, werkt de O₂-tijdreeksanalyse op een heel andere manier. De onderliggende theorie is complex, zie Cox et al. (2017) voor details, maar in essentie komt het erop neer dat de O₂ concentratie door vele factoren wordt beïnvloed, waaronder primaire productie. Omdat primaire productie in belangrijke mate wordt bepaald door invallend daglicht (dag/nacht ritme) kan het primaire productie signaal uit de tijdserie worden 'gefilterd' door naar O₂ veranderingen te kijken die op de dag/nacht frequentie voorkomen.



Figuur 1: Stappenplan voor de bepaling van de primaire productie in de gehele waterkolom.

Voor het MONS-programma voldoen in principe een aantal methodes, maar zoals ook uit de vraagspecificatie blijkt, wordt de FRRF-methode als meest kansrijk beschouwd, omdat deze op verschillende manieren inzetbaar is, zowel tijdens metingen aan boord wanneer het meetschip op een meetlocatie ligt, tijdens transits van het meetschip, in combinatie met een Ferrybox of als *in situ* instrument op autonome meetstations. Ook in de wetenschappelijke literatuur wordt de FRRF-methode als meest kansrijk gezien voor monitoringsprogramma's (Aardema et al. 2019). Het artikel van Aardema et al. (2019) beschrijft de succesvolle toepassing van de FRRF tijdens een van de MWTL-monitoringstochten op de Noordzee. Voor de FRRF-metingen aan boord wordt voorgesteld om

een Chelsea LabSTAF (<https://chelsea.co.uk/products/labstaf/>) aan te schaffen en voor *in situ* metingen een Chelsea FastOcean APD (<https://chelsea.co.uk/products/fastocean-apd/>) (Xie et al. 2018). Belangrijk is ook te vermelden dat de FRRF-methode al op korte termijn kan worden ingezet in het MONS-programma. De bepaling van de conversiefactor (stap 5 in Figuur 1) die nodig voor de omrekening van de FRRF-data naar C-eenheden kan zonder problemen in een later stadium worden uitgevoerd, waarna de verzamelde FRRF-data (stap 4 in Figuur 1) met de juiste conversiefactor ge-update kunnen worden naar primaire productie.

De genoemde conversiefactor kan door een combinatie van laboratorium- en veldonderzoek vastgesteld worden. Ten eerste stellen we voor om algencultures in het lab op te zetten van diatomeeën, dinoflagellaten en *Phaeocystis* en de conversiefactor bepaald door 'gelijktijdige' meting van primaire productie met de FRRF en ^{14}C . Een gedetailleerde methodebeschrijving hiervoor is te vinden in Lawrenz et al. (2013). Omdat de conversiefactor waarschijnlijk afhankelijk is van licht- en nutriënt-limitatie zullen de vergelijkende experimenten moeten plaatsvinden bij verschillende combinaties van licht- en nutriënt-limitatie (N, P, Si, zie b.v. Burson et al. 2016). Ten tweede, stellen we voor om de conversiefactor te bepalen door FRRF-metingen aan boord te koppelen aan gelijktijdige ^{13}C -metingen van de primaire productie. Idealiter zouden deze metingen plaatsvinden tijdens enkele MWTL-campagnes (3-4x voor gedurende een jaar, in verschillende seizoenen) zodat de resultaten direct kunnen worden gecombineerd met de andere variabelen die worden gemeten. Mocht dit niet tijdens de MWTL-metingen kunnen dan stellen we voor dit tijdens andere vaartochten te doen. Uit deze gecombineerde validatiemetingen in het laboratorium en aan boord wordt een ijklijn afgeleid, die we vervolgens gebruiken om de conversiefactor te schatten voor FRRF-metingen op andere locaties en momenten.

De O_2 -tijdserie analyse heeft potentie voor gebruik op vaste meetstations (zie Hoofdstuk 7), aangezien gebruik van een zuurstofsensor relatief goedkoop is en eenvoudig in gebruik is. We stellen voor om de O_2 -tijdserie analyse in zetten op de locaties waar ook de FRRF ook wordt gebruikt om primaire productie te meten. Op deze manier is het mogelijk om de accuraatheid en inzetbaarheid van de O_2 -tijdserie methode te testen. Er is wel regelmatig onderhoud nodig aan de sensor (schoonmaken, kalibratie). Grofweg 1 x per maand is voldoende in de zomer, in de winter kan dit minder frequent.

Een eerste schatting van benodigde inzet voor het gebruik van de FRRF voor primaire productie metingen is als volgt:

- **Personeel (505k€):** Ondanks dat de implementatie van de FRRF op korte termijn kan plaatsvinden is er onderzoek nodig om de methode te valideren en te verankeren. We stellen daarom voor dit onderzoek uit te laten voeren door een PhD-student (4 jaar, 250k€) met ondersteuning van een technisch assistent (4 jaar, 175k€). Na de onderzoeksfase is aanvullende financiering, bijvoorbeeld voor een technisch assistent, nodig om deze metingen door te kunnen

zetten onder supervisie van een senior onderzoeker (± 1 maand per jaar, 4x20k€).

- **Vaartijd:** De FRRF-metingen kunnen grotendeels toegevoegd worden aan de bestaande MWTL-tochten dus hiervoor hoeft weinig extra inzet te zijn met betrekking tot scheepstijd. Als voor de bepaling van de FRRF-conversiefactoren aparte vaartochten nodig zijn worden de kosten hiervoor hoger, maar we merken op dat deze metingen eenvoudig met ander onderzoek te combineren is. De metingen kunnen worden uitgevoerd door de PhD-student met ondersteuning van een technisch assistent. Laboratoriumruimte zijn aan boord en continue aanvoer van oppervlaktewater zijn wel nodig.
- **Apparatuur en consumables (290k€):** Chelsea LabSTAFF (80k€), Chelsea FastOcean (80k€), zuurstofsensors (30k€), opzet cultures/consumables/analysis (100k€).
-

Tot slot worden ten behoeve van de bepaling van primaire productie nog de volgende aanbevelingen gedaan:

- Voor de berekening van de primaire productie is het belangrijk om goede metingen hebben van de lichtuitdoving in de waterkolom (Figuur 1) en het is daarom **essentieel** dat de lichtuitdovingscoëfficiënt (K_d) tijdens de MWTL-tochten in de zomer en winter wordt gemeten op elk station met de huidige methode en is het belangrijk dat het lichtprofiel begint aan het wateroppervlak. Ondanks dat apparatuur beschikbaar is wordt dit nog niet standaard uitgevoerd.
- We stellen voor om gps-data tijdens de MWTL-campagne continue op te slaan en te koppelen aan de verzamelde data.
- Het wordt sterk aangeraden om ruwe data inclusief de ctd- en lichtmetingen op te slaan en beschikbaar te maken zodat achteraf herrekening kan plaatsvinden indien nodig, waarvoor waarschijnlijk aanvullende dataopslag methodes beschreven nodig zijn.

6. Aanvullingen op het MWTL-programma ten behoeve van fytoplanktensamenstelling en primaire productie

Het huidige MWTL-programma omvat voor het fytoplankton bepalingen van de concentraties chlorofyl-a/b en feofytine-a/b op de onderstaande MWTL-monitoringlocaties (Figuur 6). Soortensamenstelling van het fytoplankton wordt niet meer bepaald en de primaire productie wordt niet gemeten (Tabel 2).



Figuur 2: MWTL-locaties waarin de kleurcode en het getal in de cirkel geven aan hoe vaak per jaar de locatie wordt bemonsterd.

Vanwege de goede ruimtelijke en temporele dekking van de Noordzee door de MWTL is geeft dit een goede basis om aanvullende metingen te doen ten behoeve van fytoplanktensamenstelling en pelagisch primaire productie. De volgende voorstellen worden gedaan:

- Door gebruik te maken van een Ferrybox kunnen naast sensoren voor temperatuur, saliniteit, zuurstof, turbiditeit en fluorescentie ook PI-curves met een FRRF voor pelagische primaire productie (Chelsea LabSTAFF, zie hierboven) en fytoplanktensamenstelling (flow cytometer van bv. Cytosense) worden gemeten, zoals eerder toegepast door Aardema et al. (2019) op de Noordzee en door RWS op Markermeer.
- Daarnaast stellen we voor om voor iedere monsternamen eerst een verticaal profiel te nemen van temperatuur, saliniteit, turbiditeit, fluorescentie, zuurstof, pH, opgelost anorganisch koolstof en PAR en lichtklimaat spectraal. Hiermee krijgen we dan ook informatie over de verticale verdeling van de algen en het lichtklimaat onder water, wat belangrijk is om de primaire

productie over de waterkolom te integreren (zie hierboven).

- De bepaling van de pigmentsamenstelling zou moeten worden uitgebreid naar het volledige spectrum aan pigmenten in plaats van alleen chlorofyl-a/b en feofytine-a/b.
- Deze metingen zouden gecombineerd moeten worden met continue loggen van GPS-coördinaten.

Hierbij moet worden opgemerkt dat voor de implementatie van alle metingen afstemming met RWS/MWTL nodig is. De Ferrybox (nodig voor FRRF- en flow cytometer-metingen tijdens transit) is bijvoorbeeld op de Zirfae op dit moment niet meer in gebruik.

Een schatting van benodigde inzet is moeilijk te geven aangezien het nemen van extra ctd-profielen met aanvullende variabelen en verbeterde data-opslag vanuit offertes moet komen van het bedrijf dat de metingen doet. Voor de aansluiting van de Ferrybox op de Zirfae moet er een nieuwe inlaat voor water moet worden gemaakt. De oude inlaat liep door het koelwatersysteem en gaf daardoor andere waarden dan de meetvis, waarbij meetvisdata wel overeen kwamen met de concentraties in de MWTL-watermonsters. Voor de waterinlaat en aanpassingen aan de meetvis kan nu geen kostenschatting gemaakt kan worden. Wel zijn investeringen nodig voor de aanschaf van een Chelsea LabSTAFF (80k€) en flow cytometer (150k€).

7. Vaste meetstations

Rationale

Zoals aangegeven in het MONS rapport (Asjes et al. 2021) en de vraagspecificatie (zie Hoofdstuk 2), is er behoefte aan hoog-temporele metingen om de draagkrachtveranderingen van de Noordzee te kunnen volgen. Daarom is gevraagd om een tweetal vaste meetstations in te richten waar continue, hoge frequentie (\pm minuten) tijdseries worden opgebouwd. Het installeren van vaste meetstations en het opbouwen van deze tijdseries dienen de volgende doelen: 1) De hoogfrequente tijdseries zijn uitermate geschikt om de dynamiek van het fytoplankton en de primaire productie uit te splitsen naar relevante tijdschalen, zoals met de SmartBuoy datasets is gebeurd (Blauw et al. 2012, Blauw et al. 2018), 2) Meetstations zijn ook actief gedurende 'extreme events' (e.g. stormen), welke waarschijnlijk in kracht en frequentie zullen toenemen en 3) De hoogfrequente meetseries zijn van grote waarde voor de kalibratie en validatie van fysische, biochemische en biologische modellen (Carpenter et al. 2016, De Borger et al. 2021, Meire et al. 2013) en zijn zeer geschikt om satellietbeelden, zoals chlorofylbepalingen van de Sentinel-3 satelliet, en de hierboven beschreven O₂-methode om primaire productie te bepalen te valideren.

Binnen Europa worden de nationale programma's van meetstations gebundeld binnen het JERICO en JERICO-NEXT programma, waarin aandacht is voor standaardisatie van metingen, inzet van nieuwe technologieën, open access delen van data en modellering (Farcy et al. 2019). Een belangrijk onderdeel hierin is om de 'traditionele' fysische (bv. temperatuur en saliniteit) en biogeochemische metingen (bv. zuurstof) aan te vullen met biologische variabelen zoals fytoplanktensamenstelling met in situ flow cytometry (Dubelaar et al. 1999) en zoöplankton met in situ imaging (Lombard et al. 2019). Een voorbeeld van een bestaand meetnetwerk is COAST-HF (Coastal Ocean observing System - High Frequency), waarbij met 14 meetboeien langs de kust van Frankrijk met hoge resolutie fysische en biogeochemische parameters van het oppervlaktewater worden gemeten, waaronder temperatuur, saliniteit, turbiditeit en fluorescentie. Afhankelijk van het meetstation worden ook stroomsnelheid (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler), primaire productie (FRRF, Fast Repetition Rate Fluorometer), fytoplanktensamenstelling taxa (in situ flow cytometry) en nutriëntconcentratie (in situ nutriënt analyzer) gemeten (Cocquempot et al. 2019). Een vergelijkbare aanpak kan voorzien in de al beschreven informatiebehoefte vanuit MONS.

Op basis van bovenstaande informatie wordt hieronder geadviseerd over de meting van fytoplanktensamenstelling en primaire productie op 2 permanente meetstations in de Noordzee.

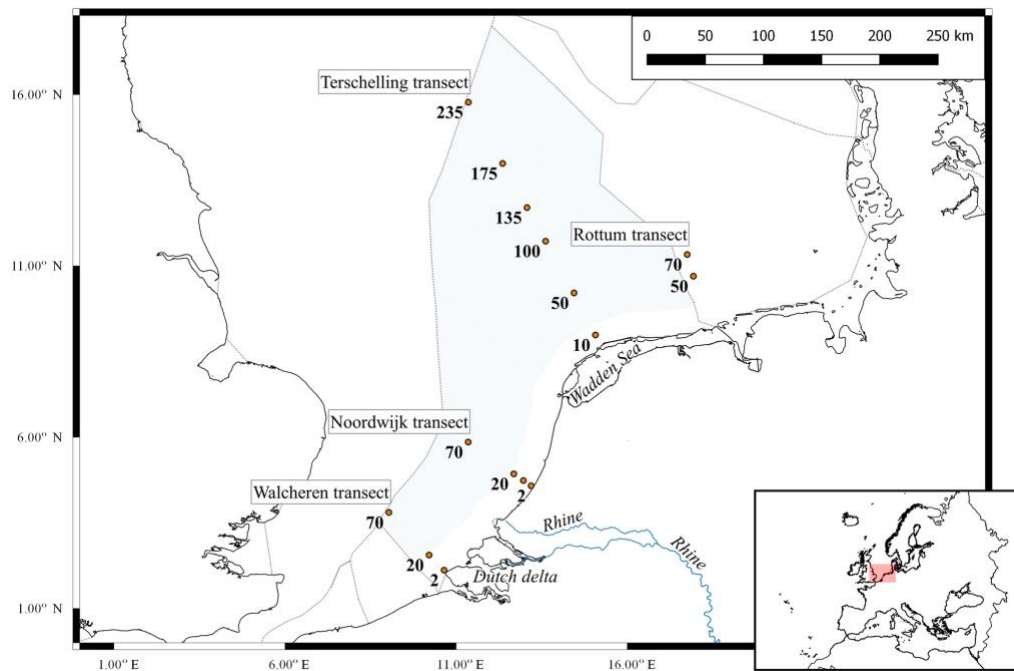
Aangezien de installatie en onderhoud hiervan gepaard gaat met hoge kosten zijn er veel afwegingen te maken zijn, welke niet allemaal tot stand gebracht konden worden tijdens de korte duur van deze MONS no-regret actie. Daarom is overeengekomen om in dit advies zo volledig mogelijk randvoorwaarden op te stellen voor de te kiezen locatie, meetmethodiek en te meten variabelen.

Locaties

Een belangrijke beslissing voor de meetstations is de selectie van de locatie. Hieronder volgen een aantal randvoorwaarden waaraan deze zouden moeten voldoen.

De meetstations niet in of directe omgeving van een bestaande infrastructuur zoals een gasplatform of windmolenpark plaatsen. Het is bekend dat infrastructuren zoals een boorplatform of windmolenpark een zgn. schaduw effect geven in de waterkolom (Degraer et al. 2020, Klunder et al. 2020, Floeter et al. 2017) met lagere fytoplankton en hogere sediment concentraties in het water, waardoor deze metingen niet representatief zullen zijn voor gebieden buiten de infrastructuur. Ook zal een veranderend gebruik of onderhoud van de infrastructuur de waarnemingen beïnvloeden. Als laatste zal de ontmanteling van betreffend platform betekenen dat de tijdserie onderbroken wordt of dat de omstandigheden zullen veranderen. De KNMI-weerstations op de platforms op de Noordzee moet bijvoorbeeld verplaatst worden ten gevolge van de ontmanteling van de gasplatformen waardoor de tijdserie onderbroken wordt.

Meetlocaties laten samenvallen met de bestaande MWTL-stations. Voor de Noordzee stellen we voor om de locaties samen te laten samenvallen met bestaande MWTL-stations (Figuur 2), omdat bestaande bemonstering met relatief lage resolutie wordt aangevuld met een monitoring op hoge temporele resolutie. Ook kan dan het onderhoud samenvallen met de reguliere monitoring wat kostenbesparend is.



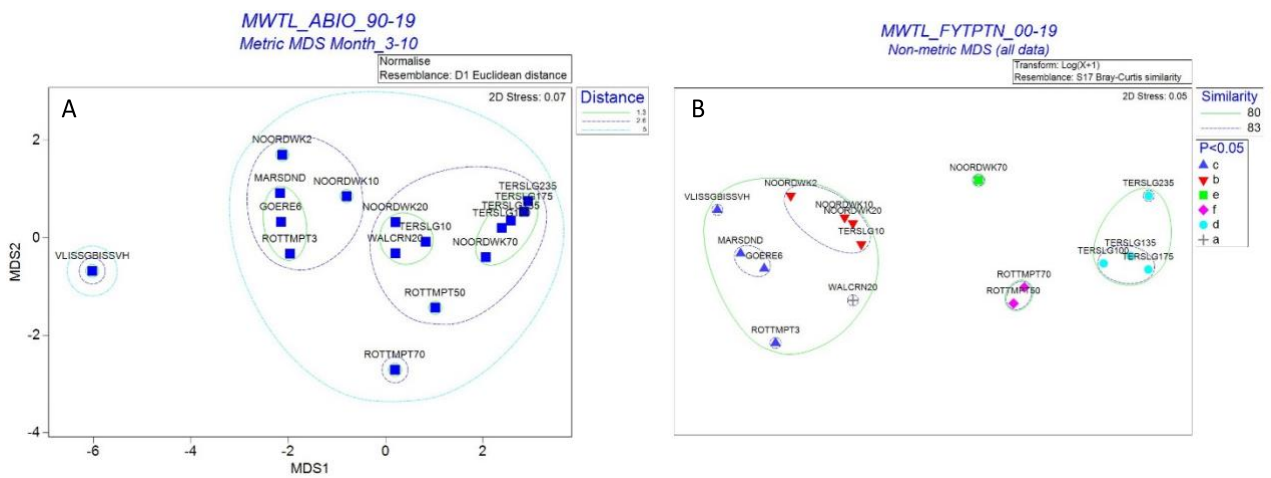
Figuur 3: Kaart met de huidige transecten en stations van het MWTL-meetprogramma. De getallen geven aan hoever het station uit de kust ligt.

De meetstations moeten representatief zijn voor de kustzone en de offshore Noordzee. De fytoplankton samenstelling en primaire productie varieert behoorlijke over de Noordzee (Blauw et al. 2018, Schneider et al. 2020) en hier moet rekening gehouden worden met de plaatsing van de meetstations. Bovendien zijn activiteiten als de bouw van OWFs zowel in de kustzone als offshore gepland en daarom moeten meetstations dit afdekken. Wel wordt aangeraden om het kuststation niet te dicht (<10 km) onder de kust te plaatsen, aangezien de uitstroom van de rivieren leidt tot een 'zoetwaterbel' op het Noordzeewater met bijbehorende complexe fysische omstandigheden, die interpretatie problematisch maken (Blauw et al. 2012).

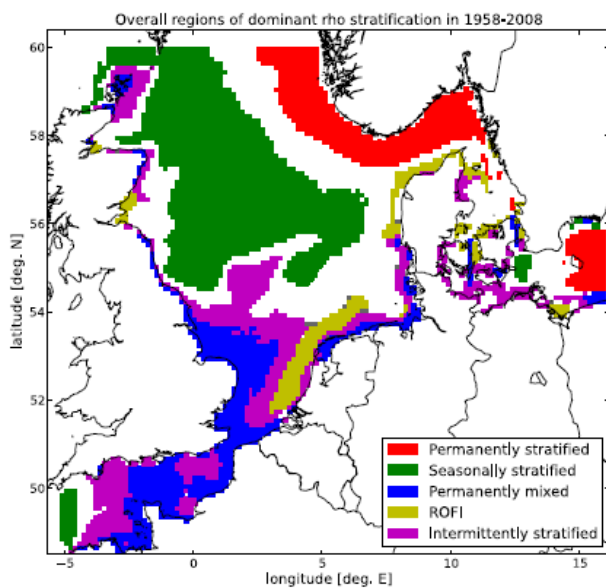
Voor effectbepaling aanvullend in/rond infrastructuur meten. Om het effect van activiteiten op de Noordzee te bepalen, zouden de meetstations langjarige data moeten opleveren die representatief zijn voor 'onverstoorde' condities, zodat gevolgen van bijvoorbeeld klimaatverandering uit de tijdseries afgeleid kunnen worden. De effectbepaling van een lokale activiteit, zoals een OWFs of aquacultuur, kan dan plaatsvinden door relatief korte en gerichte campagnes in en rond betreffende locatie te meten (e.g. Floeter et al. 2017).

Om de fysische en biologische verschillen tussen de huidige MWTL-stations aan te geven is er een multivariate analyse gedaan op de abiotische condities (Figuur 3A, 1990-2019) en pigmentensamenstelling (Figuur 3B, 1990-2019). De offshore stations van de Terschelling- raai clusteren in beide analyses apart van de kuststations (Figuur 3). Vlissingen en de stations dicht (<10km) onder de

kust laten clusteren qua abiotische condities, waarschijnlijk door de sterke invloed van de rivieruitstroom. Stations Noordwijk20 en Noordwijk70 liggen hier wat tussenin qua abiotische factoren en pigmentsamentelling (Figuur 3). De Rottum stations liggen buiten het NCP (Nederlands Continentaal Plaat) en lijken ook niet representatief voor een groter gedeelte van de Noordzee. De stratificatie van de Noordzee is weergegeven in Figuur 4 (Van Leeuwen et al. 2015). Hieruit blijkt dat een kustnabij station (maar niet in de ROFI, region-of-freshwater-influence) onder het regime 'intermittently stratified valt en een offshore station onder 'seasonally stratified', deze regimes zijn ook de dominante in de Noordzee (Van Leeuwen et al. 2015).



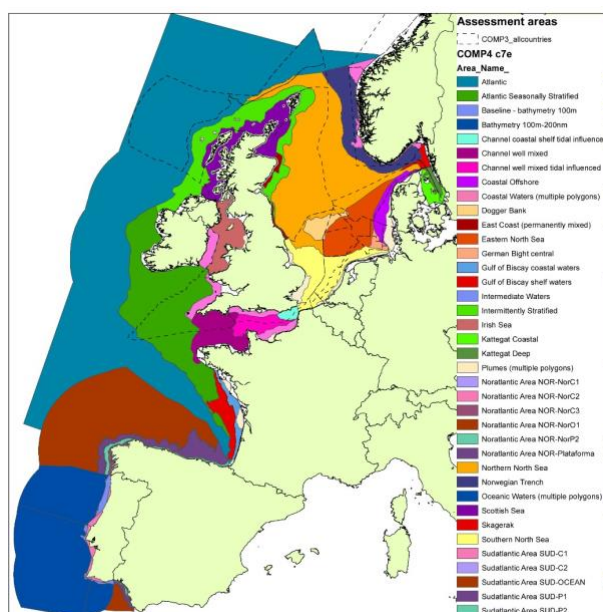
Figuur 4: Multivariate (MDS) analyse van de abiotische factoren tussen 1990 en 2019 (A) en phytoplanktonasamenstelling tussen 2000 en 2-19 (B) van de MWTL-stations.



Figuur 5: Stratificatie regimes in de Noordzee (Van Leeuwen et al. 2015).

Voor de OSPAR ecosysteem assessments is een indeling gemaakt in gebieden met vergelijkbare

dynamiek in algen en primaire productie. Een eerste opzet voor deze indeling is uitgewerkt binnen het EU-project JMP-EUNOSAT (Blauw et al. 2019). De definitie van gebieden met vergelijkbare algendynamiek zijn gebaseerd op een analyse van ruimtelijke patronen in satellietdata. Vervolgens zijn deze patronen gerelateerd aan ruimtelijke patronen van verklarende variabelen uit het Deltares hydrodynamisch model. Belangrijke verklarende variabelen bleken de waterdiepte (als maat voor de mate van stratificatie) en de saliniteit. Na afloop van het project zijn deze definities van gebieden verder verfijnd. Deze gebiedsindeling gaat worden gebruikt voor de OSPAR rapportages en beoordelingen van eutrofiering (Figuur 5). Voor het NCP betekent dit een indeling in 'Southern North Sea' en 'Eastern North Sea'.



Figuur 6: OSPAR indeling die gebruikt gaat voor beoordeling van de eutrofiering (Blauw et al. 2019).

Op basis van bovenstaande gegevens stellen we de volgende stations voor als mogelijke kandidaten voor het kustnabij en offshore station:

- Kustnabij station: NOORDWK20 of NOORDWK70, deze liggen buiten de directe invloed van de rivieren, zijn representatief voor de 'Southern North Sea', liggen in de buurt van de grote geplande uitbreidingen OWFs Hollandse Kust en zijn 'intermittently stratified'. Eerder heeft er op NOORDWK10 een SmartBuoy gelegen, maar uit analyse van de data bleek dat hier soms zoetwaterlenzen vormen op het Noordzeewater wat interpretatie van de data bemoeilijkt (Blauw et al. 2018). Het station NOORDWK20 wordt op dit moment nog 18x per jaar bezocht tijdens de MWTL-metingen. Hiermee kan onderhoud van het station worden gecombineerd.
- Offshore station: TERSLG135 ligt in diepere gedeelte ($\pm 50\text{m}$ diep) van de Oestergronden, is

representatief voor de Eastern North Sea. In dit gebied zijn grootschalige OWFs gepland, het water is 'seasonally stratified' en ligt relatief dicht bij de FerryBox route tussen Rotterdam en Noorwegen (zie Figuur 6 in hoofdstuk 'Ruimtelijke dekking') wat vergelijking tussen datasets vereenvoudigd. Bovendien heeft er op TERSLG135 al eerder een Smartbuoy (CEFAS + RWS) gestaan waardoor er vergelijking met eerdere data kan worden gemaakt. Het station wordt in de huidige MWTL-monitoring 12x per jaar bezocht wat waarschijnlijk voldoende moet zijn om het station te onderhouden.

Metingen, variabelen en instrumenten

Voor de fytoplanktonsamenvatting en primaire productie doen we hieronder verschillende aanbevelingen. Echter, door de korte termijn van deze no-regret actie kunnen in een later stadium veranderingen worden voorgesteld. We raden aan:

- **Beperk gebruik van beschikbare scheepstijd door uitwisseling van instrumenten op zee.** Er zal regelmatig (schatting is 8-12x per jaar) onderhoud aan de sensoren moeten plaatsvinden en de stations zullen jarenlang opereren. De kosten kunnen deels beperkt worden door scheepstijd te minimaliseren en daarom wordt voorgesteld instrumenten op zee uit te wisselen en deze op het land te onderhouden. Dit geeft op korte termijn een hogere investering omdat er per meetstation een dubbele set aan instrumenten aangeschaft moeten worden, maar de extra kosten worden gedurende de looptijd terugverdiend. Bovendien wordt continuïteit van de tijdserie gewaarborgd omdat er sensors aan land gecheckt en onderhouden kunnen worden. Afstemming met RWS Aanbod kant, zoals CIV Mobiel Meten en CIV Laboratorium, is hierbij gewenst.
- **Metingen over de hele waterkolom.** Empirische data (Floeter et al. 2017) en modelresultaten (Van der Molen et al. 2014) geven aan dat een belangrijk effect van OWFs een verandering van de verticale gelaagdheid van het water zal zijn door verhoogde menging. Om de verticale verdeling van licht (belangrijk voor berekening van primaire productie) en van het fytoplankton in de waterkolom te meten is het belangrijk om lichtmetingen (m.b.v. PAR sensors) en chlorofyl (met fluorescentie sensor) te doen over de gehele waterkolom (zie ook het voorstel voor fysische metingen in de MONS-abiotiek rapportage van Blauw et al. 2022). Hiervoor kan de SmartBuoy benadering worden gebruikt waarbij instrumenten op verschillende dieptes langs de mooring worden gezet (Blauw et al. 2012, Meire et al. 2013). Een andere optie is gebruik te maken van een zgn. WireWalker (Pinkel et al. 2010). Een WireWalker is een pakket aan instrumenten dat langs een lijn verticale profielen kan maken van de waterkolom. De energie die nodig is voor

de verticale beweging wordt uit golfbeweging gemaakt, waarbij golven ervoor zorgen dat het pakket stapje voor stapje naar beneden gaat en als de bodemstopper wordt geraakt een vrije upcast doet met een snelheid van ongeveer 10m per minuut. De WireWalker is een beproefd concept dat veelvuldig in kustsystemen is ingezet en gedurende perioden van >4 weken operationeel is geweest (Pitcher et al. 14). De verticale profielen van licht en chlorofyl zijn relevant voor primaire productie berekeningen in het water (Figuur 1) en op de bodem (Hoofdstuk 6 'Bentische primaire productie').

Biologische variabelen. Over het algemeen worden meetstations gebruikt voor het meten van fysische en biochemische variabelen. Tegenwoordig kunnen deze stations worden uitgebreid met meting van fytoplanktensamenstelling met *in situ* flow cytometry (CytoSense) en *in situ* meting van primaire productie met de FRRF (Chelsea - FastOcean APD, <https://chelsea.co.uk/products/fastocean-apd/>). Ook stellen we voor deze vaste meetstations uit te rusten met een O₂-sensor om de primaire productie bepaling met de O₂-tijdserie analyse te testen en vergelijking met de FRRF-methode. Ook zou mesozooplankton kunnen worden gemeten (zie ook 'MONS - zooplankton' van Jak et al. 2022) via imaging technieken.

Kosteninschatting

Een eerste schatting van benodigde inzet voor de eerste 5 jaar is als volgt:

- **Personeel (500k€):** Voor de praktische uitvoering van deze monitoring een technisch assistent nodig voor onderhoud en uitzetten van de instrumenten (5 jaar, 250k€) en wetenschappelijk personeel voor de opwerking van de data (±3-4 maanden per jaar, 250k€).
- **Vaartijd (10-12 vaardagen per jaar):** Het wisselen van instrumenten op de 2 vaste meetstations moet worden toegevoegd aan de bestaande MWTL-tochten dus hiervoor hoeft relatief weinig extra inzet te zijn met betrekking tot scheepstijd. We rekenen op een halve dag per meetstation per uitwisseling en 10-12x wisselen per jaar. Dit zou een totaal aantal vaardagen van 10-12 per jaar zijn. Mocht de vaarfrequentie van het MWTL-programma afnemen dan wordt benodigde scheepsinzet aanmerkelijk hoger.
- **Apparatuur en onderhoud (940k€):** Een grote investering gaat gepaard met de aanschaf van instrumenten voor de meetstations. Omdat nog niet gekozen is of er met boeien of WireWalkers gewerkt gaat worden zijn in dit rapport alleen de instrumenten voor fytoplanktensamenstelling en primaire productie opgenomen: CytoSense *in situ* flow cytometer (4 x 150k€) + Chelsea FastOcean APD (4x 80k€) + O₂-sensors (incl. batterypack en dataopslag, 4x25k€).

- **Vaartijd:** Het wisselen van instrumenten op de 2 vaste meetstations moet worden toegevoegd aan de bestaande MWTL-tochten dus hiervoor hoeft relatief weinig extra inzet te zijn met betrekking tot scheepstijd. We rekenen op een halve dag per meetstation per uitwisseling en 10-12x wisselen per jaar. Dit zou een totaal aantal vaardagen van 10-12 per jaar zijn. Mocht de vaarfrequentie van het MWTL-programma afnemen dan wordt benodigde scheepsinzet aanmerkelijk hoger.

8. Ruimtelijke dekking

Hoewel de MWTL-monitoring de gehele Nederlandse Noordzee omvat en het hele seizoen meet wordt een deel van de ruimtelijke patronen van het fytoplankton gemist, o.a. omdat primaire productie niet wordt gemeten. Deze ruimtelijk patronen zullen waarschijnlijk versterkt worden door het schaduweffect dat bijvoorbeeld windparken zullen geven. Hetzelfde geldt voor de omvang van gestratificeerde gebieden in de zomer en de duur van de stratificatie onder invloed van klimaatverandering in windparken. Ook eventuele veranderingen in de verspreiding van rivierwater in de Noordzee kan niet met enkel MWTL-locaties in beeld worden gebracht.

Om de ruimtelijke resolutie van monitoringdata te verhogen bevelen we aan om data van 2 aanvullende platforms te gebruiken: satellietdata en Ferrybox-data langs een ander transect en met een hogere resolutie dan de MWTL-transecten.

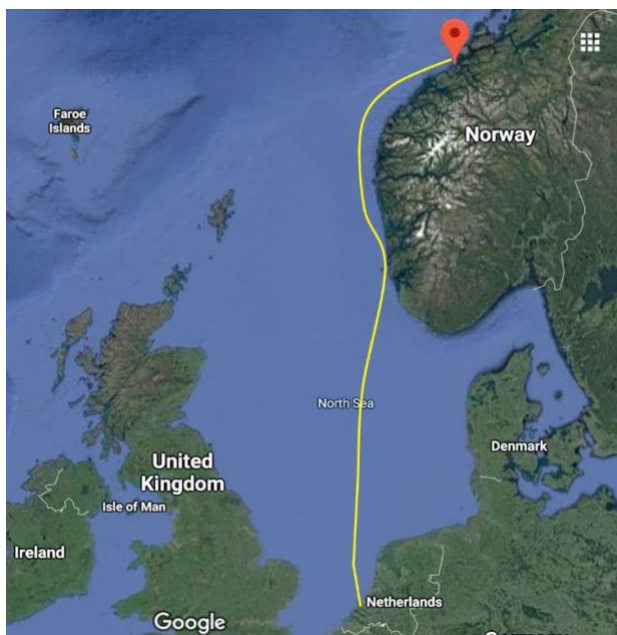
Satellietdata

Met satellietdata van Sentinel-3 wordt de waterkleur gemeten met een ruimtelijke resolutie van 1 x 1 km en een temporele resolutie van 1 opname per dag. In de praktijk zal de temporele resolutie van bruikbare data lager liggen, doordat bewolking het zicht van de satelliet op het water geheel of gedeeltelijk blokkeert, maar afhankelijk van het gebied verwachten we voor iedere locatie in de Noordzee ongeveer 50 bruikbare metingen van waterkleur per jaar. Deze data kunnen met algoritmen worden vertaald naar concentraties chlorofyl en zwevend stof. Deze data geven een veel fijnschaliger weergave van ruimtelijke patronen en hogere temporele resolutie dan de MWTL-metingen. In het JMP-EUNOSAT project heeft RBINS (Royal Belgian Institute of Natural Sciences) een satellietproduct ontwikkeld wat voor iedere situatie het optimale algoritme kiest. Dit product wordt gevalideerd met o.a. de Nederlandse MWTL-data (van der Zande et al., 2019). De output hiervan wordt nu ook gebruikt voor OSPAR-eutrofiëringsassessments en de data zijn ook verstrekt aan RWS voor andere doeleinden. Er zijn ook Sentinel-3 chlorofyl A producten publiek beschikbaar via CMEMS, maar die geven slechtere validatieresultaten voor (relatief troebele) Nederlandse kustwateren dan het RBINS-product.

Voor de kustwateren tot 20 km uit de kust zijn ook satellietdata beschikbaar van de Sentinel- 2 satelliet. Deze hebben een hogere ruimtelijke resolutie dan de Sentinel-3 data: tot enkele tientallen meters. Op basis van deze data zijn nu ook chlorofyl A en zwevend stof producten beschikbaar via een CMEMS-service en de eerste validatieresultaten voor zwevend stof in de Waddenzee waren veelbelovend. De betrouwbaarheid voor chlorofyl A in kustwateren moet nog verder worden onderzocht, maar als de ruimtelijke patronen hierin realistisch blijken te zijn zouden ze een goede aanvulling zijn om de invloed van windparken, maricultuur en beschermde gebieden inzichtelijk te maken. De uitbreiding van de MWTL-metingen met FerryBox (zie hieronder) zullen deze validatie versterken. In het HIGHROC project kon worden aangetoond de windparken de zwevend stof concentraties duidelijk beïnvloeden.

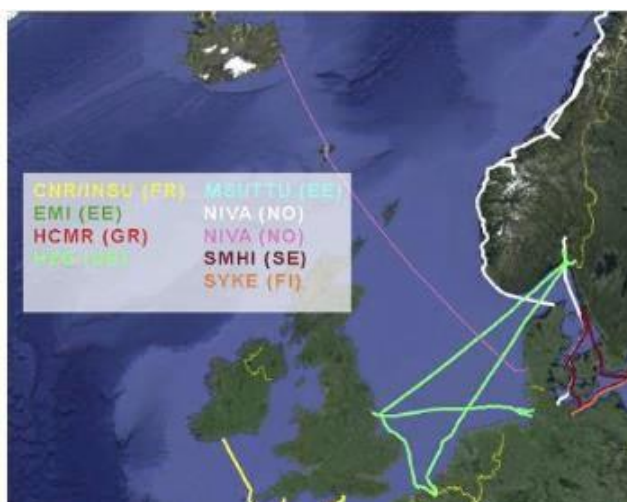
Ferrybox

In samenwerking met RWS werkt NIVA (Noorwegen) aan een installatie van een Ferrybox systeem aan boord van het vrachtschip 'SC Connector' tussen Rotterdam, Immingham (UK) en een aantal havens langs de Noorse westkust. Het schip komt ongeveer om de 2 weken aan in Rotterdam (zie transect in Figuur 6). Dit transect loopt in tegenstelling tot de MWTL-transecten parallel aan de kust in de richting van de Rijnpluim. Vanaf begin 2022 zullen aan boord van dit schip de volgende variabelen quasi-continue worden gemeten: temperatuur, saliniteit, chlorofyl-fluorescentie, CDOM-fluorescentie, turbiditeit, en er is een automatische monsternamen op voorgeprogrammeerde momenten. Er is in het schip ruimte voorbereid voor het toevoegen van andere sensoren voor bijv. pCO₂, pH, primaire productie (FRRF) en fytoplanktensamenstelling met een flow cytometer.



Figuur 6: Schets van de route die de nieuwe Ferrybox aan boord van het vrachtschip 'Connector' gaat varen.

Daarnaast zijn er een aantal andere vrachtschepen met Ferrybox systemen aan boord die het NCP doorkruisen en door Hereon in Duitsland worden onderhouden en al sinds vele jaren in gebruik zijn (Figuur 7). Data van deze trajecten kunnen worden gedownload vanuit de COSYNA-portal. Op sommige trajecten wordt ook pCO₂ aan boord gemeten. Deze data en de pCO₂ data van een transect van IJmuiden naar Bergen (Noorwegen) kunnen worden gedownload vanuit de SOCAT- database.



Figuur 7: Kaart met huidige Ferrybox trajecten in de Noordzee in 2014. Het oost-west traject van Duitsland naar Engeland is de Cuxhaven-Immingham Ferrybox 'Tordania'. Het 'driehoek' traject van Zeebrugge (Be) naar Immingham (UK), naar Moss (No), naar Halden (DK) naar Zeebrugge is de 'Lysbris' Ferrybox.

Kosteninschatting

Apparatuur en onderhoud (230€): Alleen relevant indien een CytoSense flow cytometer (150k€) en Chelsea FastOcean APD (80k€) zal worden geïnstalleerd op de Ferrybox.

Personeel: Voor installatie en onderhoud van de instrumenten is een technisch assistent nodig (deeltijd) die op regelmatige basiscontroles kan uitvoeren.

9. Bentische primaire productie

Door de geringe diepte in sommige regio's van de Noordzee is het waarschijnlijk dat er primaire productie op, en in, de bodem optreedt (e.g. Middelburg en Soetaert 2005). Primaire productie in zandige zeebodems is gelinkt aan de activiteit van bentische micro-algen (bv. diatomeeën), terwijl bij voldoende hard substraat ook macro-algen op de bodem kunnen groeien. Preliminair data van de Klaverbank (Noordzee), verkregen met de NIOZ Eddy Covariance lander, suggereren inderdaad dat hier bentische primaire productie optreedt (Cathalot, ongepubliceerd). Aanvullend bewijs hiervoor zijn video-opnames van het gebied die macroalgen laten zien. Op Noordzee stations is de extinctie coëfficiënt (K_d) ongeveer 0.1 m^{-1} (MWTL-data en zie Capuzzo et al. 2018), wat betekent dat er op 20 à 30 m diepte nog 5- 15% van het invallende licht aanwezig is, voldoende voor fotosynthese. In diepere gebieden van de Noordzee is het niet uitzonderlijk dat het diep chlorofyl maximum zich op 35-40 m bevindt (Van Leeuwen et al., 2013). Aangezien dit wijst op pelagische productie op die diepte is het aannemelijk dat bentische primaire productie op vergelijkbare diepte mogelijk is. De bijdrage van bentische primaire productie aan het voedselweb van de Noordzee is echter onbekend.

Er worden in de Noordzee meer en meer harde substraten geïntroduceerd (windmolenparken, drijvende platformen). Die structuren zullen macro-algen groei bevorderen, aangezien ze een hard substraat bieden in de zone met voldoende lichtinval, waar wieren op kunnen groeien. Bepaalde organismen (e.g. Amphipoda zoals *Jassa herdmani*) vormen sedimentmatten op de pylonen van de windmolens die een substraat kunnen vormen voor (semi-bentische) primaire productie. Anderzijds is het waarschijnlijk dat drijvende structuren de primaire productie verstoren door beschaduwning, waardoor primaire productie op de bodem belemmerd zal worden (Karpouzoglou et al., 2020).

Het doel van dit MONS deelonderzoek is het kwantificeren van de bentische primaire productie in de Noordzee en dit in relatie tot de totale primaire productie te brengen. Eerst worden aan de hand van literatuuronderzoek en data-analyse die delen van de Noordzee aangeduid waar bentische productie kan optreden (Fase 1). *In situ* en/of aan boord fotosynthese metingen, licht en nutriënten beschikbaarheid worden dan gecombineerd om de effectieve groei van bentische algen te bepalen (Fase 2). In Fase 3 worden de data gebruikt om mechanistische modellen te parametriseren om uiteindelijk de bentische productie in het Nederlands deel van de Noordzee te bepalen (Fase 4).

Plan van aanpak

Op basis van beschikbare informatie (zie hierboven) is het aannemelijk dat bentische primaire productie

in bepaalde delen van de Noordzee voorkomt. Voordat het hele onderzoek zal worden opgestart worden de hierboven genoemde data kwantitatief geëvalueerd en volgt een go/nogo moment. Indien blijkt dat de kwantitatieve bijdrage als minimaal kan worden ingeschat t.o.v. pelagische productie dan kan worden besloten dat het niet zinvol is om dit onderzoek verder te zetten. Mocht er voldoende aanleiding zijn te veronderstellen dat bentische productie belangrijk kan zijn, dan zullen de volgende 4 fases van het onderzoek worden opgestart.

Fase 1. Regio's met potentiële bentische primaire productie en groei in de Noordzee: data- analyse

Fotosynthese door algen is afhankelijk van licht, maar de *groei* van algen (primaire productie) is alleen mogelijk als er ook voldoende nutriënten aanwezig zijn. Fase 1 van dit onderzoek maakt gebruik van bestaande data, eventueel aangevuld met bestaande model output. Hierbij zullen beschikbare lichtprofielen de afgeleide coëfficiënten, in combinatie met diepte van de bodem en fotosynthese karakteristieken van bentische macro- en microalgen gebruikt worden om in te schatten waar fotosynthese mogelijk is. Nutriënten data bij de bodem worden gebruikt om de potentiële algengroei te bepalen.

Fase 2. *In situ* metingen van bentische primaire productie

Gebaseerd op resultaten van Fase 1 worden er vaartochten gepland, waarschijnlijk in combinatie met ander Noordzeeonderzoek, zodat er in zoveel mogelijk ondiepe gebieden waar fotosynthese aannemelijk is, het volgende kan worden gemeten:

- a. **Licht profielen in water** (bij voorkeur met lichtspectra) van wateroppervlak tot de bodem, in combinatie met nutriëntprofielen. Aanvullend aan Niskin monsters, kan dit met behulp van respectievelijk een CTD en nitraat sensor gemeten worden.
- b. Laboratoriumexperimenten: aan boord worden sediment cores geïncubeerd onder *in situ* condities, met als doel om de fotosynthese-licht (PI) response van de bentische primaire producenten te bepalen. Dit wordt gelinkt aan de chemische condities in het sediment.
 - De zuurstof consumptie en productie van het sediment wordt bepaald onder verschillende licht intensiteiten (PI curve) in gesloten sediment cores. Dit gebeurt door het modelleren van het tijdsverloop van de zuurstofconcentraties, gemeten met behulp

van optodes.

- Verticale profielen van O₂ and pH in het sediment worden onder verschillende lichtintensiteiten gemeten met microsensors. Hieruit wordt, met behulp van wiskundige modellen, de fotosynthese en respiratie in de verschillende sedimentlaagjes bepaald.
 - Profielen van nutriëntconcentraties in het sediment worden bepaald met hoge resolutie aan hand van diffusieve hydrogels (PO₄, NO₃, Metzger et al., 2016) en profielen met lagere verticale resolutie (NH₃) worden bepaald door van slicing van het sediment onder anaerobe condities.
 - PAM fluorescentie metingen geven een schatting van de efficiëntie van de fotosynthese van de algen op de bodem.
 - Pigmenten analyses in sediment geven indicatie over de identiteit van de primaire producenten in het sediment.
- c. **in situ metingen** worden uitgevoerd waarbij gesloten **sediment cores** worden uitgehangen aan een kabel, dicht bij de bodem, of eventueel aan een bentische lander vastgemaakt. Verandering in zuurstofconcentratie in het ingesloten water, samen met licht en temperatuur wordt gemeten. Dit geeft een schatting van de *in situ* micro-algen productie.
- d. **in situ** incubaties waarbij **macro-algen** in een gesloten container worden geïncubeerd dicht bij de bodem, en waarbij zuurstof concentratie in het water, licht en temperatuur wordt gemeten. Dit laat toe om de macro-algen productie te bepalen.
- e. **in situ** metingen met de **Eddy covariance** techniek om productie / respiratie van sedimenten op grotere ruimtelijke schaal te bepalen. Dit is voornamelijk geschikt op heel zandige sedimenten en harde substraten. Deze techniek is niet makkelijk toe te passen maar geeft wel schattingen op grote ruimtelijke schaal.

Fase 3. Mechanistische modellen

De verzamelde data worden gebruikt voor het kalibreren van bestaande mechanistische modellen. Een bruikbaar macro-algen model is gebaseerd op Broch & Slagstad (2012), zoals in Long et al. (in press)

toegepast. De interactie tussen primaire producenten en de nutriëntencyclus in de sedimenten kan beschreven worden aan hand van een diagenetisch model, zoals het model van Soetaert et al. (1996) dat is uitgebreid met een primaire productie module door Hochard et al. (2010).

Fase 4. Bentische primaire productie.

De mechanistische modellen worden gebruikt om de **bentische primaire productie** op te schalen naar het gehele gedeelte van Nederlands deel van de Noordzee.

Kosteninschatting

Een eerste schatting van benodigde inzet is als volgt:

- **Personeel (350k€):** De exploratiefase, d.w.z voor het go/no go moment, waarin een 1e inschatting wordt gemaakt naar de relevantie van bentische primaire productie is een kort project dat door een senior onderzoeker wordt uitgevoerd (20k€). Het onderzoek in Fase1-4 is meest geschikt voor een PhD-student (4 jaar, 250k€) onder supervisie van een senior onderzoeker (± 1 maand per jaar, 4x20k€).
- **Vaartijd (>100k€):** Ten minste 1, preferentieel 2 campagnes met de RV *Pelagia* voor Fase 2 van het onderzoek. De bemonsteringscampagnes kunnen goed worden gecombineerd met ander onderzoek op de Noordzee. Kosten per campagne: >100k€, Ships of opportunity kunnen eventueel ingezet worden voor (2a) en (2b) om de kosten te drukken.

Apparatuur en consumables (135€): Aanschaf Eddy covariance systeem (60€), voorbereiding vaartocht/microsensors/consumables/ laboratorium analyses (50-75k€)

10. Referenties

- Aardema HM et al. 2019. High-resolution underway measurements of phytoplankton photosynthesis and abundance as an innovative addition to water quality monitoring programs. *Ocean Sci.* 15, 1267–1285
- Asjes J et al. 2021. Monitoring en Onderzoek Natuurversterking en Soortenbescherming (MONS) (Vierde versie. 18 augustus 2021).
- Blauw AN et al. 2012. Dancing with the Tides: Fluctuations of Coastal Phytoplankton Orchestrated by Different Oscillatory Modes of the Tidal Cycle. *PLoS One* 7
- Blauw AN et al. 2018. Predictability and environmental drivers of chlorophyll fluctuations vary across different time scales and regions of the North Sea. *Prog. Oceanogr.* 161, 1–18
- Blauw AN, et al. 2019. Coherence in assessment framework of chlorophyll-a and nutrients as part of the EU project 'Joint monitoring programme of the eutrophication of the North Sea with satellite data' (Ref: DG ENV/MSFD Second Cycle/2016). Activity 1 Report. 86 pp.
- Blauw AN, et al. 2022. MONS Monitoringplan abiotiek. Deltares.
- Broch OJ en D Slagstad 2012, Modelling seasonal growth and composition of the kelp *Saccharina latissima*. *J Appl Phycol* 24, 759–776
- Burson A et al. 2016. Unbalanced reduction of nutrient loads has created an offshore gradient from phosphorus to nitrogen limitation in the North Sea. *Limnol. Oceanogr.* 61, 869– 888
- Capuzzo E et al. 2018. A decline in primary production in the North Sea over 25 years, associated with reductions in zooplankton abundance and fish stock recruitment. *Glob. Chang. Biol.* 24, e352–e364
- Carpenter JR et al. 2016. Potential impacts of offshore wind farms on North Sea stratification. *PLoS One* 11, 1–28
- Cocquempot L et al. 2019. Coastal ocean and nearshore observation: A French case study. *Front. Mar. Sci.* 6, 1–1

- Cox TJS et al. 2017. Tune in on 11.57 μ Hz and listen to primary production. *Biogeosciences* 14, 5271–5280
- De Borger E et al. 2021. Offshore Windfarm Footprint of Sediment Organic Matter Mineralization Processes. *Front. Mar. Sci.* 8, 1–16
- Degraer S. et al. 2020. Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning - A Synthesis. *Oceanography* 33: 48-57
- Dubelaar GBJ et al. 1999. Design and first results of CytoBuoy: A wireless flow cytometer for in situ analysis of marine and fresh waters. *Cytometry* 37, 247–254
- Farcy P et al. 2019. Toward a European coastal observing network to provide better answers to science and to societal challenges; the JERICO research infrastructure. *Front. Mar. Sci.* 6, 1–14
- Floeter J et al. 2017. Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Prog. Oceanogr.* 156, 154–173
- Glud, R.N., 2008. Oxygen dynamics of marine sediments. *Mar. Biol. Res.* 4, 243–289. <https://doi.org/10.1080/17451000801888726>
- Hochard S et al. 2010. Impact of microphytobenthos on the sediment biogeochemical cycles: A modeling approach. *Ecol. Model.* 221, 1687-1701
- Karpouzoglou T et al. 2020. Effects of large-scale floating (solar photovoltaic) platforms on hydrodynamics and primary production in a coastal sea from a water column model. *Ocean Sci.*, 16, 195–208
- Klunder L et al. 2020. Impact of an artificial structure on the benthic community composition in the southern North Sea: assessed by a morphological and molecular approach. *ICES J. Mar. Sci.* 77, 1167–1177
- Kromkamp JC and JCM Philippart, 2015. Primaire productie in het Waddengebied: meten en berekenen. NIOZ Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.
- Lawrenz E et al. 2013. Predicting the Electron Requirement for Carbon Fixation in Seas and Oceans. *PLoS One* 8, 1–18

- Lombard F et al. 2019. Globally Consistent Quantitative Observations of Planktonic Ecosystems. *Front. Mar. Sci.* 6: 196
- Long J et al, in press. Carrying capacity of *Saccharina latissima* cultivation in a Dutch coastal bay: a modeling assessment, *ICES J. Mar Sci*
- Marra JF et al. 2021. A database of ocean primary productivity from the 14-C method. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 6, 107-111
- Meire L et al. 2013. Impact of global change on coastal oxygen dynamics and risk of hypoxia. *Biogeosciences* 10, 2633-2653
- Metzger EA et al. 2016. Simultaneous nitrite/nitrate imagery at millimeter scale through the water-sediment interface. *Env. Sci & Technol* 50, 8188-8195
- Middelburg JJ en K Soetaert, 2005. The role of sediments in shelf ecosystem dynamics. Chapter 11, in: *The Sea*, Vol. 13, eds. Robinson and Brink, Harvard University Press, pp. 353-373
- Pinkel R et al. 2011. The Wirewalker: A vertically profiling instrument carrier powered by ocean waves. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 28, 426–435
- Raven JA, Beardall J, 2021 Influence of global environmental Change on plankton. *J. Plankton Res.* 43, 779–800. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbab075>
- Regaudie-de-Gioux, A., Lasternas, S., Agustí, S., Duarte, C.M., 2014. Comparing marine primary production estimates through different methods and development of conversion equations. *Front. Mar. Sci.* 1, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00019>
- Schneider LK et al. 2020. Exploring the trophic Spectrum: Placing Mixoplankton Into Marine Protist Communities of the Southern North Sea. *Front. Mar. Sci.* 7, 1–16
- She J et al. 2019. An integrated approach to coastal and biological observations. *Front. Mar. Sci.* 6, 1–6
- Silsbe GM et al. 2015. Toward autonomous measurements of photosynthetic electron transport rates: An evaluation of active fluorescence-based measurements of photochemistry. *Limnol. Oceanogr. Methods* 13, 138–155

- Silsbe GM and Kromkamp JC 2012. Modeling the irradiance dependency of the quantum efficiency of photosynthesis. *Limnol. Oceanogr. Methods* 10, 645–652
- Soetaert, K., Herman, P.M.J., Middelburg, J.J., 1996. A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1019–1040
- Underwood GJC and Kromkamp J 1999. Primary production by phytoplankton and microphytobenthos in estuaries. *Adv. Ecol. Res.* 29, 93–153.
- van der Molen J et al. 2014. Predicting the large-scale consequences of offshore wind turbine array development on a North Sea ecosystem. *Cont. Shelf Res.* 85, 60–72
- Van der Zande D et al. 2019a. Coherence in assessment framework of chlorophyll a-and nutrients as part of the EU-project 'Joint monitoring programme of the eutrophication of the North Sea with satellite data' (Ref: DG ENV/MSFD Second Cycle/2016). Activity 2 Report. 106 pp.
- Van der Zande D et al. 2019b. Joint Monitoring Programme of the EUtrophication of the NOOrthSea with SATellite data user case. 12(SI). *J. Operat. Oceanogr.* 12
- Van Leeuwen SM et al. 2013. Modelling the contribution of deep chlorophyll maxima to annual primary production in the North Sea. *Biogeochemistry* 113, 137– 152
- Van Leeuwen S et al. 2015. Stratified and nonstratified areas in the North Sea: Long-term variability and biological and policy implications. *J. Geophys. Res. Ocean.* 120, 1–17
- Van Oevelen et al. 2021. Primaire productie in de Westerschelde over de periode 2016-2019 bepaald m.b.v. de Fast Repetition Rate Fluorometry techniek - MONEOS eindrapport.
- Xie Y et al. 2018. Diel patterns of variable fluorescence and carbon fixation of picocyanobacteria *Prochlorococcus*-dominated phytoplankton in the South China Sea basin. *Front. Microbiol.* 9