



UNIVERSITEIT ANTWERPEN

Juni 2019-2020

Effecten van biogene riffen op ecosysteemdiensten in het Belgisch deel van de Noordzee

Focus visserijproductie Atlantische kabeljauw

Marlies De Corte

Promotor Dr. Katrien Van der Biest, Prof. Dr. Jan Staes

Masterproef voorgelegd met het oog op het behalen van de
graad van Master in Milieuwetenschap

Samenvatting en sleutelwoorden

Kustecosysteem Zuidelijke Noordzee, ecosysteemdiensten, InVest, Mytilus edulis rif COASTBUSTERS, rif abundantie, Gadus morhua, klimaatverandering, complex voedselweb

Mariene ecosystemen bieden belangrijke ecosysteemdiensten als waterkwaliteitsregulatie, golfdemping voor kustbescherming, visserij. Niettemin zorgen menselijke activiteiten als visserij, baggerwerken, zand- en grindextractie... voor een homogenisering van de zeebodem habitatstructuren. Het zandbankensysteem in het Belgisch deel van de Noordzee bestaat hoofdzakelijk uit zandbanken met een variërende sedimentsamenstelling en een geassocieerde soortenverspreiding. Zandbanken met fijne sedimenten en een hoog moddergehalte, zeldzamer in ruwe omstandigheden offshore, herbergen de hoogste soortendiversiteit en -dichtheid. Echter verlaagt nutriëntenaanrijking uit kustgebieden soortenrijkdom. Habitatstructurende soorten als de blauwe mossel zijn gekend het fijn zand in te vangen en het moddergehalte te verhogen. Verschillende studies tonen een hogere vis- en kreeftachtigenproductie nabij tweekleppige riffen. De driedimensionale structuur van mosselriffen vormt een kraamkamer en schuilplaats tegen predatoren en stromingen, wat soorten energie kan besparen. Daarenboven maakt de kolonisatie met diverse bentische soorten het mosselrif een aantrekkelijk foerageergebied voor de hogere trofische niveaus. Prooi-soorten met eenzelfde of hogere vetzuursamenstelling zijn van belang voor een goede conditie en bijgevolg reproductie. Wat commerciële soorten als de Atlantische kabeljauw potentieel opvoert.

Nabijgelegen Nederlandse percelen naast mosselzaadbanken tonen een tweemaal grotere soortenrijkdom en biomassa aan bodemdieren in de nabijheid van mosselen.

Belgische windmolenfunderingen trekken rifvormende soorten aan na de constructiewerken door resterende schelpen en steentjes. Drie tot vijf jaar na inplanting (2005) is een hoge biodiversiteit waargenomen rond de windmolenfunderingen. Een piek in voornamelijk kabeljauwachtigen is er gedetecteerd in 2008. Dit wordt vooral toegeschreven aan interjaarlijkse, ruimtelijke (zandbanktop-geul) en seizoensvariabiliteit in het marien ecosysteem. Echter resten, negen jaar na windmoleninplanting, met zeeanemonen bezette mosselen. Een evolutie naar een soortarme *M. senile* gedomineerde gemeenschap wordt er verwacht. Evenzo een finaal stadium op scheepswrakken. Echter rapporteerde men in Denemarken evenzo hoge aantallen zwarte grondel rond een mossel(schelpen)rif voor en na zeesterren predatie.

Het IPCC Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 voorspelt in 2081-2100 t.o.v. 1986-2005 20.5-24.1% visvangstverlaging. Een verhoogde mortaliteit dreigt voor immobiele soorten als de blauwe mossel, kreeftachtigen, soorten die zich niet kunnen verplaatsen naargelang hun

voorkeursomgevingsomstandigheden (temperatuur, pH). Het verliezen van schakels uit mariene voedselketens leidt tot veranderende prooi-predatorverhoudingen, wat een voedselweb instorting kan ontketenen. Habitatheterogeniteit wordt beschouwd als de belangrijkste motor van biodiversiteit en ondersteunt een robuust kustecosysteem. Het monetariseren van waardevolle ecosystemendiensten die zeehabitats leveren, reikt beleidsmakers handvaten aan voor habitatprioritering teneinde robuuste kustplanning. Met de visserijtools van het ecosystemendienstenmodel InVest is een inschatting gemaakt van de Atlantische kabeljauwwerving in de Zuidelijke Noordzee bij meer rifhabitat. Accurate voorspellingen benodigen echter een klimaatmodel en lokale ecosystemeparameters, soortenmonitoring rond biogene riffen met verschillende rifgroottes.

Summary and keywords

Coastal ecosystem Southern North Sea, ecosystem services, InVest, Mytilus edulis reef COASTBUSTERS, reef abundance, Gadus morhua, climate change, complex food web

Marine ecosystems offer important ecosystem services like water quality regulation, wave attenuation concerning coastal protection, fisheries. However, human activities as fishing, dredging, sand- and gravel extraction... homogenize habitat structures. The sandbank system in the Belgian part of the North Sea has varying sediment- and subsequently species distribution. Sandbanks with fine sediments and high mud contents, scarcer in rough conditions offshore, house higher species diversity and -density. Yet nutrient enrichment from coastal areas reduces species richness. Habitat-structuring species as the blue mussel are known to capture fine sand and increase the mud content. Several studies show higher fish- and crustacean production near bivalve reefs. Mussel reefs' three-dimensional structure provides a nursery and shelter against predators and currents, which can save species energy. Mussel reef colonization of various benthic species attracts higher trophic foraging predators. Prey species with similar or higher fatty acid contents support fish condition and hence -reproduction. Which potentially boosts commercial species like Atlantic cod.

Neighboring Dutch parcels, next to mussel seed banks, species diversity and biomass of benthic animals doubled through mussel presence.

Belgian windmill foundations attract reef-forming species after construction works by remaining shells and stones. Three to five years after implantation (2005), a high biodiversity is observed around the windmill foundations. A peak in mainly cod species was detected in 2008. This is mainly attributed to interannual, spatial (sand bank top - channel) and seasonal variability in the marine ecosystem. However, nine years after windmill implantations, mussels covered with sea anemones remain. Evolution towards a species-poor *M. senile* dominated community is expected. Equally a final

stage on shipwrecks. However in Denmark, similar numbers of black goby were reported around a mussel(shell) reef before and after starfish predation.

The IPCC Representative Concentration Pathway (RCP) 8.5 predicts a 20.5-24.1% reduction in fish catch in 2081-2100 compared to 1986–2005. Increased mortality threatens immobile species such as the blue mussel, crustaceans, species that cannot relocate to regions with preferred environmental conditions (temperature, pH). Losing links from marine food chains leads to changing prey-predator relationships, which can trigger a food web collapse. Habitat heterogeneity is considered to be the main driver of biodiversity and supports a robust coastal ecosystem. Monetizing valuable ecosystem services from marine habitats offers policymakers tools for habitat prioritization to ensure robust coastal planning. With the fishing tools of the ecosystem service model InVest the Atlantic cod recruitment in the Southern North Sea is estimated when more reef habitats are present. However, accurate predictions require a climate model and local ecosystem parameters, species monitoring around different biogenic reef sizes.

Inhoud

Samenvatting en sleutelwoorden	1
Summary and keywords	2
Leeswijzer	5
1 Inleiding	6
1.1 Interdisciplinaire maatschappelijke kadering	6
1.2 Probleemstelling - onderzoeksvraag	7
1.3 Noordzeekenmerken	13
1.4 Atlantische kabeljauw	15
1.4.1 Levenscyclus Atlantische kabeljauw met bijhorende habitats en proisoorten.....	15
1.4.2 Factoren die Atlantische kabeljauwwerving beïnvloeden	17
1.5 Rif abundantie	23
1.5.1 Noordzeesediment en bentische soortendiversiteit en -dichtheid	23
1.5.2 Mosselriffen in het Belgisch deel van de Noordzee 'COASTBUSTERS'	25
1.5.3 Tweekleppige riffen soortenbiomassa en -diversiteit.....	28
1.5.4 Nederlandse mosselcultuur.....	29
1.5.5 Harde substraten in het BNZ	31
2 Methoden.....	37
2.1 InVest 3.7.086 dataverzameling Atlantische kabeljauw	37
2.1.1 InVest fisheries habitat scenario tool.....	38
2.1.2 InVest fisheries tool.....	39
3 Resultaten.....	41
3.1 InVest scenario's.....	41
3.2 InVest fisheries habitat scenario tool.....	41
3.2.1 Scenario 1 (-50% habitatverandering).....	41
3.2.2 Scenario 2 (-25% habitatverandering).....	41
3.3 InVest fisheries tool.....	42
3.3.1 Scenario 1 (-50% habitatverandering).....	42
3.3.2 Scenario 2 (-25% habitatverandering).....	42
4 Conclusie en discussie	43
5 Interdisciplinaire bevindingen	47
6 Aanbevelingen.....	52
7 Bijlagen	57
8 Bibliografie.....	61

Leeswijzer

Het literatuuronderzoek is opgebouwd uit twee overkoepelende delen. Aanvankelijk een kenschets van de Atlantische kabeljauw levenscyclus met de belangrijkste habitats en prooi-soorten. Waarna de wezenlijke invloed van voedselbronnen en klimaatverandering op de Atlantische kabeljauw-werving wordt belicht. Waaruit de gevoeligheid en kwetsbaarheid van het marien voedselweb aan klimaat- en oceanografische variabelen blijkt.

In een tweede deel van de literatuurstudie bespreken we de rif abundantie en de soorten die geassocieerd zijn met een biogeen rif. Aanvankelijk een beschrijving van de aanwezige Noordzee sedimenten met bijhorende macrobenthische assemblages, met een sediment- en macrobenthische soortenbeschrijving voor het COASTBUSTERS testproject (*Mytilus edulis* rif). In de laatste drie onderdelen over rif abundantie beschouwen we de hogere trofische niveaus in het voedselweb. Met de wereldwijd uiteenlopende verhoogde, gelijkaardige alsook verlaagde soortenwaarnemingen rond tweekleppige aquacultuurbedden. Waarin de gerapporteerde soorten dicht bij huis, in de Nederlandse mosselculturen en rond de Belgische windmolenfunderingen aan bod komen. Deze funderingen fungeren immers als artificiële riffen.

Het kwantificeren van de rol van habitatstructuren voor de ecosysteemdienst visserij, - een verhoogde vis- en schaaldierproductie t.a.v. biogene riffen - kan ruimtelijke beleidsplanning adviseren met betrekking tot de ontwikkeling van robuuste kustecosystemen. Een beperkt aantal kwantificeringen voor de veel grotere oesterriffen langs de midden- en Zuid-Atlantische kust van Amerika blijken onvergelykbaar met eventuele Belgische riffen, t.a.v. de veel lagere productiviteit van de Zuidelijke Noordzee. Vandaar de wenselijkheid om de ecosysteemdienst te kwantificeren aan de hand van aangepaste modellen. Het Ecosysteemdienstenmodel InVest werd gebruikt om de ESD visserij te kwantificeren, de visserijmodellen doelen op kwantificering t.a.v. habitatstructuren. Dit werd toegepast op de Atlantische kabeljauw in Zuidelijk Noordzee voor additionele biogene riffen t.a.v. de bestaande zandhabitat. Ecosysteemparemeters hebben een belangrijke invloed op viswerving. Het ontbreken ervan beperkt de nauwkeurigheid van de resultaten. Tot slot zijn suggesties geformuleerd die de InVest visserijmodellen meer geschikt maken om het effect van biogene riffen op viswerving te beoordelen.

1 Inleiding

1.1 *Interdisciplinaire maatschappelijke kadering*

Zeeën en oceanen beslaan drie kwart van de aarde en hebben een cruciale invloed op klimaatregulatie en zijn een steeds belangrijkere voedselbron voor de groeiende wereldbevolking (Bollmann, 2010). De Verenigde Naties streven naar behoud en duurzaam gebruik van oceanen, zeeën en mariene hulpbronnen. Deze doelstelling is opgenomen in het 14^{de} ontwikkelingsdoel voor duurzame ontwikkeling. De volgende nevensdoelstellingen zijn specifiek relevant voor mijn onderzoek: nevensdoelstelling 14.2 'tegen 2020 de zee- en kustecosystemen op een duurzame manier herstellen en hun veerkracht versterken tot gezonde en productieve oceanen', nevensdoelstelling 14.4 'visvoorraden herstellen door intensieve en destructieve visserijpraktijken te beëindigen o.b.v. wetenschappelijke beheerplanning' en nevensdoelstelling 14.5 'tegen 2020 minstens 10% van de kust- en zeegebieden behouden, gebaseerd op de beste beschikbare wetenschappelijke informatie, in overeenstemming met het (inter)nationaal recht' (United Nations, 2015).

De organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) linkt de uitbouw van een blauwe economie (economische sectoren en activiteiten die gebruik maken van mariene hulpbronnen) aan de ecosystemendiensten van mariene ecosystemen in het concept 'oceanoeconomie 2030'. Nieuwe activiteiten als windenergie en aquacultuur steken de kop op naast recreatie en belangrijke activiteiten als visserij en zandwinning in de Noordzee. De langetermijnvisie van de Noordzee 2050 onderschrijft meervoudig ruimtegebruik om spanningen tussen de diverse gebruiksfuncties van het BNZ op te lossen waarbij de natuurlijke dynamieken van de Noordzee worden ingeschakeld. Het 'working with nature'-principe doelt op een maximale integratie van de meerwaarde van ecosystemendiensten van bij de ontwerpplanning van maritieme (infrastructuur)ontwikkelingen (Philippe DE BACKER, 2017).

Vanuit de bedrijfswereld is er heel wat activiteit en innovatie in het BNZ gebied. De blauwe cluster vzw, een bottom-up initiatief vanuit de bedrijfswereld en uitbreiding van "Flanders maritime cluster" focust op de blauwe economie en faciliteert onafhankelijk partnerschappen tussen Vlaamse bedrijven, kenniscentra en overheidsinstellingen om de blauwe economie aan te zwengelen (De Vlaamse ondernemer, 2019). Het VLAIO testproject 'COASTBUSTERS', induceert biogene mosselriffen voor de kust van de Panne. Het innovatieve project is een samenwerking i.h.k.v. kustbescherming tussen Deme, Jan de Nul, Sioen Industries, het Instituut voor Landbouw en Visserijonderzoek (ILVO) en eCoast, ondersteund door het Vlaams agentschap innoveren en ondernemen (VLAIO).

Biogene riffen zijn multifunctioneel door de talrijke ecosystemendiensten die ze beslaan. Mosselriffen leveren naast kustbescherming ook waterkwaliteitsregulatie en hebben een positief effect op de

visserij door hun lokaal verhoogde productiviteit. De toename in productiviteit wordt gedreven door een toegenomen habitatheterogeniteit. Meer en/of grotere habitatstructuren raffen ondersteunen het kustbeschermingsmechanisme en zorgen potentieel voor een verhoogde nutriëntenmineralisatie, gezondere kustgebieden. Naast waterkwaliteitsregulatie vormen mosselen dus een belangrijke schakel in het voedselweb door hun bentopelagische koppeling. Ze voeden zich met nutriënten, fytoplankton en detritus (waterkwaliteitsregulatie) en worden gepredeerd door hogere organismen, met een positieve feedback op de visserijproductie (Ysebaert, Walles, Haner, & Hancock, 2019).

1.2 Probleemstelling - onderzoeksvraag

Natuurlijke en hoofdzakelijk antropogene CO₂-emissies veroorzaken klimaatverandering. Sinds de helft van de 21ste eeuw observeren we meer extremen in neerslagpatronen en temperaturen, veranderende windsnelheden en golven.

De hoogste opwarming komt voor ter hoogte van de hogere breedtegraden, de (sub)arctische gebieden. Een mondiale overschrijding van 2 °C klimaatopwarming en het niet halen van het laagste klimaatscenario RCP 2.6, 1 °C opwarming is reëel (Pörtner et al., 2019). De verwachte intermediaire klimaatscenario's van het intergovernmental panel on climate change (IPCC) voor 2081-2100, voorspellen t.o.v. 1986-2005 een gemiddelde opwarming van 1.8 °C voor RCP 4.5, 2.3 °C voor RCP 6.0 en 3.7 °C opwarming in het meest extreme scenario, RCP 8.5 (Pörtner et al., 2019). Ook oceanen warmen mee op, verdampen meer en zullen vervolgens verzilten, in het bijzonder voor de tropische en de Noordelijk halfrond subtropische gebieden. Opwarming op grotere diepte wordt verwacht in de Zuidelijke oceaan (Collins et al., 2013). Voor klimaatscenario 2.6 zou een gemiddelde zeeoppervlak opwarming 0.73 °C bedragen, voor RCP 8.5 2.58 °C (Pörtner et al., 2019).

Het IPCC beschouwd vier representatieve groepen van mariene organismen die belangrijk zijn in de oceaan voedselwebben en de gevolgen van 1.5 °C klimaatopwarming of hoger illustreren. De *pteropoda*, kleine pelagische weekdieren veelvoorkomend in gematigde en polaire wateren. Tweekleppige weekdieren als mosselen, de *euphausiide* kreeftachtigen (krill) veelvoorkomend in polaire voedselwebben en vinvissen. Bij een opwarming van 1.5 °C wordt door het IPCC met hoge zekerheid verwacht dat veranderingen in watertemperaturen bepaalde soorten (bv. plankton, vissen) aanzet tot migratie naar hogere breedtegraden, en met gemiddelde zekerheid een lagere visserijproductie op lage breedtegraden. Bij een opwarming van 1.8 °C worden de hogere risico's verwacht voor tweekleppigen op vlak van verminderde groei, grotere ontwikkelingsafwijkingen (zoals dunnere schalen) en een verhoogde mortaliteit in de larvale stadia.

Met hoge zekerheid van het IPCC zal oceaanopwarming volgens RCP 8.5 leiden tot een verandering in productiviteit van veel visbestanden. Het maximum vangstpotentieel zou dalen met 3.4% tot 6.4%

voor RCP 2.6, tot wel 20.5% - 24.1% voor RCP 8.5 in 2080–2099 t.o.v. de referentie periode 1986–2005 (Pörtner et al., 2019). Een herverdeling van mariene soorten en een vermindering van de mariene biodiversiteit, vormt een uitdaging voor duurzame visserijproductiviteit. Een verlaagde visserijproductie met een stijgende voedselvraag zet de mondiale voedselproductie onder druk. Vervolgens brengt het (in)direct de mondiale tewerkstelling in de mariene visserij van 200 miljoen werknemers onder druk (United nations, 2015). Dit vormt eveneens een voedingsbodemp voor nationale verdelingsconflicten tussen visserijgebieden waarbinnen visbestanden migreren. Voor de Atlantische kabeljauw, haring (*Clupea harengus*) en makreel (*Scomber scombrus*) is een noordwaartse verplaatsing naar de Arctische gebieden opgemerkt en een verhoogde predatie op kleinere soorten (Pörtner et al., 2019).

Intertidale rotskusten hebben een laag tot matig aanpassingsvermogen doordat ze zeer gevoelig zijn aan oceaanoopwarming en -verzuring. De ecosystemen lopen naar gemiddelde verwachting van het IPCC een zeer hoog risico boven 3 °C, het RCP 8.5-scenario (Pörtner et al., 2019).

De klimaatscenario's verwachten voor de periode 2081-2100 een zeespiegelstijging van 0.29-0.59 m voor RCP 2.6 en een stijging van 0.61-1.10 m voor RCP 8.5. Zonder klimaatadaptatie kunnen we met zeer hoge IPCC zekerheid een sterke toename verwachten van overstromingsgevaar voor laaggelegen kustgebieden tegen het einde van de eeuw. Door de zeespiegelstijging te vertragen kopen we echter tijd om adaptatiemaatregelen in kustecosystemen in te voeren en een robuuste basis te leggen voor na 2100 (Pörtner et al., 2019).

Een zeespiegelstijging, in combinatie met hogere windsnelheden veroorzaakt extremere golven en stromingen, wat het hydrografisch circulatiepatroon kan wijzigen. Nearshore zandbanken hebben afhankelijk van de diepte, oriëntatie en afstand t.o.v. de kust, verschillende effecten op het hydrodynamisch patroon. Zo zorgen ze voor een belangrijke golfdemping van de laaggelegen kustlijngebieden van de Zuidelijke Noordzee tegen overstromingen (Héquette et al., 2013).

Stormgolven zijn verantwoordelijk voor landinwaartse zandbankmigratie, dit wijzigt de hoogte van zandbanken met een verlaagde golfbreking tot gevolg. Daarnaast veroorzaken door wind versterkte getijdenstromen een zandbankmigratie langs de kustlijn (longshore), wat de positie van zandbanken verandert (Héquette et al., 2013).

Golven en stromen, versterkt door windenergie veroorzaken voornamelijk Noordoostwaarts sedimenttransport vanuit het Engelse Kanaal langs de Belgische kustlijn. De door wind versterkt Noordoostwaartse longshore getijdenstromen migreerden de Hillsbank een kilometer noordwaarts langs de kust tussen 1911 en 2000. De Hills zandbank, is een ondiepe zandbank op 1400 meter van de kustlijn ten oosten van Duinkerke, ongeveer 9 km. De top komt bloot te liggen bij laagwater springtij. De Hillsbank migreerde jaarlijks 6 tot 10 meter landinwaarts, tussen 1911 en 1962 en 2 tot 4

meter tussen 1962 en 2000. De landinwaartse migratie, verplaatste en verlaagde tegelijkertijd ook de geul van 10 tot 15 m diep tussen de Hillsbank en de kustlijn.

De veranderende positie van zandbanken leidt tot heel verschillende effecten op de kusthydrodynamica en sedimenttransport. Echter suggereren Héquette et al. (2013) een continuüm van nearshore bankevolutie, waarbij hechting van de zandbank aan de kust de laatste fase vertegenwoordigt waarbij zand wordt geleverd aan het strand en de kust beschermt. In de overgangperiode zijn er periodes van sedimenttekort door de nabijheid van de bank-geassocieerde geul aan het strand (Héquette et al., 2013).

Een overstromingsrisicobeheerplan 'masterplan kustveiligheid' van de afdeling Kust van het Vlaams Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust zet naast zandsuppletie in op én stormmuren, én stormvloedkering én het verhogen van dijken (Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, 2015). Dijken en stormmuren staan geen borg voor kustbescherming en vormen een aanvullende beschermmaatregel. De huidige zandsuppletie vormt geen duurzame kustbeschermingsmaatregel, daar het wordt afgegraven van de zandbanken die net de golfslag temperen. Uiteindelijk spoelt het zand na enige tijd terug. Zandsuppletie heeft een aanzienlijk effect op het op te hogen strandecosysteem, afhankelijk van de sedimentkwaliteit en -kwantiteit, suppletietechniek, oppervlakte en locatie (Speybroeck et al., 2006).

Daarenboven heeft het ook effect op de zand- en grindextractiezone. De kwintenbank, een zand- en grindwinningszone kende een verarming in soortendiversiteit van eenoogkreeftjes (*Copepoda*) en een verandering van de gemeenschapsstructuur door een gewijzigde sedimentsamenstelling (Vincx et al., 2004). Grindwinning verlaagt het aantal grindhabitats die voor soorten als de haring fungeren als schuilplaats.

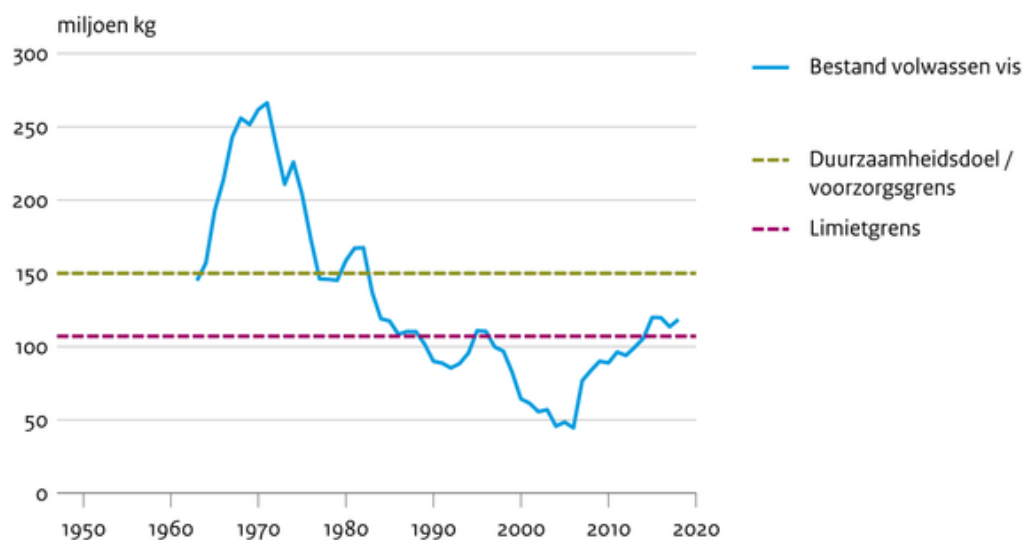
Het Belgisch deel van de Noordzee (BNZ) is gegeerd en vertoont veel economische activiteit. Deze veelheid aan claims en functies werd vastgelegd in het marien ruimtelijk plan (MRP) (Federale overheidsdienst volksgezondheid, 2020). Activiteiten als zandwinning, baggeren van de vaargeulen en homogeniseren de Noordzeebodemstructuur verarmen de kwaliteit en omvang van habitats voor mariene soorten. Wereldwijd gebeurt bijna een kwart van de globale visvangst met bodemsleepnetten, wat de voornaamste humane bron van fysische verstoring van de zeebodem vormt (Palet; Thrush, Gray, Hewitt, & Ugland, 2006). Volgens Smaal et al. (2013) is er net na de visserij een verlaging van het moddergehalte waarneembaar in de zandige zeebodem (A. Smaal et al., 2013). Bodemsleepnetten egaliseren het sediment en verminderen de complexiteit van het reliëf. Ze zorgen voor een aanzienlijke afschraping van de bodem(soorten), wat de samenstelling van het marien ecosysteem wijzigt en de waterkolom door sedimentopwelling vertroebelt (Palet). Op lange termijn zorgen activiteiten als zandwinning, baggerberging voor habitathomogenisering. Het verlies

van kraamkamers, foerageergebied en schuilplaatsen, verlaagt het aantal vispopulaties (De Backer, Van Hoey, Coates, Vanaverbeke, & Hostens, 2014). Echter bleek op korte termijn een onverwachte verhoging van de macrobenthische soortenassemblages door de bodemversturende activiteiten. Een beperkte (2%) toename van fijn zand, verrijkt met modder waarin *A. Alba* huist trekt habitatstructurende soorten aan als bepaalde tweekleppigen en modderige zandsorten zoals de borstelworm *Lanice conchilega* (De Backer et al., 2014).

Sinds 1970 trad een sterke daling in van de Atlantische kabeljauw populaties over de volledige Noordzee (Figuur 1). Tussen 1977-1989, was er een afname in densiteit met een factor 100 langs de Zuidoostelijke Noordzee. Sinds 2000-2005, een beperkte toename langs de noordoostelijke kustlijn (WGECO, 2008).

In 2004-2006 kende de Atlantische kabeljauw (*Gadus morhua*) in de Noordzee een dieptepunt van 45 miljoen kilogram. Het bestand bedroeg in 1971, 266 miljoen op zijn maximum (ICES, 2019). De soort werd opgenomen als kwetsbare rode lijstsoort (Sobel, 1996). Een stijgende trend werd vanaf 2008 waargenomen door een herstelplan met vangstrestricties op de Atlantische kabeljauw in het Kattegat en de Noordzee incl. het Skagerrak en het oostelijk deel van het Engels Kanaal (verordening EG 1342/2008). In 2018 steeg de populatie net boven de limietgrens met 118 miljoen kilogram, het duurzaamheidsdoel beoogt 150 miljoen kilogram (ICES, 2019). Een herstel van het bestand blijft een enorme uitdaging, zeker met de huidige snelheid van temperatuurstijging (Olsen et al., 2011)

Kabeljauwstand in Noordzee



Figuur 1 Atlantische kabeljauwstand in de Noordzee (ICES 2018)

Visserijquota op individuele soorten zorgt, door indirecte predatie in het complexe voedselweb, voor contra-intuïtieve effecten op de paabiomassa. Een verlaagde visserijdruk op toppredatoren

Atlantische kabeljauw en koolvis (*Pollachius virens*) verhoogt de predatiedruk op wijting en schelvis met (indirect) een toename in haring, zandspiering (*Ammodytes marinus*), steenbolk (*Trisopterus luscus*) en sprat paaibiomassa (ICES advisory committee, 2015) (ICES, 2013). Volgens het international council for the exploration of the sea (ICES) (2013) zou de Noordzee paaibiomassa meer onder druk komen te staan door veranderingen in predator-prooi relaties dan in visserijdruk. Het instorten van toppredatoren uit ecosystemen kan leiden tot cascade effecten op de lagere trofische niveaus, waarbij het voedselweb volledig wordt geherstructureerd (ICES, 2013). Een overvloed aan kleine pelagische prooi-soorten door de instorting van de Atlantische kabeljauw, werd bv. positief geassocieerd met een toename in grijze zeehonden (*Halichoerus grypus*) (Frank, Petrie, Choi, & Leggett, 2005). Een multi-soorten management aanpak is van belang voor het behoud van een evenwicht in de Noordzeebestanden (ICES, 2013).

Habitatverlies is wijdverbreid erkend als de grootste oorzaak van de achteruitgang van soorten (Peterson, Grabowski, & Powers, 2003). Een verlies aan habitatstructuren en vervolgens mariene soorten kan leiden tot een verminderde werking van het mariene ecosysteem (De Backer et al., 2014). Habitat-heterogeniteit wordt beschouwd als de belangrijke motor van biodiversiteit (Thrush et al., 2006). Vandaar verdient habitatrestauratie de hoogste prioriteit in instandhoudingsprogramma's en mitigatie inspanningen tegen habitatverlies. Het kwantificeren van ecosystemendiensten is zeer waardevol en ondersteunend voor besluitvormers bij het prioriteren van habitats inzake behoud en herstel (Peterson et al., 2003).

Biogene mosselriffen, bodemstructuren gevormd door mosselschelpen zijn potentiële biodiversiteitshotspots ter ondersteuning van de visbestanden in de Noordzee. Hun volume werkt daarenboven mitigerend op de toenemende golfwerking en stroming (Troost et al., 2014). Oesterriffen (*Crassostrea virginica*) in het Mosquito Lagoon estuarium, Florida verlaagden de totale golfenergie t.o.v. kaal sediment met 44.7%, en in combinatie met slijkgras (*Spartina alterniflora*) zelfs met 67.3% (Manis, Garvis, Jachec, & Walters, 2015).

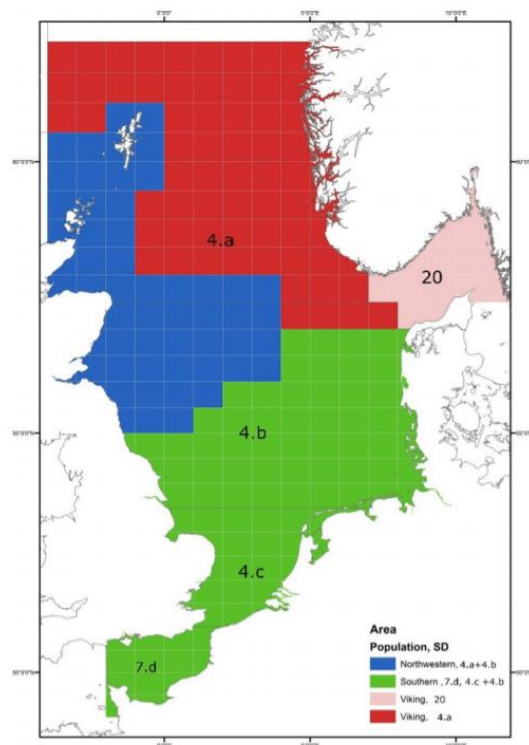
Riffen fungeren als schuilplaats, kraamkamer en foerageergebied voor verschillende soorten vissen en kreeftachtigen (Chowdhury, Hossain, Ysebaert, & Smaal, 2020; Kristensen et al., 2015). De complexe driedimensionale structuur van het rif biedt jonge vissen vele schuilplaatsen. De divers bevolkte blauwe mosselriffen (*Mytilus edulis*) trekken grotere foeragerende vissoorten aan (Ysebaert et al., 2019). T.o.v. ongestructureerde habitats tonen meerdere studies dat er hogere dichtheden vissen en kreeftachtigen aanwezig zijn in de buurt van riffen, aangehaald in paragraaf 1.5.3 (Peterson et al., 2003; P. Zu Ermgassen, Grabowski, Gair, & Powers, 2018; P. S. zu Ermgassen, Grabowski, Gair, & Powers, 2016). De oudere leeftijdsklassen vissen en kreeftachtigen worden aangetrokken door de verhoogde prooidichtheid rond het rif (Ysebaert et al., 2019). Daarnaast is er volgens Ermgassen et

al. (2016) een verhoogde afzetting van larven en een verlaagde larvale mortaliteit na afzetting, wat bentische invertebraten en vispopulaties reguleert (P. S. zu Ermgassen et al., 2016).

De onderzoeksvraag **“Hoeveel Atlantische kabeljauw kan de aanleg van een biogeen rif voortbrengen?”** is benadert met het ecosysteemdienstenmodel InVest 3.7.086 voor het Zuidelijke Noordzee zandbanksysteem. De “Fisheries tools” zijn toegepast op de Atlantische kabeljauw in de Zuidelijke Noordzee om een verandering van een zandbodem naar een biogeen rif op de totale Atlantische kabeljauwvangst en -opbrengt in te schatten (Sharp, D., D., Bernhardt, & Rogers, 2018). Ecosysteemdiensten zijn volgens het verenigde naties project TEEB (The Economics of Ecosystem services and Biodiversity) directe en indirecte bijdragen van ecosystemen aan het menselijk welzijn. Ze ondersteunen direct of indirect overleving en levenskwaliteit (Biodiversity Information System for Europe, 2020). De verenigde naties categoriseerden ecosysteemdiensten in verschillende functies; “provisioning, regulating-, supporting- en cultural services”. Visserij wordt ondergebracht in provisioning, voedselvoorziening. Het ecosysteemdienstenmodel InVest is opgebouwd uit meerdere tools. Sommige tools kwantificeren intermediaire/ondersteunende ecosysteemdiensten zoals de “habitat quality tool” en de “habitat risk assessment tool”. Andere tools kwantificeren finale ecosysteemdiensten als voedselvoorziening met de “fisheries tools”, en waterzuivering in de “nutriënt delivery ratio tool”.

Ecosysteemdienstenmodellen studies over kraamkamerfuncties van habitats zijn beperkt tot koraalriffen, mangroven en zeegrasvelden. Arkema et al. (2019) paste het visserijmodel toe op koraalriffen, mangroven en zeegrasvelden voor het kustbeheerplan van Belize (Arkema et al., 2019), waarnaar teruggekoppeld wordt in de conclusie, 4.

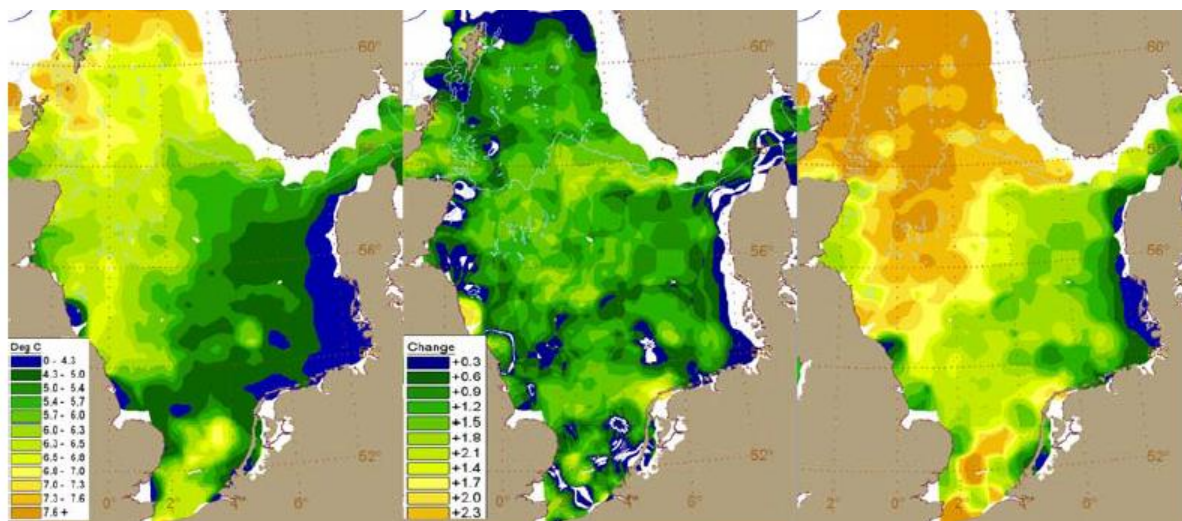
1.3 Noordzeekenmerken



Figuur 2 Atlantische kabeljauw in de ICES deelgebieden (4 Noordzee, 20 Kattegat en Skagerrak, 7d Oost-Engels kanaal) (WGNSSK, 2019)

De Noordzee is door ICES ingedeeld in verschillende deelgebieden, Figuur 2 (WGNSSK, 2019). Deelgebied 4 de Noordzee is onderverdeeld in de zuidelijke Noordzee 4c, de centrale Noordzee 4b en het Noordelijke deel van de Noordzee als 4a. Het oostelijk deel van het Engels Kanaal als deelgebied 7d en het ICES deelgebied IIIa Skagerrak en Kattegat is op de kaart aangeduid met 20 (ILVO, 2020).

De Noordzee vertoont een relatie tussen de diepte, temperatuur en het zoutgehalte. Gescheiden door de centrale Doggerbank wordt de trechtervormige Noordzee dieper van Zuid (<50 m) naar Noord (100 m-350 m), Figuur 12. De eerste 100 m daalt de temperatuur en stijgt het zoutgehalte, vanaf 200 m stagneert zoutgehalte en temperatuur. Het zoutgehalte in de Noordelijke Noordzee, 35 g/l daalt richting de Zuidelijke Noordzee naar 30 g/l, Figuur 13. Aan de Kustlijnen zorgt bijmenging van rivierwater voor een trapsgewijze verlaging van het zoutgehalte. Rivierwater bevat nutriënten afkomstig uit landbouwgebieden waardoor het zeewater aan de kustgebieden rijker is aan voedingsstoffen en vatbaar voor eutrofiëring (Peeters, Vries, & Haas, 1999). Brakke systemen zijn zeldzamer en het hoger zoutgehalte behelst van nature een grotere soortenrijkdom, met name van de epifauna van belang voor visserijproductie (A. Smaal et al., 2013).



Figuur 3 Bodemtemperatuurkaarten: links bodemtemperatuur Noordzee 1997-2005, centraal bodemtemperatuur verschil tussen 1977-1989 en 2000-2005, rechts bodemtemperatuur 2000-2005 Noordzee (WGECO, 2008)

Figuur 3 toont een gradiënt van temperatuursverandering. Er is een dalende temperatuur zichtbaar vanuit de Zuidelijke Noordzee richting het Skagerrak. Het Noordwesten van het Skagerrak, t.h.v. de Shetlandeilanden is gekenmerkt door warmere wateren ($>7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Echter kent de volledige Noordzee een algehele bodemtemperatuurstijging van ongeveer $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tussen 1977-1989 en 2000-2005. Er zijn ruimtelijke verschillen in bodemtemperatuurstijging van de Noordzee, met een hogere opwarming ten westen van de Skagerrak en de Nederlandse kustlijn, zichtbaar op Figuur 3. De laatste 20 jaar steeg de bodemtemperatuur van de Nederlandse kust tot $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (WGECO, 2008).

In de Noordzee komen drie soortenassemblages voor in overeenstemming met veranderende diepte en watertemperatuur. Noordelijke visassemblages t.h.v. de diepe Fjorden in Noorwegen (ICES deelgebied 4a) kunnen op 200 m diepte gescheiden worden van de centraal-noordelijke- en Zuidoostelijke visassemblages (ICES deelgebieden 4b en 4c) (WGECO, 2008).

De belangrijkste soort van de noordelijkste bestanden is de koolvis (43.6 gewichtspercentage), en ook belangrijk maar in kleinere hoeveelheden de schelvis en de steenbolk (11.6 en 10.7 gewichtspercentage). De centraal-noordelijke bestanden bestaan voornamelijk uit schelvis (42.4 gewichtspercentage), gevolgd door wijting en kabeljauw (13.9 en 9.2 gewichtspercentage). Tot slot in de Zuidelijke Noordzee, Figuur 14 zijn de schar en de wijting in gelijke aandelen aangetroffen (21.8 en 21.6 gewichtspercentage). Ook grijze poon en de horsmakreel (*Trachurus trachurus*) beslaan 12.8% en 10.1% van de totale biomassa in de Zuidelijke Noordzee. De schol en de kabeljauw vertegenwoordigen 6.3 en 5.5 gewichtspercent in de Zuidelijke Noordzee. De zandspiering en zandgrondel worden dominant teruggevonden in de zuidelijke Noordzee (Teal, 2011).

1.4 Atlantische kabeljauw

1.4.1 Levenscyclus Atlantische kabeljauw met bijhorende habitats en prooi-soorten

De Atlantische kabeljauw komt voor in de Noordelijke Atlantische oceaan en de Noordzee, zichtbaar op Figuur 15. Volgens Smith et al. (1989) is de Atlantische kabeljauw van Newfoundland, Canada genetisch weinig verschillend van de Noordzee Atlantische kabeljauw (Smith, Birley, Jamieson, & Bishop, 1989). De Atlantische kabeljauw beslaat 5.5 gewichtspercent van de zuidoostelijke Noordzeebestanden en 9.2 gewichtspercent van de Centraal-Noordelijke bestanden volgens Teal (2011).



Figuur 4 Levenscyclus Atlantische kabeljauw (Støttrup et al., 2019)

Kabeljauw is een opportunistisch omnivoor roofdier met verschillende habitattypes en prooi-soorten doorheen de levenscyclus, gevisualiseerd op Figuur 4. De Atlantische kabeljauw heeft een tolerantie voor verschillende zoutgradiënten tussen 30 en 35.5 g/L. De soort wordt typerend teruggevonden in dieptes lager dan 200 m en in een breed temperatuurbereik gaande van vriestemperaturen tot 20 °C met bij een voorkeur voor 3-7 °C (Hedger et al., 2004).

Hun omnivoor voedingspatroon wordt hiërarchisch bepaald volgens de Atlantische kabeljauwgrootte, de hoeveelheid prooi-soorten en de spatioal-temporele (geografische en seizoensale) overlap tussen de Atlantische kabeljauw en de prooi-soorten voorhanden. Juvenile Atlantische kabeljauw consumeert eerder pelagische soorten, medium Atlantische kabeljauw veeleer bentische soorten en vis. Grotere Atlantische kabeljauw consumeert grotere hoeveelheden vis (Link & Garrison, 2002).

Twee- tot driejarige volwassen Atlantische kabeljauw paait hoofdzakelijk in de centraal gelegen Doggerbank en de Zuidelijke bocht van de Noordzee (Fox et al., 2008) t.h.v. de kustgebieden van Zuidoost Engeland en Nederland (J. Reubens, Degraer, & Vincx, 2014). Hoewel de kinderkamers van de Duitse Bocht en het Nederlandse kustwateren in 1990 vele malen groter waren tegenover vandaag (Ter Hofstede, Heessen, & Daan, 2005). De paai vindt plaats in rotsachtige habitatstructuren vanaf de laatste week van januari tot midden februari, op een diepte van 50-200 m en bij 0-12 ° C (met 0-6 ° C voorkeursbereik). Na 10-30 dagen, afhankelijk van de temperatuur komen de eieren uit (Bos, Leopold, & Bolle, 2009) (Froese, 2019).

Kabeljauweieren en larven vanuit de paaigebieden van de Noordzee worden meegevoerd met oceaanstromingen richting de fjorden van het centraal-oostelijke Skagerrak en Kattegat. Jonge Atlantische kabeljauw in het Skagerrak en Kattegat blijkt immers genetisch vergelijkbaar met Atlantische kabeljauw uit paaigebieden in de oostelijke Noordzee (André et al., 2016). Het Skagerrak is door Boström et al. (2014) geïdentificeerd als het belangrijkste gebied voor Atlantische kabeljauw kleiner dan 15 cm, de larvale fase (Boström et al., 2014; Cushing, 1980). Jonge Atlantische kabeljauw is sterk geassocieerd met complexe habitatstructuren die een schuilplaats bieden zoals zee gras en andere ondiepe gebieden met grind, rotsen of keien (Froese, 2019; Støttrup et al., 2019).

Oppervlakteschattingen van het zee grasgebied in Denemarken variëren van 673 tot 1345 km², slechts 10 tot 20% van de historische distributie (Boström et al., 2014). Wanneer het zee gras verdween uit het Zweedse Skagerrak, daalde de Atlantische kabeljauwdichtheid van nuljarigen met 96%. De groei van nuljarige Atlantische kabeljauw blijkt significant hoger in zee gras habitats in vergelijking met kale open water-, kassei- en rotsachtige rifomgevingen (Støttrup et al., 2019).

Dominante (prooi)soorten in het zee grasgebied zijn de strandkrab (*Carcinus maenas*), grijze garnaal (*crangon crangon*), roodsprietgarnaal en steurgarnaal (*Palaemon elegans*) (Pihl et al., 2006).

De larvale fase duurt ongeveer drie maanden (bij 8 °C), na tweeënhalve maand nestelen de pelagische larven zich op de bodem (Froese, 2019).

Larvale Atlantische kabeljauw (2-13 mm, Lough et al. (2007)) voedt zich met larven evenals volgroeide eenoogkreeftensoorten *paracalanus* (onderklasse: Copepoda (Eenoogkreeftjes), Orde: Calanoida, Familie: Paracalanidae, Geslacht: Paracalanus); *pseudocalanus* (onderklasse: Copepoda (Eenoogkreeftjes), orde: Calanoida, familie: Clausocalanidae, geslacht: Pseudocalanus); *calanus finmarchicus* (onderklasse: Copepoda (Eenoogkreeftjes), Orde: Calanoida, Familie: Calanidae, Geslacht: calanus) en de planktonische schaaldiersoort *Oithona*.

Juvenile Atlantische kabeljauw (14-49 mm, Lough et al. (2007)) voedt zich daarnaast ook met krill (*Euphasiids naupli*), watervlooien (*cladocera*), viseieren (Heath & Lough, 2007; Link & Garrison, 2002) en grijze garnalen (De Clerck & Maertens, 2002).

Atlantische kabeljauw ouder dan een jaar wordt in diepere wateren aangetroffen, vaak geassocieerd met de rotsachtige kelphabitats in de Oostelijke Noordzee, het Skagerrak (Støttrup et al., 2019). Twee- tot vierjarige volwassen exemplaren worden vaak geassocieerd met stenige substraten met spleten als schuilplaats tegen predatoren en stromingen (Jan T Reubens, De Rijcke, Degraer, & Vincx, 2014). De kabeljauw vertoont filopatrie of homing waarbij volwassen exemplaren migreren vanuit het Skagerrak of Kattegat naar de geboorteplaats om te paaien. 79% van de volwassen individuen in de paaigebieden van de Noordzee behoren tot de referentiepopulatie Noordzee (André et al., 2016). Mediumgrote en grote Atlantische kabeljauw vertoont algemeen een voorkeur voor zandspiering, haring en krabbensoorten als de Atlantische rotskrab (*Cancer irroratus*) en de Jonah krab (*Cancer borealis*). Grote Atlantische kabeljauw is piscivoor en treedt in competitie met vis voor menselijke consumptie als haring, zilverheek, krab (Link & Garrison, 2002), schelvis en wijting (ICES advisory committee, 2015).

De Atlantische kabeljauw is kannibalistisch. Het dieet van exemplaren groter dan 10 cm (volwassen Atlantische kabeljauw meet tussen 31 en 74 cm (Froese, 2019; Meryeme Khoukh, 2018)) bestaat gedeeltelijk uit juveniele Atlantische kabeljauw; namelijk voor 2% in de Zuidelijke Noordzee en 10% in de Noordelijke Noordzee (Daan, 1973). Volgens Daan et al. (1973) blijkt de meest gepredeerde Atlantische kabeljauw tot 15 cm lang en minder dan een jaar oud. Grotere Atlantische kabeljauw voedt zich met een- tot maximum tweejarigen (Daan, 1973).

1.4.2 Factoren die Atlantische kabeljauwwerving beïnvloeden

In de literatuur is er onzekerheid over de respons van visbestanden op toekomstige klimaatveranderingen (Ken Drinkwater, 2005; Link & Garrison, 2002). De interacties in het complexe voedselweb zoals de relatie tussen temperatuur, groei en werving zijn onzeker; desondanks gedocumenteerd met historische waarnemingen (Rothschild, 2007) (Payne, 2009).

De 'gadoid outburst' van de jaren '60 in de ICES Noordzee deelgebieden 4a, 4b en 4c, aangeduid op Figuur 2, illustreert de complexiteit en dynamiek van het marien voedselweb met verschillende drukingsfactoren. De gadoid outburst toont een verband tussen een dalend haringbestand en een toename in Atlantische kabeljauwachtigen (Koolvis, Atlantische kabeljauw, Schelvis, Wijting Noorse steenbol). Het gedaalde juveniele haringbestand tijdens de tweede wereldoorlog, zonder visserij is mogelijks te wijten aan een natuurlijke daling in werving. Later daalde het bestand verder, door een heropleving van de visserij. Door minder predatie van de haring was er een toename in de prooi-soorten zandspiering, eenoogkreeftensoort *pseudocalanus*,... . *Pseudocalanus* is tevens een belangrijke prooi-soort voor Atlantische kabeljauwlarven en voor makreel, sprot, pelagische

borstelwormen en zandspieringlarven (Cushing, 1980). De zandspiering is een gegeerde prooi van volwassen Atlantische kabeljauw (Link & Garrison, 2002).

Een tweede mogelijke factor volgens Cushing et al. (1980) is een verminderde predatie op kabeljauwlarven door het gedaalde haringbestand (Cushing, 1980). Twee- tot driejarige haring zou Atlantische kabeljauweitjes prederen in de Zuidelijke Noordzee (Daan, Rijnsdorp, & Van Overbeeke, 1985). Hoge haring overvloed kan dus leiden tot uitsterving van Atlantische kabeljauw. Eveneens blijkt grijze poon, toegenomen sinds de jaren '80 in de Noordzee, een belangrijke predator van Atlantische kabeljauwlarven. Dergelijke interacties tussen soorten verhinderen Atlantisch kabeljauwherstel (Speirs, Guirey, Gurney, & Heath, 2010).

Volgens Cushing et al. (1980) zorgde een derde alternatieve factor, klimaatverandering, voor een match-mismatch tussen eenjarige haring en nuljarige Atlantische kabeljauw (Cushing, 1980).

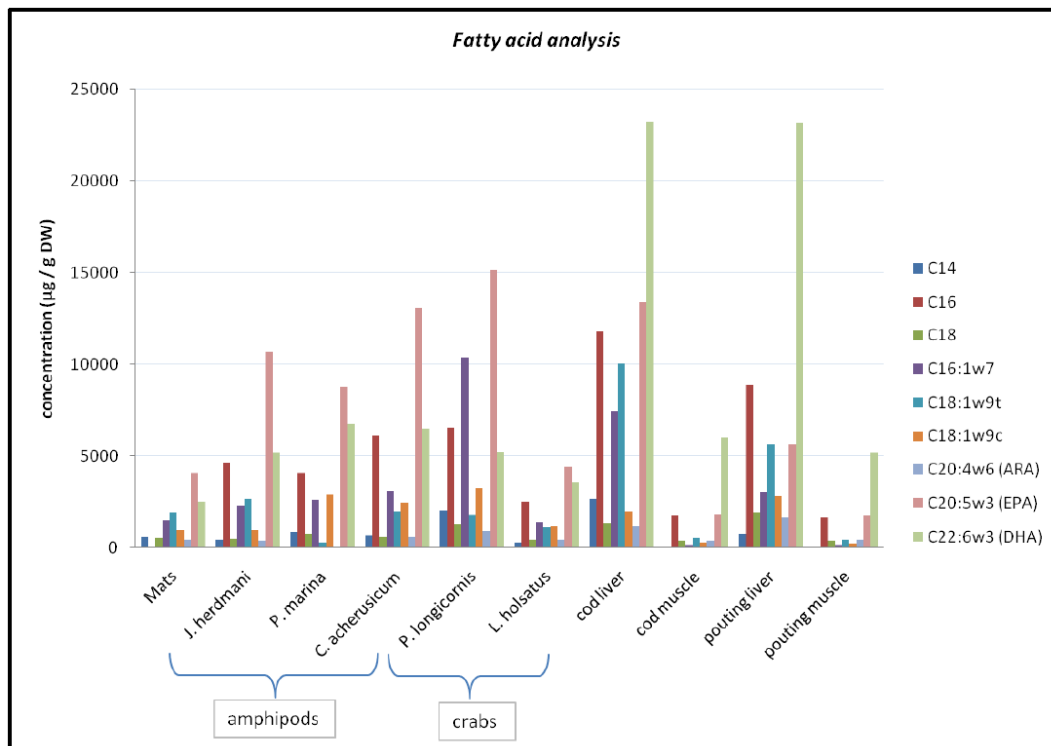
De haring van de Dogger- en Buchan-/Shetland groepen in de Centrale en Noordelijke Noordzee paaient vijf tot zes maanden voor de Atlantische kabeljauw. Op het moment dat de Atlantische kabeljauwlarven in de Zuidelijke bocht van de Noordzee uitkomen zijn de haringen afgedreven naar het oostelijke paaigebied van het Engels kanaal, waar ze zich voeden met de Atlantische kabeljauwlarven. Uit de publicatie van Cushing et al. leren we dat de hoeveelheden Atlantische kabeljauwlarven in de haringmagen immers lager lagen dan verwacht. Mogelijks waren de Atlantische kabeljauwlarven al te groot wanneer de haring aankwam (Cushing, 1980).

Voedsel

Kabeljauwwerving, het aantal eieren per paarijpe Atlantische kabeljauw, schommelt doorheen de jaren o.i.v. genetische- en omgevingsfactoren. De vruchtbaarheid varieert van 2.5 miljoen eieren bij een kuitvis van 5 kg en tot 9 miljoen eieren bij een kuitvis van 34 kg. Paarijpe biomassa is geen afdoende indicator voor eiproductie (Payne, 2009) (Froese, 2019). Variabelen als leeftijdsdiversiteit van de populatie en conditie van paarijpe Atlantische kabeljauw beïnvloeden de totale eiproductie. Voedselkwantiteit is bepalend of er extra energie over is voor reproductie, voedselkwaliteit is cruciaal voor de ontwikkeling en conditie van de Atlantische kabeljauw. Nutriëntentekort kan ook groei limiteren. Atlantische kabeljauw blijkt beter te groeien op eenoogkreeftjes dan op raderdieren met minder eiwit- en taurinegehalten (aminozuur) (Karlsen et al., 2015). Vetgehalten zijn cruciaal voor de reproductie van vele mariene vissoorten. Vet levert namelijk metabole energie aan de lever voor eiproductie (Rose & O'driscoll, 2002). De totale lipiden energie (TLE) in de lever van *de Gadus morhua* in de Barentszee, uitgedrukt in kilojoules, is evenredig met de gemiddelde lengte van de paaivrouwtjes en het percentage dat herhaaldelijk paait. Er is een significant positieve correlatie tussen de TLE en eiproductie tot drie jaar (de paaileeftijd) geobserveerd (Marshall, Yaragina,

Ådlandsvik, & Dolgov, 2000). Het vetzuurgehalte van de lever varieert met de maturiteitsfase en de selectieve retentie van essentiële vetzuren in de eierstokken tijdens de rijping als DHA (Docosahexaeenzuur, vormt samen met Alfanoleenzuur en Eicosapentaeenzuur omega 3) en ARA (arachidonzuur) (Røjbek, Jacobsen, Tomkiewicz, & Støttrup, 2012). Essentiële vetzuren kan de Atlantische kabeljauw niet zelf synthetiseren en stoelt hiervoor op prooisorten. Vetzuren kunnen dienen als voedingsindicatoren van de hogere trofische niveaus (Kirsch, Iverson, Bowen, Kerr, & Ackman, 1998).

In Newfoundland was er rond 1990 een lagere werving en hoge mortaliteit van volwassen Atlantische kabeljauw, gerelateerd aan de afwezigheid van de vetrijke prooi soort Lodde (*Mallotus villosus*). Voor 1990, werd de voormalig hoge leverconditie, vooral weerspiegeld door de aanwezigheid van de Lodde. Leverconditie, gemeten met een lever index is gecorreleerd met de gonaden- (of geslachtsklier)grootte bij volwassen paarijpe vis. Bij talrijke aanwezigheid van de lodde, is een twee tot drie keer hoger gonaden gewicht waargenomen, met een sterker effect voor jonge paarijpe vis. Volgens Rose et al. (2002) is de lodde van belang bij het herstellen van de Atlantische kabeljauwvoorraad (Rose and O'driscoll (2002)). De lodde komt voornamelijk voor in diepe koude wateren en paait in de Barentssee, IJslandse wateren. De zandspiering, voorkomend en paaiend in ondiepe kustgebieden van de Noordoostelijke en Noordwestelijke Atlantische oceaan, heeft een iets lagere maar gelijkaardige nutritionele voedselkwaliteit dan de Lodde. Beide soorten hun nutritionele voedselkwaliteit ligt in dezelfde grootteorde als de kabeljauw (Pedro et al., 2019). De zandspiering is volgens Smaal et al. (2013) negatief gelinkt aan mosselen en bijgevolg mosselriffen (A. Smaal et al., 2013). De zeedonderpad (*Myoxocephalus scorpius*) met de laagste omega 3 inhoud t.o.v. de kabeljauw, positief gerelateerd aan mosselen (A. Smaal et al., 2013), toont hogere essentiële vetzuurwaarden in de hogere breedtegraden van de Oost-Canadese poolgebieden t.o.v. de middelste breedtegraden (Pedro et al., 2019).



Figuur 5 Vetzuuranalyse Atlantische kabeljauw- en steenbollever en -spier, prooisoorten *J. herdmani*, *Jassa mats*, *P. marina*, *C. acherusicum*, *P. longicornis* en *L. holsatus* (massaspectrometer HP 5973) (Heirman, 2011)

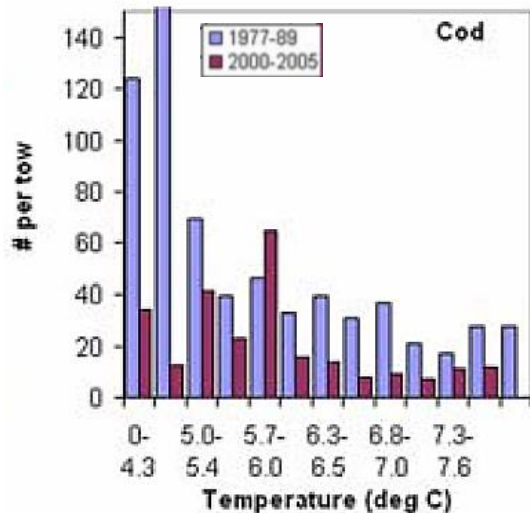
Voor meerdere prooisoorten van de Atlantische kabeljauw, teruggevonden op de artificiële riffen van de windmolenfunderingen van C-power in het BNZ (1.5.5) zijn vetzuurprofielen opgesteld (Figuur 5). De vetzuurwaarden variëren, maar liggen algemeen hoger, in eenzelfde grootteorde als de vetzuren van een Atlantische kabeljauwlever (Heirman, 2011). Uitgezonderd de *Jassa mats* en *L. holsatus* zijn nutritioneel minder interessant door hun lagere essentiële vetzuurinhoud. Gelijkaardige en hogere vetzuurprofielen duiden op het belang van de prooisoorten in het Atlantische kabeljauwdieet. De *P. longicornis* heeft een opmerkelijk hogere hoeveelheid onverzadigd palmitoleïnezuur (C16:1w7), wat het een belangrijke voedselbron maakt voor de Atlantische kabeljauw (Heirman, 2011).

Klimaatopwarming

Zoöplanktonorganismen zoals eenoogkreeftjes, geliefd door de Atlantische kabeljauw zijn zeer vatbaar voor een veranderend klimaat (Olsen et al., 2011). De dynamiek in een planktonbestand heeft een belangrijke invloed op pelagische soorten als de zandspiering, haring, krill, lodde en vervolgens de hogere trofische niveaus als de Atlantische kabeljauw (Rothschild, 2007). In 2000 zorgde de opwarming van de Noordzee voor grote veranderingen in de planktongemeenschap. Die veranderingen zorgden voor een verminderde overleving van Noordzee haringlarven en beïnvloedde vervolgens de hogere trofische niveaus in het voedselweb (Payne, 2009).

Belangrijke prooien van de Atlantische kabeljauw zijn *para*-of *pseudocalanus* soorten die voornamelijk voorkomen in de zuidelijke Noordzee en *C. finmarchicus*, een noordelijke pooisoort (Heath & Lough, 2007). Hun voorkomen, verschoof met ongeveer vijf graden Noordwaarts tussen 1960/1970 en 1990. De maart-juli biomassa van de *para*- en *pseudocalanus* soorten steeg met 15% in de zuidwestelijke en centrale breedtegraadgebieden aan beide zijden van de Atlantische Oceaan (Golf van Maine, Scotian Shelf, Grand Banks, Newfoundland, Rockall en de noordelijke Noordzee). Newfoundland/Labrador onderging de grootste verandering in procentuele samenstelling, van meer dan 90% *C. finmarchicus* in de jaren zestig/zeventig naar *para/Pseudocalanus* dominantie (> 70%) in de jaren negentig (Heath & Lough, 2007). Temperatuurstijging kan tevens leiden tot een vervanging van eenoogkreeftensoorten. Sinds 2009-2010 is in de Zuidelijke Noordzee de koudwater kreeftensoort *C. finmarchicus*, een belangrijke voedselbron voor Atlantische kabeljauwlarven (Olsen et al., 2011), naar het Noorden opgeschoven en vervangen door de minder voedzame *C. helgolandicus*. Een soort die nooit is teruggevonden in het dieet van de Atlantische kabeljauw (Olsen et al., 2011; Van Ginderdeuren, 2013). Onvoldoende energetisch gunstige prooien zorgen voor een lagere groeisnelheid van Atlantische kabeljauwlarven (Olsen et al., 2011).

De geschiedenis leert ons dat klimaatopwarming ingrijpende effecten heeft. Rond 1920-1930, een periode gekenmerkt door warmere jaren, observeerden ze in het noorden van de Noord-Atlantische oceaan een 1200 km Noordelijke verplaatsing van de Atlantische kabeljauw (vanuit Zuid-Groenland richting Disko eiland). Tot het verdwijnen van het Atlantische kabeljauwbestand in 1970 door verdere opwarming (Ken Drinkwater, 2005). Eveneens werd een Atlantische kabeljauwverplaatsing waargenomen van Zuid- naar Noord-IJsland.



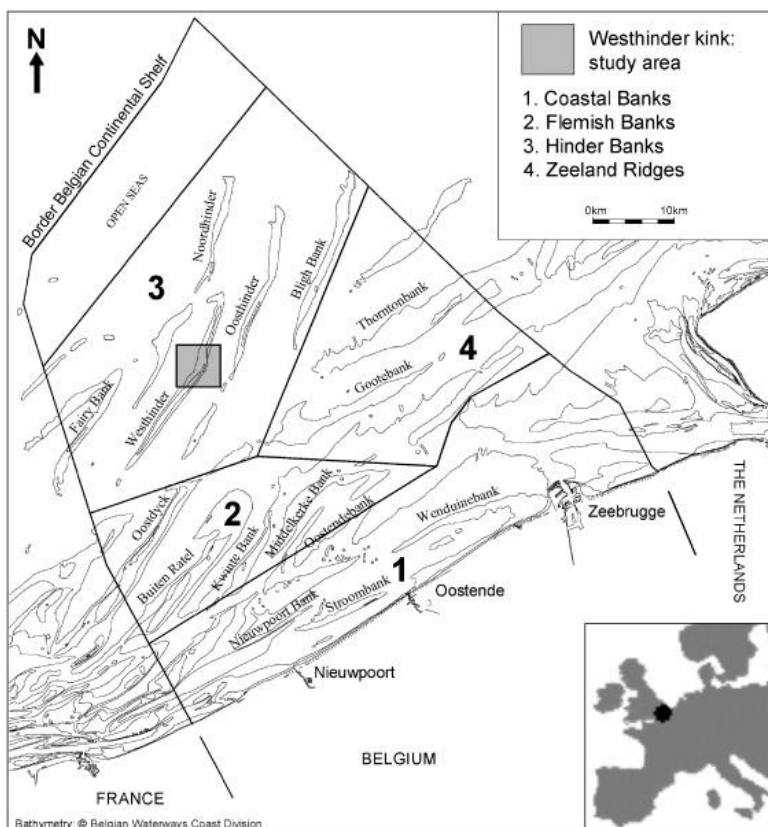
Figuur 6 Atlantische kabeljauwdensiteit binnen de Noordzee temperatuurcategorieën van 1977-1989 t.o.v. 2000-2005 (WGECO, 2008)

In de Noordzee zijn grote klimaatopwarming gerelateerde verschuivingen in biogeografische patronen gedocumenteerd voor demersale vissen, verlengingen van hun noordelijke verspreidingsbereik en migratie naar grotere dieptes (Froese, 2019; Somero, 2012). Soorten met een nauwe klimatologische niche zijn het meest getroffen door klimaatopwarming (Trakhtenbrot, Nathan, Perry, & Richardson, 2005). Mobiele soorten die hun temperatuurbereik willen handhaven, migreren (WGECO, 2008). De optimale groeitemperaturen voor Atlantische kabeljauw blijken te dalen met een stijgende lengte (Björnsson, Steinarsson, & Oddgeirsson, 2001). In 1990–1999 vergeleken met 1980–1989 kwam de Atlantische kabeljauw voor in grotere aantallen in diepere koudere wateren, met eenzelfde verspreiding doorheen de Noordzee. Echter in 2000-2005 t.o.v. 1977-1989 zorgde een algemene bodemtemperatuurdaling in de Noordzee van 1 °C, zichtbaar op Figuur 3, voor een algemene daling van het kabeljauwbestand. Dalingen van het Atlantische kabeljauwbestand blijken volgens het WGECO (2008) het opvallendst bij temperaturen lager dan vijf graden, zichtbaar op Figuur 6; langs het Nederlandse kustgebied en in de centraaloostelijke Noordzee t.h.v. het Skagerrak, zichtbaar op Figuur 3. Desalniettemin blijft Atlantische kabeljauwmigratie, volgens WGECO (2008) ruimtelijk complex en ongelijk (WGECO, 2008). Drinkwater (2005) voorspeld dat de paaiplaatsen noordelijker gevestigd zullen worden en zomermigratie eerder zal plaatsvinden of zelfs gestaakt zal worden wanneer het zee-ijs volledig verdwenen is. Bij een temperatuurstijging van 3 °C verwacht Drinkwater (2005) een verdwijning van de Zuidelijke Noordzee- en Kattegat Atlantische kabeljauwbestanden, en een gedaalde werving van Atlantische kabeljauwbestanden in Noorwegen en IJsland (Ken Drinkwater, 2005). Het IPCC voorspeld met RCP 8.5 een zeeoppervlak temperatuurstijging van 2.58 °C tegen 2100 (Pörtner et al., 2019).

Temperatuurstijging zorgt anderzijds voor snellere ontwikkeling waardoor larven op jongere leeftijd volwassen zijn, wat zou resulteren in eerdere paaiperiodes en hogere eiproductie tot uiteindelijk een hogere biomassa productie van de Atlantische kabeljauw evenals zijn proisoorten. Ook bv. een verlaagde ei-incubatie tijd van de Atlantische kabeljauw van 42 naar 8 dagen bij 1 °C t.o.v. 14 °C, maakt eieren in warmere wateren minder lang kwetsbaar voor predatoren. Hoewel deze reacties op klimaatverandering zeer onzeker zijn door de onzekere klimaat- en oceanografische variabelen (Ken Drinkwater, 2005). Ruimtelijke en temporele veranderingen kunnen echter ook leiden tot een discrepantie tussen prooi en predatorontmoetingen wat uiteindelijk de werving negatief beïnvloedt, de match-mismatch hypothese (C. ICES, 2005; Olsen et al., 2011). Soorten die baten van warmere omstandigheden, kunnen indirect negatieve effecten ervaren door bv. een afname van hun belangrijkste prooi (WGECO, 2008).

1.5 Rif abundantie

1.5.1 Noordzeesediment en bentische soortendiversiteit en -dichtheid



Figuur 7 Zandbanken in het Belgisch continentaal plat (Deleu, Van Lancker, Van den Eynde, & Moerkerke, 2004)

Het Belgisch continentaal plat, weergegeven op Figuur 7 kenmerkt zich door de aanwezigheid van zandbanksystemen. Het BNZ bestaat uit nearshore kustbanken over de volledige Belgische kustbreedte, waarin het COASTBUSTERS project is gesitueerd. Verder offshore liggen op 10-30 km

voor de West-Belgische kust Vlaamse banken; op 15-30 km voor de Oost-Belgische kust Zeeland richels en op 35-60 km over de volledige kustbreedte Hinderbanken (Van Hoey, Degraer, & Vincx, 2004).

De zandbankgebieden kennen een onregelmatige verspreiding van sedimenten (zelfs binnen enkele tientallen meters) gedomineerd door borstelwormen, tweekleppigen en kreeftachtigen. De hoge correlatie tussen de fysieke omgeving (sediment korrelgrootte en moddergehalte) en de macrobenthische soorten (soortenrijkdom, -dichtheid en -assemblages), verklaart de hoge benthische soortenvariabiliteit in de onshore zone. Hoe verder van de kustlijn hoe dominanter de borstelwormen en hoe minder tweekleppigen voorkomen. Een algemene onshore-offshore gradiënt is waargenomen met onshore soortenrijke en -arme assemblages en offshore soortenarme assemblages. Sedimenten in het offshore-gebied hebben over het algemeen een zeer laag moddergehalte, vanwege de sterke stromingen, en herbergen dichtheidsarme assemblages. De variabiliteit op het gebied van macrobenthische soortenrijkdom, -dichtheid en -assemblage neemt algemeen af naar de open zee (Van Hoey et al., 2004).

Macrobenthische soorten zijn een belangrijke voedselbron voor demersale vissoorten en vormen daarmee een belangrijke schakel in het trofische voedselweb (DEGRAER et al.). Het hoogste aantal macrobenthische soorten situeert zich op het westelijke deel van de kustbanken. Productiviteit hangt samen met het sedimenttype (bepalend voor soortendiversiteit) en de zware metalen vervuiling in sedimenten. De zuidelijke Noordzee diversiteit op alle taxonomische niveaus en naderhand productiviteit stijgt van Oost naar West (Heip, Herman, & Vincx, 1984; Van Hoey et al., 2004). Sedimenttypes kleiner dan 37 micrometer, gelinkt met zware metalenvervuiling afkomstig uit het Schelde estuarium nemen af van Oost naar West. De vervuiling uit het Schelde-estuarium resulteert in een afname van rondwormen (*Nematoden*) en eenoogkreeftjes (*Harpacticoïden*) van west naar oost langs de Belgische kust (Heip et al., 1984).

Algemeen zijn er vier macrobenthische gemeenschappen en overgangsassemblages gedefinieerd door Van Hoey et al. (2004). In het COASTBUSTERS project zijn er drie macrobenthische soortassemblages geïdentificeerd, globaal aangeduid op Figuur 8.

De eerste *Abra alba* - *Mysella bidentata* - gemeenschap (tweekleppigen, hoge soortendiversiteit gemiddeld 370 soorten/m² en hoge soortendichtheid gemiddeld 7589 individuen/m² (DEGRAER et al.)) is van uitzonderlijk ecologisch belang met habitatstructurerende soorten als de borstelworm *Lanice conchilega* en een groot aantal tweekleppigen (*Spisula subtruncata*, *A. alba* 995 individuen/m², *Fabulina Fabula* 273 individuen/m² (DEGRAER et al.)). De gemeenschap komt voor in modderig zand in ondiepe wateren vlakbij de kust (219 µm mediane korrelgrootte, 6% mediaan

moddergehalte, 13 m gemiddelde diepte onder de tweede algemene waterpassing (TAW) of het gemiddelde zeeniveau bij laagwater in Oostende als nulpeil). Ook teruggevonden in de Nederlandse-, Duitse-, Frans Noord-Atlantische- en Engels kanaal kustgebieden (Van Hoey et al., 2004). Deze gemeenschap wordt in het COASTUSTERS gebied vooral teruggevonden in de diepere gedeelten van de zandbankgeul 'het Potje' en langsheen de noordelijke helling van de Trapegeer zandbank (DEGRAER et al.).

De tweede *Nephtys cirrosagemeenschap* (borstelwormen, lage soortendiversiteit en -dichtheid), komt voor in goed gesorteerde mobiele zandbodems met een laag moddergehalte (208 µm mediane korrelgrootte, 4% mediaan moddergehalte, 8 m gemiddelde diepte onder de TAW). De *N. cirrosa*-gemeenschap vormt ook een overgangsgemeenschap (Van Hoey et al., 2004). In het COASTUSTERS gebied aangetroffen in de topzone van de Trapegeer zandbank en op de Broersbank (DEGRAER et al.).

De derde *Ophelia limacina* - *Glycera lapidum* - gemeenschap (borstelwormen, zeer lage soortendiversiteit en -dichtheid) heeft vergelijkbare habitatkenmerken als een *Mytilus edulis*-gemeenschap (DEGRAER et al.). Mosselen staan er om bekend dat ze veel fijn sediment kunnen invangen en de modderfractie verhogen, tenzij bevissing voorvalt wat moddergehaltenes verlaagt (A. Smaal et al., 2013). *Glycera lapidum* wordt aangetroffen in grof zandige sedimenten, *Ophelia limacina* in fijn tot middelmatig zand met een zeer laag moddergehalte (268 µm mediane korrelgrootte, 2% mediaan moddergehalte, 14 m gemiddelde diepte onder de TAW) (Van Hoey et al., 2004). Deze gemeenschap komt in het COASTUSTERS gebied voor in de ondiepste gebieden (bv. de top van de Broersbank) (DEGRAER et al.).

Tot slot is de vierde *Eurydice pulchra* - *Scolelepis squamata*- gemeenschap (borstelwormen en pissebedden, lage soortendiversiteit en matige soortendichtheid) niet aangetroffen in het COASTBUSTERS project. Meestal aangetroffen in het bovenste intergetijdengebied van de Belgische zandstranden (274 µm mediane korrelgrootte, <1% mediaan moddergehalte, 12 m gemiddelde diepte onder de TAW) (Van Hoey et al., 2004).

1.5.2 Mosselriffen in het Belgisch deel van de Noordzee 'COASTBUSTERS'

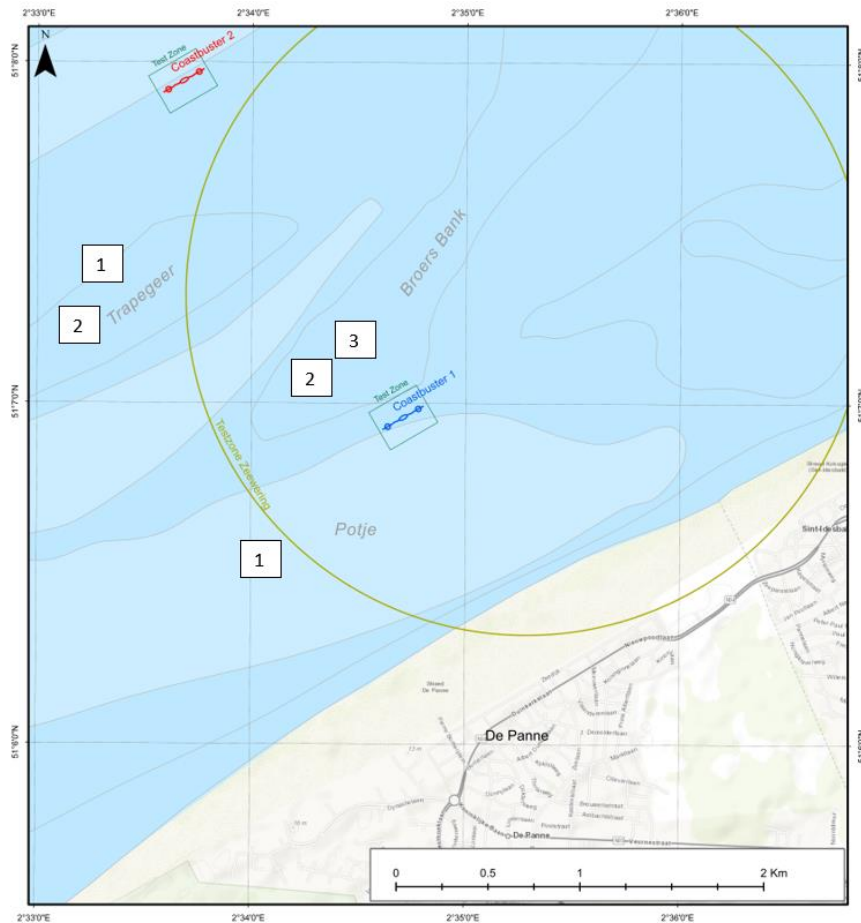
Tweekleppige bedden komen van nature voor in sub- en intergetijdengebieden over de hele wereld. Daarnaast vindt tweekleppige aquacultuur van mosselen en oesters uitgebreid plaats met bodemculturen (ingezaaide bedden) of zwevende culturen (vlot-, longline-, bouchot cultuur). De gecultiveerde tweekleppigen worden verwacht hetzelfde te ontwikkelen als natuurlijke assemblages, onderhevig aan dezelfde omgevingsfactoren. Echter kan onderhoud en exploitatie van tweekleppigen aquacultuursites zorgen voor een verschillende dynamiek tussen cultureel en

natuurlijke tweekleppige riffen, met verwachte verschillen in biodiversiteitsontwikkeling (Ysebaert et al., 2019).

De *Mytilus edulis* komt voor in gematigde klimaten (middelste breedtegraden) met een temperatuurbereik van -1 tot 25 °C en in de subarctische regio's met een temperatuurbereik van -1 tot 21 °C (Thyrring, Rysgaard, Blicher, & Sejr, 2015). Wanneer de planktonische mossellarven zich vasthechten aan harde substraten worden ze immobiel, onderhevig aan omgevingsvariabelen. Mosselen verduren hoge watertemperaturen (tot wel 32 °C), echter ligt hun tolerantie voor chronisch hoge temperaturen lager. Zo verduren mosselen hooguit tien dagen een watertemperatuur van 28.5 °C (Somero, 2012).

Naast overleving beïnvloeden temperatuurstijgingen ook predatie. Er is bijvoorbeeld een verhoogde predatie van zeesterren (*Pisaster ochraceus*) waargenomen op *Mytilus*-mosselbanken in rotsachtige getijdenhabitats bij verhoogde hittestress (Sanford 1999, Pincebourde et al. 2008). Zeesterren kennen echter weinig vijanden, die een uitbraak van roofzuchtige zeesterren kunnen onderdrukken. Dichterbij, in de Waddenzee bleek reeds een limiterende werking van de gewone zeester (*Asterias rubens*) met een piek voedselfrequentie bij 13 °C op de blauwe mosselpatches (15 °C in de zomer, 4 °C in de Winter) (Saier, 2001). Meer predatie leidt tot een afname van het lokale mosselbestand waarin vervolgens minder epifauna kunnen gedijen (Somero, 2012).

Desalniettemin is de relatie tussen mosseldensiteit en soortendiversiteit niet gekend. Langs de Amerikaanse kust varieerden faunale assemblages immers onafhankelijk van de dichtheid van de geribbelde mosselbanken (*Geukensia demissa*). Mosselgroei en -sterfte is een dynamisch gegeven waardoor de infaunale assemblagebemonstering, naast de huidige ook de initiële mosselbezettingsdichtheid met biologische afzettingen (voedsel voor kreeftachtigen, krabben en zo de hogere trofische niveaus) weerspiegelt (A. C. Smaal, Ferreira, Grant, Petersen, & Strand, 2018).



Figuur 8 COASTBUSTERS mosselrif locaties een en twee (Coastbusters 2.0 locations, 2019). Globale aanduiding van de macrobenthische gemeenschappen in het BNZ: 1) *Abra alba* – *Mysella bidentata*/*Lanice conchilega* gemeenschap, 2) *Ophelia limacina* – *Glycera lapidum*/*Mytilus edulis* gemeenschap, 3) *Nephtys cirrosa* gemeenschap (DEGRAER et al.)

In de kustbanken (aangeduid op Figuur 7) t.h.v. De Panne zijn nearshore mosselriffen tussen kustzandbanken geïnduceerd i.h.k.v. het kustbeschermingsproject COASTBUSTERS 2017-2020 van de projectpartners DEME, Jan de Nul, Sioen Industries, eCoast. Mosselrif nummer een, zichtbaar op Figuur 8 is aangelegd tussen de Broersbank en Trapegeer, ten Noorden van de vloedgeul ‘het potje’ 5-10 m onder de TAW. COASTBUSTERS mosselrif nummer twee ligt tussen de zandbank Trapegeer en de Smalbank, Figuur 8.

De mosselriffen worden geïnduceerd met een longline mosselcultuur; longlines bevestigd aan een hoofdtouw die mosselspatval opvangen. De *M. Edulis* hechten zich m.b.v. hun byssusdraden (of baard) aan de longlines en de schelpen van hun soortgenoten. Bij een hoge mosseldensiteit vallen de blauwe mosselen van het touw op de zeebodem. Na verloop van tijd vormen de mosselen mosselbanken of -riffen die zandbanken kunnen stabiliseren en de waterbeweging verstoren (Agentschap innoveren en ondernemen, 2016). De riffen zijn (zeker in de ontwikkelingsfase) gevoelig aan verstoringen van buitenaf. Zware stormen kunnen de ontwikkelingscyclus van het benthos hinderen (Rabaut, Kerckhof, Vincx, & Degraer, 2010). Het project gaat de haalbaarheid na van

mosselriffen in de ruwe Noordzee omstandigheden en doelt op een robuuste aanpak binnen het Vlaams masterplan Kustveiligheid. Naast kustbescherming worden ook andere ecosysteemdiensten als waterkwaliteitsregulatie (aangehaald in 5 Interdisciplinaire bevindingen) en visserijproductie, waarbinnen deze thesis kadert, afgetoetst.

1.5.3 Tweekleppige riffen soortenbiomassa en -diversiteit

Biogene oesterriffen in de zuidoostelijke kust van Bangladesh tonen t.o.v. zachte sediment habitats een hogere abundantie aan macro-invertebraten en vinvissen. Wat de aanwezigheid van bentische prooi-soorten gerelateerd aan het rif suggereert. Op de landwaartse wadplaat is bij de aanwezigheid van oesterriffen een grotere biomassa evenals diversiteit aan macrobenthos zoals borstelwormen, kleine kreeftachtigen, juveniele slakken en tweekleppigen waargenomen. Het rif fungeert er als schuilplaats, kraamkamer en foerageergebied (Chowdhury et al., 2020). Ook in de zuid-Chileense kust (*Perumytilus purpuratus*, *M. chilensis*), (*Musculista senhousia*) en de kust van zuid-Australië (*Xenostrobus incostans*) tonen tweekleppige aquacultuurriffen een hogere diversiteit dan de omliggende gebieden. Echter in andere gebieden zoals Australië is een beperkte toename in diversiteit waargenomen, in Zuid-Afrika geen effect en in de Gele zee zelfs een lagere diversiteit (A. C. Smaal et al., 2018).

Een toename van het aantal epibentische soorten is ook gevonden in de *Mytilus edulis* mosselkweekpercelen in de Oosterschelde Nederland (besproken in 1.5.4). Ook in Nørrefjord, Denemarken is een positief effect waargenomen op de epibenthos, wat echter afwezig blijkt in Limfjorden (Denemarken). De visvangst rond de mosselboerderij in Nørrefjord bestond voor 81% uit Atlantische kabeljauw, zwarte grondel (*Gobius niger*) en driedoornige stekelbaars (*Gasterosteus aculeatus*). Kristensen et al. (2015) rapporteerde evenzo hoge aantallen zwarte grondel in de aanwezigheid van een mosselrif, zelfs na predatie van zeesterren wanneer enkel het mosselschelpenrif overbleef. Wat het beschermend effect (schuilplaats) van de mosselrif structuur voor soorten aantoonde. De hogere aantallen zwarte grondel trekken grotere predatoren als de Atlantische kabeljauw aan met na predatie een daling van de zwarte grondels. Kristensen (2015) ondersteunt een positieve associatie van de Atlantische kabeljauw met mosselriffen (Kristensen et al., 2015). Uit 1.4.1 bleek de paaihabitat van de Atlantische kabeljauw uit rotsachtige structuren te bestaan.

Positieve, negatieve en afwezige correlaties over mossel- en geassocieerde soortenbiomassa en -diversiteit zijn blijkbaar variabel en beïnvloedt door omgevingsfactoren en larvale soortenverspreiding. Algemene gevolgtrekkingen zijn hierdoor onmogelijk (A. C. Smaal et al., 2018). Echter zou een te hoge mosseldensiteit de fytoplankton voorraad uitputten met een negatieve

feedback op het marien voedselweb. Tweekleppigen zouden dan de rol van het zoöplankton innemen met een minder efficiënte energieoverdracht naar de hogere trofische niveaus (Ysebaert et al., 2019).

Ook de *Crassostrea virginica* of Oosterse oesterriffen leveren geen consistente vis- en kreeftachtigenproductie in twee grotendeels verschillende kustgebieden (de Noordelijke Golf van Mexico en de Zuid- en midden Atlantische kustgebieden) met een verschillend soortenbestand. Op basis van leeftijdgebaseerde mortaliteit van de huidige habitat, relatief tot voorgaande productieschattingen van de ongestructureerde habitat, werd door Ermgassen et al. (2016) tweemaal meer vis- en schaaldierproductie gerapporteerd langs de Atlantische kust van de V.S. dan Peterson et al. (2003) langs de Golf van Mexico en de Atlantische kust. Respectievelijk 5282 ± 127.6 kg/(ha.j) t.o.v. 2600 kg/(ha.j) verbeterde visproductie door oesterrif herstel t.o.v. ongestructureerde habitat. De studies van Peterson et al. (2003) en Zu Ermgassen et al. (2016, 2018) bieden absolute waarden voor verbeterde visproductie bij oesterrif herstel t.o.v. ongestructureerde habitat. Immers geen relatieve toename in visproductie t.o.v. een ongestructureerde habitat, noodzakelijk voor een extrapolatie naar andere locaties. Echter blijft natuurlijke mortaliteit slecht begrepen en vormen mortaliteitsschattingen de gevoeligheid in visserijmodellering (P. S. zu Ermgassen et al., 2016). Ermgassen et al. (2016) toont aan dat ecosysteemdiensten, geassocieerd met kraamkamerhabitats variëren over biogeografische regio's. Om vis- en kreeftachtigenproductie met hogere betrouwbaarheid in te schatten is locatiespecifieke leeftijdgebaseerde data vereist (P. S. zu Ermgassen et al., 2016).

De grote omvang van de Oosterse oesterriffen is immers buitenproportioneel voor een inschatting van de visserijopbrengst in de Zuidelijke Noordzee t.a.v. rifvergroting. Gegeven een jaarlijkse productie van 6 kg/(ha.j) in 2018 (www.geofish.be, som van alle aanlandingen van commerciële soorten (Froese, 2019)) in het meest productieve deel van het Belgisch deel van de Noordzee (BNZ of de 12 mijlszone, 22.2 kilometer territoriale wateren). Naar promotor Van der Biest Katrien (Van der Biest Katrien, 2020).

1.5.4 Nederlandse mosselcultuur

In de sublitorale Waddenzee leveren weekdieren (*mollusca*) het grootste aandeel biomassa. De westelijke Waddenzee en Oosterschelde staan gekend voor mosselkweek. De mosselkweek op de natuurlijk gevormde mosselbanken met kenmerkend sterke seizoensfluctuaties, wordt opgevisst en vervolgens ingezaaid op kweekpercelen. Een overdracht van de mosselbanken naar de kweekpercelen, dichter bij de Noordzee zou de biodiversiteit niet nadelig beïnvloeden, zelfs verhogen door het hoger zoutgehalte t.h.v. de kweekpercelen. Op de mosselkweekpercelen worden

echter meer soorten bodemdieren aangetroffen dan op wilde mosselzaadbanken (waaronder ook mosselpredatoren). Desalniettemin zijn de bodemfauna biomassa en -dichtheden exclusief mosselen veel hoger op wilde banken. Opvallend is er een daling waargenomen van het aandeel blauwe mosselen en een stijging van het aandeel exoten in de totale biomassa van bodemdieren per vierkante meter mosselperceel in de westelijke Waddenzee. Mosselen daalden van gemiddeld 62% in 1981-1982 naar 10% in 2008, exoten stegen overeenkomstig van 2% naar 80% (A. Smaal et al., 2013).

De mosselkweekpercelen in de westelijke Nederlandse Waddenzee zijn rijk aan bodemdieren alsook vissen en vormen daarmee hotspots voor biodiversiteit. Er is een positief verband gedetecteerd tussen het voorkomen van mosselen en een verhoogde biodiversiteit. In de aanwezigheid van mosselen toonden proefvlakken, van vier hectare op 40 mosselzaadbanklocaties gemonitord over zes jaar, een tweemaal grotere soortenrijkdom en biomassa aan bodemdieren. 35 (uit 123) soorten werden positief geassocieerd met de *Mytilus edulis* in het sublitoraal van de westelijke Nederlandse Waddenzee. Waaronder de Noordzee grijze garnaal, bevestigd na De boer et al. (2001) (de Boer, Welleman, & Dekker, 2001). De grijze garnaal voedt zich met kreeftachtigen, draad- en borstelwormen; soorten die het mosselrif aantrekt. Doorgaans staat de grijze garnaal op het menu van predatoren als de juveniele kabeljauw, wijting, dwerg- en steenbolk, vijfdradige meun ... (De Clerck & Maertens, 2002). Wijting wordt op zijn beurt gesmaakt door volwassen Atlantische kabeljauw (ICES advisory committee, 2015).

Positief geassocieerde vissoorten in de westelijke Waddenzee bij de aanwezigheid van mosselen zijn de botervis, puitaal, kleine- en grote zeenaald, slakdolf, zeedonderpad, grondel en vijfdradige meun (A. Smaal et al., 2013). De positieve associatie van botervis met mosselen wordt ondersteund door de Boer et al. (2001) en Kristensen et al. (2015). De botervis verblijft onder stenen en legt eitjes in een grote klomp onder een steen of in een lege tweekleppige schaal. De botervis werd aangetroffen op twee Vlaamse zandbanken, de Kwintebank en de Oostdyck bank (zichtbaar op Figuur 7) (Zander et al., 1986).

Slechts op drie van de 40 proefvlakken overleefden mosselen langer dan vijf jaar. Verschillende oorzaken zijn mogelijk bv. de effectiviteit van de zaadval, verzadiging met predatoren waaronder zeesterren..., immers bestaat hierover geen uitsluitel. Schaaleffecten, overlevingskansen t.o.v. de grootte van de bank, zijn niet behandeld in het onderzoek. Smaal et al. (2013) stelt dan ook een schaalafhankelijkheidsonderzoek voor om na te gaan of de overleving van mosselen in de westelijke Waddenzee dichtheidsafhankelijk is (A. Smaal et al., 2013).

1.5.5 Harde substraten in het BNZ

Windmolenfunderingen epifaunale kolonisatie



Figuur 9 Het C-power windmolenpark op de Thorntonbank in het Belgisch continentaal plat (NV, 2006)

In de Zeelandrichels (aangeduid op Figuur 7) t.h.v. Zeebrugge op de Thorntonbank (ongeveer 27 km uit de Belgische kust), staan sinds 2008 zes windmolens in het offshore windmolenpark van C-power, aangeduid op Figuur 9. De betonnen windmolenfunderingen diversifiëren de homogene zachte sedimenten van de Thorntonbank, gedomineerd door een relatief "arme" macrobenthische *Nephtys cirrosa*-gemeenschap/*Mytilus edulis*-gemeenschap, omschreven in paragraaf 1.5.1 (Francis KERCKHOF, RUMES, & DEGRAER, 2019). De harde structuren zinnen een divers aantal soorten wat een 'rif-effect' kan ontluiken. In 2008 telden epibiota stalen na drieënhalve maand kolonisatie 49 soorten op de windmolenfunderingen t.o.v. de initiële zandbodem in 2006. De artificiële riffen lokten een protist, vier algen (*Blidingia minima*, *Ulva intestinalis*, *Ulva compressa* en *Bangia fuscopurpurea*) en 44 invertebraten. Dansmuggen (*chironomide Telmatogeton japonicus*), de vlokreeftensoort *Jassa herdmani*, zeepokkensoort het vulkaantje (*Balanus perforatus*) en een mosdiertje (*Electra pilosa*) zijn met meer dan 1000 individuen/m² aangetroffen. Evenals de vlokreeft (*phtysica marina*) was talrijk aanwezig met 100-1000 individuen/m². De snelle en intense kolonisatie van de windmolenfunderingen wijst op een eerste fase van ecologische successie.

Pioniersoorten als het harig mosdiertje, de kleine zeeappel (*Psammechinus miliaris*), de gewone zeester, bostelwormen (*Phyllodoce mucosa*) en *Jassa herdmani* worden typisch aangetroffen in een eerste kolonisatiefase van windmolenfunderingen in de Noordzee twee jaar na inplanting, volgens Kerckhofs et al. (2019). Soorten die later geleidelijk vervangen worden door minder opportunistische soorten (Francis KERCKHOF et al., 2019). In een volgende, intermediaire en biodiverse fase, tussen drie en vijf jaar na windmoleninplanting worden soorten aangetroffen als de *Mytilus edulis*, hydropoliep (*Tubularia indivisa*), borstelworm (*Spirobranchus triqueter*), slangster (*Amphipholis*

squamata) evenals de vlokreeftensoorten *Jassa herdmani*, *Stenothoe* en *Monocorophium acherusicum* (Francis KERCKHOF et al., 2019). *Jassa herdmani* is gekend in grote dichtheden voor te komen op artificiële windmolenriffen, tot 13 000 individuen/m² (J. T. Reubens et al., 2014). De amfipode is evenzo dominant op scheepswrakken (Zintzen, Norro, Massin, & Mallefet, 2008). De soort benodigd immers voldoende fijn sediment (Brabant, 2009). Op de windmolenfunderingen zijn grovere sedimenten, schelpenresten en kleine steentjes waargenomen (tot 10 m boven de zeebodem) afkomstig van de windmolenconstructiewerken. De sedimenten huisvesten ook andere rifvormende soorten als de tweekleppigen *Pisula solida* en juveniele *Parvicardium* evenals de borstelworm (*L. conchilega*).

In 2008 werden de hardsubstraatsoorten hydropoliep (*Tubularia larynx*), zeeanemoon (*Metridium senile*), gewone zeester, *Mytilus edulis* slechts beperkt aangetroffen, wat wijst op een immature fouling gemeenschap (Brabant, 2009). Windmolenfunderingen worden beschouwd als kleine en onvolgroeide kunstmatige riffen in een overgangssituatie met epifaunale kolonisatieprocessen (J. T. Reubens et al., 2013).

Scheepswrakken epifaunale kolonisatie

Scheepswrakken daarentegen kenmerken zich door een gestabiliseerde epifaunale climaxgemeenschap. Het zijn 'volwassen' kunstmatige riffen. Echter blijken volwassen en naderhand oudere riffen een lagere soortendensiteit, -diversiteit en -biomassa te vertonen. Naast ouderdom is ook de grootte van een rif een bepalende factor. Kleine kunstmatige riffen, windmolenfunderingen en scheepswrakken zouden ook meer soorten aantrekken (excl. productie) t.o.v. hun omvang in vergelijking met grotere kunstmatige riffen (J. T. Reubens et al., 2013).

Ook de ligging van een rif is bepalend voor soorten abundantie. Scheepswrakken nabij de kust met seizoenale temperatuur- en zoutgehalteschommelingen en nutriëntenaanrijking vanuit de kustgebieden, hebben een algemeen lagere soortenrijkdom gekenmerkt door een *M. senile* gedomineerde gemeenschap. Kustwrakken (op 11, 15, 22 km t.o.v. de kust) in de zuidelijke Noordzee bestaan gemiddeld uit 52% uit zeeanjelier (*Metridium senile*) en 29% *J. herdmani* en hydropoliepen (*T. indivisa* en *T. larynx*). Intermediair (30,31 km t.o.v. de kust) en offshore (op 46, 54 km t.o.v. de kust) gelegen scheepswrakken in de Zuidelijke Noordzee bestaan gemiddeld uit 81% hydropoliepen (*T. indivisae*) en de *J. herdmani* (Zintzen et al., 2008). Te danken aan stabielere temperaturen en zoutgehaltes, minder nutriëntenaanrijking en hoge stroomsnelheden. De diverse *Tubularia indivisa* gedomineerde gemeenschap huisvest ook de tweekleppige wijdemantel (*Aequipecten opercularis*). De juveniele wijdemantel komt in hoge dichtheden voor op offshore scheepswrakken in de Belgische en Nederlandse wateren (gemiddeld 120 individuen/m², <15 mm); exemplaren van 22 mm zijn waargenomen op de C-power windmolenfunderingen (Brabant, 2009).

De offshore stijgende soortenrijkheid op scheepswrakken van Zintzen et al. (2008) dreigt te verschillen van offshore soortenarme gradiënt volgens Van Hoey et al. (2004), besproken in paragraaf 1.5.1. Volgens Zintzen et al. (2008) zou de hoge productiviteit en troebelheid van de kustzone de ontwikkeling van een soortenrijke gemeenschap beperken (Zintzen et al., 2008)

Windmolenfunderingen finale epifaunale kolonisatiefase en perspectief

Het C-power windmolenpark op 27 km uit de Belgische kust zou als nearshore-intermediair hard substraat kunnen doorgaan overeenkomstig de intermediaire scheepswrakken locatie op 30-31 km van de kust volgens Zintzen et al. (2008). Na negen jaar windmoleninplanting werden met zeeanemonen bezette mosselen waargenomen op de C-power windmolenfunderingen.

De blauwe mossel- en zeeanjelier gemeenschap vormt een derde kolonisiestadium of climax gemeenschap vanaf het zesde jaar na inplanting van de windmolenfunderingen volgens Kerckhofs et al. (2019). Mosselschelpen faciliteren met hun schelpenstructuur vlokreeftensoorten (*M. acherusicum*, *J. herdmani*) evenals de zeeanjelier (*Metridium senile*). De zeeanjelier treedt echter in concurrentie met blauwe mosselen op vlak van ruimte en remt nieuwe soortenkolonisatie, en is bekend als finaal soortenarm stadium zoals op scheepswrakken in de Noordzee kustgebieden (Zintzen et al., 2008). Waardoor de co-gedomineerde *M. senile* - *M. edulis* assemblage wordt verwacht te evolueren naar een *soortarme M. senile* gedomineerde gemeenschap (Francis KERCKHOF et al., 2019).

Hierdoor zijn volgens Kerckhof et al. (2019) windmolenfunderingen geen alternatief voor natuurlijke harde substraten als grindbedden. 'Windmolenfunderingen als hotspots voor biodiversiteit' dragen immers een dubieuze connotatie afkomstig van hun vergankelijk intermediair soortenrijk stadium, tussen drie en vijf jaar na inplanting van de windmolenfunderingen (Francis KERCKHOF et al., 2019). De windturbines en vooral funderingen (ook van booreilanden, gasplatforms) vormen desalniettemin een gunstig substraat voor de kolonisatie van *Mytilus edulis*. Wanneer door hevige weersomstandigheden of hun eigen gewicht de mosselen afvallen, vormen ze (op verder dan 30 m) een 'secundair rif dat de ruimtelijke heterogeniteit en geassocieerde biodiversiteit lokaal verbeterd (Francis KERCKHOF et al., 2019).

Kabeljauwachtigen rond windmolenfunderingen

Vissoorten die aangetrokken blijken tot (kunstmatige) riffen in het BNZ zijn de steenbolk, pollak (*Pollachius pollachius*), koolvis, Atlantische kabeljauw, zeebaars (*Dicentrarchus labrax*), gewone zeedonderpad, naakte slijmvissoorten (*Blenny*), gewone grondel (*Pomatoschistus minutus*), makreel en horsmakreel. In 2008 werden op de windmolenfunderingen van C-power (Thorntonbank) en Belwind (Grote bank) 65% lagere visdichtheden (12 t.o.v. 34 individuen/1000m²) aangetroffen t.o.v.

de zandbodem in 2005 (80% daling in de westelijke Thorntonbank concessiezone). Er bleek een gedaalde zomerpopulatie haring- en sprat van 22 individuen/1000 m² in 2005 naar 1 individu/1000 m² in 2008. Deze variatie wijst op een interjaarlijkse variatie in demografie en verspreiding van de haringachtigen (*Clupeiformes*). De variabiliteit in visdichtheid kan niet toegeschreven worden aan de (lokale) effecten van de bouwactiviteiten, ondergeschikt aan de natuurlijke variabiliteit binnen het ecosysteem.

De belangrijkste drijfveren voor de variatie naast interjaarlijkse variabiliteit zijn de ruimtelijke (zandbankgeul-zandbanktop) en seizoenale verschillen (Brabant, 2009). In 2008 werden tot zes keer meer epibenthos aangetroffen in de zandbankgeulen tegenover de zandbanktoppen van de Groote bank (referentiebank), Oosthinder (Belwind) en de Thorntonbank (c-power). Dominerende epibenthische soorten zijn de grijze garnaal, slangsterren, heremietkreeft, zwemkrab (*Liocarcinus holsatus*), dwerginktvis (*Sepiola*) en dwergpijlinktvis. Het verhoogde aantal epibenthos in de zandbankgeulen verklaart overeenkomstig een 22% hogere demersale visdensiteit. Die ruimtelijke verschillen zijn uitgesprokener in de herfst, namelijk een 200% hogere visdensiteit in de herfst vergeleken met de zomer. Er deed zich in de herfst van 2008 in de Thorntonbank geulen een piek voor van 64% kabeljauwachtigen dwergbol (*Trisopterus minutus*) en steenbol t.o.v. het totaal aantal voorkomende demersale vis. De dwergbol is bijna uitsluitend in de herfst van 2005 en 2008 aangetroffen met lengte 9-17 cm (volwassen lengte 10-26 cm (Froese, 2019)). In de piek van 2008 kwam de dwergbol voor in een tien maal hogere densiteit (64 individuen/1000m²). De aangetroffen steenbolken in 2005 waren voornamelijk tweejarigen, in de herfst van 2008 werden voornamelijk eenjarigen en hoger aangetroffen (Brabant, 2009).

De gadoid outburst, besproken in paragraaf 1.4.2 toonde een verband tussen een dalend haringbestand en een aanzienlijke toename in kabeljauwachtigen. Enerzijds door een toename in prooi-soorten van de haring, wat meer epibenthische soorten en hogere trofische niveaus kan voeden. In de C-power windparken bleek in de zomer van 2008 een gedaald haringbestand. In de herfst van 2008 in de zandbankgeulen van o.a. de Thorntonbank een zesmaal hogere epibenthos en een 22% hogere demersale visdensiteit, waarvan 64% kabeljauwachtigen dwergbol en steenbol. Een tweede mogelijke reden voor de gadoid outburst was een verminderde predatie op kabeljauwachtigenlarven. In de windmolenparken werd in de herfstpiek van 2008 meer eenjarige steenbol aangetroffen t.o.v. 2005 met voornamelijk tweejarige steenbol.

In de herfst en de zomer (de meest intensieve voedingsperiode) van 2010-2011 werd in het windmolenpark van C-power naast steenbol ook Atlantische kabeljauw gedetecteerd (J. T. Reubens et al., 2014). De steenbol toonde vanaf het eerste jaar na de windmolen constructies al hoge

vangsten (J. T. Reubens et al., 2013). In 2009 werden gemiddeld 14 ± 11 juveniele (<22 cm lang) en volwassen steenbolken/m² windmolenfundering of 22 000 individuen - 2700 kg extra waargenomen nabij een windturbinefundering t.o.v. de omliggende zachte sedimenten. De Atlantische kabeljauw werd in 2009 minder aangetroffen dan in 2010 en 2011 (respectievelijk 1.05 ± 0.4 , 6.3 ± 1.5 en 3.9 ± 1.0 individuen/(vissers.vissersuren)). De incrementele toename van de Atlantische kabeljauw vertoont eerder een 'constructie-effect' (J. T. Reubens, Degraer, & Vincx, 2011) met vergelijkbare gemiddelde kabeljauwlengtes in de windmolenparken tegenover de zandige omgeving.

De steenbolklengte bleek iets verhoogd bij de windmolenfunderingen t.o.v. zandgebieden. Echter blijkt in de conditie-index (o.b.v. totaal gewicht en lengte) geen significant verschil. Wat aantoont dat windmolenfunderingen voor de Atlantische kabeljauw en steenbolk niet ondergeschikt zijn aan de zandhabitat en er zich geen ecologische val voordoet (J. T. Reubens et al., 2014).

De aanwezige prooidieren, gekoppeld aan habitatstructuur beïnvloeden de conditie van vissoorten. Het dieet van de Atlantische kabeljauw rond de windmolenfunderingen in de zomer en herfst bleek voornamelijk te bestaan uit het porseleinkrabbetje (*Pisidia longicornis*), *Jassa herdmani*, zeeanemonen (*Actinaria*), krabben (*Brachyura*) en strandkrabben (*Liocarcinus*). De pooisoorten *J. herdmani* en *Pisidia longicornis* zijn bekend in grote dichtheden op de artificiële windmolenriffen, tot 13 000 individuen *J. herdmani*/m² en tot 4000 individuen *Pisidia longicornis*/m² (J. T. Reubens et al., 2014). Het dieet van de steenbolk rond de C-power windmolenfunderingen in juli tot oktober 2009 bestond voor 84.6% uit *Jassa herdmani* en 10.3% *Pisidia longicornis* (J. T. Reubens et al., 2011). Echter varieerde de dieetsamenstelling van de opportunistische Atlantische kabeljauw en steenbolk seizoenaal in de staalnamen 2010-2011 op het concessiegebied van C-power. Zomerstalen van Atlantische kabeljauw werden gedomineerd door *Jassa herdmani*, winter- en lentestalen door het *Pisidia longicornis* en herfststalen door de gewone zwemkrab (Marlien, 2012). Zoals in paragraaf 1.4.2 aangehaald vormen deze prooisoorten een belangrijke voedselbron door hun gelijkaardige of hogere vetzuursamenstelling als de Atlantische kabeljauw. De Atlantische kabeljauw en steenbolk in de windmolenparken bezitten meer energie dan nodig om het basaal metabolisme in stand te houden (J. T. Reubens et al., 2014).

Meerdere windmolenfunderingen creëren stapstenen (Brabant, 2009). Het aantreffen van de uitheemse grote roze zeepok (*Megabalanus coccopoma*) in Belgische windparken en het Nederlandse windmolenpark 'Egmond aan Zee' illustreert het stapsteeneffect van windmolenfunderingen (in combinatie met hogere temperaturen) (F Kerckhof, Rumes, Norro, Jacques, & Degraer, 2010). Dit effect zal blijken naarmate de uitbouw van de resterende Noordzee windmolenparken (acht windparken met horizon 2020) zich voltrekt (Belgium offshore platform, 2019).

De Atlantische kabeljauw probeert energiewinst te maximaliseren door de voedingsactiviteit van hun prooien te volgen. Ze jagen vaak in schemerperioden, met bijgevolg een trade-off tussen foerageersucces en predatiedruk. Artificiële windmolenriffen in het BNZ zinnen ook predatoren van de Atlantische kabeljauw. De bruinvis (*Phocoena phocoena*) is significant meer aangetroffen in het windpark tegenover de omliggende gebieden (J. T. Reubens et al., 2014). Eveneens zeehonden (*Phoca vitulina*) en in kleine aantallen de witsnuitdolfijn, dat voornamelijk meerjarige kabeljauwachtigen behagen (Bos et al., 2009).

De windmolenfunderingen bieden echter wel een beschuttingsfunctie tegen predatoren en stromen. Dit wordt ondersteund door het meer en langer (over 24 uur) detecteren van Atlantische kabeljauw en steenbolk in windmolenparken, in mindere mate rond scheepswrakken en bijna niet rond zandbodems. Hun verblijf in het windmolenpark tussenin voederperiodes verlaagd hun energiekosten (J. Reubens et al., 2014).

Bescherming en voedselvoorziening door windmolenfunderingen zorgen voor extra energie voor groei en reproductie. Op lokale schaal veronderstelt Reubens et al. (2014) biomassaproductie van Atlantische kabeljauw of steenbolk. Eenjarige Atlantische kabeljauw domineerde het hele jaar door de windmolenfunderingen. Tweejarigen zijn in de eerste helft van het jaar in lagere aantallen aangetroffen. Algemeen werden de kabeljauw en steenbolk gedurende de wintermaanden (december-maart) minder gedetecteerd, mogelijks trekken ze dan naar paaigebieden. Nuljarige Atlantische kabeljauw (5 cm geschatte gemiddelde lengte) gedetecteerd van eind mei tot begin juni wijst eveneens op larvale werving (J. T. Reubens et al., 2014). Verboden visserijactiviteiten in windmolenparken verhogen de overlevingskansen van onvolgroeide Atlantische kabeljauw dat anders in bijvangst zou terechtkomen [35 cm is de minimum aanlandingsmaat in ICES-gebied 4c de Zuidelijke Noordzee (Jan T Reubens, Vandendriessche, Zenner, Degraer, & Vincx, 2013), 31-74 cm de volwassen Atlantische kabeljauwlengte (Froese, 2019)]. Thans blijkt op regionale schaal, ICES gebied 4c productie onveranderd. Immers bemoeilijken factoren als omgevingsomstandigheden, voedselbeschikbaarheid, predatie van larven, paaibestand structuur, inschattingen over productieverhogingen, de inschatting van een Atlantische kabeljauw- en steenbolktoename; die niet noodzakelijkerwijs afwezig is (J. T. Reubens et al., 2014).

2 Methoden

2.1 InVest 3.7.086 dataverzameling Atlantische kabeljauw

Voor de kwantificering van Atlantische kabeljauwproductie door biogene riffen is gebruik gemaakt van de open-source InVest 3.7.086 ecosysteemdiensten modelleringssoftware (Sharp et al., 2018). Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs of kortweg InVest is gecreëerd door de Stanford universiteit binnen het Natural Capital project. Ze willen ecosysteemdiensten moneteriseren met de intentie om beslissingsnemers handvaten aan te reiken om natuurlijke hulpbronnen zoals land- en watersystemen rationeel te beheren. Het geïntegreerd ruimtelijk model weegt de impacten van verschillende menselijke activiteiten op de omgeving af en vormt hiermee een hulpmiddel om de waarde van alternatief beheer in beraad te nemen. Voor de Zuidelijke Noordzee is het effect op Atlantische kabeljauwwerving gesimuleerd bij een verandering van een zandhabitat naar een mosselrif.

De toepassing van de fisheries tool en fisheries habitat scenario tool (finale InVest ecosysteemdienstentools) leveren voor de Atlantische kabeljauw in het BNZ schattingen op van het oogstvolume met de bijbehorende economische waarde. Eerst is data verzameld in een populatieparameterbestand over de Atlantische kabeljauw in het Zuidelijke Noordzeegebied. De biogene riffen van het COASTBUSTERS project situeren zich in het Zuidelijk deel van de Noordzee, ICES deelgebied 4c (Figuur 2). De populatiegegevens zijn hoofdzakelijk afkomstig uit de meest recente data (vaak 2018, 2019) gemeten of bepaald door ICES voor de Noordzee, het Skagerrak en het Oost-Engels kanaal. Het populatieparameterbestand wordt vervolgens aangepast door de InVest Fisheries tool. Waarna het aangepaste populatieparameterbestand, samen met een habitatafhankelijkheid- en habitatverandering bestand zijn opgeladen in de fisheries habitat scenario tool. Wat een totaal Atlantisch kabeljauw oogstvolume en economische waarde genereerde.

Een samenvattende tabel met de data van de opgestelde CSV bestanden (populatieparameterbestand, habitatafhankelijkheid bestand en habitatverandering bestand) opgeladen in de InVest visserijmodellen is terug te vinden in de bijlagen, Tabel 2. De overige data die rechtstreeks in de desktoptools werd ingevuld is beschreven in de methoden sectie, paragrafen 2.1.1 en 2.1.2. De twee gemodelleerde scenario's komen aan bod in deel 3 Resultaten, waarin ook de outputwaarden zijn weergegeven.

2.1.1 InVest fisheries habitat scenario tool

Het populatieparameterbestand is leeftijd gestructureerd van een tot tien jaar voor de Atlantische kabeljauw in de regio Noordzee-Skagerrak. De leeftijdsgegevens uit het WGNSSK adviesblad 2019 voor de Noordzee, Skagerrak en het Oost-Engels kanaal (ICES Working Group on the Assessment of Demersal Stocks in the North Sea and Skagerrak) zijn niet geslachtsspecifiek (WGNSSK, 2019).

De meest recente overlevingskansen, natuurlijke mortaliteit (NorthSeaSkagerrak) in gans 2018 is leeftijdsafhankelijk en komt uit het WGNSSK adviesblad november 2019 tabel 4.5b. 'Cod in Subarea 4, Division 7.d and Subdivision 20: Natural mortality by age-group' (WGNSSK, 2019).

Vismortaliteit is de relatieve vangstkwaetsbaarheid per leeftijd. Waarde '1' staat voor volledige kwaetsbaarheid (InVEST, 2020). De oudere leeftijdsklassen tonen een hogere vismortaliteit. Er is een stijgende trend zichtbaar, waarbij zesjarigen volledige kwaetsbaarheid vertonen. Deze data is afgeleid uit Nielsen en Berg 'figuur 3 verhoudingen van de totale visserijsterfte per leeftijd tot zes jaar, model A met constante selectiviteit' (Nielsen & Berg, 2014).

Verder in het WGNSSK adviesblad 2019 staan de maturiteit gegevens per leeftijd in 2019, afkomstig uit tabel 4.5a. 'het aandeel volwassen naar leeftijdsgroep' (WGNSSK, 2019).

Het WGNSSK adviesblad 2019 bevat in tabel 4.3d 'het gemiddelde vangstgewicht (over de seizoenen) per leeftijd in 2018' (WGNSSK, 2019). Deze tabel in combinatie met tabel VI 'vruchtbaarheid per gewichtsklasse' van Oosthuizen en Daan et al. (1974) (Oosthuizen & Daan, 1974), bijgevoegd in de bijlagen Figuur 16; toont een stijgende vruchtbaarheid bij een stijgende leeftijd (tot tienjarigen). 821 385 eitjes op driejarige leeftijd en 7 134 553 eitjes op tienjarige leeftijd.

Tabel 3 van het WGNSSK adviesblad 2019 bevat een totale vismortaliteit in 2019 van gemiddeld 0.54 (effectief bevestigd in de Noordzee-Skagerrak), opgenomen onder 'exploitatie fractie' in het populatieparameterbestand. Echter wordt een maximale duurzame opbrengst (maximum sustainable yield, MSY) aangeraden van gemiddeld 0.31 tot maximaal 0.46 om de voorraad in stand te houden (WGNSSK, 2019).

De larvale verspreiding is het deel van de cumulatieve larvenpool dat zich in elke subregio verspreidt. Overigens wordt hiervoor per subregio(kolom) een decimaal getal opgegeven. Hier zijn geen subregio's bepaald en is de larvale verspreiding aangenomen gelijkmatig verdeelt te zijn, waarde '1' (Sharp et al., 2018).

Vervolgens geeft het habitatafhankelijkheid bestand aan welke leeftijden het meest afhankelijk zijn van een zand- of rifhabitat. De Atlantische kabeljauw bleek tot drie jaar significant meer aanwezig in biogene oesterriffen, een complexe habitatstructuur t.o.v. een zandige habitat (Carbines, Jiang, & Beentjes, 2004).

Het habitatverandering bestand bevat de procentuele verandering tussen de habitattypes biogeen rif en zand. Voor de Atlantische kabeljauw zijn twee aannames gesuggereerd door promotor Van der Biest Katrien. Een daling van 50% en 25% van de zandhabitat met respectievelijk een aanvulling met mosselrif.

Tot slot dient een gamma waarde te worden opgegeven. Een gamma waarde beschrijft de relatie tussen een verandering in leefgebied en de verandering in overleving. Hoe hoger de gammawaarde, hoe meer kans op overleving. (Een gamma waarde van 0.2 betekent bij 50% habitattoename een toegenomen overlevingskans van 10% (InVEST, 2020).)

Grijze garnalen zijn positief geassocieerd met mosselriffen (de Boer et al., 2001). Voor het biogeen rif is eenzelfde kinderkamerfunctie als een wad en moerasgebied aangenomen, door een gebrek aan gegevens. Ingevolge Van der Biest (2020) (Van der Biest Katrien, 2020). Voor het gehele IJzer estuarium (27.8 ha) modelleerde Liefkens et al. (2006) een totale garnaalwerving van 18-32.4 Kg/(ha.j)). Voor 2014-2018 is een schatting gemaakt (met Belgische vissers) over de garnaalproductie in het COASTBUSTERS gebied o.b.v. de VLIZ Geofish tool van 0.8 kg/(ha.j). Echter 3.5 keer lager dan de garnaalreproductie nabij de Hemmepolder in het IJzer-estuarium, 2.8 kg/(ha.j). Volgens Verbiest (2020) kan een bijkomende garnaalwerving van 5.14-9.26 Kg/(ha.j) verwacht worden bij het COASTBUSTERS rif (18-32.4 kg/(ha.j) gedeeld door 3.5). De garnaalproductie in de mid- en westkust, dichtbij Mariakerke bedraagt echter 10.0 kg/(ha.j) (Van der Biest Katrien, 2020).

Op basis van voorgaande zijn gammawaarden berekend. Een habitataanvulling bij een huidige garnaalproductie (dichtbij Mariakerke) van 10.0 kg/(ha.j) met 50% COASTBUSTERS mosselrif (ongeveer 1 ha) met 5.14-9.26 Kg/(ha.j) garnaalproductie; betekent een verhoging van 2.57-4.63 Kg/(ha.j) (10 kg/1(ha.j) naar 12.57-14.63/1.5(ha.j)). 25.7-46.3% garnaalproductie toename bij 50% habitat toename, resulteert in gammawaarden 0.51-0.93 .

2.1.2 InVest fisheries tool

Het aangepaste populatieparameterbestand, de output van de fisheries habitat scenario tool is vervolgens opgeladen in de InVest fisheries tool. Naast populatieparameters in het aangepaste populatieparameterbestand zijn nog wervings- en waarderingsparameters vereist vooraleer de fisheries tool kan voltrokken worden. De modelrun vereist een voldoende aantal tijdstappen om de bevolking in evenwicht te brengen. Voor leeftijd gestructureerde modellen beschrijft de InVest handleiding 2020 100-300 tijdstappen (InVEST, 2020).

De wervingsparameters. ICES gebruikt voor de Atlantische kabeljauw een Beverton-Holt stock-recruit relationship (ICES advisory committee, 2015; Nielsen & Berg, 2014). Beverton-Holt is een voorraad-wervingsmodel waarbij werving gerelateerd wordt aan de paaibiomassa; individuen uit de vorige

generatie die het aantal individuen in de volgende generatie determineren (ICES advisory committee, 2015). Op Figuur 17 in de bijlage, 'figuur 3.8.2. recruitment per SSB over time' uit het ICES WKNSEA rapport 2015 is in de jaren '80 het hoogste aantal eieren per paairijpe Atlantische kabeljauw geregistreerd (ICES advisory committee, 2015). De specifieke waarden zijn gehaald uit tabel 10 van het WGNSSK adviesblad 2019. Overeenkomstig alfa en bèta in het Beverton-Holt model. Alfa is het maximum aantal eieren in 1980, namelijk 2 254 006 000 (leeftijd 1). Bèta is het aantal paairijpe Atlantische kabeljauw die de helft van de eieren voortbrengt. Paairijpe biomassa (SSB, spawning stock biomass) die de helft van het aantal rekruten 1 127 003 000 in 1980 genereerd wordt benaderd met het meest gelijkaardige aantal rekruten gegenereerd in 1978, 1 122 754 000. Wat een paairijpe biomassa van 144 837 000 kg (met minimum 128 523 000 en maximum 163 222 000 kg SSB) geeft (WGNSSK, 2019). Het totaal aantal rekruten in 2019 bedraagt 133 583 000 (WGNSSK, 2019).

Na de populatie- en wervingsparameters komen de waarderingsparameters aan bod. 'Fraction of harvest kept after processing', het uiteindelijke percentage Atlantische kabeljauwfilet van 43% is gehaald uit Välimaa et al. (2019) 'figuur 1 producten en zijstromen van aan wal verwerkte Atlantische kabeljauw' (Välimaa et al., 2019). De gemiddelde eenheidsprijs in 2019 van Atlantische kabeljauw, aangeland en verkocht in Oostende, Nieuwpoort en Zeebrugge bedraagt 3.23 €/kg (Statbel, 2019).

3 Resultaten

3.1 *InVest scenario's*

Twee scenario's zijn uitgevoerd met de InVest visserijmodellen. Het populatieparameterbestand en het habitatafhankelijkheid bestand zijn gecombineerd met twee verschillende habitatveranderingsbestanden. Het eerste habitatverandering bestand bestaat uit een hectare zand waarvan de helft rif wordt. In het tweede habitatverandering bestand wordt van het hectare zandbodem een kwart rif. Deze twee scenario's (populatieparameterbestand – habitatafhankelijkheid bestand – habitatverandering bestand 1 of 2) zijn uitgevoerd met de gamma waarden 0.51 en 0.93, besproken in paragraaf 2.1.1.

3.2 *InVest fisheries habitat scenario tool*

3.2.1 Scenario 1 (-50% habitatverandering)

- **Gamma 0.51**

In het aangepaste populatieparameterbestand verandert enkel op vierjarige leeftijd de natuurlijke overlevingskans in het Noordzee Skagerrak van 0.2 naar 0.20313228776996706.

- **Gamma 0.93**

In het aangepaste populatieparameterbestand verandert enkel de natuurlijke overlevingskans in het Noordzee Skagerrak voor vierjarigen van 0.2 naar 0.21047884306740686.

3.2.2 Scenario 2 (-25% habitatverandering)

- **Gamma 0.51**

In het aangepaste populatieparameterbestand verandert enkel op vierjarige leeftijd de natuurlijke overlevingskans in het Noordzee-Skagerrak van 0.2 naar 0.21226029727219564.

- **Gamma 0.93**

In het aangepaste populatieparameterbestand verandert enkel de natuurlijke overlevingskans in het Noordzee Skagerrak voor vierjarigen van 0.2 naar 0.22551067040744166.

➔ De eerste drie levensjaren zijn als volledig afhankelijk ingevoerd (1) in het habitatafhankelijkheid bestand. De daaropvolgende levensjaren zijn als evenredig afhankelijk van het rif (0.5) als van de zandhabitat (0.5) aangeduid, aangegeven in Tabel 2.

Het vierde levensjaar is niet langer uitsluitend afhankelijk van het rif maar evenzeer evenredig

afhankelijk van de zandhabitat. Dit vertaalt zich in een stijging in de natuurlijke mortaliteit voor vierjarige Atlantische kabeljauw in ieder scenario waarbij telkens zandhabitat verloren gaat.

- Echter blijkt de natuurlijke mortaliteit van vierjarige Atlantische kabeljauw contradictorisch hoger bij het minste procentueel zandhabitatverlies (25% t.o.v. 50%); evenals bij een hogere gammawaarde (de kans op overleving van een soort bij een toename van het rif).

3.3 *InVest fisheries tool*

3.3.1 Scenario 1 (-50% habitatverandering)

- **Gamma 0.51**

De finale InVest output waarde geeft na de 300^{ste} evenwichtsstap de oogst in biomassa met de bijhorende prijs in euro aan. Namelijk 1 965 109 010.38 kg Atlantische kabeljauwoogst met een waarde van € 2 729 339 904.51.

- **Gamma 0.93**

De finale InVest output waarde na de 300^{ste} evenwichtsstap bedraagt 1 970 517 553.56 kg Atlantische kabeljauwoogst of € 2 736 851 830.13.

3.3.2 Scenario 2 (-25% habitatverandering)

- **Gamma 0.51**

De finale InVest output waarde na de 300^{ste} evenwichtsstap bedraagt 1 971 829 077.75 kg Atlantische kabeljauw of € 2 738 673 406.09.

- **Gamma 0.93**

De finale InVest output waarde na de 300^{ste} evenwichtsstap bedraagt 1 981 584 320.57 kg Atlantische kabeljauw met een waarde van € 2 752 222 462.84.

- Desalniettemin de contradictorisch hogere vierjarige mortaliteit blijkt toch een stijging van de vangsthoeveelheden en opbrengst bij een hogere gammawaarde.

- Echter blijkt meer biogeen rif, 50% zandhabitat verlies tot een lagere opbrengst te leiden.

4 Conclusie en discussie

InVest is een datagedreven programma, de kwaliteit van de output is afhankelijk van de kwaliteit van de inputdata. ICES rapporten wijzen op onzekerheden inherent aan variabele data. Algemeen tonen schattingen over biomassa, maturiteit en vervolgens eiproductie per leeftijd methodologische vertekeningen in historische tijdsreeksen (C. ICES, 2005).

Interjaarlijkse demografische variatie van een visbestand is lastig te voorspellen. Reproductie hangt af van de conditie van het visbestand met voedselkwaliteit als belangrijke variabele. Een voedselwebmodel met prooi- predator verhoudingen tussen leeftijdscategorieën komt niet voor of kan niet worden toegevoegd in de visserijmodellen van InVest. Het Natural Capital project zou de visserijmodellen dan ook willen uitbreiden met complexe voedselweb- en voorraadmodellen (Guerry et al., 2012). Dit blijkt op vandaag, zonder bekende reden niet geïmplementeerd.

Het onderzoeksgebied beslaat enkel de Zuidelijke Noordzee, ICES deelgebied 4c, gezien de locatie van het COASTBUSTERS mosselrif zich in het BNZ situeert. De Atlantische kabeljauwdata wordt in verschillende zeegebieden gemonitord door ICES. Een toevoeging van de aangrenzende ICES deelgebieden (4a, 4b, 4c, 3a, 7d) met bijhorende populatieparameters zou een verrijking zijn van het huidige model, daar de Atlantische kabeljauw trekt doorheen zijn levenscyclus (André et al., 2016). Het toevoegen van meerdere subregio's in het InVest visserijmodel maakt het mogelijk waardes voor de larvale verspreiding op te geven. Larvale verspreiding wordt in het populatieparameterbestand aangeduid in een decimale waarde oplopend tot een, als aandeel van de cumulatieve larvenpool dat zich in elke subregio verspreidt. De rol van stromingen is er echter niet in opgenomen. Kuststructuren interfereren met stromingspatronen, wat een invloed kan uitoefenen op larvale Atlantische kabeljauwverspreiding doorheen de Noordzee (Erftemeijer, van Beek, Bolle, Dickey-Collas, & Los, 2009). Desondanks blijft de impact van een klein mosselrif in het enorme zeesysteem, onderhevig aan diverse klimaat- en oceanografische variabelen erg moeilijk te voorspellen.

Visbestanden zijn onderhevig aan klimaat- en oceanografische variabelen als temperatuurstijging met een complexe en soms ongekende invloed op overleving, maturiteit, vruchtbaarheid (Ken Drinkwater, 2005), evenals ruimtelijke verspreiding van soorten die dezelfde omgevingsvariabelen proberen te behouden (Froese, 2019; Somero, 2012; WGECO, 2008). ICES monitort de visbestanden en ziet hierdoor trends doorheen de jaren (WGECO, 2008). Enkel op die manier zijn de effecten van klimaatverandering op visbestanden doorvertaald in InVest. Een koppeling met de voorspelde toekomstige klimaatscenario's van het IPCC over verwachte oceaanoopwarming en zeeniveaustijging

zijn niet geïntegreerd in de tool. Niettegenstaande blijven de complexe effecten van klimaatverandering op het oceaanklimaat onzeker (Tulp, van Hal, ter Hofstede, & Rijnsdorp, 2009).

Het InVest coastal vulnerability model (een finale ecosysteemdiensttool in InVest) blijkt geen bruikbare tool om klimaateffecten op oceanen in te schatten. Het identificeert de (hoog bevolkte) kustlijngebieden met het grootste risico op erosie of overstroming. Evenals regio's waar dat risico wordt verminderd door de aanwezigheid van natuurlijke habitats. Een kustkwetsbaarheidsindex wordt opgesteld met parameters (manueel ingestelde- en modelparameters) als zeespiegelstijging (optioneel), golf- en windblootstelling, reliëfhoogte gescoord met percentielen bv. 0-20 zeer laag, 21-40 laag, 41-60 gemiddeld, 61-80 hoog, 81-100 zeer hoog. Het model houdt geen rekening met kustprocessen uniek voor de regio, noch voorspelt het veranderingen op lange of korte termijn van de positie of configuratie van de kustlijn (Guerry et al., 2012; Sharp et al., 2018).

Binnen het masterplan kustveiligheid zijn reeds lokale gedetailleerde studies voorhanden over de overstromingsgevoeligheid van het Belgische kustgebied (Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust, 2015). Het onderzoeksproject Crest (climate resilient coast) ontwikkelde een FLIAT-model (Flood Impact Assessment Tool) met overstromingsrisicoberekeningen van het Vlaamse hinterland (Mertens Tina, 2020).

Het habitat/species risk assessment model (een ondersteunende ecosysteemdiensttool in InVest) brengt het risico van menselijke activiteiten op habitats en soorten in kaart (excl. zeespiegelstijging). Toegepast in het Belize langoustine model van Arkema et al. (2019) met de menselijke activiteiten kustontwikkeling, zeevervoer, baggeren, olie-exploratie, visserij, recreatie, afvloeiing van landbouwproducten en aquacultuur als stressoren die de zeebodemstructuur aantasten. Verder wordt de spatiaal-temporele overlap van de aanwezige habitats met bovenstaande stressoren weergegeven. Eveneens bevat het model de populatieparameters natuurlijk sterftcijfer, aanwervingspercentage, volwassen leeftijd en hersteltijd tot oorspronkelijke habitatcondities. Alle criteria worden ingedeeld met specifieke kenmerken voor laag-, middelmatig- en hoog risico. Bv. voor natuurlijke sterfte betekent laag risico 0-20%, medium risico 20-50% en hoog risico >80% (Arkema et al., 2014). De gebruiker kan bovendien alle criteria wegen (volgens datakwaliteit) indien nodig.

Voor het Belize kustbeheerplan zijn eerst verschillende lage-, middelmatige- en hoge risicogebieden gekwantificeerd o.b.v. het InVest risk assessment model. Het InVest visserijmodel is nadien toegepast op 0% hoge-, 50% gemiddelde- en 100% lage risicogebieden ter bepaling van de functionele langoustinehabitats (Arkema et al., 2014).

Het identificeren van risicozones voor habitatverandering vormt een bruikbare inputwaarde voor het habitatverandering bestand van de visserijtool. Desalniettemin blijft de relatie tussen risico-

activiteiten en de functionele habitataantasting een onzekerheid. In het COSTBUSTERS project zou de habitat risk tool de habitatarisicogebieden (en specifiek t.a.v. de Atlantische kabeljauw paaizones) in de Zuidelijke Noordzee kunnen aanduiden, als suggestieve zones voor de aanleg van een golfdempend mosselrif.

Cabral et al. (2015) paste het habitat risk assessment model toe op de bentische habitats in de Normandisch-Bretoense golf (Saint Malo) in Frankrijk. De meest risicovolle gebieden worden aangegeven op een geïntegreerde kaart met verschillende antropogene stressoren als de aanleg van windmolenparken, selectieve extractie van soorten of visserij, zeebodemerrosie door bodemsleepnetten, baggerwerken... . Permanente harde substraten (scheepswrakken, offshore energie constructies) en schelpdierkwekerijen worden benaderd als negatieve stressoren. Door hun potentieel afdichtend effect met lokale sedimentstructuurverandering enerzijds; en een belemmering van de waterbewegingen, verandering van stromingen met gevolgen voor de hydrologische processen anderzijds (Cabral et al., 2015). Uit 1.5.5 blijkt de habitat heterogenisering door introductie van windmolenfunderingen in het BNZ geen inferieur effect te hebben op kabeljauwachtigen vergeleken met de omliggende zandhabitat, wat een diverse bodemgemeenschap impliceert. Habitat- en vervolgens soortendiversiteit ondersteunt het opportunistisch dieet van het Noordzee kabeljauwstand, net boven de Atlantische kabeljauw limietgrens uit Figuur 1. Daarenboven fungeren de harde structuren mogelijk als stapstenen voor minder mobiele soorten, zoals de uitheemse roze zeepok is aangetroffen op Nederlandse en Belgische windmolenfunderingen. Cabral et al. (2015) wijst op een onvoldoende ruimtelijk expliciete inschatting van regulerende diensten. Daarvoor is er meer lokaal relevante ecosysteeminformatie nodig (Cabral et al., 2015; Ysebaert et al., 2019). Door onvoldoende kennis over de wisselwerking tussen meerdere stressoren op mariene habitats, gaat het habitat risk model uit van een additieve impact en geen synergetisch of antagonistisch effect tussen de stressoren. Hierdoor wordt de collectieve impact mogelijks onderschat en laat die interactie nu net cruciaal zijn om viswerving in kaart te brengen (Sharp et al., 2018). Arkema et al. (2014) wijst op de benodigde aanvulling van een wetenschappelijk onderbouwde weging van stressoren o.b.v. de cumulatieve effecten van menselijke activiteiten op ecosystemen (Arkema et al., 2014).

Het InVest visserijmodel beoordeelt geen habitatkwaliteit, enkel wordt een procentuele toe- of afname per landgebruik ingevoerd in het habitatverandering bestand. Het InVest habitat quality model (een ondersteunende ecosysteemdienstentool in InVest) brengt het effect van 'bedreigingen' of m.a.w. menselijke activiteiten (wateronttrekking, landbouwirrigatie, urbanisatiedichtheid, baggeren, invasieve soorten,...) op de biodiversiteit van een aquatisch of terrestrisch habitatype (landbouw, bos, urbaan gebied, reservoirs, stromen,...) in kaart (Terrado et al., 2016). Er wordt een

relatieve gevoeligheidsscore toegewezen per habitatype voor elke bedreiging. Echter zorgt het definiëren van stukken land met een landgebruiks- en bedekkingskaart met onbeheerde stukken voor isolatie van metapopulaties en vervolgens een uitstervingsrisico in gefragmenteerde landschappen. Het model belicht trade-offs tussen verschillende ruimtelijke inrichtingen en ondersteunt beslissingsnemers om een keuze te maken met de minst negatieve impact op het ecosysteem. Het kwaliteitsmodel vereist geen bijkomende specifieke habitatparameters (Sharp et al., 2018). Zonder gedetailleerde water(bodem)gebruiks- en bedekkingskaarten voor oceanen en zeeën is het geen bruikbare tool voor de inschatting van bedreigingen op biogene riffen.

De InVest tools helpen bij het identificeren van de meest geschikte locaties voor ruimtelijke inrichting met zo weinig mogelijk negatieve impact op het ecosysteem, bruikbaar voor kustbeschermingsprojecten. Echter vormen ontbrekende lokale ecosysteempparameters hét knelpunt bij de kwantificering van de verhoogde Atlantische kabeljauwwerving door mosselriffen t.o.v. een ongestructureerde habitat. Soortendiversiteit is immers gekoppeld aan het habitatype en de daarmee gerelateerde bodemgemeenschap (Van Hoey et al., 2004) beïnvloed door klimaat- en oceanografische (als zoutgehalte, temperatuur, diepte,...) variabelen (Ken Drinkwater, 2005; Teal, 2011).

Het huidige habitatafhankelijkheid bestand bevat immers de algemene afhankelijkheid van de soort per leeftijd. De zandbodem- en mosselrifhabitats zijn niet gedifferentieerd volgens de geschiktheid om te paaien, te foerageren, te schuilen. Uit de literatuur weten we dat mosselriffen wel degelijk beschutting bieden tegen predatoren (J. Reubens et al., 2014), en een hoog foerageerpotentieel hebben door een verhoogde prooidichtheid voor grotere soorten (Peterson et al., 2003; P. Zu Ermgassen et al., 2018; P. S. zu Ermgassen et al., 2016). In de InVest visserijmodellen wil men in de toekomst o.b.v. bestaande data, de impact van biogene habitatverandering op de overleving en vruchtbaarheid van verschillende levensfasen van sleutel-/indicatorsoorten toevoegen (Guerry et al., 2012). Dit is echter in de huidige visserijmodellen nog niet terug te vinden.

De locatiespecifieke dynamiek van het complexe ecosysteem van zeeën en oceanen speelt een belangrijke rol in de relatieve toename van viswerving nabij een mosselrif t.o.v. de initiële ongestructureerde zandbodem in het BNZ. Een gebrek aan lokale data bemoeilijkt de beoordeling van lokale effecten van een klein mosselrif in een groot zeesysteem. Lokale testprojecten als COASTBUSTERS in het BNZ leveren dan ook waardevolle locatiespecifieke informatie op over de diverse ecosysteemdiensten van een *Mytilus edulis* rif.

5 Interdisciplinaire bevindingen

De vele ecosysteemdiensten die biogene riffen leveren, maken hen maatschappelijk zeer waardevolle investeringen. Resultaten uit ecosysteemdienstenmodellen als InVest zijn doorgaans geen concrete antwoorden op beleidsvraagstukken, doch volkomen relevant. Rosenthal et al. (2014) wijst op het belang van iteratieve co-creatie van in het begin van het ecosysteemdienstenonderzoek tussen overheden, wetenschappers en belanghebbende stakeholders. Dit om beleidsrelevantie informatie en bovenal opname van informatie in het beleid te verhogen, teneinde een veerkrachtig ecosysteem te faciliteren (Rosenthal et al., 2015). Evenals wijzen Rosenthal et al. (2015) op de divergente doelstellingen tussen de verschillende partijen. Hierbij kunnen verschillende scenario's met bijhorende impacts de inherente trade-offs belichten. Iteratieve co-creatie tussen wetenschappers, beleidsmakers en belanghebbende stakeholders vond plaats voor de ontwikkeling van een geïntegreerd nationaal kustbeheerplan voor Belize. De stakeholderbetrokkenheid van de negen kustgebieden situeerde zich voornamelijk in het begin van het proces d.m.v. twee online enquêtes. De verschillende stakeholdersbelangen, waaronder de visserij(opbrengsten) droegen bij aan de ontwikkeling van het kustbeheerplan. Echter slaagden ze er niet in om effectieve communicatiemechanismen tussen de stakeholders én, de wetenschappelijke- en beleidsprojectpartners te creëren. Uit het beperkt aantal diepte interviews die ze voerden, bleek echter een verhoogd engagement tot medewerking. Na een lang proces van zes jaar is een geïnformeerd voorkeursbeheerplan opgesteld door iteratie tussen beleidsmakers en wetenschappers. Dit voorkeursscenario als een consensus tussen extremen van voortzetting of stopzetting van de huidige economische ontwikkelingen, respectievelijk een 100% afname of 50% toename in langoustine visserijopbrengsten. Het voorkeursbeheerplan bevatte naast visserij ook andere planningsobjectieven als toeristische inkomsten (van het prachtige koralen, mangroves en zeegrassen) en kustbescherming. Arkema et al. (2015) besluiten dat zonder iteratieve co-creatie over het voorkeursscenario met een verbeterd economisch rendement en een minimale milieu- en vervolgens sociale impact, de beleidsimpact aanzienlijk lager zou liggen. Echter dient doorlopende monitoring uit te wijzen of de gemodelleerde resultaten in de praktijk worden bevestigd, met om de vier jaar een bijsturing van het beheerplan (Arkema et al., 2019; Arkema et al., 2015; Verutes et al., 2017).

Het COASTBUSTERS project omvat een iteratieve co-creatie tussen wetenschappers, de bedrijfswereld en de overheid van bij de beginfase; kennisontwikkeling over biogene riffen i.h.k.v. kustbescherming alsook de andere ecosysteemdiensten die het met zich meebrengt. Waarbinnen contact is opgenomen met lokale stakeholders als de gemeente de Panne om hun medewerking en ondersteuning tijdens de duur van het project te waarborgen. Dit gebeurde ook met het

departement mobiliteit en openbare werken, het agentschap maritieme dienstverlening en kust, de afdeling Kust, de wetenschappelijke dienst beheerseenheid van het mathematisch model van de Noordzee en het kabinet Noordzee. De stakeholders toonden interesse over de toekomstige resultaten van het project (Agentschap innoveren en ondernemen, 2016). De visserij sector en andere kustgemeenten zijn minder betrokken. Dit zijn belangrijke stakeholders wanneer tweekleppigen riffen zouden opgenomen worden in het druk bezet marien ruimtelijk plan, hoogstwaarschijnlijk in de reeds beperkte zones voor kustvisserij.

Het Verenigde Naties duurzame ontwikkelingsdoel 14 staat voor het behoud en duurzaam gebruik van oceanen, zeeën en mariene hulpbronnen. Nevendoelstelling 14.4 staat voor spoedig herstel van visbestanden door destructieve visserijpraktijken te beëindigen. Hierbij onderschrijft de VN een ecosysteemgerichte benadering van de exclusief economische zones op 370 km buiten de kust of voor België het continentaal plat (SDG 14.2); evenals het belang van kleinschalige, ambachtelijke visserij (SDG 14.7.B) (United nations, 2015). In 1960 bestond 63% van de volledige Belgische vloot uit kustvisserij. Goed voor ongeveer 20% van alle visaanvoer (49% haring en sprot, 12% grijze garnaal, 9% kabeljauw, 6% schol, 4% wijting en 3% tong) en zelfs 60% van alle schelpdieren en kreeftachtigen. Dit stelde 40% van de Vlaamse vissers te werk. Echter is de kustvisserijvloot in België gedaald tot minder dan 25% (<20 schepen). Dit zorgde voor een aanzienlijke daling, 94% in de directe werkgelegenheid van de commerciële kustvisserij t.o.v. 1950. De Europese Commissie erkent naast het sociaaleconomische belang (voedselvoorziening en inkomsten) ook de sociaal-culturele waarden van kustvisserij voor de kustgemeenschappen. De Europese Commissie adviseert een voorrangregeling voor de kleinschalige-, ambachtelijke- en kustvisserij en een beperkte toegang in het BNZ voor vervuilende bodemberoerende grootschalige visserij (VLIZ, 2014).

Er is immers een voorstel gedaan om de drie mijlszone voor kustvisserij in het BNZ uit te breiden naar 4.5 mijl, maar dit is niet weerhouden in het marien ruimtelijk plan 2020-2026. België moet hierover een akkoord bereiken met andere lidstaten met commerciële belangen in het BNZ (Federale overheidsdienst volksgezondheid, 2020). Wel moedigt men actieve sportvissers aan naar geprofessionaliseerde lage-impact visserij door een opsplitsing van de visvergunning mogelijk te maken met het ministerieel besluit van 16/12/2005. Echter is een andere belemmering hierin het verbod op verkoop en ontbreekt bv. een online registratie waar welke vis gevangen wordt (Desnijder N.; Brouckaert E.; Hansen K.; Heyman J., 2014).

Doorgaans wordt de Atlantische kabeljauw bevestigd met bodemsleepnetten, met als gevolg een vernieling van de habitats, omwoeling van de bodem en ongewenste bijvangsten. Echter blijkt de boomkor effectiever voor de tong en schol - belangrijke doelsoorten in de Noordzee visserij - wat zou bijdragen aan de instandhouding van kabeljauwbestanden. 85% van de kustvisserij bestaat uit

boomkorvaartuigen (VLIZ, 2013). Het ILVO ontwikkelde in samenwerking met Belgische vissers een duurzamer alternatief voor de boomkor, de SumWing en de Ecoroll. Een zwevende vleugel i.p.v. metalen buis woelt de bodem minder om en de lichtere materiaalkeuze verbruikt tot 40% minder brandstof. De Rederscentrale (beroepsvereniging voor visserij), het ILVO, het departement Landbouw en Visserij en de provincie West-Vlaanderen tekenden een convenant voor een duurzame Vlaamse visserijsector met selectievere visserijtechnieken met minder milieu-impact (Desnijder N.; Brouckaert E.; Hansen K.; Heyman J., 2014). In het Valduvis project wordt de Belgische visserij gescoord op ecologische, economische en sociale duurzaamheid. De ecologische parameters zijn bodemimpact, seizoen, visbestand, brandstofverbruik en aanpassingen duurzame visserij (Kinds, Sys, Schotte, Mondelaers, & Polet, 2016). De samenwerking tussen de rederscentrale en het ILVO voor de ontwikkeling van de duurzaamheidstool en de participatie aan het project van zo goed als elk Belgisch visserstuig getuigd van wilskracht in de Belgische visserij om te verduurzamen.

In de transitie naar duurzame kleinschalige visserij in het BNZ kunnen biogene riffen de ecosysteemdienst visserij ondersteunen. De kraamkamer-, foerageer- en schuilplaatsfunctie van de riffen bieden kansrijke perspectieven voor het herstel van de Atlantische kabeljauw- en mogelijks ook andere bestanden. Er dient echter rekening mee gehouden te worden dat de aanleg van riffen in het BNZ ter ondersteuning van de Atlantische kabeljauwbestanden mogelijk de Noordelijke vissers baten. Zoals besproken in paragraaf 1.4.1 worden de kabeljauweieren en larven vanuit de paaigebieden van de Noordzee meegevoerd met oceaanstromingen richting de fjorden van het centraal-oostelijke Skagerrak en Kattegat. Daar groeien ze op tot wanneer ze paairijp zijn, de minimum aanlandingsmaat benaderen. Wat een verminderde terugkeer van volwassen Atlantische kabeljauw naar de Noordzee paaigronden impliceert.

Een andere ecosysteemdienst, waterkwaliteitsregulatie van het COASTBUSTERS rif, is benaderd in de masterproef van medestudent Gerben Meutermans. Tweekleppigen mineraliseren de overmatige antropogene nutriëntentoevoer, leggen koolstof vast in de vorm van calciumcarbonaat in hun schelpen. Mosselbanken dragen hiermee bij aan gezonde kustgebieden. Met hoge zekerheid van het IPCC leidt sinds 1970 overmatige antropogene nutriënten- en organische stofaanrijking van oceanen en zeeën (afkomstig van landbouw, stedelijk landgebruik...) tot verhoogde fotosynthese, overmatige algenbloei en hypoxische omstandigheden. Daarenboven verwacht het IPCC met hoge zekerheid een intensivering van hypoxische condities ter hoogte van de hoge en middelste breedtegraden.

Overmatige algenbloei en -sterfte zorgt voor overmatige CO₂-afbraak met zuurstofarme omstandigheden en vissterfte tot gevolg. Het IPCC voorspelt voor het meest optimistische klimaatscenario RCP 2.6 een daling van 0.6% opgeloste zuurstof op 100-600 m in oceanen, voor het meest extreme klimaatscenario RCP 8.5 een daling tot 3.9% (Pörtner et al., 2019). De oceaan is een

belangrijke koolstofopslagplaats, met een buffervermogen van 30% van de mondiaal antropogene CO₂-uitstoot. Het te veel aan CO₂ verhoogt de pH van zeeën en oceanen. Het IPCC voorspelt voor het einde van de 21ste eeuw (2081-2100) per klimaatscenario een gemiddelde zeeoppervlak pH-daling van 0.065 voor RCP 2.6 en -0.315 voor RCP 8.5 (Pörtner et al., 2019). Het IPCC voorspelt daarbij, met hoog vertrouwen, corrosieve omstandigheden voor calciumcarbonaat schaalproducerende organismen en met medium vertrouwen een impact op mariene organismen en ecosystemen. Dit is zeer waarschijnlijk het hele jaar door het geval voor de Zuidelijke oceaan en de Noordelijke IJszee. Beperkte kennis over lokale processen en zee-ijsinteractie in globale klimaatmodellen belemmert het IPCC om de voorspellingen seizoenal en spatiaal voor de specifieke polaire zones te specificeren (Pörtner et al., 2019).

De InVest nutriënt delivery ratio tool maakt een inschatting van de nutriënt aanleveringsbronnen en hun transport (Sharp et al., 2018). I.h.k.v. het nationaal actieplan van de Golf van Mexico, met de op één na grootste hypoxische (zuurstofarme) zomerzone ter wereld, is met de InVest nutrient delivery tool bepaald welke en hoeveel landbouwgronden beter verdwijnen (Rabotyagov et al., 2014). Deze brongerichte toetsing kan ook in Vlaanderen een antwoord bieden aan ruimtelijke planners en beleidsmakers. Echter berekent de tool enkel nutriëntaanreiking en geen nutriëntomzetting of m.a.w. bioremediatie van een biogeen rif (Sharp et al., 2018), de ecosysteemdienst dat in de thesis van Gerben Meutermans wordt beoogd.

Er zijn echter ook complicaties bij waterkwaliteitsregulatie, zoals een verminderde troebelheid predatoren meer vangstsucces kan opleveren in de aantrekkelijke roofomgeving. Het mosselrif blijft voorsnog een nutriëntenrijk systeem met een hoge nutriëntencyclering, gunstig voor diverse soorten. Wanneer de nutriëntenrijke riffen het aantal bodemdieren zou concentreren kunnen belangrijke commerciële soorten als de schol en tong, voorkomend in modder-zandbodems nadelig beïnvloedt worden.

Reflectie

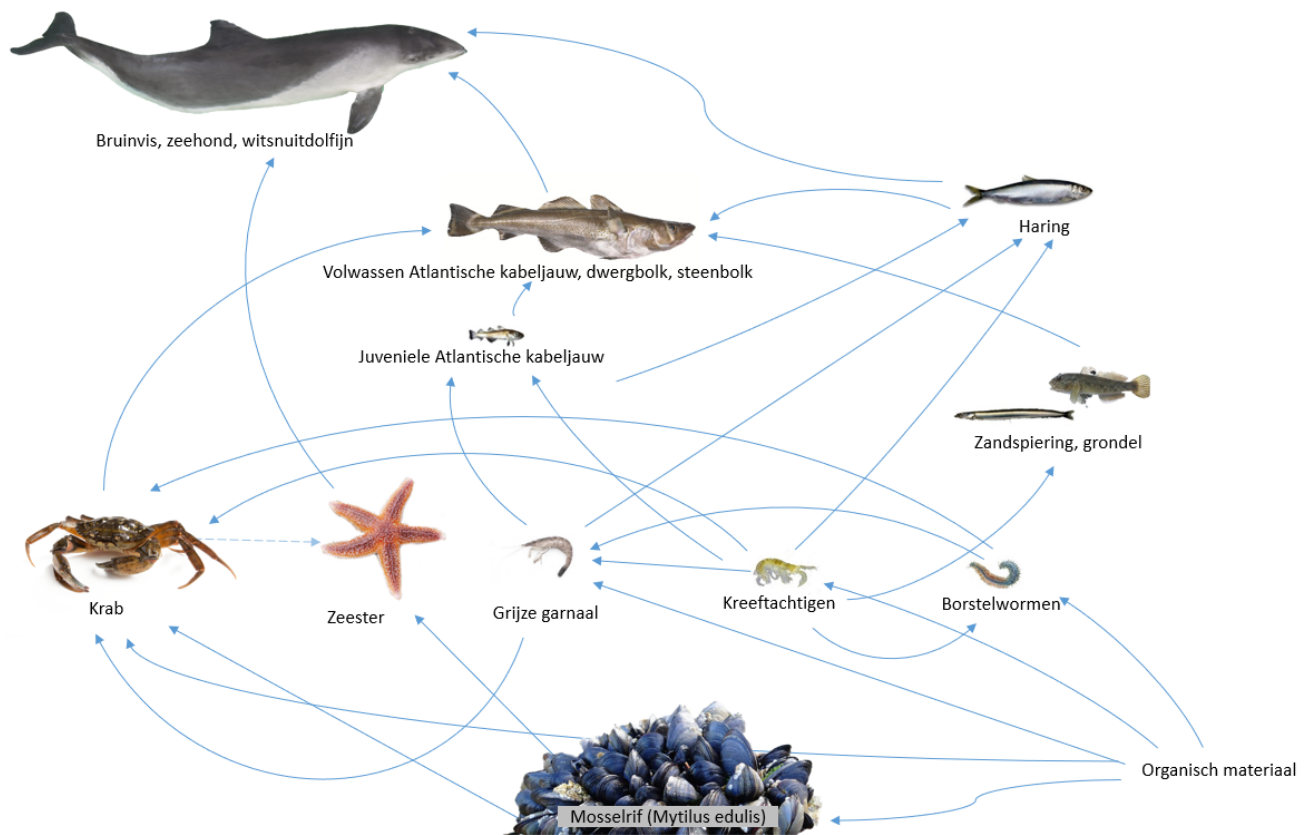
Doorheen het academiejaar vonden enkele overlegmomenten en verschillende mailings plaats met promotor Katrien Van der Biest. Later in het tweede semester sloot promotor Jan Staes aan ter vervanging.

In het eerste semester ging de dataverzameling van start over schol. De soort blijkt negatief geassocieerd aan mosselriffen waardoor naderhand voor Atlantische kabeljauw is gekozen (A. Smaal et al., 2013). Promotor Van der Biest gaf mij een eerste constructieve aanzet met een Excel-bestand met de benodigde inputparameters voor de InVest visserijmodellen. Het vinden van Atlantische kabeljauwdata en vervolgens het toepassen van de InVest visserijmodellen ging niet altijd even vlot, waarbij promotor Van der Biest mij prompt bijstond.

Ook vond een inhoudelijk overleg plaats met de projectpartner Deme en promotor Katrien Van der Biest. Waar ook de andere thesisonderwerpen zijn aangehaald over het befaamde mosselrif, wat - in weerwil van de groeiende kennisbasis en onderzoek- de vele kennislacunes en onderzoeksopportunities van biogene riffen aantoont. Een ervan is waterkwaliteitsregulatie, het onderwerp van Gerben Meutermans. Tevens mijn 'critical friend' die mij gerichte en relevante tussentijdse feedback gaf.

In het tweede semester vond een overlegmoment plaats met beide promotoren Katrien Van der Biest en Jan Staes met een voorstel voor de thesisstructuur van de literatuurstudie. De InVest modellering vond plaats voor de literatuurstudie omwille van organisatorische redenen. De feedback in het tweede semester van promotor Staes verliep via mail. Hij droeg interessante inzichten aan. Afgezien van de eenzame coronatijd, was het onderwerp uitdagend en bovendien zeer leerzaam met veel ruimte voor verder onderzoek. Ik wil beide promotoren dan ook bedanken voor de constructieve terugkoppelingen.

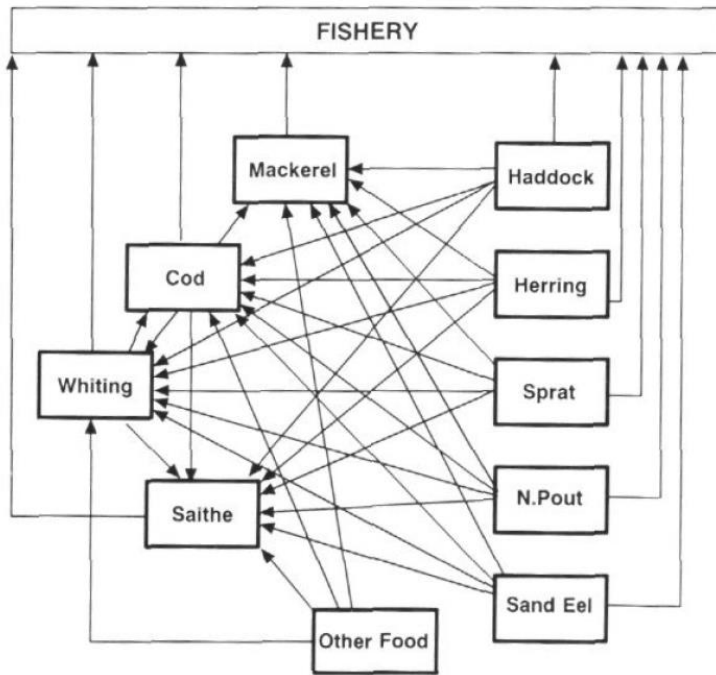
6 Aanbevelingen



Figuur 10 Voedselweb Atlantische kabeljauw in de Zuidelijke Noordzee rond mosselriffen en windmolenfunderingen (drie tot vijf jaar na inplanting)

Een voedselwebmodel benadering waarbij alle InVest parameter(bestanden) voor alle schakels uit de samenhangende voedselketens worden opgesteld, is toegewijd om het complex marien model te omvatten maar tevens zeer omvangrijk. Bv. voor de ecologische voorspelling van de Baltische kabeljauw in Noordelijkere wateren is een eerder beknopt en beheersbaar voedselweb gebruikt o.b.v. de belangrijkste prooisoorten haring en sprot (Lindegren et al., 2010).

Op Figuur 10 is een globale, weliswaar onvolledige schets afgebeeld van het voedselweb van de opportunistische Atlantische kabeljauw, waargenomen rond de mosselbedden in Nederland en op de C-power windmolenfunderingen tussen drie en vijf jaar na inplanting in het BNZ (het intermediair soortenrijk stadium (Francis KERCKHOF et al., 2019)). Wat de toegevoegde waarde van rifhabitat aanduidt in het Noordzee ecosysteem. Uit dit voedselweb zouden bijvoorbeeld de zandspiering, grondel en haring als belangrijke prooisoorten in een InVest gekoppeld voedselwebmodel kunnen worden toegevoegd.



Figuur 11 Prooi-predator model Noordzee (Sparre, 1991)

De ICES multi-soorten werkgroep bepaalde al in 1991 een prooi-predatormodel voor de Noordzee, Figuur 11. De belangrijkste prooisorten van de kabeljauw zoals de haring, sprat, zandspiering, kever en demersale schelvis, blijken hetzelfde voor de demersale wijting en de pelagische vissoorten koolvis en makreel (Sparre, 1991). Dit toont het belang aan van een multi-soortenbenadering en - monitoring op en rond het mosselrif.

I.h.k.v. toenemende activiteit in het BNZ zijn inschattingen over de effecten van habitatverandering op de reproductie van aquatische soorten zeer waardevol. De InVest visserijmodellen, gebruikt voor de werving van de Atlantische kabeljauw t.o.v. mosselriffen lijken naast een voedselweb koppeling ook lokale ecosysteemp parameters en klimaat- en oceanografische variabelen te ontbreken. In Tabel 1 zijn mogelijke aanvullingen voor het InVest visserijmodel voorgesteld.

Tabel 1 Suggestie Invest Fisheries tools

InVest Voedselwebmodel: geheel per schakel			
Fisheries tool	Fisheries habitat scenario tool		Klimaatmodel
Populatieparameterbestand per leeftijd/stadium en per subregio	Habitatafhankelijkheid bestand	Habitatverandering bestand	Soortenverspreidingskaarten Fishbase (soortenverspreiding voorkeurbereik en projectie in 2050 o.i.v. RCP 8.5)
Leeftijd	Habitatafhankelijkheid algemeen	Procentuele habitatverandering	Zeeoppervlak temperatuur (°C)
Natuurlijke mortaliteit	+Overlevingspotentieel		Zoutgehalte van het oppervlak (praktisch zoutgehalte eenheid, psu)
Maturiteit	+Paaigeschiktheid		Diepte (m)
Gewicht	+Foerageerpotentieel		Primaire productie (mg C/(m ³ .dag))
Larvale verspreiding			Zee-ijs bedekking (0-1)
Vismortaliteit			Opgeloste bodemzuurstof (millimol/m ³)
Vruchtbaarheid			+Habitatstructuren
+Klimaatcorrectie vruchtbaarheid			
Wervingsparameters		Gamma waarde	
Initiële rekruten			
Wervingsmodel			
Alfa			
Bèta			
Waarderingsparameters			
Prijs/kg			
% oogst na verwerking			

Er is onzekerheid over welk IPCC klimaatscenario en bovenal welke onvoorspelbare synergetische interacties zich zullen voltrekken. Een ambigu vraagstuk dat zal moeten blijken in de toekomst. Niettemin is er een worstcase IPCC scenario, RCP 8.5 bepaalt dat belangrijke klimaatvariabelen aanreikt. Om de dynamiek van klimaatverandering op soorten te bevatten zou een koppeling met een klimaatmodel een waardevolle toevoeging zijn in de visserijmodellen van InVest. De verspreidingskaarten, opgesteld door Fishbase vormen hiervoor een mogelijkheid (Froese, 2019). De verspreidingskaarten geven de natuurlijke verspreiding per soort aan o.b.v. hun voorkeursbereik alsook een projectie van de soortenverspreiding in 2050 onder invloed van het meest extreme IPCC klimaatscenario, RCP 8.5. Wat aangeeft welke gebieden minder of meer geschikt worden voor een soort (Froese, 2019). De parameters bestaan uit zeeoppervlak temperatuur ($^{\circ}\text{C}$), zoutgehalte van het oppervlak (praktisch zoutgehalte eenheid), diepte (m), primaire productie ($\text{mg C/m}^3\cdot\text{dag}$), zee-ijs bedekking (0-1), opgeloste bodemzurstof (mmol/m^3) en afstand tot land (km). Het klimaatmodel betrokken in de ecologische Baltische kabeljauwvoorspellingen van Lindegren beperkte zich tot de parameters temperatuur en zoutgehalte (Lindegren et al., 2010).

De bestaande Fishbase verspreidingskaarten aanvullen met de aanwezige habitatstructuren (artificiële en natuurlijke riffen, zandbodems, mangroves, kelphabitats) zou kunnen dienen als inputwaarde voor het habitatverandering bestand.

Daarnaast kan het populatieparameterbestand eventueel aangevuld worden met een procentuele klimaatcorrectie op de vruchtbaarheid van immobiele soorten die zich niet kunnen verplaatsen naargelang voorkeursomgevingsomstandigheden zoals fytoplankton, mosselen,...

Evenzeer ontbreken in InVest gespecificeerde relatieve ecosysteemparameters per habitattypen als overleving, paaigeschiktheid, foerageerpotentieel per vissoort en per levensjaar of -stadium.

Het definiëren van dergelijke parameters per habitattypen en per levensjaar- of stadium teneinde een inschatting te kunnen maken over de overleving en vruchtbaarheid van verschillende vissoorten bij habitatverandering. En bijgevolg een gamma waarde -de overlevingskans t.a.v. riftoename - te kunnen bepalen.

Beleidsmakers hebben geen universele richtlijnen of maatstaven over welk locatiespecifiek habitat herstel of -behoud de voorkeur geniet. Het moneteriseren van ecosystemendiensten maakt hun waarde tastbaarder en afwegingen over habitatbehoud en -herstel werkbaarder. De verschillende ecosystemendiensten, golfdemping, waterkwaliteitsregulatie, visserij gegenereerd door de aanleg of het behoud van een biogeen rif zijn daarbij bruikbare maatstaven. Echter blijkt moneteriseren geen evidente opgave. Voor visserij blijken klimaat- en oceanografische factoren, variërend per kustgebied en lokale habitatkenmerken, variërend per habitat, kritieke factoren om

soortabundantie t.o.v. rifoppervlakte te generaliseren. Een accurate kwantificering van de ecosysteemdiensten in een gegeven kustgebied en habitat vereisen lokale monitoring.

Regionale ICES vismonitoring bij het toenemend aantal windparken in de Noordzee zal slechts beperkt een indicatie kunnen geven of kabeljauwachtigen effectief toenemen door de aanleg van artificiële riffen in het BNZ. Het lokale COASTBUSTERS project is stap in de goede richting om de ecosysteemdiensten van een mosselrif in een gegeven context te bestuderen. Monitoring van verschillende vissoorten en schaaldieren bij verschillende rifgroottes draagt belangrijke lokale informatie aan over soortabundantie t.a.v. mosselrifoppervlakte. Deze informatie kan bovendien informatie aandragen over ideale schaalgroottes t.a.v. soortendiversiteit. Daarnaast is een al dan niet permanent verblijf in de riffen zeer waardevolle informatie om de soortspecifieke diensten van mosselriffen in kustecosystemen (foerageer-, schuil-, paaiplaats) beter te begrijpen.

Akoestische monitoring van vissoorten zoals uitgevoerd op en rond windmolenfunderingen lijken hierbij gunstig. Hiervoor kunnen vissoorten uit het ICES prooi-predatormodel dienen, te zien op Figuur 11 die reeds aangetroffen zijn rond mosselbedden; bv. de Atlantische kabeljauw en de prooi-soorten haring, zandspiering en grondel. Alsook monitoring van andere kabeljauwachtigen bv. wijting, goed voor 21.6% van de totale biomassa in de Zuidelijke Noordzee, vermeldt in 1.3. Ook is het interessant om de soorten in de zandhabitat rondom de riffen op te volgen. Of zij eventueel een weerslag ondervinden, bv. op vlak van foerageerpotentieel door een verplaatsing van prooi-soorten naar de nutriëntenrijke riffen.

Dergelijke lokale habitatparameters van het mosselrif in het BNZ, onder invloed van specifieke klimaat- en oceanografische factoren, toegepast in visserijmodellen als InVest kunnen gelden als voorbeeldcase en andere kustregio's inspireren richting locatiespecifiek robuust kustbeheer. Het moneteriseren van de ecosysteemdiensten is naast een leidraad voor beleidsbeslissingen, eveneens een beweegreden voor draagvlakvorming tegenover een aangepaste ruimtelijke invulling van het BNZ in de transitie naar duurzame visserij.

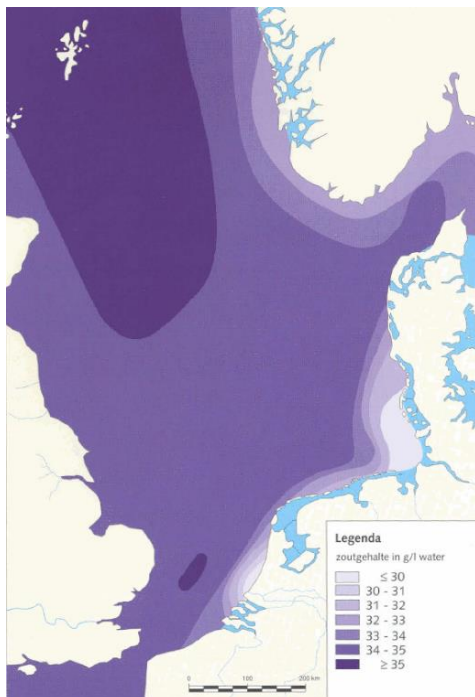
7 Bijlagen

Tabel 2 Populatie- en habitat parameterinput InVest Fisheries tools

POPULATIEPARAMETERS									HABITATAFHANKELIJKHEID PARAMETERS		HABITATVERANDERING PARAMETERS	
Leeftijd	Noordzee Skagerrak	Vismortaliteit / Selectiviteit	Maturiteit	Gewicht	Vruchtbaarheid	Exploitatie fractie	Larvale Verspreiding		Biogeen rif	Zandhabitat	Biogeen rif	Zandhabitat
1	1	0.048484848	0.023	0.513	230952.1912	0.54	1		1	1	1	-0.25 of -0.50
2	0.897	0.23030303	0.333	1.255	566240	0.54	1		1	1	1	-0.25 of -0.50
3	0.32	0.448484848	0.578	2.293	821385	0.54	1		1	1	1	-0.25 of -0.50
4	0.2	0.648484848	0.826	3.726	1291696	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
5	0.2	0.836363636	0.947	5.062	2287704	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
6	0.2	1	1	6.489	2691322	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
7	0.2	1	1	8.214	3675032	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
8	0.2	1	1	10.18	4531840	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
9	0.2	1	1	10.768	4802166	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
10	0.2	1	1	13.325	7134553.846	0.54	1		0.5	0.5	1	-0.25 of -0.50
(WGNSSK, 2020)	Tabel 4.5b (WGNSSK, 2020)	Figuur 3, model A (Nielsen & Berg, 2014)	Tabel 4.5a (WGNSSK, 2020)	Tabel 4.3d (WGNSSK, 2020) en tabel 6 (Oosthuizen & Daan, 1974)	Tabel 4.3d (WGNSSK, 2020)	Tabel 3 (WGNSSK, 2020)	Aanname (InVEST, 2020)		(Carbines, Jiang, & Beentjes, 2004)		Aanname (Van der Biest, 2020)	



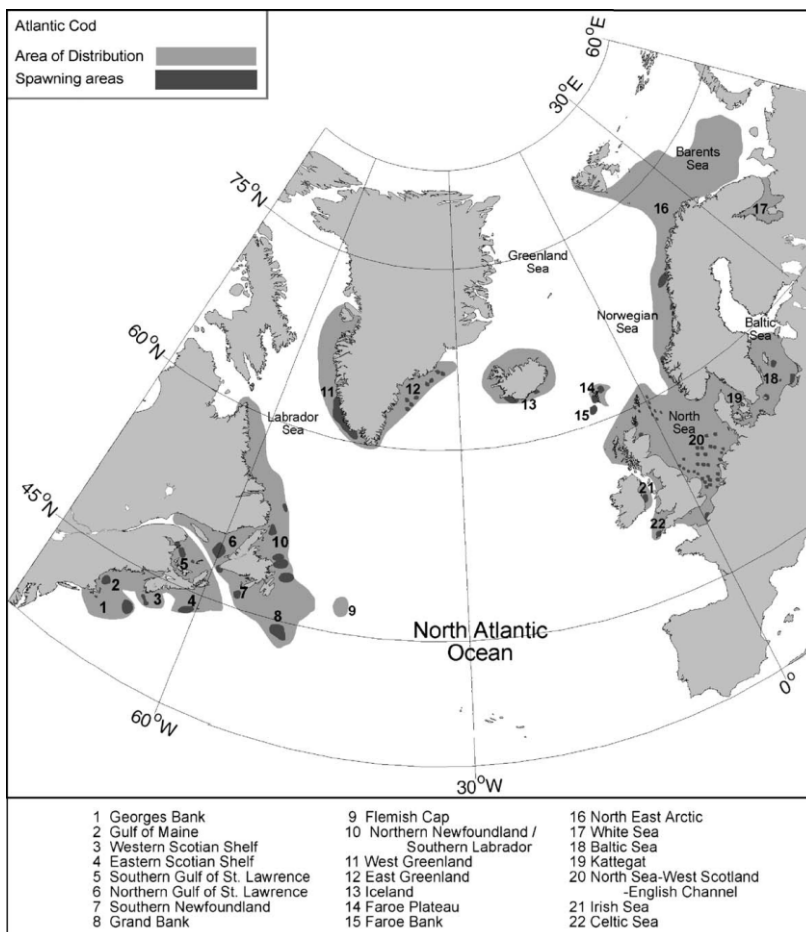
Figuur 12 Dieptekaart Noordzee, de Doggersbank in de centrale Noordzee scheidt de diepe Noordelijke en ondiepe Zuidelijke Noordzee (Peeters et al., 1999)



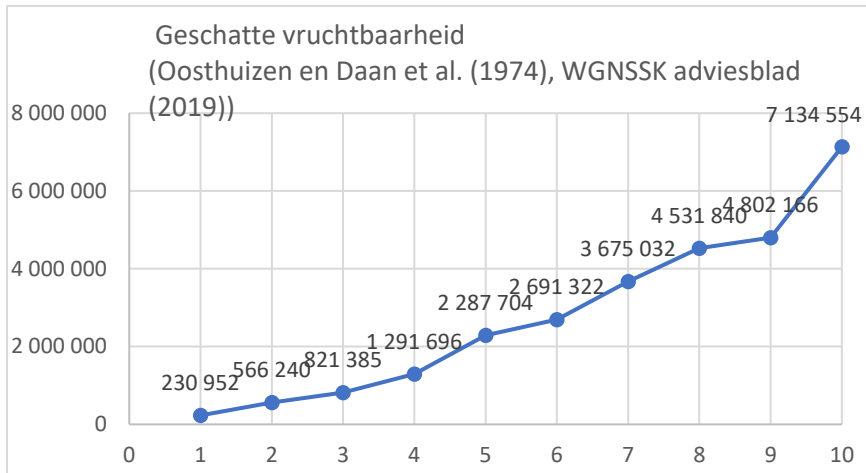
Figuur 13 Zoutgehalteverdeling Noordzee, continentale rivieren en het Oostzeewater verlagen lokaal het zoutgehalte (Peeters et al., 1999)



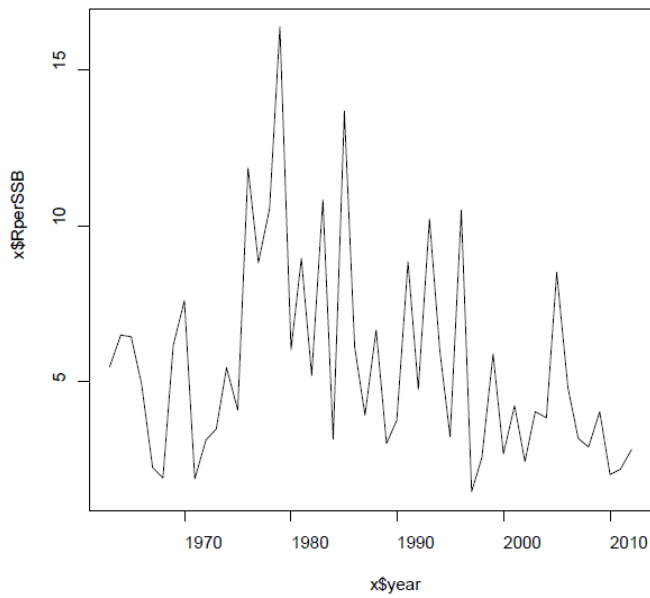
Figuur 14 Soortenverdeling zuidoostelijke Noordzeebestanden (Teal, 2011)



Figuur 15 Verspreiding van de Atlantische kabeljauw



Figuur 16 Geschatte vruchtbaarheid (eitjes) Atlantische kabeljauw per leeftijd (jaar)



Figuur 17 Aantal eieren per paarijpe Atlantische kabeljauw doorheen de tijd

8 Bibliografie

- Agentschap innoveren en ondernemen. (2016). *Coastbusters version september 2016*. Retrieved from Agentschap Maritieme Dienstverlening en Kust. (2015). *Masterplan kustveiligheid*. Retrieved from <https://afdelingkust.be/sites/default/files/atoms/files/Masterplan%20Kustveiligheid.pdf>
- André, C., Svedäng, H., Knutsen, H., Dahle, G., Jonsson, P., Ring, A.-K., . . . Jorde, P. E. (2016). Population structure in Atlantic cod in the eastern North Sea-Skagerrak-Kattegat: early life stage dispersal and adult migration. *BMC research notes*, 9(1), 63.
- Arkema, K. K., Rogers, L. A., Toft, J., Mesher, A., Wyatt, K. H., Albury-Smith, S., . . . Samhuri, J. (2019). Integrating fisheries management into sustainable development planning. *Ecology and Society*, 24(2).
- Arkema, K. K., Verutes, G., Bernhardt, J. R., Clarke, C., Rosado, S., Canto, M., . . . McField, M. (2014). Assessing habitat risk from human activities to inform coastal and marine spatial planning: a demonstration in Belize. *Environmental Research Letters*, 9(11), 114016.
- Arkema, K. K., Verutes, G. M., Wood, S. A., Clarke-Samuels, C., Rosado, S., Canto, M., . . . Toft, J. (2015). Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(24), 7390-7395.
- Belgium offshore platform. (2019). 2019 wordt recordjaar voor windenergie in de Belgische Noordzee. 'Retrieved '11/05/2020, 'from' <https://www.belgianoffshoreplatform.be/nl/news/2019-wordt-recordjaar-voor-windenergie-in-de-belgische-noordzee/>
- Biodiversity Information System for Europe. (2020). Ecosystem services. Retrieved from <https://biodiversity.europa.eu/topics/ecosystem-services>
- Björnsson, B., Steinarsson, A., & Oddgeirsson, M. (2001). Optimal temperature for growth and feed conversion of immature cod (*Gadus morhua* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 58(1), 29-38.
- Bollmann, M. (2010). World ocean review: living with the oceans.
- Bos, O. G., Leopold, M. F., & Bolle, L. (2009). *Passende Beoordeling windparken: Effecten van heien op vislarven, vogels en zeezoogdieren*. Retrieved from
- Boström, C., Baden, S., Bockelmann, A. C., Dromph, K., Fredriksen, S., Gustafsson, C., . . . Olesen, B. (2014). Distribution, structure and function of Nordic eelgrass (*Zostera marina*) ecosystems: implications for coastal management and conservation. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 24(3), 410-434.
- Brabant, S. D. R. (2009). *Offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: State of the art after two years of environmental monitoring*. Retrieved from
- Cabral, P., Levrel, H., Schoenn, J., Thiebaut, E., Le Mao, P., Mongruel, R., . . . Morisseau, F. (2015). Marine habitats ecosystem service potential: A vulnerability approach in the Normand-Breton (Saint Malo) Gulf, France. *Ecosystem services*, 16, 306-318.
- Carbines, G., Jiang, W., & Beentjes, M. P. (2004). The impact of oyster dredging on the growth of blue cod, *Paraperis colias*, in Foveaux Strait, New Zealand. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 14(5), 491-504.
- Chowdhury, M. S. N., Hossain, M. S., Ysebaert, T., & Smaal, A. C. (2020). Do oyster breakwater reefs facilitate benthic and fish fauna in a dynamic subtropical environment? *Ecological Engineering*, 142, 105635.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., . . . Krinner, G. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029-1136): Cambridge University Press.
- Cushing, D. (1980). The decline of the herring stocks and the gadoid outburst. *ICES Journal of Marine Science*, 39(1), 70-81.

- Daan, N. (1973). A quantitative analysis of the food intake of North Sea cod, *Gadus morhua*. *Netherlands Journal of Sea Research*, 6(4), 479-517.
- Daan, N., Rijnsdorp, A., & Van Overbeeke, G. (1985). Predation by North Sea herring *Clupea harengus* on eggs of plaice *Pleuronectes platessa* and cod *Gadus morhua*. *Transactions of the American Fisheries Society*, 114(4), 499-506.
- De Backer, A., Van Hoey, G., Coates, D., Vanaverbeke, J., & Hostens, K. (2014). Similar diversity-disturbance responses to different physical impacts: three cases of small-scale biodiversity increase in the Belgian part of the North Sea. *Marine pollution bulletin*, 84(1-2), 251-262.
- de Boer, W., Welleman, H., & Dekker, W. (2001). *De relatie tussen het voorkomen van vissoorten en garnaal in de Demersal Fish Survey in relatie tot het zoutgehalte en andere habitatvariabelen in de Waddenzee, Oosterschelde en Westerschelde*. Retrieved from
- De Clerck, R., & Maertens, B. (2002). VAN VISBESTANDEN.
- De Vlaamse ondernemer. (2019). Eerste call Blauwe Cluster overtreft verwachtingen - Speerpunt-cluster wil blauwe economie vertegenwoordigen. 'Retrieved '13/05/2020, 'from' <https://www.dvo.be/artikel/65015-eerste-call-blauwe-cluster-overtreft-verwachtingen/>
- DEGRAER, S., VAN LANCKER, V., MOERKERKE, G., VAN HOEY, G., VINCX, M., JACOBS, P., & HENRIET, J.-P. Eerste plan voor wetenschappelijke ondersteuning van een beleid gericht op duurzame ontwikkeling (PODO I).
- Deleu, S., Van Lancker, V., Van den Eynde, D., & Moerkerke, G. (2004). Morphodynamic evolution of the kink of an offshore tidal sandbank: the Westhinder Bank (Southern North Sea). *Continental Shelf Research*, 24(15), 1587-1610.
- Desnijder N.; Brouckaert E.; Hansen K.; Heyman J., P. H. W. M. (2014). *Vistraject. Duurzaamheidstraject voor de Belgische visserijsector*. Retrieved from <https://lv.vlaanderen.be/sites/default/files/attachments/vistraject.pdf>
- Erfteemeijer, P. L., van Beek, J. K., Bolle, L. J., Dickey-Collas, M., & Los, H. F. (2009). Variability in transport of fish eggs and larvae. I. Modelling the effects of coastal reclamation. *Marine Ecology Progress Series*, 390, 167-181.
- Federale overheidsvolksgezondheid, v. v. d. v. e. l. (2020). Marien ruimtelijk plan 2020-2026. 'Retrieved '17-04, 'from' https://www.health.belgium.be/sites/default/files/uploads/fields/fpshealth_theme_file/bijlage_1_ruimtelijke_analyse_van_de_zeegebieden_mrp_2020.pdf
- Fox, C. J., Taylor, M., Dickey-Collas, M., Fossum, P., Kraus, G., Rohlf, N., . . . Maxwell, D. L. (2008). Mapping the spawning grounds of North Sea cod (*Gadus morhua*) by direct and indirect means. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1642), 1543-1548.
- Frank, K. T., Petrie, B., Choi, J. S., & Leggett, W. C. (2005). Trophic cascades in a formerly cod-dominated ecosystem. *Science*, 308(5728), 1621-1623.
- Froese, R. a. D. P. (2019). Fishbase. 'Retrieved 'from' www.fishbase.org
- Guerry, A. D., Ruckelshaus, M. H., Arkema, K. K., Bernhardt, J. R., Guannel, G., Kim, C.-K., . . . Verutes, G. (2012). Modeling benefits from nature: using ecosystem services to inform coastal and marine spatial planning. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8(1-2), 107-121.
- Heath, M., & Lough, R. (2007). A synthesis of large-scale patterns in the planktonic prey of larval and juvenile cod (*Gadus morhua*). *Fisheries Oceanography*, 16(2), 169-185.
- Hedger, R., McKenzie, E., Heath, M., Wright, P., Scott, B., Gallego, A., & Andrews, J. (2004). Analysis of the spatial distributions of mature cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) abundance in the North Sea (1980–1999) using generalised additive models. *Fisheries Research*, 70(1), 17-25.
- Heip, C., Herman, R., & Vincx, M. (1984). Variability and productivity of meiobenthos in the Southern Bight of the North Sea. *Rapport et process-verbaux des reunions. Conseil international pour l'Exploration de la Mer*, 183, 507-521.
- Heirman, E. (2011). Importance of windmill artificial reefs as feeding grounds for demersal fishes in the Belgian part of the North Sea.

- Héquette, A., Anthony, E. J., Ruz, M.-H., Maspataud, A., Aernouts, D., & Hemdane, Y. (2013). *The influence of nearshore sand banks on coastal hydrodynamics and sediment transport, northern coast of France*. Paper presented at the Proceedings Coastal Dynamics.
- ICES. (2013). Multispecies Considerations for the North Sea. In *ICES Advice Book 6*.
- ICES. (2019). Visbestanden in de Noordzee, kabeljauw 1947-2019. 'Retrieved '17-04, 'from' <https://www.clo.nl/indicatoren/nl0073-visbestanden-in-de-noordzee>
- ICES advisory committee. (2015). *Report of the Benchmark Workshop on North Sea Stocks (WKNSEA)*. Retrieved from Copenhagen, Denmark: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00586/69828/67724.pdf>
- ICES, C. (2005). Report of the Working Group on Fish Ecology (WGFE).
- ILVO, V., EC,. (2020). Geofish. 'Retrieved 'from' <https://geofish.be/>
- InVEST. (2020). Online Manual Fisheries. In.
- Karlsen, Ø., van der Meeren, T., Rønnestad, I., Mangor-Jensen, A., Galloway, T. F., Kjørsvik, E., & Hamre, K. (2015). Copepods enhance nutritional status, growth and development in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) larvae—can we identify the underlying factors? *PeerJ*, 3, e902.
- Ken Drinkwater. (2005). The response of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to future climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 62, 1327-1337. doi:0.1016/j.icesjms.2005.05.015
- KERCKHOF, F., RUMES, B., & DEGRAER, S. (2019). ABOUT “MYTILISATION” AND “SLIMEIFICATION”: A DECADE OF SUCCESSION OF THE FOULING ASSEMBLAGES ON WIND TURBINES OFF THE BELGIAN COAST. *MEMOIRS*, 73.
- Kerckhof, F., Rumes, B., Norro, A., Jacques, T., & Degraer, S. (2010). Seasonal variation and vertical zonation of the marine biofouling on a concrete offshore windmill foundation on the Thornton Bank (southern North Sea). *Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Early Environmental Impact Assessment and Spatio-Temporal Variability*. (Eds S. Degraer, R. Brabant and B. Rumes.) pp, 53-68.
- Kinds, A., Sys, K., Schotte, L., Mondelaers, K., & Polet, H. (2016). VALDUVIS: An innovative approach to assess the sustainability of fishing activities. *Fisheries Research*, 182, 158-171.
- Kirsch, P. E., Iverson, S. J., Bowen, W. D., Kerr, S. R., & Ackman, R. G. (1998). Dietary effects on the fatty acid signature of whole Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(6), 1378-1386.
- Kristensen, L. D., Stenberg, C., Støttrup, J., Poulsen, L. K., Christensen, H. T., Dolmer, P., . . . Holmer, M. (2015). Establishment of blue mussel beds to enhance fish habitats. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(3), 783-796.
- Lindegren, M., Möllmann, C., Nielsen, A., Brander, K., MacKenzie, B. R., & Stenseth, N. C. (2010). Ecological forecasting under climate change: the case of Baltic cod. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1691), 2121-2130.
- Link, J. S., & Garrison, L. P. (2002). Trophic ecology of Atlantic cod *Gadus morhua* on the northeast US continental shelf. *Marine Ecology Progress Series*, 227, 109-123.
- Manis, J. E., Garvis, S. K., Jachec, S. M., & Walters, L. J. (2015). Wave attenuation experiments over living shorelines over time: a wave tank study to assess recreational boating pressures. *Journal of coastal conservation*, 19(1), 1-11.
- Marlien, S. (2012). Seizoenale dynamieken in de contributie van artificiële harde substraten aan het dieet van steenbolke (*Trisopterus luscus*) en Atlantische kabeljauw (*Gadus morhua*) in het Belgisch deel van de Noordzee. *Book of*.
- Marshall, C. T., Yaragina, N. A., Ådlandsvik, B., & Dolgov, A. V. (2000). Reconstructing the stock-recruit relationship for Northeast Arctic cod using a bioenergetic index of reproductive potential. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(12), 2433-2442.
- Mertens Tina, M. J. (2020). CREST – Research highlights with applications at the Belgian coast. *hydrolink*, 1/2020, 3.
- Meryeme Khoukh, F. M. (2018). *Spatial management of the European hake *Merluccius merluccius* fishery in the Catalan Mediterranean: Simulation of management alternatives with the InVEST model*. Retrieved from Spatial management of the European hake *Merluccius*

- merluccius fishery in the Catalan Mediterranean: Simulation of management alternatives with the InVEST model
- Nielsen, A., & Berg, C. W. (2014). Estimation of time-varying selectivity in stock assessments using state-space models. *Fisheries Research*, *158*, 96-101.
- NV, C.-p. (2006). *Thorntonbank farshore windturbinepark*. Retrieved from
- Olsen, E. M., Ottersen, G., Llope, M., Chan, K.-S., Beaugrand, G., & Stenseth, N. C. (2011). Spawning stock and recruitment in North Sea cod shaped by food and climate. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *278*(1705), 504-510.
- Oosthuizen, E., & Daan, N. (1974). Egg fecundity and maturity of North Sea cod, *Gadus morhua*. *Netherlands Journal of Sea Research*, *8*(4), 378-397.
- Palet, H. Zeevisserij en bodemberoering.
- Payne, M. R., Hatfield, E. M. C., Dickey-Collas, M., Falkenhaus, T., Gallego, A., Groger, J., Licandro, P., Llope, M., Munk, P., Röckmann, C., Schmidt, J. O., and Nash, R. D. M. (2009). Recruitment in a changing environment: the 2000s North Sea herring recruitment failure. *Journal of Marine Science*, *272*-277. doi:10.1093/icesjms/fsn211
- Pedro, S., Fisk, A. T., Ferguson, S. H., Hussey, N. E., Kessel, S. T., & McKinney, M. A. (2019). Limited effects of changing prey fish communities on food quality for aquatic predators in the eastern Canadian Arctic in terms of essential fatty acids, methylmercury and selenium. *Chemosphere*, *214*, 855-865.
- Peeters, J., Vries, I., & Haas, H. (1999). *Eutrofiering en productiviteit in de Noordzee*: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
- Peterson, C. H., Grabowski, J. H., & Powers, S. P. (2003). Estimated enhancement of fish production resulting from restoring oyster reef habitat: quantitative valuation. *Marine Ecology Progress Series*, *264*, 249-264.
- Philippe DE BACKER. (2017). *Langetermijnvisie Noordzee 2050*. Retrieved from
- Pihl, L., Baden, S., Kautsky, N., Rönnbäck, P., Söderqvist, T., Troell, M., & Wennhage, H. (2006). Shift in fish assemblage structure due to loss of seagrass *Zostera marina* habitats in Sweden. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *67*(1-2), 123-132.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., . . . Okem, A. (2019). IPCC, 2019: Technical Summary. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Rabaut, M., Kerckhof, F., Vincx, M., & Degraer, S. (2010). Wat betekent de zandbank voor het benthos?
- Rabotyagov, S. S., Campbell, T. D., White, M., Arnold, J. G., Atwood, J., Norfleet, M. L., . . . Richardson, J. (2014). Cost-effective targeting of conservation investments to reduce the northern Gulf of Mexico hypoxic zone. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(52), 18530-18535.
- Reubens, J., Degraer, S., & Vincx, M. (2014). The ecology of benthopelagic fishes at offshore wind farms: a synthesis of 4 years of research. *Hydrobiologia*, *727*(1), 121-136.
- Reubens, J. T., Braeckman, U., Vanaverbeke, J., Van Colen, C., Degraer, S., & Vincx, M. (2013). Aggregation at windmill artificial reefs: CPUE of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and pouting (*Trisopterus luscus*) at different habitats in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, *139*, 28-34. doi:10.1016/j.fishres.2012.10.011
- Reubens, J. T., De Rijcke, M., Degraer, S., & Vincx, M. (2014). Diel variation in feeding and movement patterns of juvenile Atlantic cod at offshore wind farms. *Journal of Sea Research*, *85*, 214-221.
- Reubens, J. T., Degraer, S., & Vincx, M. (2011). Aggregation and feeding behaviour of pouting (*Trisopterus luscus*) at wind turbines in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, *108*(1), 223-227. doi:10.1016/j.fishres.2010.11.025
- Reubens, J. T., Vandendriessche, S., Zenner, A. N., Degraer, S., & Vincx, M. (2013). Offshore wind farms as productive sites or ecological traps for gadoid fishes?—Impact on growth, condition index and diet composition. *Marine environmental research*, *90*, 66-74.

- Røjbek, M. C., Jacobsen, C., Tomkiewicz, J., & Støttrup, J. G. (2012). Linking lipid dynamics with the reproductive cycle in Baltic cod *Gadus morhua*. *Marine Ecology Progress Series*, 471, 215-234.
- Rose, G., & O'driscoll, R. (2002). Capelin are good for cod: can the northern stock rebuild without them? *ICES Journal of Marine Science*, 59(5), 1018-1026.
- Rosenthal, A., Verutes, G., McKenzie, E., Arkema, K. K., Bhagabati, N., Bremer, L. L., . . . Vogl, A. L. (2015). Process matters: a framework for conducting decision-relevant assessments of ecosystem services. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11(3), 190-204.
- Rothschild, B. J. (2007). Coherence of Atlantic cod stock dynamics in the northwest Atlantic Ocean. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(3), 858-874.
- Saier, B. (2001). Direct and indirect effects of seastars *Asterias rubens* on mussel beds (*Mytilus edulis*) in the Wadden Sea. *Journal of Sea Research*, 46(1), 29-42.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., W., S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., A., K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M. Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., & Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., and Douglass, J. (2018). *InVEST 3.7.0 User's Guide*: Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Smaal, A., Craeymeersch, J., Drent, J., Jansen, J., Glorius, S., & Van Stralen, M. (2013). *Effecten van mosselzaadvisserij op sublitorale natuurwaarden in de westelijke Waddenzee: samenvattend eindrapport*. Retrieved from
- Smaal, A. C., Ferreira, J. G., Grant, J., Petersen, J. K., & Strand, Ø. (2018). *Goods and services of marine bivalves*: Springer.
- Smith, P., Birley, A., Jamieson, A., & Bishop, C. (1989). Mitochondrial DNA in the Atlantic cod, *Gadus morhua*: lack of genetic divergence between eastern and western populations. *Journal of Fish Biology*, 34(3), 369-373.
- Sobel, J. (1996). *Gadus morhua*. *The IUCN Red List of Threatened Species: e*. T8784A12931575.[Online]. Available online at: <https://www.iucnredlist.org/species/8784/12931575> (Accessed October, 2018).
- Somero, G. N. (2012). The physiology of global change: linking patterns to mechanisms. *Annual Review of Marine Science*, 4, 39-61.
- Sparre, P. (1991). *Introduction to multispecies virtual population analysis*. Paper presented at the ICES Mar. Sci. Symp.
- Speirs, D., Guirey, E., Gurney, W., & Heath, M. (2010). A length-structured partial ecosystem model for cod in the North Sea. *Fisheries Research*, 106(3), 474-494.
- Speybroeck, J., Bonte, D., Courtens, W., Gheschiere, T., Grootaert, P., Maelfait, J.-P., . . . Degraer, S. (2006). Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 16(4), 419-435. doi:10.1002/aqc.733
- Statbel. (2019). *Sea fishing - Monthly results 2019 : (January-December)*. Retrieved from <https://statbel.fgov.be/nl/themas/landbouw-visserij/zeeverij#figures>
- Støttrup, J. G., Kokkalis, A., Brown, E. J., Vastenhoud, B., Ferreira, S., Olsen, J., & Dinesen, G. E. (2019). Essential Fish Habitats for commercially important marine species in the inner Danish waters. Retrieved from https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/196861601/338_2019_Essential_Fish_Habitats.pdf
- Teal, L. (2011). *The North Sea fish community: past, present and future: background document for the 2011 National Nature Outlook*. Retrieved from
- Ter Hofstede, R., Heessen, H. J. L., & Daan, N. (2005). *Systeembeschrijving Noordzee: natuurwaardenkaarten vis*. Retrieved from

- Terrado, M., Sabater, S., Chaplin-Kramer, B., Mandle, L., Ziv, G., & Acuña, V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of The Total Environment*, 540, 63-70.
- Thrush, S. F., Gray, J. S., Hewitt, J. E., & Ugland, K. I. (2006). Predicting the effects of habitat homogenization on marine biodiversity. *Ecological Applications*, 16(5), 1636-1642.
- Thyrring, J., Rysgaard, S., Blicher, M. E., & Sejr, M. K. (2015). Metabolic cold adaptation and aerobic performance of blue mussels (*Mytilus edulis*) along a temperature gradient into the High Arctic region. *Marine Biology*, 162(1), 235-243.
- Trakhtenbrot, A., Nathan, R., Perry, G., & Richardson, D. M. (2005). The importance of long-distance dispersal in biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 11(2), 173-181.
- Troost, K., Paijmans, A., van Kooten, T., van Hal, R., Goudswaard, P. C., & van Asch, M. (2014). *Typische soorten van habitattypen in zoute wateren. Voorstellen voor herziening van de bestaande lijsten op basis van data analyse en expert inschattingen*. Retrieved from
- Tulp, I., van Hal, R., ter Hofstede, R., & Rijnsdorp, A. (2009). Klimaatverandering in de Noordzee: gevolgen voor vis. *De Levende Natuur*, 110(6), 273-276.
- United nations. (2015). Sustainable development goals. 'Retrieved '17-04, 'from' <https://www.un.org/sustainabledevelopment/oceans/>
- Välimaa, A.-L., Mäkinen, S., Mattila, P., Marnila, P., Pihlanto, A., Mäki, M., & Hiidenhovi, J. (2019). Fish and fish side streams are valuable sources of high-value components. *Food Quality and Safety*.
- Van der Biest Katrien. (2020). *Rapport COASTBUSTERS 1.0_visserijproductie*. Retrieved from
- Van Ginderdeuren, K. (2013). *Zooplankton and its role in North Sea food webs : community structure and selective feeding by pelagic fish in Belgian marine waters*. Ugent, Retrieved from <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:001995215>
- Van Hoey, G., Degraer, S., & Vincx, M. (2004). Macrobenthic community structure of soft-bottom sediments at the Belgian Continental Shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59(4), 599-613.
- Verutes, G. M., Arkema, K. K., Clarke-Samuels, C., Wood, S. A., Rosenthal, A., Rosado, S., . . . Ruckelshaus, M. (2017). Integrated planning that safeguards ecosystems and balances multiple objectives in coastal Belize. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 13(3), 1-17.
- Vincx, M., Bonne, W., Cattrijsse, A., Degraer, S., Dewicke, A., Steyaert, M., . . . VanWaeyenberghe, J. (2004). Structural and functional biodiversity of North Sea ecosystems: species and their habitats as indicators for a sustainable development of the Belgian continental shelf. *Belgian Science Policy: scientific support plan for a sustainable development policy (SPSD-I)*.
- VLIZ. (2013). VISSEN IN HET VERLEDEN - Een multidisciplinaire kijk op de geschiedenis van de Belgische zeevisserij. *Vliz special*, 68, 130.
- VLIZ. (2014). *Hoogtij(d) voor kustvisserij*. Retrieved from
- WGECO, R. (2008). Report of the Working Group on Fish Ecology (WGFE).
- WGNSSK. (2019). *Cod (Gadus morhua) in Subarea 4, Division 7.d and Subdivision 20 (North Sea, Eastern English Channel, Skagerrak)*. Retrieved from
- Ysebaert, T., Walles, B., Haner, J., & Hancock, B. (2019). Habitat modification and coastal protection by ecosystem-engineering reef-building bivalves. In *Goods and Services of Marine Bivalves* (pp. 253-273): Springer.
- Zander, C., Whitehead, P., Bauchot, M., Hureau, J., Nielsen, J., & Tortonese, E. (1986). Fishes of the North-eastern Atlantic and the Mediterranean. *Whitehead, PJP. Bauchot, ML. Hureau, JC. Nielsen, J. Tortonese, E, editor. Blenniidae*, 3, 1108.
- Zintzen, V., Norro, A., Massin, C., & Mallefet, J. (2008). Spatial variability of epifaunal communities from artificial habitat: Shipwrecks in the Southern Bight of the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2), 327-344.

- Zu Ermgassen, P., Grabowski, J., Gair, J., & Powers, S. (2018). Quantifying fish and mobile invertebrate production from a threatened nursery habitat (vol 53, 596, 2016). *JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY*, 55(6), 3005-3009.
- zu Ermgassen, P. S., Grabowski, J. H., Gair, J. R., & Powers, S. P. (2016). Quantifying fish and mobile invertebrate production from a threatened nursery habitat. *JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY*, 53(2), 596-606.