



VIDENSKATALOG

Potentielle natur og miljø virkemidler, forvaltningsprincipper
og overvågning i vindmølleparkområder

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 490

2022



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

VIDENSKATALOG

Potentielle natur og miljø virkemidler, forvaltningsprincipper
og overvågning i vindmølleparkområder

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 490

2022

Karsten Dahl
Jørgen L. S. Hansen
Ib Krag Pedersen
Christian Lønborg
Cordula Göke

Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 490
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Videnskatalog
Undertitel:	Potentielle natur og miljø virkemidler, forvaltningsprincipper og overvågning i vindmølleparkområder
Forfattere:	Karsten Dahl, Jørgen L. S. Hansen, Ib Krag Pedersen, Christian Lønborg og Cordula Göke
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Marts 2022
Redaktion afsluttet:	Marts 2022
Faglig kommentering:	Peter Anton Upadhyay Stæhr
Kvalitetssikring, DCE:	Anja Skjoldborg Hansen
Sproglig kvalitetssikring:	Charlotte Hviid
Ekstern kommentering:	Energistyrelsen. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/SR490_komm.pdf
Finansiel støtte:	Energistyrelsen
Bedes citeret:	Dahl, K., Hansen, J.L.S., Pedersen, I.K., Lønborg, C. & Göke, C. 2022. Potentielle natur og miljø virkemidler, forvaltningsprincipper og overvågning i vindmølleparkområder. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 54 s. - Videnskabelig rapport nr. 490 http://dce2.au.dk/pub/SR490.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten beskriver virkemidler der kan bringes i spil i kommende vindpark områder. Virkemidlerne omfatter både aktive initiativer til gavn for den marine biodiversitet samt overvågnings- og forvaltningsinitiativer. Forslagene er baseret på et litteratur studium af lignende initiativer i relation til vindparker i andre lande samt en faglig vurdering af forholdene i danske farvande.
Emneord:	Virkemidler, vindparker, overvågning, forvaltning
Layout:	Grafisk Værksted
Foto forside:	Karsten Dahl
ISBN:	978-87-7156-675-8
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	54
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR490.pdf

Indhold

Forord	5
Udvidet sammenfatning	6
Extended summary	8
1 Indledning og formål	10
1.1 Projektets formål	10
1.2 Afgrænsning, afklaring og anvendelse af begreber	10
1.3 Prioritering af naturværdier i havvindmølleparker	11
1.4 Opdeling i farvandsområder	12
2 Marine naturværdier, miljøtilstand og presfaktorer i de danske farvande	14
2.1 Hydrografiens indflydelse på fordelingen af havets biodiversitet	14
2.2 Betydningen af havbundens heterogenitet for biodiversiteten	16
2.3 Presfaktorer på havbundens biodiversitet	17
2.4 Havvindmøllers påvirkning af biodiversiteten	20
3 Nationale og Internationale erfaringer med natur og miljøvirkemidler i relation til havvind	23
3.1 Minimering af effekten i planlægningsfasen	23
3.2 Minimering af effekter på fugle	23
3.3 Minimering af visuelle effekter på arter	24
3.4 Etablering og retablering af habitater som virkemiddel	24
3.5 Minimering af fysiske effekter	24
3.6 Opsummering	25
4 Konkrete natur- og miljøvirkemidler	28
4.1 Udlægning af stenrev	28
4.2 Naturgenopretning af ålegræsbede	32
4.3 Udsætning af hummer	34
4.4 Etablering af europæisk østers banker	35
4.5 Faunaafvisende udformning af møllefundament og erosionsbeskyttelse	35
4.6 Fauna fremmende udformning af møllefundament og erosionsbeskyttelse	36
4.7 Møllepark design i relation til effekter på fugle	36
4.8 Belysning af den operationelle havvindmøllepark	37
4.9 Temporær nedlukning af mølleparkens drift	39
5 Forvaltningsmæssige overvågningsbehov i havvindmølleparker	40

6	Virkemidlernes omkostninger	44
6.1	Ålegræs udplantning	44
6.2	Stenrev	44
7	Afrunding og perspektivering	45
8	Referencer	48

Forord

Behovet for grøn energi vil forøges markant i den nære fremtid. Ambitionerne om udbygning af havvindmølleparker er ambitiøst, og omfatter for indeværende udbygning af yderligere 10 GW frem mod 2030. Det er forventeligt, at der vil være stadigt stigende modsætninger imellem udbygningsplanerne og beskyttelse af nogle af havområdernes naturværdier. Der er derfor behov for at sikre at udbygningen af vindkraft gennemføres med mindst mulig indvirkning på de pågældende naturværdier.

Energistyrelsen har i den sammenhæng bedt DCE om at udarbejde et virkemiddelkatalog over mulige miljøfremmende tiltag, der kan komme i spil ved fremtidige udbygninger af havvindmølleparker. Disse tiltag omfatter både natur- og miljøvirkemidler, forvaltningsprinciper og marin overvågning.

Udvidet sammenfatning

Der er ambitioner om en meget stor udbygning af vindparker, i de havområder, som Danmark deler med vores nabolande. Alene i danske farvande er planen at udvide med yderligere 10 GW frem mod 2030. For at imødegå forventede konflikter mellem udbygningsplaner og natur- og miljøhensyn har Energistyrelsen ønsket at DCE udarbejder et katalog over mulige natur- og miljøvirkemidler, forvaltningsprincipper og overvågning, som kan bringes i spil i forbindelse med fremtidig udbygning af havvind.

Rapporten består af fire faglige hovedelementer: i) En overordnet beskrivelse af biodiversiteten i de danske havområder, ii) en litteraturgennemgang af natur- og miljøvirkemidler i vindmølleparker, iii) gennemgang af konkrete virkemidler i danske vindmølleparker og iv) forslag til natur- og miljøovervågningsaktiviteter i vindmølleparker.

Danmark står, som resten af verden, midt i en biodiversitetskrise og de marine naturværdier og havmiljøet er under pres fra en lang række menneskeskabte forhold, som kan variere mellem farvandsafsnit. Etableringen af havvindmølleparker forventes, i samspil med de eksisterende presfaktorer, at påvirke havets levesteder, biodiversitet og økosystemfunktioner. Der hvor møllerne opføres, vil der ske et tab af havbundsareal. Hvor bundtypen erstattes med en ny bundtype vil finkornede sedimenter oftest erstattes med hårde substrater som erosionsbeskyttelsen udgør. Konsekvenserne er ændrede biologiske samfund fra blødbunds samfund til hårbundssamfund. På grund af reveffekter, er det dog forventningen at hele det marine økosystem vil blive påvirket, og at det vil ske over områder, der er større end de områder der er påvirket af de enkelte møller og vindmølleparker. I områder hvor der ikke naturligt findes hårde substrater, hvilket særligt gør sig gældende i den centrale og sydlige Nordsø, kan vindmøllerfundamenter og tilhørende erosionsbeskyttelse føre til en øget indvandring af ikke-hjemmehørende fauna- og algearter. Vindmølleparker har en effekt på havfugleforekomster. Der er arter der fortrænges fra fødeområder og arter der får længere flyveruter og endelig er der risiko for kollisioner.

Anden del består af en litteraturgennemgang af emnet miljøvirkemidler i relation til havvind. Det viser at viden og erfaring er begrænset inden for emner som mølledesign, belysningsprincipper, kollisionsrisiko og beskyttelse mod elektromagnetiske felter omkring kabler. Andre emner nævnes i litteraturen, men er reelt ikke undersøgt. Det drejer sig om effekter af overfladestrukturer, møllernes placering, erosionsbeskyttelse og udlægning af østersbanker.

Tredje del består af konkrete natur- og miljøvirkemidler, der kan implementeres med varierende grad af erfaring.

- Naturgenopretning af stenrevsområder og ålegræs enge. Virkemidlerne vil være særlig relevant i kabelkorridorer. Det skyldes at stenrev kun er opfisket på vanddybder ned til ca. 10 meters dybde, og ålegræs har hovedudbredelsesområder på relativt lave vanddybder. Her vurderes risikoen for utilsigtede negative effekter ved implementering af virkemidlerne for meget lille. Dette er i tråd med erfaringer fra nationale genopretningsprojekter i Danmark indenfor genopretning af både stenrev og ålegræsenge.

- Udlægning af kunstige stenrev uden for områder med naturlig hård bund vil være et brugbart virkemiddel, hvis man ønsker at fremme hårdbundsamfund på bekostning af blødbundssamfund. Virkemidlet er forbundet med risici for utilsigtet indvandring af fremmede arter på samme måde som møllefundamenter og erosions beskyttelse er i sig selv. Der kan være implikationer i relation til tre af havstrategidirektivets deskriptorer ”havbundens integritet” og ”biodiversitet” og ”ikke hjemmehørende arter”, der bør afklares. Der er et godt erfaringsgrundlag til stede.
- Etablering af banker af europæisk østers og udsætning af hummere omkring erosionsbeskyttelse er to virkemidler der kan overvejes. Der er et begyndende erfaringsgrundlag for opdræt af begge arter, men ikke for udsætning i relation til vindmølleparker. Det er også usikkert om der har været egentlige østersbanker i danske farvande eller blot spredte enkeltindivider og om de vil kunne trives i den danske del af Nordsøen, Skagerrak og Kattegat. Udsætning af hummer vil fremme en proces, som må antages at finde sted naturligt over år.
- Med hensyn til havfugle er der foreslået tre virkemidler. Det ene er udformning af mølleparker design i forhold til fremherskende flyveruter. Udformningen skal mindske barriereeffekten. Det andet virkemiddel er en regulering af den særligt vertikale belysning i mølleparken om natten, en belysning der kan medføre risiko for kollisioner. En aktiv behovsstyret belysningsstrategi afhængig af flytildedeværelse vil reducere risikoen. Det sidste virkemiddel er en temporær nedlukning af parken under forhold som er karakteristiske for større natlige fugletræk og under usigtbare vejrforhold.

Den sidste del af rapporten omhandler behovet for at overvåge havvindmølleparker. Der foreligger endnu ikke fastlagte retningslinjer for hvordan havvindmølleparker skal overvåges i forhold til principperne for en økosystembaseret forvaltning. Det er vigtigt at få et overvågningsprogram der er repræsentativt i forhold til de bundtyper der findes og som kan belyse de relevante deskriptorer i havstrategidirektivet. Herunder er det også vigtigt, at få lavet en risikovurdering af den samlede udbygningsplan for utilsigtet introduktion af ikke-hjemmehørende arter. Monitorering i de frie vandmasser og havpattedyr er også vigtig. Opsætning og servicering af automatiske målestationer for udvalgte parametre i vindmølleparker vil generere vigtige data til at udvikle og kalibrere hydrodynamiske modeller for de danske farvande.

Extended summary

There are ambitions for a very large expansion of wind farms in the regional sea areas Denmark shares with our neighboring countries. In Danish waters alone, the plan is to expand by a further 10 GW by 2030. In order to address possible conflicts between development plans for offshore wind and nature conservation and the overall goal to achieve good environmental status in Danish seas, the Danish Energy Agency have asked DCE to provide a catalog of concrete measures to secure the marine biodiversity and good environmental status. This includes management principles and relevant monitoring activities that can be brought into play in connection with future development of offshore wind.

As for the rest of the world, Denmark faces a biodiversity crisis and a number of anthropogenic pressures affects the biodiversity and environmental condition of the regions of Danish seas. Establishment of offshore wind turbines causes a loss of original seabed area where the sedimentary substrates is typically replaced by hard substrates of the towers and scour protection. Consequently, the biological communities will change from soft bottom communities to hard bottom communities and due to reef effects, where mobile organisms are attracted to these reef-like structures, ecosystem changes are not confined to the wind farms. In areas where hard substrates do not naturally exist, which is particularly true in the central and southern North Sea, wind turbine foundations and associated scour protection can lead to increased immigration of non-indigenous fauna and macroalgae species. Wind farms have an effect on seabird species. Some species are displaced from food areas, other species might get longer flyways, and finally there is a risk of collisions.

The second part of the report consists of a literature review within the subject of environmental instruments in relation to offshore wind. There is overall knowledge, although limited, in topics such as turbine design, lighting principles, collision risk and protection against electromagnetic fields around cables. Other topics are mentioned in the literature but have not been studied in the field. These are the effects of surface structures, the location of the turbines, erosion protection and establishment of oyster banks.

The third part of the report consists of concrete nature and environmental instruments that can be implemented with varying degrees of experience:

- Restoration of boulder reef areas and eelgrass meadows. Those measures will be particularly relevant in cable corridors. In former time boulder reefs was extracted at water depth to approx. 10 m and eelgrass has its main distribution areas at relatively low water depths. The risk of implementing both instruments is very small, and they will both be in line with national efforts for restoring lost habitats. There is experience in Denmark regarding the restoration of both boulder reefs and eelgrass meadows.
- Establishment of artificial boulder reefs (i.e. reefs where there have been no reefs before). It is a useful tool if the goal is to promote hard bottom communities at the expense of soft bottom communities. The instrument is associated with risks of unintentional introduction of non-indigenous species (which is also a general risk on windmill foundations and scour protection). There may be implications in relation to three of the Marine

Strategy Directive's descriptors "seabed integrity" and "biodiversity" and "non-indigenous species" that should be clarified. The level of experience creating reef sites is high in Denmark.

- Establishment of European oyster beds and release of lobsters around scour protection are two measures that can be considered. There is experience for breeding both species under laboratory conditions, but not for release in relation to wind farms. It is also uncertain whether there have been oyster beds in Danish waters years ago or just scattered individuals. It is also unknown if oysters will be able to thrive in the Danish part of the North Sea, Skagerrak and Kattegat. Release of lobster will promote a process assumed to take place any-way over years. There is very limited experience in the use of these measures in Denmark.
- For seabirds, three measures have been proposed. One is the design of wind farm designs in relation to prevailing flyways. The design should reduce the barrier effect. The second tool deals with the special vertical lighting in the wind farm at night, a lighting that can lead to the risk of collisions. An active demand-driven lighting strategy controlled by presence of airplanes in the area will reduce the risk. The last measure is a temporary closure of the park under conditions that are characteristic of major nocturnal bird migration and under invisible weather conditions. There are experience with these measures in Denmark.

The last part of the report deals with monitoring needs for a proper management of marine areas. There are so far no established guidelines how to monitor offshore wind farms in relation to the ecosystem-based management. It is important to have a monitoring program that is representative for the different seabed types and that the program fulfill the obligations set by the Marine Strategy Directive. In this context, it is also important to have a risk assessment made for unintentional introduction of non-indigenous species of the full implemented plan for wind parks in Danish as well as neighboring waters. Monitoring in the free water masses is also important as well as marine mammals. Setting up and servicing automatic measuring stations for in selected parameters in wind farms will generate important data for developing and calibrating hydrodynamic models for different water basins.

1 Indledning og formål

1.1 Projektets formål

Dette projekt omhandler samspillet mellem, på den ene side udbygning af havvindmølleparker, og på den anden side dansk havmiljø og natur. Det konkrete formål med projektet er at identificere og foreslå mulige tiltag og forvaltningsprincipper der sikrer, at udbygningen af havvind sker under hensyntagen til naturværdier og havmiljø. Opgaven er af opdragsgiver afgrænset, så den ikke omhandler alle emner i relation til udbygning af havvindmølleparker i danske farvande. Vi vil derfor i det udarbejdede katalog ikke behandle vigtige emner så som strategisk planlægning, effekter under anlægsfasen eller myndighedernes forvaltning af arealerne i forhold til menneskelige aktiviteter efter anlæggelsen. Kataloget har særligt fokus på virkemidler for bentiske organismer, bentiske habitater samt havfugle. I det udarbejdede katalog har vi ikke vurderet hvor vidt forskellige tiltag vil kunne påvirke levevilkårene for fisk og havpattedyr. De foreslåede aktiviteter skal endvidere være realiserbare inden for en overskuelig tidsramme.

Det er endvidere en præmis for projektet, at foreslåede tiltag skal være praktisk realiserbare og i overensstemmelse med principperne i en økosystembaseret forvaltning. Der er ikke taget stilling til om de beskrevne virkemidler kan implementeres uden en konkret vurdering (VVM) i forhold til den konkrete park og i forhold til den generelle lovgivning. Rapporten består af fire elementer: 1) En generel introduktion til dansk havnatur og miljø med udgangspunkt i fire overordnede farvandsområder; Nordsøen, Kattegat, Bælt-havet og den vestlige Østersø. 2) Litteraturgennemgang af virkemidler i forhold til natur og miljø i havvindmølleparker. 3) Med udgangspunkt i litteraturgennemgangen foreslås og diskuteres konkrete natur- og miljøvirkemidler, der sammenstilles i et katalog. 4) Der opstilles forslag til relevante forvaltnings- og overvågningsaktiviteter, der yderligere kan kvalificere fremtidig anvendelse af natur- og miljøvirkemidler i vindmølleparker og samtidigt kan udfylde noget af det fremtidige behov for data under havstrategidirektivet.

1.2 Afgrænsning, afklaring og anvendelse af begreber

I projektets opgaveløsning, er der foretaget en række afgrænsninger af det meget omfattende emne. Afgrænsningen har været nødvendig for at sikre projektets gennemførsel. Hovedfokus er offshore vindmølleparker, der typisk vil ligge på relativt store vanddybder og på sandet sedimentbund. Denne afgrænsning er begrundet i, at det er her den største udbygning af havvind forventes at ske ifølge den seneste version af havplanen (Søfartsstyrelsen, 2021). Hertil kommer, at opsætningen af møller på dyb sedimentbund, anses for at være en relativt større forandring i de undersøiske landskaber og en relativt større påvirkning af de naturlige spredningsveje og udbredelsesmønstre for de planter og dyr der er tilknyttet den hårde havbund. Nedprioriteringen af f.eks. kystnære vindparker og i nogen omfang kabeltraceer er endvidere begrundet i, at disse områder typisk rummer mere forskelligartede naturtyper, hvor relevansen af virkemidler kan være sværere at generalisere.

I rapporten skelnes mellem direkte virkemidler, dvs. fysiske modifikationer af design af møller og af området med vindmølleparker og indirekte virke-

midler. For de direkte virkemidler fokuserer rapporten på den del af biodiversiteten og de naturelementer, der i særlig grad er knyttet til det substrat og de fysiske strukturer som vindmøllerne og den udlagte erosionsbeskyttelse udgør. For de indirekte virkemidler fokuserer rapporten på den generelle arealanvendelse i havet, i forhold til de behov der er for at beskytte specifikke arter og levesteder. Hermed menes f.eks. muligheden for at kompensere for fugledødelighed, der skyldes kollisioner med vindmøller ved f.eks. at reducere jagttrykket og/eller bifangst i fiskeredskaber tilsvarende i et andet område. Et andet eksempel på et forvaltningstiltag, kan være at kompensere for den generelle forstyrrelse af havbunden der sker uden for vindmølleparker, ved at indføre/fastholde restriktioner for anvendelsen af slæbende fiskeredskaber inde i parkområder.

I relation til havvindmøller anvendes begrebet havmiljø primært om processer i de frie vandmasser (pelagialet), der relaterer sig til vandkvalitet og her vil rapporten fokusere på mulige effekter i vindmøllernes nærområder (dvs. inde i vindmølleparkerne). Den mulige effekt på forskellige vandmiljøparametre er relateret til vindmøllernes påvirkning af hydrodynamikken omkring mølletårnene. Det kan ændre blandingsprocesser i vandsøjlen og dermed tilførsel af næringsstoffer der stimulerer planteplanktonets vækst (eutrofiering), hvor man kan diskutere om det f.eks. er formålstjenstligt at etablere muslingebanker. Andre effekter af ændret hydrodynamik, som f.eks. storskala påvirkninger af havstrømme, herunder vandudvekslingen med Østersøen, er ikke medtaget i rapporten.

Dyrkning af tang, muslinger eller opdræt af fisk er elementer, der diskuteres i relation til kombineret brug af vindparkarealer. I relation til vindmølleparker, som ikke udleder næringssalte og som i de fleste tilfælde er placeret på åbent hav, er der set bort fra disse aktiviteter som et miljøvirkemiddel.

For den del af den marine biodiversitet der er under havoverfladen, er der ikke udarbejdet en konsistent rødliste for marine arter i de danske farvande (Ejrnæs mfl., 2021). En af de operative målsætninger for den nyeste danske havstrategi er *"Behov for beskyttelsestiltag for HELCOM og OSPAR rødlistede arter: Findes der rødlistede arter, som er truede eller ikke tilstrækkeligt beskyttede?"* (Miljø- og Fødevarerministeriet, 2019). Af den årsag indgår rødlistede arter ikke som et emne i denne rapport.

1.3 Prioritering af naturværdier i havvindmølleparker

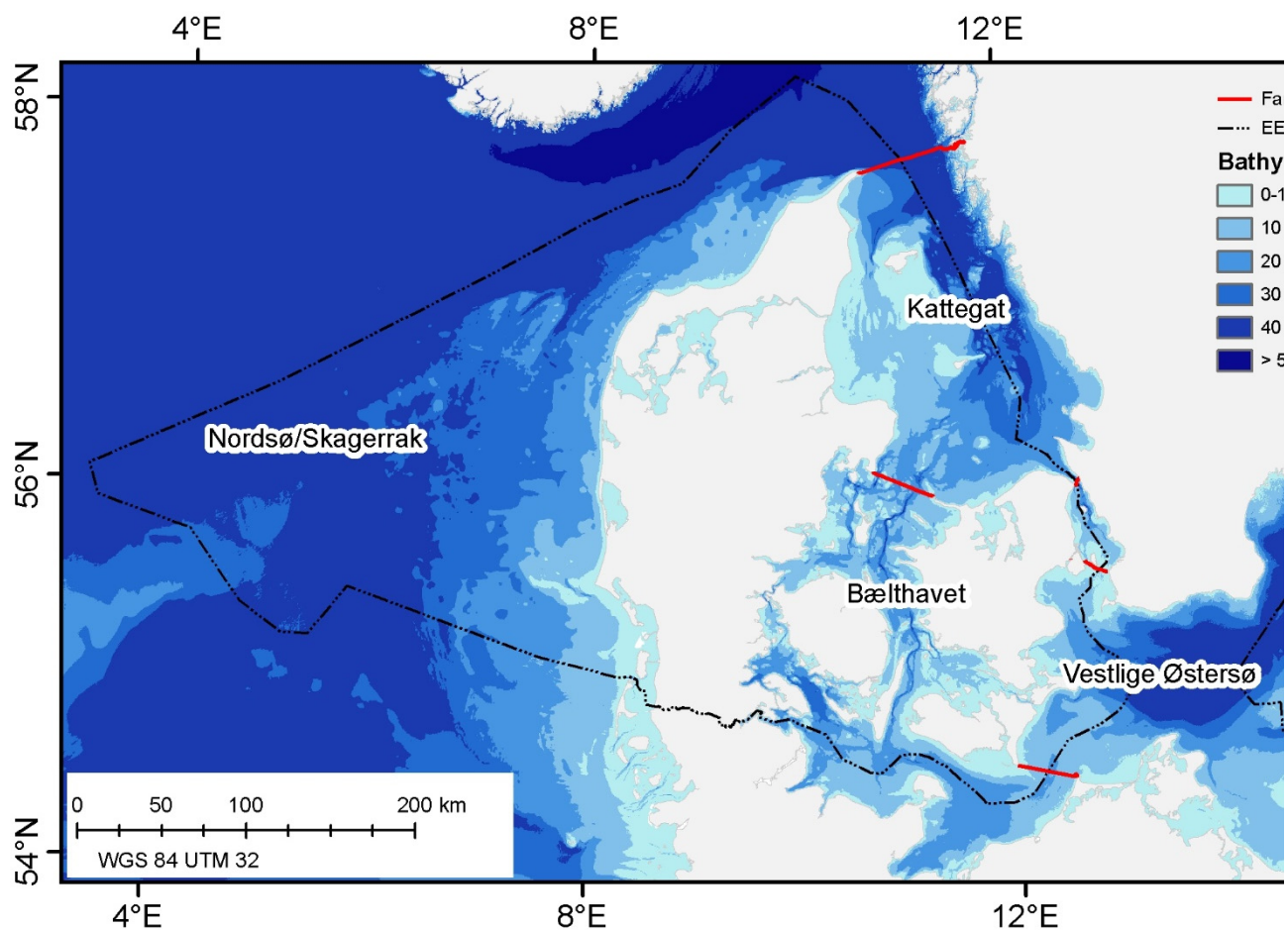
Når der opsættes havvindmøller og etableres parkområder, vil møllernes undersøiske fundamenter have ligheder med naturlige rev og udvise reveffekter. Det er derfor forventeligt, at vindmøller vil virke som kunstige rev og på samme måde som naturlige rev, og øge den lokale biodiversitet inden for parkområdet. Det vil i særdeleshed finde sted i situationer hvor mølleparker etableres på blødt sediment. Biodiversitet er målbar og biodiversitet er indikator for naturværdi eller naturkvalitet. Det forudsætter dog, at de biologiske samfund man måler på, er formet af naturlige økosystemprocesser i et nogenlunde uforstyrret økosystem; kort sagt: Anvendelse af biodiversitet som indikator for naturværdi giver kun mening, hvis det rent faktisk er natur (vild natur) man måler på. En zoologisk have er et indlysende eksempel på, at man vil kunne måle en høj diversitet af arter, uden at det har noget med natur at gøre. Grænserne er dog flydende mellem hvad, der kan kaldes natur, og hvad der ikke kan.

Ud fra en helhedsbetragtning om at beskytte truede arter og levesteder, kan indgreb, der restaurerer natur eller ligefrem skaber kunstige levesteder være formålstjenstlige. Men det er en svær balancegang, for hvornår er en art eller et levested truet så meget, at det kan retfærdiggøre det indgreb som anlæg af kunstige levesteder er? Hertil kommer at restaureret og kunstig natur har forskellige grader af autenticitet, og det bør indgå i denne afvejning mellem på den ene side, beskyttelseshensynet til sårbare arter og levesteder, og på den anden side ønsket om at opretholde en vild natur. Hvis der udlægges sten på et sted, hvor der tidligere har været et stenrev med mange og tæt forekomst af sten, kan man sige, at stenrevet er restaureret, og det vil være mere autentisk end et tilsvarende kunstigt stenrev anlagt på sedimentbund. Autenticiteten er ikke kun et spørgsmål om æstetik, det vil også have en biologisk betydning: De oprindelige stenrev i danske farvande forekommer eksempelvis ofte på steder, hvor høje strømhastigheder har eroderet det ustabile materiale bort, så kun de stabile sten er tilbage. Et kunstigt stenrev der er placeret på en lokalitet, hvor det omgivende miljø ligner det der forekommer omkring naturlige stenrev, må forventes at få en mere autentisk flora og fauna.

I denne rapport beskrives den direkte virkning, som et tiltag forventes at have på det lokale økosystem uafhængigt af placeringen og graden af autenticitet. Indirekte virkninger omhandler mulige afledte kaskadeeffekter, som tiltaget med tiden kan have på økosystemet, men som dog vil afhænge af den aktuelle placering. Forvaltningstiltag omhandler dels alternativer til fysiske indgreb og/eller supplerende forvaltningsmæssige tiltag, der er hensigtsmæssige for at opnå den ønskede effekt på populationsniveau eller økosystemniveau.

1.4 Opdeling i farvandsområder

Naturindhold på et givent habitat afhænger af hvilket farvandsområde det er en del af. De danske farvande opdeles her i 4 områder: Nordsøen/Skagerrak, Kattegat, Bælthavet og den vestlige Østersø (Figur 1.1). Nordsøen og Skagerraks afgrænsning til Kattegat er defineret ved en linje fra Skagen til Sveriges vestkyst. Kattegat er afgrænset fra Bælthavet ved en linje fra Sjællands Odde til Djursland og til Øresund ved en linje mellem Helsingør og Helsingborg. Bælthavet (inkl. Øresund) er afgrænset ved tærsklerne Drogden og Darss til den vestlige Østersø. Disse farvandsområder er omfattet af de to regionale havkonventioner; OSPAR og HELCOM, hvor OSPAR dækker Nordsøen, Skagerrak og Kattegat og hvor HELCOM dækker Kattegat, Bælthavet og den vestlige Østersø. Opdelingen af havområdet i forhold til havkonventionerne er vigtig, idet OSPAR og HELCOM medvirker til koordineringen af indikatorudviklingen til deskriptorerne under EU's havstrategidirektiv og disse kan afvige mellem de to konventioner.



Figur 1.1. Farvandsafgrænsninger anvendt i rapporten. Afgrænsningerne repræsenterer forskellige funktionelle økosystemer, samt forskellige forvaltningsområder. OSPAR områder dækker Nordsøen, Skagerrak og Kattegat. HELCOM dækker også Kattegat og derud over resten af Østersø området.

2 Marine naturværdier, miljøtilstand og presfaktorer i de danske farvande

Det danske havareal rummer en mangfoldighed af arter og livsformer (havets biodiversitet), som i samspil med fysiske og kemiske forhold former og regulerer det marine økosystem. Både havbunden og de frie vandmasser har et stort antal forskellige levesteder, der hver især har deres karakteristiske dyre- og plantesamfund. På havbunden er det havbundens beskaffenhed (sedimentsammensætning) og mængden af lys, der er de primære faktorer, der afgør hvilke biologiske samfund man kan forvente at finde. På den belyste sedimentbund kan man finde ålegræsengene, forudsat at området samtidigt er tilstrækkeligt beskyttet mod erosion fra bølger og strøm. På den hårde belyste bund, som omfatter stenrevne, vil den naturlige vegetationstype være tangskove, hvor makroalgerne bruger det hårde substrat til at forankre sig på. Begge typer af opret vegetation har meget stor betydning som levested for den øvrige fauna og som skjulested for fx fisk. På den hårde bund på større dybder, hvor der ikke er lys nok til plantevækst, er det den fasthæftede fauna, der dominerer og skaber strukturer, der i mindre omfang minder om de skjulesteder, som vegetationen bidrager med. Endelig er der de vidstrakte finere sedimentbunde ("muddersletter"), der udgør det største areal af den danske havbund. Umiddelbart fremstår bunden her mere artsfattig, fordi de fleste arter lever nedgravet i bunden. Men, man kan finde mere end 100 forskellige arter nede i sedimentet i en prøve, der bare dækker 0,1 m² havbund.

I de frie vandmasser, pelagialet, er grænserne mellem de forskellige levesteder dynamiske, og de forskellige miljøer formes og afgrænses i høj grad af havstrømmene og af vandmassernes forskellige vægtfylde. I de frie vandmasser starter fødekæderne med planktonet. Det er de organismer, der driver med strømmen som fx planktonalger, vandlopper og larver af fisk og bunddyr. De større organismer, typisk fisk, blæksprutter og havpattedyr, er ofte mobile, og kan aktivt opsøge deres levesteder, og flere af dem foretager sæsonvandring og findes derfor kun i de danske farvande en del af året, som fx hornfisk og makrel. Bestandsstørrelserne af de arter, der foretager sæsonvandring, påvirkes dermed af alle de naturlige og menneskeskabte påvirkninger, der forekommer både i og uden for de danske farvande.

2.1 Hydrografiens indflydelse på fordelingen af havets biodiversitet

De fire funktionelle økosystemer, (Nordsøen, Kattegat, Bælthavet og den vestlige Østersø) har meget forskellige biologiske samfund. Deres særegne karakteristika kan relateres til farvandsområdernes geografiske placering, de hydrografiske forhold og havbundstypen. I rækkefølgen: Vestlige Østersø, Bælthavet, Kattegat og Nordsøen, forbinder farvandene Østersøen med Nordatlanten. Bælthavet og Kattegat udgør en meget dynamisk overgangszone, hvor det brakke Østersøvand, som strømmer ud fra Østersøen blandes med det salte Nordsøvand. Hydrografisk set er Kattegat og Skagerraks vandmasser adskilt ved en front gående fra ca. Skagen i nordøstlig retning til Sveriges vestkyst. Fra Skagen til Bornholm, falder saltholdigheden i overfladelaget fra ca. 30 ‰ ved Skagen til ca. 7 ‰ ved Bornholm. Igennem hele området syd for Kattegat-Skagerrak fronten og ned til de to tærskler ved Darss (vestlige del af Fermen Bælt) og Drogden (Øresund) er vandsøjlen saltlagdelt med et kraftigt

saltspringlag i ca. 15 m dybde. Saltspringlaget adskiller det brakke Østersøvand i overfladelaget fra det saltere Nordsøvand i bundlaget. På grund af den gradvise blanding mellem de to vandmasser, opstår der et modsatrettet strømningsmønster i de to vandlag, hvor den dominerende strømning i overfladelaget er udadgående (mod Nordsøen) og hvor den dominerende strømretning i bundvandslaget går indad (mod Østersøen). Dette strømningsmønster har stor betydning for hvordan biodiversiteten fordeles sig i de indre danske farvande. Det har længe været kendt, at den samlede artsrigdom af både flora og fauna følger denne saltgradient (se. f.eks. Remane 1934). Der er således langt flere forskellige arter i Nordsøen og i den nordlige del af Kattegat, sammenlignet med artsrigdommen i den vestlige Østersø. Det samme er afspejlet i den vertikale fordeling af dyre- og plantesamfund ned gennem vandsøjlen, hvor saltlagdelingen på samme måde adskiller overflade- og bundvandslagets biologiske samfund. De store forskelle i artsrigdom skyldes, at der er langt flere organismer der er tilpasset til de saltholdigheder der er i oceanerne end brakvandsområderne. Der er således mange organismer der har deres udbredelsesgrænser i de indre danske farvande. I tilfældet med Østersøen skyldes den lave artsrigdom formentlig også, at Østersøen geologisk set, er et ungt indhav, hvor den indvandring af organismer der startede efter istiden, stadig foregår fra de artsrige områder i Nordsøen og Kattegat.

I havet foregår spredningen af marine organismer fra et ene område til et andet ved at organismene enten svømmer, kravler på bunden eller driver med havstrømmene (plankton). I de frie vandmasser er det kun de større organismer (som f.eks. fisk, pattedyr og blæksprutter), som kan svømme hurtigere end strømmen og dermed selv aktivt opsøge deres opholdssted. De mindre organismer spreder sig planktonisk (dvs. de driver mere eller mindre passivt med strømmen). Størstedelen af de bunddyr der findes i danske farvande, har også et planktonisk larvestadie, hvor larverne spredes med havstrømmene i en periode før de bundfælder sig og rekrutterer havbunden. For dyrene på havbunden, er det planktoniske larvestadie tillige en kritisk fase i deres livscyklus (Thorson 1966). Også makroalger har et planktonisk spredningsstadie. Det forhold, at spore, æg og larver spredes med havstrømmene gør, at fordelingen af de forskellige bundsamfund og deres artsrigdom formes af hydrografien. Det betyder generelt, at strømningsmønstret bestemmer hvor stor konnektivitet (forbindelse), der er mellem bundsamfund og bestande af arter i forskellige geografiske områder. Den geografiske fordeling af havbundens samlede biodiversitet er også styret af denne konnektivitet mellem områder. De områder, der har en høj konnektivitet med andre områder, forventes at have en høj biodiversitet, fordi der vil være en stor transport af larver ind i området, som så til stadighed vil rekruttere havbundens samfund. Et sådant donorområde kan fx være de åbne havområder i det centrale Kattegat, hvor saltholdigheden og vandudveksling er stor (Josefson & Hansen 2004). De områder der ligger opstrøms i forhold til strømmen, vil eksportere larveplankton til områder der er placeret nedstrøms.

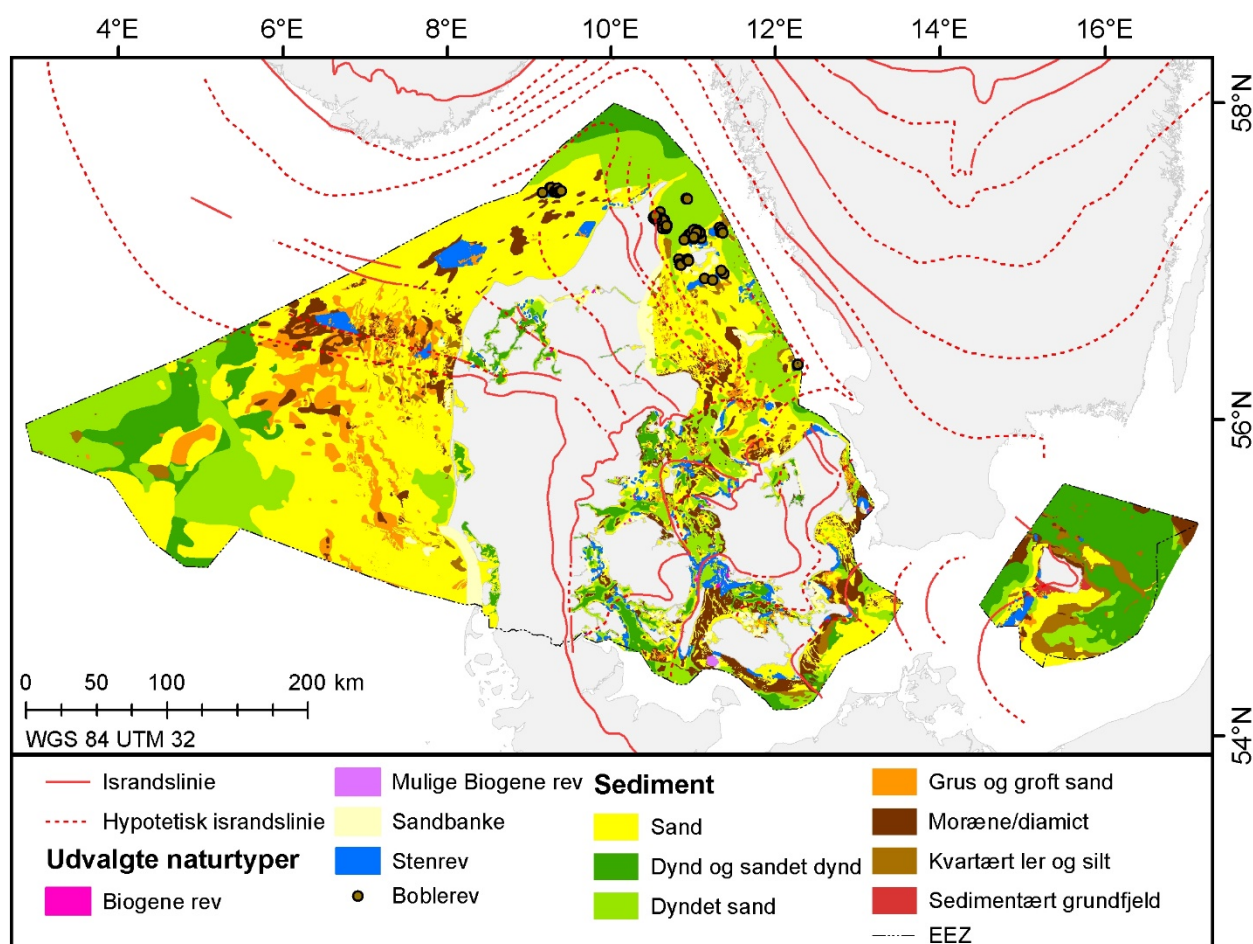
Konnektiviteten er vigtigt for bundsamfundenes robusthed i tilfælde af fx fysiske forstyrrelser eller iltsvind. Hvis et område er tæt forbundet med andre områder, vil der hurtigere ske en genindvandring. Omvendt vil områder med en lille konnektivitet naturligt være mere følsomme for forstyrrelser.

I de indre danske farvande og den vestlige Østersø har konnektiviteten en særlig stor betydning, fordi fordelingen af biodiversiteten samtidig er styret af de saltholdighedsgradienter der er i vandet ind gennem de indre danske farvande. Mange dyre- og plantearter har således udbredelsesgrænse i dette

område, og da der er en udadgående nettostrømning fra Østersøen mod Nordsøen, vil larveplanktonnet i de fleste tilfælde blive transporteret ud af de indre danske farvande. Bunddyrene har dermed sværere ved at rekruttere områder, der ligger i retning af Østersøen (Bendtsen & Hansen 2013). Det betyder, at de levesteder der ligger tættest på udbredelsesgrænsen til Østersøen, vil være de områder der er mest følsomme for forstyrrelse. I Nordsøen er der ikke de samme skarpe gradienter i saltholdighed og udbredelsesgrænser for bundfaunaen. Da Nordsøområdet er kendetegnet ved en meget kraftig blanding, er der stor konnektivitet for larveplanktonnet mellem de forskellige områder. Det forventes således, at konnektiviteten i Nordsøen kun er begrænsende for udbredelsen af de organismer, med levesteder der har en lille geografisk udbredelse.

2.2 Betydningen af havbundens heterogenitet for biodiversiteten

Der er flere forskellige typer af biologiske samfund inden for hvert af de fire overordnede økosystemer afhængigt af sedimentets sammensætning (substratet), som traditionelt opdeles i mange flere underkategorier end kun blødt og hårdt sediment (Figur 2.1).



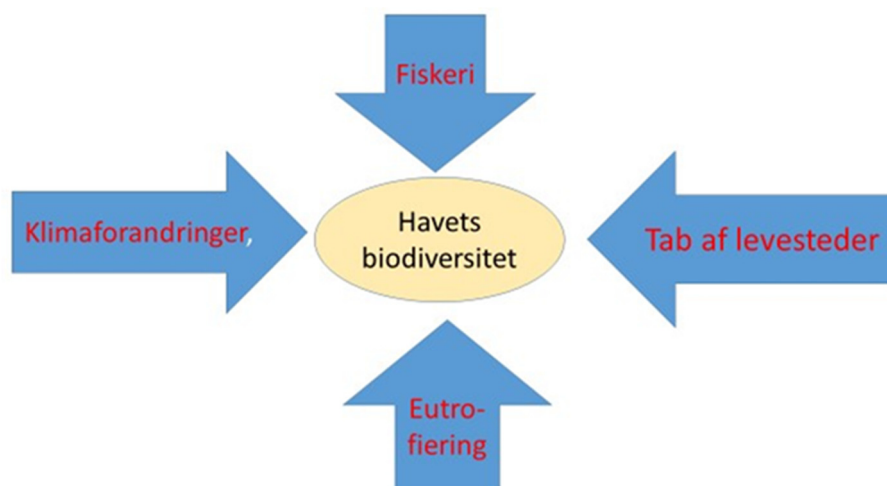
Figur 2.1. Fordeling af sedimenttyper (Leth mfl., 2021) i de danske farvande, overlagt mere detaljeret kortlægning af naturtyper i habitatområder (Miljøstyrelsen 2020) samt israndslinjer fra den sidste istid (GEUS 1998).

Et andet vigtigt forhold, der bestemmer hvor stor en artsrigdom, man kan forvente at finde i et område, er hvordan de forskellige havbundstyper er blandet inden for et område og dermed hvor mange forskellige biologiske samfund, som indgår i de økologiske processer.

Havbundens rumlige heterogenitet har stor betydning for hvor mange forskellige organismer, der kan være på samme sted. I den helt lille skala kan det fx være mængden af ormegange i sedimentbunden, der bestemmer hvor mange arter af hvirvelløse dyr der kan sameksistere inden for et område på 10 cm × 10 cm. Fritliggende sten er substrat for fastsiddende organismer, og det kan tiltrække mobile dyr, der gemmer sig bag det der rager op af havbunden. I lidt større skala kan havbundens heterogenitet påvirke hvordan organismerne i både vandsøjlen og bunden fordeler sig rumligt i havet. Her er stenrev et godt eksempel, hvor stenformationerne rager op i de undersøiske landskaber og danner levesteder for de organismer, der er tilpasset til selve stenrevne, men samtidigt tiltrækker stenrevne en lang række andre arter. De pelagiske mobile arter (fx fisk og blæksprutter) bruger stenrev som skjulested, især fiskeynglen. Det tiltrækker så rovdyr, således at flere led i fødekæden, både fra de frie vandmasser og fra bunden, samles omkring stenrev. Det er en del af den såkaldte reveffekt, som også kan genfindes på steder, hvor kunstige konstruktioner skaber den nødvendige og tilsvarende strukturelle heterogenitet i de undersøiske landskaber, såsom vrage, broer og vindmøllefundamenter. Det er i høj grad organismerne, der skaber disse skjulesteder, når fx makroalgerne danner tætte tangskove. Selv på en sedimentbund kan tilstedeværelsen af ganske få fritliggende sten bidrage med lidt gemmesteder og øge den samlede biodiversitet (Hansen 2021).

2.3 Presfaktorer på havbundens biodiversitet

De forskellige levesteder og de biologiske samfund er under hastig forandring i de danske havområder på grund af direkte eller indirekte menneskelige påvirkninger. Forudsætningerne for en god havnatur kræver et rent vandmiljø, fravær af forstyrrelser og frem for alt plads. I havet er pladsbehovet i høj grad et spørgsmål om tilstedeværelsen af den omtalte heterogenitet. Det gælder storskala komplekse undersøiske landskaber, det gælder reveffekten og det gælder i sedimentstrukturer helt ned i cm-skalaen (Høglund mfl. 2019). Dette står i modsætning til den homogenisering af levestederne på havbunden, som har stået på siden begyndelsen af det forrige århundrede, hvor stenfiskeri har mindsket mængden af stenrev i de mere lavvandede undersøiske landskaber, og hvor trawlfiskeriet over havbunden har fjernet heterogenitet på sedimentbundene. Hertil kommer presset på de marine fødekæder, både fra bunden af fødekæden, der primært skyldes udledning af næringsstoffer fra land og fra toppen af fødekæderne fra fiskeriet. Herudover bidrager klimaforandringerne med et generelt pres på både levestederne og økosystemprocesserne i havet. Effekten af disse fire presfaktorer (figur 2.2) vekselvirker i nogle tilfælde, og det kan forstærke den samlede negative effekt på havets biodiversitet (Ejrnæs mfl., 2021).



Figur 2.2. Fire overordnede presfaktorer på havets biodiversitet (modificeret fra IPBES, 2021). Fra toppen af havets fødenet, er det fiskeri (fangst og bifangster) og jagt der truer de enkelte bestande med mulige ubalancer til følge i resten af fødenettet. Fra bunden af fødenettet påvirkes biodiversiteten negativt af eutrofiering (overgødsning), der kan give anledning til masseopblomstringer af planktonalger og medføre iltsvind. Tab og fysisk forstyrrelse af levesteder på havbunden skyldes trawling, råstofindvinding og offshore konstruktioner og støj kan bidrage til forstyrrelse af de pelagiske miljøer. Negative effekter af klimaforandringer (vandstandsstigning, stigende temperatur, ændret ferskvandsafstrømning) forstærker effekten af de andre presfaktorer ved at påvirke de enkelte bestande, medføre tab af levesteder og til at forstærke de negative konsekvenser af eutrofiering på vandmiljøet. De fire overordnede presfaktorer på den marine biodiversitet omfatter også andre presfaktorer som fx støj, ikke-hjemmehørende arter og kontaminanter.

Eutrofiering

De danske farvande er blevet mere eutrofe i løbet af 1900-tallet på grund af øget tilførsel af næringsstoffer fra land. Det stimulerer planteplanktonnets vækst, som så mindsker lysets nedtrængning i vandsøjlen. Det betyder, at ålegræs og makroalgerne får mindre dybdeudbredelse og vegetationsbælterne langs kyster og på stenrev skrumper i udbredelse. Det betyder igen tab af de økosystemservices, som den marine vegetation bidrager med i form af organisk produktion. En anden negativ effekt af eutrofiering er iltsvind, der opstår hvor bundvandet er stillestående og på tidspunkter hvor vandet er varmt. Iltsvind kan direkte slå faunaen ihjel og i værste fald udrydde hele bundfaunasamfund. Selv i de tilfælde, hvor iltkoncentrationen i sig selv ikke bliver kritisk lav, stimuleres dannelsen af giftig svovlbrinte i overfladesedimentet. I de seneste årtier er eutrofieringsniveauet sænket, og der er sket forbedringer af miljøtilstanden i de danske farvande (Carstensen mfl. 2006; Riemann mfl., 2016). Men den marine vegetation har ikke genvundet tidligere tiders arealudbredelse fra begyndelsen af 1900-tallet (Krause-Jensen mfl., 2021)

Fiskeri og jagt

Udnyttelse af havets ressourcer fjerner organismer primært fra toppen af den marine fødekæde og skaber en kunstig "top-down" effekt på økosystemet. Det har en direkte effekt på populationstørrelserne af de efterstræbte arter, men der er også indirekte effekter på andre arter, der kan blive påvirket af aktiviteterne, f.eks. bifangst af ikke tilsigtede arter. For det pelagiske fiskeri omfatter bifangst andre fiskearter end dem der fiskes efter, men fugle og pattedyr kan også ende som bifangst. Trawling med bundsløbende redskaber påvirker især bundfaunaen, som enten fanges som bifangst eller skades nede på bunden ved kontakt med det sløbende redskab. Der er således flere arter,

der er blevet relativt sjældne i løbet af de sidste 100 år formodentligt på grund af trawlfiskeri (Josefson mfl. 2018). Når der fjernes rovdyr fra toppen af fødekæden, kan det forstyrre balancen i økosystemet. Masseforekomster af søpindsvin, som nedgræsser makroalgevegetation er muligvis også et eksempel på, at deres rovdyr er for få til at kontrollere søpindsvinene i økosystemet (Steneck 1998). Nedgræsning af tangskove har fundet sted i Kattegat, er et problem i Limfjorden (Dahl et al, 2021) og har påvirket over 1000 km kyststrækning langt den norske kyst mod nord (Norderhaug et al, 2021).

Jagt på havdykænder, bifangst af fugle i nedgarn og forstyrrelser fra rekreative aktiviteter er blandt de vigtige presfaktorer på havfugle. Havjagten er i de seneste år pålagt en række restriktioner, med bl.a. fredning af arterne havlit og fløjsand samt en køns-differentieret jagt på ederfugl, hvor der nu udelukkende må jages hanner. Jagten er alligevel en aktuell presfaktor, ikke udelukkende pga. antallet af nedlagte individer, men også pga. den forstyrrelse som jagten udgør på fuglene. Netop havdykænderne er særligt sårbare i deres fældningsperiode. Dykænder fælder deres svingfjer synkront, og er i en ca. tre ugers periode fra medio juli til udgangen af august uflyvedygtige. I netop denne periode er arterne særligt følsomme overfor menneskelige forstyrrelser, for eksempel fra rekreative, marine aktiviteter.

Tab og forringelse af levesteder

Denne presfaktor opererer i flere rumlige skalaer på havbunden. Det sker i forbindelse med offshore konstruktioner, råstofindvinding og fiskeri med slæbende redskaber. I den store skala er det især stenrevene som landskabselementer, hvor arealet er mindsket pga. stenfiskeri. Opfiskning af sten langs de danske kyster og på stenrev i åbne farvande har været en aktivitet der går flere hundrede år tilbage, men særligt fra 1900-tallet og frem til 1990'erne var der en stor aktivitet. Stenene blev brugt til havnebyggerier, kystsikring og andre marine anlægsarbejder. Stenfiskeriet har fundet sted på relative lave vanddybder mellem 2 og 10 m. Udnyttelsen af sten har forarmet mange rev, således at stentætheden af større stabile sten i dag er begrænset. Ud over tabet af det samlede stenrevsareal, har stenfiskeriet også medført en forringelse af stenrevene som levested, fordi det fortrinsvis er sten fra toppen af revet, der er blevet fjernet og dermed er dybdezonen for makroalgerne indsnævret. Det giver færre dybdezoner i algesamfundet og dermed en mindre diversitet af makroalgerne og det associerede faunasamfund. Når sten fjernes fra toppen af revet, vil det resultere i færre huler i revet og dermed færre specielle levesteder. Endelig er det muligt, at fjernelse af store sten også medfører erosion af revet.

På sedimentbunden er trawlfiskeri langt den største kilde til fysisk forstyrrelse. Havbunden bliver de fleste steder overtrawlet flere gange om året i de danske farvande. Trawlingen medfører en homogenisering af havbunden, f.eks. med fjernelse af mindre sten og andet hårdt substrat, der ellers bidrager med heterogenitet til den bløde havbund.

Klimaforandringer

Klimaforandringer påvirker arternes udbredelse og levestederne i havet. De indre danske farvande er et eksempel på områder, hvor klimaforandringerne slår relativt hurtigt igennem. Det skyldes dels den forholdsvis lave vanddybde og farvandenens placering i overgangszonen mellem Østersøen og Nordsøen. Klimaforandringerne har medført højere vandtemperatur og den forventes fortsat at stige. Ud over den gradvise temperaturstigning er hyppigheden af perioder med ekstreme hedebølger "Marine Heat Waves (MHW)

steget markant, hvorved særligt koldt vands tilpassede arter er udsatte (Holbrook mfl., 2019). Vandstanden vil stige støt de næste århundreder og ændrede nedbørsforhold i Østersøregionen kan ændre hydrografien. Klimaforandringerne ændrer levestederne i de danske havområder (Nordemann mfl., 2015), hvor især habitaterne i kystzonen vil forandres. Klimaforandringerne påvirker direkte de enkelte arters udbredelsesmønstre. F.eks. er der observeret et stigende antal mere varmekrævende fisk i Nordsøen. Det er dog næppe sandsynligt, at de varmeelskende arter vil indvandre i samme tempo som de varmefølsomme arter vil forsvinde, og der kan forventes en generel reduktion i biodiversiteten. De indirekte effekter af klimaforandringerne på havet kan være den største trussel, idet f.eks. en stigende havtemperatur kan accelerere eller forstærke de negative effekter af eutrofiering på vandets iltindhold (Bendtsen og Hansen 2013).

Klimaforandringer påvirker fordelingen af havfugle. De indre danske farvande er særlig vigtige som overvintrings- og rastested for arter af lappedykkere, lommer, svaner, gæs og ænder. Der ses forskydninger i en række af disse arters overvintringsmønstre, der kan relateres til ændrede klimamæssige forhold. Ændringerne betyder generelt, at arterne i stigende grad overvintrer nordligere og østligere end det før var tilfældet. Sådanne forandringer udgør en øget udfordring i at monitorere arternes udbredelse, fordeling og bestandsudvikling.

Ikke-hjemmehørende arter

Ikke-hjemmehørende arter, beskriver arter der ikke har en oprindelig forekomst i økosystemet og hvor indvandringen ikke tilskrives en naturlig proces. Årsagerne til en ny arts indvandring kan være mange. F.eks. kan en væsentlig barriere i artens udbredelse være forsvundet (åbning af en kanal) eller skibe kan via ballastvand eller ved begroning slæbe arter henover naturlige barrierer. Tilsløset eller utilsigtet udsætning af organismer er andre typiske vektorer.

Kunstig ændring af konnektiviteten for en art i et område kan også bryde en sådan udbredelsesbarriere. Et eksempel kan være introduktion af et levested, der kommer til at forbinde to andre levesteder; en såkaldt ”trædestens” effekt. Selvom de ikke-hjemmehørende arter bidrager til biodiversiteten, så regnes introduktionen af disse arter for negativ, da de kan have negative effekter på økosystem funktioner og fordi de kan udkonkurrere andre hjemmehørende arter. Problemet med ikke-hjemmehørende marine arter i dansk havnatur vurderes at være stigende i alle danske havområder (Stæhr mfl. 2020).

2.4 Havvindmøllers påvirkning af biodiversiteten

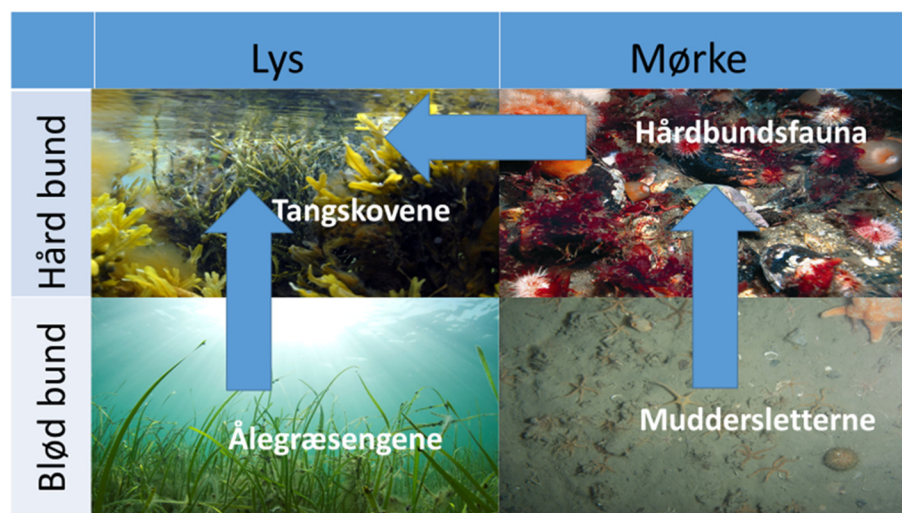
Mange af de mulige påvirkninger som vindmøllernes undersøiske fundamenter og erosionsbeskyttelse har på økosystemprocesser og biodiversiteten i havet, kan sammenfattende beskrives og forklares med reveffekter, som beskrevet ovenfor. Reveffekter, som observeres både på kunstige strukturer og på naturlige stenrev, beskriver en kaskade af processer, hvor dyr og planter sætter sig fast, og med tiden danner et samfund af tang og hårdbundsfauna. Den endelige sammensætning af disse samfund afhænger først og fremmest af, om der er lys nok til, at tangfloraen kan vokse og hvilket farvandsområde det foregår i (Figur 2.3). Men, ud over de organismer, der er direkte tilknyttet det faste substrat, vil en lang række andre dyr blive tiltrukket til revstrukturer for at søge skjul eller føde og den effekt bidrager til, at man ofte måler en lokal

forøget biodiversitet omkring revet. Den del af reveffekten som består i tiltrækning, kan ses som et udtryk for mangel på rumlig heterogenitet og skjulesteder i de omkringliggende områder.

Påvirkning af havbundens rumlige heterogenitet

Reveffekter som fænomen, giver sommetider anledning til at rev omtales som "biodiversitet hotspots". Det bør dog bemærkes, at det kan være svært at sammenligne biodiversitetsmål på rev og andre bundtyper, som sedimentbund. For det første er biodiversiteten lagt mere synlig på hårde bundtyper som rev, hvor faunaen ikke kan grave sig ned. For det andet er den højere biodiversitet omkring rev et relativt begreb, hvor der oftest sammenlignes med den omkringliggende sedimentbund. Netop fordi tiltrækningen af organismer fra omkringliggende områder er en del af reveffekten, kan man sige, at den højere biodiversitet omkring rev er betinget af manglen på skjulesteder på den omkringliggende havbund, i lige så høj grad som den er betinget af skjulestederne på revet.

I forhold til de fire presfaktorer (figur 2.2) så er det sandsynligt at tabet af levesteder på lavvandede stenrev i nogen grad vil modvirkes af vindmølleparkers kunstige substrat, hvis disse også er opstillet på lavt vand. Vindmølleparker anlagt med en varieret erosionsbeskyttelse omkring den enkelte mølle vil skabe en stor reveffekt og strukturel heterogenitet. Spørgsmålet er hvordan denne ændring af levestederne påvirker og ændrer de oprindelige levesteder og biologiske samfund, som typisk vil være blødbundssamfund. Her er det vigtigt at vide hvordan arealerne mellem de enkelte møller påvirkes. Mulige effekter er en generel øgning af biodiversiteten og større stabilitet af sedimentet, hvis trawlingen af bunden ophører. Andre effekter kan være øget sedimentation og ændringer i fødekædestrukturer som beskrevet nedenfor.



Figur 2.3. Hypotetiske ændringer i udbredelsen af de fire overordnede økosystemer på havbunden som følge af de reveffekter der er associeret med havvindmølleparker. Samfundene på de dybe sedimentbunde, hvor der ikke er lys, forventes erstattet med et hårbundsfaunasamfund. Tilsvarende vil ålgræsenge på de lave belyste sedimentbunde blive erstattet med tangskove (makroalger) der gror fasthæftet på møllefundamenterne. Endvidere er der mulighed for at eksisterende samfund med hårbundsfauna vil blive suppleret med tangskove, da det hårde substrat som møllerne bidrager med vil strække sig helt op i den belyste zone.

Påvirkning af havets fødekæder

Det er endvidere muligt, at de negative effekter af fiskeriets fjernelse af rovdyr og dermed tab af "top-down" kontrol af de marine fødekæder uden for vindmølleparkerne, kan kompenseres af vindmøllerne, idet erosionsbeskyttelse vil danne skjulesteder for rovdyr som fx hummere og krabber. Endvidere kan tiltrækningen af rovfisk, som er en del af reveffekten, bidrage med samme effekt i nærområdet. Den mulige kompenserende effekt for fiskeriet på biodiversiteten afhænger dog af, i hvilket omfang der kommer til at foregå fiskeri i parkområderne. Over vandoverfladen vil forventes en påvirkning af havfuglene, som også befinder sig i af toppen af den marine fødekæde. Her forventes effekterne af tilstedeværelsen af en havvindmøllepark på fugleforekomster ofte at række langt ud over selve parkens nærområde og her er effekterne negative. Fugle der anvender havområderne til fouragering eller træk forholder sig primært til den visuelle tilstedeværelse af turbinerne. Effekten på fugleforekomster kan groft kategoriseres i tre emner: i) kollision imellem fugle og møller, ii) barriereeffekter og iii) fortrængning / tiltrækning til mølleparken. Tiltag, der reducerer risici for et af disse emner, kan have indflydelse på effekten af de andre emner. Mens effekten af kollisioner imellem fugle og turbiner har en direkte indflydelse på en bestand (idet fugle oftest dør af en kollision), så er effekten af f.eks. fortrængning eller barriereeffekter mindre direkte og sværere at kvantificere. Disse aspekter berører således både biodiversitet men også fuglenes rolle i det marine økosystem, og begge forhold må tages i betragtning. Effekten på fuglene vil muligvis ændre sig over tid, afhængigt af om der sker en gradvis tilvænnning (habituering). Graden og det tidsmæssige element af habituering vil kunne bidrage med vigtige informationer til en evaluering af kumulative effekter. Indsamling af oplysninger om gradvis habituering i forhold til eksisterende havvindmølleparker har hidtil ikke været prioriteret.

Det forventes at vindmøllefundamenter i sig selv er neutrale i forhold til vekselvirkning, med de presfaktorer der berører klimaforandringer og eutrofiering.

Risiko for indvandring af ikke hjemmehørende arter

Vindmølleparker kan udgøre en risiko for at øge introduktionen af ikke-hjemmehørende arter til de indre danske farvande. Det gælder i særlig grad organismer der er tilknyttet til det hårde substrat som vindmøllerne bidrager med, og i særlig grad på steder hvor denne type levesteder ikke eller sjældent forekommer naturligt som fx i den centrale og sydlige Nordsø. Netop fordi havvindmøllerne sættes med regelmæssig afstand langt fra kysten er der en relativt større chance for, at de kommer til at virke som trædesten end andre mere kystnære kunstige rev. At møller i åbne farvande koloniseres af ikke-hjemmehørende arter er dokumenteret (De Mesel mfl., 2015). En egentlig risikoanalyse af betydningen af store sammenhængende parkområder i regionale havområder for spredning af ikke-hjemmehørende arter er derimod ikke gennemført.

3 Nationale og Internationale erfaringer med natur og miljøvirkemidler i relation til havvind

Havvindmøller påvirker det fysiske havmiljø på mange forskellige måder ved f.eks. at skabe nyt substrat og ændre strømforholdene omkring møllerne. Der er i litteraturen foreslået forskellige "virkemidler", der kan bruges til at mindske og modificere denne miljøpåvirkning både i anlægs- og driftsfasen.

Dette afsnit er baseret på en gennemgang af beskrevne virkemidler fra peer reviewed forskningslitteratur og –rapporter. Litteraturen blev gennemgået vha. "Google Scholar". Søgningen blev foretaget 21-12-2021 med kriterierne: "wind turbine" "and" "marine" "and" "environmental impact", hvilket gav en liste på 9970 resultater. Gennemgang af først titler og nøgleord og derefter abstrakt reducerede listen til 184 relevante publikationer. Efterfølgende gennemgang af disse udgivelser blev brugt til at identificere potentielle virkemidler.

3.1 Minimering af effekten i planlægningsfasen

Generelt beskrives virkemidler som et supplement til at mindske påvirkninger af naturværdier, da miljøpåvirkninger bedst kan minimeres ved, allerede i planlægningsfasen, at tage højde for f.eks. en optimal parkplacering og herunder hvilke skridt, der kan tages for at mindske de samlede miljøkonsekvenser. Det understreges desuden ofte, at før konkrete virkemidler tages i brug, skal der foreligge en faglig vurdering af deres relevans i det givne projekt, samt et skøn af deres potentielle positive og negative miljøpåvirkninger. Der vil i den nedenstående tekst og i tabel 4.1, være en kort gennemgang af nogle relevante virkemidler, der er foreslået taget i brug i forbindelse med anlæggelsen og driften af havvindmølleparker.

Et virkemiddel, som allerede er taget i brug, er de metoder, der anvendes til at begrænse niveauet og / eller spredningen af undervandsstøj i anlægsfasen. Dette kan f.eks. være anvendelsen af boblegardiner, der udsender luftbobler som mindsker støj i forbindelse med ramning af monopæle ned i havbunden som fundament for turbiner. Nogle studier har også beskrevet andre metoder, såsom "Shell-in-shell" eller "Hydro sound damper" som kan bruges til at reducere støjniveauet (Wagenknecht 2021). I Modsætning hertil er den støj og vibration, som udsendes af havvindmøller i driftsfasen og dennes potentielle påvirkning på f.eks. fisk og bundfauna, ikke særlig velundersøgt (Popper mfl. 2022). Derfor er virkemidler for evt. at modvirke disse påvirkninger heller ikke afprøvet.

Nogle studier har foreslået at havvindmølleparker kan forvaltes som beskyttede områder og skabe et potentielt refugium (tilflugtssted) for f.eks. visse typer af fisk og havpattedyr, mens det dog samtidigt kan have negative påvirkninger på andre grupper såsom fugle (Hammar mfl., 2016).

3.2 Minimering af effekter på fugle

Størrelsen, mængden og tætheden af de enkelte havvindmøller i et givent område og deres geografiske udstrækning, vil afgøre påvirkningsgraden på miljøet. Eksempelvis vil antallet af fuglekollisioner afhænge af det samlede areal

som møllevingerne overstryger og af møllernes laveste vingespids-højde. Kollisionsfrekvensen for fuglene kan således reduceres ved at etablere færre men større møller, forudsat at det modificerede parkdesign ikke får flere individer der flyver i risiko-højde, eller får dem til at flyve ind imellem turbinerne. Det vil reducere arealet af vindmøllens vingeoverstryg sammenlignet med mange små møller, og det kan dermed reducere kollisionsrisikoen. På den anden side, vil større og højere møller potentielt påvirke andre artsgrupper af fugle, da de fugle der flyver i større højde vil have en kollisionsrisiko. Det gælder fx trækkende rovfugle, traner, gæs og lommer. Større møller vil også betyde større afstand mellem møllerne, færre individuelle fundamenter og dermed mindre kunstigt substrat, mindre kabelføring og potentielt mindre elektromagnetisk påvirkning. Det vil således, bortset fra de trækkende fugle, alt sammen betyde at vindmøllerne får et mindre "fodaftryk" på det omgivende miljø.

3.3 Minimering af visuelle effekter på arter

Refleksion fra selve møllen (af nogen kaldt "diskotekseffekten"; Nazir mfl. 2020) og lys omkring havvindmøllerne er blevet påvist at forstyrre benthiske samfund, havpattedyr og fugle samt fisk der naturligt lever i området (fx Becker mfl. 2013; Davies. mfl. 2015). Denne påvirkning kan modvirkes ("virkemiddel") ved at 1) kun bruge lys når nødvendigt, 2) bruge mindst mulig lysstyrke, 3) have ikke reflekterede overflader, og 4) anvende filtreret lys som påvirker mindst muligt (Davies mfl. 2020). For fuglenes vedkommende skønnes det vertikale lys at have den største effekt (se afsnit 4.8), og der skønnes derfor ikke at være forskel imellem parker med små og store turbiner.

3.4 Etablering og reetablering af habitater som virkemiddel

Et andet virkemiddel, der er blevet foreslået, men stadig er på test stadiet, er etablering og/eller restaurering af banker med europæisk østers inde i selve mølleparken (Kamermans mfl., 2018). Hvorvidt dette er en reel mulighed og hvilke miljøfordele / konsekvenser dette vil have, mangler stadig at blive undersøgt. Ved andre foreslåede virkemidler i litteraturen er der heller ikke skelnet mellem decideret akvakulturprojekter og naturbevaringsprojekter. Der er således stillet forslag om, at mølleparker pga. af deres fundament kan bruges som fysisk forankringspunkt og til at beskyttelse af akvakulturanlæg af blåmuslinger, østers og makroalger (Miller-Cieluch mfl., 2009; Buck mfl., 2004). De praktiske forhold og konkrete miljøpåvirkninger og effekter på havets fødekæder og biodiversitet af sådanne tiltag, mangler stadig at blive undersøgt i detaljer.

Der har i de senere år været en stigende interesse for aktiv naturgenopretning i marine områder. Det gælder reetablering af ålegræsengene (Lange, 2020 og Bruhn mfl., 2020) og stenrev (Stenberg mfl., 2015; Dahl mfl., 2020; Dahl og Göke, 2021). Der er gennemført flere ålegræsrestaureringsprojekter langs kysterne i Danmark. Møllernes typiske offshore placering på vanddybder dybere end 10 meter gør dog, at restaurering af ålegræs er irrelevant i parkerne, da det ligger uden for ålegræssets maksimale dybdeudbredelse. Restaurering af ålegræs i de kystnære dele af kabeltraceer, er derimod en mulighed som et virkemiddel.

3.5 Minimering af fysiske effekter

Det er i litteraturen blevet debatteret hvordan havvindmølleparker direkte påvirker de meteorologiske (f.eks. vindforhold; Christiansen mfl., 2022) og

hydrografiske forhold (f.eks. upwelling (dvs. opblanding af bundvand), sedimentation og blanding) både i selve parken og i det omgivne område (van Berkel mfl., 2020; Grashorn and Stanev 2016). I nogle tilfælde kan parken "blokere" for vandgennemstrømningen, så dele af vandet strømmer udenom i stedet for igennem parken (Floeter mfl., 2017). Sådanne ændringer i vind, strøm- og blandingsforhold i vandsøjlen kan direkte påvirke miljøforhold såsom lysnedtrængningen i vandsøjlen (Van der Molen mfl., 2014; Grashorn and Stanev 2016; Rivier mfl., 2016) og sedimentation (Maar mfl., 2009). Disse fysiske ændringer vil direkte påvirke de biologiske samfund på bunden i nærområdet (Maar mfl., 2009) på en måde der minder om eutrofieringseffekter med øget algeopvækst, øget sedimentation og øget risiko for iltsvind. Hvordan disse ændrede hydrografiske forhold, påvirker havmiljøet er dog alene baseret på teoretiske analyser, idet der ikke er foretaget de relevante målinger inde i parkerne endnu. Fremtidige studier, kunne derfor fastslå i hvilket omfang vindmølleparker kan medføre storskala effekter på hydrografen, samt hvordan evt. virkemidler (f.eks. ændringer af mølle placering og udformning) kan afhjælpe og minimere sådanne miljøpåvirkninger er derfor påkrævet.

Miljøpåvirkninger af elektromagnetiske felter dannet af kabler afhænger dels af kablets type og strømstyrke, men også af hvor dybt nede i sedimentet kablerne er begravet (Taormina mfl., 2018 og referencer heri). Påvirkningen af elektromagnetiske felter på forskellige organismegrupper er generelt ikke særlig velundersøgt og hvorvidt et virkemiddel, som nedgravningsdybden af kabler i sedimentet, eller ændringer i kablets isoleringsmateriale, kan afhjælpe sådanne potentielle effekter, er derfor stadig uafklaret (Hutchison mfl., 2018; Barauh 2016)

Fundament type (flydende eller med fast fundament) vil også påvirke de samfund, der gror på disse samt støjniveauet i anlægsfasen. Men det er også blevet påvist at fundamentets orientering, struktur, overflade har betydning for sammensætningen af samfundet. Generelt er de samfund, der gror på fundamentet anderledes end dem der gror på naturlig hårdt substrat (Wilhelmsson og Malm 2008). Derfor kunne et potentielt virkemiddel f.eks. være at ændre overfladernes struktur, men de konkrete fordele og ulemper af forskellige udformninger mangler stadig at blive undersøgt i detaljer.

3.6 Opsummering

Generelt mangler der dog stadig mere holistiske undersøgelser af havvindmøllers samlede påvirkninger på tværs af organismegrupper, og på tværs af geografisk adskilte parkområder. Der mangler især undersøgelse af ændret fiskeripraksis inde i parkområdet og hvilke effekter dette har på bundens heterogenitet og biodiversitet. Disse samlede positive, negative og neutrale påvirkninger på biodiversiteten og økosystemet, er endnu ikke sammenstillet hverken for de danske farvande eller i den internationale litteratur, der er samlet i projektet.

Sammenlagt vil virkemidlernes miljøpåvirkning og effektivitet under havoverfladen afhænge af en hele række af faktorer såsom farvandsområde, fundamentets struktur, hydrografi, sedimentation og lysklimaet. Tabel 3.1 giver en oversigt over de forskellige typer af virkemidler, der anvendes eller som foreslås som muligheder, til at mindske de negative effekter af havvind på havmiljøet og de biologiske samfund omkring møllerne.

Tabel 3.1: Oversigt som viser potentielle direkte virkemidler der kan tages i brug for at ændre natur og miljøpåvirkninger af havvindmølleparker. Bemærk: De beskrevne virkemidler og de potentielle miljøpåvirkninger er baseret på et litteraturstudie. De konkrete miljøpåvirkninger af havvindemøller i Danske farvande er generelt ikke blevet undersøgt og videre studier er derfor påkrævet for at bestemme konkrete miljøpåvirkninger

Virkemidler	Beskrivelse	Organismer påvirket	Vidensniveau	Referencer
Mølledesign	Design af møllerne (Højde, vingefang osv.) kan påvirke f.ek.s kollisions risikoen for fugle.	Fugle	Begrænset viden. Der foreligger enkle undersøgelser men der mangler yderligere studier for at kunne generalisere resultaterne.	Masden mfl., 2009, 2010a&b, og 2012
Belysningsprincipper	Det er påvist at lys omkring havvindmøllerne er blevet påvist at forstyrre havpattedyr og fugle samt fisk der naturligt lever i området.	Fugle, fisk og havpattedyr.	Begrænset viden. Der foreligger enkle undersøgelser men der mangler yderligere studier for at kunne generalisere resultaterne.	Bennun mfl., 2021
Reducere kollisionsrisiko - over vand	Studier beskriver at farvning af møllevingerne kan mindske kollisions risikoen for fugle.	Fugle.	Begrænset viden. Der foreligger enkle undersøgelser men der mangler yderligere studier for at kunne generalisere resultaterne.	
Kabelbeskyttelse	Elektromagnetiske felter genereret af kabler og deres påvirkning på dyrelivet afhænger dels af kablets type og strømstyrke, men også af hvor dybt i sedimentet kablerne er begravet.	Bundlevende dyr og havpattedyr.	Begrænset viden. Påvirkningen fra elektromagnetiske felter på forskellige organisme grupper er generelt ikke særlig velundersøgt og hvorvidt et virkemiddel, så som kabelnedgravning dybere i sedimentet eller ændringer i kablets isolering kan afhjælpe potentielle effekter er stadig uklart.	Taormina mfl., 2018

Tabel fortsættes på næste side

Tabel fortsat fra forrige side

Tabel 3.1: Oversigt som viser potentielle direkte virkemidler, der kan tages i brug for at ændre natur og miljøpåvirkninger af havvindmølleparker. Bemærk: De beskrevne virkemidler og de potentielle miljøpåvirkninger er baseret på et litteraturstudie. De konkrete miljøpåvirkninger af havvindemøller i Danske farvande er generelt ikke blevet undersøgt og videre studier er derfor påkrævet for at bestemme konkrete miljøpåvirkninger.

Virkemidler	Beskrivelse	Organismer påvirket	Vidensniveau	Referencer
Fundament overflade struktur	Ændringer af placering og fundaments overflades struktur kan påvirke hvilke organismer der begror fundamentet.	Epibentiske dyr og planter (f.eks. Muslinger).	Ikke undersøgt. Studier i forbindelse med f.eks. biofouling har påvist hvordan overfladestrukturen kan påvirke hvilke organismer der gror på overfladen, men studier i forhold til havvindmøllestrukturer mangler.	Carl.mfl., 2012; Scardino&Nys. 2011
Mølleplacering	Ændringer af afstand og placering af møller for at ændre f.eks. vandgenemstrømning.	Vandfase og bundlevende dyr (f.eks. Muslinger) samt havpattedyr.	Ikke undersøgt. Der er meget begrænset viden om dette emne da der mangler konkrete studier som påviser hvordan dette kan ændre miljøpåvirkningen.	van Berkel mfl., 2020; Grashorn and Stanev 2016
Erosionsbeskyttelse og udlægning af ekstra sten	Typen af erosionsbeskyttelse og udlægning af sten kan påvirke de bunddyrssamfund der lever i området.	Hårdbundsfauna.	Ikke undersøgt. Der foreligger ikke nogle konkrete studier på dette emne.	Maar mfl., 2009
Banker med europæisk østers	Etablering og/eller restaurering af banker med europæisk østers inde i selve mølleparken.	Bundlevende dyr.	Ikke undersøgt. Der foreligger ikke nogle konkrete studier på hvorvidt dette er en reel mulighed.	Kamermans mfl., 2018

4 Konkrete natur- og miljøvirkemidler

På baggrund af litteraturstudiet beskrevet i afsnit 3 kombineret med kendskabet til de danske farvandes miljø og naturforhold, er udlægning af stenrev og genopretning af ålegræsbede, identificeret som to mulige konkrete naturforbedrende tiltag, der kan iværksættes ved etablering af vindmølleparker og associerede kabelkorridorer. Stenrev og ålegræsbede er samtidigt de biotoper, som er de bedst undersøgte, når det gælder restaurering og reetablering. Mht. stenrev skelnes mellem reetablering/restaurering af stenrev og etablering af kunstige stenrev.

Etablering af østersbanker og udsætning af hummer er to andre mulige aktiviteter, hvormed man kan ændre de biologiske samfund. I tilfældet med hummerenen kan udsætningen evt. kombineres med kunstige og reetablerede stenrev.

Endelig foreslås en række andre virkemidler, som er knyttet til udformning af møllestrukturer, parkstruktur og drift af møllerne.

Etablering af blåmuslingebanker er ikke medtaget som et virkemiddel. Blåmuslinger vokser stort set kun i de øvre vandmasser (0 – ca. 15 m), hvilket i praksis begrænser virkemidlet til kabelkorridorer. Hertil kommer at naturlig predation af søstjerner er den sandsynlige grund til at blåmuslingebanker er sparsomme i f.eks. Kattegat. Længere sydpå i Bælthavet og vestlige Østersø, er der mangel på søstjerner pga. lav salinitet, og det er formentlig årsagen til at blåmuslinger er særdeles talrige på hårde bundtyper i den vestlige Østersø og i områder omkring Bornholm. I praksis synes virkemidler derfor begrænset til dele af Bælthavet.

4.1 Udlægning af stenrev

Indledningsvis beskrives de biologiske forhold, der kan forventes på naturlige stenrev i forhold til lys og salinitet, som er de to væsentligste naturgivne faktorer, der har betydning for det biologisk samfund på den hårde bund.

I relation til udlægning af sten som virkemiddel, skelnes der i det følgende mellem to forskellige virkemidler 1) reetablering (naturgenopretning) af eksisterende eller tidligere tiders stenrev og 2) etablering af rev, der er helt nye for lokaliteten. (kunstige rev). Opdelingen er foretaget ud fra både faglige og forvaltningsmæssige perspektiver.

4.1.1 Biologiske forhold på naturlige stenrev

Sten i den fotiske zone (den zone hvor der er lys nok til planternes vækst) vil skabe grundlag for tangskove af makroalger. Med stigende dybde og aftagende lys vil det biologiske samfund, der vokser på substratet (epibiota) gradvist blive domineret af fastsiddende fauna (epifauna). Ud over de fasthæftede organismer vil revstrukturene tiltrække og være et levested for mobile dyr som fx krebsdyr og fisk. Rev er et vigtigt habitat for forskellige arter af gruppen læbefisk, nålefisk, tangspræl og en række torskearter samt stenbider. Revene kan have forskellig funktion for de enkelte arter som gydeområde, opvækstområde eller fourageringsområde.

Hvor artsrigt det etablerede samfund af hårbundsorganismer bliver og hvilke arter der vil dominere, afhænger af lokalitetens saltholdighed og lysforholdene. Jo mere salt der er i vandet, jo højere en biodiversitet kan man forvente (Nielsen mfl., 1995). I den vestlige Østersø fra området omkring Møn's klint og videre østpå til Bornholm, består samfundet på den hårde bund på det lave vand, af et kystnært *Fucus*-domineret brunalge samfund mens algesamfundet på lidt dybere vand, består af et lavt tæppe over stenene af dværgformer af små rødalger samt af Østersøblåmuslingen. I Bælthavet stiger artsdiversiteten markant og den fortsætter med at stige fra Kattegat og ud i Skagerrak. Tangskovene bliver samtidige betydelig mere frodige med flerlaget vegetation og store individer og bidrager dermed til flere og mere forskellige skjulesteder for fx fiskeyngel.

Undersøgelser i dybdeintervallet mellem 4 og 10 m ved Mejl Flak og Lillegrund, der ligger mellem Samsø og Djursland (Samsøbælt), har vist, at der er mellem 10 og 30 gange større biomasse knyttet til den hårde bund med større sten sammenlignet med den omgivne blandede småstenede og grusede sedimentbund på samme vanddybde (Dahl mfl., 2005). Der er ikke lavet tilsvarende sammenligninger mellem den hårde bund og de omkringliggende mere bløde sedimentbunde på større vanddybder.

En undersøgelse af biomasser, der alene forekommer på den hårde bund fra et mere eksponeret område ved Hatter Barn i Bælthavet viser, at biomasserne aftager ganske betydeligt med stigende vanddybde (Dahl mfl., 2015). På et mere fladt plateau med stenrev på 8 -10 meters vanddybde var den gennemsnitlige biomasse 620 g askefri tørvægt pr. m². På revets skråning, på 15 -17 meters dybde, med meget tætte forekomster af store sten var biomassen faldet til 74 g askefri tørvægt pr. m² og på sten ved foden af revet på 18 -19 meters dybde var biomassen reduceret til knap 14 g askefri tørvægt per m². Undersøgelsen fandt også en klar signifikant positiv lineær sammenhæng mellem biomasser af makroalger og biomasser af fauna. Tilsvarende blev der fundet en signifikant positiv sammenhæng mellem algebiomasse og antallet af fritlevende faunaorganismer og mellem algebiomasser og antal fritlevende krebsdyr. Fasthæftede søpunge og havbørsteorme var de organismegrupper, der var mest talrige på større vanddybde. De samlede biomasser er noget højere end de tilsvarende biomasser som man finder på de blødere sedimentbunde (sand og mudder) Der er dog ikke sammenlignelige data fra det helt lave vand i de åbne farvande (8-10 m) som inkluderer rodfæstede planter (fx ålegræs). Det er dog forventeligt at biomassen af filtrerende dyr (f.eks. blåmuslinger) kan opnå meget højere biomasser på den hårde bund end på sediment bund. Det gælder i særlig grad de steder, hvor der både er en lav vanddybde og kraftig strøm og fravær af søstjerner.

4.1.2 Naturgenopretning af eksisterende eller tidligere revlokaliteter

Stenfiskeri har medført at mange kystnære stenrev er forarmet. Mængden af store sten er reduceret, og i mange tilfælde er havbunden sænket som følge af indvindingen. Stenfiskeri har efterstræbt sten på relativt lavt vand og sandsynligvis ikke meget dybere end 10 m i de tilfælde hvor man har anvendt dykkere. I virkemiddelsammenhæng vil naturgenopretning af stenrev formodentlig kun være relevant i de ganske få tilfælde, hvor fremtidige vindmølleparker anlægges kystnært på lavvandede lokaliteter hvor der samtidigt findes dokumentation for historiske stenrev. Til gengæld kan udlægning af sten være relevant i kystnære dele af kabelkorridorer. Stenrevslokaliteten ved Gil-

leleje Flak, er et sådant eksempel, hvor der kunne udlægges sten med det formål at restaurere naturtypen stenrev. Det eksisterende stenrev udgør her en del af udpegningsgrundlaget for Natura 2000 området, og det må således siges at være historisk dokumenteret. Miljøministeriet har allerede planlagt restaurerings aktiviteter for en mindre del af revområdet.

Forventet biologisk virkning

På lavvandede stenrev vil der over en periode på 8-10 år udvikles et klimaks samfund domineret af produktive tangskove af makroalger, såfremt lysforholdene er tilstede. Effekten i forhold til biodiversitet og økosystemtjenester vil afhænge af lokaliteten. I Østersøen vil effekten ikke være så markant pga. den lavere salinitet lige bortset fra den mest lavvandede zone, hvor blæretangsbæltet (*Fucus*) spiller en meget vigtig rolle som skjulested og opvækstområde for fisk

Undersøgelser på Bredgrund ud for Flensborg Fjord har vist, at torskebestanden var forøget ca. 100 gange på et nyanlagt revområde sammenlignet med et referenceområde og sammenlignet med forholdene før revet blev udlagt (Vilms mfl., 2021). Også på det genoprettede stenrev ved Læsø Trindel blev der observeret en markant øgning af torskearter (Støttrup mfl., 2014). Det er ikke undersøgt systematisk, i hvilket omfang nye revstrukturer tiltrækker fisk fra andre habitater eller om der reelt forekommer en egentlig merproduktion af fisk.

Undersøgelser ved det genoprettede lavvandede stenrev ved Læsø Trindel viste kaskader af økosystemeffekter op gennem fødekæder med en hurtig respons fra marsvin (*Phocoena phocoena*) (Mikkelsen mfl., 2013). Marsvinene opholdt sig dobbelt så ofte på revlokaliteten og hvert ophold varede i dobbelt så lang tid i forhold til situationen før restaureringen. Der var ingen ændring på referencelokaliteten.

Negativ effekt

Restaurering af ødelagte habitater kan have utilsigtede og uforudsete effekter, som dog ikke anses for at være negative, idet ændringerne i udgangspunkt, må betragtes som en tilbagevendende til en mere naturlig tilstand.

Risici

Risici anses som begrænset og kan fx bestå i at bunden pga. erosive processer ikke længere kan bære en udlægning af sten. Bundens bæreevne er undersøgt på to forskellige niveauer ved de to restaureringsprojekter ved Læsø Trindel og i Roskilde Fjord's indre bredning.

Forvaltningsmæssige implikationer

Der kan være sejladsmæssige forhold, der kan have en betydning for evt. projekters udformning. Men derudover forventes naturgenopretning af lavvandede stenrev ikke at være i konflikt med Havstrategidirektivets deskriptor 1 og 6, der omhandler biodiversitet generelt og havbundens integritet. Naturgenopretning inden for Natura 2000 områder vurderes ikke at være i strid med habitatdirektivet, så længe det genoprettede stenrev er foreneligt med udpegningsgrundlaget for det enkelte område.

Erfaringsgrundlag

Blue reef-projektet ved Læsø Trindel (Stenberg mfl., 2015) og Als stenrevsprojektet (Vilms mfl., 2022) er begge færdige projekter som er evalueret. Igangværende projekter (Gilleleje Flak, Roskilde innerbredning og Tårnbæk Rev)

4.1.3 Etablering af kunstige stenrev

Etablering af stenrev hvor der ikke tidligere har været stenrev eller andre typer af hård bund, vil ændre havbunden fra en havbund domineret af finere sedimenter. Det vil medføre en ændring i det associerede bundfaunasamfund fra primært infauna (dyr der lever nedgravet i sedimentet) til et nyt samfund der vil være domineret af såkaldt epifauna (dvs. dyr der lever ovenpå eller fasthæftet til substratet) på dybt vand eller makroalger på lavt vand. Etableres stenrevet på vanddybder større end 20 meters dybde, vil man i Bælthavet og Kattegat forvente samfund, der er domineret af fauna pga. reduceret lysforhold. I Nordsøen vil dybdegrænsen for makroalger formodentlig være omkring 25 m.

Forventet biologisk virkning

Ændringen af levestedet vil medføre ændrede biologiske samfund gående fra infauna dominerede dyresamfund til epifauna dominans. Fiskesammensætningen vil ligeledes ændres, idet arter af fladfisk vil vige til fordel for arter knyttet til den hårde bund som beskrevet ovenfor.

Hvis kunstige rev udlægges på lavere vanddybde fx i kabelkorridorer, kan man forvente en mere kompleks sammensætning af habitatet, hvor etablering af en højere biomasse af makroalger, i sig selv bidrager til dannelse af rumligt komplekse levesteder. Sådanne rev vil formodentlig også tiltrække marsvin på samme måde som dokumenteret på Læsø Trindel af Mikkelsen mfl., (2013). Hvorvidt marsvin også vil blive tiltrukket til stenrev på større vanddybde, er ikke undersøgt.

Negativ effekt

Etablering af kunstige stenrev vil medføre tab af et areal med den oprindelig habitat og biodiversitet (dvs. tab af autenticitet og oprindelighed). Herudover kan det kunstige stenrev bidrage til storskala-effekter i form af ændret konnektivitet mellem eksisterende (naturlige og kunstige) forekomster af hård bund og stenrev. I princippet vil dette i de fleste tilfælde øge biodiversiteten men sammensætningen af de biologiske samfund kan afvige fra den oprindelige (autentiske) sammensætning.

Risici

Når konnektiviteten ændres som følge af udlægning af kunstige stenrev i områder og miljøer hvor hårde substrater ikke allerede er naturligt forekommende, rummer det en risiko for at fremme indvandring af ikke hjemmehørende arter. Det kan i værste fald omfatte arter som kan betragtes som invasive. Risikoen består i at substratet kan fungere som en spredningsmæssig "trædesten". Trædestenseffekten er ikke undersøgt i danske farvande, og den vil være helt forskellig fra det ene område til det andet afhængigt af habitaternes arealer, strømmønstre og strømhastigheder og dermed transportafstande og -tider. Risikoen for at udlagte sten kan fremme indvandring af ikke-hjemmehørende arter vurderes størst i den centrale og sydlige Nordsø, hvor der ikke er kortlagt stenrev. Risikoen vurderes mindst i Bælthavet hvor rev er hyppige på mange forskellige vanddybder.

Der er endvidere en risiko for, at bunden ikke kan bære udlagte sten. Det kan skyldes gytje aflejringer eller plastisk ler. Der er et eksempel på flere kollapsede kunstige stenrev i svensk farvand hvor bundforholdene ikke på forhånd var undersøgt inden udlægning af sten.

Forvaltningsmæssige implikationer

Etablering af kunstige stenrev på naturtypen sandbanker i Natura-2000 områder kan med stor sandsynlighed ikke tillades. For habitatområder som fx sandbanker, der er dynamiske bundtyper (dvs. vedligeholdes af erodering af sedimenter, omlejring og sedimentation) kan der også være en problemstilling omkring tilladelse af "aktiviteter" uden for udpegede beskyttede område (sandbanken), i det tilfælde hvor denne sedimentdynamik påvirkes og dermed påvirker naturtypen.

De nævnte risici er omfattet af tre af Havstrategidirektivets deskriptorer. Havbundens integritet (Deskriptor 6) forholder sig til permanent tab af en havbundstype og her vil ændring af en type havbund til en anden, formodentligt blive betragtet som et tab af den oprindelige. Biodiversitet (Deskriptor 1) omfatter principielt alle de arter og samfund der reagerer på den ændrede habitat og hvorom der er defineret indikatorer. Endelig er der Deskriptor 2, der vedrører, ikke-hjemmehørende arter/invasive arter). Her kan ændret konnektivitet være i konflikt med GES målsætningen om ikke at øge introduktion, yderligere spredning og yderligere økosystemeffekter af ikke hjemmehørende arter. Der er dog ikke nogen eksplicit indikator der vedrører de ikke hjemmehørende arters levesteder og dermed heller ikke deres relation til udlægning af kunstigt substrat.

Endelig kan der være sejladsmæssige forhold, der kan have en betydning for evt. projekters udformning.

Der er ikke kendskab til den forvaltningsmæssige linje når det gælder balancen mellem tilladelse til etablering af kunstige rev, som ligger hos farvandsdirektoratet og hensynet til at minimere tabet af havbund i henhold til havstrategidirektivet.

Erfaringsgrundlag

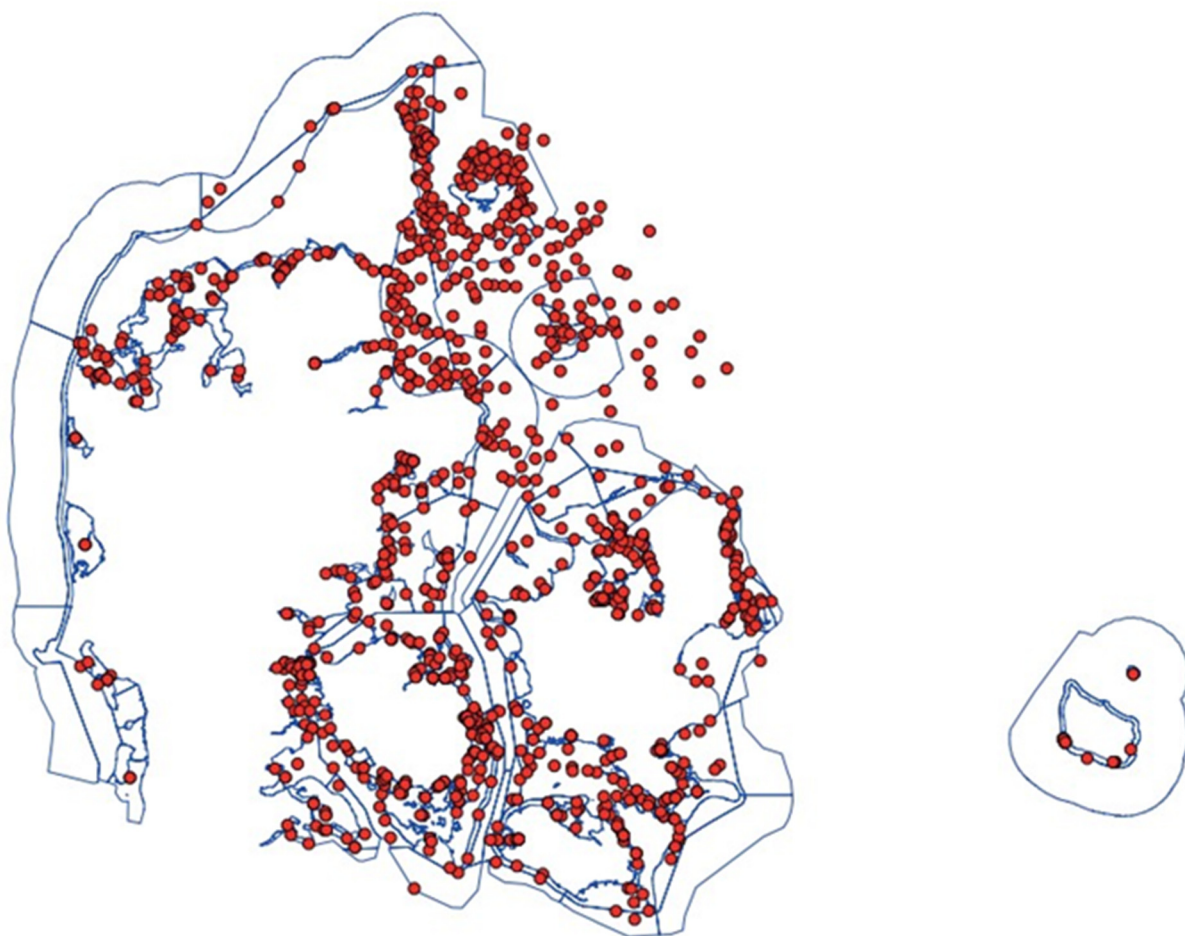
Der er anlagt nogle små kunstige stenrev i Flensborg Fjord (Svendsen mfl., 2022), et stenrev i Limfjorden (Dahl mfl., 2020) og endnu et ud for Spodsbjerg Fyr. Revet i Flensborg Fjord blev anlagt for at studere effekten af småstenede rev på fisk, revet i Limfjorden for at studere effekten af rev for vandkvaliteten (Staehr mfl., 2022) og revet ved Spodsbjerg er tænkt som et formidlingsrev.

4.2 Naturgenopretning af ålegræsbede

4.2.1 Ålegræshabitater

Ålegræs kan danne frodige enge på relativt lavt vand på steder med sand eller mudderblandet sandbund. Ålegræsbede binder næringsstoffer og kulstof og har derfor en positiv effekt på både vandmiljøet og klimaet. Engene er samtidig et vigtigt habitat for en lang række arter af hvirvelløse dyr, fisk som småtorsk og ål samt en række fuglearter (Bostrom mfl., 2014). Ålegræsbedenes økosystem tjenester og funktioner spænder fra gydeområder, opvækstområder og spisekammer. Ålegræs er endvidere kendt for at stabilisere sedimenter (Hemminga and Duarte, 2000) eller ligefrem akkumulere/opbygge sedimenter (Dahl, pers. obs). I 1930'erne var ålegræsenge vidt udbredt langs de danske kyster og også i mere åbne farvandsområder og på større vanddybder end i dag. En undtagelse var farvandet ud for den jyske vestkyst fra Esbjerg til Hanstholm. I 1930'erne blev ålegræsset voldsomt reduceret pga. ålegræsnygen og det har aldrig siden opnået den samme udbredelse som dengang (fig 4.1).

I dag er havbund med ålegræs betydelig mere sparsom både hvad angår arealer og dybdeudbredelse. Det estimeres at ålegræs historisk dækkede ca. 7000 km² havbund, mod ca. 2200 km² i dag (Staehr mfl., 2019).



Figur 4.1 Placering af de historiske observationer af ålegræssets dybdegrænse i perioden 1880-1930. Kortet viser samtlige observationer af ålegræs i dataindsamlingen (fra Krause-Jensen og Rasmussen, 2009).

4.2.2 Naturgenopretning af ålegræsbede

Restaurering af ålegræs habitater er relevante i lavvandede områder fra 1 meters dybde og ud til 4–8 meters dybde afhængig af forholdene på lokaliteten. I relation til havvindmølleparker kan det være relevant i forbindelse med kabelkorridorer, der løber ind til land gennem en havbundstype domineret af finere sedimenter.

Succesfuld restaurering af ålegræshabitater er gennemført ved udsået frø og ved udplantning af høstede planter med rhizomer fx i et tidevands estuarie i Californien (Beheshti mfl., 2022). Der er tilsvarende forsøg i gang i danske fjordområder som Horsens fjord (Lange mfl., 2020; Bruhn mfl., 2020). Udsået frø af ålegræs er testet, men succesen var begrænset i den svenske Gullmars Fjord (Enfantès mfl., 2016) og samme erfaringer har man fra danske forsøg (Flint, pers. Med.). Etablering ved høst af rhizomdele har derimod været succesfuld i fx Horsens Fjord.

Etablering af ålegræsbede kan konsolidere havbunden, og i nogle tilfælde ligefrem opbygge havbunden ved sedimentation og dermed skabe kulstoflagret i havbunden. Det kan være en fordel i de tilfælde hvor der er behov for at beskytte nedgravede kabler i havbunden mod blotlæggelse pga. erosion.

Negativ effekt

Der er ingen negativ effekt forbundet med retablering af ålegræsenge.

Risici

Der er ikke knyttet biologiske risici til restaurering af ålegræsenge, men restaureringen kan slå fejl.

Forvaltningsmæssige implikationer

Retablering af ålegræsenge vurderes at kunne gennemføres uden implikation langs de danske kyster, også i beskyttede Natura 2000 områder hvor sandbanker (type 1110), kystlaguner (type 1150) eller lavvandede fjorde og vige (type 1160) udgør udpegningsgrundlaget.

Erfaringsgrundlag

Syddansk Universitet har erfaringer med ålegræs restaurering i både Odense Fjord og Horsens Fjord.

4.3 Udsætning af hummer

Hummer (*Homarus gammarus*) er knyttet til hård bund, hvor den lever ret territorielt. Om dagen lever hummeren i skjul i en hule, under sten eller mellem sten. Om natten jager den muslinger og andre byttedyr på havbunden og den går ikke af vejen for at spise artsfæller. Hummer blev over en lang årrække kun observeret ganske få gange i forbindelse med NOVANA-programmets overvågning af stenrev i danske farvande. Men i de senere år er antallet af observationer steget (Dahl, pers. obs). I Limfjorden er fangstmængden næsten 10 dobbelt over 10 år, men om det skyldes øget bestand eller ændret fiskeritryk, er endnu uklart.

Forventet biologisk virkning

Udsætning af små hummere klækket og opdrættet i et anlæg, vil fremme kolonisering af arten på udlagte stenrev eller i mindre områder med udlagte sten som erosionsbeskyttelse. Hvor store bestande og tætheder af hummere der kan være tilstede, før kannibalisme bliver en væsentlig faktor er uvist, ligesom deres eventuelle konkurrence og nicheopdeling med andre krebsdyr (fx tasekrabber) er ukendt.

Negativ effekt

Der vil være en afledt men naturlig effekt af hummernes predation på den omgivne bunds muslingeforekomster samt andre egnede bunddyr. En lignende effekt blev beskrevet for strandkrabber ved Nysted vindmøllepark (Maar mfl., 2009). Her menes effekten at bero på, at krabberne kunne leve i skjul beskyttet af erosionsbeskyttelsen ved møllerne og vandre ud på bunden om natten for at fouragere på den øvrige bundfauna. Som konsekvens heraf, var den omkringliggende havbund domineret af bittesmå dyndsnegle, der formodentligt ikke efterstræbtes af krabberne.

Risici

Opdræt af hummer for udsætning kan føre til introduktion af sygdomme.

Forvaltningsmæssige implikationer

Opdræt og udsætning af arter i den danske natur kan være omfattet af anden lovgivning.

Erfaringsgrundlag

DTU Aqua har erfaring med klækning og opdræt af hummer i skaldyrscentret i Limfjorden. Der foregår også aktuelt forskning omkring hummeradfærd i fjorden med akustisk mærkede hummere.

4.4 Etablering af europæisk østers banker

Større banker af europæisk østers (*Ostrea edulis*) fandtes tidligere i den sydlige del af Nordsøen, og der er i dag tanker om at genoprette banker i Belgien (Kamermans, 2018). Europæisk østers blev omkring 1900 tallet også registreret enkelte steder i den sydlige Nordsø ud for Fanø, ud for Hirtshals og i dele af Kattegat samt Limfjorden (Nordmann, 1903). Ifølge Køie mfl., (1999) findes der i dag mindre naturlige bestande i Nordsøen, Skagerrak og i Limfjorden hvor der er et fiskeri efter arten. Den europæiske østers konkurrerer med den ikke hjemmehørende slægtning; stillehavsøstersen som også er revdannende.

Forsøg med etablering af europæisk østers som erosionsbeskyttelse omkring møllefundamenter forventes påbegyndt i Belgien.

Forventet biologisk virkning

Etablering af østersbanker vil fungere som et biogent rev. Der kan skabes fast substrat for epifauna på større vanddybde og de fysiske strukturer vil danne levested for mobile bunddyr og fisk.

Negativ effekt

Udlægning af banker vil påvirke den eksisterende fauna

Risici

Der er ikke udført reetableringsforsøg med østers i åbne farvande, så succesraten kendes ikke.

Håndtering af østers er ifølge Litehauz (2016) årsagen til ca. 20% af observerede invasive arter i Danmark, men ifølge appendiks 1 i den pågældende rapport kan der være flere samtidige transportveje for flere arter.

Forvaltningsmæssige implikationer

Opdræt og udsætning af arter i den danske natur kan være omfattet af lovgivning.

Erfaringsgrundlag

Dansk skaldyrs center under DTU Aqua har erfaring med opdræt af europæisk østers.

4.5 Faunaafvisende udformning af møllefundament og erosionsbeskyttelse

Hvis der foreligger en risikovurdering for at en park er lokaliseret så introduktion af ikke hjemmehørende arter kan fremmes, kan et tiltag være at hindre eller formindske på vækst af fasthæftede epifauna og makroalger på konstruktions overflader (møllefundamenter og erosionsbeskyttelse)

Forventet biologisk virkning

At mindske begroning og levested for hårbundsfauna mest muligt.

Negativ effekt

Evt. brug af antifouling belægning kan have en effekt på de biologiske samfund på den omkringliggende havbund

Risici

Mulige toksiske effekter af bundmaling på de biologiske samfund på møllerfundamenter og nærområder.

Forvaltningsmæssige implikationer

Ingen kendte.

4.6 Fauna fremmede udformning af møllefundament og erosionsbeskyttelse

Hvis der er politisk vilje til at fremme kunstige rev, kan man arbejde med at udforme både møllefundamenter og erosionsbeskyttelse, så de i højest mulige omfang tilgodeser, at fasthæftede arter kan etablere sig og at erosionsbeskyttelsen er så strukturelt varieret (størrelsessammensætning og mulighed for huledannelse) således, at der er nicher for både større og mindre dyr at skjule sig i.

Forventet biologisk virkning

Vil fremme artsdiversitet for samfund knyttet til den hårde bund.

Negativ effekt

Der kan være afledte predationseffekter og evt. øget sedimentation af kulstof på den omkringliggende havbund.

Risici

Øget indvandring af ikke hjemmehørende arter i områder hvor hård bund ikke er naturligt forekommende.

Forvaltningsmæssige implikationer

Ingen kendt.

4.7 Møllepark design i relation til effekter på fugle

Der er en række fuglearter, der har udvist ændrede fordelingsmønstre ved etablering af havvindmølleparker. Det gælder i varierende grad lommer, suler, havlit, sortand, alkefugle og rider. Eksperimentelle studier har vist, at mølleparkernes design kan have indflydelse på fuglenes reaktion på strukturerne (Masden mfl., 2008, 2010a, 2010b, 2012, 2016). Fuglenes flyveruter kan påvirkes også af tilstedeværelse af turbinerne. Det er teorien, at fuglenes respons på turbinernes eller parkens tilstedeværelse i forhold til deres flyveadfærd afhænger af mølleparkens design.

Ændret flyveadfærd kan påvirke fuglenes fysiologiske energiforbrug. Ved små forlængelser af flyveruter under træk, forventes effekten af være negligerbar, mens påvirkningen kan have større effekter i situationer hvor fugle passerer vindmølleparken mange gange. Et sådant eksempel kan være en park, der placeres imellem fugles yngleområde og deres fourageringsområder, med potentielt mange passager pr. døgn.

Hvis fuglene undgår havvindmølleparker under deres flyveruter, kan det også få indflydelse på deres anvendelse af mølleparkens område til fouragering.

Forventet biologisk virkning

Effekten af fuglenes flyvemønstre i og omkring en møllepark forventes at være afhængig af den indbyrdes tæthed af turbinerne, deres størrelse og deres rumlige arrangement i området. Det er forventningen at turbiner arrangeret i tæt formation vil have en større indvirkning på fuglenes flyveadfærd end en park med meget stor afstand imellem møllerne.

Med større afstand imellem turbinerne forventes en række fuglearter i større omfang at flyve ind i en møllepark. Det kan reducere effekten af fortrængning af rastende fugle omend omfang ikke er belyst.

Det rumlige arrangement af mølleparken kan fremstå som en større eller mindre barriere for flyvende fugle. Barriereeffekten af en møllepark forventes at kunne reduceres ved at arrangere mølleparken langs en flyvelinje, og ikke på tværs af en sådan.

Negativ effekt

Man skal være opmærksom på, at ved etablering af mølleparker med stor afstand imellem turbinerne formodes det at aktiviteten af flyvende fugle imellem turbinerne vil øges. Derved kan fortrængning fra potentielle fourageringsområder reduceres, men samtidig kan risikoen for kollisioner imellem fugle og turbiner øges.

Risici

Se ovenfor.

Forvaltningsmæssige implikationer

Forskelle imellem effekten af forskellige mølleparkdesigns er teoretisk anskuet, og det vil kræve indsamling af nye data og grundige analyser at dokumentere graden af effekt.

Erfaringsgrundlag

Der foreligger meget begrænset erfaring med vindmølleparkeres design og disses forskellige indvirkning på fugles flyvemønstre. I Holland findes der to nærtliggende vindmølleparker, Egmond aan See, med tæt arrangerede turbiner, mens vindmølleparken, Princess Amalia Wind Farm har større afstand imellem turbinerne. Resultater tyder på at alkefugle i højere grad opholder sig i Princess Amalia end Egmond aan See. Der er imidlertid også hydrografiske forskelle imellem de to parker, så det er vanskeligt at konkludere, at det er vindmølleparkdesignet, der er årsag til forskellen.

4.8 Belysning af den operationelle havvindmøllepark

Der er behov for belysning af havvindmølleparkerne, og belysningen er reguleret af lovgivning. Der skelnes imellem horisontal og vertikal belysning. Den horisontale belysning skal sikre skibstrafik. Den er generelt diskret, med blinkende, ofte røde, lysmarkeringer på turbiner i mølleparkens periferi. Som afmærkning for flytrafikken har mølleparkerne desuden permanent, hvidt lys, der er masket af for horisontal spredning for at reducere visuelle gener.

Det er kendt at stærkt lys tiltrækker flyvende fugle. Tiltrækning af nattrækkende landfugle til det vertikale lys i en havvindmøllepark vil kunne øge risikoen for kollisioner meget betydeligt. Kollisionsrisikoen er ikke alene begrænset til roterende møllevinger. Der kan også ske kollisioner med mølletårnene i de tilfælde hvor fuglene blive blindet af lyset eller tiltrukket af møllerne eller andre strukturer i vindmølleparkerne

For havfugle, der ofte bevæger sig lavt over vandet, er der ikke stor risiko for tiltrækning til det vertikale lys pga. blindgørelse. Havfugle, som f.eks. lommer, forventes at blive påvirket af synlig belysning på nattehimlen. I helt klart vejr spredes den vertikale belysning kun meget lidt horisontalt, men i situationer med skyet vejr med lave skybaser, oplyses skybasen, hvilket er synligt på meget stor afstand (på samme måde som lyset fra byer eller store drivhuse i tilsvarende vejr på landjorden). Det antages at i sådanne situationer vil det afholde havfugle fra at søge i nærheden af havvindmølleparker, og at det kan være årsagen til den beskrevne effekt, hvor lommer fortrænges ud til store afstande fra mølleparkerne, som er beskrevet.

Ved at reducere den tid der er kraftigt vertikalt lys på mølleparkerne til et minimum, kunne kollisioner i forbindelse med tiltrækning af nattrækkende landfugle og fortrængning af visse havfugle reduceres betydeligt. Der er krav om permanent vertikal belysning om natten af hensyn til flysikkerheden. Men det lodrette lys kan tilsluttes en automatisk tænding/slukning, der styres af tilstedeværelse eller fraværet af transpondere fra fly. Der er for indeværende ikke lovhjemmel for indførelse af et sådant system i Danmark. Der er heller ikke vished for hvor meget indførelse af systemet vil kunne afhjælpe kollisioner og/eller fortrængninger. Undersøgelser af effekten af dette, vil potentielt kunne afhjælpe betydelige negative effekter fra tilstedeværelsen af havvindmølleparker.

Forventet biologisk virkning

Det forventes at reduktion af anvendelse af vertikalt lys i havvindmølleparkerne, vil kunne reducere risiko for kollision imellem nattrækkende landfugle og turbindstrukturer. Desuden vil det i teorien reducere fortrængning af visse arter af havfugle.

Negativ effekt

Der vil ikke være kendte negative effekter for miljøet af reduceret anvendelse af vertikalt lys.

Risici

Der vil ikke være kendte risici for miljøet ved reduceret anvendelse af vertikalt lys.

Forvaltningsmæssige implikationer

Der er for indeværende ikke lovmæssig hjemmel til at anvende transponder signaler til at tænde og slukke det vertikale lys i havvindmølleparkerne.

Erfaringsgrundlag

Der er meget begrænset viden om effekten af reduktion af det vertikale lys i mølleparkerne. Et vidensgrundlag bør opbygges som en strategisk planlægning af fremtidig drift af mølleparkerne.

4.9 Temporær nedlukning af mølleparkens drift

Kollisioner imellem trækkende landfugle og turbiner skønnes at forekomme i specifikke vejsituationer og på specifikke årstider. Sådanne overvågnings-systemer findes allerede på markedet. Systemer anvender typisk en kombination af radar registreringer af fugleforekomster, kombineret med video overvågning og eventuelt audioovervågning. Risikoen for kollisioner stiger meget i usigtbart vejr. En kombination af data fra overvågningen med registrering af vejsituationer vil kunne kvalificere en beslutningsproces om temporær nedlukning af mølleparkens drift, eventuelt kombineret med reduktion af belysning i mølleparken, idet lyset i særlig grad tiltrækker fugle i sådanne situationer.

Forventet biologisk virkning

Nedlukning af mølleparkens drift i situationer med massiv aktivitet af nat-trækkende landfugle, og med usigtbart vejr, vil forventelig kunne reducere risikoen for kollisioner imellem fugle og vindmøller evt. i kombination med reduceret vertikalt lys.

Negativ effekt

Der er ingen kendte negative biologiske effekter af virkemidlet.

Risici

Der er ingen kendte risici af virkemidlet.

Forvaltningsmæssige implikationer

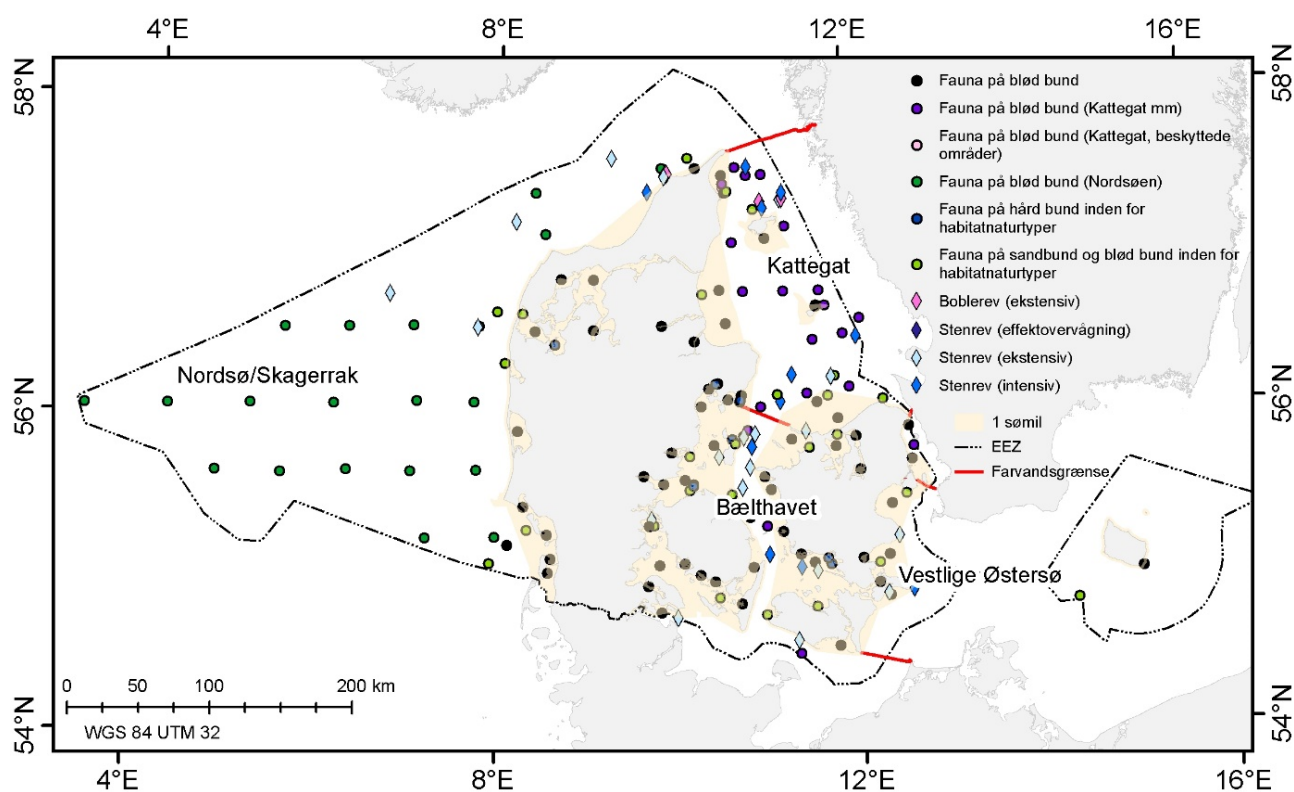
Der er for indeværende ikke lovmæssig hjemmel til at slukke det vertikale lys i havvindmølleparkerne. Det er forbundet med produktionstab at foretage nedlukning af mølleparkens drift.

Erfaringsgrundlag

Der findes en række beskrevne erfaringer af sådanne anlæg (se f.eks. Georgiev & Zehtindjiev 2021).

5 Forvaltningsmæssige overvågningsbehov i havvindmølleparker

Danmark har en lang tradition for at overvåge levesteder og biologiske samfund i de danske farvande. Allerede i begyndelsen af det forrige århundrede gennemførte CGJ Petersen (Petersen 1913) en systematisk monitoring af havbunden i de indre danske farvande, med det formål at vurdere fødegrundlaget for fiskebestandene. Senere, fra 1970'erne har den marine overvågning været fokuseret på at følge den tidlige udvikling i forureningstilstand i bred forstand, og i forbindelse med vedtagelse af vandmiljøplanerne fra 1980'erne og frem, har der været et særligt fokus på at overvåge effekter af næringsberigelse (eutrofiering) på havmiljøet. Overvågningsprogrammerne omfatter både fysiske, kemiske og biologiske parametre, og de dækker flere niveauer i den marine fødekæde. Overvågningen af det marine miljø og den marine natur sker under det nationale NOVANA-program, understøtter både nationale overvågningsbehov og EU-direktivbundne overvågningsbehov (Figur 5.1). Samlet set, er der således en meget stor mængde data for det danske havmiljø, som dækker en meget lang tidsperiode. I forbindelse med EU's havstrategi foregår der tillige en løbende metodisk harmonisering med de øvrige EU-lande, som bl.a. koordineres af de regionale havkonventioner HELCOM og OSPAR.



Figur 5.1. Nuværende fordeling af NOVANA overvågningsstationer og stationsområder for henholdsvis blødbundsfauna, stenrev og boblerev i danske farvande. Markerede overvågningsstationer for blødbundsfauna omfatter dels punktstationer og stationsnet med 4 individuelle prøvetagningsstationer.

Der eksisterer endnu ikke fastlagte retningslinjer for hvordan havvindmølleparker skal overvåges i forhold til principperne om en økosystembaseret forvaltning. Når det gælder havvindmølleparkernes forventede påvirkninger af havets levesteder og økosystemer, er der dog flere oplagte overvågningsaktiviteter, som kan være/blive nødvendige. Formålet vil dels være at kunne følge vindmøllernes påvirkning af økosystemet forvaltningsmæssigt og dels at kunne opretholde en balanceret og repræsentativ overvågning af det stadig større areal af de marine områder, som udbygges med vindmølleparker. I det følgende gives der eksempler på hvilke mulige nye overvågningsbehov, der kan være relevante i vindmølleparker, set i lyset af de formodede effekter af konstruktionerne. Der er således ikke tale om nogen systematisk gennemgang af alle de parametre, der er en del af det nationale overvågningsprogram, og i dag kun overvåges på arealer der ligger uden for vindmølleparker. I forhold til introduktion af nye metoder og parametre, vil dette sandsynligvis kræve forudgående videnskabelige undersøgelser, før der kan udfærdiges en endelig metodebeskrivelse, der kan anvendes i et overvågningsprogram.

Det nationale overvågningsprogram

I forhold til det eksisterende NOVANA-program kan der være behov for at flytte og/eller etablere nye overvågningsstationer for at dække de arealer der et udlagt til havvind. I forhold til de forventede effekter af vindmølleparker på eksisterende biologiske samfund og på økosystemernes funktioner, kan det blive nødvendigt at inkludere nye overvågningsparametre, fordi disse mulige effekter ikke er undersøgt systematisk og derfor i et vist omfang er ukendte.

For at kunne beskrive mulige ændringer i biodiversitet og økosystemfunktion i fremtiden, er det en anbefaling, at man følger eksisterende metoder og tekniske anvisninger, der er udarbejdet for de eksisterende overvågningsparametre i NOVANA-programmet. Det vil sikre sammenlignelighed med de lange tidsserier, der allerede eksisterer fra før den store udbygning af havvindskete i Danmark. Det vil kunne bruges til at beskrive både lokale effekter (arealer inden for vindmølleparker) og regionale effekter (generelt i de danske farvande) af havvind i fremtiden.

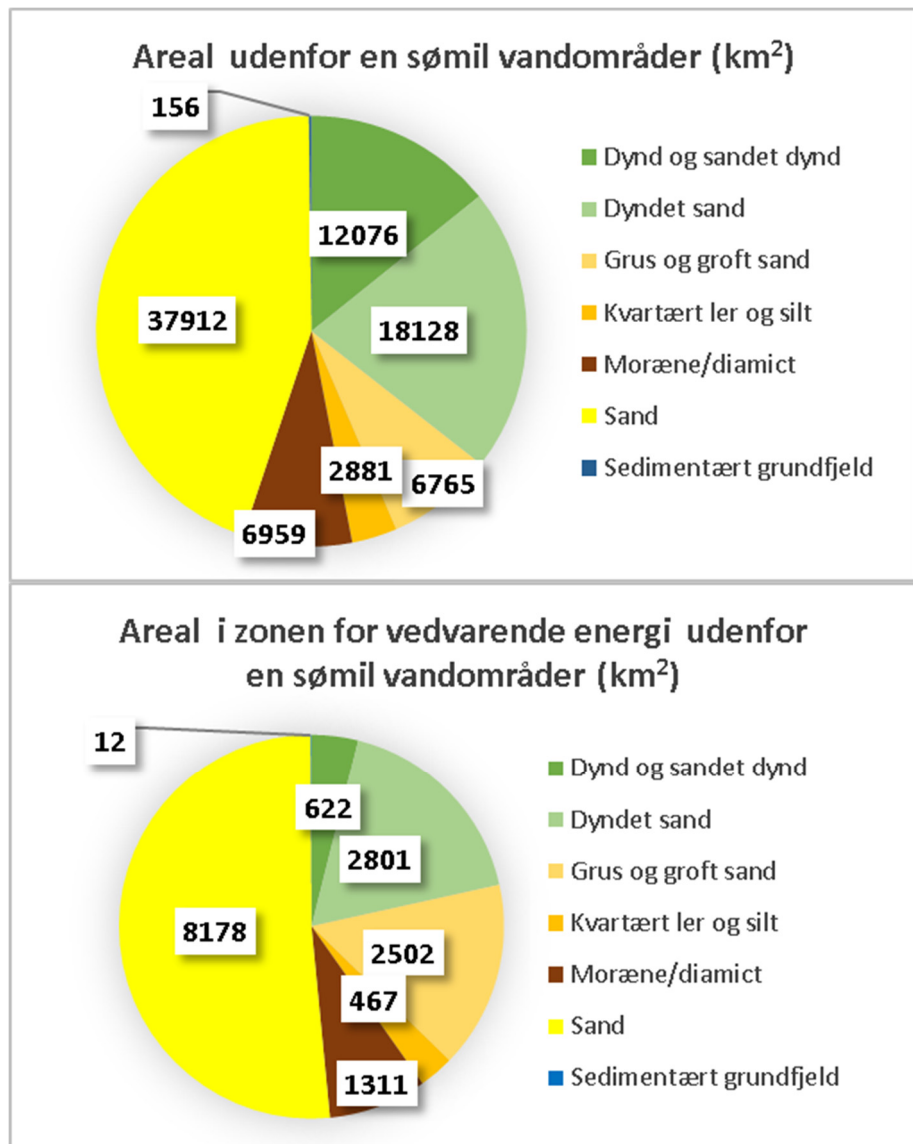
Overvågning af havbundens integritet

I forhold til udviklingen af et overvågningsprogram for Havstrategidirektivets indikatorer for havbundens integritet (**Deskriptor 6**), så er det DCE's forventning, at det bliver nødvendigt at placere overvågningsstationer inden for parkområderne for at kunne dække denne del af det danske havbundsareal repræsentativt i forhold til de forskellige sedimenttyper. I forhold til det nuværende NOVANA-program er det endvidere anbefalingen, at opdelingen i de sedimenttyper, der overvåges, kommer til at følge samme opdeling, der er anvendt i regi af de regionale havkonventioner, HELCOM og OSPAR, således at sammenligneligheden sikres regionalt, på tværs af landenes territorialgrænser. Havvindmølleparker er ikke placeret repræsentativt i forhold til de forskellige havbundstyper. Eksempelvis er bundtypen "kvartært silt og ler" overrepræsenteret inden for vindmølleparker mens fx "dyndet sand og ler" er underrepræsenteret (Figur 5.2). For at kunne følge udviklingen på de enkelte bundtyper i og udenfor for parkerne, kan det derfor blive nødvendigt at have en højere tæthed af overvågningsstationer inden i parkerne, for at dække de forskellige havbundstyper som havvindmøllerne er opført på repræsentativt.

I hvilket omfang der skal etableres nye henholdsvis flyttede stationer kræver en nøjere analyse. Vægtningen af stationsantal i forhold til den arealmæssige

udbredelse af de enkelte havbundstyper er en præmis, der først er introduceret med EU's havstrategidirektiv. I det nuværende NOVANA-program er stationsantallet således heller ikke vægtet i forhold til arealerne af de forskellige havbundstyper (Figur 5.2). Det er dels et udtryk for at overvågningsprogrammer over tid, har skullet opfylde mange forskellige formål, hvor hensynet til at bevare værdifulde tidsserier har været afvejet mod behovet for programændringer og dels et udtryk for at kortlægningen af den danske havbund løbende opnår en højere detaljeringsgrad.

Figur 5.2. Øverst: Den arealmæssige fordeling af sedimenttyper på havbunden i de danske farvande. Nederst: Den arealmæssige fordeling af sedimenttyper i arealer der er udlagt til havvind. Arealer angivet i lagkageplottet medregner ikke havområder indenfor vandområdernes 1 sømil grænse.



Overvågning af effekter på havets fødenet

I forhold til de særlige påvirkninger som vindmølleparker kan have på økosystemstruktur, kan det være relevant med et særskilt program for havvindmølleparker. Havstrategidirektivets **deskriptor 4**, omhandler strukturen af havets fødenet og dermed reveffekter. De mulige reveffekter og herunder hypotesen om, at vindmølleparkerne fremmer rovdysene i fødekæden, kan undersøges ved sammenlignende studier i og uden for havvindmølleparken.

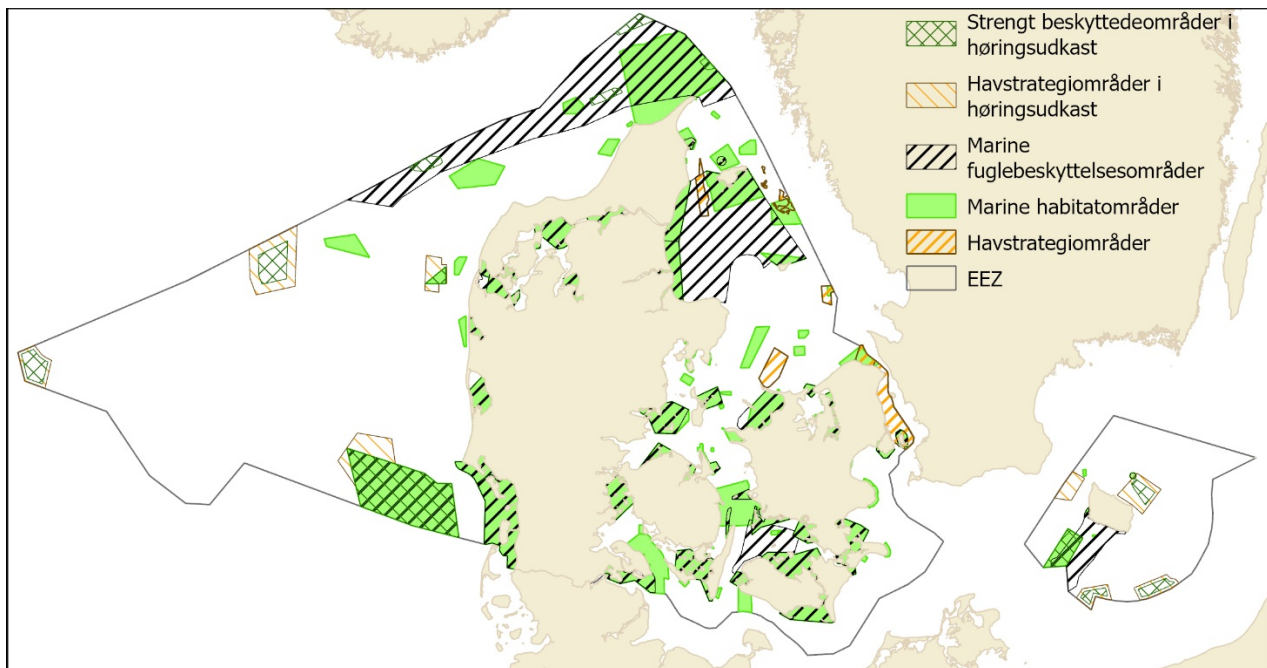
Havvindmølleparkernes mulige betydning for introduktion af ikke hjemmehørende arter vedrører Havstrategidirektivets **deskriptor 2**. Denne deskriptor

overvåges med data fra monitoringen af alle de biologiske parametre som indeholder dataformater på artsniveau. Herudover overvåges der for introduktion af ikke hjemmehørende arter i havne, og som en del af ballastvandkonventionen. Denne overvågning af ikke hjemmehørende arter i Danmark er baseret på både molekylære detektionsmetoder (eDNA), klassiske taksonomiske metoder og processer som rekruttering monitoreres forsøgsvis med setlingsplader hvor bundfældningen/rekrutteringen af larveplanktonet undersøges.

Risikovurdering for introduktion af ikke hjemmehørende arter i forhold til placeringen af danske og udenlandske vindmølleparker og deres påvirkning kan undersøges med "sporstoffer" (tracerstudier) i hydrodynamiske modeller, der belyser af konnektiviteten for hårbundsorganismer.

Udbygning af Natura 2000 netværket og nye overvågningsparametre

Vindmølleparker er i dag stort set placeret udenfor Natura 2000 netværket, der rummer beskyttede naturtyper og arter udpeget under Habitatdirektivet og Fuglebeskyttelsesområder (Figur 5.3). For visse biodiversitetsindikatorer under Havstrategidirektivets **deskriptor 1** kan det evt. være relevant at foretage sammenlignende studier mellem Natura 2000 områder og vindmølleparker.



Figur 5.3. Kort over beskyttede områder i danske farvande i henhold til Fuglebeskyttelsesdirektivet, Habitatdirektivet og Havstrategidirektivet og områder der er under behandling for fremtidig beskyttelse (høringsudkast)

Overvågningsparametre, der omhandler hydrografiske forhold og plankton indgår både i Vandramme- og Havstrategidirektivet. For Havstrategidirektivet omhandler det **deskriptor 7** (hydrografiske ændringer) og **deskriptor 4** (havets fødenet), som også omfatter plante- og zooplankton i de frie vandmasser. Ved monitorering af de frie vandmasser (pelagialt) bør stationerne dække de relevante vandmasser og behøver således ikke nødvendigvis at være placeret inde i vindmølleparkerne. Men vindmøllernes fundamenter kan evt. med fordel anvendes til automatiseret dataindsamling af temperatur, vandkemi, strømforhold, plante- og dyreplankton. Mulige ændringer af hydrografiske forhold kan formodentligt bedst undersøges med hydrodynamiske modeller evt. kalibreret til lokale målinger fra automatiserede målestationer i vindmølleparkerne.

6 Virkemidlernes omkostninger

AU har kun et vist kendskab til omkostninger for de direkte virkemidler for ålegræs og stenrev.

Omkostninger til implementering af evt. forvaltningsinitiativer vil der blive set bort fra og omkostninger til overvågning vil kræve en mere tilbundsående diskussion om omfang, tekniske retningslinjer m.m.

6.1 Ålegræs udplantning

I forbindelse med udarbejdelsen af virkemiddelkataloget (Bruhn mfl., 2020) er omkostningerne forbundet med restaurering af ålegræsenge ved plantning af skud estimeret til knap 250.000 kr./ha. Forudsætningerne for beregningerne er grundigt beskrevet i rapporten

6.2 Stenrev

Udgifterne pr. ha udlagt sten afhænger i høj grad af om sten udlægges i et lag eller om de udlægges på en måde så strukturer bygges op i flere lag.

I Miljøstyrelsens Blue Reef projektet ved Læsø Trindel for godt 13 år siden blev der udlagt sten ud på ca. 2,75 ha. Et relativt stort, men ikke specificeret areal, blev udlagt med strukturer der rejste sig op til 5,5 meter over den omliggende havbund mens det resterende område ikke var fuldt dækket med sten. Samlet blev der udlagt ca. 100.000 tons sten fra et norsk granitbrud. Omkostningerne til sten og udlægning af sten beløb sig til ca. 24 mill. i 2008.

Da sten ofte anvendes til erosionsbeskyttelse i relation til vindmøllefundamenter må der foreligge erfaringer om omkostninger pr. tons i branchen.

7 Afrunding og perspektivering

Ambitionerne om udbygning af havvindmølleparker i danske farvande er store, og omfatter for indeværende udbygning af yderligere 10 GW frem mod 2030. Hertil kommer, at vores nabolande tilsvarende planlægger at gennemføre udbygningen af havvind. Der må forventes at være stadigt stigende modsætninger imellem udbygningsplanerne af havvind og beskyttelse af nogle af havområdernes naturværdier. Andre naturværdier, som fx samfund på den bløde bund, kan afhængig af den fremtidige forvaltning af fiskeriindsatsen gå hen og få gavn af udbygningen.

Udbygningen af havvind påvirker havmiljøet i samspil med en lang række andre presfaktorer som klimaforandringer, forstyrrelse af havbunden, fiskeri og eutrofiering. Denne vekselvirkning påvirker de marine arter i en større geografisk skala, hvor effekten af et virkemiddel kan være forskellig afhængigt af, om man ser på den enkelte vindmøllepark eller i hele artens udbredelsesområde.

En litteraturgennemgang har vist, at kendskabet til vindmøllers effekt på den omgivne natur og miljø kun er ringe undersøgt set i forhold til de arealer der afsættes til havvind. Tilsvarende er der meget lidt dokumentation og viden om tiltag, som kan fungere som virkemidler for at fremme miljø- og naturforhold.

Dette projekt peger på to oplagte direkte virkemidler, som begge er knyttet til restaurering af vegetationsdækkede habitater i kystnære områder: Udlægning af sten i tidligere stenrevsområder eller udplantning af ålegræsbede på sandede substrater. De vil på grund af den lave vanddybde for begge virkemidler have størst relevans i relation til den kystnære del af kabel korridorer. Begge habitattypers arealudbredelse er gået betydeligt tilbage. Brug af disse virkemidler på udvalgte steder, er i god tråd med igangværende initiativer både for at forbedre vandmiljøet, men også for restaurering af meget værdifulde levesteder og økosystem tjenester i mange led i fødekæden. Der er et erfaringsgrundlag for restaureringer af begge habitater og begge virkemidler vil samtidig øge beskyttelsen af de udlagte kabler.

Etablering af nye kunstige stenrev er også et muligt virkemiddel i vindmølleparker. Sådanne rev vil typisk blive anlagt på dybt vand, og den biologiske effekt vil være den samme som ved erosionsbeskyttelse omkring møllefundamenter. Hårdbundsamfund vil blive fremmet på bekostning af de eksisterende samfund domineret af infauna. Etablering af kunstige rev rummer nogle dilemmaer omkring varige ændringer af autentiske undersøiske landskaber. Etablering af stenrev, hvor sådanne naturtyper ikke findes naturligt i forvejen, kan være forbundet med en risiko for introduktion af fremmede arter, særligt i den centrale og sydlige Nordsø. Her bør der ud fra et forsigtighedsprincip tilstræbes den mindst mulige påvirkning af levesteder og arter snarere end at anvende ekstra havbundsareal til etablering af et virkemiddel. Det bør afklares om der er en konflikt mellem etablering af kunstige rev og flere af Havstrategidirektivets deskriptorer.

Etablering af banker af europæisk østers og udsætning af hummer er to andre mulige direkte virkemidler. I hvilket omfang etablering af østersbanker kan betragtes som genopretning, og om de fysiske forhold rent faktisk er tilstede

i Nordsøen, Skagerrak og Kattegat for egentlige banker, er uvist. Udsætning af hummer vil kunne fremme en naturlig udvikling, som ville forventes at finde sted over tid alligevel. Vedvarende udsætninger kan derimod ses som biomanipulation og have præg af ekstensiv akvakultur.

Med hensyn til havfugle er der foreslået en række tekniske virkemidler knyttet til belysning, bemaling og online trækmonitoring, der muliggør nedlukning af drift og potentielt også belysning i specifikke situationer. I det første tilfælde drejer det sig om belysningsprincipper, som kan begrænse fugle kollisioner og potentielt også fortrængning. Mølleparkeres design kan have indflydelse på graden af påvirkning af havfugle, hvor store turbiner med stor indbyrdes afstand kan have en reduceret fortrængningseffekt, men samtidig potentielt øge risikoen for kollisioner for visse arter.

Der er et meget stort behov for at sikre vidensopbygning angående effekter på havfugle fra eksisterende havvindmølleparker for at kvalificere beslutningsprocessen for fremtidige anlæg.

Med den stigende udbygning af havvind vil der samtidig være et stigende behov for at udføre overvågning inden for parkerne. Både for at dække det generelle NOVANA programs forpligtigelser over for EU's direktiver, men også for at belyse effekter af parkerne. I dag er adgangen til parkerne begrænset. At sikre fremtidig overvågningsadgang og opsætning og servicerede af automatiske overvågningsfaciliteter i henhold til de nationale tekniske retningslinjer vil være et virkemiddel, der vil tilgodese den nationale forvaltning af marine områder. Automatiske målestationer vil kunne levere data til verifikation og justering af nationale farvandsmodeller. Til finansiering af forskning og overvågningsaktiviteter kunne man fx forestille sig en ordning betalt af erhvervet, efter model fra produktionsafgiftsfondene og promilleafgiftsfondene, jf. Landbrugsstøtteleven kapitel 2 (Landbrugsstøtteleven (retsinformation.dk)). Her er ved lov fastsat, at Ministeren kan opkræve en afgift af konkrete aktiviteter, i dette tilfælde opførelse af vindmølleparker på havet. Som i Landbrugsstøtteleven kan man fx bestemme, at midlerne skal anvendes til miljøforbedrende initiativer og forskning inden for de konkrete formål midlerne er opkrævet til.

Danmark har havvindmølleparker, der har været operationelle i næsten 20 år. Parkernes langtidseffekt på fuglenes fordeling, hydrografi, miljø og de benthiske samfund bør undersøges grundigt. Tilsvarende bør det sikres, at specifikke aspekter af formodede effekter på bl.a. fugle gøres til genstand for undersøgelser i og omkring både eksisterende og kommende havvindmølleparker. Sådanne resultater vil kunne kvalificere beslutningsprocessen omkring placering af kommende havvindmølleparker.

I takt med stigende behov for arealer til havvindmøller vil behovet for grundige overvejelser omkring kumulative effekter (den kombinerede effekt på tværs af organisme grupper og områder) blive intensiveret. Hertil kommer, at udbygningen sker samtidigt med at levesteder og arter er påvirket af en lang række andre presfaktorer.

Der er for indeværende en generel uklar tilgang til behandlingen af kumulative effekter både hvad angår forskning, rådgivning og forvaltning. Det gælder både den geografiske udstrækning af en vurdering af kumulative effekter og i forståelse af hvilke menneskelige påvirkninger, der skal indgå i en vurdering. For fugle og mange benthiske organismer, er det område der er aktuelt

for en kumulativ vurdering meget større end området for mindre mobile arter. Der er i relation til mange kumulative vurderinger behov for et internationalt perspektiv. For eksempel vil vurderinger for trækkende fuglebestande strække sig over arternes flyverute. Klarhed over principperne for vurderinger af kumulative effekter vil være af stor vigtighed. Det er et krav at en VVM-redegørelse skal indeholde afsnit om kumulative effekter. Ofte er det en næsten umulig opgave at løfte for en enkelt havvindmølle-udbygningsplan. Der er et tydeligt behov for at løfte analyser af kumulative effekter til et højere administrativt plan, således at en VVM-redegørelse udelukkende vurderer, hvordan en given park kan bidrage til en kumulativ effekt for relevante arter, og at samlede kumulative effekter på populations-niveau gennemføres af en mere overordnet instans.

En sikring af bedst mulig sameksistens imellem udbygningsplanerne og naturværdier ligger i en grundig strategisk planlægning. Med et grundigt overblik over truede naturværdier (levesteder og arter) vil en sensitivitetskortlægninger med fordel kunne gennemføres i det samlede område udlagt til havvind 2030. En sådan tilgang skønnes at kunne bidrage langt mere effektivt til at reducere effekter af havvindmølleparker på naturværdier end kompenserende foranstaltninger i relation til specifikke vindmølleparker. Her vil det dog også være nødvendigt med et særskilt overvågningsprogram til at opsamle erfaringer for at kunne validere og opdatere en sådan sensitivitetskortlægning.

8 Referencer

Baruah, B. (2016). 'A Review of the Evidence of Electromagnetic Field (Emf) Effects on Marine Organisms'. Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences 4. Available at: <http://www.researchgate.net/publication/3111111365266412024>

Becke Becker A, Whitfield AK, Cowley PD, Jarnegren J, Næsje TF. (2013) Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary associated fishes. *J. Appl. Ecol.* 50, 43– 50. (doi:10. 1111 / 1365-2664.12024).

Beheshti, K. M., Williams, S. L., Boyer, K. E., Endris, C., Clemons, A., Grimes, T., Wasson, K., and Hughes, B. B.. (2022). Rapid enhancement of multiple ecosystem services following the restoration of a coastal foundation species. *Ecological Applications* 32 (1):e02466. 10.1002 / eap.2466.

Bennun, L., van Bochove, J., Ng, C., Fletcher, C., Wilson, D., Phair, N., Carbone, G. (2021). Mitigating biodiversity impacts associated with solar and wind energy development. Guidelines for project developers. land, Switzerland: IUCN and Cambridge, UK: The Biodiversity Consultancy.

Bendtsen J & Hansen JLS (2013a). A model of life cycle, connectivity and population stability of benthic macro-invertebrates in the North Sea-Baltic Sea transition zone. *Ecological modelling* 267: 54-65

Bendtsen J & Hansen JLS. (2013b) Effects of global warming on hypoxia in the Baltic Sea – North Sea transition zone. *Ecological Modelling* 264: 17-26

Bostrom, C., Baden, S., Bockelmann, A. C., Dromph, K., Fredriksen, S., Gustafsson, C., mfl., (2014). Distribution, structure and function of Nordic eelgrass (*Zostera marina*) ecosystems: implications for coastal management and conservation. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 24, 410–434. doi: 10.1002 / aqc.2424

Bruhn A, Flindt MR, Hasler B, Krause-Jensen D, Larsen MM, Maar M, Petersen JK og Timmermann K. (2020). Marine virkemidler – beskrivelse af virkemidlernes effekter og status for vidensgrundlag. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 126. - Videnskabelig rapport nr. 368 <http://dce.au.dk/pub/SR368.pdf>

Buck, B.H., Krause, G., Rosenthal, H., (2004). Extensive open ocean aquaculture development within wind farms in Germany: the prospect of offshore co-management and legal constraints. *Ocean Coast. Manag.* 47, 95–122. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.04.002>.

Carl C., Poole A.J., Sexton B.A., Glenn F.L., Vucko M.J., Williams M.R., Whalan S. & de Nys R. (2012) Enhancing the settlement and attachment strength of pediveligers of *Mytilus galloprovincialis* by changing surface wettability and microtopography, *Biofouling*, 28:2, 175-186, DOI: 10.1080 / 08927014.2012.662676

Carstensen J., Conley D. J., Andersen J.H. og Ærtebjerg G. (2006) Coastal eutrophication and trend reversal: a Danish case study. *Limnol Oceanogr.* 51: 398-408.

Christiansen N, Daewel U, Djath B and Schrum C (2022) Emergence of Large-Scale Hydrodynamic Structures Due to Atmospheric Offshore Wind Farm Wakes. *Front. Mar. Sci.* 9:818501. doi: 10.3389/fmars.2022.818501

Dahl K, Al-Hamdani Z, Svendsen JC & Christoffersen M. (2020). Naturgenopretning af stenrev i Roskilde Fjord. Designforslag. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 17 s. - Teknisk rapport nr. 171 <http://dce2.au.dk/pub/TR171.pdf>

Dahl, K., Buur, H., Andersen, O.N., Göke, C. & Tonetta, D. (2020). Indvandring og biodiversitet på det nye stenrev ved Livø. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 60 s. - Videnskabelig rapport nr. 405 <http://dce2.au.dk/pub/SR405.pdf>

Dahl, K. & Göke, C. (2021). Naturgenopretning af stenrev i Øresundsregionen – en identifikation af mulige lokaliteter. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 28 s. - Teknisk rapport nr. 200 <http://dce2.au.dk/pub/TR200.pdf>

Dahl, K., Andersen N.G., Møhlenberg, F., Lundsteen, S., Andersen, O.G.N., Göke, C., Rasmussen, M.B., Stæhr P.A. og Grønkjær P. (2015) Arbejdspakke 3: Habitatkvalitet og fødeproduktion (Fauna & Føde) fra Stenrev som gyde- og opvækstområde for fisk (Revfisk) C. Stenberg & L. D. Kristensen (red.). Stenrev som gyde- og opvækstområde for fisk. DTU Aqua-rapport nr. 294-2015. Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet. 290 pp.

Dahl, K., Lundsteen, S. & Tendal, O. S. (2005): Mejlgrund og Lillegrund. En undersøgelse af biologisk diversitet på et lavvandet område med stenrev i Samsø Bælt. Danmarks Miljø undersøgelser & Århus Amt, Natur & Miljø. 87 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 529. <http://faglige-rapporter.dmu.dk>

Davies Thomas W., Bennie Jonathan and Gaston Kevin J. (2012) Street lighting changes the composition of invertebrate communities. *Biol. Lett.* 8:764–767 <http://doi.org/10.1098/rsbl.2012.0216>

Davies, T.W., McKee, D., Fishwick, J. *mfl.*, (2020) Biologically important artificial light at night on the seafloor. *Sci Rep* 10, 12545. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69461-6>

Ejrnæs, R., Nygaard, B., Kjær, C., Holm, T. E., Strandberg, B. Johansson, L. S., Søndergaard, M., Wiberg-Larsen, P., Fløjgaard, C., Sterup, J., Hansen R. R., Elmeros, M., Hansen, M. D. D., Clausen, K., Brunbjerg, A. K., Moeslund, J. E., Baattrup-Pedersen, A., Johnsen, T. J., Hansen, J. L. S. (2021). Danmarks biodiversitet 2020 - Status, udvikling og trusler. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi - Videnskabelig rapport nr. 465. <http://dce2.au.dk/pub/SR465.pdf>

De Mesel, I., Kerckhof, F., Norro, A. *mfl.*, (2015): Succession and seasonal dynamics of the epifauna community on offshore wind farm foundations and their role as stepping stones for non-indigenous species. *Hydrobiologia* 756, 37–50. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-2157-1>

Floeter, J., van Beusekom, J.E., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hänselmann, K., Hufnagel, M., Janssen, S., Lenhart, H., Moller, K.E., North, R.P., Pohlmann, T., Rieth-muller, R., Schulz, S., Spreizenbath, S., Temming, A., Walter, B., Zielinski, O., Mollmann, C. (2017): Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Progress in Oceanography* 156:154–173, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.003>.

Georgiev, M. & Zehindjiev, P. (2021). Real-time bird detection and risk control in wind farms. Wind Europe Conference, Copenhagen, November 2021 <https://www.researchgate.net/profile/Pavel-Zehindjiev/publication/357879511-REAL-TIME-BIRD-DETECTION-AND-COLLISION-RISK-CONTROL-IN-WIND-FARMS/links/61e5619bc5e31033759f55e0/REAL-TIME-BIRD-DETECTION-AND-COLLISION-RISK-CONTROL-IN-WIND-FARMS.pdf>

GEUS (1998). Israndslinier i Norden. <https://frisbee.geus.dk/geuswebshop/>

Grashorn, S., Stanev, E.V. (2016): Kármán vortex and turbulent wake generation by wind park piles. *Ocean Dynamics* 66: 1543–1557. Doi: 10.1007/s10236-016-0995-2.

Hammar L, Perry D, Gullström M (2016) Offshore wind power for marine conservation. *Open J Marine Sci* 06:66–78. <https://doi.org/10.4236/ojms.2016.61007>

Hemminga, M. A., and Duarte, C. M. (2000). *Seagrass Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511525551

Hutchison, Z., Sigray, P., He, H., Gill, A., King, J. and Gibson, C. (2018). Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables. Report by University of Rhode Island. Report for Bureau of Ocean Energy Management (BOEM). Available at: <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Hutchison2018.pdf>

Holbrook, N. J., Scannell, H. A., Gupta, A. S., Benthuyssen, J. A., Feng, M., Oliver, E. C. & Wernberg, T. (2019). A global assessment of marine heatwaves and their drivers. *Nature Communications*, 10 (1), 1-13.

Høgslund, S., Carstensen, J., Krause-Jensen, D. & Hansen, J.L.S. (2019). Sammenhænge i det marine miljø - Betydning af sedimentændringer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 74 s. - Videnskabelig rapport nr. 323 <http://dce2.au.dk/pub/SR323.pdf>

Infantes, E., L. Eriander, and P. O. Moksnes (2016). Eelgrass (*Zostera marina* L.) restoration methods on the west coast of Sweden using seeds. *Marine Ecology Progress Series* 546.

Josefson AB & Hansen JLS. (2004). Species richness of benthic macrofauna in Danish estuaries and coastal areas. *Global Ecol. and Biogeogr.* 13 (3): 273-28.

Josefson AB, Loo L-O, Blomqvist M, Rolanson J. (2018). Substantial change in the depth distribution of benthic invertebrates in the eastern Kattegat since 1880s Ecology and Evolution: 8 (18): 9426-9438.

Kamermans, P.; Walles, B.; Kraan, M.; Van Duren, L.A.; Kleissen, F.; Van der Have, T.M.; Smaal, A.C.; Poelman, M. (2018) Offshore Wind Farms as Potential Locations for Flat Oyster (*Ostrea edulis*) Restoration in the Dutch North Sea. Sustainability 10, 3942. <https://doi.org/10.3390/su10113942>

Krause-Jensen, D. & Rasmussen, M.B. (2009): Historisk udbredelse af ålegræs i danske kystområder. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. 38s. – Faglig rapport fra DMU nr. 755. <http://www.dmu.dk/Pub/FR755.pdf>

Krause-Jensen, D., Duarte, C. M., Sand-Jensen, K., & Carstensen, J. (2021). Century-long records reveal shifting challenges to seagrass recovery. Global Change Biology, 27(3), 563-575.

Køie, M. Kristiansen Aa. & Weitemayer, S. (1999) Havets dyr og planter, Gyl-dendal, 2. udgave.

Lange, T., Wendländer, N., Svane, N., Steinfurth, R., Nielsen, B., Rasch, C., Kristensen E. & Flindt, M.R. (2020) Storskala-transplantation af ålegræs – metoder og perspektiver. Vand og Jord 27 årgang nr 1.

Leth, J.O. (ed.) mfl., 2021. Seabed sediment of Denmark. Digital map. <https://data.geus.dk/MetaVis/Klik.jsp?id=2167&lang=da>

LITEHAUZ (2016). Non-indigenous species from hull fouling in Danish marine waters. Naturstyrelsen , 70 pp. ISBN no. 978-87-7175-558-9

Maar, M., Bolding, K., Petersen, J.K., Hansen J.L.S. & Timmermann K. (2009) Local effects of blue mussels around turbine foundations in an ecosystem model of Nysted off-shore wind farm. J. Sea Res., 62, pp. 159-174 DOI:10.1016/j.seares.2009.01.008

Masden, E.A. & A.S.C.P. Cook (2016): Avian collision risk models for wind energy impact assessments. – Environ. Imp. Asses. Rev. 56: 43-49.

Masden, E.A., D.T. Haydon, A.D. Fox, R.W. Furness, R. Bullman & M. Desholm (2009): Barriers to movement: impacts of wind farms on migrating birds. – ICES J. Mar. Sci. 66: 746-753.

Masden, E.A., D.T. Haydon, A.D. Fox & R.W. Furness (2010a): Barriers to movement: modelling energetic costs of avoiding marine wind farms amongst breeding seabirds. – Mar. Poll. Bull. 60: 1085-1091.

Masden, E.A., A.D. Fox, R.W. Furness, R. Bullman & D.T. Haydon (2010b): Cumulative impact assessments and bird / wind farm interactions: developing a conceptual framework. – Environ. Imp. Asses. Rev. 30: 1-7.

Masden, E.A., R.E. Reeve, M. Desholm, A.D. Fox, R.W. Furness & D.T. Haydon (2012): Assessing the impact of marine wind farms on birds through movement modelling. – J. Roy. Soc. Interface 9: 2120-2130.

Mikkelsen, L., K. N. Mouritsen, K. Dahl, J. Teilmann, and J. Tougaard (2013). Re-established stony reef attracts harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Marine Ecology Progress Series* 481: 239-248.

Miljø- og Fødevareministeriet (2019) Danmarks Havstrategi II Første del: God tilstand, Basisanalyse, Miljømål. Miljø og fødevareministeriet https://mim.dk/media/216857/hsii_foerste_del_-_endelig_udgave.pdf

Miljøstyrelsen 2020. Marine naturtyper (2004-2018). <https://www.geodata-info.dk/srv/dan/catalog.search#/metadata/bd87fc5d-f43a-4bc0-8583-29c9f960ac35>

Miller-Cieluch, T., Krause, G., Buck, B.H., (2009). Aquaculture within offshore wind farms : social aspects of multiple-use planning. *GAIA Ecol. Perspect. Sci. Soc.* 18, 158–162

Nielsen, R., AA. Kristiansen, L. Mathiesen, and H. Mathiesen (1995). Distributional index of the benthic macroalgae of the Baltic Sea area. *Acta botanica fennica*, The Baltic Marine Biologists Publication No. 18 vol. 155: 1-51.

Nazir, M.S., Ali, N., Bilal, M., Iqbal, H.M.N., (2020). Potential environmental impacts of wind energy development: a global perspective. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 13, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.01.002>.

Nordemann, P.J., Hansen, J.W., Jeppesen, E., Wiberg-Larsen, P., Hansen, J.L.S., Jakobsen H.H., Stæhr, P.A., Dahl, K. (2015). Klimaforandringerne betydning for vandområder - med fokus på de biologiske kvalitetselementer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 106 p. Videnskabelig rapport, Vol. 146.

Nordmann (1903) Meddelelser fra Dansk geologisk Forening. Nr. 9. København. 1903. pp. 45-60.

Petersen, C. G. J. (1913). Havets Bonitering II. Om Havbundens Dyresamfund og om disses betydning for den marine Zoogeografi. Beretn. Minist. Landbr. Fisk. Dan. Biol. Stn., 21, 1–42

Popper, A.N., Hice-Dunton, L., Jenkins, E., Higgs, D.M., Krebs, J., Mooney, A., Rice, A., Roberts, L., Thomsen, F., Vigness-Raposa K., Zeddies D., and Williams K.A. (2022). Offshore wind energy development: Research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *The Journal of the Acoustical Society of America* 151, 205-215 (2022) <https://doi.org/10.1121/10.0009237>

Remane A. (1934). Die brackwasserfauna (Mit besonderer Beruecksichtigung der Ostsee). *Zoologischer Anzeiger* 7 suppl: 34-74.

Riemann B, Carstensen J, Dahl K, Fossing H, Hansen JW, Jakobsen H, Josefson AB, Krause-Jensen D, Markager S, Stæhr P, Timmermann K, Windolf J, Andersen JH (2016) Recovery of Danish coastal ecosystems after reductions in nutrient loading: A Holistic Ecosystem Approach. *Estuaries and coasts* 39: 82-97.

Rivier, A., A.C. Bennis, G. Pinon, V. Magar, M. Gross. (2016). Parameterization of wind turbine impacts on hydrodynamics and sediment transport. *Ocean Dynamics* 66:1285–1299. Doi: 10.1007/s10236-016-0983-6.

Scardino AJ, de Nys R. (2011). Mini review: biomimetic models and bioinspired surfaces for fouling control. *Biofouling* 27:73–86.

Stenberg C., Støttrup, J. Dahl, K., Lundsteen, S., Göke C. and Andersen O.N (2015) Ecological benefits from restoring a marine cavernous boulder reef in Kattegat, Denmark - DTU Aqua reportnr.289-2015

Staehr, P.A., Göke, C., Holbach, A.M., Krause-Jensen, D., Timmermann, K., Upadhyay, S. and Ørberg, S.B. (2019). Habitat model of eelgrass in Danish coastal waters: development, validation and management perspectives. *Frontiers in Marine Science*. 6(175). doi: 10.3389/fmars.2019.00175.

Staehr, PA, Jacobsen HH, Hansen JLS, Andersen P, Christensen J, Göke C, Thomsen M, Stebbing P. (2020). Trends in records and contribution of non-indigenous species and cryptogenic species to marine communities in Danish waters: Potential indicators for assessing impacts. *Aquatic Invasions* 15: 217-244.

Staehr, P. A. U., S. U. Staehr, D. Tonetta, S. Høgslund, and M. M. Nielsen (2022). Contribution of boulder reef habitats to oxygen dynamics of a shallow estuary. *Science of The Total Environment* 805: 150261.

Støttrup, J. G., C. Stenberg, K. Dahl, L. D. Kristensen, and K. Richardson (2014). Restoration of a temperate reef: Effects on the fish community. *Open Journal of Ecology* 4: 1045.

Svendsen, J.C., Kruse, B.M., Wilms, T., Dahl, K., Buur, H., Andersen, O.G.N., Bertelsen, J.L., Kindt-Larsen, L. (2022). The importance of reef habitats for fish, harbor porpoise and fisheries management. DTU Aqua Report no. 397-2022. National Institute of Aquatic Resources, Technical University of Denmark, 79 pp.

Steneck, R. S. (1998). Human influences on coastal ecosystems: does overfishing create trophic cascades? *Trends in Ecology & Evolution* 13, 429-430 Søfartsstyrelsen (2021) Havplanredegørelse, havplansekretariatet pp.57 <https://havplan.dk>

Taormina, B., J. Bald, A. Want, G. Thouzeau, M. Lejart, N. Desroy, and A. Carrier. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 96:380–391, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>.

Wagenknecht F.(2021). Assessment of noise mitigation measures during pile driving of larger offshore wind foundations. *EGU Journal of Renewable Energy Short Reviews*. 19-23.

van Berkel, J., Burchard, H., Christensen, A., Mortensen, L.O., Svenstrup Petersen, O., Thomsen, F (2020): The effects of offshore wind farms on hydrodynamics and implications for fishes. *Oceanography* 33:108–117. Doi: 10.5670/oceanog.2020.410

van der Molen, J., H.C. Smith, P. Lepper, S. Limpenny, J. Rees (2014): Predicting the large-scale consequences of offshore wind turbine array development on a North Sea ecosystem. *Continental Shelf Research* 85:60–72. Doi: 10.1016/j.csr.2014.05.018.

Wilhelmsson, D., & Malm, T. (2008). Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3), 459-466.

Wilms, T. J. G., P. H. Norðfoss, H. Baktoft, J. G. Støttrup, B. M. Kruse, and J. C. Svendsen (2021). Restoring marine ecosystems: Spatial reef configuration triggers taxon-specific responses among early colonizers. *J Appl Ecol* 58: 2936-2950.

VIDENSKATALOG

Potentielle natur og miljø virkemidler, forvaltningsprincipper og overvågning i vindmølleparkområder

Rapporten beskriver virkemidler der kan bringes i spil i kommende vindpark områder. Virkemidlerne omfatter både aktive initiativer til gavn for den marine biodiversitet samt overvågnings- og forvaltningsinitiativer. Forslagene er baseret på et litteratur studium af lignende initiativer i relation til vindparker i andre lande samt en faglig vurdering af forholdene i danske farvande.

ISBN: 978-87-7156-675-8
ISSN: 2244-9981