

Effekter av havsbaserad vindkraft på fisk

Marcus C Öhman



RAPPORT 7115 | JUNI 2023



Effekter av havsbaserad vindkraft på fisk

av Marcus C Öhman

AquaBiota Water Research

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-7115-8

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2023

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2023

Omslagsfoto: Marcus C Öhman



Förord

Forskningsprogrammet Vindval är ett samarbete mellan Energimyndigheten och Naturvårdsverket med uppgiften att ta fram och förmedla vetenskapligt baserade fakta om vindkraftens effekter på människa, natur och miljö. Inom programmet har hittills över 50 forskningsprojekt finansierats. Utöver detta har fyra syntesrapporter tagits fram, varav tre har uppdaterats. I syntesrapporterna sammanställer och bedömer experter de samlade forskningsresultaten och erfarenheterna av vindkraftens effekter nationellt samt internationellt inom fyra områden: Människors intressen, fåglar och fladdermöss, marint liv och däggdjur på land.

Resultaten från Vindvals forskning har bidragit till underlag för miljökonsekvensbeskrivningar samt planerings- och tillståndprocesser i samband med etablering av vindkraftsanläggningar. Dessutom ska resultaten från Vindval komma till användning i tillsyn och kontrollprogram samt myndigheters vägledning. Ett av Vindvals fokusområden är planering och de avvägningar mellan miljö och socioekonomiska intressen som måste göras. Programmet ska utveckla metoder och verktyg för att göra sådana avvägningar. Vindval ställer höga krav vid vetenskaplig granskning av forskningsansökningar och forskningsresultat, samt vid beslut om att godkänna rapporter och publicering av projektens resultat.

Denna rapport är skriven av Marcus C Öhman, AquaBiota Water Research. Rapporten är en fördjupning av kapitlet om effekter på fisk i Vindvals syntesrapport ”Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv – en syntesrapport om kunskapsläget 2021” (rapportnr 7049, 2022).

Författaren svarar för rapportens innehåll.

Stockholm 14 juni 2023

Kerstin Jansbo
Programchef, Vindval

Innehåll

Sammanfattning	6
Summary	8
Inledning	10
Fiskars ekologi	12
Fisk och havsbaserad vindkraft	13
Ljud	14
Människans påverkan på ljudmiljön	14
Fiskars hörsel	14
Fisk kan påverkas av ljud på olika sätt	14
Ljud från anläggningen av vindkraftverk	15
Ljud från sjötrafik	17
Ljud i vattnet under drift	17
Ljud vid avveckling	18
Ljud och forskning	19
Sammanfattning	19
Sediment	20
Påverkan på fisk vid sedimentspridning	20
Fiskägg	20
Fisklarver	21
Vuxen fisk	21
Sedimentspridning under anläggningsfasen	22
Sedimentspridning under driftsfasen	23
Sedimentspridning under avvecklingsfasen	23
Sammanfattning	23
Reveffekt	24
Artificiella strukturer som livsmiljö för fisk	24
Vindkraftverk som hårbottenmiljö	24
Fish aggregation device	27
Reveffekter och avvecklingsfasen	27
Sammanfattning	28
Elektromagnetiska fält	29
Sjökablar och elektromagnetiska fält	29
Fisk och magnetiska fält	29
Sammanfattning	30
Ljus	31
Hinderljus	31
Sammanfattning	31
Oönskad spridning	32

Kumulativ påverkan	33
Anläggningsfasen	33
Driftfasen	33
Interaktioner med andra marina näringar	34
Sammanfattning	35
Tack	36
Referenser	37

Sammanfattning

Vindkraft till havs ökar i betydelse som energikälla. Det finns idag planer på att anlägga havsbaserad vindkraft i Sveriges alla havsområden. Byggandet och närvaron av vindkraftverk till havs kan påverka det marina livet. Av särskild vikt är att förstå hur fisk påverkas då fisk är av central ekologisk betydelse och flera arter är av intresse ur kommersiell synpunkt. För att förstå hur fisk påverkas av vindkraft behövs det ett helhetsperspektiv där både vindkraftverkens hela livscykel, och fiskars ekologi i vidare bemärkelse, beaktas.

En vindpark, som består av flera vindkraftverk samlade inom ett område, går igenom tre faser. Den första fasen är anläggningsfasen, följt av driftfasen och därefter avvecklingsfasen. Fisk kan påverkas på olika sätt beroende på vilken fas det gäller. Under anläggningsfasen är det i synnerhet två påverkansfaktorer att beakta i de fall de förekommer. Det ena handlar om ökade ljudvolymmer och det andra om spridning av sediment.

När det gäller ljud har fisk generellt väl utvecklade hörselorgan. Om ljudbilden plötsligt ändras kan fisk påverkas. Anläggandet av vindkraftverksfundament kan avge högintensivt ljud. Detta gäller i synnerhet när monopile-fundament installeras, vilket under goda förhållande pågår under cirka sex timmar. Hur fisk reagerar på ökat ljud beror på flera faktorer. Hörselförmågan skiljer sig åt mellan arter och ljudets spridning påverkas av hur den lokala vatten- och bottenmiljön är beskaffad. En viktig faktor som avgör hur fisk påverkas av ljud är avståndet till ljudkällan vilket fisk kan påverka genom att röra sig ifrån ljudet. Generellt skulle det gå att urskilja en gradient för ett flertal arter, där fisk som är tillräckligt långt borta är opåverkad, till de som är nära nog för att det ska bli en beteendereaktion, till de som är ytterligare närmare vilket kan leda till en hörselnedläggning, till de som är i direkt anslutning till anläggningsarbetet där ljudet kan vara fysiologiskt skadligt. Fisk i direkt anslutning till en installationsplats med tillräckligt god simförmåga kommer sannolikt flytta ifrån området när arbetet inleds. Ljudets inverkan på fisk går att påverka genom att använda tekniska skyddsåtgärder till exempel genom att skrämja bort fisk innan vindkraftsfundamenten installeras och att omgärda anläggningsområdet med bubbelgardiner eller annan ljuddämpande utrustning.

Vid anläggning av vindkraft kan sediment frigöras i samband med att vindkraftsfundamentet monteras och även när sjökablar utplaceras. Frigörelsen av sediment från monteringen av vindkraftverken är mest påtagligt när monopile-fundament installeras och då om det behöver borraras i botten. Hur fisk påverkas av sediment beror bland annat på befintliga arter, levnadsstadier och fiskens storlek samt typ av botten och vattenförhållanden. Påverkan från frigörelsen av sediment vid anläggandet av vindkraftverk är generellt inom en koncentration och tidsrymd som flertalet fiskar klarar av. När det gäller hur fiskägg- och fisklarvstadiet påverkas så är den perioden för många marina fiskarter pelagisk vilket betyder att en lokal påverkan sannolikt har en begränsad effekt på populationsnivå.

Den längre perioden under en vindparks livscykel är driftfasen. Havsbaserade vindkraftverk tillför en hårbottenmiljö som under driftfasen kan fungera som artificiellt rev, med ansamlingar av fisk som följd. Det gäller både vindkraftsfundamentet och erosionskydd. Även flytande vindkraftverk kan locka till sig fisk och

beskrivs då som en "fish aggregation device". Anhopningen av fisk runt vindkraftverk kan uppstå som ett resultat av att fiskar simmar till vindkraftsfundamentet och som en konsekvens av reproduktion. Fisk kan söka sig till vindkraftsverk av flera skäl, till exempel för ökad tillgång av föda, ett område för reproduktion och skydd från predation. Olika arter kan påverkas på olika sätt från de som är oberörda av närvaron av vindkraftverk till de som visar tydliga preferenser för att uppehålla sig nära strukturen. Sverige har en lång kust med olika vattenmiljöer där inte minst salthalten och klimatet påverkar vilka arter som finns var och i vilken mängd. Följaktligen kan reveffekten variera beroende på var vindkraftverk placeras.

Ytterligare en potentiell påverkansfaktor under driftfasen är närvaron av sjökablar i vindparker, och mellan vindparker och land. De kan lokalt avge magnetiska fält. Det är dock mycket som talar för att påverkan från magnetiska fält i anslutning till sjökablar är av mindre betydelse.

Efter driftfasen kan vindkraftverk nedmonteras. Hur fisk påverkas av en avveckling kan vara svårt att veta givet att om ett vindkraftverk installeras idag så ligger nedmonteringen många år i framtiden då andra tekniker kan komma att tillämpas. Dagens avvecklingsmetoder kan generera en viss temporär påverkan i form av ljud och en begränsad sedimentspridning. Om det under driftfasen har genererats en reveffekt innebär en nedmontering att reveffekten upphör vilket kan vara negativt för de arter som har uppehållit sig i närheten av vindkraftsfundament.

Även om vindparken beskrivs som en enhet där flera verk är samlade inom ett område så är avståndet vanligtvis mellan verk 1–2 kilometer, med de vindparker som byggs idag. Det betyder att påverkan är mer lokal än regional. Samtidigt om det blir tillräckligt många vindkraftverk inom ett område kan det bli en samlad påverkan där till exempel vissa arter kan röra sig mellan strukturerna. Att det blir en sådan additiv effekt beskrivs som en kumulativ påverkan. Det kan även gälla om flera vindparker byggs inom ett havsområde eller om det blir en interaktion med, utsjöbankar, öar, kuststräckor, skyddade områden eller mänsklig aktivitet, till exempel sjöfart och fiske.

Det är mycket som talar för att tillförseln av vindkraftverk till havs inte utgör ett hot för fiskarter eller fiskpopulationer. Likväl kan vindkraft påverka fisk på olika sätt, en påverkan som kan skilja sig åt beroende på var i Sverige vindparker etableras. Sverige har en lång kuststräcka där livsmiljön och artsammansättningen kan skilja sig åt på ett påtagligt sätt mellan havsområden. Följaktligen är det av central betydelse att göra en lokal bedömning av hur fisk påverkas när vindparker ska anläggas.

Summary

Offshore wind power is increasing in importance as a source of energy in Sweden. There are currently plans to install wind power in all major offshore areas of Sweden. The construction and presence of offshore wind turbines can affect marine life. Of particular importance is to understand how fish are affected as fish form a fundamental part of the marine ecosystem and several species are of interest for commercial purposes. To understand how fish are affected by wind power, a broad perspective is needed where both the entire life cycle of wind turbines, and the ecology of fish in a wider sense, are considered.

A wind farm, which consists of several wind turbines gathered within an area, goes through three phases. The first phase is the construction of the farm, followed by the operational period and then finally the decommissioning. Fish can be affected in different ways depending on the phase. During the construction phase, there are in particular two influencing factors to consider; one concerns sound and the other sediment.

When it comes to sound, fish generally have a well-developed hearing ability. The construction of wind turbine foundations can emit loud sound volumes. This is especially true when installing monopile foundations, which under good conditions may take six hours. How fish react to increased noise depends on several factors. The ability to hear differs between species, and the spread of sound is affected by water conditions and the character of the bottom. An important factor that determines how fish are affected by sound is the distance to the sound source, which fish can affect by moving away. In general, a gradient may be defined for several species where fish that are far away are unaffected, to those that are close enough for there to be a behavioural reaction, to those that are even closer which can lead to a temporary or permanent hearing loss, to those that are in direct connection to construction work where the sound can be physiologically harmful. The impact of the sound can be reduced by using technical protective measures e.g., by scaring away fish before the wind turbine foundations are installed and by surrounding the installation area with bubble curtains or using other sound-absorbing techniques.

When installing wind power, sediment can be released in connection with the installation of the wind power foundation and when submarine cables are deployed. The release of sediment from the installation of the wind turbines is most noticeable when monopile foundations are installed and drilling is needed. How fish are affected by sediment depends, among other things, on species composition, life stages and the size of the fish as well as bottom structure and water conditions. The impact from the release of sediment during the construction of wind turbines is generally within a concentration and time span that most fish can cope with. When it comes to how the fish egg and larval stages are affected that period for many marine fish species is pelagic, which means that a local impact is likely to have a limited effect on the population level.

The longer period during a wind farm's life cycle is the operational phase. Offshore wind turbines add a hard bottom environment which during the operating phase can function as an artificial reef, with accumulations of fish as a result. This applies to both the wind power foundation as well as the erosion protection

surrounding it. Even floating wind turbines can attract fish and are then described as a fish aggregation device. The accumulation of fish around wind turbines can occur due to relocation i.e., fish swimming to the wind turbine foundation, and as a consequence of reproduction. Fish may seek out wind turbines for several reasons, including an area for feeding, reproduction, and protection from predation. Different species may be affected in different ways. Some species may be unaffected by the presence of wind turbines while others may show clear preferences for staying close to the structure. Sweden has a long coastline, including a brackish sea, where not least the geographical change in salinity and climate affect which species are found where, and in what quantity. Consequently, the reef effect can vary depending on where wind turbines are placed.

Another potential influencing factor during the operational phase is the presence of submarine cables in wind farms, and between wind farms and land. They can locally emit magnetic fields. However, there is much to suggest that the influence of magnetic fields in connection with submarine cables is of minor importance.

After the operating phase, wind turbines can be dismantled. How fish are affected by a decommissioning can be difficult to know given that if a wind turbine is installed today, the dismantling is many years in the future when other technologies may be applied. Today's decommissioning methods can generate a temporary impact in the form of noise and a limited sediment dispersion. If a reef effect has been generated during the operational phase, dismantling means that the reef effect ceases, which can be negative for the species that have stayed the structure.

Although the wind farm is described as a unit, where several plants are gathered within an area, the distance between plants is usually 1–2 km in the wind farms that are built today. This means that the impact is more local than regional. At the same time, if there are enough wind turbines in an area, there may be a collective impact where, for example, certain species can move between the structures. This is described as a cumulative effect, which may also apply if several wind farms are built within a sea area or if there is an interaction with coastlines, protected areas or human activities such as fishing.

There is little to suggest that the establishment of offshore wind turbines will threaten any fish species or fish populations. However, wind power can influence fish at some level, and it can differ depending on where in Sweden wind farms are established. Consequently, it is of importance to make a local assessment of how fish are affected when wind farms are to be established.

Inledning

Fiskar lever i en dynamisk komplex miljö där olika ekologiska omständigheter påverkar deras beteende, fysiologi, reproduktiva förmåga och överlevnad. Fisk är under ständig påverkan av naturliga faktorer som till exempel predation, konkurrens, tillgång till föda och vattenkvalitet. Vissa faktorer kan ha en större betydelse i hur en fiskpopulation regleras än andra. Mänskliga aktiviteter för in ytterligare faktorer som kan påverka fisk, utöver de som skulle beskrivas som naturliga. Det kan handla om fiske, sjöfart, miljöutsläpp eller att strukturer byggs i havet. Hur stor påverkan blir beror på hur stor faktorn är i relation till övriga förhållanden som påverkar fisk.

En mänsklig faktor, som får ökad betydelse som påverkansfaktor på fisk, är havsbaserad vindkraft. Vindkraft till havs växer som energikälla världen över. Ett område som är mycket expansivt när det gäller utvecklingen av vindkraft är Nordsjön. Storbritannien är störst, åtföljt av Tyskland, Nederländerna, Danmark och Belgien. I Sverige finns det planer på att bygga uppåt 30 vindparker i de flesta havsområden, både i Västerhavet och Östersjön. Detta är en utveckling som skulle kunna påverka det marina ekosystemet då fisk är av central ekologisk betydelse. Fisk är också en viktig kommersiell resurs.

För att förstå hur vindkraft till havs kan påverka fisk bör den komplexitet som kännetecknar fiskars ekologi, och hur den uttrycks i förhållande till lokala förutsättningar, beaktas. En art kanske söker sig till ett område med vindkraft, en annan art söker sig därifrån och en tredje är opåverkad. Ett visst livsstadium, till exempel det juvenila stadiet, kanske påverkas medan vuxna fiskar inte gör det. Vindkraftens eventuella påverkan blir en del av ett större ekologiskt sammanhang, och hur påverkan tolkas kan variera beroende på vilket faktor som undersöks. Sverige har en mycket lång och varierad kust, och en tydlig salthaltgradient från Haparanda med närmast sötvattensförhållanden, till en marin saltvattensmiljö vid Strömstad i Bohuslän (Figur 1). Klimatförhållanden skiljer sig åt vilket till exempel resulterar i en större grad av istäckning längre norrut. Denna variation gör att den förväntade påverkan på marint liv från havsbaserad vindkraft skiljer sig åt mellan olika geografiska områden (Isaeus m.fl. 2022).

Syftet med den här rapporten är att sammanställa kunskapsläget om hur havsbaserad vindkraft kan påverka fisk med fokus på svenska och angränsande havsområden. Rapporten ingår som en del i en övergripande syntes om vindkraftens effekter på marint liv (Bergström m.fl. 2022). I rapporten beskrivs hur fiskar påverkas av vindkraft utifrån fiskars biologi och ekologi. Hur fisk kan påverkas under vindkraftverkens olika faser behandlas också. Av intresse är hur påverkan från vindkraft kan skilja sig åt i olika delar av Sverige. Fisk och vindkraft blir också en del av ett större sammanhang som även inbegriper annan mänsklig verksamhet.



Figur 1. Sveriges havsområden. Sverige har, jämfört med andra länder i EU, en mycket lång kuststräcka. Vattenmiljön skiljer sig åt bland annat på grund av salthaltgradient från norr till söder, med 2–3 promille i Bottenviken, ca 5 promille i Bottenhavet, runt 10 promille i Öresund och uppåt 30 promille i Skagerrak.

Rapporten baserar sig på vetenskapliga artiklar och rapporter som berör hur fisk påverkas av havsbaserad vindkraft, samt även andra publikationer om fiskars biologi och ekologi och hur fisk reagerar på annan typ av mänsklig aktivitet. För att få en heltäckande bild om kunskapsläget kring hur vindkraft påverkar fisk har sökningar på relevant referensmaterial utförts utifrån olika databaser (ISI Web of Science, Google scholar, ResearchGate m.fl.) där studier utförda under senare tid har varit av särskilt intresse.

Fiskars ekologi

Fiskar lever i en tredimensionell värld med stor variation vad gäller livsmiljöer. Typen av livsmiljö kan avgöra hur mycket fisk, och vilka arter, som återfinns på en plats givet att olika arter kan ha olika preferenser. Inom ekologin kallas det för habitateffekter (Öhman och Rajasuriya 1998, Beck 2000). Vissa arter är pelagiska och föredrar de öppna vattenmassorna och andra är demersala (bottenlevande) och lever i direkt anslutning till botten. De finns också de som rör sig mellan botten och omgivande vatten vilka kallas bottennära eller bentopelagiska fiskar.

TVå vanligt förekommande bottenlivsmiljöer i svenska vatten är hårbotten- och mjukbottenmiljöer. Det förra är vanligt förekommande i till exempel Skageracks skärgård, med klippformationer både ovan och under vatten, att jämföras med Kattegatt som i huvudsak består av mjukbotten. Hårbottenmiljöer beskrivs som rev vilket i princip inbegriper alla former av hårda formationer på botten (Öhman 2006). Fiskfaunan i hårbottenmiljöer skiljer sig vanligtvis från mjukbottenmiljöer och fiskfaunan som lever nära kusten skiljer sig generellt från det öppna havet.

Fiskpopulationerna varierar längs den svenska kusten mellan till exempel Skagerack, Kattegatt, Arkonahavet, Egentliga Östersjön, Ålands hav, Bottenhavet och Bottenviken (Havs- och vattenmyndigheten 2021). I vissa områden kan det vara relativt få fiskar och i andra områden kan det finnas en större täthet. En viktig faktor som ger geografiska skillnader vad gäller artsammansättningen i Sverige är den varierade salthalten mellan havsområdena. Dessutom skiljer sig klimatet från norr till söder.

Fisk är under ständig påverkan av naturliga faktorer där livsmiljön som sådan har en stor påverkan, men även andra faktorer som till exempel predation, konkurrens, tillgång till föda inverkar. Vissa faktorer kan ha en större betydelse i hur en fiskpopulation regleras än andra, till exempel för en population sill kan tillgången på föda vara en viktigare reglerande faktor än risken för att de själva tas av rovfiskar, eller för en grupp torsk kan parasiter vara mer avgörande för hur mycket torsk det finns inom ett område än tillgången till föda.

Hur fisk påverkas av ekologiska faktorer gäller inte bara vuxen fisk. En fisk går igenom flera levnadsstadier. Efter att ägget är befruktat, och så småningom kläcks, frigörs en så kallad fisklarv vilket är ett stadie där fisken är mindre än, och har ännu inte utvecklats till, juvenil fisk och har en kroppsform som skiljer sig från både juvenil och vuxen fisk. Denna fas är ofta pelagisk där fisklarven driver som plankton med havsströmmarna. Det betyder att lekområdet och det område som fisklarver växer upp i kan vara åtskilda, ibland av betydande sträckor (Kinlan och Gaines 2003, Antoni och Saillant 2017). Efter det juvenila stadiet växer fisken till och blir vuxen. Även i den fortsatta utvecklingen som vuxen kan fisken förändras och till exempel söka nya miljöer och få förändrade födopreferenser.

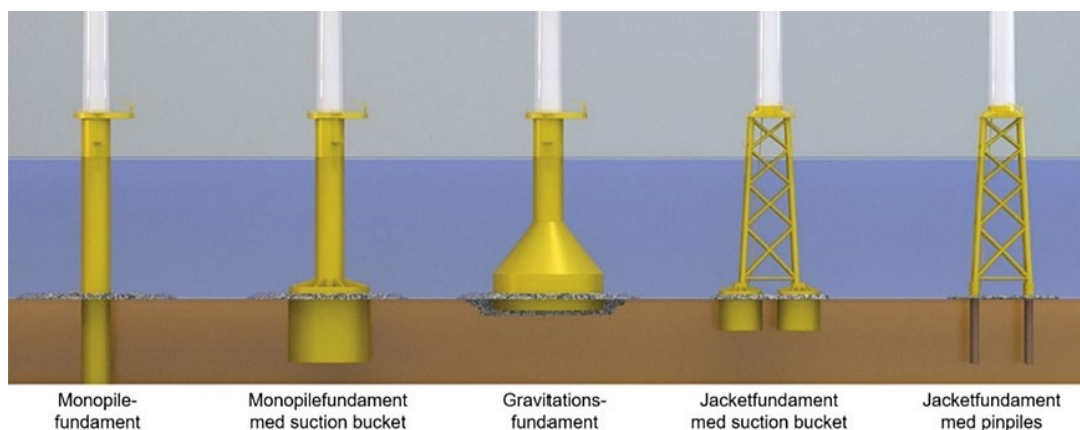
Vid bedömningar av hur fisk påverkas av vindkraft finns det anledning att se till fiskars större ekologiska sammanhang. Det kan till exempel handla om vilka arter som finns inom ett område och hur de interagerar, och hur livsmiljön ser ut i närheten och i omgivande vatten. Utöver naturliga ekologiska processer kan även pågående mänsklig aktivitet, som exempelvis fiske, ha en betydande inverkan på fisk.

Fisk och havsbaserad vindkraft

En vindpark går igenom tre faser. Första fasen är anläggningsfasen då hela vindkraftverket installeras, vilket i regel tar några dagar till någon vecka per vindkraftverk (Lacal-Arantegua m.fl. 2018). Anläggandet av själva fundamentet går dock fortare. Ett monopile-fundament kan under goda förhållande installeras på 6 timmar (Bergström m.fl. 2022). Under anläggningsfasen kan fisk påverkas av ökade ljudnivåer och sedimentspridning. När vindparken är klar övergår anläggningsfasen till driftsfasen. Med de vindparker som byggs idag kan driftsfasen utgöra en tidsperiod på uppåt 40–45 år. När en vindpark har tjänat ut sin tid avvecklas den och vindkraftverken nedmonteras och transporteras bort.

Påverkan från havsbaserad vindkraft på fisk ser olika ut under de tre faserna, och därför finns det skäl att separera dem vid bedömning av vilka effekter en vindpark kan ha på fisk. I synnerhet skiljer faserna sig mycket åt i fråga om varaktighet men också vad gäller påverkansfaktorer och intensitet. Påverkan från anläggningsfasen äger rum under en begränsad tidsperiod, räknat i dagar, medan driftsfasen snarare räknas i decennier.

Vid bedömning av påverkan finns det även skäl att beakta att den tekniska utvecklingen inom havsbaserad vindkraft går fort, vilket påverkar bedömningen av deras påverkan. Vindkraftverkens utformning har betydelse (Figur 2). Olika typer av vindkraftsstrukturer och tekniker har olika påverkan på fisk. Parkens lokalisering i havsmiljön är också en viktig faktor.



Figur 2. Det finns olika typer av fundament som på olika sätt påverkar marint liv, t.ex. anläggningen av monopilefundament genererar mer ljud än övriga fundament, då de pålas ner i botten. Jacketfundamenten till höger i figuren, som även kallas fackverksfundament, skapar sannolikt bättre förutsättningar för en reveffekt. Utöver dessa bottenbaserade vindkraftverk pågår det nu en snabb utveckling vad gäller flytande vindkraftverk som har en förankring i botten.

Källa: OX2

Ljud

Människans påverkan på ljudmiljön

Marina organismers ljudmiljö har de senaste åren fått större uppmärksamhet inte minst givet att ljudmiljön ändras med ökad mänsklig verksamhet (Hildebrand 2009, Duarte m.fl. 2021). Sjötrafiken utgör här den största källan till ljud (Kikuchi 2010, Andersson m.fl. 2011, Tougaard m.fl. 2020). Ljud från fartygsmotorer kan påverka fisk (Bruintjes och Radford 2013, McCormick m.fl. 2018). I vissa områden som till exempel Öresund, där sjötrafiken är mycket tät, befinner sig en stor del av fiskfaunan i ett konstant ljud från fartyg (Vieira m.fl. 2020). Ljud från båtmotorer är vanligt förekommande i större delen av svenska vatten (Mustonen m.fl. 2019). När det gäller havsbaserad vindkraft kan undervattensljud uppstå i samband med anläggningsfasen, driftsfasen och avvecklingsfasen.

Fiskars hörsel

Hörseln är generellt viktig för fiskar (Popper m.fl. 2019). Ljuduppfattningen har flera funktioner. Det kan handla om att undvika rovdjur eller söka föda och det kan användas för orientering (till exempel i ett stim eller för att hitta livsmiljöer) och kommunikation (exempelvis vid reproduktion) (Kasuman 2008, Putland m.fl. 2019).

Fiskar uppfattar inte ljud på samma sätt som människan. Utöver örat kan även simblåsan och sidolinjen spela en roll. Ljud i vatten uppträder som partikelrörelser och som tryck. Alla fiskar uppfattar partikelrörelser vilket registreras av örat med hjälp av otoliter (hörselstenar). Vid ljud kommer dessa i rörelse vilket detekteras av de nervceller som är kopplade till de hårceller som otoliterna står i kontakt med. Sidolinjen registrerar också partikelrörelser.

Simblåsan, ett organ de flesta fiskar har, är gasfyllt och absorberar tryckförändringar då den dras ihop och expanderar med varierat tryck, en rörelse som kan uppfattas av örat. På det sättet utökar simblåsan ljuduppfattningen. Vissa arter har en koppling mellan örat och simblåsan som förstärker uppfattningen av ljudet ytterligare. Fiskar med en koppling mellan simblåsa och öra beskrivs som hörselspecialister. De kan höra frekvenser upp till 3 000–4 000 Hz.

Övriga fiskar, så kallade hörselgeneralister, kan uppfatta ljudfrekvenser upp till 100–500 Hz. Dessa generalister kan delas upp i de som kan uppfatta ljudtryck (det vill säga fisk med simblåsa) och de som endast kan uppfatta partikelrörelse (fisk utan simblåsa, till exempel plattfisk och makrill) (Gorska m.fl. 2005). Det finns också fiskar som har simblåsa men med jämförelsevist lägre tryck (till exempel öring och lax) vilket skulle kunna innebära att simblåsan spelar mindre roll för hörandet.

Fisk kan påverkas av ljud på olika sätt

Hur fisk påverkas av ljudförändringar kan handla om allt från beteendeförändringar, t.ex. ett kortvarigt flyktbeteende, till hörselnedsättningar, fysiologisk skada eller att fisk avlider. När det gäller beteendeförändringar så finns det exempel från studier i Norge och Barents hav där det noterades att när fisk utsattes för starkt plötsligt

ljud (från luftkanoner vid maringeologiska undersökningar) rörde de sig aktivt ifrån området (Engås m.fl. 1996, Slotte m.fl. 2004). Det finns också undersökningar där fisk utsattes för starkt ljud där det inte gick att påvisa beteendeförändringar, till exempel i en studie på torsk som föreföll oberörda av höga ljudnivåer (Kastelein m.fl. 2008).

Fiskar kan själva ge ifrån sig ljud för att kommunicera vilket är en social interaktion som skulle kunna påverkas av externt ljud. Det finns exempel på när fiskars sociala interaktioner har påverkats av ljudet från båtmotorer (Bruintjes och Radford 2013). I svenska förhållanden skulle beteendeförändringar exempelvis kunna gälla torskhanar som använder simblåsan för att skapa ljud som används vid lek. Samtidigt kan det konstateras att de under leken uppehåller sig i varandras närhet vilket skulle kunna minska känsligheten för yttre ljudpåverkan (Fudge och Rose 2009, Hawkins and Picciulin 2019). Det finns också havsområden, som till exempel Öresund, där torsk lek pågår trots mycket buller från båttrafik (Højgård Petersen m.fl. 2018, Havs- och vattenmyndigheten 2021).

Höga ljud kan ge fiskar nedsatt hörsel (Andersson m.fl. 2016). Den kan vara temporär eller permanent. För temporär hörselnedsättning används förkortningen TTS som står för "temporary threshold shift" och för permanent hörselnedsättning används förkortningen PTS som står för "permanent threshold shift".

TTS kan uppstå i fisk både från kraftiga kortvariga ljud och från längre kontinuerliga ljudbelastningar. TTS ger en temporär minskad känslighet för ljud inom ett visst frekvensområde. Normalt upphör denna effekt efter 10-tals minuter upp till några timmar efter exponeringen. PTS kan innebära allt från en viss permanent försämring av känsligheten för en viss frekvens, eller frekvensområde, till total dövhet. Kraftiga ljud kan också resultera i andra fysiska effekter utöver påverkan på hörsel. I en studie av Smith m.fl. (2004) ökade mängder kortisol noteras, som en följd av högt ljud. Vid mycket kraftiga ljud kan följden bli vävnadsskador eller att fisk avlider (McCauley m.fl. 2003, Popper och Hastings 2009), ett faktum som nyttjas vid dynamitfiske (Jiddawi och Öhman 2002).

Ljud från anläggningen av vindkraftverk

När det gäller havsbaserad vindkraft och ljud så är det anläggningen av verken som är den aktivitet som genererar mest ljud (Andersson m.fl. 2011, 2016, Tsouvalas 2020, Mooney m.fl. 2020, Han och Choi 2022). Ljudbilden skiljer sig åt beroende på vilka typer av fundament som används (Figur 2). Det typ av installation som genererar starkast ljud är när monopile-fundament anläggs, medan andra strukturer ger en annan ljudbild med normalt lägre ljudvolym (Bergström m.fl. 2022).

Grundstrukturen i ett vindkraftverk av monopiletyp är ett stålrör med en diameter som varierar mellan 10–18 meter. Det monteras genom pålning som är en metod som är vanligt förekommande även för andra strukturer, som monteras i hav- och kustområden, till exempel broar och hamnar (Andersson m.fl. 2016). Monopile-fundament är en struktur som passar bäst i vattenmiljöer med mjuka botten eftersom pålningen blir svårt om botten består av berghällar eller stenblock. Ljudet kommer av att fundamentet drivs ner i botten med en hydraulhammare. Påverkan är temporär och att montera ett monopilefundament kan under goda förhållanden ta sex timmar. Färdigställandet av ett helt vindkraftverk, inklusive montering av fundament, torn, maskinhus och rotorblad tar normalt några dagar (Lacal-Aránteguija m.fl. 2018, Bergström m.fl. 2022). Även om ljudpåverkan från

anläggandet av ett vindkraftverk är begränsat i tid blir det en större generell påverkan när hela vindparken beaktas.

Ljud som uppstår vid anläggningen av vindkraftverk kan påverka fisk (Mueller-Blenkle m.fl. 2010ab, Halvorsen m.fl. 2012ab). Vilken effekt det har beror på flera faktorer. Hörselförmågan varierar mellan arter beroende på hur effektiva hörselorganen är (Popper m.fl. 2019) och artsammansättningen kan variera mellan områden (Havs- och vattenmyndigheten 2021). Följaktligen är det viktigt att landa i de lokala förutsättningarna när ljudeffekter i ett etableringsområde ska bedömas. Det gäller också hur ljud sprids vilket bl.a. påverkas av bottentyp, strömmar, vågor, skiktningar i vattnet, salthalt och temperatur (Andersson m.fl. 2011). Det kan tyckas självklart men en förutsättning att fisk ska påverkas är förstås att det finns fisk i området, vilket inte alltid är självklart. Fisknärvaron kan variera stort i svenska vatten (Havs- och vattenmyndigheten 2021).

Det finns flera olika tekniska lösningar som minskar ljudpåverkan på fisk. En metod, som används när monopiles ska anläggas, är att börja monteringen försiktigt för att sedan successivt öka energin i slagen ("ramp-up") (Bellman m.fl. 2020, Sigray m.fl. 2022). Detta ger fiskar, och andra mobila djur som kan påverkas av ljudet, en chans att röra sig ifrån området innan arbetet påbörjas fullt ut. Det finns även ljudsändare som genererar artificiella ljud, inom relevant frekvensområde, som kan få fiskar att lämna området. Ett sådant är FaunaGuard som utvecklats i Nederländerna och som har använts vid etablering av vindparker i bland annat Nordsjön (Van der Meij m.fl. 2015). Det går dessutom att skydda fiskars hörsel genom att omgärda arbetsområdet med en bubbelgardin (Tsouvalas och Metrikine 2016). Genom att skapa en vägg av bubblor runt vindkraftverket reduceras spridningen av ljud. För extra skydd går det att ha två bubbelgardiner. Dessutom finns det andra tekniker att tillgå som till exempel "Hydro Sound Damper" eller "noise mitigation screen" (Tsouvalas 2020).

Om fisk uppehåller sig i direkt anslutning till pålningsarbete utan skyddsåtgärder, kan det få fysiologiska konsekvenser. I en undersökning av Casper m.fl. (2013) noterades skador på simblåsan och närliggande organ vid tillräckligt starkt pålningsljud. I ett experiment i fält som utfördes av Debusschere m.fl. (2016) utsattes Europeisk havsabborre (*Dicentrarchus labrax*) av ljud från pålning genom att placera fisken 45 meter från anläggningsområdet när strukturen pålades ner i botten utan skyddsåtgärder. Ett flertal fysiologiska effekter kunde noteras. Det är dock mycket som talar för att merparten av fisk som uppehåller sig i direkt anslutning till ett anläggningsområde lämnar området när fartyg anländer och inleder de initiala stegen för montering, innan pålningen påbörjas.

Plötsliga höga ljud kan resultera i tillfälliga beteendeförändringar (Van der Knaap m.fl. 2022). Hur europeisk havsabborres beteende påverkades av ljud från pålning undersöktes inom 200 meters radie från ett anläggningsområde (Herbert-Read m.fl. 2017). Det visade sig påverka den sociala interaktionen, bland annat hur fiskarna rörde sig sinsemellan. I en fältundersökning studerades hur torsk (*Gadus morhua*) och tunga (*Solea solea*) betedde sig när de utsattes för pålningsljud (Mueller-Blenkle m.fl. 2010a). Båda arterna reagerade på ljudet med ändrat rörelsemönster, vilket kunde variera mellan individer. En viss tillvänjning (habituering) kunde konstateras. I en studie i fält i USA, där effekten av vindkraftsetablering undersöktes, visade sig påverkan på plattfisk vara av mindre betydelse (Wilber m.fl. 2018). I en analys utförd av Hammar m.fl. (2014) var slutsatsen att just ljud var en faktor att ta i beaktande. Pålningsljudet ansågs kunna påverka torskarnas

lek. Analysen inbegrep dock inte skyddsåtgärder vilket idag är standardvillkor i tillståndsansökningar för att anlägga vindkraftverk i svenska vatten.

Fiskars olika levnadsstadier skulle kunna influeras av ljud på olika sätt. Bolle m.fl. (2012) studerade fisklarver från arten tunga (*Solea solea*). Undersökningen visade inga tecken på att överlevnaden ändrades som en följd av ökat ljud från pålning. Även om fisklarver skulle påverkas så kan effekten på populationsnivå vara obetydlig givet att många marina fiskarter har en så kallad pelagisk larvfas. Efter att ägget kläcks flyter fisklarven med vattenmassorna över större ytor. Det betyder att en lokal ljudpåverkan på fisklarver kan ha en begränsad effekt på populationsnivå. Dessutom är mortaliteten bland fisklarver och fiskägg naturligt mycket hög vilket kan innebära att en begränsad lokal påverkan ”försvinner” i den naturliga variationen. Vidare kan det konstateras att lekområdet, och det område som fisklarver växer upp i kan vara åtskilda av långa sträckor (Kinlan och Gaines 2003, Antoni och Saillant 2017).

Ljud från sjötrafik

När ett vindkraftverk monteras blir det en ökad aktivitet i anläggningsområdet vilket kan innebära att det lokalt blir mer sjötrafik vilket kan ha en ljudmässig påverkan (Benhemma-Le Gall m.fl. 2021). Ljud från sjötrafik kan också öka under driftperioden som en följd av behovet av underhåll. Vilken inverkan sjötrafiken har på fisk beror på flera faktorer. Dels vilka arter som rör sig i området och hur botten- och vattenmiljön ser ut, dels hur många fartyg som normalt finns i området (Yu m.fl. 2020). Under anläggningsperioden kan övrig sjötrafik förbjudas helt. Frågan om undervattensbuller är generell och gäller inte enbart havsbaserad vindkraft. Som tidigare nämnt är Öresund ett exempel på ett område där sjöfarten är intensiv (Andersson m.fl. 2011, Vieira m.fl. 2020). Samtidigt finns det ett flertal större fiskpopulationer och mer än 120 fiskarter i området (Angantyr m.fl. 2007).

Flertalet av de vindparker som planeras i Sverige kan komma att ligga i anslutning till farleder och områden där det finns ett pågående yrkesfiske. Det kan då innebära att ljudet från sjötrafiken från etableringen av en vindpark försvinner i ett redan närvarande brus. Det skulle också kunna resultera i en additiv effekt som en följd av ytterligare ljudpåverkan. Emellertid är sjötrafiken vid monteringen av vindkraftverken lokal och temporär och når inte samma ljudnivåer som själva anläggningsarbetet av monopiles. Noterbart är också att etableringen av en vindpark skulle kunna resultera i att båttrafiken minskar på sikt om sjöfart och fiske regleras inom ett vindparksområde.

Ljud i vattnet under drift

Ljud kan även uppstå när vindkraftverk är i drift (Sigray m.fl. 2009, Kikuchi 2010, Andersson m.fl. 2011, Pangerc m.fl. 2016, Tougaard m.fl. 2020). Ljud från maskinhuset och vibrationer i strukturen kan fortplanta sig i strukturen och nå ner under vattnet vilket skulle kunna uppfattas av fisk. Detta gäller inte minst monopilefundament vars struktur kan liknas vid ett sammanhängande stålrör. Hur ljudet påverkar fisk beror på många olika faktorer inklusive individuella skillnader, artsammansättning, vattenmiljö och bottenstruktur samt även fiskars tillväxningsförmåga. Det som talar för att driftljudet har en begränsad effekt, i alla fall för

ett flertal arter, är att fisk kan uppehålla sig i större mängder runt vindkraftverk (se nedan om reveffekten). Människors ljuduppfattning under vatten skiljer sig från fiskar men i sammanhanget kan det vara intressant att notera att dykare vid vindkraftverk i drift inte upplever störande ljudvolym (MC Öhman, observation i fält).

Noterbart är att i förhållande till det ljud som uppstår när monopile-fundament pålas ner i botten är ljudet under drift betydligt lägre. Det är också lägre än ljudet från fartyg (Tougaard m.fl. 2020). I en undersökning utförd vid Lillgrund i Öresund fanns det indikationer på att ett flyktbeteende kunde uppstå i närheten av ett vindkraftsfundament vid kraftig vind, men att bedömning var att ljudet från vindkraftverk under drift inte har en effekt på fisk på populationsnivå (Andersson m.fl. 2011). Båmstedt m.fl. (2009) undersökte hur abborre (*Perca fluviatilis*), mört (*Rutilus rutilus*) och öring (*Salmo trutta*) påverkades av ljud från vindkraftverk. Studien visade att arterna inte var nämnvärt påverkade av ljudet. Wahlberg och Westerberg (2005) observerade att ljudet från vindkraftverk i drift är av mindre betydelse när det gäller påverkan på fiskars beteenden eller hörsel men att det möjligen skulle kunna "överrösta" fiskar som kommunicerar med ljud om den sker i samma frekvensområde. Samtidigt finns det tecken på att fisk kan anpassa det ljud de genererar i förhållande till omgivningen, eller använda andra sätt att kommunicera (Ladich 2019). Som nämnt tidigare, i Öresund, där det är mycket buller på grund av att tiotusentals fartyg passerar årligen (Andersson m.fl. 2011, Vieira m.fl. 2020), uppehåller sig mer än 120 fiskarter och torsken leker framgångsrikt (Angantyr m.fl. 2007, Højgård Petersen m.fl. 2018, Havs- och vattenmyndigheten 2021). Även sill har visats sig kunna leka i områden med mycket sjötrafik till exempel i Kiel-kanalen (Gollasch och Rosenthal 2006), och i närheten av fartyg i drift (Skaret m.fl. 2005).

Ljud vid avveckling

När en vindpark planeras ingår även avvecklingen som en del av planen. Det kan vara svårt att veta vilka tekniker som då kommer tillämpas då avvecklingen ligger många år i framtiden om det handlar om vindparker som planeras för i nuläget. Från det att beslut om att bygga en vindpark tas till att en vindpark blir klar kan det ta upp till tio år, inte minst på grund av att tillståndsprocessen tar lång tid (Malafray och Öhman 2022). Därefter har en vindpark en livslängd på 40–45 år innan avveckling (Bergström m.fl. 2022). Följaktligen kan avvecklingen ske om mer än 50 år. Vilka metoder som används för avveckling då vet vi inte idag. Vi vet inte heller hur fiskfaunan ser ut då, inte minst givet att klimatet och den biologiska mångfalden förändras.

Vid avveckling av vindkraft i dagsläget är det brukligt att strukturen nedmonteras och lyfts upp från vattnet med hjälp av en kranbåt. Vilken teknik som används för nedmonteringen av ett vindkraftverk varierar beroende på fundamentstyp (Bergström m.fl. 2022). Monopiles som ju i princip är ett stort stålrör kan kapas av, vanligtvis strax under botten. Även fackverksfundament kan skäras i delar. Gravitationsfundament kan nedmonteras på olika sätt. De kan till exempel tas isär i delar, där varje del sen lyfts upp. Ett annat sätt är att fylla hålrummet med luft, vilket gör strukturen flytande, för vidare transport till land. De ljud som uppstår vid själva nedmonteringsarbetet är inte lika störande som vid installation av monopile-fundament. Samtidigt kan det innebära en ljudpåverkan med högre ljudvolym när strukturer skärs av eller om till exempel gravitationsfundament behöver slås sönder.

Ljud och forskning

Det finns ett flertal studier utförda på fisk och hur de påverkas av ljud (Popper m.fl. 2019) men hur fisk påverkas av det ljud från anläggningen av vindkraftsfundament och under driftfasen skulle behövas undersökas mer (Popper m.fl. 2022, Svendsen m.fl. 2022). Detta visar också att den forskning som utförts vad gäller vindkraftens effekter på fisk varierar beroende på vilket fråga det rör sig om, till exempel vindkraftens reveffekter är mer undersökt än ljudets effekter (Bergström m.fl. 2022). Studier på hur fisk påverkas av ljud går att utföra under kontrollerade förhållande i akvarier och bassänger (t.ex. Kastelein m.fl. 2008). Detta är dock en onaturlig situation där fiskens rörelse är begränsad i förhållande till öppet hav. Dessutom är ljudmiljön annorlunda då till exempel ljudet kan studsas på vattenbehållarens väggar. Ytterligare ett sätt att undersöka hur ljud påverkar fisk kan vara att utföra datasimuleringar. Det kan också ha sina svagheter eftersom det kan finnas begränsningar i hur väl en simulering fångar den naturliga miljöns komplexitet.

För att få en mer heltäckande och adekvat bild av hur fisk påverkas av ljud från vindkraft behövs det flera studier i fält i verkliga situationer (Popper m.fl. 2022, Svendsen m.fl. 2022). Noterbart är också att det idag finns väl utvecklade skyddsåtgärder som reducerar ljudpåverkan vilket bör inbegripas i undersökningar av hur vindkraftsetableringar påverkar fisk, givet att det i Sverige är ett förväntat tillvägagångssätt när tillstånd sökes. Information av särskilt intresse för att kunna göra bedömningar av hur etableringen av vindkraft påverkar fisk är tröskelvärden; att kunna svara på frågan vid vilken ljudnivå blir ljudpåverkan negativ. Det är ett bra exempel på behovet av fältstudier på hur ljud påverkar som undersöker beteendeförändringar, hörselpåverkan och fysiologiska effekter utförda på flera arter vid olika distanser från ljudkällan i olika miljöer.

Sammanfattning

- Ljud från anläggningen av vindkraftverk kan påverka fisk olika beroende på art och levnadsstadium och hur omgivande miljö är beskaffad samt distansen till anläggningsområdet.
- Ljudpåverkan skiljer sig åt beroende på vilka fundamentstyper som anläggs. Det kraftigaste ljudet genereras vid pålning av monopile-fundament.
- I generella termer går det att, beroende på art, urskilja flera nivåer som relaterar till distans i hur fisk påverkas av installationen av vindkraftsfundament. Är fisken tillräckligt långt borta är de opåverkade. Är fiskare närmare kan de reagera beteendemässigt. Ytterligare ett steg närmare kan resultera i en hörselnedsättning. Om fisk uppehåller sig i direkt anslutning till anläggningsarbetet kan det leda till permanenta skador (även om flertalet fiskar sannolikt simmar ifrån området när arbetet inleds på plats innan pålningen påbörjas).
- För att minska påverkan av ljud vid anläggningen av vindkraftverk går det att mota bort fisk genom artificiella ljud och att begränsa ljudspridningen med hjälp av t.ex. bubbelgardiner eller andra skyddsstrukturer.
- Det kan även bli ljud i vattnet under driftfasen. Det skulle kunna ha en viss effekt men är sannolikt av mindre betydelse, i synnerhet på populationsnivå.

Sediment

Påverkan på fisk vid sedimentspridning

Fiskar kan påverkas av ökade koncentrationer av sediment i vattnet (Wilber och Clarke 2001). Känsligheten kan variera mellan arter och mellan levnadsstadier. Av central betydelse när det gäller effekten på fisk är koncentrationsnivån, som mäts i milligram per liter (mg/l), samt hur länge en sedimentbelastning pågår (Newcombe och MacDonald 1991, Karlsson m.fl. 2020). Andra faktorer som också kan spela en roll är sedimentpartiklarnas form och storlek. Vattenmiljöfaktorer som exempelvis syrehalt, salthalt, temperatur och den naturliga partikelhalten kan också samverka med en sedimentbelastning på olika sätt. Generellt har fisk en viss tålighet för sediment i vattnet och klarar sedimentkoncentrationer på upp till 100 mg/l, i upp till två veckor (Karlsson m.fl. 2020). Det är inte ovanligt att fisk kan klara koncentrationer på uppåt 1000 mg/l under några dagar.

En direkt effekt av sediment i vattnet är att det kan påverka fiskars beteende då de till exempel kan välja att röra sig ifrån ett sedimentbelastat område (Westerberg m.fl. 1996). Detta kan vara en konsekvens av att sediment kan fastna i gälarna, att det kan vara svårare att finna föda och att risken för predation ökar (Berg och Northcote 1985, Karlsson m.fl. 2020). Vid stora mängder suspenderat material i vattnet kan även bottenmiljön under en tid påverkas då sediment lägger sig på botten (Hammar m.fl. 2009).

Det finns en hel del kunskap kring hur sediment påverkar fisk. Många studier på fisk och sediment utförs dock i akvarier och bassänger vilket är en miljö som skiljer sig betydligt från ett dynamiskt hav. Studier kan också använda koncentrationsnivåer som inte är realistiska i förhållande till hur det ser ut i naturen. Dessutom kan effekter skilja sig mellan arter vilket gör att det inte alltid går att extrapolera resultat från studier på en art till att gälla andra arter.

Fiskägg

Olika levnadsstadier kan påverkas olika av ökade partikelkoncentrationer i vattnet (Kemp m.fl. 2011). Det finns studier där fiskägg utsatts för höga koncentrationer och ändå klarat sig (Auld och Schubel 1978, Partridge och Michael 2010). Kiöboe m.fl. (1981) undersökte hur ägg från sill (*Clupea harengus*) påverkades av sediment. Trots att de utsattes för koncentrationer på upp till 300 mg/l i 10 dagar fastnade inga partiklar på äggen, och fisklarver föddes utan anmärkning. Samtidigt visade Shackle m.fl. (1999) att överlevnaden av fiskägg till kläckning förbättrades hos öring (*Salmo trutta*) om gruset på botten rengjordes från sediment innan lek. Sediment kan inverka på fiskäggs flytförmåga vilket skulle kunna påverka äggens överlevnad (Westerberg m.fl. 1996). Om fiskägg hamnar på botten och blir övertäckta av sediment är sannolikheten stor att de inte utvecklas vidare.

Fisklarver

Fisklarver (stadiet efter kläckning och innan juvenil fisk) är oftast mer känsliga för sediment än både ägg och vuxna fiskar (Auld och Schubel 1978). Blir det tillräckligt höga koncentrationer kan det dels störa födointaget, då det kan bli svårare att hitta föda, dels påverka andningen då partiklar kan fastna i gälfilamenten (Berg och Northcote 1985, Zingel och Paaver 2010, Lowe m.fl. 2015). I ett experiment som utfördes av Johnston och Wildish (1982) noterades att vid koncentrationer på 20 mg/l började födointaget sjunka hos sillarver (*Clupea harengus*). Studien visade också att mindre larver var mer känsliga än större larver. Westerberg m.fl. (1996) observerade att de minsta larverna av torsk (*Gadus morhua*), som fortfarande hade gulesäcken kvar, var känsliga vid jämförelsevis låga koncentrationer. Trots en större känslighet hos fisklarver konstaterar Karlsson m.fl. (2020) att fisklarver normalt klarar koncentrationer som är högre än det som är naturligt.

Som tidigare konstaterats har flertalet marina fiskarter initialt en pelagisk fas där äggen och så småningom fisklarven flyter fritt och sprids i vattenmassorna (det finns även arter som har pelagiska fisklarver men där äggen läggs på botten). Följaktligen kan lekområdet, och det område som fisklarver växer upp i, vara åtskilda, ibland långa sträckor (Kinlan och Gaines 2003, Antoni och Saillant 2017). Det betyder att en lokal påverkan av suspenderat material på fisklarver har sannolikt en begränsad effekt på populationsnivå. Dessutom är mortaliteten bland fisklarver och fiskägg naturligt mycket hög. En lokal påverkan utgör då endast en begränsad del av en större naturlig variationen.

Vuxen fisk

Vuxna fiskar, och större fiskar, klarar generellt suspenderat material bättre än fisklarver och mindre fiskar, vilket kan vara en konsekvens av att de har större gälar (Moore 1977). Större rörliga fiskar har också en fördel av att lättare kunna röra sig ifrån sedimentbelastade områden. Vissa arter som till exempel plattfiskar kan vara mer tåliga då de lever naturligt i en miljö med högre sedimentkoncentration.

För att suspenderat material ska leda till mortalitet hos vuxna fiskar krävs det i regel koncentrationer på mer än 1000 mg/l (1 g/l) (Karlsson m.fl. 2020). I en studie utsattes vuxen torsk (*Gadus morhua*) för 550 mg/l i 10 dagar och överlevde. Dessutom noterades anpassningar i gälarna för att bättre kunna hantera det suspenderade materialet (Humborstad m.fl. 2006). Det finns studier som visar att även vuxna arter som är naturligt mindre, och även juvenila fiskar, kan hantera sediment. Hammar m.fl. (2008) observerade detta i en undersökning från Lillgrunds vindpark när vindkraftsfundamenten anlades. Det finns också exempel där vuxna fiskar kan vara särskilt känsliga som bland planktonätande fiskar (planktivorer) vars gälar är anpassade för att effektivt ta upp plankton (Johnston och Wildish 1981, 1982, Westerberg et al. 1996).

Sedimentspridning under anläggningsfasen

Vid anläggning av vindkraft kan sediment frigöras (suspenderat material) i samband med att vindkraftsfundamentet monteras och även när sjökablar utplaceras (Bergström m.fl. 2022). Sediment kan spridas som en plym ut från anläggningsområdet och finnas kvar i vattenkolumnen från några timmar till flera dagar. Lägre koncentrationer och små partiklar blir mer långvariga än högre koncentrationer och större partiklar.

Frigörelsen av sediment från monteringen av vindkraftverken är särskilt påtaglig när monopile-fundament installeras och det behöver borraras (Bergström m.fl. 2022). Även andra fundamentstyper, som till exempel gravitationsfundament eller jacket-fundament, kan orsaka en viss sedimentspridning, i synnerhet om botten måste bearbetas (Coates m.fl. 2015).

Sediment kan även frigöras när sjökablar placeras på botten eller spolats ner i botten. Sjökablarna kan sträckas ut flera kilometer i längd inom en vindpark och mellan vindparken och land vilket temporärt och lokalt skulle kunna påverka fisk. Emellertid blir det en mindre belastning per ytenhet än vad borrning av monopiles orsakar. I en genomgång av studier gjorda på vilken effekt som sjökablar har på marint liv, var slutsatsen att påverkan från sediment vid installation av sjökablar var av mindre betydelse (Taormina m.fl. 2018).

Hur stor partikelspridningen blir inom ett visst område vid en vindkraftsinstallation kan bero på olika faktorer. Bottenmiljön är av central betydelse. Mer suspenderat material frigörs om botten består av finkornigt sediment jämfört med om botten består av sand, grus eller fasta strukturer. Ytterligare en faktor som inverkar på spridningen är hydrodynamiken såsom strömförhållanden, vågor och tidvatten. Andra omständigheter som påverkar är hur länge monteringsarbetet pågår och hur stor yta som påverkas. Hur länge anläggningen av ett fundament pågår varierar beroende på fundamentstyp och förhållandena vid anläggningsplatsen. Vid goda förhållanden tar monteringen av ett monopile-fundament sex timmar och när fundamentet är på plats tar det ytterligare några dagar att montera torn, maskinhus och rotorblad (Lacal-Aránteguija m.fl. 2018, Bergström m.fl. 2022). Vanligt är att vindkraftverk anläggs etappvis ett, ibland två, i taget vilket gör att sedimentbelastningen späds ut över tid inom ett vindparksområde. Som ovan angivet är monteringen av sjökablar också en faktor vad gäller sedimentspridning.

Vid en bedömning av hur sedimentspridning från anläggningen av vindkraftsfundament kan påverka fisk är det viktigt att sätta det i sitt naturliga sammanhang. Det kan till exempel handla om hur grumligt vattnet normalt är inom ett blivande anläggningsområde. I en studie i Öresund noterade Valeur och Jensen (2001) att koncentrationen av suspenderat material kunde i perioder uppgå till 40 mg/l.

Fiske kan också orsaka sedimentspridning och vindparker byggs ofta i områden där det finns ett pågående fiske. En bottentrål kan skapa en sedimentplym som sträcker sig flera hundra meter åt sidorna och direkt bakom en trål kan sedimentkoncentrationen uppnå nivåer på 500 mg/l (Churchill 1989, Palanques m.fl. 2001, De Madron m.fl. 2005). Etableringen av en vindpark kan gynna bottenfauna och flora då det kan bli ett skydd från trålning, något som påvisats i Nordsjön (Coates m.fl. 2016). Det kan innebära att en vindpark kan fungera som ett skyddat område. Det blir då vad som beskrivits som ett *de facto* naturreservat (Esgro m.fl. 2020).

Sedimentspridning under driftsfasen

Ett vindkraftverksfundament kan påverka vattenströmmarna lokalt. Nedströms, bakom strukturen kan det uppstå virvlar som skulle kunna påverka sediment, i synnerhet finkornigt sediment. Enligt en rapport från danska förhållanden ska det vara en påverkan som är av mindre betydelse (Dong Energy m.fl. 2006) men det finns studier som visar att det kan bildas plymer av sediment nedströms (Baeye och Fettweis 2015).

Om sediment påverkas av närvaron av vindkraftsfundament skulle det även kunna påverka bottenlivet. Lefaible m.fl. (2023) noterade att mängden organismer och arter ökade i bottensedimentet i anslutning till ett vindkraftverk med jacket fundament men effekten var inte lika tydlig för monopile-fundament.

Sedimentspridning under avvecklingsfasen

Som tidigare noterats har en vindpark en livslängd på 40–45 år innan avveckling (Bergström m.fl. 2022). Vilka metoder som används för avveckling efter en sådan tidsperiod vet vi inte idag. Vi vet inte heller hur fiskfaunan ser ut då, inte minst givet att klimatet och den biologiska mångfalden förändras.

Sannolikt har sedimentspridning en mindre betydelse som påverkansfaktor när vindkraftverk avvecklas. Påverkan är lokal, och temporär, och är inte i nivå med anläggningsfasen. Det kan bli en viss sedimentspridning men mycket talar för att det inte når nivåer som är skadlig för fisk. Som tidigare nämnt klarar fiskar generellt en koncentration och varaktighet av 100 mg/l i upp till två veckor (Karlsson m.fl. 2020) och flertalet arter har förmågan att simma ifrån en lokal sedimentplym.

Sammanfattning

- Vid anläggning av vindkraftverk till havs kan sediment frigöras. Detta är mest påtagligt om monopile-fundament används och om det behöver borraras i botten.
- Hur fisk påverkas beror bland annat på befintliga arter, levnadsstadier och fiskens storlek samt typ av botten och vattenförhållanden.
- Fisk klarar generellt koncentrationer på upp till 100 mg/l i upp till två veckor vilket är en nivå vindkraftsinstallationer ofta har förutsättningarna att hålla sig inom.
- Flertalet marina fiskarter har en pelagisk ägg- och larvfas vilket betyder att en lokal påverkan av suspenderat material på fiskägg och fisklarver sannolikt har en begränsad effekt på populationsnivå.

Reveffekt

Artificiella strukturer som livsmiljö för fisk

Två vanligt förekommande livsmiljöer i svenska hav är hårbottenmiljöer och mjukbottenmiljöer. Hårbottenar formar naturliga rev där ett stort antal fiskarter finner en hemvist. Hårbottenmiljöer går även att skapa och beskrivs då som artificiella rev (Bohnsack 1989, Öhman 2006). Artificiella rev används världen över för att attrahera fisk och gynna fiske (Baine 2001, Powers m.fl. 2003, Hylkema m.fl. 2020). Artificiella rev kan till och med ge mer fisk och högre artrikedom än naturliga rev, vilket bland annat påvisades i en studie i Skottland (Hunter och Sayer 2009). Andra strukturer som människor skapar som kan fungera som rev är till exempel bropelare, vågbrytare, vrak, oljeplattformar och hamnstrukturer (Dicken 2010, Pereira m.fl. 2017, Sreekanth m.fl. 2019, Love m.fl. 2019). En undersökning av reveffekten i anslutning till olje- och gasplattformar konstaterade att de generellt var de mest produktiva miljöer som finns vad gäller fisk (Claisse m.fl. 2014). Ytterligare en faktor som talar för att artificiella rev gynnar ansamling av fisk är att rovdjur, som äter fisk, söker sig dit som till exempel tumlare och säl (Mikkelsen m.fl. 2013, Russell m.fl. 2014).

Hummerreven utanför Göteborg är ett exempel på ett artificiellt rev i Sverige (Länsstyrelsen 2007, Kraufvelin m.fl. 2023). Anledningen till att reven anlades var att kompensera för att Göteborgs hamn byggdes om då livsmiljöer för hummer och fisk försvann. En tydlig reveffekt noterades efter att hummerreven hade anlagts. Fisk kan vara mycket snabba på att kolonisera nya strukturer till havs (Todd m.fl. 2020). Från att ha varit stenblock på botten utan fisk noterades så småningom 45 fiskarter på reven. På ett par månader hade fiskfaunan utvecklats till att likna det som återfanns på naturliga hårbottenmiljöer i området, vilket är vanligt bland artificiella rev (Paxton m.fl. 2020). Flera arter ökade i antal däribland typiska hårbottenfiskar som grässnultra (*Centrolabrus exoletus*) och skärsnultra (*Symphodus melops*), men också torsk (*Gadus morhua*), lyrtorsk (*Pollachius pollachius*) och glyskolja (*Trisopterus minutus*) samt även sill (*Clupea harengus*). Att så många arter har funnit en hemvist på hummerreven är ett uttryck för den artrikedom som är kännetecknande för Skagerack. Skulle motsvarande rev anläggas i Östersjön skulle det dock inte bli lika många arter på reven, även om några specifika arter skulle kunna öka i mängd (jämför med resultaten i Andersson och Öhman 2010).

Vindkraftverk som hårbottenmiljö

Vindkraftverk till havs tillför en hårbottenmiljö som kan resultera i att det blir mer fisk i anslutning till vindkraftverket än vad som var på samma plats innan etableringen av vindparken (Glarou m.fl. 2020). Vindkraftsfundamentet tillför då en ny livsmiljö (Wilson och Elliot 2009) och får en funktion som kan liknas vid artificiella rev (Bergström m.fl. 2022). Detta konstaterades vid en vindpark i Kalmarsund där det gick att påvisa att det blev mer fisk runt verken än i omgivande vatten. I synnerhet en art, sjustrålig smörbult (*Gobiusculus flavescens*), återfanns i mycket stora antal (Andersson och Öhman 2010). Kalmarsund har bräckt vatten vilket gör att det är färre arter än i Västerhavet. En svensk vindpark i ett område med högre salthalt

än Kalmarsund är Lillgrunds vindpark i Öresund, där fler arter har påträffats än i anslutningen till vindkraftverken i Kalmarsund. Bergström m.fl. (2013) undersökte fiskfaunan vid Lillgrunds vindpark och konstaterade att torsk (*Gadus morhua*), ål (*Anguilla anguilla*), rötsimpa (*Myoxocephalus scorpius*) och stensnultra (*Ctenolabrus rupestris*) återfanns i högre antal på vindkraftsfundamenten än i omgivande miljöer.

Skillnaden mellan Kalmarsund och Öresund visar att geografi är en faktor som är viktig att beakta vid bedömningar av hur vindkraft kan påverka fisk (Isaeus m.fl. 2022). Sveriges kust är en av de längsta i Europa. Den är unik med en vattenmiljö som närmar sig sötvatten längst upp i norr, mot gränsen till Finland, för att sen följa en ökande saltkoncentrationsgradient söderut till Skåne och sen norrut längs västkusten. Dessutom är det skillnad i klimat med lägre temperaturer, och större ytor med is vintertid, längre norrut. Det finns också olika lokala förutsättningar för en reveffekt. I ett område med en botten som i huvudsak består av lera och sand är sannolikheten större att det blir en mer tydlig reveffekt i förhållande till omgivningen då en ny livsmiljö tillförs. Dessutom innebär det en ökad strukturell komplexitet som ofta har en gynnsam effekt på biologisk mångfald (se t.ex. Öhman och Rajasuriya 1998, Ferrari m.fl. 2018, Santoso m.fl. 2022).

När ett vindkraftverk placeras i havet så kan fisk söka sig dit. En del arter kan stanna permanent medan andra hittar en tillfällig plats för skydd och föda. Med tiden kan det bli mer fisk som ett resultat av reproduktion, där leken kan ha skett på en annan plats, och att fisklarverna sedan har funnit en hemvist i anslutning till fundamentet (Bohnsack 1989, Pickering m.fl. 1997). Närvaron av vindkraftverk skulle även kunna påverka leken där arter som naturligt leker i hårbottenmiljöer också skulle kunna leka i anslutning till vindkraftsfundament och erosionskydd. Det skulle även kunna påverka leken lokalt för arter som leker i mjukbottenmiljöer då det i anslutning till fundamenten blir en ändrad livsmiljö (Barbut m.fl. 2020).

Bergström m.fl. (2013) tolkade det ökade antalet fiskar vid verken i Lillgrund vindpark som främst en konsekvens av att fiskar i området sökte sig dit. De noterade vidare att fisk generellt inte verkade undvika verket vilket tolkades som att reveffekten var starkare än andra faktorer som skulle kunna påverka, till exempel ljud och magnetiska fält. I samma vindpark, som den Bergström m.fl. (2013) undersökte, studerade Langhamer m.fl. (2018) en specifik art, tånglake (*Zoarces viviparous*), och konstaterade att den visade få tecken på att influeras av närvaron av vindkraftverk. Det skulle kunna vara ett exempel på en art som inte påverkas av vindkraft. Det skulle också kunna finnas arter som minskar i antal efter etableringen av en vindpark. I en studie av Lindeboom m.fl. (2011) noterades att det var färre individer av mindre fjärsing (*Echiichthys vipera*) i en vindpark jämfört med referensområden.

De flesta studier på hur vindkraft till havs påverkar fisk, inte minst när det gäller reveffekten, har utförts i Nordsjön. I Danmark, väster om Jylland, undersökte Stenberg m.fl. (2015) fiskfaunan kring fundamenten i vindparken Horns rev 1. Mer fisk på verken kunde konstateras samt en positiv utveckling avseende antalet arter. I linje med resultaten från Lillgrund (Bergström m.fl. 2013) konstaterade Stenberg m.fl. (2015) att fiskfaunan mellan verken inte verkade vara påverkade av kraftverksfundamenten.

En intressant fråga när det gäller ett område som Nordsjön, med stor generell expansion av vindkraft, är hur stor effekten blir på hela området. I ett försök att ge en övergripande bild av utvecklingen av fiskfaunan, och mobila kräftdjur, som en följd av vindkraftsutvecklingen gjorde Krone m.fl. (2013) en analys av undervattensstrukturer i Tyska Bukten. Utifrån deras resultat föreslog de att mängden djur som

associerar med hårbottenmiljöer skulle öka med mellan 25 och 165 % i Nordsjön vilket för tankarna till det som beskrivs som en ”spillover effect”. Om det blir en ökad produktion av fisk inom en vindpark är det möjligt att det skulle kunna leda till mer fisk bortom vindkraftverken och även utanför vindparken (Hammar m.fl. 2015). Detta påvisades i en studie i Engelska kanalen (Halouani m.fl. 2020) vilket är i linje med vad som kan hända vid etableringen av marina reservat med mer fisk även utanför ett skyddat område (Halpern m.fl. 2009, Da Silva m.fl. 2015). Som jämförelse var det dock svårt att se ett sådant samband när det gällde pelagisk fisk bortom en mindre vindpark i Kalmarsund (Axenrot och Didrikas 2012).

I belgiska vatten har flera forskningsprojekt undersökt reveffekten på skäggtorsk (*Trisopterus luscus*) (Reubens m.fl. 2011, 2013, 2014ab, De Troch m.fl. 2013) som ingår i samma taxonomiska familj som torsk (*Gadus morhua*). Antalet skäggtorskar ökade i anslutning till verken. De visade att tillgången på föda vid verken var en viktig faktor (se även Mavraki m.fl. 2021). En annan art som också visats sig föredra närheten till vindkraftverk och dess erosionskydd är rödspätta (*Pleuronectes platessa*) trots att den är mer av en mjukbottenart (Buyse m.fl. 2022).

Reveffekter har också studerats i nederländska delen av Nordsjön. Här noterade Van Hal m.fl. (2017) hur hårbottensarter som normalt inte finns i Nordsjöns mjukbottenmiljöer återfanns vid verken. Det gäller i synnerhet arter som tillhör fiskfamiljen läppfiskar (Labridae). Läppfiskar rör sig ogärna längre distanser över öppna bottenar. Följaktligen är sannolikheten stor att deras närvaro är ett resultat av reproduktion (dvs produktion) och inte omlokalisering av befintlig fisk. Läppfiskarna har då kommit till verken efter en tid i den pelagiska larvfasen, som en följd av reproduktion i ett annat område.

Ytterligare en viktig faktor som observerades av Van Hal m.fl. (2017) var att mängden fisk vid verken varierade över tid. Arter kunde komma och gå från en dag till en annan. Även skillnader som relaterade till säsonger noterades. Naturen är dynamisk och olika fiskarter relaterar till undervattensstrukturer på olika sätt både rumsligt och tidsmässigt. För en del arter kan reveffekten handla om återkommande besök, för andra kan det handla om en stationär livslång tillvaro vid verken. Om läppfiskar sannolikt är mer stationära på verken kan andra arter visa på en dynamisk relation till vindkraftverk. En sådan art är torsk (*Gadus morhua*) som naturligt kan röra sig långa distanser för föda och reproduktion. Noterbart är att vindkraftverk är ett populärt habitat för torsk där de finner mat och skydd. Många studier visar på detta (Bergström m.fl. 2013, De Troch m.fl. 2013, Reubens m.fl. 2013, 2014ab, Van Hal m.fl. 2017) och det är också en art som är vanlig på andra artificiella rev som t.ex. de ovan nämnda hummerreven utanför Göteborg (Länsstyrelsen 2007).

Tillförseln av en hårbottenstruktur som blir en livsmiljö för fisk handlar inte bara om den struktur som utgörs av själva vindkraftverket. Det gäller även erosionskyddet. Erosionskydd ska hindra att bottenmaterialet runt fundamentet grävs ur som en följd av den hydrodynamik som bildas runt fundamenten. Ett exempel på det är Lillgrundens vindpark där erosionskyddet sträcker sig uppåt 8 meter från vindkraftsfundamentet (Hammar m.fl. 2008). Erosionskydd består ofta av stenblock, likt hummerreven, vilket genererade en tydlig reveffekt. Stenblocken ökar den strukturella komplexiteten som kan ha en gynnsam effekt på artrikedomen. Som ovan nämnt så har ett samband mellan strukturell komplexitet och antalet fiskarter, och även mängden fisk, påvisats i ett flertal studier från olika platser i världen (Öhman och Rajasuriya 1998, Ferrari m.fl. 2018, Santoso m.fl. 2022). Detta samband skulle kunna utnyttjas för att gynna etableringen av fisk och då även specifika arter (Hermans m.fl. 2020).

En reveffekt är främst en lokal påverkan i anslutning till verket som en följd av att en hårbottenmiljö tillförs. I vissa fall skulle det kunna vara en oönskad effekt till exempel om verk byggs i ett område där en unik mjukbottenmiljö ska bevaras. Det finns dock lite som talar för att tillförseln av vindkraftsfundament till havs kommer hota några fiskarter eller fiskpopulationer. Om en påverkan anses resultera i en önskvärd förändring för naturen kan det beskrivas som en naturpositiv effekt.

Fish aggregation device

Utöver en typisk reveffekt, som liknar det som generellt uppstår vid artificiella rev, är det ytterligare en faktor som ger vindkraftverk vissa unika egenskaper. Ett bottenbaserat vindkraftverk skapar en hårbottenstruktur som sträcker sig från botten hela vägen upp till ytan. I de öppna vattenmassorna skapas därmed en struktur som inte fanns där innan, i en miljö där fisknärvaren generellt är låg. På lokal nivå kan det, i de fall reveffekten är mer framträdande, innebära att mängden fiskar och arter ökar då utgångspunkten ofta är ett till stor del tomt öppet vattenområde.

Givet att vindkraftsfundamentet når till ytan kan den även liknas vid det som kallas "fish aggregation devices" (FAD) där strukturens förmåga att attrahera fisk sker närmare ytan än vad som är kännetecknande för artificiella rev. Typiskt för FAD:s är att en förankrad struktur, som flyter vid ytan, får fisk att ansamlas vid strukturen vilket också utnyttjas av fisket (Itano m.fl. 2000, Dempster 2005, Eighania 2019). Det är känt att fisk kan söka sig till flytande föremål långt ut till havs. I tropiska vatten kan det locka till sig hundratals arter (Orue m.fl. 2019). Eftersom det lockar till sig fisk så kan det även innebära ökad predation då rovdjursfiskar kan söka sig dig (Dempster 2005).

När det gäller havsbaserad vindkraft uppnås en mer typisk FAD-funktion om flytande kraftverk används då det är en flytande struktur som är förankrad i botten. Även förankringsanordningen kan generera reveffekter beroende på hur de är konstruerade. Utvecklingen av flytande vindkraft går snabbt framåt. En viktig anledning till att flytande vindkraftverk fått ett ökat intresse är att det går att installera vindkraftverk längre ut till havs, i större djup, med goda vindförhållanden.

Reveffekter och avvecklingsfasen

Livslängden för en vindpark beror på flera faktorer. Vindparker som planeras idag kan ha en förväntad livslängd på 40–45 år innan nedläggning (Bergström m.fl. 2022). Hur en sådan avveckling påverkar fisk kan vara svårt att förutse givet den långa tidsrymden. Om det inte blir några generella förändringar skulle en avveckling kunna leda till att fiskfaunan, efter en tids omställning, återgår till likartad sammansättning som innan vindkraftverken anlades. Samtidigt är havet av naturliga skäl dynamiskt och den marina miljön kan ändras över tid. Dessutom kan klimatförändringarna, under en fyrtioårsperiod, leda till förändringar i det marina livet.

En viktig faktor som påverkar utvecklingen, efter en miljöpåverkan, är hur stor påverkan har varit (Smyth m.fl. 2015). Om en miljöpåverkan är tillräckligt stor så minskar sannolikheten att miljön återgår till det tillstånd som var innan anläggningen av en park. Utvecklingen av vindparker går mot större avstånd mellan verken, vilket innebär att det blir större områden utan direkt påverkan. Det skulle

kunna innebära att möjligheten att återgå till ett tidigare tillstånd ökar, jämfört med om verken hade stått nära varandra.

Som konstateras ovan kan vindkraftsfundamenten generera en reveffekt med en ansamling av fisk. Detta som en följd av att fisk finner en hemvist i anslutning till en tillförd hårbottenmiljö (Andersson och Öhman 2010, Bergström m.fl. 2013). Om vindkraftverk genererar en reveffekt blir frågan hur en avveckling påverkar de fiskpopulationer som utvecklats kring strukturen. En nedmontering av vindkraftverk innebär att en livsmiljö för fisk försvinner dvs den hårbottenmiljö som täckte en del av botten, och dessutom penetrerade hela vattenkolumnen, är borta. Om närvaron av vindkraftsfundamentet har genererat en reveffekt betyder det att den faktor som uppehåller en reveffekt tas bort, och därmed försvinner en hårbottenstruktur för fisk att ansamlas kring.

Olika arter kommer i så fall påverkas olika. Torsk (*Gadus morhua*), som är en rörlig fisk som kan förflytta sig över större områden, påverkas sannolikt mindre än stensnultra som är mer bunden till hårbottenstrukturer. Om reveffekten är mer begränsad blir påverkan mindre. Det finns flera exempel där strukturer medvetet lämnas kvar på botten efter att de har fyllt sin funktion. Ett sådant exempel är det som kallas ”rigs-to-reefs” där olje- och gasplattformar som fungerar som rev fortsätter att gynna ansamlingar av fisk även när de inte längre används för att utvinna olja och gas (Soldal m.fl. 2002, Ajemian m.fl. 2015). Som tidigare nämnts kan sådana konstgjorda livsmiljöer vara mycket produktiva när det gäller fisk (Claisse m.fl. 2014). När fundament från havsbaserade vindkraft lämnas kvar, för att gynna fisk och andra organismer, har det beskrivits som ”renewables-to-reefs” (Smyth m.fl. 2015). Avvecklingen skulle då kunna sättas i ett större sammanhang där bevarade strukturer ingår i en havsplan för ett avgränsat område som införlivas med andra verksamheter (Christie m.fl. 2014).

Sammanfattning

- Havsbaserade vindkraftverk tillför en hårbottenmiljö som kan fungera som artificiella rev med ansamlingar av fisk som följd.
- Anhopningen av fisk kan uppstå som ett resultat av att fiskar simmar till vindkraftsfundamentet (omlokalisering) och som en konsekvens av reproduktion.
- Fisk kan söka sig till vindkraftsverk av flera skäl, till exempel tillgång till föda, skydd från predation och reproduktion.
- Olika arter kan påverkas på olika sätt där en del kan vara oberörda av närvaron av vindkraftverk och andra kan visa tydliga preferenser för att uppehålla sig nära strukturen.
- Sverige har en lång kust med olika vattenmiljöer där inte minst salthalten och klimatet påverkar vilka arter som finns var. Följaktligen kan reveffekten variera beroende på var vindkraftverk lokaliseras.
- Om fisk uppehåller sig runt vindkraftverk är sannolikheten stor att sammansättningen kommer variera över tid som en följd av naturlig variation.
- Om vindkraftsfundamenten har genererat en reveffekt innebär avvecklingen att en livsmiljö försvinner. Om en reveffekt ska vidmakthållas kan hela eller delar av vindkraftsfundament och erosionskydd bevaras.
- Det är mycket som talar för att vindkraftverk inte utgör ett hot för fiskarter eller fiskpopulationer.

Elektromagnetiska fält

Sjökablar och elektromagnetiska fält

Det finns ett stort antal sjökablar på havets botten som försörjer länder och kontinenter med ström (ESCA 2019, SVK 2021). Sjökablar återfinns i vindparker, dels de som leder strömmen från de enskilda vindkraftverken, dels kablar som leder strömmen från vindparken till stamnätet på land. Strömmen i sjökablar kan vara antingen växelström ("alternating current", AC) eller likström ("direct current", DC). Högspänd växelström (PHVAC) används främst när det gäller havsbaserad vindkraft, men högspänd likström (HVDC) kommer sannolikt öka i betydelse som en följd av ökat avstånd till land och även att vindparkerna blir större.

Ström i en kabel genererar elektromagnetiska fält. Dessa fält består av ett elektriskt fält och ett magnetiskt fält. Det elektriska fältet skärmas i normala fall av (vilket är till fördel för hajar och rockor som kan detektera elektriska fält; Montgomery och Walker 2001, Rølvåg m.fl. 2020). Även det magnetiska fältet går att begränsa och blir obetydligt till svagt om en kabel är välisolerad. Andra faktorer som påverka det magnetiska fältet är strömstyrkan, om kabeln grävs ner och hur ledarna är placerade inom kabeln. Om magnetfältet når utanför kabeln är det lokalt och avtar snabbt efter några meter från kabeln (Sherwood m.fl. 2016). Magnetfältet runt en likströmskabel är statiskt medan det runt en växelströmskabel bildas ett växlande magnetfält som byter riktning.

Fisk och magnetiska fält

Eftersom det finns fiskarter som kan uppfatta magnetiska fält, och använder jordens magnetfält för att orientera sig, skulle en sjökabel kunna påverka fisk om det magnetiska fältet är tillräckligt starkt (Hanson och Westerberg 1987, Öhman m.fl. 2007, Putman m.fl. 2013, 2014, Naisbett-Jones m.fl. 2017). Flertalet arter verkar dock vara opåverkade av sjökablar, och om de reagerar på det så är det lite som talar för att det skulle vara ett permanent hinder för förflyttning.

Dunlop m.fl. (2016) undersökte hur en sjökabel, mellan en vindpark och land, påverkade fisk. De noterade att sjökabeln inte hade någon effekt. Deras slutsats var att livsmiljö och djup hade en starkare påverkan på hur fiskarna rörde sig i området. Det skulle kunna jämföras med hur vindkraftfundament blir en livsmiljö för fisk. Bergström m.fl. (2013) lyfte fram reveffekten som en viktigare faktor i förhållande till en eventuell påverkan från magnetiska fält från sjökablar.

Ålen (*Anguilla anguilla*) är en art som gör lekvandringar mellan Sverige och Sargassohavet. Jordens magnetfält är en viktig del av deras förmåga till lokalisering (Tesch m.fl. 1992, Naisbett-Jones 2017). Givet att ålen är beroende av att uppfatta magnetfält för att orientera sig i rätt riktning är det av intresse att veta hur sjökablar kan påverka deras förmåga att hitta rätt väg. I ovannämnda studie av Dunlop m.fl. (2016), på hur fisk påverkades av en sjökabel från en vindpark, noterades ingen effekt på amerikansk ål (*Anguilla rostrata*). I en undersökning av den närbesläktade europeiska ålens (*Anguilla anguilla*) vandring förbi vindparken Lillgrund i Öresund gick det ej att med tydlighet påvisa att sjökablar hade en generell påverkan på ålens

vandring (Lagenfelt m.fl. 2012). I en annan undersökning från Kalmarsund noterades att ålar blev försenade, i genomsnitt 40 minuter, när de passerade en sjökabel (Westerberg och Lagenfelt 2008). Även en viss desorientering har observerats (Westerberg och Begout-Anras 2000).

Som tidigare konstaterats kan olika levnadsstadier i fisk påverkas olika när det gäller yttre påverkan. I en undersökning utsattes fiskägg och fisklarver av arten regnbåge (*Oncorhynchus mykiss*) för magnetiska fält (Fey m.fl. 2019). Det hade ingen påverkan på kläckningen och inte heller på embryots och fisklarvens tillväxt eller mortalitet. Tiden för när fisklarven lämnade botten påverkades inte heller. Det fanns indikationer på att gulesäcken absorberades snabbare. Även om magnetiska fält inte har en påverkan fysiologiskt så skulle det kunna få en effekt beteendemässigt på fisklarver eftersom det finns exempel på att fisklarver använder jordens magnetfält för att orientera sig (O'Connor och Muheim 2017). Noterbart är dock att sjökablar generellt inte har ett tillräckligt starkt magnetfält i anslutning till kabeln för att fisklarver ska påverkas (Formicki m.fl. 2021). För många marina fiskarter är fiskägg- och fisklarvstadiet dessutom pelagiska. De flyter fritt i de öppna vattenmassorna och är spridda över stora områden. Det skulle betyda att en eventuell lokal påverkan sannolikt inte skulle ha en effekt på populationsnivå.

Sammanfattning

- Sjukablar i vindparker, och mellan vindparker och land, kan lokalt avge magnetiska fält.
- Det är mycket som talar för att påverkan från magnetiska fält i anslutning till sjukablar är av mindre betydelse och utgör inte ett hot för fiskarter eller fiskpopulationer.

Ljus

Syner är ett viktigt organ för fisk (Douglas och Djamgoz 1990) och plötsliga ljusförändringar som till exempel en oväntad skugga kan generera ett flyktbeteende då det kan indikera att det finns ett rovdjur i närheten. Etableringen av ett vindkraftverk innebär dels att det blir en skugga orsakad av strukturen som reser sig upp ur vattnet, dels att det kan bli skuggfenomen från rotorbladen i rörelse (Lovich och Ennen 2013, Dodd och Briers 2021).

Forskning på hur skuggfenomen från vindkraftverk skulle kunna påverka fisk är begränsad (Dodd och Briers 2021) men mycket talar för att det är en fråga av mindre betydelse. En viktig anledning till det är mängden fisk som bevisligen kan uppehålla sig kring ett verk (se ovan om reveffekten). Skulle det vara en stressfaktor av större betydelse skulle dessa fiskar undvika vindkraftverken.

Det finns flera anledningar som talar emot att rotorbladens rörelse skulle störa fisk. Rotorbladen är högt upp (det kan vara 30 meter mellan vattenytan och rotorbladet när det står som lägst) och vattnet är i ständig rörelse med vågor som bryter och sprider ljuset i olika riktningar samt att vattenmiljön i svenska vatten ofta har en nivå av grumlighet. Dessutom är det normalt att solen naturligt skuggas av moln. Vidare befinner sig fisk generellt på större djup än i närheten av ytan. Skulle de trots detta uppfatta ljusförändring är det värt att notera att fisk har en förmåga att anpassa sig (habituering), i synnerhet när det inbegriper en konstant påverkan.

Hinderljus

Att ljus på natten kan påverka fisk är ett välkänt fenomen givet att ljus används flitigt som en fiskemetod för att locka fisk till fiskeredskap (Solomon and Ahmed 2016). Vindkraftverk kan, av säkerhetsskäl, ha hinderbelysning dvs lampor som ska hindra kollisioner med flyg eller fartyg. Givet att dessa lampor är högt upp är sannolikheten liten att det skulle påverka fisk. Dessutom har fisk, som ovan konstaterat, generellt en förmåga att anpassa sig genom tillvänjning om en yttre påverkan är kontinuerlig (se t.ex. Folkedal m.fl. 2010).

Sammanfattning

- Vindkraftverkens rotorblad kan orsaka skuggor som skulle kunna uppfattas av fisk. Det är dock mycket som talar för att det är av mindre betydelse. Det gäller också hinderbelysning.

Oönskad spridning

Om det blir en rörelse av marint liv mellan vindkraftverken i en vindpark, skulle det kunna uppfattas som en positiv effekt genom att det blir ett större utbyte av biologisk mångfald. Det skulle också kunna innebära att vindkraftverk gynnar spridningen av icke önskvärda fiskarter, till exempel invasiva arter. Vindkraftverken skulle kunna fungera som ”stepping stones” och bidra till en sådan spridning. Forskningen inom området är dock begränsad.

Det kan konstateras att vindkraftsfundament och erosionsskydd är jämförelsevis små ytor som står 1–2 kilometer från varandra, i de vindparker som byggs idag. Distansen och den begränsade ytan skulle kunna göra det svårt att uppnå en större spridningseffekt jämfört med naturliga strukturer som öar och kustområden med större reella ytor längs vilka fiskar kan sprida sig. För att icke önskvärda fiskarter ska spridas måste det vara arter med god spridningsförmåga, i likhet med den naturligt förekommande stensnultran (*Ctenolabrus rupestris*) som spridit sig bland vindkraftverk (Bergström m.fl. 2013, Van Hal m.fl. 2017).

Kumulativ påverkan

Anläggningsfasen

Med de planer som nu föreligger vad gäller etableringen av havsbaserade vindparker i Sverige, är det möjligt att en additiv påverkan skulle kunna uppstå under anläggningsfasen. Om flera vindparker anläggs samtidigt skulle de olika påverkansfaktorerna kunna samverka i vad som beskrivs som en kumulativ påverkan. Det skulle till exempel kunna gälla om två monopile-fundament pålas i varandras närhet samtidigt och att ljudspridningsradierna överlappar. Det gäller också om två monopile-fundament behöver borras i varandras närhet vilket skulle kunna resultera i att sedimentplymer blandas.

Det är dock föga troligt att anläggandet av vindparker skulle ske på ett sådant sätt att det skulle få en kumulativ effekt givet att vindkraftverk då måste installeras i samma stund i närheten av varandra. Anläggningsfasen är tidsmässigt begränsad och det sker bara en gång på en given plats. Med de långa och omfattande beslutsprocesser som föreligger i Sverige för etablering av varje enskild vindpark (Malafry och Öhman 2022) är det osannolikt att två vindparker anläggs samtidigt bredvid varandra. Utöver de planer som finns för vindparker i svensk ekonomisk zon byggs det vindparker i närheten av svenska vatten. Kumulativa effekter handlar då även om vad som görs i andra länders ekonomiska zon som angränsar till svenska vatten.

Vid anläggandet av en enskild vindpark skulle två vindkraftverk kunna installeras samtidigt vilket skulle kunna ge en kumulativ effekt inom en vindpark, om det sker i varandras närhet. En kumulativ påverkan skulle då kunna reduceras genom att välja olika tidpunkter för anläggning och tillbörlig distans mellan installationsplatser inom vindparken.

I sammanhanget är det viktigt att notera att det finns utmaningar i det svenska systemet när det gäller planeringen av vindkraftsetableringar till havs (Havs- och vattenmyndigheten 2022, Malafry och Öhman 2022). Det skapas omständliga processer med rådande regelverk vilket också försvårar överblicken vad gäller kumulativa effekter.

Driftfasen

Genom att vindkraftsfundamentet tillför en ny livsmiljö i öppet hav öppnas också en möjlighet för arter att röra sig mellan vindkraftverken. Om det blir en reveffekt innebär det att det blir mer fisk på en plats än vad som var där innan. Bli det en reveffekt vid ett fundament inom en vindpark är sannolikheten stor att det blir en liknande utveckling i anslutning till övriga vindkraftsverk inom en vindpark. Det betyder också att det kan bli en interaktion mellan verken. En sådan, så kallad konnektivitet, innebär att det blir ett flöde av fisk mellan strukturerna inom vindparken. Detta flöde handlar om vuxna fiskar som aktivt simmar mellan vindkraftverken. Många arter kan röra sig över stora områden mellan olika delar av havslandskapet (Berkström m.fl. 2019). Fisklarver är också en viktig faktor då de sprids av strömmar i den pelagiska larvfasen och finner lämplig livsmiljö på fundamenten. Trots att fisklarver är små, ännu icke fullt utvecklade fiskar, finns

det studier som visar att de kan söka sig till lämplig livsmiljö i slutet av larvstadiet (Carr 1991, Öhman m.fl. 1998).

Genom att vindparken består av flera verk i ett område som kan liknas vid mindre öar skulle hela parken kunna beskrivas som en artificiell skärgård. Ju fler vindkraftverk, och ju närmare de står varandra, desto större sannolikhet för att det blir en interaktion mellan vindkraftverk. Samtidigt kan det konstateras att varje enskilt verk utgör en begränsad yta och att utvecklingen går från att det är några hundra meter till 1–2 kilometer mellan vindkraftverken. Ju längre vindkraftverken står ifrån varandra desto längre distans för ett utbyte av organismer. Det skulle i så fall betyda att interaktionen av fisk (individer, populationer, arter) mellan verken minskar med distansen.

Precis som reveffekten kommer skilja sig åt i Sverige kommer även konnektiviteten variera. Det finns områden som till exempel i Bottenviken, där reveffekten sannolikt kommer vara mindre uttalad än i Västerhavet, då det senare har flera arter inklusive mer utpräglade hårdbottnarter. Är reveffekten mer begränsad blir det också en mindre påtaglig konnektivitet.

Konnektivitet gäller också det som kan ske mellan vindkraftverk och naturliga livsmiljöer till exempel öar och kuststräckor. Av förklarliga skäl blir den sannolikt större ju närmare det är mellan land och vindpark. Dessutom kan djup och naturliga undervattensstrukturer ha en påverkan. I Sverige finns det ett flertal utsjöbankar med fisk som kan interagera med vindkraftverk (Naturvårdsverket 2010). Även isolerade mindre rev i djupare vatten kan ha fiskarter som kan interagera med vindkraftverk (Beisiegel m.fl. 2019). Det skulle också kunna uppstå en samverkan mellan vindpark och skyddade områden vilket skulle kunna användas strategiskt för att öka en skyddseffekt (Hammar m.fl. 2016, Püts m.fl. 2023).

Interaktioner med andra marina näringar

En kumulativ påverkan vad gäller annan mänsklig aktivitet är också möjlig. Svenska hav erbjuder många ekosystemtjänster och med det följer olika verksamheter (Ahtiainen och Öhman 2014). Fiske, sjöfart och annan båttrafik utgör de mest påtagliga aktiviteterna (Havsmiljöinstitutet 2014, Hav- och vattenmyndigheten 2021).

Fiske kan direkt påverkas av att en vindpark anläggs. En viktig anledning är att vissa fiskemetoder, som till exempel trålning, kan vara svåra att använda inom en vindpark, med minskat fiske som följd. Om det blir så kan det på sikt gynna fiskpopulationerna inom området, då fisk inte fångas i samma utsträckning som innan vindkraftsetableringen. Det kan också handla om att bottentrålning upphör vilket leder till att det blir en återhämtning av bottenlevande organismer (Coates m.fl. 2016). Det går då att tala om en kumulativ skyddseffekt.

Även sjöfart kan påverka och bli påverkad av vindkraft. Ett exempel på det är Lillgrund vindpark som ligger i Öresund i närheten av en farled med mycket omfattande sjötrafik. Många av de vindparker som planeras att byggas i Sverige skulle placeras i anslutning till farleder. Vindparkerna kan hindra en del sjötrafik och i vissa fall kan farleder behöva läggas om. Under anläggning av en vindpark kan det lokalt bli en ökad sjötrafik för de fartyg som behövs vid montering av vindkraftverk och under driftfasen används båtar för underhåll.

Om sjötrafiken ändras skulle det kunna påverka fisk även om det är svårt att vetenskapligt visa hur. Som ovan nämnt kan fisk påverkas av ljudet från båtmotorer. Om det blir förändringar i sjötrafik skulle detta kunna vara gynnsamt för fisk om det innebär att det blir mindre sjötrafik, och tvärtom vara negativ om sjötrafiken ökar. Även om det finns studier som visar att fisk kan påverkas av ljud från båtmotorer (Kikuchi 2010, Andersson m.fl. 2011, Bruintjes och Radford 2013, McCormick m.fl. 2018, Tougaard m.fl. 2020) är det svårt att visa hur förändringar i sjötrafik, på en skala som inbegriper hela vindparker och angränsande farleder, skulle kunna påverka fisk.

Sammanfattning

- Vid byggande av vindparker samt under driftfasen kan det uppstå kumulativa effekter när flera faktorer samverkar.
- Under anläggningsfasen skulle det kunna bli en kumulativ effekt av att flera vindparker anläggs i varandras närheten samtidigt. Sannolikheten för detta är dock liten givet varje enskild vindparks omfattande planerings- och tillståndsprocess samt att anläggningsperioden är reglerad i tillståndet.
- Under driftfasen skulle en kumulativ effekt kunna innebära att det blir en rörelse av fisk mellan vindkraftverk och vindparker. Fisk skulle också kunna röra sig mellan vindkraftverk och kuststräckor, utsjöbankar och skyddade områden.
- En kumulativ effekt kan även ske när det gäller annan mänsklig aktivitet som till exempel sjöfart och fiske.
- Om närvaron av en vindpark skulle leda till att fisk skyddas kan det beskrivas som en kumulativ skyddseffekt.

Tack

Ett stort tack till Lena Bergström, SLU, för värdefulla kommentarer och diskussioner i samband med framtagandet av rapporten samt till Mathilda Karlsson och Carl Rolff för konstruktiva kommentarer på rapportens innehåll. Ett stort tack till rapportens vetenskapliga granskare Martin Snickars, Åbo Akademi, Finland och relevansgranskare Goncalo Carneiro och Mårten Åström, Havs- och vattenmyndigheten och Bjarke Laubek, Vattenfall samt till Kjell Grip, Kerstin Jansbo, Kajsa Olsson och Åsa Elmqvist, Vindval och Oskar Forsum, Energimyndigheten, för konstruktiva synpunkter kring rapportens innehåll.

Referenser

Ajemian MJ, Wetz JJ, Shipley-Lozano B, Shively JD, Stunz GW (2015) An Analysis of Artificial Reef Fish Community Structure along the Northwestern Gulf of Mexico Shelf: Potential Impacts of “Rigs-to-Reefs” Programs. *PlosOne* 10: e0126354.

Ahtiainen H, Öhman MC (2014) Ecosystem Services in the Baltic Sea – Valuation of marine and coastal ecosystem services in the Baltic Sea. *TemaNord* 2014: 563.

Andersson MH, Öhman MC (2010) Fish and sessile assemblages associated with wind-turbine constructions in the Baltic Sea. *Marine and Freshwater Research* 61: 642–650.

Andersson, Sigra P, Persson LKG (2011) Ljud från vindkraftverk i havet och dess påverkan på fisk. *Vindval Naturvårdsverket Rapport 6436*.

Andersson MH, Andersson S, Ahlsén J, Brodd Andersson L, Hammar J, Persson LKG, Pihl J, Sigra P, Wikström A (2016) Underlag för reglering av undervattensljud vid pålning. *Vindval Naturvårdsverket Rapport 6723*.

Angantyr LA, Rasmussen J, Göranson P, Jeppesen JP, Svedäng H (2007) Fisk i Öresund. *Öresundsvattensamarbetet Rapport*.

Antoni L, Saillant E (2017) Spatial connectivity in an adult-sedentary reef fish with extended pelagic larval phase. *Molecular Ecology* 26: 4955–4965.

Auld AH, Schubel JR (1978) Effects of suspended sediment on fish eggs and larvae: a laboratory assessment. *Estuarine and Coastal Marine Science* 6: 153–164.

Axenrot T, Didrikas T (2012) Effekter av havsbaserad vindkraft på pelagisk fisk. *Vindval Naturvårdsverket Rapport 6481*.

Baeye M, Fettweis M (2015) In situ observations of suspended particulate matter plumes.

at an offshore wind farm, southern North Sea. *Geo-Marine Letters* 35: 247–255.

Baine M (2001) Artificial reefs: a review of their design, application, management, and performance. *Ocean & Coastal Management* 44: 241–259.

Barbut L, Vastenhoud B, Vigin L, Degraer S, Volckaert FAM, Lacroix G (2020) The proportion of flatfish recruitment in the North Sea potentially affected by offshore windfarms. *ICES Journal of Marine Science* 77: 1227–1237.

Beck MW (2000) Separating the elements of habitat structure: independent effects of habitat complexity and structural components on rocky intertidal gastropods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 249: 29–49.

Beisiegel K, Tauber F, Gogina M, Zettle ML, Darr A (2019) The potential exceptional role of a small Baltic boulder reef as a solitary habitat in a sea of mud. *Aquatic Conservation Marine Freshwater Ecosystems* 29: 321–328.

Benhemma-Le Gall A, Graham IM, Merchant ND, Thompson PM (2021) Broad-scale response of harbour porpoises to pile-driving and vessel activities during offshore windfarm construction. *Frontiers in Marine Science* 8: 664724.

- Berg L, Northcote TG (1985) Changes in territorial, gill-flaring, and feeding behavior in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) following short-term pulses of suspended sediment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 42: 1410–1417.
- Bergström L, Sundqvist F, Bergström U (2013) Effects of an offshore wind farm on temporal and spatial patterns in the demersal fish community. *Marine Ecology Progress Series* 485: 199–210.
- Bergström L, Öhman MC, Berkström C, Isæus M, Kautsky L, Koehler B, Sandman AN, Ohlsson H, Ottvall R, Schack H, Wahlberg M (2022) Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv. *Vindval Naturvårdsverket Rapport 7049*.
- Berkström C, Wennerström L, Bergström U (2019) Ekologisk konnektivitet i svenska kust- och havsområden – en kunskapsmanställning. *Aqua reports* 2019:15.
- Bohnsack JA (1989) Are high densities of fishes at artificial reefs the result of habitat limitation or behavioral preferences. *Bulletin of Marine Science* 44: 631–645.
- Bolle LJ, de Jong CAF, Bierman SM, van Beek PJG, van Keeken OA, Wessels PW, Van Damme CJG, Winter HV, De Haan D, Dekeling RPA (2012) Common Sole Larvae Survive High Levels of Pile-Driving Sound in Controlled Exposure Experiments. *PLoS ONE* 7: e33052.
- Bruintjes R, Radford AN (2013) Context-dependent impacts of anthropogenic noise on individual and social behaviour in a cooperatively breeding fish. *Animal Behaviour* 85: 1343–1349.
- Buyse J, Hostens K, Degraer S, De Backer A (2022) Offshore wind farms affect the spatial distribution pattern of plaice *Pleuronectes platessa* at both the turbine and wind farm scale. *ICES Journal of Marine Science* 79: 1777–1786.
- Båmstedt U, Larsson S, Stenman Å, Magnhagen C, Sigra P (2009) Effekter av undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk på fisk från Bottniska viken. *Vindval Naturvårdsverket Rapport 5924*.
- Carr MH (1991) Habitat selection and recruitment of an assemblage of temperate zone reef fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 146: 113–137.
- Casper BM, Smith ME, Halvorsen MB, Sun H, Carlson TJ, Popper AN (2013) Effects of exposure to pile driving sounds on fish inner ear tissues. *Comparative Biochemistry and Physiology* 166: 352–360.
- Churchill JH (1989) The effect of commercial trawling on sediment resuspension and transport over the Middle Atlantic Bight continental shelf. *Continental Shelf Research* 9: 841–865.
- Claisse JT, Pondella DJ, Love M, Zahn LA, Williams CM, Williams JP, Bull AS (2014) Oil platforms off California are among the most productive marine fish habitats globally. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 15462–15467.
- Christie N, Smyth K, Barnes R, Elliott M (2014) Co-location of activities and designations: a means of solving or creating problems in marine spatial planning? *Marine Policy* 43: 254–261.
- Coates DA, van Hoey G, Colson L, Vincx M, Vanaverbeke J (2015) Rapid macrobenthic recovery after dredging activities in an offshore wind farm in the Belgian part of the North Sea. *Hydrobiologia* 756: 3–18.

- Coates DA, Kapasakali DA, Vincx M, Vanaverbeke J (2016) Short-term effects of fishery exclusion in offshore wind farms on macrofaunal communities in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research* 179: 131–138.
- Da Silva IM, Hill N, Shimadzu H, Soares AMVM, Dornelas M (2015) Spillover effects of a community-managed marine reserve. *PLoS ONE* 10: e0111774.
- Debusschere E, Hostens K, Adriaens D, Ampe B, Botteldooren D, De Boeck G, De Muynck A, Sinha AK, Vandendriessche S, Van Hoorebeke L, Vincx M, Degraer S (2016) Acoustic stress responses in juvenile sea bass *Dicentrarchus labrax* induced by offshore pile driving. *Environmental Pollution* 208: 747–757.
- Dempster T (2005) Temporal variability of pelagic fish assemblages around fish aggregation devices: biological and physical influences. *Journal of Fish Biology* 66: 1237–1260.
- De Troch M, Reubens JT, Heirman E, Degraer S, Vincx M (2013) Energy profiling of demersal fish: A case-study in wind farm artificial reefs. *Marine Environmental Research* 92: 224–233.
- Dicken ML (2010) The ichthyofauna in the Port of Ngqura, South Africa. *African Journal of Marine Science* 32: 491–499.
- De Madron XD, Ferré B, Le Corre G, Grenz C, Conan P, Pujo-Pay M, Buscail R, Bodiot O (2005) Trawling-induced resuspension and dispersal of muddy sediments and dissolved elements in the Gulf of Lion (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research* 25: 2387–2409.
- Dempster T (2005) Temporal variability of pelagic fish assemblages around fish aggregation devices: biological and physical influences. *Journal of Fish Biology* 66: 1237–1260.
- Dodd JA, Briers RA (2021) The impact of shadow flicker or pulsating shadow effect, caused by wind turbine blades, on Atlantic salmon (*Salmo salar*) CD2020 08. Scotland's Centre of Expertise for Waters (CREW).
- Dong Energy, Danish Energy Authority, Danish Forest and Nature Agency (2006) Danish offshore wind – key environmental issues, Denmark.
- Douglas RH, Djamgoz MBA (1990) The visual system of fish. Chapman and Hall.
- Duarte m.fl. (25 författare) (2021) The soundscape of the Anthropocene ocean. *Science* 371: 6529.
- Dunlop ES, Reid SM, Murrant M (2016) Limited influence of a wind power project submarine cable on a Laurentian Great Lakes fish community. *Journal of Applied Ichthyology* 32: 18–31.
- Eighania M, Paighambaria SY, Taquetb M, Gaertner JC (2019) Introducing nearshore fish aggregation devices (FAD) to artisanal Persian Gulf fisheries: A preliminary study. *Fisheries Research* 212: 35–39.
- Engås A, Løkkeborg S, Ona E, Soldal AV (2006) Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 53: 2238–2249 (1996).

- ESCA (2019) An introduction to subsea cables around the UK and North-western Europe. European Subsea Cables Association Report.
- Esgro MW, Lindholm J, Nickols KJ, Bredvik J (2020) Early conservation benefits of a de facto marine protected area at San Clemente Island, California. PLoS ONE 15: e0224060.
- Ferrari R, Malcolm HA, Byrne M, Friedman A, Williams SB, Schultz A, Jordan AR, Figueira WF (2018) Habitat structural complexity metrics improve predictions of fish abundance and distribution. *Ecography* 41: 1077–1091.
- Fey DP, Jakubowska M, Greszkiewicz M, Andrulowicz E, Otrembab Z, Urban-Malingaa B (2019) Are magnetic and electromagnetic fields of anthropogenic origin potential threats to early life stages of fish? *Aquatic Toxicology* 209: 150–158.
- Folkedal O, Torgersen T, Nilsson J, Oppedal F (2010) Habituation rate and capacity of Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr to sudden transitions from darkness to light. *Aquaculture* 307: 170–172.
- Formicki K, Korzelecka-Orkisz A, Tański A (2021) The Effect of an Anthropogenic Magnetic Field on the Early Developmental Stages of Fishes – A Review. *International Journal of Molecular Sciences* 22: 1210.
- Fudge SB, Rose GA (2009) Passive- and active-acoustic properties of a spawning Atlantic cod (*Gadus morhua*) aggregation. *ICES Journal of Marine Science* 66: 1259–1263.
- Glarou M, Zrust M, Svendsen JC (2020) Using artificial-reef knowledge to enhance the ecological function of offshore wind turbine foundations: Implications for fish abundance and diversity. *Journal of Marine Science and Engineering* 8: 332.
- Gollasch S, Rosenthal H (2006) The Kiel Canal. The world's busiest man-made waterway and biological invasions. I: Gollasch S, Falil BS, Cohen AN (Red) Bridging Divides: maritime canals as invasion corridors. *Monographiae Biologicae* 83. Springer.
- Gorska N, Ona E, Korneliussen R (2005) Acoustic backscattering by Atlantic mackerel as being representative of fish that lack a swimbladder. Backscattering by individual fish. *ICES Journal of Marine Science* 62: 984–995.
- Halouani G, Villanueva CM, Raoux A, Dauvin JD, Lasram FBR, Foucher E, Le Loc'h F, Safi G, Azaiz E, Robin JP, Niquil N (2020) A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm. *Journal of Marine Systems* 212: 103434.
- Halpern BS, Lester SE, Kellner JB (2009) Spillover from marine reserves and the replenishment of fished stocks. *Environmental Conservation* 36: 268–276.
- Halvorsen MB, Casper BM, Woodley CM, Carlson TJ, Popper AN (2012a) Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. PLoS ONE 7.
- Halvorsen MB, Casper, BC, Matthews F, Carlson TJ, Popper AN (2012b) Effects of exposure to pile driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia, and hogchoker. *Proceeding Royal Society B* 279:47.

- Hammar L, Wikström A, Börjesson P, Rosenberg R (2008) Studier på småfisk vid Lillgrund vindpark. Effekstudier under konstruktionsarbeten och anläggning av gravitationsfundament. Naturvårdsverkets Rapport 5831.
- Hammar L, Magnusson M, Rosenberg R, Granmo Å (2009) Miljöeffekter vid muddring och dumpning: en litteratursammanställning. Naturvårdsverket Rapport 5999.
- Hammar L, Wikström A, Molander S (2014) Assessing ecological risks of offshore wind power on Kattegat cod. *Renewable Energy* 66: 414–424.
- Hammar L, Perry D, Gullström M (2016) Offshore Wind Power for Marine Conservation. *Open Journal of Marine Science* 6: 1.
- Han DG, Choi JW (2022) Measurements and Spatial Distribution Simulation of Impact Pile Driving Underwater Noise Generated During the Construction of Offshore Wind Power Plant Off the Southwest Coast of Korea. *Frontiers in Marine Science* 8: 654991.
- Havs- och vattenmyndigheten (2021) Fisk- och skaldjursbestånd i hav och sötvatten 2020: Resursöversikt. Rapport 2021:6.
- Havs- och vattenmyndigheten (2022) Uppdrag att utreda frågor om exklusivitet för anläggande av vindkraftsparker i allmänt vatten och i Sveriges ekonomiska zon. Redovisning av regeringsuppdrag M2022/00768.
- Havsmiljöinstitutet (2014) Sjöfarten kring Sverige och dess påverkan på havsmiljön. Havsmiljöinstitutets rapport 2014:4.
- Hawkins AD, Picciulin M (2019) The importance of underwater sounds to gadoid fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146: 3536–3551.
- Herbert-Read JE, Kremer L, Bruintjes R, Radford AN, Ioannou CC (2017) Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals. *Proceedings of the Royal Society B* 284:20171627.
- Hermans A, Bos OG, Prusina I (2020) Nature inclusive Design: A Catalogue for offshore wind infrastructure: Technical report no 114266/20-004.274.
- Hildebrand JA (2009) Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series* 395:5–20.
- Humborstad OB, Jørgensen T, Grotmol S (2006) Exposure of cod *Gadus morhua* to resuspended sediment: an experimental study of the impact of bottom trawling. *Marine Ecology Progress Series* 309: 247–254.
- Hunter WR, Sayer MDJ (2009) The comparative effects of habitat complexity on faunal assemblages of northern temperate artificial and natural reefs. *ICES Journal of Marine Science* 66: 691–698.
- Hylkema A, Debrot AO, Osinga R, Brona PS, Heesink DB, Izioka AK, Reida CB, Rippena JC, Treibitze T, Matan Yuvalde M, Murk AJ (2020) Fish assemblages of three common artificial reef designs during early colonization. *Ecological Engineering* 157: 105994.

- Højgård Petersen A, Clausen P, Gamfelt L, Hansen JLS, Norling P, Roth E, Svedäng H, Tunón H (2018) The Sound: Biodiversity and ecosystem services in a densely populated and heavily exploited area. I: Tunón (Red): Biodiversity and ecosystem services in Nordic coastal ecosystems: an IPBES-like assessment. Volume 2. The geographical case studies. TemaNord 2018:532. Nordic Council of Ministers.
- Isæus M, Beltrán J, Isæus ES, Öhman MC, Andersson-Li M (2022) Ekologiskt hållbar vindkraft i Östersjön. Vindval Naturvårdsverket Rapport 7055.
- Itano DG, Holland KN (2000) Movement and vulnerability of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in relation to FADs and natural aggregation points. Aquatic Living Resources 13:213–23.
- Jiddawi NS, Öhman MC (2002) Marine fisheries in Tanzania. Ambio 31: 518–527.
- Johnston DW, Wildish DJ (1981) Avoidance of dredge spoil by herring (*Clupea harengus*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 26, 307–314.
- Johnston DD, Wildish DJ (1982) Effect of suspended sediment on feeding by larval herring (*Clupea harengus*). Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 29, 261–267.
- Karlsson M, Kraufvelin P, Östman Ö (2020) Kunskapssammanställning om effekter på fisk och skaldjur av muddring och dumpning i akvatiska miljöer. En syntes av grumlingens dos och varaktighet. Aqua reports 2020:1.
- Kastelein A, Heul S, Verboom WC, Jennings N, Veen J, Haan D (2008) Startle response of captive North Sea fish species to underwater tones between 0.1 and 64 kHz. Marine Environmental Research 65: 369–377.
- Kasuman AO (2008). Sounds and sound production in fishes. Journal of Ichthyology 48: 981–1030.
- Kemp P, Sear D, Collins A, Naden P, Jones I (2011) The impacts of fine sediment on riverine fish. Hydrological Processes 25: 1800–1821.
- Kikuchi R (2010) Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. Marine Pollution Bulletin 60: 172–177.
- Kinlan BP, Gaines SD (2003) Propagule dispersal in marine and terrestrial environments: a community perspective. Ecology 84: 2007–2020.
- Kjørboe T, Frantsen E, Jensen C, Sørensen G (1981) Effects of suspended sediment on development and hatching of herring (*Clupea harengus*) eggs. Estuarine, Coastal and Shelf Science 13: 107–111.
- Kraufvelin P, Bergström L, Sundqvist F, Ulmestrand M, Wennhage H, Wikström A, Bergström U (2023) Rapid re-establishment of top-down control at a no-take artificial reef. Ambio 52: 556–570.
- Krone R, Gutow L, Brey T, Dannheim J, Schröder A (2013) Mobile demersal megafauna at artificial structures in the German Bight – Likely effects of offshore wind farm development. Estuarine, Coastal and Shelf Science 125: 1–9.
- Lacal-Aránzaga R, Yustab JM, Domínguez-Navarro JA (2018) Offshore wind installation: Analysing the evidence behind improvements in installation time. Renewable and Sustainable Energy Reviews 92: 133–145.

- Ladich F (2019) Ecology of sound communication in fishes. *Fish and fisheries* 20: 552–563.
- Lagenfelt I, Andersson I, Westerberg H (2012) Blankålsvandring, vindkraft och växelströmsfält. Vindval Naturvårdsverket Rapport 6479.
- Langhamer O, Dahlgren TG, Rosenqvist G (2018) Effect of an offshore wind farm on the viviparous eelpout: Biometrics, brood development and population studies in Lillgrund, Sweden. *Ecological Indicators* 84: 1–6.
- Lefaible N, Braeckman U, Degraer S, Vanaverbeke J, Moens T (2023) A wind of change for soft-sediment infauna within operational offshore windfarms. *Marine Environmental Research* 188:106009.
- Lindeboom HJ, Kouwenhoven HJ, Bergman MJN, Bouma S, Brasseur S, Daan R, Fijn RC, de Haan D, Dirksen S, van Hal R, Hille Ris Lambers R, ter Hofstede R, Krijgsveld KL, Leopold M, Scheidat M (2011) Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environmental Research Letters* 6: 035101.
- Love MS, Claisse JT, Roeper A (2019) An analysis of the fish assemblages around 23 oil and gas platforms off California with comparisons with natural habitats. *Bulletin of Marine Science* 95: 477–514.
- Lovich JE, Ennen JR (2013) Assessing the state of knowledge of utility-scale wind energy development and operation on non-volant terrestrial and marine wildlife. *Applied Energy* 103: 52–60.
- Lowe ML, Morrison MA, Taylor RB. (2015) Harmful effects of sediment-induced turbidity on juvenile fish in estuaries. *Marine Ecology Progress Series* 539: 241–254.
- Länsstyrelsen (2007) Hummerrevsprojektet Slutrapport. Länsstyrelsens i Västra Götalands Län rapport nr 2007:41.
- Malafry M, Öhman MC (2022) Rättsliga förutsättningar för havsbaserad vindkraft. Vindval Naturvårdsverket Rapport 7028.
- Mavraki N, Degraer S, Vanaverbeke J (2021) Offshore wind farms and the attraction-production hypothesis: insights from a combination of stomach content and stable isotope analyses. *Hydrobiologia* 848: 1639–1657.
- McCauley RD, Fewtrell J, Popper AN (2003) High intensity anthropogenic sound damages fish ears. *The Journal of the Acoustical Society of America* 113: 638–642.
- McCormick MI, Allan BJM, Harding H, Simpson SD (2018) Boat noise impacts risk assessment in a coral reef fish but effects depend on engine type. *Scientific Reports* 8: 3847.
- Mikkelsen L, Mouritsen KN, Dahl K, Teilmann J, Tougaard J (2013) Re-established stony reef attracts harbour porpoises *Phocoena phocoena*. *Marine Ecology Progress Series* 481: 239–248.
- Montgomery JC, Walker MM (2001) Orientation and navigation in elasmobranchs: which way forward? In *The behaviour and sensory biology of elasmobranch fishes: an anthology in memory of Donald Richard Nelson*. Springer, Dordrecht. s. 109–116.

- Mooney TA, Andersson MH, Stanley J (2020) Acoustic Impacts of Offshore Wind Energy on Fishery Resources: An Evolving Source and Varied Effects Across a Wind Farm's Lifetime. *Oceanography* 33: 82–95.
- Moore PG (1977) Inorganic particulate suspension in the sea and their effects on marine animals. *Oceanography Marine Biology Annual Review* 15: 225–363.
- Mueller-Blenkle C, Gill AB, McGregor PK, Metcalfe J, Bendall V, Wood D, Andersson MH, Sigray P, Thomsen F (2010a) Behavioural reactions of cod and sole to playback of pile driving sound. *The Journal of the Acoustical Society of America* 128: 2331.
- Mueller-Blenkle C, McGregor PK, Gill AB, Andersson MH, Metcalfe J, Bendall V, Sigray P, Wood DT, Thomsen F (2010b) Effects of Pile-driving Noise on the Behaviour of Marine Fish. COWRIE Technical Report.
- Mustonen M, Klauson A, Andersson M, Clorennec D, Folegot T, Koza R, Pajala J, Persson L, Tegowski J, Tougaard J, Wahlberg M, Sigray P (2019) Spatial and Temporal Variability of Ambient Underwater Sound in the Baltic Sea. *Scientific Reports* 9: 13237.
- Naisbett-Jones LC, Putman NF, Stephenson JF, Ladak S, Young KA (2017) A magnetic map leads juvenile European eels to the Gulf Stream. *Current Biology* 27: 1236–1240.
- Naturvårdsverket (2010) Undersökning av utsjöbankar – Inventering, modellering och naturvärdesbedömning. Naturvårdsverket rapport 6385.
- Newcombe CP, MacDonald DD (1991) Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. *North American Journal of Fisheries Management* 11: 72–82.
- O'Connor J, Muheim R (2017) Pre-settlement coral-reef fish larvae respond to magnetic field changes during the day. *Journal of Experimental Biology* 220: 2874–2877.
- Orue B, Lopez J, Moreno G, Santiago J, Soto M, Murua H (2019) Aggregation process of drifting fish aggregating devices (DFADs) in the Western Indian Ocean: Who arrives first, tuna or non-tuna species? *PLoS One* 14: e0210435.
- Palanques A, Guillén J, Puig P (2001) Impact of bottom trawling on water turbidity and muddy sediment of an unfished continental shelf. *Limnology and Oceanography*, 46(5), 1100–1110.
- Pangerc T, Theobald PD, Wang LS, Robinson SP, Lepper PA (2016) Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. *Journal of the Acoustical Society of America* 140: 2913–2922.
- Partridge GJ, Michael RJ (2010) Direct and indirect effects of simulated calcareous dredge material on eggs and larvae of pink snapper *Pagrus auratus*. *Journal of fish biology* 77: 227–240.
- Paxton AB, Shertzer KW, Bacheler NM, Kellison GT, Riley KL, Taylor JC (2020) Meta-analysis reveals artificial reefs can be effective tools for fish community enhancement but are not one-size-fits-all. *Frontiers in Marine Science* 7: 282.
- Pereira PHC, Dos Santos MVB, Lippi DL, Silva PHD, Barros B (2017) Difference in the trophic structure of fish communities between artificial and natural habitats in a tropical estuary. *Marine and Freshwater Research* 68: 473–483.

- Pickering H, Whitmarsh D (1997) Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the attraction versus production debate, the influence of design and its significance for policy. *Fisheries research* 31: 39–59.
- Popper AN, Hastings MC (2009) The effect of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology* 75: 455–489.
- Popper AN, Hawkins AD, Sand O, Sisneros JA (2019) Examining the hearing abilities of fishes *The Journal of the Acoustical Society of America* 146: 948–955.
- Popper AN, Hice-Dunton L, Jenkins E, Higgs DM, Krebs J, Mooney A, Rice A, Roberts L, Thomsen F, Vigness-Raposa K, Zeddies David, Williams KA (2022) Offshore wind energy development: Research priorities for sound and vibration effects on fishes and aquatic invertebrates. *Journal of the Acoustical Society of America* 151: 205–215.
- Powers SP, Grabowski JH, Peterson CH, Lindberg WJ (2003) Estimating enhancement of fish production by offshore artificial reefs: uncertainty exhibited by divergent scenarios. *Marine Ecology Progress Series* 264: 265–277.
- Putland RL, Montgomery JC, Radford CA (2019) Ecology of fish hearing. *Journal of Fish Biology* 95: 39–52.
- Putman NF, Lohmann KJ, Putman EM, Quinn TP, Klimley AP, Noakes DLG (2013) Evidence for geomagnetic imprinting as a homing mechanism in Pacific Salmon. *Current Biology* 23: 312–316.
- Putman NF, Jenkins ES, Michielsens CGJ, Noakes DLG (2014) Geomagnetic imprinting predicts spatio-temporal variation in homing migration of pink and sockeye salmon. *J. R. Soc. Interface* 11: 20140542.
- Püts M, Kempf A, Möllmann C, Taylor M (2023) Trade-offs between fisheries, offshore wind farms and marine protected areas in the southern North Sea – Winners, losers and effective spatial management. *Marine Policy* 152: 105574.
- Reubens JT, Vandendriessche S, Zenner AN, Degraer S, Vincx M (2013) Offshore wind farms as productive sites or ecological traps for gadoid fishes? – Impact on growth, condition index and diet composition. *Marine Environmental Research* 90: 66–74.
- Reubens JT, Degraer S, Vincx M (2014a) The ecology of benthopelagic fishes at offshore wind farms: a synthesis of 4 years of research. *Hydrobiologia* 727: 121–136.
- Reubens JT, Maarten DR, Degraer S, Vincx M (2014b) Diel variation in feeding and movement patterns of juvenile Atlantic cod at offshore wind farms. *Journal of Sea Research* 85: 214–221.
- Rølvåg T, Hagen AB, Hagen TB (2020) Shark attacks on offshore streamer cables. *Engineering Failure Analysis* 110: 104403.
- Russell DJF, Brasseur SMJM, Thompson D, Hastie GD, Janik VM, Aarts G, McClintock BT, Matthiopoulos J, Moss SEW, McConnell B (2014) Marine mammals trace anthropogenic structures at sea. *Current Biology* 24: R638–R639.

Santoso P, Setiawan F, Subhan B, Arafat D, Bengen DG, Sani LMI, Humphries AT, Madduppa H (2022) Influence of coral reef rugosity on fish communities in marine reserves around Lombok Island, Indonesia. *Environmental Biology of Fishes* 105: 105–117.

Shackle VJ, Hughes S, Lewis VT (1999). The influence of three methods of gravel cleaning on brown trout, *Salmo trutta*, egg survival. *Hydrological processes* 13: 477–486.

Sherwood J, Chidgey S, Crockett P, Gwyther D, Percival H, Stewart S, Strong D, Whitely B, Williams A (2016) Installation and operational effects of a HVDC submarine cable in a continental shelf setting: Bass Strait, Australia. *Journal of Ocean Engineering and Science* 1: 337–353.

Sigray P, Andersson MH, Fristed T (2009) Partikelrörelser i vattnet vid ett vindkraftverk – Akustisk störning. Naturvårdsverket Rapport 5963-7.

Sigray P, Linné M, Andersson MH, Nöjd A, Persson LK, Gill AB, Thomsen F (2022) Particle motion observed during offshore wind turbine piling operation. *Marine Pollution Bulletin* 180: 113734.

Skaret G, Axelsen BE, Nøttestad L, Fernö A, Johannessen A (2005) The behaviour of spawning herring in relation to a survey vessel. *ICES Journal of Marine Science* 62: 1061–1064.

Slotte A, Kansen K, Dalen J, Ona E (2004) Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. *Fisheries Research* 67, 143–150.

Smith ME, Kane AS, Popper AN (2004) Noise-induced stress response and hearing loss in goldfish (*Carassius auratus*). *Journal of Experimental Biology* 207: 427–435.

Smyth K, Christie N, Burdon D, Atkins JP, Barnes R, Elliott M (2015) Renewables-to-reefs? – Decommissioning options for the offshore wind power industry. *Marine Pollution Bulletin* 90: 247–258.

Soldal AV, Svellingen I, Jorgensen T, Lokkeborg S (2002) Rigs-to-reefs in the North Sea: hydroacoustic quantification of fish in the vicinity of a “semi-cold” platform. *ICES Journal of Marine Science* 59: 281–S287.

Solomon OO, Ahmed OO (2016) Fishing with light: ecological consequences for coastal habitats. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies* 2016: 474–483.

Sreekanth GB, Lekshmi NM, Patil A (2019) Performance of a shipwreck as an artificial fish habitat along Goa, west coast of India. *Journal of Environmental Biology* 40: 170–176.

Stenberg C, Støttrup JG, van Deurs M, Berg CW, Dinesen GE, Mosegaard H, Grome TM, Leonhard SB (2015) Long-term effects of an offshore wind farm in the North Sea on fish communities. *Marine Ecology Progress Series* 528: 257–265.

Svendsen JC, Ibanez-Erquiaga B, Savina E, Wilms T (2022) Effects of operational offshore wind farms on fishes and fisheries. Review report. DTU Aqua Report 411-2022.

- Taormina B, Bald J, Want A, Thouzeau G, Lejart M, Desroy N, Carlier A (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.
- SVK (2021)
www.svk.se/om-kraftsystemet/om-transmissionsnatet/transmissionsnatskarta
- Tesch FW, Wendt T, Karlsson L (1992) Influence of geomagnetism on the activity and orientation of eel, *Anguilla anguilla*, as evident from laboratory experiment. *Aquatic Ecology Freshwater Fish* 1: 52–60.
- Todd VLG, Williamson LD, Cox SE, Todd IB, Macreadie PI (2020) Characterizing the first wave of fish and invertebrate colonization on a new offshore petroleum platform. *ICES Journal of Marine Science* 77: 1127–1136.
- Tougaard J, Hermannsen L, Madsen PT (2020) How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *The Journal of the Acoustical Society of America* 148: 2885.
- Tsouvalas A, Metrikine AV (2016) Noise reduction by the application of an air-bubble curtain in offshore pile driving. *Journal of Sound and Vibration* 371: 150–170.
- Tsouvalas A (2020) Underwater noise emission due to offshore pile installation: A Review. *Energies* 13: 12.
- Valeur JR, Jensen A (2001) Sedimentological research as a basis for environmental management: The Øresund fixed Link. *The Science of the Total Environment* 266: 281–289.
- Van der Knaap I, Slabbekoorn H, Moens T, Van den Eynde D, Reubens J (2022) Effects of pile driving sound on local movement of free-ranging Atlantic cod in the Belgian North Sea. *Environmental Pollution* 300: 118913.
- Van der Meij H, Kastelein R, van Eekelen E, van Koningsveld M (2015) FaunaGuard: a scientific method for deterring marine fauna. *Terra et Aqua* 138: 17–24.
- Van Hal R, Griffioen AB, van Keecken OA (2017) Changes in fish communities on a small spatial scale, an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm. *Marine Environmental Research* 126: 26–36.
- Vieira M, Amorim CP, Sundelo A, Prista N, Fonseca PJ (2020) Underwater noise recognition of marine vessels passages: two case studies using hidden Markov models. *ICES Journal of Marine Science* 77: 2157–2170.
- Wahlberg M, Westerberg H (2005) Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series* 288: 295–309.
- Westerberg H, Rönnbäck P, Frimansson H (1996) Effects on suspended sediments on cod egg and larvae and on the behaviour of adult herring and cod. *ICES Council Meeting Papers* 1: 26.
- Westerberg H, Begout-Anras M-L (2000) Orientation of silver eel (*Anguilla anguilla*) in a disturbed geomagnetic field. Proc. 3rd conference on fish telemetry in Europe. Norwich 20–25 juni, 1999.

- Westerberg H, Lagenfelt I (2008) Sub-Sea power cables and the migration behaviour of the European eel. *Fisheries Management and Ecology* 15: 369–375.
- Wilber DH, Clark DG (2001) Biological effects of suspended sediments: A review of suspended sediment impacts of fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American Journal of Fisheries Management* 21: 855–875.
- Wilber DH, Carey DA, Griffin M (2018) Flatfish habitat use near North America's first offshore wind farm. *Journal of Sea Research* 139: 24–32.
- Wilson JC, Elliott M (2009) The habitat-creation potential of offshore wind farms. *Wind Energy* 12: 203–212.
- Yu Q, Liu K, Teixeira AP, Soares CG (2020) Assessment of the influence of offshore wind farms on ship traffic flow based on AIS data. *The Journal of Navigation* 73: 131–148.
- Zingel P, Paaver T (2010) Effects of turbidity on feeding of the young-of-the-year pikeperch (*Sander lucioperca*) in fishponds. *Aquaculture Research* 41: 189–197.
- Öhman MC, Rajasuriya A (1998) Relationships between habitat structure and fish communities on coral and sandstone reefs. *Environmental Biology of Fishes* 53: 19–31.
- Öhman MC, Munday PL, Jones GP, Caley MJ (1998) Settlement strategies and distribution patterns of coral-reef fishes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 225: 219–238.
- Öhman MC (2006) Konstgjorda marina rev och fiskbiotoper. *Kustfiske och fiskevård*, sid. 187–191 (redaktörer Lindgren B, Carlstrand H).
- Öhman MC, Sigra P, Westerberg H (2007) Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish. *Ambio* 36: 630–633.

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Effekter av havsbaserad vindkraft på fisk

Rapporten är en fördjupning av avsnittet om fisk och vindkraft i Vindvalrapporten ”Effekter av havsbaserad vindkraft på marint liv – en syntesrapport om kunskapsläget 2021” (rapportnummer 7049, 2022).

Havsbaserad vindkraft förväntas påverka fisk på olika sätt under anläggnings- drifts- och avvecklingsfasen. Under anläggningsfasen är ökade ljudvolymmer och spridning av sediment, de viktigaste faktorerna att beakta.

Under driftsfasen tillför havsbaserade vindkraftverk en hårdbottenmiljö som kan fungera som artificiellt rev där fisk ansamlas. Hur vindkraftverkens avvecklingsfas påverkar fisk är svårt att veta, eftersom nedmontering ligger många år i framtiden för de vindkraftverk som installeras idag.

Mycket talar för att vindkraftverk till havs inte utgör ett hot för fiskarter eller fiskpopulationer. Det är dock viktigt med en lokal bedömning av hur fisk påverkas när vindparker ska anläggas, eftersom det råder olika förutsättningar i de havsområden som omger Sverige.

