UPPSALA
UNIVERSITET

Påverkas fiskars beteende av akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk?

Johanna Bergman

Independent Project in Biology
Självständigt arbete i biologi, 15 hp, vårterminen 2013
Institutionen för biologisk grundutbildning, Uppsala universitet

Påverkas fiskars beteende av akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk?

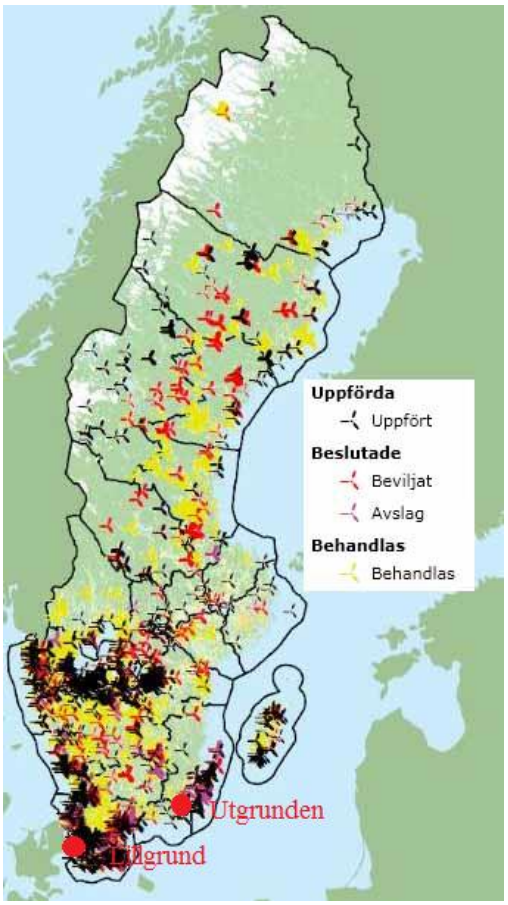
Johanna Bergman
Självständigt arbete i biologi 2013

Sammandrag

Havsbaserade vindkraftverk blir vanligare eftersom behovet av energikällor växer. Bara i Sverige har utbyggnaden ökat markant de senaste tio åren. Vibrationer och akustiska störningar kan uppstå i form av ljudvågor från vindkraftverken och det är framförallt under anläggningsfasen och driftfasen som vindkraftverken alstrar ljud med inslag av höga toner. Det har länge varit oklart hur dessa akustiska störningar påverkar det marina livet, exempelvis fisk. Nyligen gjorda svenska studier visar att fiskar kan ändra sitt beteende om de utsätts för ljud från havsbaserade vindkraftverk. Detta har påvisats bland annat genom ändrat simbeteende och avvikande från normala lek- och födoplatser. Dock är det fortfarande svårt att säga hur fiskarnas beteende påverkas i det långa loppet och studier på långvarig effekt saknas. Därför bör man i framtiden undersöka huruvida fiskar påverkas vid akustisk exponering under en längre tidperiod. Det finns också för få studier gjorda vid kritiska tidpunkter i fiskarnas livscykler som till exempel parning och lek. Sådana studier behövs för att få en tydligare inblick i havsbaserade vindkraftverks påverkan på fisk.

Inledning

I takt med en ökad energikonsumtion runt om i världen, en förhöjd växthuseffekt samt minskning av fyndigheterna av fossila bränslen, har behovet av förnyelsebara energikällor vuxit (Gill 2005, Petersen & Malm 2006). Vindkraftverk är en förnyelsebar energikälla och i Sverige har dessa blivit markant fler de senaste tio åren. I början av 1980-talet byggdes de första demonstrationsverken (Andersson & Anners 2012) och idag (mars 2013) är antalet vindkraftverk 2 459 i Sverige, varav 70 stycken är havsbaserade (Vindkraftstatistik, Svensk Vindenergi 2013). Lillgrunds vindkraftspark i Öresund är Sveriges största med sina 48 stycken kraftverk och en installerad effekt på 110 MW (Bergström *et al.* 2012a). Intresset för havsbaserad vindkraft har även det blivit större då bland annat etableringsplatsen inte begränsas av vägtransporter. Vindstyrkan är betydligt starkare (upp till 20 % starkare) och mindre turbulent till havs vilket gör placeringen av vindkraftverk i denna miljö mer optimal än på land (Pelc & Fujita 2002, Petersen & Malm 2006). Sveriges angränsning till Östersjön är ideal för havsbaserad vindkraft med lång kuststräcka, relativt låga vattendjup och goda vindförhållanden (Gill 2005, http://havsvind.se/fakta-havsbaserad-vindkraft/). Bara i Sverige har en total effekt på 2500 MW havsbaserad vindkraft fått tillstånd och 5500 MW är under utveckling (figur 1) (Bergström *et al.* 2012a).



Figur 1. Karta över Sveriges vindkraftverk som är uppförda, beviljade, avslagna och som behandlas. Vindparkerna Lillgrund och Utgrunden är markerade med röda prickar. Karta omritad efter original från Vindbrukskollen, Wikimedia commons hämtad, 2013-05-05.

Med havsbaserade vindkraftverk tillkommer akustiska störningar i form av undervattensljud, under både anläggningsfasen, driftfasen och avvecklingsfasen (Nedwell *et al.* 2003). Dessa akustiska störningar kan till exempel bestå av höga ljudnivåer vid pålning av vindkraftens fundament eller tryckvågor vid vattenytan från rotorbladen (Petersen & Malm 2006, Andersson & Sigray 2011). Störningarnas effekter kan i sin tur delas in i tre skalor hos fiskar: primär, sekundär och tertiär effekt (Nedwell *et al.* 2003). Den primära effekten avser direkta eller fördröjda dödsfall av fiskar i närområdet av kraftfulla ljudkällor som till exempel en sprängning. Sekundära effekter kan ge långsiktiga konsekvenser för fiskarnas överlevnad och innefattar skador såsom dövhet. Tertiära effekter kan vara att fiskar ändrar sitt beteende genom att undvika normala lekområden och ändrar sitt sökande efter föda och partner på grund av störande ljud i sitt normala levnadsområde. Andersson och Sigrays styrker att denna beteendeändring sker i sin rapport (2011).

Om och hur akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk påverkar fisk har länge varit en fråga för forskare och myndigheter. Den här uppsatsens syfte är att undersöka om just fiskars beteende påverkas av akustiska störningar från havsbaserad vindkraft och i sådana fall på vilket sätt.

Ljud i vatten

Ljud är täthets- och tryckvariationer som kan transporteras i olika medier som gas, vätska eller fast material, i form av vågrörelser. Vatten har en högre densitet (täthet) än luft och ljudvågor rör sig därför snabbare i vatten än i luft, cirka 1500 m s^{-1} jämfört med 340 m s^{-1}. Ljudets hastighet varierar beroende på temperatur, salthalt och tryck i vattnet. Om det förekommer skiktningar i vattenmediet i form av temperatur och salthalt kan ljudvågorna böjas av och ändra riktning (Wikström & Granmo 2008), vilket lätt kan uppstå i Östersjön som är ett bräckt och skiktat hav. Hur ljudet sprids i vattnet delas upp i tryck (1 µPa) och partikelrörelse (m s^{-1}) (Jonasson 2002, Wahlberg & Westerberg 2005). Partikelrörelsen är förflyttningar av vattenpartiklar i ljudvågens utbredningsriktning när ljudvågen går igenom vattnet och har störst betydelse närmast ljudkällan där den är som kraftigast (Wahlberg & Westerberg 2005, Axenrot & Didrikas 2012). I havet kan ljudets spridningsarea öka successivt då ljudvågen breder ut sig. Ljudenergins spridningsarea kan anta formen av en cylinder eller sfär beroende på om ljudet blir instängt mellan två dimensioner (till exempel botten och yta i grunt vatten) eller om det kan spridas i alla riktningar (i ett djupt öppet hav). Vid cylindrisk spridning avtar ljudets styrka med ca 3 dB per avståndsfördubbling jämfört med ca 6 dB i sfärisk spridning, båda under ideala förhållanden. Dock beror även ljudförlusten på andra faktorer som exempelvis havsytans tillstånd (ljudförlusten ökar vid brytande vågor) och bottentyp. Det blir mindre ljudförluster om botten är hård och slät (till exempel berghäll) än vid mjukare bottentyper såsom lera och sand (Wikström & Granmo 2008).

Det kan vara svårt att översätta hur djur i vatten uppfattar ljudet till hur det upplevs för djur och människor på land där ljudets styrka oftast mäts i decibel (dBA). Istället avgörs ljuduppfattningen med hjälp av hörseltröskler, där den lägsta ljudnivån som kan detekteras vid varje frekvens för olika organismer registreras (Popper & Carlson 1998, Wikström & Granmo 2008). Dessa trösklar skiljer sig avsevärt mellan arter. För att en fisk ska uppfatta en viss frekvens måste frekvensens ha en viss intensitet (dB re 1 µPa) (Båmstedt *et al.* 2009). De frekvenser som fiskar inte kan uppfatta är de inte känsliga för och kan därmed inte störas av.

Alla organismer utsätts hela tiden för bakgrundsljud, ljud som skapats av organismerna själva eller som kommer från omgivningen i form av till exempel vind eller regn. Bakgrundsljud inkluderar även antropogena ljud såsom fartygsbuller på långt avstånd (Nedwell *et al.* 2003). Ljudnivån som en fisk kan upptäcka en signal på är beroende av bakgrundsljudet (Popper & Carlson 1998). Havet kan verka tyst under ytan men skenet bedrar. I havet räknas vågornas svall och biologiska ljud såsom valarnas sång och fiskarnas grymtningar till bakgrundsljudet. För att lättare jämföra skillnader i ljudnivå mellan olika ljudkällor måste bakgrundsljudet tas i anspråk (Hildebrand 2009). En relativt tyst bakgrundnivå i ett hav räknas som 1 µPa, medan en tyst bakgrundsnivå i en skog är ungefär 20 µPa vilket motsvarar 30 dBA i luft (Jonasson 2002).

Ljud från vindparker till havs

Undervattensljud från vindkraftverk

Ljud som alstras i vatten från vindkraftverk kan delas in i tre delar, anläggningsfasen, driftfasen och avvecklingsfasen. Av dessa är driftfasen den betydligt längsta delen. Under anläggningsfasen är det främst ljud från pålning, muddring, grävning och borrning som kan ha en störande effekt på omgivningen men också förstudier när områden kartläggs innefattar en

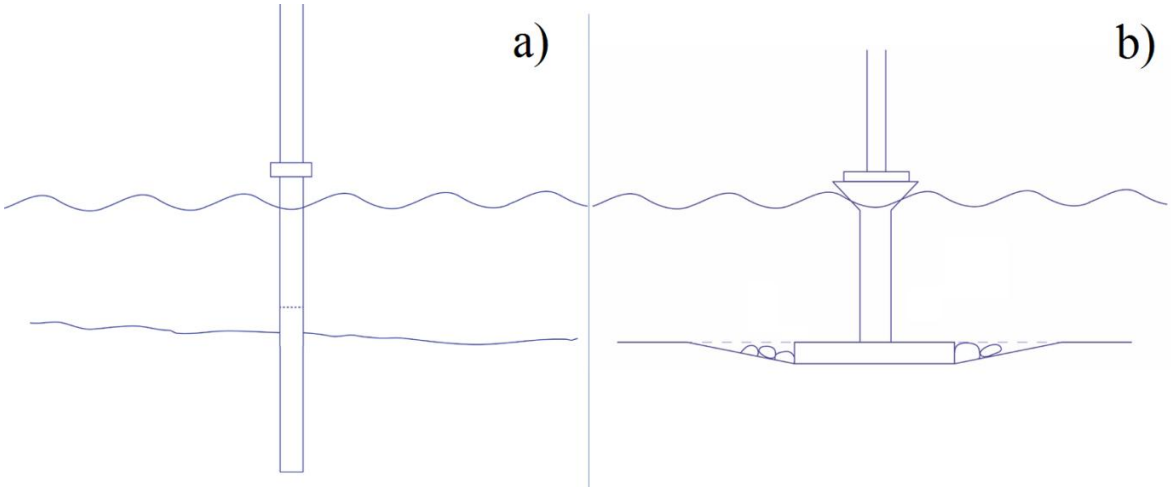
ökning i båttrafik. Under avvecklingsfasen kan ljud från skärning i fundamentet förekomma (Nedwell *et al.* 2003, Thomsen *et al.* 2006, Kikuchi 2010).

Driftljud från havsbaserade vindparker

Som det framgår av Wikströms och Granmos rapport (2008) samt nämns av Nedwell *et al.* (2003) räknas driftljud som ljud från vingbladen och stormljud (lågfrekvent buller med förekomst av höga toner) från turbinen. Stormljudet har sitt ursprung i generatorer och växellådor som sitter inuti vindkraftverket och överförs till vattnet via vindkraftverkets fundament i form av vibrationer som sedan sprider sig i vattenmassan. Därmed har fundamentets form en viktig betydelse för hur ljudet kommer att bete sig i havet. Ljudet kan också sprida sig genom luften och sedan ner i vattnet, men detta är ytterst en liten del (Jonasson 2002).

I nuläget finns det två vanligt förekommande fundamentstyper i Sverige, monopilefundament och gravitationsfundament där den förstnämnda är den mest använda (figur 2) (Bergström *et al.* 2012a). Monopile består av ett enkelt stålrör med en diameter på 3 – 7 meter och skapar ljudvågor med en frekvens på 50 – 500 Hz (Wikström & Granmo 2008). Diametern på stålröret anpassas efter belastningen. Dessa fundament kan användas på de vanligaste bottentyperna men är inte lämpliga på berghäll, mjuk lera eller vid hög förekomst av stenblock i och med att konstruktionen måste försänkas ned i botten. Vid anläggning av monopilefundament är det mest ljud från borrning eller hydrauliska hammare vid pålning som alstras i vattnet (Bergström *et al*. 2012a).

Gravitationsfundament däremot består av en ballastfylld kassun (sänkkista) med betong och skapar ljud under 50 Hz (Wikström & Granmo 2008). Fundamenten är oftast timglasformade för att kunna bryta bort is och konstruktionen i sig är tillräckligt stabil för att motstå vind och vågor. Ett helt fundament väger omkring 3000 – 7000 ton och gjutning sker antingen på land eller direkt på en pråm. Denna typ av konstruktion används främst på grunda bottnar då tillverknings- och installationskostnaden ökar exponentiellt med havsdjupet. I och med att gravitationsfundament kräver en något djupare förankring i botten, passar denna konstruktion på de flesta bottnar förutom lösa sediment (såsom lera). Dock krävs en jämn och fast botten vilket betyder att grävning kan förekomma i anläggningsfasen. Till skillnad från monopiler behöver gravitationsfundament också någon form av erosionsskydd för att förhindra att vattenrörelser försvagar förankringen i botten (Bergström *et al.* 2012a).



Figur 2. Förenklade bilder över a) monopilefundament och b) gravitationsfundament. Modifierad efter original från Bergström *et al.* (2012a).

I Sverige, Danmark och Tyskland har fältmätningar av undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk gjorts på olika platser i Östersjön, Nordsjön och Bälthaven (Westerberg 1994, Wahlberg & Westerberg 2005, Betke 2006, Madsen *et al*. 2006). Undersökningarna visade att det fanns en dominans av frekvenser under 800 Hz, med inslag av höga toner. Generellt hamnade de flesta vindkraftverk som var involverade i mätningarna inom frekvensintervallet 1 – 1000 Hz (monopilefundament, gravitationsfundament och tripodfundament fanns i dessa vindparker). Dock kunde vissa vindkraftverk utstråla högre frekvenser. Generellt uppskattas vindkraftverk av olika typer generera ljud under frekvensen 1000 – 2000 Hz och kommer då överrösta ljud från omgivningen (Westerberg 1994, Hoffmann *et al.* 2000).

Vid mätningar gjorda på monopilefundament i vindparken Bockstigen utanför Gotland uppmättes frekvenser till 1000 Hz (sammanställt i rapport av Jonasson 2002). Ifrån mätningarnas resultat kunde man konstatera att ljud över 400 och 500 Hz försvann i bakgrundsljudet samt att frekvenser över 150 Hz avtog i ljudnivå från 80 dB ner till 65 dB från ett avstånd av 200 m till 1000 m ifrån vindkraftverken. Till exempel uppmättes 86 dB för frekvensen 200 Hz vid 50 m avstånd och vid 200 m avstånd hade ljudet minskat till 80 dB. Ljudet försvann sedan helt i bakgrundsbruset, som låg inom 77 – 80 dB, vid 400 m och 1000 m ifrån kraftverken. Dessa ljudnivåer kan jämföras med ljud från sjötrafiken där till exempel containerfartyg och fisketrålare avger ljudnivåer på ca 150 dB i frekvensintervallet 50 – 200 Hz. I genomsnitt ligger fartygsbullret inom frekvensområdet 2 – 1000 Hz med en ljudstyrka på 110 – 150 dB, enligt Fiskeriverkets mätningar som gjordes på 100 m avstånd ifrån fartygen (Jonasson 2002).

Förutom fundamentstyp har även andra faktorer som storlek, antal vindkraftverk, bottentyp, djup och vindstyrka viktiga roller att spela när det handlar om hur ljudets alstras i vattnet (Jonasson 2002, Axenrot & Didrikas 2012). Dessa faktorer samt även andra påfrestningar såsom vågor och is avgör vilken fundamentstyp som passar i olika miljöer (Bergström *et al.* 2012a).

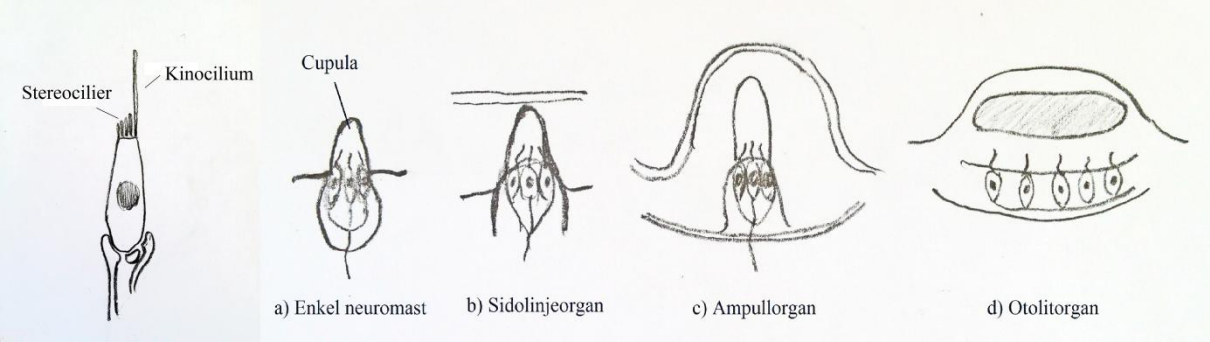
Fiskar och dess påverkan av akustiska störningar i vatten

Hur fiskar reagerar på ljud och vibrationer i vattnet

Fiskar använder sina hörselorgan för att orientera sig i vattnet och kan avgöra riktningen till en ljudkälla i både det horisontella och vertikala planet (Hawkins & Sand 1977, Westerberg 1994, Simpson *et al.* 2005). Beroende på kroppsstruktur kan fiskar uppfatta ljudintensitet olika. Gemensamt för alla fiskar är att de saknar ytteröron och att det är otoliten (ett kalkartat hörselorgan) i innerörat som gör att de kan uppfatta ljud i form av partikelrörelser (Bone *et al.* 1995). Otoliten är dock inte känslig för ljud i form av tryckskillnader (Axenrot & Didrikas 2012), vilket däremot fiskarnas simblåsa är.

Alla fiskar har även så kallade neuromaster, som är sekundära sensoriska celler och finns i alla hörselorgan hos fisken, bland annat i fiskarnas sidolinje och i otolitorganet som ligger på ett epitel av neuromaster (Båmstedt *et al.* 2009). Dessa består av hårceller i ett geléformat hölje, så kallad cupula, och fungerar som mekaniska receptorer (Lowenstein 1957). Hårcellerna har olika långa cilier som registrerar rörelser, varav det finns en längre, kinocilium, och några kortare stereocilier på ena sidan av kinociliet (figur 3) (Bone *et al.* 1995). När vågrörelser når fiskens akustiska sensoriska organ deformeras neuromasterna, vilket gör att cilierna böjs och impulser skickas till fiskens nervsystem. Om stereocilierna böjs mot kinociliet så blir hårcellen depolariserad och skapar en neurologisk stimulering. Böjs

stereocilierna istället ifrån kinociliet, blir hårcellen hyperpolariserad och inhiberad. Otoliten gör mindre rörelser än omgivande vävnad då fiskens huvud vibrerar i ljudfält i och med att otoliten har lägre densitet än huvudet i övrigt. En neuromast kan registrera en vågförflyttning på mindre än 1 nm (Bone *et al.* 1995). Ju längre och tunnare cilierna är desto känsligare är fiskens respons till stimuli (Lowenstein 1957).



Figur 3. Till vänster en bild på enskild hårcell. a) Visar en enkel neuromast med geléformat hölje (cupula), b) en neuromast i fiskens sidolinje, c) en neuromast i ett ampullorgan och d) otolitorganet. Bilden är omritad efter original av Bone *et al.* (1995).

Högfrekventa ljud hjälper fiskarna att agera snabbt på korta skarpa ljud, till exempel i situationer då de flyr undan predatorer (Bone *et al.* 1995). Maskering av akustisk kommunikation, konstant utlösning av larmreaktioner och temporära eller permanenta hörselskador är tre faktorer som är av extra stor betydelse för fiskarnas överlevnad enligt Wahlberg och Westerberg (2005). Nedan beskrivs olika hörselorgan som fiskar kan använda sig av för att registrera ljud.

Simblåsa

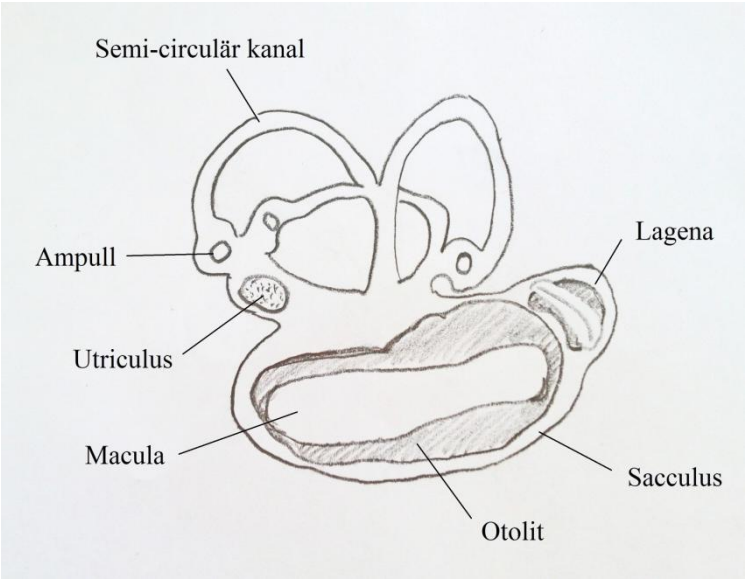
Om fiskarten har en simblåsa ökar känsligheten för ljud ytterligare. Frekvensomfånget blir större då simblåsan reagerar på ljudvågens tryckvariationer i vattnet genom att göra små volymändringar som i sin tur kan påverka otolitorganet med rörelser i omgivningen. Simblåsan kan också vara direkt kopplad till otoliten med hjälp av specialiserade mekanismer, till exempel med en gasblåsa och gaskanaler som hos sillfiskar (Bone *et al.* 1995). Dessa fiskar kan uppfatta ljud upp till ca 2000 Hz (Westerberg 1994). Hos bland annat torskfiskar överförs istället pulseringar från simblåsan till otoliten via benen i fiskens huvud till innerörat. På så vis förbättras ljudstimulins partikelrörelse och kopplingen mellan otoliten och simblåsan omvandlar ljudtrycket till partikelrörelse. De arter som däremot saknar simblåsa, som exempelvis makrill (*Scomber scombrus*) och plattfiskar (*Pleuronectiformes*), är i princip döva för ljud över 250 Hz (Westerberg 1994). Den lägsta hörbara frekvensen verkar däremot vara oberoende av om fisken har simblåsa eller inte. Av de fiskarter som tidigare har studerats (sill (*Clupea harengus*), torsk (*Gadus morhua*), abborre (*Perca fluviatilis*), rödspätta (*Pleuronectes platessa*) och lax (*Salmo salar*)) har alla visat en känslighet för låga ljud i infraljudområdet (1-200 Hz).

Sidolinje

De flesta fiskar har en så kallad sidolinje, vilken består av neuromaster placerade fritt i det yttersta lagret av epidermis och av fria hårceller på kroppsytan. Fiskarna använder sidolinjen till navigering men också för att upptäcka rörelser från exempelvis byten eller predatorer (Båmstedt *et al.* 2009). Dock kan denna typ av sensorkanal vara sekundärt reducerad hos vissa fiskar, till exempel hos bottenlevande fiskar (Lowenstein 1957). Sidolinjen stimuleras av låga frekvenser (under 150 Hz) och av vågrörelser nära fiskens kropp (Wahlberg & Westerberg 2005).

Lorenzinis ampuller
En annan typ av känselorgan som främst broskfiskar använder sig av är Lorenzinis ampuller. Dessa utgörs av geléfyllda kanaler med några utåtstickande mikrovilli eller en enstaka kinocilium, är placerade runt huvudet (även på vingarna hos rockor) och fungerar som elektroniska receptorer (Bone *et al.* 1995). Ampullerna upptäcktes av Marcello Malpighi år 1663 men det var Stefano Lorenzini som först gjorde en detaljerad beskrivning av dem år 1678, och därav namnet. Kanalerna kan bli upp till 4 mm i diameter (Lowenstein 1957).

Membranliknande labyrinten
Den så kallade membranliknande labyrinten anses vara det sista steget gällande neuromastorganen och är helt avskild från yttre media såsom vatten genom att vara skyddad inuti hjärnan, i innerörat. Labyrintens fyra huvudsyften är att ta hand om och reglera muskelformen, vara receptor för vinkelrätformig acceleration, gravitation samt ljud (Lowenstein 1957). Den består av semicirkulära kanaler vinkelrätt arrangerade i den övre delen och en sammansatt lägre del av utriculus, sacculus, macula och lagena (figur 4) (Bone *et al.* 1995). I de semicirkulära kanalerna finns ampuller som innehåller neuromaster som registrerar accelerationen. Maculan däremot registrerar ljud och linjär acceleration av fiskens kropp.



Figur 4. Den membranliknande labyrinten med dess olika delar. Bilden är omritad efter original av Bone *et al.* (1995).

Hörselspecialister, hörselgeneralister och icke-specialister
Beroende på hur fiskens hörselorgan ser ut kan fiskarna delas in i tre olika grupper: hörselspecialister, hörselgeneralister och icke-specialister. Hörselspecialisterna såsom sillfiskar och karpfiskar (*Cyprinidae*), har en simblåsa som är i kontakt med innerörat, antingen genom gaskanaler eller hörselben, och kan på så vis omvandla ljudvågor till partikelrörelser. Det gör att dessa fiskar är extremt känsliga för specifika ljudfrekvenser och kan registrera ljud under 20 Hz och upp till mer än 2000 Hz, med högst känslighet runt 300 – 1000 Hz (Popper & Carlson 1998, Thomsen *et al.* 2006). Specialisterna har också en lägre hörseltröskel än de andra grupper vilket gör att de är mer känsliga för ljud. Den ligger omkring 70 dB vid 100 Hz (Jonasson 2002).

Hörselgeneralisterna, exempelvis abborre och laxfiskar, kan liksom specialisterna både registrera ljudvågor och partikelrörelser men är främst känsliga för partikelrörelser och

därmed lågfrekventa ljud (Båmstedt *et al.* 2009). De kan registrera frekvenser under 20 Hz men kan bara detektera ljud upp till 500 – 600 Hz, i vissa undantagsfall upp till 1000 Hz (Popper & Carlson 1998, Popper *et al.* 2003, Thomsen *et al.* 2006, Båmstedt *et al.* 2009). Den högsta känsligheten ligger dock mellan 100 – 400 Hz (Popper *et al.* 2003, Thomsen *et al.* 2006), och deras hörseltröskel ligger omkring 90 dB vid 100 Hz (Jonasson 2002).

Makrill och plattfiskar är exempel på fiskar som tillhör gruppen icke-specialister. Dessa fiskar saknar simblåsa och hör främst frekvenser under 250 Hz. Det beror på att ljudfrekvenser över 100 Hz inte påverkar vibrationen av hörselcellerna speciellt mycket, men om fisken istället har en simblåsa kan tryckförändringarna i vattnet påverka simblåsans volym som i sin tur ger utslag på otoliten (Wahlberg & Westerberg 2005, Båmstedt *et al.* 2009).

Studier av beteendeförändringar hos fiskar

Studier har visat att fiskars beteende påverkas av akustiska störningar men det är fortfarande oklart hur mycket undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk påverkar. Nedan kommer de senaste studierna tas upp.

Öresund vid Lillgrunds vindkraftspark

Lillgrunds vindpark i Öresund består av 48 turbiner med en effekt på 2,3 MW per vindkraftverk. Parken stod klar 2007 och under en tvåveckorsperiod år 2010 undersökte Andersson *et al.* (2011) hur turbinernas ljud påverkar fisken i närområdet. Ett område vid Sjollen, 10 km norrut från Lillgrund, användes som kontroll. Resultatet visade att vindkraftverken gav ifrån sig ett bredbandigt ljud under 1000 Hz där 127 Hz var en stark ton och hade den kraftigaste ljudstyrkan vid full effekt (2,3 MW). En meter ifrån vindkraftverket uppmättes en maximal ljudstyrka på 136 – 138 dB re 1 µPa (vid 12 m s^{-1}), vilket var 33 – 55 dB över bakgrundsnivån. Rörde man sig 100 m ifrån vindkraftverket hade den maximala ljudstyrkan sjunkit till 104 – 106 dB re 1 µPa vilket var nära bakgrundsnivån men för tonen vid 127 Hz låg fortfarande ljudnivån 23 dB över bakgrundsnivån.

I undersökningen användes fyra olika fiskarter som lever i området runt Lillgrund (torsk, sill, lax och ål (*Anguilla anguilla*)) för att påvisa om olika typer av hörselsystem hos fiskar reagerar olika på ljud från vindkraftverk. Värdena för den starka tonen 127 Hz användes då fiskar kan urskilja höga toner ur brus. Laxens och ålens undre hörseltröskel var högre än torskens och sillens (96 dB re 1µPa jämfört med 75 dB re 1µPa) vilket gjorde att lax och ål inte var lika känsliga för ljud såsom torsk och sill. Andersson *et al.* slutsats blev då att laxens och ålens egna hörselförmågor begränsade detektionsavståndet, då dessa arter endast kunde registrera ljud vid en viss nivå. Bakgrundsljudet var därmed inte en begränsande faktor. Lax och ål fick ett detektionsavstånd på 250 m respektive 1 km beroende på om vindkraftverken kördes med 60 % eller 100 % effektivitet, vilket motsvarade vindstyrkor på ca 6 m s^{-1} respektive 12 m s^{-1}. För sill och torsk blev istället detektionsavståndet 13 km respektive 16 km för de olika effekterna. Till skillnad från lax och ål begränsades sillens och torskens detektionsavstånd av bakgrundsljudet. Dock var beräkningarna gjorda på tyst hav vilket inte är helt representativt då området i Öresund är starkt trafikerat av fartyg och bara bakgrundsljudet från fartygen når upp till en ljudnivå på 81 dB re $1\mu Pa_{(RMS}$[1]$)$ för vindstyrkor på 12 – 14 m s^{-1} (motsvarande 100 % effekt på vindkraftverken) och 78 dB re $1\mu Pa_{(RMS)}$ för 6 – 8 m s^{-1} (60 % effekt). Med andra ord doldes ljuden från vindkraftverken delvis av

[1] RMS = root mean square

bakgrundsljudet. Ljudutbredningen varierar också med de lokala variationerna i bottentyp och fysiska hinder som exempelvis halvön Falsterbonäset.

Telemetrispårning av blankål i Hanöbukten
Westerberg sammanställde i sin rapport från hur blankålsvandringen i Hanöbukten påverkades av havsbaserade vindkraftverk med en effekt på 220 kW. Han visade på ett starkt samband mellan ökad vindstyrka och ökad ålfångst, baserat på tre års fångststatistik. I samma rapport presenterade Westerberg resultatet av en telemetriundersökning där ultraljudssändare placerades på ålarnas rygg för att kunna följa ålarnas vandring med hjälp av en hydrofon (undervattensmikrofon). I undersökningen tittade man på huruvida ålarnas vandring ändrades om vindkraftverken i Hanöbukten var påslagna eller ej. Under det första årets (år 1991) telemetrispårningar fanns det en skillnad i ålarnas förflyttning beroende på om kraftverken var igång eller inte. Till en början verkade ålarna simma bort ifrån vindkraftverken. Den andra telemetrispårningen gjordes två år senare (1993) men fick ett helt annat resultat. Då visade ålarna varken upp ett undvikande simbeteende eller förändrad simhastighet. Utifrån telemetrispårningens resultat blev Westerbergs slutsats att ålarna inte kommer få något förändrat beteende när de utsätts för akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk. Det bör dock nämnas att ålarna inte kunde spåras närmare än 500 meter från vindkraftverken på grund av försöksuppläggningen.

Pålningsljuds påverkan på torsk och sjötunga
Ett experiment utfördes utanför västra Skottland i en bukt med lågt bakgrundsljud, där torsk och sjötunga (*Solea solea*) hölls i två stora nätburar med en diameter på 40 m. Undervattenshögtalare spelade upp pålningsljud från vindkraftverk och fiskarnas rörelse registrerades med hjälp av en inopererad sändare under fiskarnas skinn. Rörelserna registrerades sedan med ett så kallat telemetrisystem och därefter analyserades fiskarnas beteendemönster (Andersson & Sigray 2011). Pålningsljud kan enligt Andersson och Sigray (2011) beskrivas som ”en dämpad svängning som pågår under ett tidsspann kortare än 0,1 sekunder och som upprepas varje sekund”. Det pålningsljud som användes i experimentet varierade mellan 170 och 1100 Hz med huvudparten i intervallet 150 – 350 Hz. Värt att nämna i sammanhanget är att torsk är känslig för ljud mellan 20 – 400 Hz och sjötunga 2 – 200 Hz.

Resultaten visade ett tydligt förändrat beteende hos båda fiskarterna redan vid låga ljudnivåer. Hos torsken varierade reaktionerna inom arten kraftigt; fisken stannade antingen till eller ökade sin simhastighet och rumsfördelning inuti buren. Sjötungan reagerade däremot bara genom ökad simhastighet och fördelning i buren, men dess förändring var mer signifikant än torskens (Andersson & Sigray 2011). Totalt visade 45 % av torskarna och 32 % av sjötungorna en reaktion. I den bur som utsattes för den högsta ljudnivån hade fler fiskar uppvisat ett mer stillastående beteende än i den andra buren som utsattes med lägre ljudnivåer. Reaktionen på ljud minskade också vid upprepade testförsök men resultaten var inte signifikanta. Enligt Andersson och Sigray själva är detta den första studien som visar att fiskar får en tydlig beteendereaktion när de utsätts för pålningsljud från vindkraftverk.

Pilotförsök på rödspätta
Ett svenskt pilotförsök gällande undervattensljud från vindkraftverk och dess påverkan har gjorts på juvenil rödspätta vid Kristinebergs marina forskningsstation i Fiskebäckskil (Wikström & Granmo 2008). I försöket ingick även en större studie på tre andra bottenlevande arter, limfjordmussla (*Abra nitida*), ormstjärna (*Amphiura filiformis*) och sandräka (*Crangon crangon*), där alla arter utsattes för olika ljud från vindkraftverk. I försöket med juvenil rödspätta blev fiskarna exponerade för ljud med tre olika frekvenser (61, 178 eller

721 Hz) under 15 minuter i ett akvarium där deras simaktivitet, antal nedgrävningar och nedgrävningshastighet observerades. Efter att 15 minuter hade förflutit noterades varje individs gällockrörelser under en minut. Resultaten visade en signifikant ökad respiration när fiskarna utsattes för en frekvens på 178 Hz. Även vid frekvensen 61 Hz fanns en trend mot ökad respiration. Enligt Wikström och Granmo (2008) kunde detta vara en indikation på stress. Dock fanns det ingen skillnad mellan försöksgruppen och kontrollgruppen gällande simaktivitet, antal nedgrävningar och nedgrävningshastighet vid någon av de tre frekvenserna. Dessa resultat tyder på att rödspätta inte stördes av undervattensljud. Även om Wikström och Granmo såg en trend mot ökad respiration var tiden för ljudexponering alldeles för kort för att kunna säkerställa att rödspättan påverkas av undervattensljud.

Beteendeförändringar hos abborre, mört och öring

En studie gjord av Båmstedt *et al.* (2009) har inte visat på några negativa effekter hos abborre, mört (*Rutilus rutilus*) och öring (*Salmo trutta*) när de utsätts för lågfrekvent ljud från havsbaserade vindkraftverk, varken beteendeförändring, födointag eller stressnivå. I försöket användes frekvenserna 6, 15, 30, 60 och 180 Hz, där en sändarhydrofon sänktes ned i en trål innehållandes fiskar. Fiskarna fick vänja sig vid miljön och utsattes därefter för ljud i 1 – 3 minuter i en frekvens åt gången. Videokameror observerade fiskarnas beteendeförändring. Mörten, som anses vara hörselspecialisten av nämnda tre arter, reagerade inte alls på ljud runt 120 – 180 Hz. Till exempel producerades ett ljud runt 120 dB vid 180 Hz (Båmstedt *et al.* 2009), vilket är långt över mörtens ljudtröskel som ligger mellan 60 och 80 dB vid 100 – 500 Hz (Amoser *et al*. 2004). Att mörten inte reagerade tyder på att den inte upplevde några negativa effekter av ljud från havsbaserade vindkraftverk. Abborrarna uppvisade heller ingen reaktion på lågfrekventa ljud. Öringarna var däremot signifikant mer aktiva men dessa beteendeförändringar påverkade varken deras födointag eller stressnivå (Båmstedt *et al.* 2009).

Beteendeförändringar hos mört och storspigg

En småskalig studie på förändrat simbeteende på grund av akustiska ljud från vindkraftverk har också gjorts på mört och storspigg (*Gasterosteus aculeatus*) (Andersson *et al.* 2007). Mörtens simblåsa är i kontakt med hörselorganet vilket gör arten till en hörselspecialist. Storspiggen är å andra sidan klassad som en hörselgeneralist då dess simblåsa inte är i kontakt med hörselorganen och den är på så vis inte lika känslig för högre ljudfrekvenser (Andersson *et al.* 2007). Mörten utsattes för ljudfrekvenserna 25, 80, 500 och 1000 Hz medan storspiggen utsattes för 25, 160, 200 och 500 Hz. Båda arterna reagerade på ljud från vindkraftverken men på olika sätt. Mörten visade upp ett flyktbeteende, som kan liknas vid en naturlig reaktion för att undvika predatorer eller överlägsna konkurrenter. I de flesta fallen rörde sig mörten mellan 20 – 40 cm vid ljudexponering. Fiskarna som var i kontrollgruppen visade en tendens till att röra sig mindre. Storspiggen visade upp ett varierat reaktionsmönster med baklängessimning, plötslig böjning av kroppen, vertikal rörelse utan tydliga fenrörelser och stelhet (eng. *freezing*). Studien visade att båda arterna reagerade på ljud från vindkraftverk och enligt Andersson *et al.* var fiskarnas beteendeförändringar en indikation på stress.

Partikelrörelse från Utgrundens vindkraftpark

En studie gjord av Sigray *et al.* (2009) visade att torsk, abborre, rödspätta och lax kan uppfatta partikelrörelser på ett avstånd av 10 meter från vindkraftverken. Partikelrörelsen låg över samtliga fiskars tröskelvärde, vilket indikerar att fiskarna kunde uppfatta ljudet. Längre ifrån vindkraftverken kunde de olika fiskarterna inte uppfatta partikelrörelserna då nivåerna var jämförbara med fiskarnas hörseltrösklar.

Sigray och hans kollegors (2009) analys av partikelrörelse visade även att ljudtonernas styrka och frekvenser varierade med vindstyrkan. Vindkraftverken i Utgrunden alstrade tre toner som alla låg över 20 Hz. För frekvenser över 20 Hz så alstrade vindkraftverken mest ljud vid låga vindstyrkor (5,5 – 6 m s^{-1}). Partikelrörelsen minskade snabbt ju längre bort från vindkraftverken man rörde sig. Detta styrker Sigray *et al*. slutsats om att nämnda arter inte uppfattade partikelrörelsen längre än 10 meter ifrån kraftverken och att den därmed inte utgjorde något hot mot fiskarna (2009).

Kortisolutsöndring till följd av stress
Om fisken upplever fysiologisk stress som framkallats av ljud kan kortisol- och glukosutsöndringen öka i fiskens blodomlopp som en primäreffekt (Santulli *et al.* 1999). Båmstedt *et al.* (2009) mätte i sin studie kortisolhalten i fiskarterna abborre, mört och öring sju minuter efter det att fiskarna hade exponerats för ljud från vindkraftverk. Resultaten visade ingen skillnad mellan kontroll- och testgrupperna, dock hittades höga halter av kortisol i båda grupperna. Detta beror sannolikt på att samtliga fiskar upplevde att ”bakgrundsstressen” var hög och därmed kan andra stressfaktorer ha överskuggat en eventuell ljudeffekt hos försökfiskarna (Båmstedt *et al.* 2009). Detta problem är nästintill oundvikligt och återkommande även i andra liknande studier (Wysocki *et al.* 2006).

Diskussion

Akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk har visat sig ge beteendeförändringar hos fisk (Andersson *et al.* 2007, Wikström & Granmo 2008, Andersson & Sigray 2011). Dock är det fortfarande svårt att säga i vilken utsträckning fiskarna påverkas och om störningarna har en långvarig effekt.

I de studier som påvisade en beteendeförändring hos fiskar, uppvisade arter olika reaktioner på grund av akustiska ljud från vindkraftverk. De beteendeförändringar som fiskarna uppvisade liknar de reaktioner som påträffas vid ökat predationstryck eller konkurrens från mer överlägsna individer. Andra studier (Westerberg 1994, Båmstedt *et al.* 2009, Andersson & Sigray 2011) visade ingen påverkan på fisk eller negativa konsekvenser av akustiska störningar från vindkraftverk. Till exempel ändrade inte den europeiska ålen sitt simbeteende när den passerade ett vindkraftverk på 500 meters avstånd. Precis som Wahlberg och Westerberg (2005) nämnde i sin rapport kunde fiskar uppfatta vindkraftljud som bakgrundsljud och därmed inte uppleva någon fara. Fiskar kan också vänja sig vid ljud, speciellt de som inte har för hög intensitet och som inte är kopplade till fara eller om de utsätts för liknande ljud under en längre period. Då vindkraftverk inte utgör något fysiskt hot mer än i form av akustiska störningar är det möjligt att fiskar kan ”lära sig” att dessa oljud inte är farliga och därmed kooperativa att leva med.

Det som kan bli ett problem för fiskarna är om vindkraftverken utsöndrar alldeles för högfrekventa ljud i och med att fiskar reagerar just på korta och skarpa ljud. Fiskarnas detektionsnivå av ljud har stor betydelse för deras beteende och överlevnad och för detta är det viktigt att deras hörselorgan är intakta och inte störs av bullrande ljud. Här spelar även andra faktorer in såsom långvarig stress på grund av höga ljudnivåer. Wahlberg och Westerberg (2005) förutspådde att bland annat torsk och atlantisk lax kunde upptäcka akustiska ljud från vindkraftverk på avstånd 0,4 – 25 km med en vindhastighet mellan 8 – 13 m s^{-1}. Skulle dessa fiskar då påverkas av vindkraftverkens buller inskränker det på en stor del av arternas habitat. Om fiskarna sedan skadas av ljudet kan det leda till ett förändrat beteende

som kan sänka fiskens levnadsstandard och mer eller mindre vara livshotande, då fiskens hörselorgan är viktiga för överlevnad.

Hörselspecialister såsom sill kommer vara betydligt känsligare för högfrekventa ljud än hörselgeneralister och icke-specialister. Detta styrks i studier gjorda av Andersson *et al.* (2011) och Andersson & Sigray (2011). Beroende på hur fiskarnas hörselorgan ser ut, om fisken har en simblåsa eller ej och om denna i sådana fall är kopplad till otolitorganet, kommer olika fiskarter påverkas annorlunda av akustiska störningar från vindkraftverk. Vissa arter som till exempel lax och ål kommer nämnvärt inte påverkas i och med att hörselgeneralister inte är anpassade för att registrera högre frekvenser. Hörselspecialister såsom sillfiskar lever mer i riskzonen då dessa arter är betydligt känsligare för högre ljud då deras morfologi är anpassade för att kunna urskilja högre frekvenser och toner. Under anläggningsfasen kommer därför hörselspecialister påverkas mer än fiskarter.

Skillnaden mellan dessa grupper kommer också avgöra hur långt ifrån vindkraftverken fiskarna kan uppfatta de akustiska störningarna. Som Andersson *et al.* (2011) visade i sin studie begränsades laxens och ålens egna hörselförmågor detektionsavståndet (250 m respektive 1 km vid 60 % eller 100 % effektivitet hos vindkraftverken) medan sillens och torskens detektionsavstånd var betydligt längre (13 km respektive 16 km). Då havsbaserade vindkraftverk främst utsöndrar lågfrekventa ljud kommer troligtvis de flesta fiskarter kunna uppfatta ljuden i form av partikelrörelser på ett kortare avstånd från kraftverken, oavsett om fiskarna är hörselspecialister, generalister eller icke-specialister. Detta styrks av Sigray *et al.* (2009).

Som tidigare nämnts är det främst under anläggningsfasen som mest ljud från vindkraftverk alstras i haven (Nedwell *et al.* 2003, Andersson & Sigray 2011, Bergström *et al.* 2012a). I och med att denna period är relativt kortvarig i jämförelse med driftfasen då betydligt mindre ljud avges, kan fiskarna återhämta sig från den chockartade ljudupplevelsen som uppstår under anläggningsfasen. Vid anläggning av vindkraftverk bör man dock undvika viktiga tidsperioder i fiskarnas livscykler med tanke på att vissa arter är känsliga för akustiska störningar. Förebyggande åtgärder kan också användas före pålning för att undvika fysiska skador hos fiskar, som primära effekter i form av direkta dödsfall till följd av tryckvågor. Till exempel kan de första slagen vid pålning göras lätta för att sedan öka i styrka eller så kan en varningssignal skickas ut. På så vis hinner man förvarna fiskarna och lyckas skrämma iväg dem (Bergström *et al.* 2012a).

I takt med att vindkraftverken byggs ut i bland annat svenska hav är det viktigt att ta reda på om dessa har en påverkan på den marina miljön. Idag kan en vindpark bestå av 40 – 120 kraftverk med en effekt på 3 – 5 MW per styck. Detta kan skapa ett buller som överstiger det ordinarie bakgrundsljudet. Hur mycket ljud som alstras i havet beror på typ av vindkraftverk och typ av fundament. Detta bör man ha i åtanke vid planering av en vindpark, speciellt då vissa fundament alstrar en betydligt högre ljudnivå än andra. Förutom fundamentstyp är det också bladrotationen, växellådan och generatorn inuti kraftverket som är avgörande för hur mycket ljud som vindkraftverken kommer att avge ut i vattnet. Även detta tål att tänkas på vid byggandet och förhoppningsvis kan ”tystare” alternativ produceras i framtiden. Dock bör man se till miljöförhållanden, djupet och bottentypen på placeringsplats vid val av fundament och i senare hand vilken frekvens som fundamentet alstrar.

Det finns naturligtvis fördelar med vindkraftverk som inte har tagits upp i denna rapport, bland annat att vindkraftverken utgör artificiella rev som erbjuder en boplats för nya arter (Hoffmann *et* al. 2000, Petersen & Malm 2006). Fundamentens fysiska struktur kan erbjuda skydd till fiskarna eller en ökad tillgång på föda (Bergström *et al.* 2012b). I Wilhelmsson *et*

al. (2006) studie kommer de fram till att antalet fiskar som har ökat i ett område kring Utgrundens vindkraftpark tyder på att vindkraftverken kan fungera som ett artificiellt rev. Havsbaserad vindkraft kan även ”tvinga” fartygstrafik till en ny rutt vilket gör att kraftverken kan fungera som en skyddande oas för arter då fartygstrafiken hålls på längre avstånd än tidigare. Om vindkraftverken står relativt tätt blir det dessutom svårt för fiskefartyg att bedriva bland annat bottentrålning vilket möjliggör ett rikare djurliv kring vindkraftparkerna. Att dessutom fundamenten sträcker sig från botten upp till ytan ger ytterligare fördelar, som till exempel boplatser för djurarter såsom blåmussla och för pelagisk fisk.

Även om vindkraftverk har visat sig ha en inverkan på fisk genom akustiska störningar så står ändå fartygstrafik för det största bidraget till antropogent ljud i den marina miljön. Fartygstrafiken alstrar betydligt högre ljud än vindkraftverken vilket gör att fartygen kommer att maskera de akustiska störningarna från vindkraftverken när dessa befinner sig i närheten av varandra (Jonasson 2002, Madsen *et al.* 2006). Då fartygstrafiken orsakar ett högre buller och kan behöva ledas om på grund av vindkraftverkens placering, ger detta en indikation på att ljud från vindkraftverk bara kommer att ge långsiktiga effekter där fartygstrafiken är låg (Madsen *et al.* 2006). Dock finns det för få studier som visar om akustiska störningar från havsbaserad vindkraft har en långvarig effekt på fiskar.

I framtida studier bör man undersöka om akustiska störningar har en långvarig effekt på fiskars beteende och om det innebär någon skillnad om fisken befinner sig i lek- och parningsperiod eller ej. Det finns också utrymme för vidare studier om ökade kortisolhalter i fiskarnas blodomlopp till följd av akustisk påverkan. De studier som har gjorts (Santulli *et al.* 1999, Wysocki *et al.* 2006, Båmstedt *et al.* 2009) har påvisat en förhöjd kortisolhalt på grund av olika stressfaktorer, däribland vindkraftverkens akustiska ljud. Sådana studier är dock komplicerade att genomföra då fiskarna kan bli stressade av just andra faktorer än den faktor man vill undersöka, till exempel undervattensljud från vindkraftverk.

Denna uppsats har berört tidigare studier av totalt elva olika fiskarter med olika typer av hörselorgan, detta för att få en tydligare förståelse av hur olika fiskarter kan bli påverkade av akustiska effekter. Dock finns det fortfarande för få studier idag för att säkerställa huruvida fiskars beteende kommer påverkas negativt av akustiska störningar från havsbaserade vindkraftverk.

Tack

Jag vill tacka mina medstudenter David Brobäck, Julia Jonsson och Hampus Petrén för stöd under skrivperioden och kritisk granskning av min uppsats. Jag vill även tacka min handledare Anders Ödeen som väglett mig i rätt riktning när jag varit ute på villovägar.

Referenser

Amoser S, Wysocki L E, Ladich F. 2004. Noise emission during the first powerboat race in an Alpine lake and potential impact on fish communities. Acoustic Society of America, **116**:3789-3797.

Andersson D, Anners C. 2012. Vindkraftsstatistik 2011. Statens energimyndighet, Eskilstuna.

Andersson M H, Dock-Åkerman E, Ubral-Hedenberg R, Öhman M C, Sigray P. 2007. Swimming behavior of roach (Rutilus rutilus) and three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus) in response to wind power noise and single-tone frequencies. Ambio, **36**:636-638.

Andersson M H, Sigray P. 2011. Ljud från pålning av vindkraftfundament – påverkan på fiskbeteende. Vindval rapport 6437, Naturvårdsverket.

Andersson M H, Sigray P, Persson L KG. 2011. Ljud från vindkraftverk i havet och dess påverkan på fisk. Vindval rapport 6436, Naturvårdsverket.

Axenrot T, Didrikas T. 2012. Effekter av havsbaserad vindkraft på pelagisk fisk. Vindval rapport 6481, Naturvårdsverket.

Bergström L, Kautsky L, Malm T, Ohlsson H, Wahlberg M, Rosenberg R, Åstrand Capetillo N. 2012 a. Vindkraftens effekter på marint liv. Vindval syntesrapport 6488, Naturvårdsverket.

Bergström L, Sundqvist F, Bergström U. 2012 b. Effekter av havsbaserad vindkraft på fördelningen av bottennära fisk. Vinval rapport 6485, Naturvårdsverket.

Betke K. 2006. Measurement of underwater noise emitted by an offshore wind turbine at Horns Rev. Rapport, Institut für technische und angewandte Physik GmbH.

Bone Q, Marshall N B, Blaxter, J H S, 1995. Sensory systems and communications. Biology of Fishes, ss. 219-233. Blackie Academic & Professional, Suffolk.

Båmstedt U, Larsson, S, Stenman Å, Magnhagen C, Sigray P. 2009. Effekter av undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk på fisk från Bottniska viken. Vindval rapport 5924, Naturvårdsverket.

Gill, A B. 2005. Offshore renewable energy: ecological implications of generating electricity in the coastal zone. Journal of Applied Ecology, **42**:605-615.

Hawkins A D, Sand O. 1977. Directional hearing in the median vertical plane by the cod. Journal of Comparative Physiology A, **122**:1-8.

Hildebrand J A. 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. Marine Ecology Progress Series, **395**:5-20.

Hoffmann E, Astrup J, Larsen F, Munch-Petersen S, Støttrup J. 2000. Effects of marine windfarms on the distribution of fish, shellfish and marine mammals in the Horns Rev area. Rapport till Elsamprojekt A/S, Danish Institute for Fisheries Research.

Jonasson K. 2002. Ljud i havet – påverkan på marina djur. Elforsk rapport 02:45, Göteborg Energi.

Kikuchi R. 2010. Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms in the EU region. Marine Pollution Bulletin, **60**:172-177.

Lowenstein O. 1957. The sense organs: The acoustico-lateralis system. Brown M E (red.). The Physiology of Fishes, ss. 155-182. Academic Press Inc, New York.

Madsen P T, Wahlberg M, Tougaard J, Lucke K, Tyack P. 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. Marine Ecology Progress Series, **309**:279-295.

Nedwell J, Langworthy J, Howell J. 2003. Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise. Rapport nr 544 R 0424. COWRIE och Subacoustech Ltd.

Pelc R, Fujita R M. 2002. Renewable energy from the ocean. Marine Policy, **26**:471-479.
Petersen J K, Malm T. 2006. Offshore windmill farm: threats or possibilities for the marine environment. Ambio, **35**:75-80.
Popper A N, Fay R R, Platt C, Sand O. 2003. Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes. Collin S P, Marshall N J (red.). Sensory processing in aquatic environments, ss. 3-38.Springer, New York.
Popper A N, Carlson T J. 1998. Application of sound and other stimuli to control fish behavior. Transactions of the American Fisheries Society, **127**:673-707.
Thomsen F, Lüdenmann K, Kafemann R, Piper W. 2006. Effects of offshore wind farm noise on marine mammals and fish. Rapport för biola, COWRIE Ltd, Hamburg, Tyskland.
Santulli A, Modica A, Messina C, Ceffa L, Curatolo A, Rivas G, Fabi G, D'Amelio V. 1999. Biochemical responses of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) to the stress induced by off shore experimental seismic prospecting. Marine Pollution Bulletin, **38**:1105-1114.
Sigray P, Andersson M, Fristedt T. 2009. Partikelrörelser i vatten vid ett vindkraftverk. Vindval rapport 5963, Naturvårdsverket.
Simpson S D, Meekan M, Montgomery J, McCauley R, Jeffs A. 2005. Homeward sound. Science, **308**:221.
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. 1994. Fiskeriundersökningar vid havsbaserat vindkraftverk 1990-1993. Fiskeriverket, Utredningskontoret i Jönköping.
Wikström A, Granmo Å. 2008. En studie om hur bottenlevande fauna påverkas av ljud från vindkraftverk till havs. Vindval rapport 5856, Naturvårdsverket.
Wilhelmsson D, Malm T, Öhman M C. 2006. The influence of offshore windpower on demersal fish. Journal of Marine Science, **63**:775-784.
Wysocki L E, Dittami J P, Ladich F. 2006. Ship noise and cortisol secretion in European freshwater fishes. Biological conservation, **128**:501-508.

Hemsidor

http://havsvind.se/fakta-havsbaserad-vindkraft/. Hämtad 2013-05-03.
Vindkraftstatistik, Svensk Vindenergi 2013. WWW-dokument. http://www.vindkraftsbranschen.se/wp-content/uploads/2013/05/Statistik-vindkraft-kvartal-1-2013.pdf. Hämtad 2013-05-13.