Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek.
Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitised at Gothenburg University Library.
All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text.
This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.

GÖTEBORGS UNIVERSITET

FISKERIVERKET

Ljud från havsbaserade vindkraftverk: Möjliga effekter med utgångspunkt från fiskars hörsel

Svensk översättning av engelsk version:
Sounds from offshore windmills: implications to the hearing abilities of fish,
MW 9 september, 2003

Magnus Wahlberg och Håkan Westerberg

Fiskeriverket, Box 423, 401 26 Göteborg

September 2003

FISKERIVERKET
Biblioteket
Box 423
401 26 GÖTEBORG

8331
FISKAR/ljU

FISKAR / ljU

Sammanfattning

Nuvarande kunskaper om fiskars hörsel och reaktioner på undervattensljud relateras till nya, detaljerade mätningar av ljudförhållandena vid en modern vindkraftspark i Östersjön (Ingemansson AB 'Utgrunden off-shore wind farm – Measurements of underwater noise', Report 11-00329-030127003). Undervattensbuller från vindkraftsparken beräknas kunna höras av flera fiskarter, t.ex. torsk och sill, på ett avstånd av upp till 16 km vid vindstyrkan 14 m/s. Motsvarande avstånd minskar till 600 m vid måttlig vind (8 m/s). Inom detta område kan vindkraftparkens ökning av bakgrundsbrusets nivå påverka räckvidden över vilken fiskar kan kommunicera inbördes och uppfatta ljudinformation från omgivningen. Det går inte att kvantifiera i vilken utsträckning detta kommer att inverka på fiskarnas beteende och överlevnad. För fiskar utan simblåsa, t.ex. plattfiskar eller makrill, är störningsavståndet väsentligt kortare.

Ljudnivåerna kommer inte att ha någon skadlig inverkan på fiskarnas hörselorgan ens på mycket korta avstånd. Varaktigt undflyende på grund av bullret begränsar sig till avstånd mindre än 10 m från fundamenten. Dessa slutsatser baseras på en teoretisk omräkning av ljudtrycksmätningarna till partikelhastighet och måste därför tas med viss reservation.

English summary

A summary of current knowledge on fish hearing and how fish react to sound is presented. This is related to the measurements by Ingemansson AB (*'Utgrunden off-shore wind farm – Measurements of underwater noise'*, Report 11-00329-030127003) on underwater noise from a Swedish wind mill farm. The noise from wind mills is estimated to be detectable by some fish species, such as cod and herring, at a range up to 16 kilometers at high wind speeds (14 m/s). The detection range decreases to 600 m at moderate wind speeds (8 m/s). The wind mill noise may decrease the maximum sound communication distance for swim bladdered fish within these ranges. It is unknown to what extent this affects the behaviour and fitness of the fish. For fish without a swim bladder, such as flatfish and mackerel, the distance of possible disturbance is much shorter.

The wind mill noise is not expected to have any destructive effects on fish hearing abilities even at ranges within a few meters, and fish is expected to be consistently scared away from the wind mills only at ranges shorter than 10 m. These conclusions are based on particle velocity data derived from pressure measurements and must therefore be treated carefully.

Kunskapsläget beträffande fiskars reaktioner på buller

Undervattensljud: decibel, ljudtryck och partikelförflyttning
En akustisk ljudvåg genereras av en lokal longitudinell förskjutning av ett medie. Förskjutningen leder till lokala oscillationer mellan tryck- och partikelrörelse, som propagerar med en ljudhastighet (c) bestämd av mediets kompressibilitet och densitet. Intensiteten av det akustiska fältet är definierat som produkten av de lokala tryckvariationerna (p) och hastigheten av partikelförflyttningarna (v). Tryckfluktuationerna och partikelhastigheten förhåller sig till varandra som $p=vZ$, där Z är den akustiska impedansen. I ett fritt akustiskt fält (utan reflekterande gränsytor, med en homogen ljudhastighet, och på avstånd längre än några våglängder från ljudkällan) så är den akustiska impedansen $Z=\rho c$ (ρ är mediets densitet eller täthet) Den akustiska intensiteten (I) kan beräknas från mätningar med en tryckgivare (hydrofon) enligt $I=p^2/Z$, som i det fria akustiska fältet förenklas till $I=p^2/(\rho c)$ (Beranek 1983). Normalt anger vi intensiteten av undervattensljud i decibel, beräknad som $20log_{10}(p/p_0)$, med referenstrycket $p_0 = 1\ \mu Pa$.

Från detta följer att i det fria akustiska fältet kan partikelhastigheten beräknas från tryckmätningar med formeln $v=p/(\rho c)$. Nära en ljudkälla och/eller på grunt vatten kan den akustiska impedansen avvika drastiskt från den man får i det fria fältet. Som en följd av detta blir relationen mellan tryck och partikelhastighet mera komplicerad ('nära' och 'grunt' definieras relativt våglängden av signalen, och innebär för signaler som är intressanta med hänsyn till fiskhörsel från ca 10 m upp till1 km). Detta är viktigt när vi diskuterar fiskhörsel, eftersom fiskar är känsliga inte bara för tryckkomponenten men också för partikelhastighetskomponenten i ljudfältet.

Det är tekniskt mycket mer besvärligt att mäta partikelhastighets- än ljudtryckskomponenten i ett ljudfält, och därför görs sällan sådana mätningar. Ingemansson AB (2003) mätte inte partikelhastighetskomponenten just av denna anledning. Dock så uppmätte de inte bara det akustiska ljudtrycket, men också accelerationen i vindkraftverksfundamentet, som är källan till ljudproduktionen. Dessa data kan med vissa antaganden användas för att beräkna storleksordningen av partikelhastighetskomponenten i det akustiska fältet. Det måste emellertid understrykas att sådana beräkningar inte är speciellt exakta. Därför måste tolkningarna av resultaten som presenteras nedan göras med denna viktiga reservation.

Ljudutbredningen kompliceras ytterligare av interferens. Nära en ljudkälla (här definieras 'nära' i enheter av ljudkällans tvärsnittsarea dividerad med den producerade våglängden) uppstår det interferens mellan olika delar av ljudkällan, och detta skapar ett komplicerat mönster av toppar och dalar i den akustiska intensiteten. Storleken av denna *Fresnel-zon* blir mycket begränsad för vindkraftverk vid de våglängder som är intressanta för fiskhörsel - storleksordningen ett par meter. På grunt vatten uppstår också interferens vid reflexioner mellan havsytan och botten (Medwin och Clay 1998). I parker med många vindkraftverk kan bilden kompliceras ytterligare av interferens mellan ljud från olika vindkraftverk (Ingemansson AB 2003). Interferensmönster som orsakas av vattenytan, botten och andra vindkraftverk kan sträcka sig långa avstånd ut från vindkraftverken och ge lokala förstärkningar eller försvagningar av ljudintensiteten. Sådana fenomen har inte tagits hänsyn till vid beräkningen av detektionsavstånd i exemplen i denna rapport.

Fiskens hörselegenskaper
Fiskens hörselorgan består av kalkstrukturer, otoliter, som vilar på känselceller, s.k. hårceller, i innerörat (Popper och Fay 1993). När fisken flyttas fram och tillbaka på grund av ljudvågens partikelrörelse kommer, på grund av deras större täthet, otoliterna på efterkälken i rörelsen. Denna

försening i otoliternas rörelse får hårcellerna att böja sig, och detta registreras av fisken genom nervimpulser. Fisk är därför primärt känslig för partikelförflyttningen i ljudvågen, eller snarare tidsderivatorna av partikelförflyttningen (hastighet och acceleration, Kalmijn 1988). Fiskens öra ska därför primärt ses som en accelerometer och velocimeter, snarare än som en tryckdetektor (som är fallet med människans öra).

Fiskarter med simblåsa, såsom torsk och sill, påverkas emellertid indirekt också av tryckfluktuationerna i ljudfältet. För frekvenser över ca 50 Hz (beroende på simblåsans storlek och luftvolym) sätts simblåsan i vibration genom att den trycks ihop och expanderar i takt med tryckfluktuationerna. Simblåsans vibrationer fortplantas till innerörat genom fiskkroppen. En del fiskar har speciella strukturer, såsom ben (hos karpfiskar och malar) eller luftkanaler (hos sill) som förbinder simblåsan med innerörat och gör fisken ännu känsligare för ljudtryck. Hörselförmågan relaterad till ljudtryck är kritiskt beroende av hur mycket luft som finns i simblåsan (Sand och Enger 1973). Exempelvis så har laxfiskar en simblåsa, men luftvolymen är så liten så att laxens hörselförmåga inte väsentligt förbättras i jämförelse med fiskar som inte har någon simblåsa (Hawkins och Johnstone 1978).

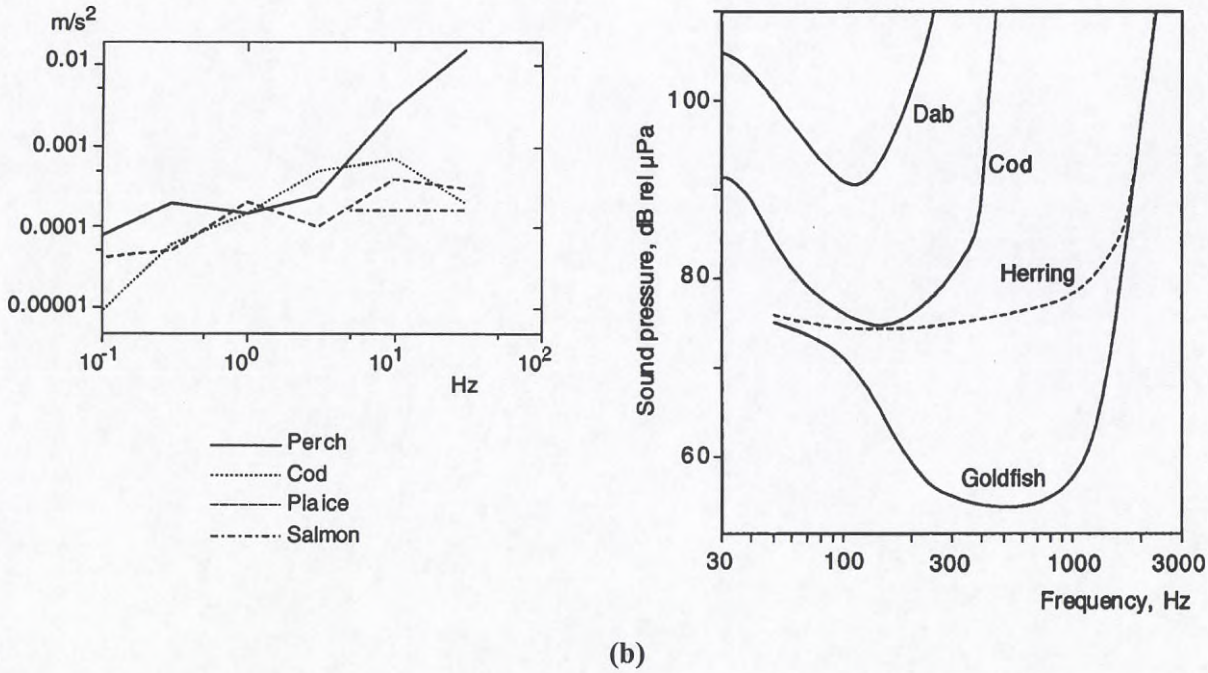


Figure 1. Fiskars hörförmåga vid (a) lägre och (b) högre frekvenser. Från Wahlberg (1999), som innehåller referenser till originaldata. Se texten för ytterligare förklaringar. (Perch=abborre, Cod=torsk, Plaice=rödspätta, salmon=lax, dab=flundra, herring=sill, goldfish=guldfisk. Sound pressure=ljudtryck, frequency=frekvens).

Figur 1 summerar olika fiskarters hörförmåga. Vid låga frekvenser (figur 1a, mätt i enheter av acceleration) verkar alla fiskarter höra ungefär lika bra. Vid högre frekvenser (figur 1b, mätt i enheter av ljudtryck) varierar hörselegenskaperna beroende på om fisken har simblåsa eller inte (flundran har ingen simblåsa), hur välfylld den är med luft, och om det finns en förbindelse mellan simblåsa och innerörat (guldfisken är en karpfisk). Observera att fiskar framför allt är känsliga för lågfrekvent ljud och att de kan höra mycket lägre frekvenser än människor (s.k. infraljud). En

guldfisks hörselkänslighet motsvarar ungefär andra ryggradsdjurs känslighet för ljud (inklusive människans i luft) vid deras respektive bästa hörselfrekvens.

Utöver de 'klassiska' hörselkurvorna i Figur 1 har man nyligen visat att torsk och vissa av arterna bland sillfiskar kan detektera ultraljud vid höga intensiteter (Astrup och Møhl 1993, Mann et al. 2001).

Hur reagerar fisk på ljud

Alla fiskare vet att fisk reagerar för ljud, antingen genom att bli attraherade till eller skrämda bort från ljudkällan. Detta fenomen används i många traditionella fiskemetoder (Wahlberg 1999). Vetenskapliga undersökningar har gjorts med fisk och ljud sedan starten av 1900-talet. Trots detta vet vi fortfarande ganska lite om hur fisk använder sig av akustisk information och hur de reagerar på ljud. Akustisk kommunikation används ofta under parning och aggression (Hawkins 1993, Soldal och Totland 2002), men det finns endast ett fåtal kvantitativa mätningar av de akustiska egenskaperna hos dessa ljud. Kolja *(Melanogrammus aeglefinnus)* producerar ljud med simblåsan med en intensitet av 114-120 dB re 1 µPa @ 1 m (Hawkins, pers. medd.), medan bubbelljud från sill har en mycket lägre intensitet, 73 dB re 1 µPa @ 1m (Wahlberg och Westerberg 2003). Ljud kan också användas för att detektera rovdjur och bytesdjur, och för att orientera sig (Popper och Fay 1993).

Det finns för närvarande ett stort forskningsintresse rörande hur fisk reagerar på människoalstrade ljudkällor, speciellt med hänsyn till fartygsbuller i samband akustisk beståndsuppskattning, ekointegrering (Olsen 1971). Andra ljudkällor, som vindkraftverk (Westerberg 1994), akustiska fiskledare vid vattenkraftverk (Carlson och Popper 1997, Popper och Carlson 1998), och detonationer (till exempel från *air guns* - luftdrivna ljudkällor som ger en explosionsartad ljudpuls för seismiska undersökningar, Engås et al. 1996) - har också studerats. Resultaten från dessa studier visar att fisk reagerar för ljud på mycket olika sätt, beroende av ljudkällans karaktär, vilken fiskart som studeras, och den experimentella metodiken. Nästan alla ljudkällor kan inducera en flyktreaktion, men ofta följer en snabb tillvänjning. Det verkar som om fisk endast kan skrämmas konsistent från ljudkällor genom att använda mycket låga frekvenser och höga nivåer av partikelacceleration. För lax skall frekvensen vara under 20 Hz och accelerationen ungefär 10^{-2} m/s^2, vilket motsvarar en intensitet av ca 180 dB re 1 µPa i det fria akustiska fältet (Sand et al. 2001).

Två andra aspekter av fiskhörsel är viktiga när man diskuterar hur fisk reagerar på ljud. För det första har det påvisats att stamsill (*Alosa sappidissima*, en sillfisk) reagerar konsistent med undflyendereflektioner på ultraljud vid intensiteter ovanför ca 185 dB re 1 µPa (Plachta och Popper 2003). Dessa resultat är mycket nya, och det är ännu inte känt hur vanlig ultraljudsdetektion är hos fisk. Den enda fiskart utanför sillfamiljen som hittills har testats är torsk, som också visar undflyendereaktioner för ultraljud vid en intensitet av 195 dB re. 1µPa (Astrup och Møhl 1993). En del fiskarter har kunnat skrämmas bort från intagskanalen vid vattenkraftverk med hjälp av högfrekventa ljud (Carlson och Popper 1998). Troligtvis producerar emellertid inte vindkraftverk starka ultraljud, så dessa nya data torde inte vara relevanta för hur fisk reagerar på vindkraftverk.

En annan viktig aspekt av fiskhörsel är sidlinjesystemet, som består av en serie hårceller på fiskkroppen, ofta inbäddad i ett intrikat system av kanaler. Sidolinjens viktigaste funktion är *inte* att detektera ljud utan reagerar på lokala vattenflöden längs fiskkroppen med låg frekvens (under 150 Hz, Kalmijn 1988). Hårcellerna har en detektionströskel vid en relativ vattenhastighet av ca 10^{-6} m/s

(Sand 1984). I det fria akustiska fältet vibrerar fiskkroppen såväl som sidlinjesystemets hårceller i fas med den omgivande vattenmassan. Därför kan sidlinjen normalt inte detektera det akustiska fältet. Tätt inpå en ljudkälla däremot *kan* sidlinjen detektera ljud: fiskkroppen vibrerar som en fast kropp, och i de fall det akustiska fältet varierar längs fiskkroppen så kan sidlinjens hårceller påverkas av den relativa rörelsen mellan kroppen och mediet. Sidlinjesystemets används för att detektera byte och rovdjur, för orientering och för att koordinera stimrörelser (Enger et al. 1989, Partridge och Pitcher 1980, Weissert och Campenhausen 1981). Eftersom sidolinjesystemet bara detekterar signaler från källor inom ett fåtal fisklängder från fisken, så är detta sinnesorgan bara viktigt på mycket korta avstånd till vindkraftverken.

Ljud-inducerade hörselskador
Högintensitetsljud kan orsaka temporära och permanenta hörselskador. Det finns begränsade mängder data som kvantifierar sådana effekter hos fisk. Nyligen så exponerade McCauley et al. (2003) fisk ('pink snapper', *Pagrus auratus*) för airgun-pulser vid en maximal ljudintensitet av 180 dB re 1 µPa. Signalen innehöll till största delen energi innanför det frekvensband där fiskar kan höra. Detta inducerade skador på sinnesepitelet i fiskörat, utan någon påvist förbättring 58 dagar efter exponeringen. I ett annat experiment så utsatte Smith et al. (2003) guldfisk (*Carrassius auratus*) och 'tilapia' (*Oreochromis æniloticus*) för vitt brus (bandbredd 0.1-4 kHz, ljudstyrka 164-170 dB re 1 µPa) under 28 dagar. Det var en stor skillnad på hur detta brus förändrade hörselegenskaperna hos fiskarna, beroende på fiskarnas hörselegenskaper: guldfisk, som har mycket bra hörsel, upplevde en temporär försämring av hörselförmågan med hela 25 dB efter 7 dagars brusexponering, medan den enda effekt som kunde observeras hos 'tilapia' (som har mycket sämre hörselegenskaper) var en 10 dB försämring av tröskelvärdet vid en speciell frekvens (800 Hz) efter att ha varit exponerade för vitt brus i 28 dagar. I en annan studie av Scholik och Yan (2001) så exponerades 'fatheaded minnows' (*Pimephales promelas*, en karpfisk och hörselspecialist) för vitt brus (0.3-4 kHz, 142 dB re 1 µPa under 24 timmar), vilket ledde till en signifikant försämring av hörselförmågan. Det är ännu okänt om det är ljudtrycket eller partikelrörelsen som orsakar dessa hörselskador.

Kunskapsluckor
Det måste poängteras att fiskars reaktion till ljudkällor endast har studerats för ett mycket begränsat antal fiskarter, och den existerande data behandlar endast ett fåtal signaltyper och ljudintensiteter. Man måste därför vara mycket försiktig med att extrapolera den existerande data till andra fiskarter och ljudtyper, och till andra miljömässiga och beteendemässiga situationer. Vi har mycket att lära om hur fisk reagerar på ljudstimuli, och hurpass svåra hörselskador som skapas av människoskapat buller.

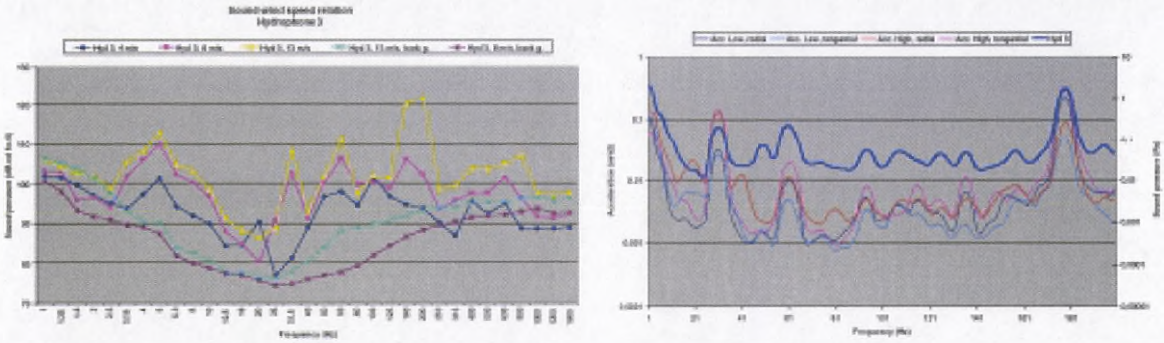
Jämförelse mellan fiskhörsel och data på undervattensljud från vindkraftverk

Detektionsavstånd
Undervattensljud från Utgrundens vindkraftverkspark uppmättes av Ingemansson AB (2003). Ljudnivån vid en vindstyrka av 14 m/s visas i figur 2. Spektrat av mätningarna kan jämföras med ett fiskaudiogram i Fig. 1a. Den maximala ljudintensiteten i frekvensområdet intressant för fiskhörsel är ca 126 dB re 1 µPa vid 180 Hz, uppmätt på ett avstånd av 83 m från det närmsta vindkraftverket. Detta kan tillbakaräknas till ett avstånd av 1 m med hjälp av den uppmätta transmissionsförlusten av 4 dB per avståndsfördubbling. Detta ger en transmissionsförlust av 26 dB, och källstyrkan vid vindkraftverket blir därför *126+26 = 152* dB re 1 µPa @ 1m vid en

vindhastighet av 14 m/s och vid en frekvens på 180 Hz. Vid denna frekvens är bakgrundsbrusets spektrala täthet 82 dB re 1 $\mu Pa/Hz^{1/2}$ (figur 2).

I biologiska hörselsystemer så integreras bruset över ett frekvensband. Bandbredden av detta frekvensband är beroende av vid vilken frekvens som djuret lyssnar. Det finns endast ett fåtal studier för att besämma frekvensbandens storlek hos fisk. Hawkins och Johnstone (1978) uppmätte filterbandbredden för lax vid 160 Hz till ca 100 Hz. Hawkins och Chapman (1975) gjorde liknande mätningar av torsk och fick en filterbandbredd av 68-85 Hz. Filterbandbredden skall transformeras till decibeler och sedan adderas till den spektrala brustätheten för att få den brusnivå som fisken upplever.

Vi kan då beräkna att den för fisken upplevda brusnivån vid 14 m/s vindstyrka varierar mellan $82+10log_{10}(68)=100$ *dB re 1 µPa*, och $82+10log_{10}(100)=102$ *dB re 1 µPa*, beroende på vilken hörseförmåga den fisk har, som vi önskar undersöka. Låt oss försiktigtvis anta det lägre värdet för upplevd brusnivå av 100 dB i beräkningen av detektionsavstånd nedan. Då är signal-brus-förhållandet 1 m frånd vindkraftverket $151-100=52$ *dB*. Vi kan anta att fisken behöver 10 dB signal-brus-förhållande för att kunna detektera vindkraftverket. Detta betyder att det maximala avståndet som fisken kan detektera vindkraftverket på är $10^{(52-10)/10}= 16$ *km*. En liknande beräkning vid en vindhastigheten på 8 m/s i figur 2 ger ett signal-brus-förhållande vid 1 m avstånd på 38 dB, och ett maximalt detektionsavstånd av 600 meter. Detektionsavståndet minskar mycket snabbt vid minskade vindhastigheter. Detta förklara av att bruset från vindkraftverket reduceras snabbare än bakgrundsbruset vid lägre vindhastigheter (figur 2a).



(a) **(b)**

Figur 2. (a) Ljudnivå (spektral täthet) 83 meter från Utgrundens vindkraftverk vid vindhastigheter mellan 4-14 m/s. **(b)** Accelerationsmätningar från vindkraftverket vid en vindhastighet av 14 m/s. Accelerometrarna monterades på vindkraftverket. Hydrofonen ('Hyd 3') är samma mätning som presenteras i figur 2a. Filterbandbredd: 1 Hz. Från Ingemansson (2003), fig. 18 och 17.

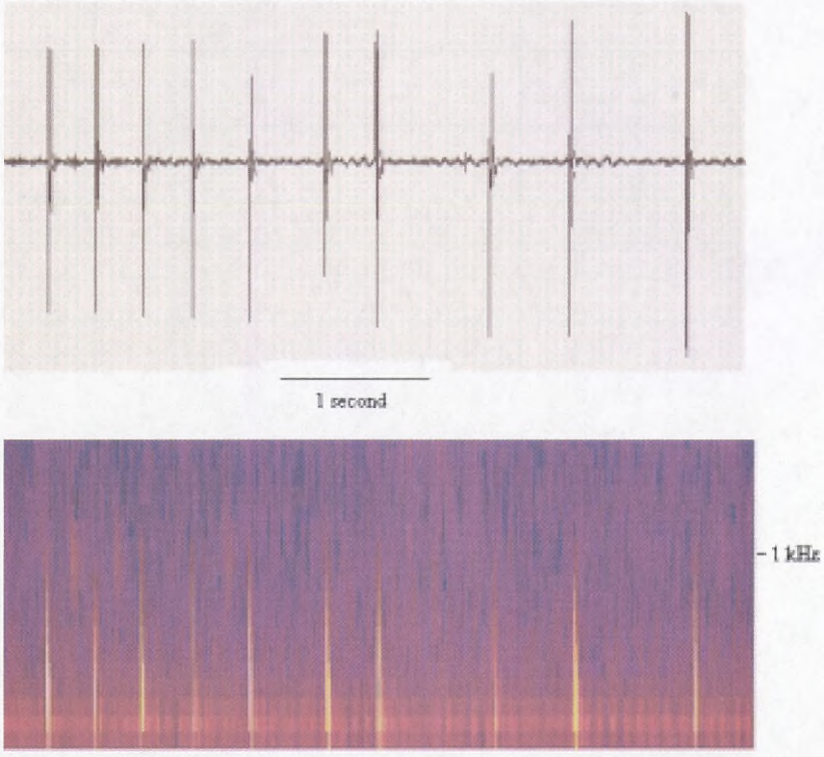
Sådana beräkningar blir väldigt osäkra när detektionsavståndet är stort. Det finns många faktorer som ger extra transmissionsförluster vid långa avstånd, på grund av inhomogeniteter i mediet och interferens vid reflektioner mot vattenyta och botten. Beräkningarna är dessutom gjorda i enheter av ljudtryck, och därför är resultaten endast användbara för fiskarter som har en simblåsa (såsom torsk och sill) För fisk utan simblåsa är hörselkänsligheten mycket sämre vid 200 Hz (figur 1b). Vid 14 m/s så är den uppskattade bakgrundsbrusnivån som beräknades ovan (100-102 dB re 1 µPa) mycket nära fiskens hörseltröskel. Vid lägre vindhastigheter (som ger lägre bakgrundsbrusnivåer) är

detektionen därför maskerad inte av bakgrundsbruset i havet men av bakgrundsbrus i innerörats receptorer. Därför blir detektionsavståndet ännu kortare än för fisk med simblåsa.

Som noteras ovan är det relevanta stimulit för fisk utan simblåsa partikelförflyttning snarare än akustiskt tryck (detta gäller också i huvudsak laxfiskar, vars simblåsa innehåller väldigt lite luft). Extrapoleringen ovan är då godtagbar endast i det fria akustiska fältet. Motsvarande beräkningar för ett fall med ren accelerationskänslighet hos fisken skulle troligen resultera i väsentligt lägre detektionsavstånd. Trots denna reservation så visar beräkningarna att en fisks detektionsavstånd för vindkraftverken kan vara flera kilometer vid höga vindstyrkor.

Vindkraftverk kan maskera fisk-kommunikation

Som noteras ovan så har fisk en variationsrik ljudproduktion som bl.a. används för kommunikation. En frågeställning är i vilken utsträckning vindkraftverken reducerar det avstånd som fisk kan höra varandra när de kommunicerar. Hawkins (pers. medd.) har uppmätt källstyrkan hos koljans kommunikationsljud till 114-120 dB re 1 µPa. Ljudens frekvensinnehåll är ca 200-500 Hz (figur 3), dvs i samma frekvensband som vindkraftverkets ljud. Enligt resonemanget ovan, med samma bakgrundsbrusnivå (vid 14 m/s vindhastighet) och samma detektionströskel, så är signal-till-brusförhållandet en meter från den ljudande koljan som bäst $120\text{-}100 = 20\ dB$. Om vi antar att detektionströskel ligger mellan 3-10 dB så skulle ljudet vara hörbart för en annan kolja på ett maximalt avstånd mellan $10^{(20-10)/20} = 3\ m$ och $10^{(20-3)/20} = 7\ m$ (här antar vi sfärisk ljudutbredning eftersom avståndet mellan fiskarna är så kort).



Figur 3. Ljud från kolja, inspelad av Soldal och Totland (2002). Ovan ses ett oscillogram (samplingsfrekvens 5.5 kHz) och nedan är ett spektrogram (filter bandbredd 172 Hz, Blackmann-Harris fönster).

I områden där ljudet från vindkraftverket är högre än bakgrundsbrusnivån (upp till 16 km avstånd efter vad som beräknats ovan), kommer detta detektionsavstånd att reducers. Vindkraftsbruset skulle i exemplet minska kommunikationsavståndet till mindre än 1 m redan på avståndet 500 m. Resultat är tillämpbart för alla fiskarter som kommunicerar i det frekvensområde där vindkraftverken skapar ljud. Nya studier är nödvändiga för att avgöra om detta har någon signifikant betydelse för fiskens beteende och överlevnad. För kolja är signalerna viktiga beteeendeingredienser för parningen, och detsamma gäller troligt för många andra fiskarter. En signifikant förkortning av kommunikationsavståndet kan göra att en lekplats vid en vindkraftspark blir oanvändbar.

Fiskens reaktion på ljud från vindkraftverk
För att beräkna det maximala avstånd för att fisk ska undfly ljud från vindkraftverk måste man göra ännu flera antaganden än de som gjordes ovan. Dock verkar det som att de uppmätta ljudnivåerna redan på en meters avstånd från vindkraftverket understiger vad som behövs för att långsiktigt skrämma fisk. Som nämnts ovan så skräms emellertid fiskar inte primärt av tryckkomponenten utan snarare av accelerationen av vattenmassan. Accelerationskomponenten uppmättes inte i denna studie, och just i närheten av en ljudkälla är den inte direkt relaterad till tryckkomponenten (se ovan). Accelerationsmätningarna vid vindkraftstornet (figur 2b) kan användas till att uppskatta den maximalt inducerade partikelaccelerationen i mediet. Den maximala accelerationen i tornet är ca 0.5 m/s^2 för frekvenser under 20 Hz (figur 2b). Som refererats ovan tycks fisk bara bli konsistent bortskrämd från ljudkällor som inducerar en acceleration större än 0.01 m/s^2.

Frågan är nu: på vilket avstånd så har den maximala partikelaccelerationen fallit från 0.5 m/s^2 till fiskens tröskelvärde för att bli bortskrämd, dvs 0.01 m/s^2? Partikelaccelerationens transmissionsförlust nära en ljudkälla beror på om ljudkällan har en monopol (pulserande) eller dipol (vibrerande) karaktären (Beranek 1983), och dessutom på vattendjupet. Accelerometermätningarna i figur 2 indikerar att vibrationerna både är radiella och tangentiella, Den tangentiella accelerationen torde leda till dipol-vibrationer, medan den radiella accelerationen kan implicera både pulserande (monopol) och vibrerande (dipol) rörelser. Det verkar troligare från en mekanisk synpunkt att vindkraftverken huvdsakligen vibrerar som en dipol snarare än en monopol. I det fria akustiska fältet genererar en monopol lokala oscillationer som faller med 12 dB per avståndsfördubbling, eller $40 \log_{10} r$ (Kalmijn 1988). Det kritiska avståndet för att accelerationen skall har fallit till 0.01 m/s^2 blir då 7 m. För en mer trolig dipol som ljudproduktionsmekansim så faller accelerationskomponenten som $60 \log_{10} r$ (Kalmijn 1988), och det kritiska avståndet reduceras till 4 m. Dessa beräkningar gäller endast i det fria akustiska fältet. De kritiska avståndet kan bli avsevärt längre på grunt vatten.

Igen måste det poängteras att tolkningen av dessa beräkningar måste göras med stor försiktighet. Mätningar av accelerationskomponenten i det akustiska fältet runt vindkraftverk är nödvändiga för att få en mer precis bedömning av på vilket avstånd som fisk blir skrämd från ljud från vindkraftverk.

Risk för hörselskador?
Källstyrkan på de ljud som vindkraftverken producerar är lägre än vad som visats kunna orsaka temporära och permanenta hörselskador hos fisk. Dock blir man tvungen till att utvärdera två viktiga reservationer omkring detta. För det första så har de studier som angetts ovan inte indikerat hur fiskhörsel kan påverkas av stimuli av lägre intensitet men under längre tid än de som använts under försöken. Dessutom så finns det till vår kännedom endast ett fåtal studier av långtidseffekter

av brus på fiskhörsel. Långtidsförsöken av Smith *et al.* (2003) visade att sådana effekter faktiskt kan uppkomma först efter långa tidsperioder av ljudexponering. För närvarande finns det ingen data för att utvärdera om vindkraftverksbrus kan inducera hörselskador i fisk på korta avstånd när den blir exponerad för brus från vindkraftverk under långa tidsperioder.

Slutsats

Denna rapport utvärderar möjliga effekter på fisk av vindkraftverksbrus. Från akustiska mätningar av Ingemansson AB (2003) så kan vi förutsäga att fisken skulle kunna detektera vindkraftverken på ett maximalt avstånd av 16 km vid höga vindstyrkor (14 m/s), och helt ned till bara 600 m vid moderata vindstyrkor (8 m/s). Vi hittar inga bevis för att vindkraftverken orsakar temporära eller permanenta hörselskador hos fisk även på ett avstånd av endast ett fåtal meter från vindkraftverken. Vindkraftverken kan producera ljud som permanent skulle skrämma bort fisk inom avstånd av ca 4-7 m vid höga vindstyrkor. Vindkraftsbruset kan ha en signifikant inverkan på de avstånd som fisk kan kommunicera med varandra, men det är okklart i vilken utsträckning detta har någon effekt på fiskens överlevnadsmöjligheter.

Undervattensbruset i dessa beräkningar kommer från en typ av vindkraftsverk. Det är inte klarlagt i vilken utsträckning brusets styrka och spektralsammansättning är representativt för andra konstruktioner. Man kan konstatera att både bullrets spektra och vindstyrkeberoende avviker väsentligt från de som uppmättes vid ett äldre och mindre aggregat (Westerberg 1994).

Fiskhörsel är en komplicerad blandning av akustisk partikelacceleration och ljudtryck, och utförlig data saknas fortfarande både på undervattensljud från vindkraftverk, såväl som på hur fisk reagerar på människoskapat ljud. Därför måste man vara synnerligen försiktig med slutsatserna ovan.

En mer omsorgsfull utvärdering av effekterna på vindkraftsverkens undervattensljud på fisk är bara möjlig med flera mätningar från ljudfälten runt vindkraftverken (inklusive mätningar av partikelaccelerationskomponenten) och med en bättre förståelse för fiskarnas beteendemässiga och fysiologiska reaktion på ljud från vindkraftverk.

Litteratur

Astrup, J., B. Møhl (1993). Detection of intense ultrasound by the Cod, Gadus morhua. J. exp. Biol., 182, 71-80.

Beranek, L. L. (1983). Acoustics. Acoustical Society of America, New York.

Carlson, T. J., A. N. Popper (1997). Using sound to modify fish behavior at power-production and water-control facilities: a workshop. US Department of Energy Project 92-071-01, Bonneville Power Administration, Portland, Oregon.

Enger, P. S., A. Kalmijn, O. Sand (1989). Behavioural investigations on the functions of the lateral line and inner ear in predation. In: S. Coombs, P Görner, H. Münz (Eds.): The mechanosensory lateral line. Springer-Verlag, New York, pp 375-387.

Engås, A., S. Løkkeborg, E. Ona, A. V. Soldal (1996). Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (Gadus morhua) and haddock (Melanogrammus aeglefinus). Can. J. Fish. Aq. Sci. 53: 2238-2249.

Hawkins, A. D., C. J. Chapman (1975). Masked auditory thresholds in the cod, Gadus morhua L. J. comp Physiol. 103: 209-226.

Hawkins, A. D., A. D. F. Johnstone (1978). The hearing of the Atlantic Salmon, *Salmo salar. J. Fish Biol.* 13: 655-673.

Hawkins, A. D. (1993). Underwater sound and fish behaviour. In J. T. Pitcher: Behaviour of teleost fishes. Chapman and Hall, London, pp 129-169.

Ingemansson AB (2003).Utgrunden off-shore wind farm – Measurements of underwater noise. Report 11-00329-03012700

Kalmijn, A. D. (1988). Hydrodynamic and acoustic field detection. In: Sensory biology of aquatic animals (ed J. Atema, R. Fay, A. Popper and W. Tavolga), pp. 83-131.

Mann,D.A., D. M. Higg, W. N Tavolga, M. J. Souza, A. N. Popper (2001). Ultrasound detection by clupeiform fishes. J. Acoust. Soc. Am. 109 (6): 3048-3054.

McCauley, R. D., J. Fewtrell, A. N. Popper (2003). High intensity anthropogenic sound damages fish ears. J. Acoust. Soc. Am. 113(1): 638-642.

Medwin, H., C. S. Clay (1998). Introduction to Acoustic Oceanography. Chapman Hall, New York.

Olsen, K. (1971). Effect of vesssel noise in purse seining. In: Kristjonsson (ed.): Modern Fishing Gear of the World, vol III., Fishing News Ltd., London, pp 291-294.

Partridge, B., T. Pitcher (1980). The sensory basis for fish schools: relative roles of lateral line and vision. J Comp. Physiol. 135: 315-325.

Plachta, D. T. T., Popper, A. N. (2003). Evasive response of American shad (Alosa sapidissima) to ultrasonic stimuli. Acoustic Research Letters On-Line 4(2): 25-30.

Popper, A. N., T. J. Carlson (1998). Application of sound and other stimuli to control fish behavior. Trans. Am. Fish. Soc. 127(5): 673-707.

Popper, A. N., R. R. Fay (1993). Sound detection and processing by fish: critical review and major research questions. Brain Behav. Evol. 41: 14-38.

Sand, O., P. Enger (1973). Evidence of an auditory function of the swimbladder in the cod. J. Exp. Biol. 59: 405-414.

Sand, O. (1984). Lateral line systems. In: L Bolis, R Keynes, S Maddress (Eds). Comparative physiology of sensory systems, Cambridge Unviersity Press, pp 3-32.

Sand, O., P. S. Enger, H. E. Karlsen, F. R. Knudsen (2001). Detection of infrasound in fish and behavioral respoonses to intense infrasound in juvenile salmonids and European silver eels: a minireview. American Fisheries Society Symposium 26: 183-193.

Scholik, A. R., H. Y. Yan (2001). Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. Hearing Res. 152: 17-24.

Smith, M., Kane, A. S., Popper, A. N. (2003). Predictive relationship between hearing sensitivity and noise-induced hearing loss in fishes. First International Conference on Acoustic Communication by Animals, University of Maryland July 27-30 (abstract), pp 225-226.

Soldal, A. V., B. Totland (2002). Biologisk lyd brukt til selektiv fiske. CD Rom, Havofskningsinstitutet, Bergen.

Wahlberg, M. (1999). A review of the literature on acoutic herding and attraction of fish. Fiskeriverket Rapport 1999 (2): 5-43.

Wahlberg, M., H. Westerberg (2003). Sounds produced by herring (Clupea harengus) bubble release. Aquatic Living Resources 16: 271-275.

Weissert, R., C. v. Campenhausen (1981). Discrimination between stationary objects by the blind cave fish Anoptichtys jordani (Characidae). J. Comp. Physiol. 143: 375-381.

Westerberg, H. (1994). Fiskeriundersökningar vid havsbaserat vindkraftverk 1990-1993. Fiskeriverket, Utredningskontoret Jönköping, Rapport 5 – 1994

Fiskeriverkets bibliotek
2 018 956 8246 06