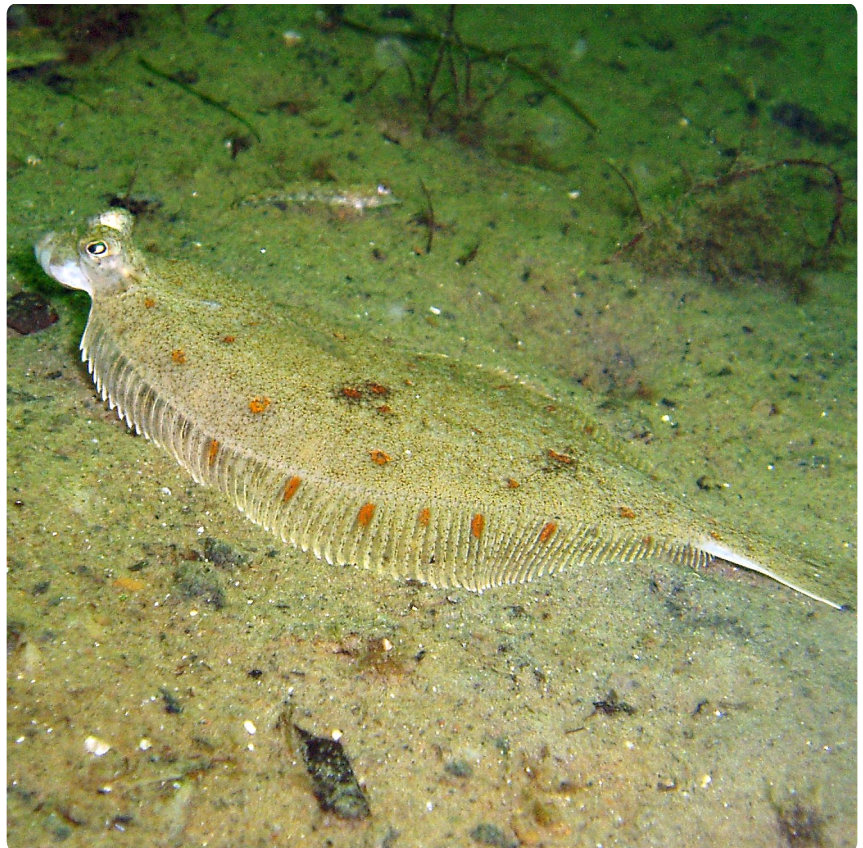
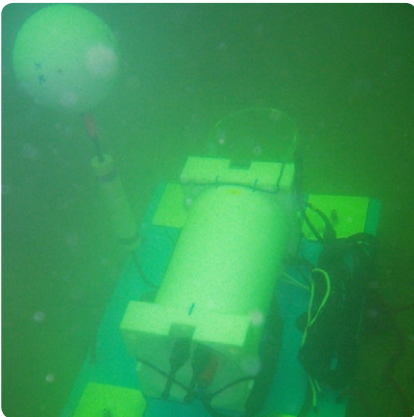


Partikelrörelser i vatten vid ett vindkraftverk

Akustisk störning på fisk

RAPPORT 5963 • JULI 2009



Partikelrörelser i vatten vid ett vindkraftverk

Akustisk störning på fisk

Peter Sigray, Stockholms universitet och Totalförsvarets forskningsinstitut

Mathias Andersson, Stockholms universitet

Tim Fristedt, Totalförsvarets forskningsinstitut

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

Postadress: CM-Gruppen, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/bokhandeln

Naturvårdsverket

Tel: 08-698 10 00, fax: 08-20 29 25

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-5963-7.pdf

ISSN 0282-7298

Elektronisk publikation

© Naturvårdsverket 2006

Tryck: CM Gruppen AB, Bromma 2009

Omslagsbild: Mathias Andersson



Förord

Vindval är ett kunskapsprogram som har i uppgift är att ta fram och sprida kunskap om vindkraftens effekter på människa, natur och miljö. Målen är att underlätta planerings- och tillståndsprocessen vid utbyggnaden av vindkraft och minska osäkerheten vid bedömning av vindkraftens miljöpåverkan. Resultaten ska kunna användas som underlag för miljökonsekvensbeskrivningar samt planerings- och tillståndsprocesser. Tanken är också att bygga upp kunskap om miljöeffekter av vindkraft vid svenska universitet, högskolor, institut och företag samt i kommuner och andra myndigheter.

Vindval finansieras av Energimyndigheten och drivs av Naturvårdsverket. I programkommittén, som diskuterar prioriteringar och bereder underlag för beslut, ingår representanter från Energimyndigheten, Naturvårdsverket, Fiskeriverket, Boverket, Riksantikvarieämbetet, länsstyrelserna och vindkraftbranschen.

Den här rapporten har skrivits av Peter Sigray, Mathias Andersson och Tim Fristedt på Stockholms universitet och Totalförsvarets forskningsinstitut. Skribenterna svarar för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Vindval i juni 2009

Innehåll

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	6
SUMMARY	7
1 BAKGRUND	9
2 FISKARS HÖRSELEGENSKAPER	10
3 UNDERVATTENSAKUSTIK	12
3.1 Vindkraftverkens ljudalstrande komponenter	12
3.2 Undervattensakustik	12
4 UTVECKLING AV MÄTINSTRUMENT	13
4.1 Instrument för uppmätning av partikelacceleration	13
4.2 Fältförsök vid Utgrundens vindkraftspark	14
5 RESULTAT	16
5.1 Tornvibrationer	16
5.2 Bakgrundsljud	16
5.3 Analys av partikelrörelser	17
5.3.1 Jämförelse mellan tornvibrationer och partikelrörelser i vattnet	18
5.3.2 Partikelrörelser vid uppstart av ett vindkraftverk	19
5.3.3 Partikelrörelsens beroende av vindstyrkan	20
5.3.4 Partikelrörelsens beroende av avståndet från vindkraftverket	23
6 FISK OCH REAKTION FÖR PARTIKELRÖRELSE	26
7 DISKUSSION	29
7.1 Slutsatser	30
8 REFERENSER	31

Sammanfattning

Ett nytt mätinstrument har utvecklats och använts för att mäta ljudvågens partikelacceleration i vatten vid det nordligaste vindkraftverket vid Utgrundens vindkraftpark i Kalmarsund. Vindkraftsverkens fundament är av typen driven monopile. Mätresultaten har satts samman med audiogram och responsstudier för torsk, abborre, rödspotta och lax. Syftet har varit att få reda på hur fiskar uppfattar den uppmätta partikelaccelerationen.

Studien visar att torsk, abborre, rödspotta och lax uppfattar partikelaccelerationen inom en radie på 10 meter från vindkraftverket. Uppmätta nivåer kommer sannolikt inte att utlösa ett reflexmässigt beteende. Utanför 10 meter uppfattar de studerade fiskarterna inte partikelaccelerationen från vindkraftsverken.

Genom jämförelse mellan mätningar på olika fiskarter med uppmätta ljudnivåer (partikelacceleration) kan man dra slutsatsen att vindkraftverken vid Utgrunden inte ger upphov till negativa effekter på individuella fiskar. Trots det faktum att det saknas audiogram och responsstudier på många fiskarter kan det förväntas att denna slutsats gäller för de flesta fiskarter i Östersjön.

Det bör påpekas att endast partikelaccelerationens effekter har studerats. Ljudtryckets effekter behandlas inte i rapporten.

Summary

A novel instrument was developed and used for measuring particle acceleration in water. Measurements were performed at the Utgrunden windmill park in Kalmarsund. The field trial was commenced at the most northern windmill during varying experimental setups and meteorological conditions. The windmill tower is of the driven mono-pile variety. The results have been compared to existing audiograms and response studies for Cod, Perch, Plaice and Salmon. The aim of this investigation was to determine fish reaction on measured levels of particle acceleration.

The study shows that Cod, Perch, Plaice and Salmon sense particle acceleration generated by the wind mill up to 10 m distance. Most likely, the measured levels do not trigger autonomous response. Fish do not sense the induced particle accelerations at distances larger than 10 m.

By comparing measured levels with known audiograms it can be stated that the wind mills at Utgrunden do not give rise to negative effects on individual fish. In spite of the fact that there is a lack of measured audiograms for many fish species it can be assumed that the conclusion is valid for most species in the Baltic Sea.

Finally, it should be noted that this study was restricted to the effects of particle acceleration. The effects of pressure are not treated herein.

1 Bakgrund

Vindkraftsutbyggnaden ökar i Sverige. Då denna utbyggnad till viss del kommer att ske till havs ställs det helt nya frågor om dess påverkan på miljön. För ett antal år sedan var kunskapen om de havsbaserade vindkraftens miljöeffekter låg (Westerberg 1994, Anon 2000). Sedan dess har flertalet forskningsprojekt studerat olika miljöaspekter (Malm 2006, Hansson 2006, Wikström och Granmo 2008, Hammar et al. 2008a, Hammar et al. 2008b och Båmstedt et al. 2008). Den akvatiska miljön på två närliggande mindre vindparker (Utgrunden och Yttre Stengrund) har undersökts och resultaten visade på en tydlig reveffekt, man fann en större mängd bentisk och semi-pelagisk fisk i anslutning till verken än vad som fanns i omgivande vatten (Wilhelmsson et al. 2006, Andersson 2008). Studierna visar att det uppkommer fisksamhällen i den omedelbara närheten till kraftverken som etablerar sig både vid pelarna och på botten. Om dessa etableringar även attraherar pelagisk fisk är inte känt men resultaten visar på ett ökat fiskbestånd av bottenlevande fisk i kraftverkens närområde. Därmed uppstår frågan om hur närfältsljudet från vindkraftverken påverkar semi-pelagisk och bentisk fisk.

Flertalet ljudmätningar har visat att havsbaserade vindkraftverk alstrar undervattensljud i fiskars hörselområde (Wahlberg och Westerberg 2005). Ett problem med dessa ljudmätningar är att man valde att mäta tryckkomponenten av det akustiska ljudfältet trots det faktum att en ljudvåg består både av en tryckvåg och av partikelrörelse. Vid låga frekvenser är fisk framförallt känslig för ljudets accelerationskomponent, som i närheten av källan dominerar den akustiska ljudbilden. Den ljudstudie som genomfördes av Ingemansson Technology AB (Lindell 2003) är den hittills mest omfattande som genomförts i svenska vatten och har som resultat blivit vägledande för ett flertal efterföljande arbeten. Dock skall noteras att i rapporten presenteras ljudtrycket från ett kraftverk vid 83 m avstånd. Slutsatser och resultat är användbara för pelagisk fisk, men inte tillämpningsbara för studier utförda i närheten av kraftverken. I detta område saknas det kunskap om ljudbilden och framförallt finns det inga resultat för uppmätta ljudnivåer. Målet med denna studie är att bestämma partikelaccelerationen vid ett vindkraftverk samt att relatera nivåerna till kända tröskelvärden för ett antal fiskarter. Studien är tekniskt inriktad och fokuserar på instrumentering och mätresultat. En kort slutdiskussion görs i vilken mätresultaten relateras till kända fiskstudier. Det bör noteras att studien är begränsad till att studera partikelaccelerationens påverkan på fisk från ett enskilt kraftverk.

2 Fiskars hörselenskaper

Gruppen ”fiskar” innehåller både benfiskar (t.ex. torsk, sill abborre och gädda), broskfiskar (hajar och rockor) och rundmunnar (nejonöga och pirål). Gruppens hörselsystem har utvecklats på olika sett. Av olika skäl har den mesta forskningen om fiskars hörsel gjorts på benfiskar (Popper och Fay 1973). I denna studie är det endast benfiskars hörselorgan som behandlas. Vidare när termen fiskar används är det denna undergrupp som avses.

Fiskar har två inneröron som ligger på var sin sida i kraniet. Varje inneröra har tre cirkelformade kanaler, placerade i rät vinkel mot varandra. Under dessa finns tre vätskefyllda hinnsäckar (*utrículus*, *sacculus* och *lagenda*) med hårda hörselstenar (otoliter) som till största delen består av kalk. Otoliterna är omgivna av ett epitel (*macula*) med sinneshår som registrerar otoliternas rörelse och omsätter dem till nervimpulser till hjärnan. Otoliterna har dubbla funktioner i fiskens sinnesuppfattning. För det första så använder fisken otoliterna som ett jämviktsorgan för att känna av kroppens läge relativt gravitationen. För det andra så registrerar de partikelacceleration som genereras av en rörelse eller en ljudkälla. När ljudvågen från en sådan källa träffar fiskens kropp, passera den rakt igenom de mjuka delarna av kroppen som i stort sett har samma densitet som vatten, men när vågen träffar otoliterna sätts de i rörelse och sinneshåren stimuleras med följden att en nervsignal skickas till hjärnan.

Förutom otoliterna använder fiskarna sitt sidolinjesystem för att registrera vattenrörelser. Sidolinjesystemet löper längs fiskens långsida, från stjärtfenan och fram över huvudet och är kanaler med geléartade känsloceller (neurmater) med känselhår som registrerar små tryckförändringar i vattnet (Bleckmann 1993). Fiskarna använder detta system för att få en uppfattning om sin omgivning, framför allt andra fiskars vattenrörelser (Henke et al. 2000, Sand och Karlsen 2000).

Fiskar är känsliga för ljudtryck om de har en simblåsa eller annan gasfylld hållighet som kan omvandla ljudtryck till rörelse. Denna rörelse uppstår då gasen i blåsan ändrar volym, som ett resultat av det yttre pålagda ljudtrycket. Om simblåsan sitter i direktkontakt med inneröronen eller nära kraniet kan dessa rörelser överföras till inneröronen och därmed öka fiskens känslighet för det högre frekvensområdet (Sand och Hawkins 1973, Popper et al. 2003). Fiskar som saknar gasfyllda blåsor eller förbindelse mellan dessa och inneröronen är därför inte lika känsliga för ljudtryck. Detta har gett upphov till att fiskar delas in i två kategorier, nämligen hörselspecialister och hörselgeneralister. Specialisterna är de fiskar som är känsliga för både ljudtryck och partikelacceleration medan generalisterna är endast känsliga för partikelacceleration och i vissa fall ljudtryck. En specialist hör ljud från 10–1200 Hz och en generalist 10–500 Hz (Popper et al. 2003). Det är först under slutet av 80-talet som forskare började studera fiskars känslighet för partikelacceleration.

Anledningarna till den relativt sena starten var att man inte kunde producera infraljud samt att tidigare gjorda audiogram visade en minskning i känslighet för ljudtrycket i det infrasoniska intervallet (Popper et al. 2003). Det finns endast ett fåtal undersökningar till dags datum där känsligheten för partikelacceleration undersökts (Sand och Karlsen 2000, Wahlberg och Westerberg 2005). Studierna visar att både specialister och generalister har i stort sett samma förmåga att uppfatta partikelacceleration i det infrasoniska intervallet (i rapporten har gränshfrekvensen 20 Hz använts som övre gränshfrekvens för det infrasoniska ljudintervallet).

3 Undervattensakustik

3.1 Vindkraftverkens ljudalstrande komponenter

Vindkraftsparken vid Utgrunden består av sju 1,45 MW vindkraftverk. De är placerade i en böjd linje som sträcker sig från norr till söder. Vattendjupet varierar från 6 till 10 m. Tornen har en navhöjd av 65 m och rotorbladens diameter är 70,5 m. Samtliga verk är grundlagda med ”driven mono-pile” teknik. Vid en vindstyrka av 12 m/s uppnås full effekt. De starkaste ljudkällorna är växellådan, generatoren och bladrotationen. Vid mätillfället var en växellåda tillverkad av Winergy (typbeteckning: PEAS 4410) i bruk, medan vid Ingemanssons mätningar var en Eickhoff installerad (typbeteckning: CPNHZ-195). Rotorbladens rotationshastighet varierar mellan 11 och 20 varv per minut. Det är i huvudsak två källor som genererar ljud nämligen rotorbladen samt växellådan. Rotorbladen alstrar infrasoniskt ljud i intervallet 1 till 10 Hz (Lindell 2003) medan växellådan genererar toner som ligger i frekvensintervallet 20 Hz till 1 000 Hz (Betke 2004). Vid mätningar av ljudtrycket genomförda vid Utgrunden fann man att de dominerande tonerna låg vid 32, 61 och 178 Hz (Lindell 2003). Då samma frekvenser noterades vid vibrationsmätningar på tornet kan slutsatsen dras att rörelserna från växellådan leds genom tornet ut i vattnet. Andra mätningar som genomförts på havsbaserad vindkraft visar liknande resultat (Westerberg 1994, Degn 2000, Fristedt et al. 2001).

3.2 Undervattensakustik

Ljudutbredning i vatten har stora likheter med utbredning i luft men med den skillnaden att ljud i vatten utbreder sig fyra gånger snabbare än i luft. Dessutom har reverberation (eko) en stark inverkan på den akvatiska ljudmiljön.

Ljudutbredning ger upphov till både tryckväxlingar och partikelrörelser, vilka är relaterade till varandra genom den akustiska impedansen. De flesta landlevande ljud med utvecklad hörsel uppfattar ljudtrycksväxlingar, vilka anges i tryckenheten Pascal (Pa). Av historiska skäl relateras luftakustik till 20 μ Pa medan ljud i vatten till 1 μ Pa. Vid de flesta mätningar är den akustiska impedansen okänd, med följderna att tryckmätningar inte kan utnyttjas för att bestämma partikelrörelsen och vice versa. I grunda vatten och i försökstankar måste både partikelaccelerationen och trycket mätas samtidigt för att kunna bestämma ljudets effekter på fisk. I den här rapporten ges ingen detaljerad beskrivning av akustikens grunder utan den intresserade hänvisas till den rika flora av litteratur som existerar inom området (se t.ex. Urick 1983 eller Brekhovskikh och Lysanov 2003).

4 Utveckling av mätinstrument

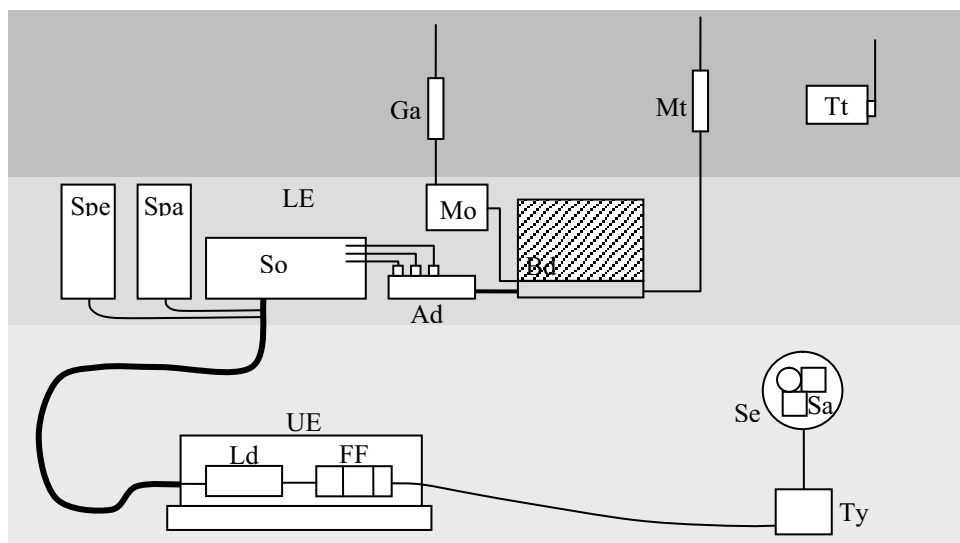
4.1 Instrument för uppmätning av partikelacceleration

Partikelrörelser är en rörelse som sker kontinuerligt i tiden. I den mekaniska beskrivningen har man friheten att beskriva rörelsen som en förskjutning, hastighet eller acceleration. Valet styrs av vilken av de tre storheterna som utgör den mest relevanta parametern. Vad gäller fisk avgörs valet av *stimuli* för de otolitiska organen. Eftersom undersökningar visar att fiskars hörselorgan är uppbyggda enligt principen för detektion av acceleration (de Vries, 1950) faller det sig naturligt att välja denna storhet som beskrivande variabel.

För detektion av acceleration i vatten valdes tre seismiska accelerometrar (av tillverkare Metra Mess- und Frequenztechnik, typ KB12VB), vilka monterades vinkelrätt mot varandra på en specialkonstruerad klack. Denna konstruktion tillät samtidig registrering av de tre ortogonala accelerationskomponenterna. Sensorernas känslighet var 1 μg och de var linjärt känsliga i frekvensintervallet 0,15–260 Hz. Klacken med accelerometrar monterades inuti en vattentät plastsfär (diameter 200 mm), vars tyngdpunkt lades i sfärens centrum och vars massa anpassades till att ge sfären en svag positiv flytkraft. I sfären monterades en undervattenskontakt till vilken en 10 m lång isolerad elektrisk kabel anslöt sfären till undervattensenheten. Detta arrangemang tillät enkla förflyttningar av sfären upp till 20 m utan att läget för den betydligt tyngre undervattensenheten behövde ändras. Med hjälp av en tyngd monterad på kabeln var det möjligt att reglera sfärens höjd över botten, se figur 1.

I undervattensenheten placerades förstärkare och filter. För att minimera externa störningar överfördes signalerna från undervattens-enheten till land-enheten med tretrådsförbindelse drivna av balanserade linje-drivare. Kabeln som användes för att ansluta undervattensenheten till land-enheten var 60 m lång (systemet var konstruerat för att klara av 500 m). Landenheten placerades i en container på vindkraftverkets plattform. För att relatera partikelaccelerationen i vattenmassan till tornets vibrationer monterades en treaxlig accelerometer (Agile, typ G-link) på tornets utsida. Enheten styrdes trådlöst med en bärbar dator som var placerad inne i containern. Även data från den tornmonterade accelerometern överfördes trådlöst till den bärbara datorn, varigenom gick det att undvika kabeldragningar. Signalerna från de tre seismiska accelerometrarna anslöts till en 24-bitars analog-till-digital omvandlare som i sin tur var ansluten till den bärbara datorn. Digitaliserade data lagrades på hårddisken för senare analys, se figur 1.

För att möjliggöra mätningar under olika meteorologiska förhållanden monterades ett GSM-modem till den bärbara datorn. En yttre antenn monterades utomhus vid containern för att ge god kontakt till telefonnätet. Den bärbara datorn kunde därmed nås med fjärrkontroll och mätningar startas utan personal närvarande vid vindkraftverket. De flesta mätningar genomfördes från hemmabasen.



Figur 1. Principskiss av mätsystemet. I den ljusgrå ytan är undervattensdelarna placerade, I den gråa ligger enheter placerade inne i containern och i den mörkgråa ligger de trådlösa enheterna placerade utomhus. Se: Sensor, Sa: Seismiska accelerometrar, Ty: Tyngd, Ue: Undervattensenhet, Ff: Förstärkare och filter, Ld: Linjedrivare, Le: Landenhet, Spe: Spänning elektronik, Spa: Spänning accelerometrar, So: Signalomvandlare, Ad: Analog-till-digital omvandlaren, Bd: Bärbar dator, Mo: Modem, Ga: GSM-antenn, Mt; Mottagare tornmonterad accelerometer och Tt: Tornmonterad treaxlig accelerometer.

Genom Vattenfall AB:s försorg var det möjligt att i realtid få vindriktning och vindhastighet.

Innan utläggning testades systemet i en tank vid Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI). För att undvika mättnings av analog-till-digital omvandlarna ställdes förstärkarna in på minsta möjliga förstärkning (1 gångers förstärkning). Systemet utprovades både med 60 och 500 m kabel mellan undervattens- och landenheten. Inget förhöjt brus kunde noteras jämfört med mätningar utförda direkt på accelerometrarna. Någon kalibrering av sensorsystemet genomfördes inte i denna studie. Istället antogs att den teoretiska betraktelse gäller som genomfördes av Stokes (1851), dvs. sensorn kan antas mäta partikelaccelerationen i vattnet med god noggrannhet när sensorns förskjutning är mycket mindre än sfärens diameter.

4.2 Fältförsök vid Utgrundens vindkraftspark

Undervattensenheten och sensorn lades ut den 24 augusti 2007 utanför det nordligaste vindkraftverket. Utläggningen genomfördes från Vattenfalls supportfartyg med vilket det var möjligt att med god precision placera undervattensenheten ungefär 8 m från pelarens ytterkant. Landenheten och den trådlösa tekniken monterades i respektive strax utanför containern. Den treaxliga trådlösa accelerometern monterades i direktkontakt med kraftverkets pelare med hjälp av ett kraftigt skruvförband. Vindkraftverket stod vid monteringen stilla, vilket gav tillfälle att mäta bakgrundsfältet samt att mäta partikelrörelser vid uppstart av

kraftverket. Sensorn med de seismiska accelerometrarna placerades ut med hjälp av dykare, som med måttband mätte in avståndet från pelaren till sensorn med en noggrannhet bättre än 1 dm (vid 1, 5 och 10 m avstånd) medan vid 0,2 m avstånd var avståndsnoggrannheten 1 cm. Sensorn placerades nordost om kraftverket för att undvika interferens från de elektriska kraftledningarna som låg förlagda på kraftverkets västra sida. Vid samtliga försök var sensorn placerad 0,37 m över botten. I början av försöksperioden genomfördes mätningar där avståndet mellan sensorn och tornet varierades. Sensorn placerades sedan 1 m från tornet och fortsatta mätningar, initierade från hemmabasen, genomfördes för att registrera nivåer under olika vindstyrkor. Under mätperioden var vindriktningen i huvudsak västlig med en vindstyrka under mättillfällena som varierade mellan 0–12 m/s. I studieområdet noterades en termoklin som låg på 10–15 m djup. Salthalten i ytvattnet var 6,8 psu och temperaturen varierade mellan 13,2–18,4 °C. Vid 20 m djup var salthalten 7,1 psu och temperaturen varierade mellan 6,3–8,1 °C (KalmarWeb 2008). Försöken pågick till och med 14 september, 2007 varefter systemet bärgades.

5 Resultat

5.1 Tornvibrationer

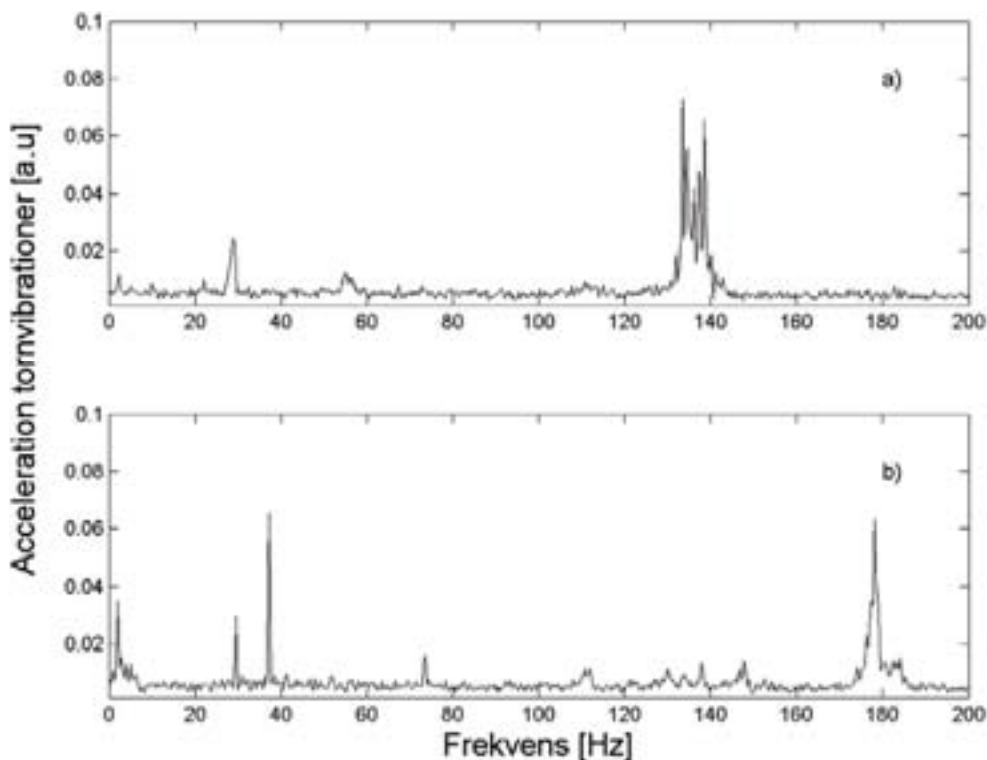
Den treaxliga trådlösa accelerometern monterades 1 m över plattformens golv (ungefär 9 m över vattenytan) på en utstickande klack svetsad på tornet. Sensorns huvudaxlar var riktade transversellt, radiellt och axiellt relativt tornets huvudaxlar. I tornets frekvensspektrum framträder tre toner vars frekvenser var korrelerade med vindstyrkan. Vid höga vindstyrkor (~12 m/s) återfinns tonerna vid 29,5 Hz, 37,2 Hz och 178 Hz medan vid låga (~6 m/s) vid 22,5 Hz, 28,5 Hz och 137 Hz, i överensstämmelse med Ingemanssons studie (Lindell 2003). Hädanefter kommer benämningen första, andra och tredje tonen att användas i rapporten. I spektrum återfinns även övertoner men de är svagare än grundtonerna. Analysen visar att tonerna glider i frekvens och mest tydligt är fenomenet för den tredje tonen som under fyra minuter observerades glida 8 Hz (se figur 2). Effekten blir att tonen ”sprids ut” i ett frekvensområde och amplituden blir skenbart lägre. Analysen visar att den andra tonen består av två toner, separerade med ungefär 1 Hz. Vid låg spektral upplösning eller vid användande av 1/3-oktavband är det inte möjligt att särskilja tonerna, men från en tid-frekvensanalys (jämför med figur 5) framgick det att tonerna existerar samtidigt.

Rotorbladen inducerar starka vibrationer i intervallet 1 till 6 Hz med maximal energi vid 2 Hz för en vindstyrka av 12 m/s (se panel b i figur 2). Amplituden för de bladinducerade tornvibrationerna var starkast i vindens riktning och axiellt medan de var svagare tvärs mot vindriktningen. Analysen visar att de bladinducerade vibrationerna ökar med ökande vindstyrka.

5.2 Bakgrundsljud

För att testa systemet utsattes sensorn för minsta möjliga påverkan i en skyddad laboriemiljö. I en jämförelse mellan laborie- och bakgrundsmätning utförd i vatten vid ett stillastående kraftverk, ses bruset för laboriemätningen vara lägre än bakgrundsmätningen i tre frekvensintervall (0–6 Hz, 55–70 Hz samt för frekvenser högre än 100 Hz, se figur 3). Den förhöjning som observerades i de kompletterande intervallen var med största säkerhet resultatet av rörelser i laboriemiljön. Enligt tillverkaren skall sensorernas brusnivå ligga vid $0,3 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ vid 0,1 Hz, $0,06 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ vid 1 Hz och $0,03 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ vid 10 Hz. De värden som observerades i de ovan angivna intervallen överensstämmer med tillverkarens minimivärden.

En spektral analys av bakgrundsdata visar att brusgolvet låg mellan 10^{-6} – 10^{-5} m/s^2 per $\sqrt{\text{Hz}}$. Med vindkraftverket i drift erhöles istället ett uppmätt brusgolv som låg en faktor 100 högre (se figur 3). Denna observation visar att det är partikelrörelser i vattenmassan, genererade av vindkraftverket, som ger upphov till



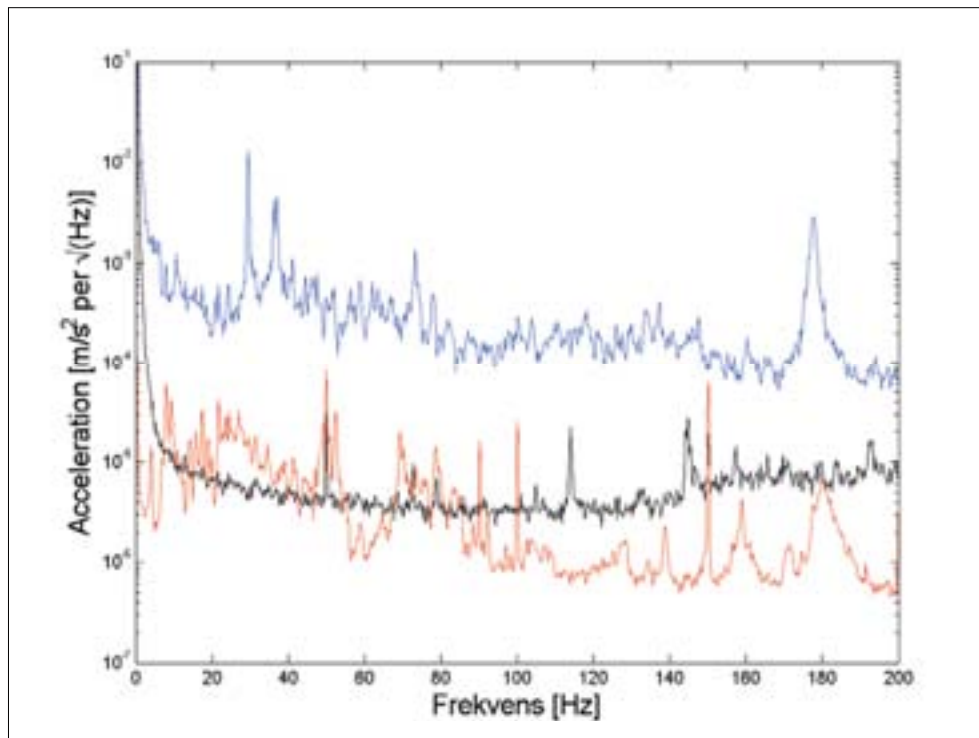
Figur 2. Vibrationsspektrum uppmätt på tornet. Bladinducerade vibrationer ökar i styrka med ökande vind. Den högre tonen i båda panelerna glider i frekvens. (a) Vindstyrkan var 6 m/s. (b) Vindstyrkan var 12 m/s. Amplitudspektrum beräknades med 4 sekunders blocklängder. Samplingshastigheten var 2 048 Hz.

signalen. En viktig observation är att skillnaden mellan de två amplitudspektra minskar för de lägre frekvenserna. Denna effekt förklaras med att ytvågornas inverkan ökar med minskande frekvens för att slutligen dominera spektrum för frekvenser lägre än 2 Hz.

Det är således möjligt att dra slutsatsen att bakgrundsdata har sin källa i både akustiska ljud (för frekvenser högre än 2 Hz) och vattenrörelser inducerade av t ex. strömmar och vågor (för frekvenser lägre än 2 Hz). I bakgrunds- och laboriemätningen observerades två toner vid 50 och 150 Hz. Dessa har sitt ursprung i elektronisk interferens och är därmed inte en effekt av partikelrörelser. Eftersom de var relativt svaga påverkar de inte analysen.

5.3 Analys av partikelrörelser

Under mätperioden uppmättes partikelaccelerationen under varierande vindhastigheter och olika avstånd. Vindriktningen var i stort sätt västlig under hela mätkampanjen. Sensorn placerades ut av en dykare som under försöken riktade in en och samma accelerometer mot tornets centrum (radiella komponenten), den andra riktades tvärs (tangentiella komponenten) och den tredje riktades vertikalt (axiella komponenten). I analysen används mätdata för den radiellt riktade accelerometern. Mätdata från den tangentiella uppvisade samma spektrala utseende som den radiella.



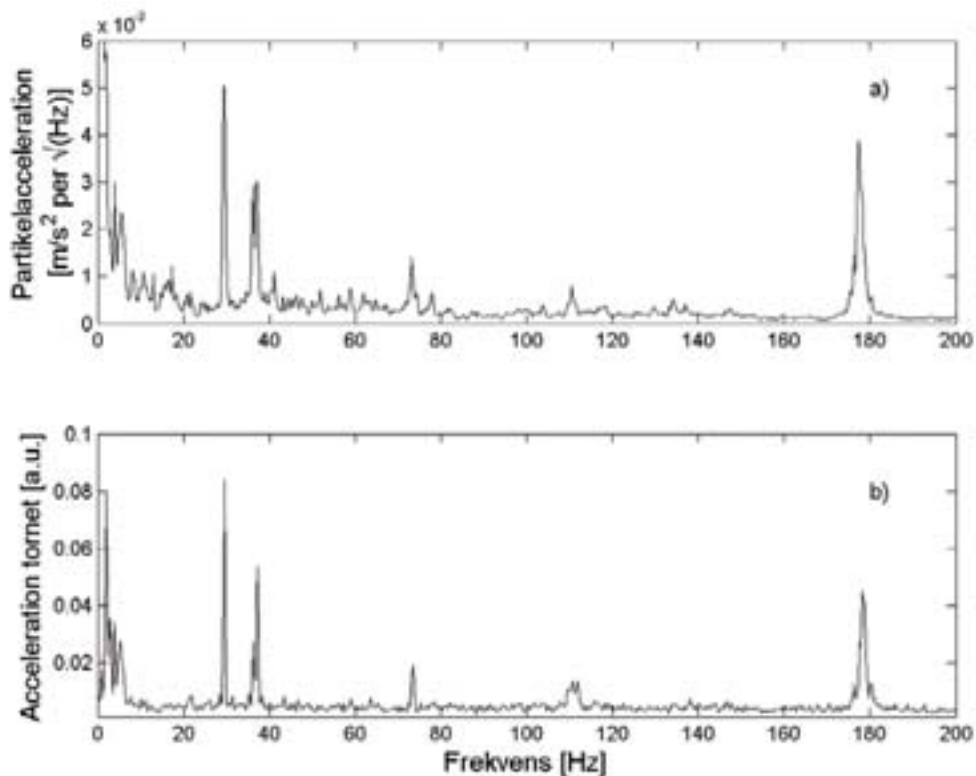
Figur 3. Uppmätt partikelacceleration. Blå kurva för 12 m/s vindstyrka med vindkraftverket i drift, svart för avslaget vindkraftverk och röd uppmätt i laboratoriemiljö. Vid låga frekvenser domineras spektrum av våginducerade rörelser. Samplingshastigheten var 800 Hz och blocklängden vid beräkning av energispektrum var 5,12 s. I den svarta kurvan noteras en uppgång vid ungefär 120 Hz. Denna effekt har sitt ursprung i det omgivande akustiska havsbruset.

Signaler från den axiella komponenten användes inte i analysen eftersom det inte går att utesluta att den påverkades av den akustiska kopplingen till botten som uppstår på grund av sfären, kabeln och tyngden.

I följande studie används spektrala effekttätheter, givna i enheten $(m/s^2)^2$ per Hz, och ur dessa beräknades amplitudspektrum i enheten (m/s^2) per \sqrt{Hz} genom att dra roten ur den frekvensintegrerade effekttätheten. Amplituden för en specifik ton erhöles genom att dra roten ur den yta som tonen upptar i effektspektrum, medan för ett frekvensintervall erhöles amplituden genom att dra roten ur den integrerade effekttätheten beräknad över intervallet. Fördelen med att använda effekttätheter är att det är möjligt att bibehålla en hög spektral upplösning, i motsats till oktavband som tenderar att radera ut finstrukturerna.

5.3.1 Jämförelse mellan tornvibrationer och partikelrörelser i vattnet

Tornvibrationerna och uppmätt partikelacceleration i vattenmassan uppvisar samma spektrala karaktär. Det är där igenom möjligt att med stor säkerhet fastställa att de toner som observerades i vattenmassan har sin källa i tornets vibrationer (se figur 4).

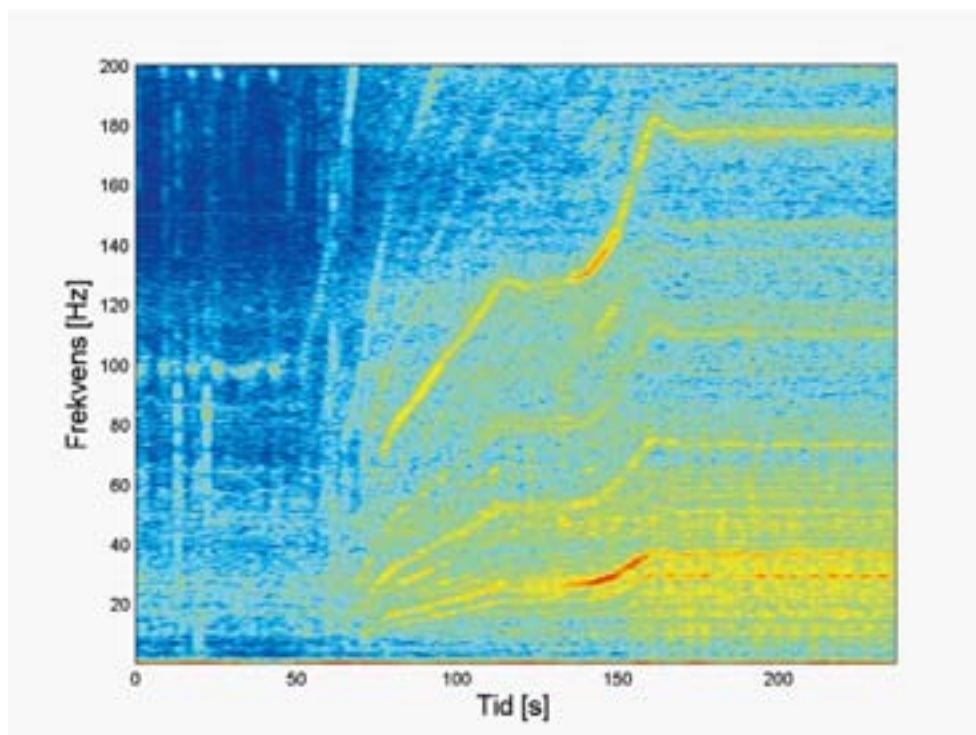


Figur 4. Tornvibrationer och partikelacceleration vid 12 m/s. (a) Uppmätt partikelacceleration i vattnet. (b) Vibrationer uppmätta på tornet. Samplingshastigheten var 800 Hz och blocklängden vid beräkning av partikelaccelerationens energispektrum var 5,12 s. Vid beräkning av tornets energispektrum var samplingshastigheten var 2 048 Hz och blocklängden vid beräkning av energispektrum 4 s.

Denna slutsats gäller inte för det infrasoniska ljudintervallet (lägre än 20 Hz), för vilket tornets accelerationsspektrum domineras av rotorbladens rörelser mellan 2 Hz och 6 Hz, medan partikelaccelerationen i vattnet domineras av vågrörelser för frekvenser lägre än 2 Hz. Observationen indikerar att de blad-inducerade rörelserna inte tar sig ut i vattnet och sålunda ger de inte upphov till partikelrörelser i vattenmassan.

5.3.2 Partikelrörelser vid uppstart av ett vindkraftverk

Under försöken uppmättes partikelaccelerationen i vattnet vid uppstart av vindkraftverket. Resultaten presenteras i figur 5 med hjälp av ett tid-frekvensdiagram, i vilket tonernas frekvens kan följas i tiden. Under försöket startades vindkraftverket ungefär en minut in i dataserien. Därefter ses tonernas frekvens både öka med ökande varvtal och sprida sig över ett större frekvensintervall. Det noteras även att maximal ljudstyrka uppnåddes när den lägre tonen låg mellan 27 Hz och 37 Hz och den högre mellan 129 Hz och 145 Hz. Detta resultat indikerar att maximal ljudstyrka alstras vid vindhastigheter lägre än 11 m/s.



Figur 5. Tid-frekvensdiagram med vindkraftverket startat vid 65 sekunder. Vid mättillfället var vindhastigheten 11 m/s. Samplingshastigheten var 800 Hz och blocklängden vid beräkning av partikelaccelerationens energispektrum var 1,28 s.

5.3.3 Partikelrörelsens beroende av vindstyrkan

Den tidigare analysen visade att tonerna i vattnet var korrelerade med uppmätta tornvibrationer samt att ljudtonerna i vattnet både glider under kortare tidsintervall och ser ut att flytta sig mellan de olika mätningarna. Den senare observationen kan relateras till de frekvensglidningarna som observerades vid uppstart av vindkraftverket (se figur 5). Två grupper av toner urskiljs i tid-frekvensdiagrammet. I den första återfinns två till tre stycken toner centrerade kring 30 Hz och i den andra en ton som ligger över 100 Hz. Förutom tonen vid 29 Hz överensstämmer mätresultaten med Ingemanssons studie (Lindell 2003). I deras mätning var dock den spektrala upplösningen lägre och det är möjligt att 29,5 Hz och 36,5 Hz inte kunde särskiljas, dessutom var en annan typ av växellåda i bruk vid mätningen. Vindstyrkor och uppmätta toner från denna studie är sammanställda i tabell 1. Den första tonen (runt 29 Hz) är normalt sätt starkast vid låga vindstyrkor medan den tredje dominerar för höga vindstyrkor. Det kan noteras att ju högre vindstyrka desto högre frekvenser har tonerna, i överensstämmelse med observationen vid uppstart av kraftverket (se figur 5).

Tabell 1. Toner uppmätta i vattnet vid olika vindstyrkor. Värdena i parenteserna anger inbördes amplitudstyrka för respektive vindstyrka. En etta markerar ton med starkast amplitud en två näst starkast osv.

Vindstyrka/Toner	5,5 m/s	6 m/s	8 m/s	11 m/s	12 m/s
Fjärde tonen		23,5Hz (4)			
Första tonen	16Hz (1)	29Hz (1)	29Hz (2)	29,5Hz (2)	29,5Hz (2)
Andra tonen	25,5Hz (2)	34Hz (3)	36,5Hz (1)	36,5Hz (3)	36,5Hz (3)
Tredje tonen	125Hz (3)	141,5Hz (2)	176Hz (3)	178Hz (1)	178Hz (1)

För att bestämma tonernas ljudstyrka bestämdes amplituderna för respektive ton (se tabell 1 och tabell 2). Det kan noteras att amplituder i rapporten är genomgående givna som halva topp-till-toppvärdet om inte annat anges. Högsta registrerade partikelacceleration vid 1 m avstånd uppmättes till 0,012 m/s² och uppnåddes under svaga vindförhållanden. Överlag observerades att tonerna är starkast vid låga vindstyrkor. Tonglidningen är påtaglig för den tredje tonen som vid den lägre vindstyrkan (6 m/s) låg vid 141,5 Hz och vid den högre (12 m/s) låg vid 178 Hz (se figur 6).

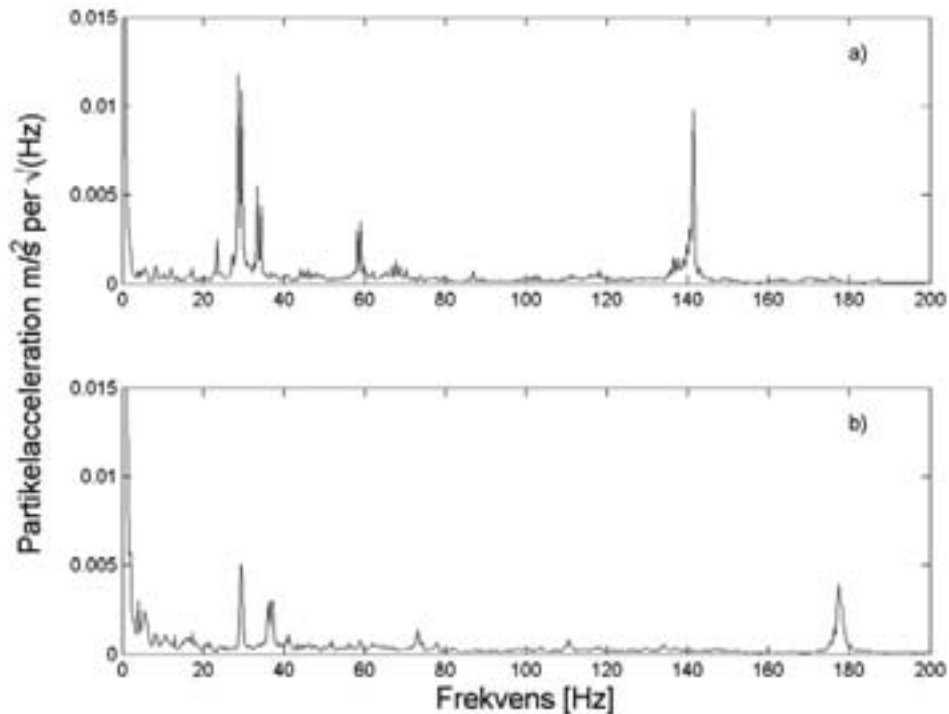
Tabell 2. Observerade amplituder (m/s²) för partikelaccelerationen i vatten. Sensorn var placerad 1 m från tornet. För tonernas frekvens se tabell 1.

Vindstyrka/ Amplitud	5,5 m/s	6 m/s	8 m/s	11 m/s	12 m/s
Fjärde tonen		0,0026			
Första tonen	0,0123	0,0094	0,0050	0,0036	0,0040
Andra tonen	0,0090	0,0042	0,0070	0,0025	0,0034
Tredje tonen	0,0088	0,0074	0,0043	0,0041	0,0042

Från analysen kan slutsatsen dras att fiskar utsätts för flera toner samtidigt samt att energin för tonerna ”flyttar” sig mellan olika frekvenser vid förändrad vindstyrka. Studier på fisk har visat att hörselintervallet täcker in de toner som observerats i dessa försök (Popper et al. 2003). Detta innebär att fiskar utsätts för den kombinerade effekten av flera toner samtidigt. I den fortsatta analysen kan därmed effekten av varje ton studeras eller den kombinerade effekten genom att beräkna den frekvensintegrerade effekten av partikelaccelerationen av ljudet. Här bör en viss aktsamhet iaktas. Fiskars hörsel skiljer sig beroende på frekvens och art (Popper et al. 2003). I den inledande diskussionen underströks att fiskar i huvudsak reagerar för partikelacceleration i det infrasoniska ljudintervallet medan detektion i det soniska intervallet beror på fiskens anatomi. Av denna anledning anges även ljudets amplitud i tabell 3 för frekvensintervallet 2–20 Hz.

Från den spektrala analysen kan det konstateras att samtliga toner ligger normalt ovanför det infrasoniska ljudintervallet. Dessutom visade analysen att tonernas relativa styrka och frekvenser varierar med vindstyrkan. Eftersom det inte är känt hur tonernas energifördelning är relaterad till vindhastigheten ger en summering av effektspektrum för tonerna en god uppskattning på den totala ljudeffekten som vindkraftverken alstrar (summan av tonernas amplitud ges i tabell 3). För att kunna avgöra om tonerna står för merparten av ljudet

beräknades även den frekvensintegrerade amplituden i intervallet 2–200 Hz. Resultaten presenteras i tabell 3.



Figur 6. Partikelaccelerationen 1 m från kraftverket. (a) Vid en vindstyrka av 6 m/s vindstyrka. (b) Vid en vindstyrka av 12 m/s vindstyrka. Samtliga toner är starkare vid låga vindstyrkor. Starkast är tonen vid 29 Hz i övre panelen. Den undre gruppen har flyttat sig några Hertz uppåt medan den övre har flyttat sig från 141,5 till 178 Hz. Samplingshastigheten var 800 Hz och blocklängden vid beräkning av partikelaccelerationens energispektrum var 5,12 s.

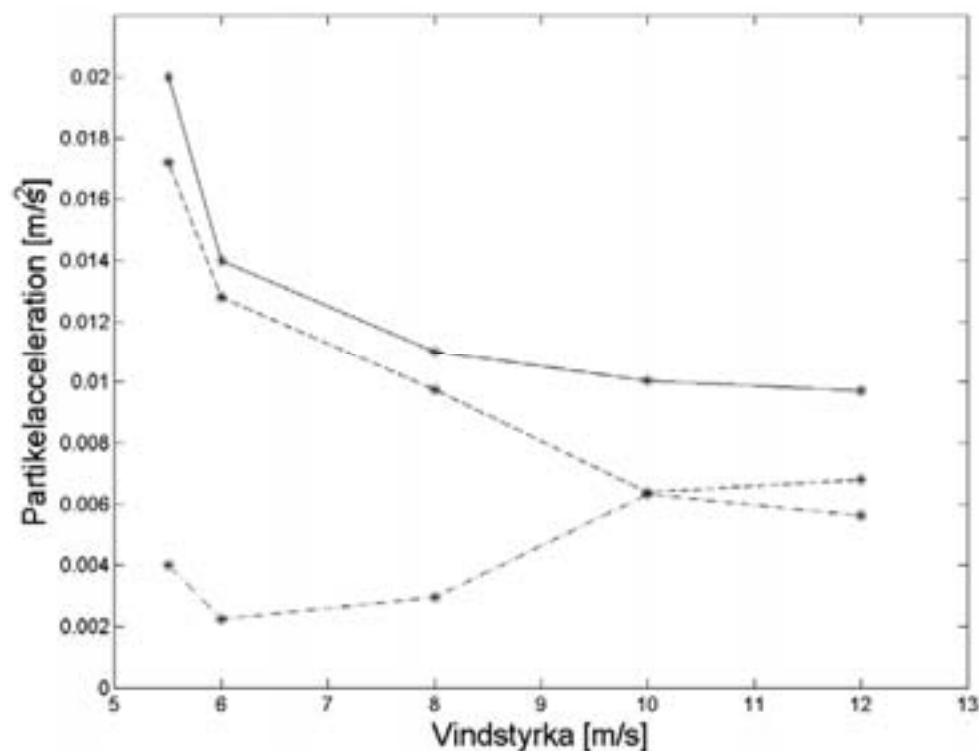
Som framgår i tabell 3 uppnås högsta partikelaccelerationer vid låga vindstyrkor. Detta gäller för både hela frekvensintervallet och också för summan av tonerna. Trenden för tonerna är att den summerade styrkan faller med ökande vindstyrka (se figur 7) för att nå ett konstant värde vid 10 m/s. Däremot gäller inte detta förhållande för det infrasoniska ljudintervallet för vilket den svaga ökningen av det infrasoniska ljudet som observerades kan bero på ett ökande bidrag från våggenererade rörelser. Dessa utsagor bekräftas av observationerna som presenteras i figur 8, i vilken det framgår att det infrasoniska ljuden avtar med ökande avstånd. Den enda förklaringen till hands är att vindkraftverket alstrar ljudet för låga vindstyrkor.

Tabell 3. Frekvensintegrerade amplituder (m/s ²) för olika vindstyrkor uppmätt 1 m från tornet.					
Vindstyrka	5,5 m/s	6 m/s	8 m/s	11 m/s	12 m/s
Summering av toner i tabell 1.	0,017	0,013	0,010	0,0064	0,0068
Integration av spektrum (> 2Hz)	0,020	0,014	0,011	0,010	0,0097
Integration av spektrum mellan 2–20 Hz	0,0040	0,0022	0,0030	0,0063	0,0056

5.3.4 Partikelrörelsens beroende av avståndet från vindkraftverket

Vid försöken genomfördes mätningar av partikelaccelerationen vid avstånden 0,2 1, 5 och 10 m mätt från tornets ytterkant. Under försöket varierade vindhastigheten mellan 5 och 6,5 m/s. Ur effekttätheterna beräknades amplituder för intervallet 2–200 Hz och 2–20 Hz för de uppmätta avstånden. Resultaten visar att amplituderna minskar med ökande avstånd samt att spektra domineras av tonerna (se figur 8 och 9 samt tabell 4). Vid 10 m avstånd ligger brusgolvet en faktor 10 högre jämfört med uppmätta värden för ett stillastående kraftverk. Därmed kan slutsatsen dras att partikelaccelerationen för samtliga avstånd har sin källa i vindkraftverket.

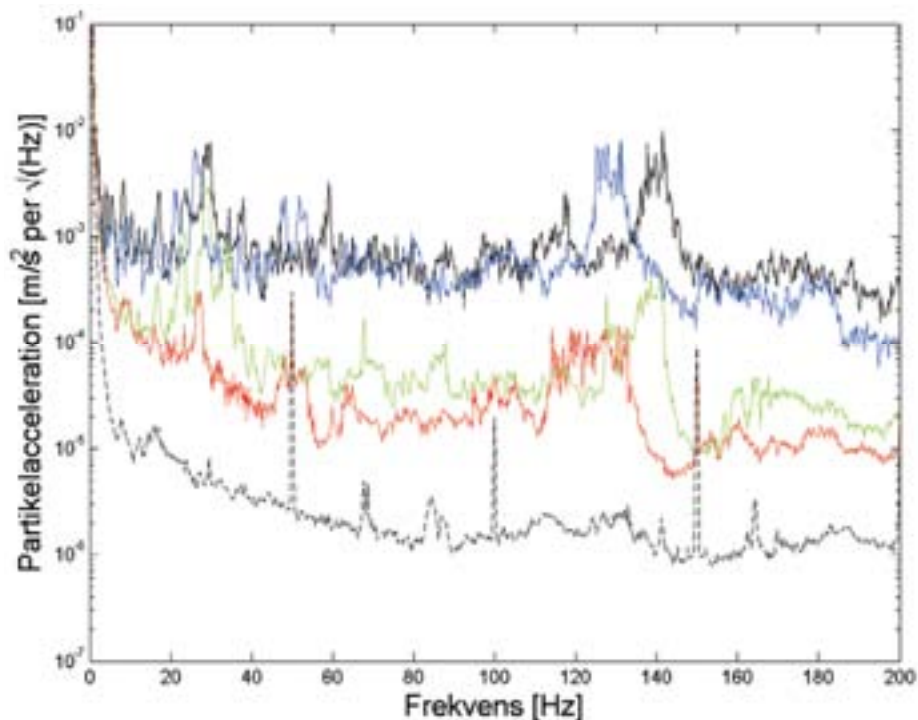
Tabell 4. Observerade amplituder (m/s ²) för intervallet 2–20 Hz och 2–200 Hz för olika avstånd.					
Avstånd	0,2 m	1 m	5 m	10 m	bakgrund
Amplitud 2–20 Hz	0,010	0,0040	0,0021	0,0018	0,0003
Amplitud 2–200 Hz	0,020	0,018	0,0045	0,0019	0,0003



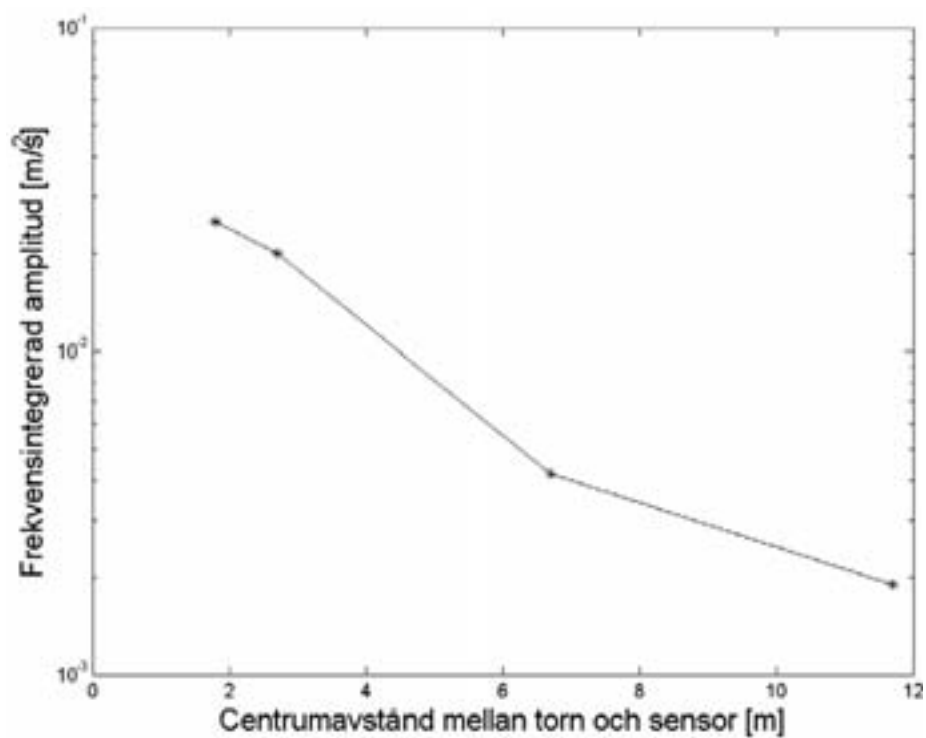
Figur 7. Partikelaccelerationens beroende på vindstyrkan. Den heldragna kurvan visar den frekvensintegrerade amplituden för intervallet 2–200 Hz, medan den streckade visar summan av tonernas amplitud. Den punkt-streckade kurvan visar den frekvensintegrerade amplituden för det infrasoniska ljudintervallet, 2–20 Hz. Samtliga mätningar var utförda vid 1 m avstånd från tornets ytterkant.

Vidare kan noteras att vid 5 m avstånd är tonernas styrka jämförbara med brusgolvet nivå vid 1 m avstånd. Återigen noteras att skillnaden i nivåer minskar för de lägre frekvenserna (mindre än 2 Hz). För frekvenser lägre än 0,6 Hz har amplituderna för de olika avstånden ungefär samma styrka. Effekten har som tidigare diskuterats, sin förklaring i ytvågorna. Mätningen utförd i laboriemiljö visar att amplituden vid 0,6 Hz är 10 000 gånger svagare än mätningarna vid vindkraftverket (se figur 3). Denna observation styrker antagandet att amplitudökningarna vid låga frekvenser var inducerade av vattenrörelser och därmed är det möjligt att utesluta att effekten var en artefakt av instrumentet. På samma sätt uppvisar de frekvensintegrerade amplituderna för intervallet 2–20 Hz samma avståndsberoende (se tabell 4). Den uppmätta nivån vid 0,2 m avstånd ger ett värde som kan användas för att uppskatta ljudets effekt på fiskar, t.ex. gobider (smörbultar m.fl.), som observerats i tornets omedelbara närhet.

Slutligen kan ett approximativt uttryck för avståndsberoendet beräknas genom att anpassa uppmätta data till ett antaget radiellt avtagande. En anpassning till kurvan i figur 9 (för intervallet 2–200 Hz) visar att amplitudens beroende av avstånden ges som $r^{-1,4}$, där r är avståndet mellan tornets mittaxel och sensorns mittpunkt. Detta förhållande kan jämföras med sfärisk vågutbredning av partikelaccelerationen, vilken avtar som r^{-3} i närfältet och som r^{-1} i fjärrfältet.



Figur 8. Spektra för olika avstånd samt bakgrundsljud. Svart kurva visar de spektra för 0,2 m, blå kurva för 1 m, grön kurva för 5 m och röd kurva för 10 m avstånd. Vindhastigheten varierade mellan 5 och 6,5 m/s. Den streckad svarta kurvan visar spektrum för avslaget vindkraftverk under vindstilla förhållanden. Samplingshastigheten var 800 Hz och blocklängden vid beräkning av partikelaccelerationens energispektrum var 5,12 s.



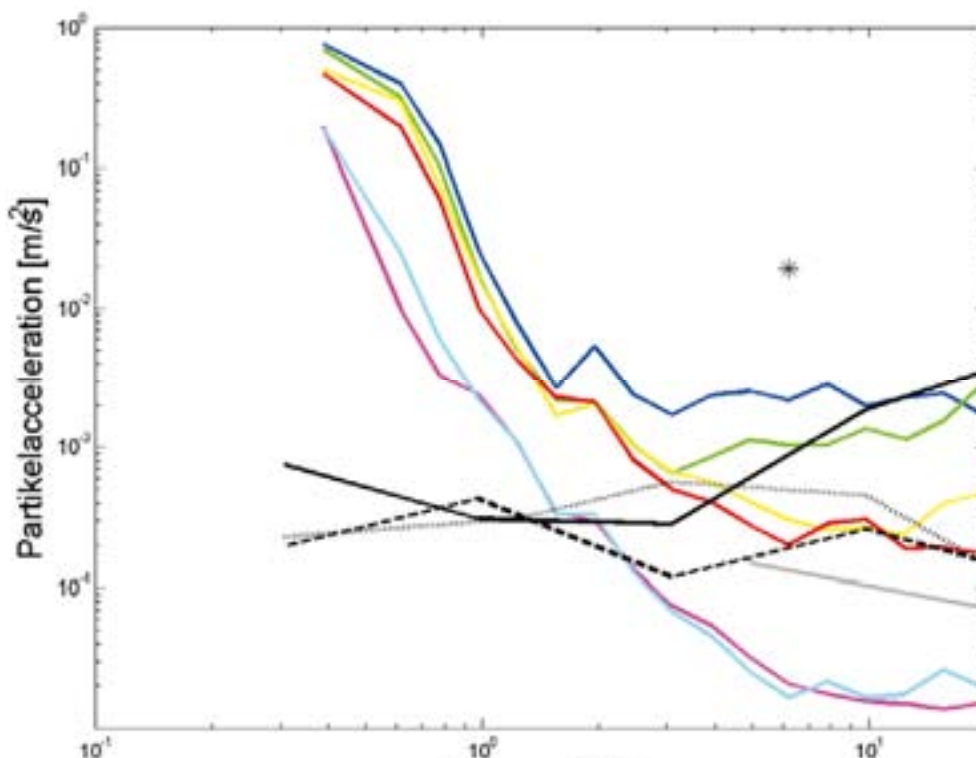
Figur 9. Avståndsberoendet för de frekvensintegrerade amplituderna för intervallet 2–200 Hz. Notera att avståndet är här definierat som längden mellan tornets mittaxel och sensors centrum.

6 Fisk och reaktion för partikelrörelser

Det finns få studier som undersökt effekten av höga nivåer av partikelrörelse på fiskar i nordiska vatten (Wahlberg och Westerberg 2005). Det är dock etablerat att fiskar kan känna av låga nivåer av partikelacceleration och att det är både inneröröronen och sidolinjesystemet som registrerar partikelacceleration i form av vattenrörelse (Bleckmann 1993). För att testa om det är inneröröronen som fiskarna använder för att registrera infraljud och inte sidolinjesystemet kan man tillföra koboltjoner till vattnet, vilka slår ut sidolinjesystemet med följden att den reaktion som registreras beror endast på att inneröröronen stimuleras (Sand och Karlsen 1986). Detta förfarande användes i en studie där abborrars (*Perca fluviatilis*) känslighet för lågfrekventa toner (0,1; 0,3; 1; 3; 10 och 30 Hz) undersöktes (Karlsen 1992a). De lågfrekventa tonerna producerades av två vibratorer kopplad till gummimembran via en pistong, placerade på var sida av ett aluminium rör, var i fisken var placerad. Denna uppställning får hela vattenmassan inuti aluminiumröret att vibrera med en bestämd frekvens. För att verifiera om fisken känner av partikelrörelserna analyserades fiskarnas hjärtslagsfrekvens (metod beskriven i detalj i Chapman och Hawkins, 1973). Resultatet visade att känsligheten för infraljud inte påverkades när sidolinjesystemet blockerades. Karlsen (1992b) föreslog därför att abborren endast använder inneröröronen för registrering av infraljud.

I studier där samma eller likartade ljudproducerande system användes har känslighet för partikelacceleration hos torsk (*Gadus morhua*) (Sand och Karlsen 1986) och rödspotta (*Pleuronectes platessa*) (Karlsen 1992b) observerats. Audiogram för dessa fiskar och lax (*Salmo salar*) presenteras i figur 10 tillsammans med resultaten av mätningarna från denna studie.

I ett par beteendestudier har fisk utsatts för höga nivåer av partikelacceleration samtidigt som deras reaktion på det inducerade ljudet registrerats. I både laborieförsök och i ett fältförsök använde Sand et al. (2000) en ljudgenerator som producerade en lågfrekvent ton (11,8 Hz) med hjälp av ett elektriskt drivet pistongsystem. Studiens mål var att utveckla en infrasonisk barriär för att hindra fisk från att ta sig in i olika vattensystem, som t.ex. kylsystem för elverk och andra vattenledningar där fiskar inte är önskvärda. De lyckades generera en partikelacceleration på $0,01 \text{ m/s}^2$ (rms) på 3 meters håll. I ett laborieförsök där vildfångade ålar (*Anguilla anguilla*) placerades i en betongbasäng på $4 \times 3,5 \times 1,5$ m, noterades en kraftig reaktion när de utsattes för denna ljudsignal. Forskarna noterade ingen habituering (tillvänjning) till ljudet trots att försöket upprepades under flera dagar. Samma ljudkälla placerades sedan i en norsk flodmynning där ålarna vandrar förbi en smal passage, på väg till havet. Vid flodmynningen fanns en Wolf fälla (för detaljer se Sand et al. 2000) där vandrande ålar kunde fångas i fyra fack. Ljudkällan placerades vid ett av dessa fack. Detta resulterade i att antalet fångade ålar in denna sektion minskade signifikant och en nästan lika stor ökning noterades i de övriga tre facken. Bakgrundsljudet under försöken uppmättes



Figur 10. 1/3-oktavbands spektra av accelerationsmätningarna från vindkraftverket i denna studie jämförda med detektionskurvor för acceleration hos några vanliga fiskarter. Svarta och grå linjer visar tröskelvärden för torsk, abborre, rödspotta och lax. Data är hämtad ifrån Wahlberg & Westerberg 2005. De färgade linjerna visar uppmätta partikelaccelerationer från Utgrundens vindkraftverk i Östersjön vid olika avstånd från fundamentet. Blå kurva markerar: 0,2 m, grön: 1 m, gul: 5 m och röd 10 m avstånd. Lila markerar bakgrunds ljud uppmätt utanför Utgrundens fyr och magenta markerar bakgrunds ljudet uppmätt vid vindkraftverket. Helden svart kurva markerar hörseltröskel för: Abborre, streckad: Rödspotta, punktmarkerad: Torsk och grå: Lax. Stjärnan markerar ljudnivån för C-respons från mört (Karlsen et al. 2004).

till $4 \cdot 10^{-3}$ – $8 \cdot 10^{-3}$ m/s^2 (motsvarande rms för 1-oktavband centrerat på 12 Hz). Samma författare gjorde tidigare liknande försök (med något högre frekvenser) på lax (egentligen smolt) som reagerade kraftigt och simmade åt motsatta hållet när de utsattes för höga nivåer av partikelacceleration (Knudsen et al. 1992). Sammantaget hävdar författarna att infraljud fungerar som en akustisk barriär för att hindra fisk från att ta sig in i vattensystem där de inte är önskvärda.

I en studie med mört (*R. rutilus*) studerades reaktionerna på vattenrörelser genererade av en predator (Karlsen et al. 2004). Vildfångad mört placerades i ett genomskinligt akvarium och en vibrator, placerad på sidan av akvariet, genererade vibrationer med frekvensen 6,7 Hz. Bakgrundsvibrationer uppmättes till mindre än 10^{-6} m/s^2 (mellan 0,1–200 Hz). Tröskelvärdet för en reaktion hos mörtarna noterades till en partikelacceleration på $0,023 \pm 0,004$ m/s^2 vid 6,7 Hz (rms). Reaktionen bestod av en så kallad "C-respons", vilket innebär att vissa nervceller (kallade Mauthner celler eller M-celler) stimuleras så att fisken reagerar med ett flyktbeteende. Denna reflex har observerats i åtskilliga undersökningar och är ett väl dokumenterat fenomen (Eaton et al. 1977).

Även i detta försök sattes sidolinjesystemet ur funktion med koboltjoner, vilket fick till följd att fiskarna kolliderade med varandra i akvariet. Författarna sammanfattar i deras studie att mörten använder infraljudet, uppfattat med innerörat, för att upptäcka en predator.

En av de senaste vetenskapliga studierna som publicerats om infraljudets påverkan på fisk behandlar experiment gjorda i en norsk insjö och vid kylvatteninloppet till ett kärnkraftverk (Sonny et al. 2006). Där används en ljudgenerator (modifierad från Sand et al. 2000) som genererar en partikelacceleration på $0,03 \text{ m/s}^2$ (rms) vid 16 Hz och 4 meter från källan. Med hjälp av ekolod undersökte författarna vid vilket avstånd och partikelacceleration som sjöns fiskar skrämdes. Resultaten visade att karpfiskarna mört (*Rutilus rutilus*), löja (*Alburnus alburnus*) och braxen (*Abramis brama*) visade en häftig undanflyende respons 10 meter från källan då partikelacceleration var $0,001 \text{ m/s}^2$. Ingen habituering till störningen noterades under studien men inte heller någon långvarig avskräckande effekt eftersom fiskarna simmade snabbt tillbaka (15–30 s) till området omkring ljudkällan när den var avstängd. Författarna menar att denna ökade känslighet, jämfört med tidigare studier (se Knudsen et al. 1992) för partikelacceleration är att förvänta då de utfördes i en sjö istället för i akvarier. En intressant iakttagelse som gjordes av Sonny et al. (2006), var att enstaka stora fiskar, troligtvis gädda (*Esox lucius*), befann sig under kortare perioder väldigt nära ljudkällan. Detta kan förklaras med att de reagerade på infraljudet som om det fanns bytesdjur där.

Sammantaget visar studier att fisk känner av svaga vattenrörelser (partikelaccelerationer) och att de reagerar på höga nivåer då dessa uppfattas som antingen ett byte eller en annalkande rovfisk. Den starka reflexen som noterats hos flertalet arter vid partikelacceleration i intervallet $0,01\text{--}0,001 \text{ m/s}^2$ indikerar att man kan anta att de flesta fiskar kommer reagera på liknade sätt vid dessa nivåer. Dock är att notera att fiskars reaktioner kan variera mellan årstid, tid på dygnet, livsstadium och beroende på bakgrundsnivåer och strömhastighet. Även fiskarnas födostrategi (rovfisk, betare etc.) kan spela stor roll för vilka risker eller störningar en fisk låter sig utsättas för.

7 Diskussion

I den här studien har partikelaccelerationen utanför ett av vindkraftverken vid Utgrunden uppmätts. I det infrasoniska ljudområdet var det framförallt våg-inducerade rörelser som dominerade (för frekvenser mindre än 2 Hz). Dessa var en faktor 1 000–10 000 gånger högre än de ljudnivåer som genererades av kraftverket. Nivåerna i det infrasoniska intervallet 2–20 Hz varierade mellan 0,0040 och 0,0063 m/s² vid 1 m avstånd från tornets ytterkant. Vid 0,2 m avstånd uppmättes nivån 0,01 m/s² för intervallet 2–20 Hz och 0,02 m/s² för 2–200 Hz.

Vindkraftverk vid Utgrunden alstrar i huvudsak tre toner, samtliga ligger över 20 Hz. Frekvenserna visade sig öka med ökande vindstyrkan. För frekvenser högre än 20 Hz visar resultaten att vindkraftverken alstrar mest ljud vid relativt låga vindstyrkor. Denna observation pekar på att en viktig faktor i sammanhanget är vilka typiska vindförhållanden som råder i området. Enligt miljökonsekvensbeskrivningen för Utgrundens vindkraftspark är årsmedelvinden vid Utgrunden 7,3 m/s. Detta förhållande pekar i sin tur på att vindkraftverken till största del alstrar de högre ljudnivåerna och sålunda bör dessa användas i framtida studier.

Vid uppmätning av partikelaccelerationens avtagande med ökande avstånd framkom det att nivåerna minskar snabbt med ökande avstånd. Vid 5 m har nivåerna sjunkit med en faktor 10 jämfört med 1 m, och vid 10 m med ytterliggare en faktor 3.

I en jämförelse mellan partikelacceleration uppmätta vid vindkraftverket och uppmätta audiogram för torsk, abborre, rödspotta och lax, framgår det att nivåerna är högre än fiskarnas hörseltröskelvärden (se figur 10). För frekvenser högre än 2 Hz är nivån vid kraftverket (0,2 m avstånd) ungefär en faktor 10 gånger högre än tröskelvärdet. Vid 10 m avstånd har amplituden fallit till samma nivå som tröskelvärdet. Detta innebär att dessa fiskarter ”hör” vindkraftverken i ett område som sträcker sig ungefär 10 m ut från kraftverket. De högsta värdena som observerades vid vindkraftverket (0,01 m/s²) är jämförbara med de värden för vilka man noterat beteendereaktion för ål, smolt och mört, men med den skillnaden att det infrasoniska ljudet från kraftverket var bredbandigt medan försöken på fisk gjordes med toner. Det saknas både audiogram och reaktionsstudier för gobider som observerats i vindkraftverkens närhet. Trots detta faktum kan det förväntas att gobider reagerar som andra fiskarter och därmed inte påverkas nämnvärt av de partikelaccelerationsnivåer som vindkraftverken vid Utgrunden genererar.

7.1 Slutsatser

Partikelacceleration i vattenvolymen uppmättes vid ett vindkraftverk vid Utgrundens vindkraftspark. Kraftverkens genererar både toner och bredbandigt brus. Vidare observerades att kraftverket genererade högre nivåer av partikelrörelser i närfältet vid låga jämfört med höga vindstyrkor. Vid kraftverkets omedelbara närhet uppmättes nivåer som ligger över hörseltröskeln för torsk, rödspotta, abborre och lax, dock lägre än de nivåer som gav upphov till beteendeförändringar vid försök med smolt, ål och mört. För den sistnämnda arten noterades ett flyktbeteende vid ljud 3,5 gånger starkare än vad som observerades vid kraftverket (0,2 m avstånd). Vid ungefär 10 m avstånd var nivåerna jämförbara med de ovan angivna fiskarnas hörseltrösklar. Genom jämförelse mellan mätningar på olika fiskarter med uppmätta ljudnivåer (partikelacceleration) kan man dra slutsatsen att de genererade nivåerna av partikelacceleration från vindkraftverken vid Utgrunden inte ger upphov till negativa effekter på fiskar. Trots det faktum att det saknas audiogram och responsstudier på många fiskarter kan det förväntas att denna slutsats gäller för de flesta fiskarter i Östersjön. I studien framkom följande specifika resultat:

- Vindkraftverken alstrar i huvudsak tre toner, samtliga över 20 Hz.
- Tonernas frekvens ökar med ökande vindstyrka.
- Högsta nivåer noterades för låga vindstyrkor (5,5–6 m/s).
- Den frekvensintegrerade partikelaccelerationen i intervallet 2–200 Hz på avståndet 0,2 m från kraftverkets fundament var 0,020 m/s².
- För frekvenser lägre än 2 Hz dominerar de våginducerade ljudrörelserna. I intervallet 2–20 Hz alstrar vindkraftverket ett bredbandigt bakgrundsljud. Den maximala partikelaccelerationen för frekvensintervallet 2–20 Hz på avståndet 0,2 m var 0,010 m/s².
- Partikelaccelerationens styrka minskar med ökande avstånd från fundamentet för att nå nivån 0,001 m/s² på 10 meters avstånd.

8 Referenser

- Andersson, M.H., 2008: Man-made structures as habitat for marine faunal assemblages, Lic. Thesis, Department of Zoology, Stockholm University, ISNN 1403-5227, 2008:14, 75 pp.
- Anon., 2000: Vindkraft till havs; en litteraturstudie av påverkan på djur och växter. Naturvårdsverket, rapport 5139, 55 s.
- Betke, K., M. Schultz-von Glahn, and R. Matuschek, 2004: *Underwater noise emissions from offshore wind turbines*. In: Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04, 591–592, Strasbourg.
- Bleckmann, H., 1993: Role of the lateral-line in fish behaviour. *Behaviour of teleost fishes*, second edition, edited by T. J. Pitcher. Chapman and Hall, London, 201–218.
- Brekhovskikh, L.M., and Y.P. Lysanvov, 2003: *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer Verlag, 304 pp.
- Båmstedt, U., S. Larsson, Å. Stenman, C. Manhagen och P. Sigray, 2008: Effekter av undervattensljud från havsbaserade vindkraftverk på fisk från Bottniska viken. Naturvårdsverket, Rapport 5294, 32 s.
- Chapman, C.J., and A.D. Hawkins, 1973: A Field Study of Hearing in the Cod. *Gadus morhua* L. *J. comp. Physiol.*, **85**, 147–167.
- Deng, U., 2000: Offshore wind turbines – VVM. Underwater noise measurements, analysis and predictions. Ødegaard & Danneskiold-Sansøe A/S, Rep. No. 00-792.
- Eaton, R.C., R.A. Bombardieri, and D.L. Meyer, 1977: The Mauthner-initiated startle response in teleost fish. *J. Exp. Biol.*, **66**, 65–81.
- Fristedt, T., P. Morén, and P. Söderberg, 2001: Acoustic and electromagnetic noise induced by wind mills – implications for underwater surveillance systems, Pilot study. FOI-R—0233—SE, FOI, Swedish Defence Research Agency.
- Hammar, L., A. Wikström, S. Andersson, och R. Rosenberg, 2008a: Miljömässig optimering av fundament för havsbaserad vindkraft. Naturvårdsverket, Rapport 5828, 105 s.
- Hammar, L., A. Wikström, P. Börjesson, och R. Rosenberg, 2008b: Studier på småfisk vid Lillgrund vindpark. Naturvårdsverket, Rapport 5831, 40 s.
- Hansson, S., 2006: Effekter på fisk av marina vindkraftsparker. Naturvårdsverket Rapport 5580, 16 s.
- Hanke, W., C. Brücker, H. Bleckmann, H. 2000: The ageing of the low frequency water disturbances caused by swimming goldfish and its possible relevance to prey detection. *J. Exp. Biol.* **203**, 1193–1200.

- KalmarWeb, citerad 2008: Välkommen till KalmarWeb
– samordnad kustvattenkontroll i Kalmar län. [Tillgänglig online från
<http://www.kalmarlanskustvatten.org/>]. Utgivare: Kustvattenkommitténs kansli
Regionförbundet i Kalmar län.
- Karlsen, H.E., 1992a: Infrasound sensitivity in the Plaice (*Pleuronectes platessa*).
J. Exp. Biol., **171**, 173–187.
- Karlsen, H.E., 1992b: The inner ear is responsible for detection of infrasound
in the perch (*Perca fluviatilis*). *J. Exp. Biol.*, **171**, 163–172.
- Karlsen, H.E., R.P. Piddington, P.S. Enger, and O. Sand, 2004: Infrasound
initiates directional fast-start escape responses in juvenile roach *Rutilus
rutilus*. *J. Exp. Biol.*, **207**, 4185–4193.
- Knudsen, F.R., P.S. Enger, and O. Sand, 1992. Awareness reactions and
avoidance response to sound in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *J. Fish
Biol.*, **40**, 523–534.
- Lindell, H., 2003: *Utgrunden – Havsbaserad vindkraftspark, mätning av
undervattensbuller*. Ingemansson Technology AB, 11-00329-03012700-sv.
- Malm, T., 2006: Hur vindkraft påverkar livet på botten – en studie före
etablering. Naturvårdsverket, Rapport 5570, 24 s.
- Popper, A.N., and R.R. Fay, 1973: Sound detection and processing by teleost
fishes: a critical review. *J. Acoust. Soc. Am.*, **53**, 1515–1529.
- Popper, A.N., R.R. Fay, C. Platt, and O. Sand, 2003: Sound detection
mechanism and capabilities of teleost fishes. *Sensory processing in aquatic
environments*. Collins, S.P. and N.J. Marshall, Springer-Verlag New York, 3–38.
- Sand, O., P.S. Enger, H.E. Karlsen, F. Knudsen, and T. Kvernsuen, 2000:
Avoidance response to infrasound in downstream migrating European silver
eels, (*Anguilla anguilla*). *Environ. Biol. Fishes*, **57**, 327–336.
- Sand, O., and A.D. Hawkins, 1973: Acoustic properties of the cod swim
bladder. *J. Exp. Biol.*, **58**, 797–820.
- Sand, O., and H.E. Karlsen, 1986: Detection of infrasound by the Atlantic
cod. *J. Exp. Biol.*, **125**, 197–204.
- Sand, O., and H.E. Karlsen, 2000: Detection of infrasound and linear
acceleration in fishes. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **355**, 1295–1298.
- Sonny, D., F.R. Knudsen, P.S. Enger, T. Kvernstuen, O. Sand, 2006: Reaction
of cyprinids to infrasound in a lake and at the cooling water inlet of a nuclear
power plant. *J. Fish. Biol.*, **69**, 735–748
- Stokes, G.G., 1851: On the effect of the internal friction of fluids on the
motion of pendulums. *Trans. Camb. Phil. Soc.*, **9**, 8–106.

de Vries, H.L., 1950: The mechanics of the labyrinth otoliths. *Acta Otolaryngol. (Stockholm)* 38, 262–273.

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

Wahlberg, M., and H. Westerberg, 2005: Hearing in fish and their reaction to sounds from offshore wind farms. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 288, 295–309.

Wikström A., och Å. Granmo, 2008: En studie om hur bottenlevande fauna påverkas av ljud från vindkraftverk till havs. Naturvårdsverket, Rapport 5856, 97 s.

Wilhelmsson, D., T. Malm, and M.C., Öhman, 2006: The influence of offshore windpower on demersal fish. *ICES J. Marine Science*, 63 (5), 775–784.

Urick, R.J., *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, 1983 3rd ed., 423 pp.

Partikelrörelser i vatten vid ett vindkraftverk

RAPPORT 5963

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-5963-7
ISSN 0282-7298

Akustisk störning på fisk

Vid planering och prövning av vindkraftanläggningar är det viktigt att på ett riktigt sätt beskriva hur den omgivande miljön kan komma att påverkas. När det gäller vindkraftverk till havs är en av de viktigaste faktorerna att utreda hur ljud och vibrationer som sprids under vattnet uppfattas av fiskar.

I den här rapporten presenteras undersökningar av hur torsk, abborre, rödspotta och lax kan uppfatta den del av ljudet som utgörs av partikelacceleration motsvarande nivåer som uppmätts vid Utgrundens vindkraftpark i Kalmarsund. Kunskapen är användbar vid planering och prövning av vindkraftanläggningar och kan utgöra underlag till exempelvis miljökonsekvensbedömningar.

Kunskapsprogrammet Vindval tar fram och sprider fakta om vindkraftens effekter på människor, djurliv och miljö. Vindval erbjuder medel till forskning och kunskapssammanställningar om miljöeffekter av vindkraftsanläggningar. Vindval styrs av en programkommitté med representanter från centrala myndigheter, länsstyrelser och vindkraftsbranschen.

