

Kunskapssammanställning om infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftsanläggningar: Exponering och hälsoeffekter

Mats E. Nilsson, Gösta Bluhm
Institutet för miljömedicin, Karolinska institutet

Gabriella Eriksson
Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) och Linköpings universitet

Karl Bolin
Marcus Wallenberg Laboratoriet, Kungliga tekniska högskolan

Förord

Naturvårdsverket har uppdragit åt Karolinska institutet, Institutet för miljömedicin (IMM) att göra en sammanställning av kunskapsläget vad gäller exponering och hälsoeffekter av infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftsanläggningar. Arbetet har utförts av docent Mats E. Nilsson (IMM), docent Gösta Bluhm (IMM), doktorand Gabriella Eriksson (IMM, nu vid Linköpings universitet) och Dr. Karl Bolin (KTH). Ebbe Adolfsson har varit kontaktperson vid Naturvårdsverket.

Innehåll

Sammanfattning	2
1. Inledning.....	3
Syfte	3
2. Metod	3
3. Akustik	3
Emission	3
Immision.....	5
Är dBA ett lämpligt mått på vindkraftsbuller?.....	7
4. Perception.....	8
Hörbarhet.....	8
Ljudkaraktär	10
5. Bullerstörning.....	10
6. Sömnstörning	13
7. Andra ohälsoeffekter	14
8. Slutsatser	15
9. Referenser.....	17

Sammanfattning

Det finns ett starkt politiskt och samhälleligt stöd för utbyggnad av vindkraft. Miljöfördelarna på nationell och global nivå är uppenbara. Samtidigt finns farhågor om hälsoeffekter på lokal nivå för boende i verkens närhet. Inte minst har negativa effekter av lågfrekvent ljud och infraljud diskuterats. Syftet med denna litteraturstudie har därför varit att sammanställa forskningslitteraturen om infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftsanläggningar.

Sammanställningen omfattar undersökningar av hur mycket infra- och lågfrekvent ljud som vindkraftverk genererar (emission), nivåer vid bostäder i närheten av vindkraftsanläggningar (immission), samt hälsoeffekter av infra- och lågfrekvent ljudimmission från vindkraft vid bostäder.

Litteratur om infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftverk söktes i databaser för vetenskapliga artiklar och i artiklar från vetenskapliga konferenser. Dessutom har så kallad grå litteratur (myndighetsrapporter, konsultrapporter, och liknande) sökts med hjälp av sökmotor på internet och via kontakt med kollegor och myndigheter.

Följande slutsatser har dragits från genomgången av litteraturen på området:

1. Infraljud (1–20 Hz) från vindkraftverk är inte hörbart på nära håll och än mindre på de avstånd där bostäder är belägna. Det finns inga belägg för att infraljud vid dessa nivåer bidrar till bullerstörning eller har andra hälsoeffekter.
2. Lågfrekvent ljud (20–200 Hz) från moderna vindkraftsverk är ofta hörbart vid gällande riktvärden för bostäder, men vindkraftsbullret har inte större innehåll av lågfrekvent ljud än andra vanliga bullerkällor vid deras riktvärden, till exempel buller från vägtrafik.
3. Större vindkraftverk genererar förhållandevis mer lågfrekvent ljud än mindre vindkraftverk, även med hänsyn taget till total ljudnivå. Med allt större vindkraftsverk kommer därför andelen lågfrekvensljud i vindkraftsbullret att öka något. Förutsatt att riktvärdet utomhus vid bostadens fasad, 40 dBA, och Socialstyrelsens riktvärden för lågfrekvent buller inomhus är uppfyllda är det dock inte troligt att allvarliga störningar till följd av lågfrekvensbuller från vindkraft är att vänta i framtiden.
4. Vindkraftsbuller orsakar bullerstörningar bland boende. Vid nivåer kring 35–40 dBA, det vill säga precis under riktvärdet 40 dBA, uppger 10–20 % av de boende att de är ganska eller mycket störda av vindkraftsbuller. Störningen beror i huvudsak på det pulserande svischande ljud som uppstår när rotorbladen passerar genom luften. Detta ljud är inte lågfrekvent, utan har sin huvudsakliga energi i frekvensområdet 500–1000 Hz.
5. Förutom besvärssupplevelser av buller har inga påtagliga ohälsoeffekter av vindkraftsbuller kunnat påvisas. Samband mellan vindkraftsbuller och självrapporterad sömnstörning har redovisats i vissa studier, medan andra studier inte funnit något sådant samband.
6. Det påstås ibland att infra- och lågfrekvent buller från vindkraft kan medföra risk för allvarliga hälsoeffekter i form av ”vibroakustisk sjukdom”, ”vindkraftssyndrom” eller skadlig infraljudspåverkan på innerörat. En genomgång av det vetenskapliga underlaget visar att dessa påståenden saknar belägg.

1. Inledning

Det finns ett starkt politiskt och samhälleligt stöd för utbyggnad av vindkraft. Miljöfördelarna på nationell och global nivå är uppenbara. Samtidigt finns farhågor om hälsoeffekter på lokal nivå för boende i verkens närhet. Inte minst har negativa effekter av lågfrekvent ljud och infraljud diskuterats. Olika åsikter har framförts, från att infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftverk är försumbart och inte alls påverkar människors hälsa (Leventhall, 2006) till att sådana ljud från vindkraftverk allvarligt kan skada människors hälsa (Pierpont, 2009). Det är därför angeläget att en kritisk sammanställning av forskningsläget genomförs, för att få en samlad bild av hur mycket infra- och lågfrekvent ljud som vindkraftsanläggningar genererar i människors boendemiljö och hur denna exponering kan påverka människors hälsa.

Syfte

Projektets syfte har varit att sammanställa forskningslitteraturen om infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftsanläggningar. Sammanställningen omfattar undersökningar av:

- (1) Hur mycket infra- och lågfrekvent ljud som vindkraftverk genererar (emission) och vilka nivåer som uppstår vid bostäder i närheten av vindkraftsanläggningar, såväl inomhus som utomhus (immission).
- (2) Hälsoeffekter av infra- och lågfrekvent ljudimmission från vindkraft vid bostäder. Med ”hälsoeffekter” menas såväl besvärssupplevelser och sömnstörningar, som eventuell risk för hjärt-kärlsjukdom och andra medicinska effekter.

2. Metod

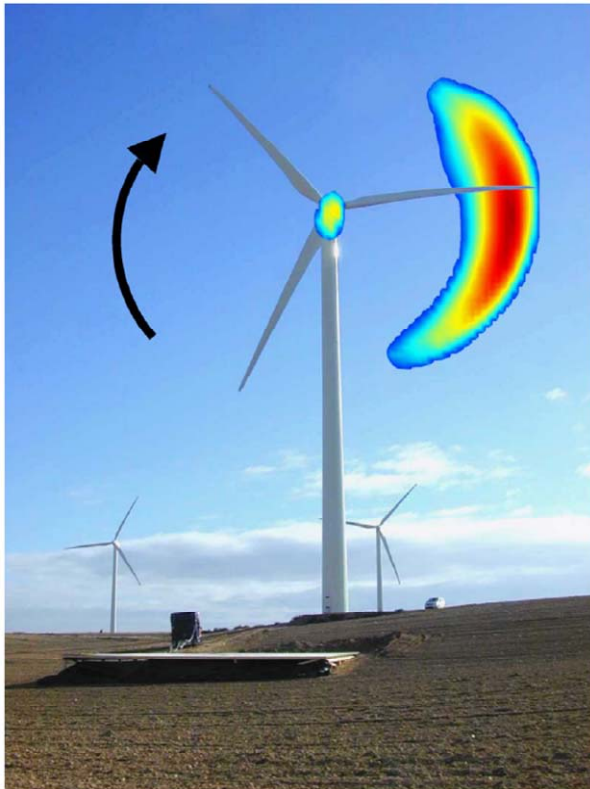
Litteratur om infra- och lågfrekvent ljud från vindkraftverk söktes i databaser för vetenskapliga artiklar (Science Citation Index, PubMed, och PsychInfo) och i artiklar från vetenskapliga konferenser (bland annat Inter Noise och International Meeting on Wind Turbine Noise). Dessutom har så kallad grå litteratur (myndighetsrapporter, konsultrapporter, och liknande) sökts med hjälp av sökmotor på internet och via kontakt med kollegor och myndigheter.

3. Akustik

I denna rapport avser ”infraljud” ljud i frekvensområdet 1–20 Hz och ”lågfrekvent ljud” ljud i området 20–200 Hz. Detta följer gängse definitioner av infra- och lågfrekvent ljud (se t.ex. Berglund, Hassmén, & Job, 1996). Det bör dock påpekas att distinktionen mellan infraljud och lågfrekventljud är godtycklig och inte, som det ibland påstås, en skarp skillnad mellan hörbart och ohörbart ljud. Hörselsinnet kan uppfatta infraljud förutsatt att ljudnivån är tillräckligt hög (se avsnitt 4.1).

Emission

Vindkraftsljud uppstår när rotorbladen passerar genom luften (se figur 1, Oerlemans, Sijtsmaa, & Méndez López, 2007). Lågfrekvent ljud genereras framförallt av inkommande turbulens mot bladen. Turbulens från bladets bakkant (så kallat ”trailing edge noise”) genererar huvudsakligen ljud i frekvensområdet 200–2000 Hz och dominerar det ljud som människor uppfattar. Detta är alltså inte ett lågfrekvensproblem eftersom denna ljudkälla inte nämnvärt bidrar till frekvenser under 200 Hz.



Figur 1. Fotografi och ljudintensitet från en akustisk kamera visas tillsammans. Ljud genereras huvudsakligen på yttre delen av bladet samt till viss del vid rotern. Figur från Oerleman *et al.* (2007)

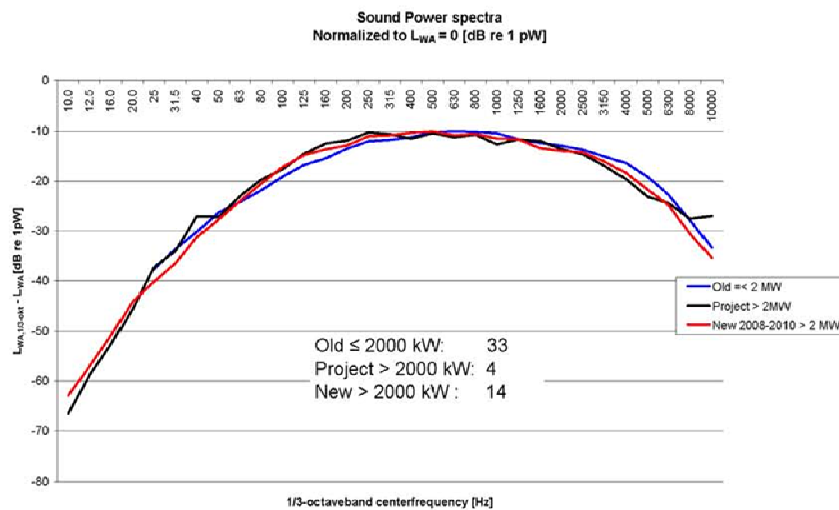
Lågfrekvent ljud genereras av turbulens och tryckfluktuationer vid bladen. Smalbandiga (tonala) ljudkomponenter genereras vid tryckkompressioner när bladet passerar tornet med grundfrekvens i bladpasseringsfrekvensen och övertoner upp till cirka 30 Hz (van den Berg, 2005). Inkommande turbulens orsakar lågfrekvent brus vilket dominerar ljudgenereringen från vindkraftverk i frekvenser med topp vid 10 Hz.

Suboptimala vinklar på bladen leder till ökad turbulens och ökad ljudgenerering. Van den Berg (2005) påpekar att om bladen är uppe (kl. 12) eller nere (kl. 6) kommer attackvinkeln variera och därmed ljudemissionen från bladen. (2005)

Pulserande fluktuationer av ljudet, så kallade amplitudmodulationer, förekommer från vindkraftverk. Mätningar visar dock inga nämnvärda amplitudmodulationer under 200 Hz (van den Berg, 2005). Detta gör det troligt att modulationerna uppkommer av "trailing edge noise" vilket innebär att problem kopplade till amplitudmodulation och lågfrekvensljud bör kunna behandlas oberoende av varandra.

I ett omfattande forskningsprojekt huvudsakligen utfört i Danmark har infra- och lågfrekvent buller från stora verk (>2 MW) jämförts med mindre verk (≤ 2 MW). I projektets slutrapport, som författades av Madsen och T. H. Pedersen (2010), inkluderades resultat från 18 större verk och 33 mindre verk. Dessa mätningar visade på en skillnad mellan små och stora verk, se Figur 2 som visar relativa nivåer av ljud för de mindre verken (blå linje), fyra större

prototyp-turbiner ($> 2\text{ MW}$, svart linje) samt 14 större verk (röd linje). Som framgår av figuren är medelvärdet (vägt med fördelningen av den installerade effekten i Danmark 2010) högre för de större verken i frekvensområdet 63-250 Hz.



Figur 2. Genomsnittliga emissionsspektra för 33 små verk ($\leq 2\text{ MW}$, blå linje), de fyra större prototypverk som ingick i Møller och C.H. Pedersens studie (Møller & Pedersen, 2010) ($> 2\text{ MW}$, svart linje), samt 14 nya mätningar på större verk ($> 2\text{ MW}$, röd linje). Spektra visar relativa ljudnivåer (0 dB = total ljudemission). Figur från Madsen och T.H. Pedersen (2010).

Madsen och T. H. Pedersen (2010) uppskattar att den totala ljudemissionen (A-vägd ljudeffekt, L_{WA}) från vindkraftverk i genomsnitt ökar med 2.9 dB per fördubbling av verkens effekt. Ljudemissionen i frekvensbandet 10-160 Hz beräknas dock att öka med i genomsnitt 3.9 dB (L_{WALF}) det vill säga med 1 dB mer per fördubbling av verkens effekt jämfört med ökningen av den totala ljudemissionen. Madsen och T. H. Pedersen påpekar också att variationen i ljudemission mellan olika typer av vindkraftverk är betydande vilket innebär att andelen lågfrekvent ljudemission från ett litet verk kan vara större än från ett stort verk. De anser därmed att det inte går att dra säkra slutsatser om lågfrekvensinnehåll endast från information om verkens storlek utan att varje nyetablering bör bedömas individuellt genom beräkningar av såväl total ljudnivå som relativ andel lågfrekvent ljud.

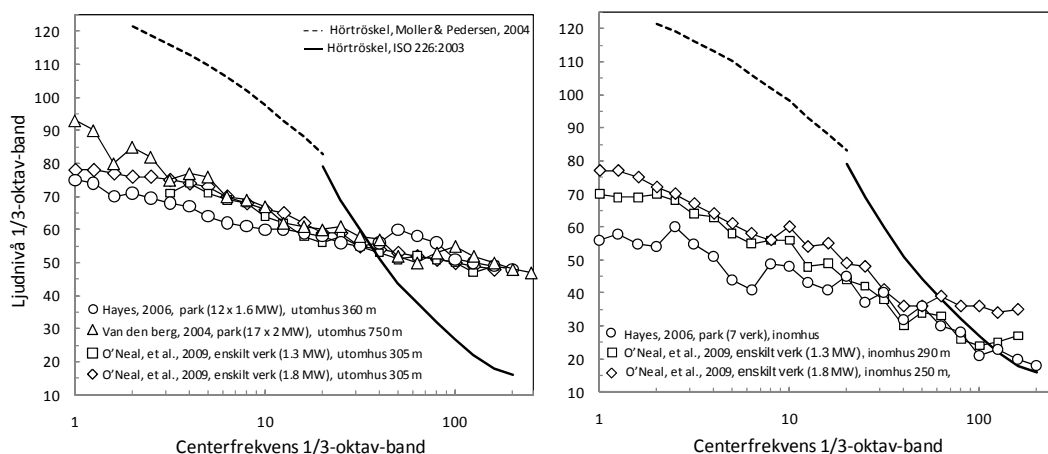
Møller, C. H. Pedersen och S. Pedersen (2011) redovisar en sammanställning i huvudsak baserad på Madsens och T. H. Pedersens data (2010). Resultaten från sammanställningen visar en statistiskt signifikant ökning på 2.2- 4.0 dB i olika tersband av det lågfrekventa ljudet med förskjutning av spektrumet ett tersband nedåt från små till större vindkraftverk. Møller, och medförfattare beräknar även att för det danska riktvärdet 44 dBA vid fasad kan en del boende nära större vindkraftverk utsättas för lågfrekvent buller över det danska riktvärdet för infra- och lågfrekvent buller inomhus kvälls- och nattetid på 20 dBA i frekvensband mellan 10-160 Hz.

Immision

Det råder stor enighet om att de infraljudsnivåer som genereras av moderna vindkraftverk ligger långt under vad som är hörbart (Jakobsen, 2005; Leventhall, 2006; Madsen & Pedersen, 2010; Møller & Pedersen, 2010; O'Neal, Hellweg, & Lampeter, 2011; van den Berg, 2004a). Detta bekräftas av spektra från publicerade mätningar av vindkraftsbuller utomhus och inomhus (Gastmeier & Howe, 2008; Hayes McKenzie Partnership Ltd., 2006; Hepburn, 2006;

O'Neal, Hellweg Jr., & Lampeter, 2009; Ramakrishnan, 2009; van den Berg, 2005). Några av dessa spektra visas i figur 3, tillsammans med hörtrösklar för infra- och lågfrekvent ljud (se avsnitt 4.1 för detaljer kring hörtrösklar).

De infraljudsnivåer som uppmätts från vindkraftverk är inte högre än de infraljudsnivåer människor utsätts för dagligen, på tunnelbana och bussar eller på arbetsplatser (Leventhall, 2006). Och de ligger långt under svenska riktvärden för infraljudsnivåer i arbetslivet, vilka ligger 5–10 dB över hörtrösklarna (Arbetsmiljöverket, 2005).



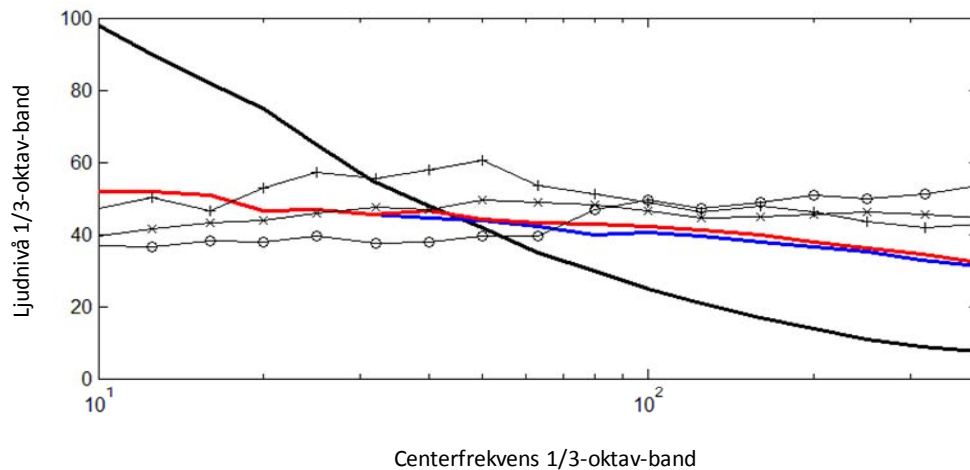
Figur 3. Immissionsspektra från mätningar av vindkraftsverk utomhus (vänster) och inomhus (höger). Helden linje avser hörtrösklar i lågfrekvensområdet enligt ISO (2003b), streckad linje avser hörtrösklar i infraljudsområdet enligt Møller och Pedersen (2004).

Jung och Cheung (Jung & Cheung, 2008) och Sugimoto, Koyama, och Watanabe (Sugimoto, Koyama, & Watanabe, 2008) har citerats som argument för att vindkraft genererar höga nivåer av infra- och lågfrekvent ljud (se till exempel Salt & Hullar, 2010). Jung och Cheung visar spektra för utomhusmätningar vid 10 m och 98 m från ett 1.5 MW verk, alltså på betydligt kortare avstånd än vanligt för bostäder. Mätningarna visade på nivåer över 80 dB i frekvensområdet 1–10 Hz. Dessa nivåer ligger under hörtröskeln vid dessa frekvenser. Det kan också noteras att nivåerna var ungefär desamma för de två avstånden, 10 och 98 m, vilket kan tyda på att mätningarna också inkluderar infraljud från bakgrunden¹. Sugimoto *et al.* mätte nivåer inomhus och rapporterade nivåer upp till 80 dB i frekvensområdet 1–20 Hz. Även här ligger nivåer under hörtröskeln. Mätningen skedde dessutom inne i en liten arbetsbod endast 20 m från vindkraftverket, vilket gör mätsituationen mindre relevant för effekter på människor (som bor i stabila konstruktioner på flera hundra meters avstånd från vindkraftsanläggningar).

I lågfrekvensområdet (20–200 Hz) genererar vindkraftverk buller som i många fall är hörbart (se figur 3). Detta är inte unikt för vindkraft, utan gäller för de flesta bullerkällor i samhället.

¹ Effekten av geometrisk utbredning av ljud från en punktkälla är oberoende av frekvens. Det borde därför vara cirka 5-7 dB lägre nivå på marknivå vid 98 m jämfört med 10 m från det 62 m höga tornet.

Figur 4 visar jämförelser mellan tillåtna bullerdoser från vindkraft och trafikbuller. I figuren visas beräknade vindkraftsspektra för olika vindkraftsverk vid riktvärdet 40 dBA vid 8 m/s på 10 m höjd (Naturvårdsverket, 2011)². Vindkraftsbuller är normaliserade till riktvärdet 40 dBA och trafikbuller till utomhusriktvärdet 55 dB $L_{Aeq,24h}$ fasad (Boverket, 2008) för frekvensintervall 16–10000 Hz.



Figur 4. Beräknade spektra från vindkraftsverk och trafikbuller vid gällande riktvärde för buller utomhus vid bostadens fasad (40 dBA vid 8 m/s på 10 m höjd för vindkraftsbuller och 55 dB $L_{Aeq,24h}$ för trafikbuller). Blå linje visar spektra för små (<2 MW) och röd linje för stora (>2 MW) vindkraftsverk. Trafikbullerspektra visas för persontrafik (-x-), tung trafik (-+-) samt spårtrafik (-o-). Svart linje avser hörrösklar i lågfrekvensområdet enligt ISO (2003b) och i infraljudsområdet enligt Møller och Pedersen (2004).

Lindkvist och Almgren (Lindkvist & Almgren, 2010) undersökte lågfrekvent buller vid ett bullerutsatt hem. Mätningar vid fasad och i rum som vetter mot vindkraftverket samt ljudtransmission genom fasaden undersöktes. Resultaten, som kan anses gälla generellt för svenska träbyggnationer, visar att Socialstyrelsens riktvärden för lågfrekvent buller inomhus (Socialstyrelsen, 2005) sällan överskrider om rådande riktvärde för buller vid fasad uppfylls. Persson ifrågasatte deras slutsats med hänvisning till att huskonstruktioner i Danmark vanligtvis är stenkonstruktioner och trä dominerar som byggnadsmaterial i Sverige (Persson, 2010). Lindkvist och Almgrens svar visar att den högre transmissionen som kan tänkas uppstå genom väggar bör kompenseras av att fönster i Sverige vanligtvis är mer dämpande än danska fönster (Lindkvist & Almgren, 2010).

Är dBA ett lämpligt mått på vindkraftsbuller?

Lågfrekvent buller är mer störande än buller utan påtagliga lågfrekventa komponenter, vid samma A-vägda ljudnivå (dBA). Därför har dBA ifrågasatts som indikator på upplevd ljudnivå och störning av buller (se till exempel Bengtsson, Persson Waye, & Kjellberg, 2004; Hellman & Zwicker, 1987; Kuwano, Namba, & Miura, 1989). Det finns alltså argument för

² Vindkraftverkens spektra har beräknats från tersbandsspektra från figur 2 som sedan har viktats för 500 m utbredning (antaget 20 °C temperatur, 70% relativ luftfuktighet, 1 atm lufttryck) och viktats till 40 dBA i frekvensintervall 16-10 000 Hz.

att ersätta dBA till förmån för andra mått, till exempel Zwickers hörstyrka (ISO, 1975), som bättre korrelerar med hur ljud upplevs (Nilsson, 2007; Nilsson, Andéhn, & Lesna, 2008). Detta gäller dock inte särskilt för vindkraftsbuller, utan för de flesta bullerkällor i vår omgivning, till exempel vägtrafik och fläktbuller, som genererar lika mycket eller mer lågfrekvent ljud.

Vinsten med en övergång från A-vägd ljudnivå till alternativa mått skall dock ställas mot de kostnader det skulle innebära att ändra nuvarande system för beräkningar och riktvärden av samhällsbuller. En kompromiss kan vara att som komplement till A-vägda ljudnivåer också mäta eller beräkna C-vägda ljudnivåer. Skillnaden mellan C- och A-vägd ljudnivå kan användas som en grov indikator på hur lågfrekvent ett ljud är (Hassall, 1998; Lundquist, Holmberg, & Landström, 2000). I situationer där det finns misstankar om påtagliga lågfrekvenskomponenter bör man därför överväga att också mäta eller beräkna C-vägd ljudnivå.

För vindkraft rekommenderar Lindkvist och Almgren (Lindkvist & Almgren, 2010) att en utökad studie om lågfrekvent buller görs om den C-vägda ljudnivån överstiger den A-vägda ljudnivån med mer än 15 dB vid beräkning eller mätning vid bostäders fasad. För en sådan undersökning rekommenderar författarna att ljudtrycksnivåer beräknas i tredjedelsoktavband 31,5–200 Hz inomhus med hjälp av en uppskattad ljudnivåskillnad ute och inne (till exempel med metod föreslagen av Madsen och T.H. Pedersen, 2010).

4. Perception

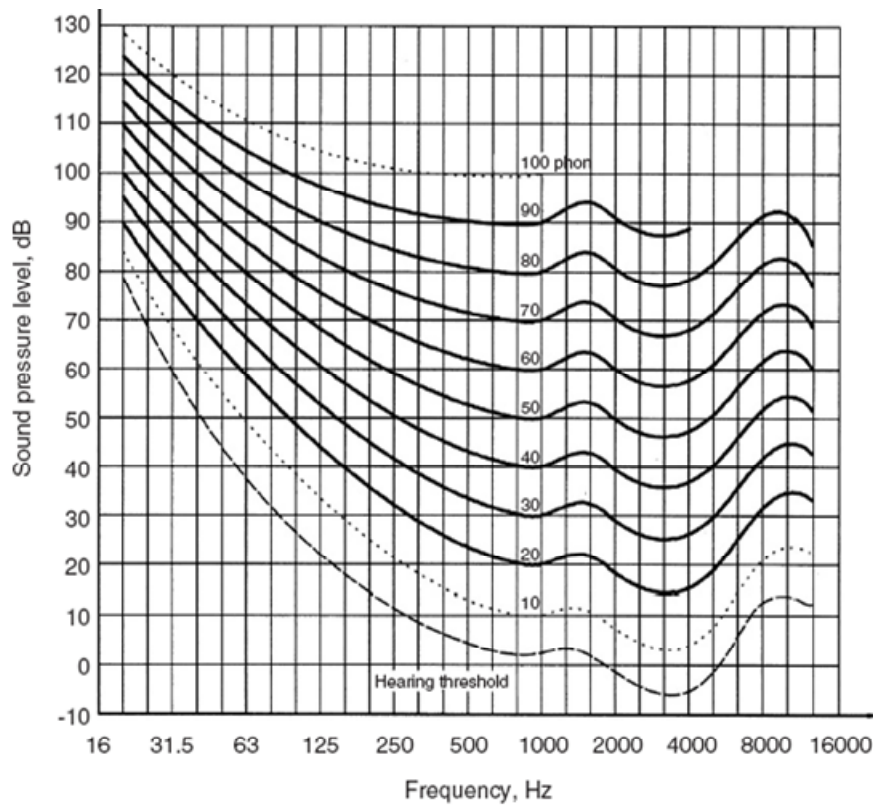
Hörbarhet

Vår förmåga att uppfatta ljud varierar med ljudets frekvens. Hörselsinnet är mest känsligt för ljud i frekvensområdet 2000–4000 Hz. Hörtröskeln, det vill säga en ljudnivå som är precis hörbar, är lägst i detta frekvensområde, och vid nivåer över hörtröskeln upplevs ljud i detta frekvensområde som starkare än ljud med högre och lägre frekvenser (ISO, 2003b), se figur 5.

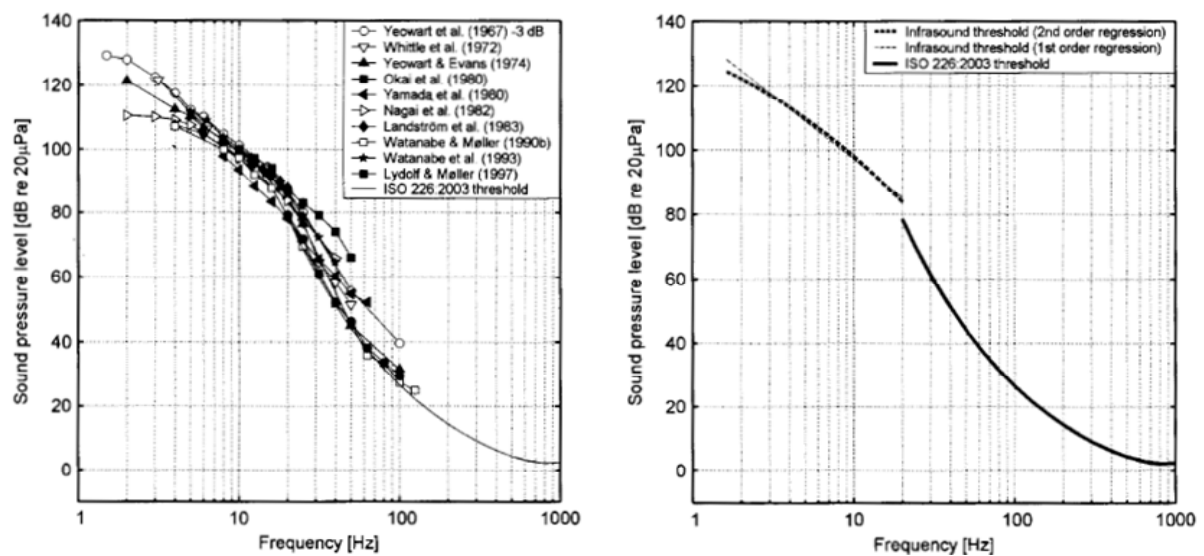
Experimentella studier av hörbarhet i infra- och lågfrekvensområdet ger ganska samstämmiga resultat. Det vänstra diagrammet i Figur 6 visar data från en rad studier sammanställda av Møller och Pedersen (2004). Hörtrösklarna avtar med frekvens, från cirka 120 dB vid 2 Hz till cirka 15 dB vid 200 Hz. Det högra diagrammet i samma figur visar standardiserade trösklar för infraljudsområdet (Møller & Pedersen, 2004) och lågfrekvensområdet (ISO, 2003b).

Upptäckt av infraljud sker genom hörselsinnet, vilket bland annat visas av att döva personer inte kan uppfatta infraljud vid tröskelnivåerna (Landström, Åkerlund, Kjellberg, & Tesarz, 1995; Yamada, Ikuji, Fujikata, Watanabe, & Kosaka, 1983). Det är först vid betydligt högre nivåer, 20–40 dB över hörtröskeln, som infraljud också kan ge känselupplevelser genom att ljudet orsakar vibrationer i kroppen (Landström, 1995).

Observera att hörtrösklarna i figur 6 (och figur 3) är medelvärden beräknade över ett stort antal personer. Fördelningen av individuella hörtrösklar kan antas vara approximativt normalfördelad med en standardavvikelse kring 5–6 dB (Leventhall, 2007; Møller & Pedersen, 2004). Det kan därför uppskattas att cirka 2 % av befolkningen har hörtrösklar 10–12 dB under genomsnittet.



Figur 5. Ljudnivåer för olika frekvenser vid samma upplevda ljudstyrka (phon). Hörtrösklar (*eng.* hearing threshold), det vill säga nivåer vid minsta upptäckbara ljudnivå, markeras av den lägre streckade linjen. Figur från (ISO, 2003b).



Figur 6. Hörtrösklar i infra- och lågfrekvensområdet. Vänster diagram visar en sammanställning av data från ett antal studier, höger diagram visar genomsnittliga experimentresultat för infraljudsområdet och hörtrösklar enligt ISO i lågfrekvensområdet. Figurerna från Møller och Pedersen (2004).

Som redan påpekats i samband med figur 3, understiger infraljud (1–20 Hz) från vindkraftverk gränsen för vad som är hörbart, ofta med betydligt mer än 12 dB. Det kan därför antas att endast ett fåtal personer med mycket god känslighet kan uppfatta infraljud från vindkraftverk i sin boendemiljö. I lågfrekvensområdet (20–200 Hz) genererar vindkraftverk däremot buller som i många fall är hörbart (se figur 3). Som påpekats i samband med figur 4, är detta inte unikt för vindkraft, utan gäller för de flesta bullerkällor i samhället.

En ljudkällas uppfattbarhet beror inte bara på dess ljudnivå utan också på ljudnivå och frekvensinnehåll hos ljud i bakgrunden. Bakgrundsljud kan göra att ljudkällan upplevs som mindre ljudstark (partiell maskering) eller helt ohörbar (total maskering). Ljud med stor andel lågfrekvensinnehåll är svårare att maskera än ljud med mindre andel lågfrekvensinnehåll (se till exempel Moore, Glasberg, & Baer, 1997).

Lyssningsexperiment utförda av Bolin, Khan och Nilsson (2010) visade att 40 dB vindkraftsljud totalt maskerades av ljud från vatten och lövsus när de maskerande ljuden hade en nivå kring 48–52 dB. En påverkan genom partiell maskering av upplevd ljudstyrka hos vindkraftsljuden uppträdde dock redan när vindkraftsljud och bakgrundsljud hade samma ljudnivå.

Ljudkaraktär

Det finns några studier som har undersökt vindkraftsbullrets ljudkaraktär. Pedersen & Waye (2004) fann att *svischande*, *vinande* och *pulserande* var de ljudegenskaper som korrelerade högst med självrapporterad bullerstörning ("annoyance", $n = 351$). Pedersen, Hallberg och Waye (2007) fann liknande beskrivningar av ljudet i en kvalitativ intervjuundersökning med 15 personer boende i södra Sverige, samtliga med flera vindkraftverk synliga från sina villatomter (högsta avstånd 600 m). Det vanligaste ordet som dessa boende använde för att beskriva bullret från vindkraftverken var *svischande*. Andra ord som användes var *dunkande*, *rungande*, *skramlande* och *tjutande*. Dessa resultat stämmer med resultatet från en tidigare lyssningsstudie av Waye och Öhrström (2002) där lyssnare använde liknande adjektiv för att beskriva ljud från fem vindkraftverk. Ett dunkande ("thumping") ljud från vindkraftverk kan också uppstå i vissa situationer, till följd av en interaktion mellan flera vindkraftverk i rörelse (van den Berg, 2005).

Det ljud som boende främst lägger märke till är alltså ett svischande och pulserande ljud som uppstår när rotorbladen passerar genom luften. Detta ljud är inte lågfrekvent utan har sin huvudsakliga energi i frekvensområdet 500–1000 Hz (Leventhall, 2006; van den Berg, 2005).

5. Bullerstörning

Bullerstörning mäts i frågeformulärsstudier och avser en sammantagen bedömning av hur störd eller besvärad den boende varit av en viss bullerkälla under en viss tidsperiod (ISO, 2003a). Sambandet mellan bullerstörning av vindkraft och ljudnivåer från vindkraft har hittills undersökts i tre tvärsnittsstudier. En svensk studie med 351 personer genomfördes år 2000 (Pedersen & Waye, 2004), en andra svensk studie med 754 personer genomfördes år 2005 (Pedersen & Waye, 2007), och en holländsk studie med 725 personer genomfördes år 2007 (Pedersen, van den Berg, Bakker, & Bouma, 2009).

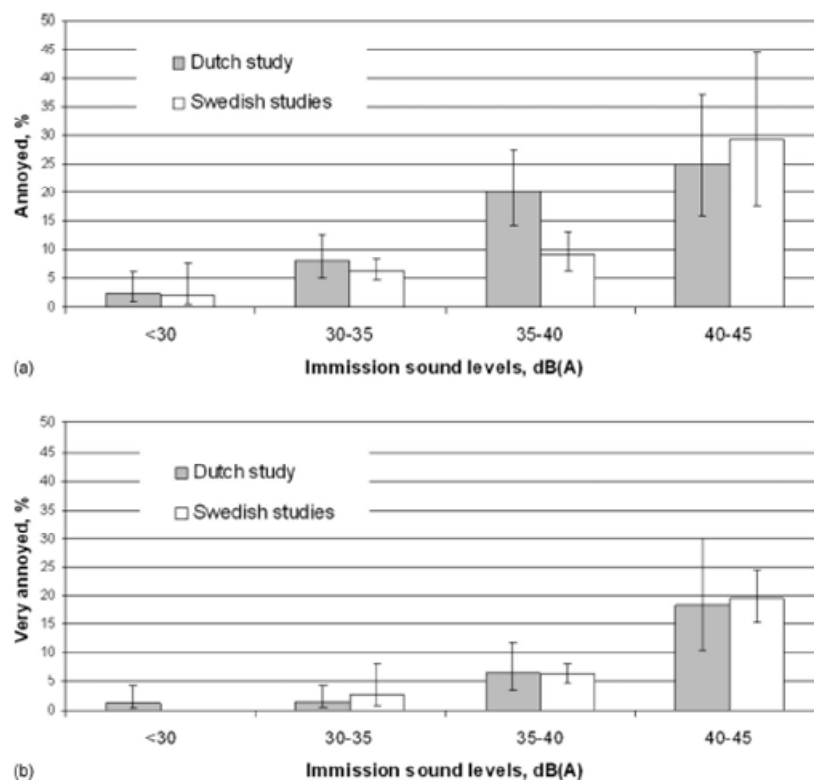


FIG. 2. Proportions of respondents annoyed (a) and very annoyed (b) by wind turbine noise outside their dwellings in four sound level intervals in the Dutch study (only respondents who did not benefit economically, $n=586$) and the Swedish studies ($n=1095$), with 95% confidence intervals.

Figur 7. Andel personer som rapporterar bullerstörning vid olika exponeringar för vindkraftsbuller. Andel bullerstörda definierade som andelen som uppgivit att de är "ganska störda" eller "mycket störda" vindkraftsbuller (de två högsta alternativen på en femgradig skala). Figuren från Pedersen et al. (2009)

Dessa studier redovisar endast beräknade A-vägda ljudnivåer (dBA). De kan därför inte ge vägledning vad gäller specifika effekter kopplade till lågfrekventa ljud. Studiernas resultat redovisas ändå i denna rapport, eftersom de är viktiga för bedömningen av nuvarande riktvärde för vindkraftsbuller.

De tre studierna är inte oberoende av varandra, eftersom samma svenska forskare medverkade i samtliga studier. Svartsfrekvenserna var måttliga i de svenska studierna, kring 60 %, men låg i den holländska studien, 37 %. Bortfallsanalyser har dock genomförts och dessa ger stöd för stickprovets representativitet.

De tre studierna använde samma fråga för att mäta bullerstörning (i den holländska studien översatt till holländska): "Änge för var och en av nedanstående olägenheter om Du lägger märke till eller störs av dem, när du vistas utomhus vid din bostad", följt av en lista med tänkbara olägenheter varav buller från vindkraft var en. Frågan besvarades på en femgradig skala med alternativen "märker inte", "märker, men störs inte", "störs inte särskilt mycket", "störs ganska mycket", och "störs mycket". Andel "bullerstörda" (eng. "annoyed") definierades som andelen som svarat "störs ganska mycket" eller "störs mycket". Andel "mycket bullerstörda" (eng. "highly annoyed") definierades som andelen som svarat "störs mycket".

Det skall påpekas att dessa definitioner av ”bullerstörda” och ”mycket bullerstörd” inte helt överensstämmer med definitioner som använts vid sammanställningar (metaanalyser) av tidigare internationell forskning om bullerstörning (Miedema & Oudshoorn, 2001). I dessa sammanställningar definieras ”bullerstörd” (eng. ”annoyed”) som en skattning > 50 på en hundrigradig skala och ”mycket bullerstörd” (eng. ”highly annoyed”) som en skattning större än > 72 på samma skala. Motsvarande brytpunkter för de tre vindkraftsstudierna motsvara > 60 för ”bullerstörd” och > 80 för ”mycket bullerstörd”. En annan skillnad är att metaanalyserna baseras på störningsfrågor som inte specifikt skiljt på störning inomhus och utomhus, medan de tre vindkraftsstudierna frågat separat om bullerstörning inomhus och utomhus (och främst presenterat resultat för störning utomhus, t.ex. figur 7). Rapporterad bullerstörning är vanligen högre utomhus än inomhus (t.ex. Nilsson & Berglund, 2006), vilket gör att resultat från frågor om buller utomhus ger en högre andel bullerstörda än resultat baserade på frågor som inte skiljer på störning inomhus och utomhus.

Figur 7 visar resultat från de tre vindkraftsstudierna, sammantaget för de två svenska studierna (vita staplar) och separat för den holländska studien (grå staplar). Beräkningarna inkluderar inte de som hade egen ekonomisk vinning av vindkraften, eftersom dessa rapporterade klart lägre störning än de som inte hade egen vinning av vindkraften (Pedersen, et al., 2009). Studierna visar på ett tydligt samband mellan vindkraftsbuller och andel störda. Bland bonde med exponering i intervallet 35–40 dBA, det vill säga de som utsätts för buller precis under riktvärdet för vindkraftsbuller, var andelen bullerstörda i de svenska studierna cirka 10 % (cirka 20 % i den holländska studien) och andelen mycket bullerstörda cirka 6 % (samma i den holländska studien).

För att få en uppfattning om vad dessa andelar innebär, kan man jämföra med andelen bullerstörda av vägtrafik, som är den störningskälla som berör flest människor i Sverige (Nilsson & Eriksson, 2009a; WSP, 2009). En sådan jämförelse visar att andelen bullerstörda av vindkraftsljud vid riktvärdet 40 dBA (utomhus vid fasad) är jämförbar med andelen bullerstörda vid riktvärdet för vägtrafikbuller utomhus vid fasad, 55 dB $L_{Aeq,24h}$. Som exempel kan nämnas en studie bland boende i Sveriges tre storstäder, där cirka 7 procent av boende med fasadexponering i intervallet 50–54 dB och cirka 10 % av boende i intervallet 55–59 dB $L_{Aeq,24h}$ var bullerstörda av vägtrafik (Nilsson & Eriksson, 2009b). Denna studie använde samma brytpunkter vid definitionen av ”bullerstörd” som de tre vindkraftsstudierna, men gjorde ingen åtskillnad mellan bullerstörning inomhus och utomhus.

Utifrån de samband som Miedema och Oudshoorns (2001) sammanställt går det också att estimerar andelen bullerstörda för transportbuller vid gällande svenska riktvärden, med samma brytpunkt vid definitionen av ”bullerstörd” som användes i de tre vindkraftsstudierna³. Enligt en sådan uppskattning är cirka 18 % av boende bullerstörda av flygtrafik, 16 % av vägtrafik och cirka 8 % av spårtrafik vid gällande riktvärde utomhus vid fasad (55 dB FBN för flygtrafik och 55 dB $L_{Aeq,24h}$ för väg- och spårtrafik). Detta skall jämföras med 10–20 % bullerstörda i de tre vindkraftsstudierna vid nivåer precis under riktvärdet 40 dBA för vindkraftsbuller (se intervallet 35–40 dBA i det övre diagrammet i figur 7). Observera dock att till skillnad från vindkraftsstudierna, baseras Miedema och Oudshoorns sammanställning på frågor som inte gjort åtskillnad mellan bullerstörning inomhus och utomhus.

³ Dessa beräkningar utgår från samband mellan andel bullerstörda och L_{DEN} , se ekvation 6 i Miedema och Oudshoorn (2001), med antagandet att $L_{Aeq,24h} = L_{DEN} - 4$ dB och att FBN = L_{DEN} , samt ”bullerstörning” definierad som andel som uppgivit de två högsta kategorierna på en 5-gradig skala, vilket motsvara > 60 poäng på en 100-gradig skala.

Sammantaget stödjer dessa jämförelser att nuvarande riktvärde för vindkraftsbuller är rimligt och jämförbart med andel störda av transportbuller vid motsvarande riktvärden utomhus vid fasad. Samtidigt är det uppenbart att vindkraft är mer störande än vägtrafikbuller vid jämförbara ljudnivåer. Vid 40 dBA vindkraft är störningarna påtagliga (se figur 7) medan andelen bullerstörda vid 40 dB dygnsequiväldigt ljudnivå från transportbuller är betydligt lägre⁴. Det finns ingenting som tyder på att detta är kopplat till infra- eller lågfrekvent ljud från vindkraftverk. Däremot finns flera andra rimliga förklaringar:

- (1) Vindkraftverk uppförs ofta i miljöer med låg bakgrundsnivå. Detta innebär att även låga ljudnivåer från vindkraft är uppfattbara och därmed potentiellt störande. Studier av vägtrafikbuller har ofta gällt bullerstörning bland boende i större städer, där bakgrundsnivåerna är uppskattningsvis 10–15 dB högre än i landsbygdsmiljöer.
- (2) Repetitivt pulserande ljud upplevs som mer störande än kontinuerligt ljud med samma frekvensinnehåll och genomsnittliga ljudnivå (Kantarelis & Walker, 1988; Zwicker & Fastl, 1990). Detta gäller även för vindkraftsljud (Seunghoon, Kyutae, Wooyoung, & Soogab, 2011) och kan vara en faktor till att vindkraftsljud upplevs som störande även vid relativt låga ljudnivåer.
- (3) Vindkraftens visuella intrång i miljön kan påverka bedömningar av bullerstörning. Detta stöds av att andelen bullerstörda bland boende som ser vindkraftsverken är betydligt högre än bland boende som inte ser verken, vid samma genomsnittliga bullerexponering (Pedersen, et al., 2009). Vindkraftsverken fångar uppmärksamheten, genom att de upplevs som en onaturlig komponent i landskapet. En hypotes är att vindkraftverk i större utsträckning än många andra bullerkällor fångar den visuella uppmärksamheten och att detta också medför en ökad fokusering på bullret. Störning av rörliga skuggor och flimmer från vindkraftverk kan troligen också öka benägenheten att rapportera bullerstörning.
- (4) Buller från vindkraftverk beräknas för en given situation (8 m/s på 10 m höjd) medan beräkningar av trafikbuller avser ett dygnsmedelvärde. Värden för vindkraft och trafikbuller är därför inte direkt jämförbara. Det kan inte heller uteslutas att beräknade nivåer av vindkraftsbuller underskattar den faktiska exponeringen i större utsträckning än för trafikbullerkällor, där beräkningsmodellerna är mer utvecklade.

6. Sömnstörning

Sömnstörning är en allvarlig effekt av buller, eftersom god sömn är en förutsättning för fysisk och mental hälsa (se WHO, 2009). Det är därför viktigt att utvärdera effekterna av vindkraftsbuller på sömnstörning. WHO anger i sina riktvärden att nivån utomhus vid fasad inte bör överstiga 40 dB L_{Aeq} nattetid för att säkerställa ostörd sömn, även med sovrumsfönstret på glänt (WHO, 2009). Den tidigare rekommendationen från WHO var 45 dB L_{Aeq} (WHO, 2000).

Studier av van den Berg antyder att beräknade nivåer kan underskatta faktisk nattexponering (van den Berg, 2004b). Stabila atmosfärsförhållanden kväll och natt leder till ökade nivåer av

⁴ Enligt Miedema och Oudshoorns (2001) samband, motsvarar 40 dB (FBN) flygbuller cirka 3 % bullerstörda, och 40 dB ($L_{Aeq,24h}$) väg- och spårtrafikbuller 3 % respektive 1 % bullerstörda (under antaganden redovisade i fotnot 2). Som påpekas av Miedema och Oudshoorn är uppskattningar vid nivåer under 45 dB mycket osäkra eftersom de utgör extrapoleringar från data. Studier av transportbuller redovisar sällan eller aldrig nivåer under 45 dB.

vindkraftverksljud samtidigt som nivåerna av bakgrundsljuden sjunker. Långtidsmätningar visar att bullernivån från vindkraftverk kan skilja sig upp till 15 dBA mellan natt och dag vid vindhastigheter på 3–4 m/s på 10 m höjd (van den Berg, 2004b). I situationer där beräkningar visar att vindkraftsbullret ligger kring 40 dBA, för 8 m/s på 10 m höjd, kan man alltså inte helt utesluta att sömnstörningar förekommer på grund av att de verkliga nivåerna är högre.

De frågeformulärsstudier som genomförts visar inte på några tydliga samband mellan vindkraftsbuller och självrapporterad sömnstörning. I en sammanställning av de tre vindkraftsstudier som genomförts, fann Pedersen (2011) signifikanta samband mellan beräknad ljudnivå och självrapporterad sömnstörning i den första svenska studien och i den holländska studien, men inte i den andra svenska studien. Återigen ger dessa studier inte möjlighet till analys av eventuella effekter av lågfrekvent ljud eftersom endast A-vägd ljudnivå rapporterats. Det går inte heller att uttala sig om möjlig påverkan på sömnkvalitet, som ju kan förekomma vid bullerexponering utan att individen är medveten om detta.

7. Andra ohälsoeffekter

Olika symtom och sjukdomar har nämnts i diskussioner om vindkraft och hälsa, vanligen kopplat till exponering för infra- eller lågfrekvent ljud. Nedan diskuteras de studier som oftast citeras i dessa sammanhang. Därefter diskuteras möjliga effekter av buller på hjärt-kärlsystemet. Ett antal studier av väg- och flygbuller talar för ett sådant samband, men studier av vindkraftsbuller saknas.

Boken ”The Windturbine Syndrome” (Pierpont, 2009) citeras ibland som ett argument för att vindkraftsbuller kan orsaka en rad allvarliga symptom. Detta är en intervjustudie med 38 personer från 10 familjer boende i närheten av stora vindkraftsverk (1,5–3,0 MW). I stort sett samtliga personer rapporterar mer eller mindre allvarliga symptom, bland annat sömnstörningar, huvudvärk, tinnitus, yrsel, illamående, panikattacker och hjärtklappning. Personerna berättade att de utvecklade dessa symptom efter att vindkraftverken uppförts nära deras hem.

Pierpoints tolkning av resultaten är att de rapporterade symptomen beror på att lågfrekvent ljud och vibrationer från vindkraftverk påverkat personernas balanssinne (Pierpont, 2009). Studien ger dock av flera skäl inget belägg för detta. Exempelvis saknas akustiska mätningar av vindkraftsbullret, det saknas jämförelsegrupp med personer utan eller med låg vindkraftsexponering och det saknas mätningar av personerna innan vindkraftverken uppfördes (hälsostatus innan verken uppfördes skattades retrospektivt). Pierpoints resultat, som baseras på ett mycket litet stickprov, motsägs av resultat från de tvärsnittsstudier som genomförts med sammanlagt mer än 1600 personer (se avsnitt 5). I dessa studier har man förutom allmän besvärsupplevelse av buller inte funnit något tydligt samband mellan vindkraftsbuller och symptomrapportering (se sammanställning av Pedersen, 2011).

Alves-Pereira och Castelo Branco (2007a) har argumenterat för att infra- och lågfrekvent ljud orsakar ”vibroakustisk sjukdom” (Alves-Pereira & Castelo Branco, 2007b; Castelo Branco & Alves-Pereira, 2004). Författarna nämner en mängd symptom, bland annat ökad risk för epilepsi och hjärt-kärl effekter som ökad risk för kranskärlskirurgi. Detta har inte uppmärksamats av andra forskare trots att denna grupp propagerat för vibroakustisk sjukdom de senaste 20-30 åren i olika artiklar (främst konferensbidrag). Problemet verkar endast relevant vid höga yrkesexponeringar, till exempel hos flygmekaniker (Castelo Branco & Alves-Pereira, 2004), knappast vid låg dos från vindkraftverk. Diskussionen kring vibroakustisk sjukdom ligger fortsatt på hypotesstadiet och belägg för problem relaterat till ljud från vindkraft saknas.

Salt och Hullar (2010) har publicerat en sammanställning av forskning kring infraljud och fysiologisk påverkan på innerörat. Artikeln har ordet "wind turbines" i titeln, men den handlar nästan uteslutande om innerörats funktion och ger en grundlig genomgång av hörselorganet och vilka delar som tros påverkas av infraljud. De yttre hårcellerna nämns som särskilt känsliga för infraljud också vid så låga nivåer att ljudet inte kan uppfattas. Artikelns sista stycken nämner att vindkraft genererar höga infraljudsnivåer, med referens till tre artiklar, varav två inte är relevanta för exponering i boendemiljö (Jung & Cheung, 2008; Sugimoto, et al., 2008). Inga referenser görs till publicerade kunskapssammanställningar (t.ex. Jakobsen, 2005; Leventhall, 2006), som visar att de infraljudsnivåer som människor utsätts för av vindkraft är måttliga och inte högre än vad många människor utsätts för dagligen, på tunnelbana och bussar eller på arbetsplatser. Det är därför svårt att se att Salt och Hullars resultat är relevant för riskbedömning av vindkraftsbuller.

Det har inte genomförts några epidemiologiska studier av vindkraftsbuller och risk för hjärtkärlsjukdom. Däremot har ett antal studier på senare år visat på samband mellan förhöjt blodtryck och vägtrafik- och flygbuller (Babisch, 2008; Babisch & van Kamp, 2009; WHO, 2011). Det finns också några studier som visat på ett samband mellan vägtrafikbuller och förhöjd risk för hjärtinfarkt (Babisch, Beule, Schust, Kersten, & Ising, 2005; Selander et al., 2009). En studie har också funnit ett liknande samband för flygbuller (Huss, Spoerri, Egger, Roeoesli, & Swiss Natl Cohort Study Grp, 2010). Ökad risk har iakttagits vid dygnsekvivalenta ljudnivåer av vägtrafikbuller från 55 dB och flygbuller från 60 dB (WHO, 2011), det vill säga betydligt högre bullernivåer än vad vindkraft genererar vid bostäder. Detta talar emot att samband mellan transportbuller och hjärt-kärlsjukdom kan generaliseras till vindkraftsbuller. Å andra sidan antas effekterna på hjärt-kärlsystemet vara stressrelaterade och utlösta via bullerstörning eller sömnstörning (Babisch, 2002). Vindkraftsbuller orsakar bullerstörning och möjligen också sömnstörning, vilket gör att man inte helt kan utesluta effekter på hjärtkärlsystemet efter långvarig exponering av vindkraftsbuller, trots att det rör sig om låga nivåer jämfört med de som förekommit i studier av väg- och flygbuller.

8. Slutsatser

1. Infraljud (1–20 Hz) från vindkraftverk är inte hörbart på nära håll och än mindre på de avstånd där bostäder är belägna. Det finns inga belägg för att infraljud vid dessa nivåer bidrar till bullerstörning eller har andra hälsoeffekter.
2. Lågfrekvent ljud (20–200 Hz) från moderna vindkraftsverk är ofta hörbart vid gällande riktvärden för bostäder, men vindkraftsbullret har inte större innehåll av lågfrekvent ljud än andra vanliga bullerkällor vid deras riktvärden, till exempel buller från vägtrafik.
3. Större vindkraftverk genererar förhållandevis mer lågfrekvent ljud än mindre vindkraftverk, även med hänsyn taget till total ljudnivå. Med allt större vindkraftsverk kommer därför andelen lågfrekvensljud i vindkraftsbullret att öka något. Förutsatt att riktvärdet utomhus vid bostadens fasad, 40 dBA, och Socialstyrelsens riktvärden för lågfrekvent buller inomhus är uppfyllda är det dock inte troligt att allvarliga störningar till följd av lågfrekvensbuller från vindkraft är att vänta i framtiden.
4. Vindkraftsbuller orsakar bullerstörningar bland boende. Vid nivåer kring 35–40 dBA, det vill säga precis under riktvärdet 40 dBA, uppger 10–20 % av de boende att de är ganska eller mycket störda av vindkraftsbuller. Störningen beror i huvudsak på det pulserande svischande ljud som uppstår när rotorbladen passerar genom luften. Detta ljud är inte lågfrekvent, utan har sin huvudsakliga energi i frekvensområdet 500–1000 Hz.
5. Förutom besvärsupplevelser av buller har inga påtagliga ohälsoeffekter av vindkraftsbuller kunnat påvisas. Samband mellan vindkraftsbuller och självrapporterad

sömnstörning har redovisats i vissa studier, medan andra studier inte funnit något sådant samband.

6. Det påstås ibland att infra- och lågfrekvent buller från vindkraft kan medföra risk för allvarliga hälsoeffekter i form av ”vibroakustisk sjukdom”, ”vindkraftssyndrom” eller skadlig infraljudspåverkan på innerörat. En genomgång av det vetenskapliga underlaget visar att dessa påståenden saknar belägg.

9. Referenser

- Alves-Pereira, M., & Castelo Branco, N. A. A. (2007a). In-home wind turbine noise is conducive to vibroacoustic disease *Proceedings of the 2nd International Meeting on Wind Turbine Noise*. Lyon, France.
- Alves-Pereira, M., & Castelo Branco, N. A. A. (2007b). Vibroacoustic disease: Biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 93(1-3), 256-279.
- Arbetsmiljöverket. (2005). *Buller. Arbetsmiljöverkets föreskrifter om buller samt allmänna råd om tillämpning av föreskrifterna (AFS 2005:16)*. Stockholm: Arbetsmiljöverket.
- Babisch, W. (2002). The noise/stress concept, risk assessment and research needs. *Noise & Health*, 4(16), 1-11.
- Babisch, W. (2008). Road traffic noise and cardiovascular risk. *Noise & Health*, 10, 27-33.
- Babisch, W., Beule, B., Schust, M., Kersten, N., & Ising, H. (2005). Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology*, 16(1), 33-40.
- Babisch, W., & van Kamp, I. (2009). Exposure-response relationship of the association between aircraft noise and the risk of hypertension. *Noise & Health*, 11(4), 161-168.
- Bengtsson, J., Persson Waye, K., & Kjellberg, A. (2004). Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for the perception of pleasantness. *Acta Acustica united with Acustica*, 90, 171-180.
- Berglund, B., Hassmén, P., & Job, S. R. F. (1996). Sources and effects of low-frequency noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5), 2985-3002.
- Bolin, K., Khan, S., & Nilsson, M. E. (2010). The potential of natural sounds to mask wind turbine noise. *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 131-137.
- Boverket. (2008). *Allmänna råd 2008:1. Buller i planeringen - Planera för bostäder i områden utsatta för buller från väg- och spårtrafik*. Karlskrona: Boverket.
- Castelo Branco, N. A. A., & Alves-Pereira, M. (2004). Vibroacoustic disease. *Noise & Health*, 6(23), 3-20.
- Gastmeier, W. J., & Howe, B. (2008). Recent studies of infrasound from industrial sources. *Canadian Acoustics*, 36(3), 58-59.
- Hassall, J. R. (1998). Noise measurement techniques. In C. M. Harris (Ed.), *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control* (pp. 9.1-9.22). Woodbury, NY: Acoustical Society of America.
- Hayes McKenzie Partnership Ltd. (2006). *The Measurement of Low Frequency Noise at Three UK Wind Farms*. London: UK Department of Trade and Industry.
- Hellman, R., & Zwicker, E. (1987). Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness? *Journal of the Acoustical Society of America*, 82(5), 1700-1705.
- Hepburn, H. G. (2006). Acoustical and geophysical measurement of infrasound from wind farm turbines. *Canadian Acoustics*, 34(2), 51-67.
- Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., Roeoesli, M., & Swiss Natl Cohort Study Grp. (2010). Aircraft noise, air pollution, and mortality from myocardial infarction. *Epidemiology*, 21, 829-836.
- ISO. (1975). *Acoustics - Method for Calculating Loudness Level. ISO 532-1975 (E)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO. (2003a). *Acoustics-Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys. ISO/TS 15666:2003(E)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO. (2003b). *Acoustics - Normal Equal-loudness-level Contours (ISO226:2003) (No. ISO 1996/1-1982 E)*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Jakobsen, J. (2005). Infrasound emission from wind turbines. *Journal of low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 24(3), 145-155.

- Jung, S. S., & Cheung, W.-S. (2008). Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise. *Journal of the Korean Physical Society* 53(4), 1897-1905.
- Kantarelis, C., & Walker, J. G. (1988). The identification and subjective effect of amplitude modulation in diesel engine exhaust noise. *Journal of Sound and Vibration*, 120(2), 297-302.
- Kuwano, S., Namba, S., & Miura, H. (1989). Advantages and disadvantages of A-weighted sound pressure level in relation to subjective impression of environmental noises. *Noise Control Engineering Journal*, 33, 107-115.
- Landström, U. (1995). Human exposure to infrasound. In P. N. Cheremisinoff (Ed.), *Encyclopedia of Environmental control Technology* (Vol. 7). London: Gulf Publishing Company.
- Landström, U., Åkerlund, E., Kjellberg, A., & Tesarz, M. (1995). Exposure levels, tonal components, and noise annoyance in working environments. *Environment International*, 21(3), 265-275.
- Leventhall, G. (2006). Infrasound from wind turbines – fact, fiction or deception. *Canadian Acoustics*, 34, 29-34.
- Leventhall, G. (2007). What is infrasound? *Progress in Biophysics & Molecular Biology*, 93(1-3), 130-137.
- Lindkvist, P., & Almgren, M. (2010). Ljudisolering i bostadshus mot ljud från vindkraft. *Bygg & teknik*, 3/2010, 60-62.
- Lundquist, P., Holmberg, K., & Landström, U. (2000). Low frequency noise and annoyance in classroom. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 19(4), 175-182.
- Madsen, K. D., & Pedersen, T. H. (2010). *Low Frequency Noise from Large Wind Turbines (Technical Report Delta AV 1272/10)*. Hörsholm, Denmark: DELTA.
- Miedema, H. M. E., & Oudshoorn, C. G. M. (2001). Annoyance from transportation noise: Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*, 109(4), 409-416.
- Moore, B. C. J., Glasberg, B. R., & Baer, T. (1997). A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *Journal of Audio Engineering Society*, 45(4), 224-240.
- Møller, H., & Pedersen, C. S. (2004). Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health*, 6(23), 37-57.
- Møller, H., & Pedersen, C. S. (2010). *Lavfrekvent støj fra store vindmøller*. Aalborg, Denmark: Aalborg Universitet.
- Møller, H., Pedersen, C. S., & Pedersen, S. (2011). *Lavfrekvent støj fra store vindmøller - opdateret 2011*. Aalborg, Denmark: Aalborg Universitet.
- Naturvårdsverket. (2011). Riktvärden för ljud från vindkraft (www.naturvardsverket.se/sv/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Vindkraft/Riktvarder-for-ljud-fran-vindkraft). Retrieved 25/11, 2011
- Nilsson, M. E. (2007). A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound. *Journal of Sound and Vibration*, 302(1-2), 197-207.
- Nilsson, M. E., Andéhn, M., & Lesna, P. (2008). Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3561-3567.
- Nilsson, M. E., & Berglund, B. (2006). Noise annoyance and activity disturbance before and after the erection of a roadside noise barrier. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(4), 2178-2188.

- Nilsson, M. E., & Eriksson, C. (2009a). Buller. In Socialstyrelsen (Ed.), *Miljöhälsorapport 2009* (pp. kap. 15, ss. 165-179). Stockholm: Socialstyrelsen.
- Nilsson, M. E., & Eriksson, C. (2009b). *Validering av miljöhälsoindikatorer för buller*. Stockholm: Socialstyrelsen.
- O'Neal, R. D., Hellweg Jr., R. D., & Lampeter, R. M. (2009). *A Study of Low Frequency Noise and Infrasound from Wind Turbines (Report No. 2433-019)*. Maynard, MA: Epsilon Associates, Inc.
- O'Neal, R. D., Hellweg, R. D., & Lampeter, R. M. (2011). Low frequency noise and infrasound from wind turbines. *Journal of Noise Control Engineering*, 59, 135-157.
- Oerlemans, S., Sijtsmaa, P., & Méndez López, B. (2007). Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of Sound and Vibration*, 299, 869-883.
- Pedersen, E. (2011). Health aspects associated with wind turbine noise—Results from three field studies. *Noise Control Engineering Journal*, 59, 47-53.
- Pedersen, E., Hallberg, L.-M., & Wayne, K. P. (2007). Living in the vicinity of wind turbines - A grounded theory study. *Qualitative Research in Psychology*, 4, 49-63.
- Pedersen, E., van den Berg, G. P., Bakker, R., & Bouma, J. (2009). Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), 634-643.
- Pedersen, E., & Wayne, K. P. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3460-3470.
- Pedersen, E., & Wayne, K. P. (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(7), 480-486.
- Persson, B. (2010). Lågfrekvent buller kan stoppa landsvindkraften. *Bygg & teknik*, 6/2010.
- Pierpont, N. (2009). *Wind Turbine Syndrome: A Report on a Natural Experiment*. Santa Fe, NM: K-Selected Books.
- Ramakrishnan, R. (2009). Characteristics of wind turbine noise. *Canadian Acoustics*, 37(3), 122-123.
- Salt, A. N., & Hullar, T. E. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. *Hearing Research*, 268(1-2), 12-21.
- Selander, J., Nilsson, M. E., Bluhm, G., Rosenlund, M., Lindqvist, M., Nise, G., et al. (2009). Long-term exposure to road-traffic noise and myocardial infarction. *Epidemiology*, 20(2), 272-279.
- Seunghoon, L., Kyutae, K., Wooyoung, C., & Soogab, L. (2011). Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. *Noise Control Engineering Journal*, 59, 38-46.
- Socialstyrelsen. (2005). *Allmänna råd. Buller inomhus (SOSFS 2005:6)*. Stockholm: Socialstyrelsen.
- Sugimoto, T., Koyama, K., & Watanabe, K. (2008). Measurement of infrasound generated by wind turbine generator *SICE Annual Conference 2008*. Tokyo: SICE.
- van den Berg, G. P. (2004a). Do wind turbines produce significant low frequency sound levels? *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control* (pp. 1-8). Maastricht, The Netherlands.
- van den Berg, G. P. (2004b). Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277(4-5), 955-970.
- van den Berg, G. P. (2005). The beat is getting stronger: The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines. *Journal of low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 24(1), 1-24.

- Waye, K. P., & Ohrstrom, E. (2002). Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration*, 250(1), 65-73.
- WHO. (2000). *Guidelines for Community Noise*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2009). *Night Noise Guidelines for Europe*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.
- WHO. (2011). *Burden of Disease from Environmental Noise*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.
- WSP. (2009). *Uppskattning av antalet exponerade för väg, tåg- och flygbuller överstigande ekvivalent ljudnivå 55 dBA*. Stockholm: WSP.
- Yamada, Y., Ikuji, M., Fujikata, S., Watanabe, T., & Kosaka, T. (1983). Body sensations of low frequency noise of ordinary persons and profoundly deaf persons. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*, 2, 1135-1140.
- Zwicker, E., & Fastl, H. (1990). *Psychoacoustics: Facts and Models*. Berlin: Springer Verlag.