

# Människors upplevelser av ljud från vindkraftverk

RAPPORT 5956 • APRIL 2009



# Människors upplevelser av ljud från vindkraftverk

Eja Pedersen

Högskolan i Halmstad och Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet

Jens Forssén

Teknisk akustik, Chalmers tekniska högskola

Kerstin Persson Waye

Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet

#### **Beställningar**

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

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

Internet: [www.naturvardsverket.se/bokhandeln](http://www.naturvardsverket.se/bokhandeln)

#### **Naturvårdsverket**

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

E-post: [registrator@naturvardsverket.se](mailto:registrator@naturvardsverket.se)

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: [www.naturvardsverket.se](http://www.naturvardsverket.se)

ISBN 978-91-620-5956-9

ISSN 0282-7298

**Elektronisk publikation**

© Naturvårdsverket 2009

Tryck: CM Gruppen AB, Bromma 2009

Omslagsfoto: Eja Pedersen, Halmstad universitet



## Förord

Vindval är ett kunskapsprogram som har i uppgift 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 redovisar resultat från Vindvals projekt ”människors upplevelser av ljud från vindkraftverk” och har skrivits av Eja Pedersen på Högskolan i Halmstad och Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet, Jens Forssén, Teknisk akustik, Chalmers tekniska högskola och Kerstin Persson Wayne, Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet.

Skribenterna svarar för innehåll, slutsatser och eventuella rekommendationer.

Vindval i maj 2009



# Innehåll

<b>FÖRORD</b>	3
<b>SAMMANFATTNING</b>	7
<b>SUMMARY</b>	9
<b>1 BAKGRUND</b>	11
<b>2 PROJEKTETS MÅL</b>	13
<b>3 PROJEKTLEDNING OCH MEDVERKANDE</b>	14
<b>4 METODER</b>	15
4.1 Studieområden	15
4.2 Tvärsnittsstudierna	16
4.3 Dagboksstudien	18
4.4 Mätningar av ljud och meteorologi	18
4.5 Modellering av ljudutbredningen	20
<b>5 STÖRNINGSUPPLEVELSER AV LJUD FRÅN VINDKRAFTVERK</b>	21
5.1 Samband mellan ljudnivå, hörbarhet och störning	21
5.2 Omgivningsfaktorer som påverkar upplevelsen av ljud	22
5.3 Individuella faktorer med samband till upplevelsen av ljud	23
5.4 Samanalyser av påverkansfaktorer	25
5.5 Vindkraftsljuds påverkan på hälsa och välbefinnande	27
5.6 Sambandet mellan störning av ljud från vindkraftverk och hälsa och välbefinnande	27
<b>6 HUR OFTA LJUD FRÅN VINDKRAFTVERK HÖRS</b>	28
<b>7 LJUDUTBREDNING</b>	31
<b>8 DISKUSSION OCH SLUTSATSER</b>	33
<b>9 REFERENSER</b>	35
<b>10 REDOVISNINGAR INOM PROJEKTETS PERIOD 2006–2008</b>	36



# Sammanfattning

I samband med uppförandet av vindkraftverk görs en miljökonsekvensbeskrivning som också innefattar en bedömning av hur människor som bor i området kommer att påverkas av vindkraftverken. En påverkansfaktor är ljud. För att korrekt beskriva hur ljudet kan komma att uppfattas och för att säkerställa att inte verken placeras så att ljudet påverkar de kringboende negativt, är det viktigt att ta fram vetenskapligt baserad kunskap. I den här rapporten presenteras resultaten från flera studier. Samanalyser av resultaten från två fältstudier hade som syfte att visa sambanden mellan ljudnivån från vindkraftverk vid bostaden och upplevelsen av ljudet, och att beskriva faktorer som påverkade detta samband. En dagboksstudie, där deltagarna bl.a. fick fylla i hur ofta de var hemma och i så fall om de var ute, syftade till att beskriva hur ofta vindkraftsljudet hördes och vid vilka meteorologiska situationer. För att undersöka hur väl den ljudutbredningsmodell som används idag stämmer med fältmätningar och om den meteorologiska variationen har så stor betydelse för ljudutbredningen att de bör tas med vid beräkningen av ljudnivåerna, gjordes långtidsmätningar av ljudet där resultatet jämfördes med olika modeller för beräkningar.

Den sammanvägda analysen av de två störningsstudierna bekräftar och förstärker tidigare rapporterade data. Såväl andelen som märkte vindkraftsljud och andelen som stördes av ljudet ökade med ökande ljudnivåer. Sannolikheten att störas av ljud var större om verken var synliga från bostaden och om man bodde i jordbrukslandskap, medan terrängen inte hade någon inverkan. Bland andra studerade hälsorelaterade variabler fanns endast ett samband mellan att störas i sömnen och ljudnivå.

I dagboksstudien noterade deltagare oftare att de hörde ljud från vindkraftverk när den momentana effekten, d.v.s. elproduktionen, ökade. Även om det var stora individuella variationer i hur mycket tid människor tillbringade utomhus vid sin bostad kunde ett statistiskt säkerställt samband mellan hörbarhet och beräknad ljudnivå påvisas; ju högre beräknad ljudnivå, ju oftare hördes verket vid utomhusvistelse. Dagboksstudien gav även viss kunskap om samband mellan hörbarhet och vindhastighet. Resultaten indikerar att vindkraftsljud hörs även vid relativt höga vindhastigheter då ljudet från vindkraftverket förväntas vara maskerat.

Långtidsmätningar av vindkraftverksljud 550 meter från ett modernt verk visade att de beräknade ljudnivåerna stämde väl med de uppmätta. Ljudnivåer beräknade med parabolisk ekvationsmodell, som tar hänsyn till variationer hos meteorologiska variabler, gav inte bättre överensstämmelse jämfört med den modell som oftast används vid tillståndsprövning [Naturvårdsverket 2001]. Meteorologiska variationer har sannolikt bara betydelse för ljudutbredelsen på längre avstånd. Meteorologiska förhållanden kan dock ha betydelse vid skattningen av källljudnivån, som är den största osäkerheten vid beräkningen.



Studierna visar att ljudnivån varierar vid en och samma vindhastighet, och indikerar att vindkraftljud hörs även när det blåser så mycket så att vindkraftsljudet borde maskeras av andra ljud åstadkomna av vinden. Det innebär att även om den ljudutbredningsmodell som ändvänder idag fungerar väl, så bör presentationen i miljökonsekvensbeskrivningen av det ljud som de närboende kan komma att höra utvidgas. Fler studier kring hörbarheten vid höga vindhastigheter behövs också eftersom dagboksstudien hade relativt få deltagare. Studierna pekar på att risken för sömnstörningar kan vara angeläget att undersökas vidare.

## Summary

The erection of wind turbines is preceded by an Environmental Impact Assessment which involves an estimation of the impact of wind turbines on people living nearby. One impact to be assessed is sound. It is important to generate scientifically based knowledge in order to describe how the sound will be perceived in order to ensure that the sound from wind turbines will not have an adverse health effect on the residents in the area. The objective of a joint analysis of the results from two field studies was to show the relationship between sound levels from wind turbines at the dwelling and the perception of the sound, as well as to describe factors influencing this relationship. The objective of a diary study, where the participants reported how often they were home and if so, if they were outdoors, was to describe how often the sound from wind turbines is heard and at which meteorological conditions. The results of long term sound measurements were compared with calculated values applying different models in order to study the accuracy of the sound propagation model used today. Another aim was to see if variations of meteorological factors influenced the sound propagation to such a degree that they should be included in the calculations of sound levels.

The joint analyses of the two studies of annoyance confirm and strengthen previous reported data. The proportion that notices wind turbine sound as well as the proportion that were annoyed by the sound increased with increasing sound levels. The probability to be annoyed by the noise was larger if the turbines were visible from the dwelling and for people living in an agricultural landscape, whereas differences in terrain had no impact. The only association between sound level and health related variables other than annoyance was that of being disturbed in the sleep.

Participants in the diary study more often reported that they could hear sound from the wind turbines when the electrical power increased, i.e. the electricity production increased. A statistically significant relationship between how often the sound was heard and the calculated sound level at the dwelling was found, even though the amount of time the participants spent outdoor varied substantially; the higher calculated sound level, the more often the sound was heard. The diary study also gave some insight in the relationship between hearing and wind speed. The results indicate that the wind turbine sound could be heard also at relatively high wind speeds when the sound is expected to be masked.

Long term measurements of wind turbine sound at 550 meters from a modern turbine showed that the calculated levels agreed well with the measured. Sound levels calculated with a parabolic equation model, which takes into account the variation of meteorological factors, did not give a better prediction in comparison with the model commonly used at environmental permit proceedings [Naturvårdsverket 2001]. Meteorological variations are probably only of importance for sound propagation at longer distances.

Meteorological circumstances could however be of importance for estimation of the source sound levels; the largest uncertainty in the calculations.

The studies show that the sound levels vary also within the same wind speed, and indicate that the wind turbine sound could be heard also at wind speeds when it should be masked by other wind induced sounds. This implies that the description in the Environmental Impact Assessment of the sound that the neighbours possibly will hear should be extended, even though the sound propagation model used today is sufficient. Further studies regarding the possibility to hear the sound at high wind speed are needed as the number of participants in the diary study was small. Data also suggest that the risk for sleep disturbance should be further explored.

# 1 Bakgrund

När den moderna vindkraften började byggas ut i slutet av 1990-talet i Sverige var kunskapen sparsam om hur de boende i områden med vindkraft påverkades. Det var osäkert hur nära bostadshus vindkraftverken kunde placeras utan olägenhet. Klagomål på buller framfördes i enstaka fall till miljö- och hälsoskyddsmyndigheten i kommuner med vindkraftsetablering [Pedersen och Persson Waye 2004], men ingen systematisk undersökning av förhållandet mellan ljudnivå och andelen störda av vindkraftverk fanns att tillgå. Det är känt att buller i hemmiljön från t.ex. trafik och närliggande industrier ger sänkt välbefinnande. Indikationer finns också på ett samband mellan buller och stressrelaterade sjukdomar som t.ex. hjärt-kärlsjukdom [Babisch et al. 2005]. Det var därför angeläget att undersöka vid vilka ljudnivåer olägenhet uppstår och att basera regelverket kring vindkraftsetablering på resultatet.

Samband mellan ljud från andra källor i miljön, såsom trafik och industri, och bullerstörning finns publicerade, men vindkraftverk skiljer sig på flera sätt från tidigare studerade ljudkällor. Ljudet från moderna vindkraftverk kommer i huvudsak från turbulens kring rotorbladen när vinden träffar bladen och när bladen rör sig genom luftmassan. Ljudet har en svischande karaktär vilket innebär att ljudnivån ökar och minskar i styrka i takt med rotorbladens rörelse (amplitudmodulerat ljud). Förändringarna beror på att vindens hastighet är olika på olika höjd och på att tornet bromsar upp vinden. Ljudet är alltså oundvikligt och karaktären kan inte ändras annat än marginellt. Ett amplitudmodulerat ljud är lätt att uppfatta och har också befunnits vara mer störande än ett ljud av jämnare karaktär [Bradley 1994, Bengtsson et al. 2004].

Speciellt för vindkraftverk är också att de är påtagliga objekt i landskapet, ofta placerade i landsbygdsområden där de kan uppfattas som främmande inslag. Hur negativt intrånget upplevs beror till viss del på hur miljön kring verket ser ut. I områden med stor andel bebyggelse blir vindkraftverket ett av flera byggnader och det kan därför antas att vindkraften upplevs som mindre störande i mer urbana områden. Terrängen kan också förväntas ha ett visst inflytande. I kuperade landskap tecknar sig vindkraftverket som ett av flera vertikala linjer, medan det i det flacka landskapet utgör ett brott mot den dominerande horisontella linjen. Det visuella intrycket, med rotorbladens rörelse, kan också antas förstärka ljudintrycket fysiologiskt. När två sinnen stimuleras på samma gång kan det leda till ökad uppmärksamhet [Calvert 2001].

Två tvärsnittstudier med syfte att fastställa sambandet mellan nivå av vindkraftsbuller vid bostaden och andelen störda av bullret utfördes därför av Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet, med början år 2000. Resultatet har tidigare redovisats [Pedersen och Persson Waye 2004; 2007], men samanalyser av datamaterialet som kan ge fördjupade svar på hur ljudet uppfattas i olika områden med hänsyn till vindkraftverkens visuella uttryck har ännu inte rapporterats. Det saknas också uppgifter om hur ofta situationer som kan orsaka störning uppstår, d.v.s. hur ofta ljudnivån vid en närboendes

bostad, när den boende är hemma och utomhus, är tillräckligt hög för att kunna uppfattas samtidigt som bakgrundsljud från vinden är så lågt att ljudet inte maskeras.

Ljudet som emitterar från vindkraftverket kommer från en position högt över marken; typiskt från 50–150 m höjd. Ljudet utbreder sig från vindkraftverket så att ljudnivån minskar ju längre från vindkraftverket mottagaren befinner sig. Markförhållanden och den meteorologiska situationen påverkar hur mycket ljudnivån avtar med avståndet. När ljudimmissionsnivån vid en bostad utomhus beräknas antas att det blåser 8 m/s medvind på 10 meters höjd vid vindkraftverket. Naturvårdsverket har utfärdat rekommendationer hur beräkningen ska utföras i Sverige [Naturvårdsverket 2001]. Den förenklade algoritmen som används tar dock inte hänsyn till variationen hos meteorologiska faktorer som relativ fuktighet och temperatur, vilka påverkar luftabsorptionen, utan utgår från en normalsituation. En annan vindhastighetsprofil än den som antas kan leda till en annorlunda spridning av ljudet än det antagna och högre ljudnivåer än förväntat [van den Berg 2006]. Den förenklade ljudutbredningsmodellen som används idag behöver därför prövas gentemot mätningar av immissionsljudnivån och gentemot andra beräkningsmodeller.

## 2 Projektets mål

På Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet, har människors upplevelser av ljud från vindkraftverk studerats både experimentellt och i fältstudier i flera projekt inom forskningsprogrammen Vindforsk och Vindval. Det övergripande syftet har varit:

- Att beskriva ett samband mellan ljudnivå från vindkraftverk vid bostaden och andelen störda av ljudet, samt
- Att beskriva faktorer som påverkar detta samband.

I den studie som nu avslutas i samarbete med Teknisk akustik, Chalmers, har tre kompletterande frågeställningar varit aktuella:

- Hur påverkas bullerstörningen av vindkraftverkens visuella intryck i olika landskap?
- Hur ofta hör de kringboende ljud från vindkraftverk och hur ofta är ljudet störande?
- Hur väl stämmer den ljudutbredningsmodell som används idag och har meteorologiska faktorer så stor betydelse att de bör tas med vid beräkningen av ljudimmission?

I den här rapporten redovisas de viktigaste resultaten från de studier som utförts.

### 3 Projektledning och medverkande

I projektet har följande personer medverkat:

**Kerstin Persson Waye**, Docent, MedDr, miljömedicin. Arbets- och miljömedicin, Sahlgrenska akademien, Göteborgs universitet. Projektledare. E-post: kerstin.persson-waye@amm.gu.se.

**Eja Pedersen**, MedDr, miljömedicin. Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet. Sektionen för Ekonomi och Teknik, Högskolan i Halmstad.

**Jens Forssén**, docent, TeknDr, akustik. Teknisk akustik, Chalmers.

**Irène Lauret Ducosson**, MSc, akustik. Teknisk akustik, Chalmers.

**Martin Björkman**, DrMedvet, akustik. Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet.

**Agneta Agge**, forskningslaborant, Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet.

**Yvonne Löfquist**, projektassistent, Arbets- och miljömedicin, Göteborgs universitet.

**Martin Schiff**, MSc, akustik. Teknisk akustik, Chalmers.

## 4 Metoder

### 4.1 Studieområden

Totalt 12 områden med vindkraft som bedömdes ha tillräckligt stor population för att statistisk säkerhet skulle kunna uppnås utgjorde studieområden för de två tvärsnittstudierna 2000 och 2005 (tabell 1). De 12 studieområdena varierade i topografi (platt eller kuperad) och bebyggelsestruktur (landsbygd eller villaområde). Endast områden med minst ett vindkraftverk med märkeffekten 500 kW eller mer valdes ut till studien, men om det fanns mindre verk inom samma område medtogs ljudnivån från dessa.

**Tabell 1. Studieområden.**

Area	Kommun	Vindkraftverk				Topografi	Bebyggelse
		Antal	Navhöjd (m)	Märkeffekt (kW)	Startår		
A	Laholm	2	50	600	1998	Platt	Landsbygd
B	Laholm	3	50	600	1998	Platt	Landsbygd
C	Laholm	8	50	600	1998	Platt	Landsbygd
D	Laholm	1	47	600	1999	Platt	Villaområde
		1	40	150	1995		
E	Laholm	1	65	500	1999	Platt	Landsbygd
F	Öckerö	1	50	660	1999	Kuperad	Villaområde
G	Tjörn	1	60	850	2004	Kuperad	Landsbygd
H	Orust	1	65	600	2001	Kuperad	Landsbygd
I	Lysekil	2	55	750	2000	Kuperad	Villaområde
		2	40	550	1995		
J	Varberg	3	41	600	1995	Platt	Landsbygd
		1	30	250	1993		
		7	30	225	1991		
		2	30	225	1994		
K	Landskrona	2	65	1,500	2002	Platt	Landsbygd
		2	41	550	1996		
L	Simrishamn	1	42	500	1996	Platt	Villaområde
		3	32	225	1993		

För att i de nya studierna studera ljudutbredning med hänsyn tagen till meteorologiska faktorer i olika terräng och hur ofta och i vilka situationer de kringboende uppfattar ljudet valdes tre landsbygdsområden som ingått i de tidigare tvärsnittstudierna: Område K, Område H och Område G. Område K avgränsades så att endast den del där de två större vindkraftverken är placerad studerades. Terrängen i Område G och Område H är kuperad med ett vindkraftverk placerat på en höjd med ett varierat landskap (mindre åkrar, höjder, träd) runt omkring. En översikt över vindkraftverken och de mätningar som gjorts i de tre områdena visas i tabell 2.



**Tabell 2. Översikt över de tre studieområdena som valdes för vidare studier.**

	Område H	Område G	Område K
<i>Vindkraftverk</i>			
Antal vindkraftverk	1	1	2
Typ av vindkraftverk	Enercon E40 600 kW	Vestas V52 850 kW	Enercon E66 1,5 MW Avstånd mellan verken: 290 m
Navhöjd, m	65	60	65
Rotordiameter, m	44	52	70
Ljudeffektnivå, dB(A)*	100,0	102,0	100,5
<i>Ljudmätningar</i>			
Mätperiod	5/9–25/9 2006	–	16/11–15/12 2006
Avstånd från mätvagn till vindkraftverk, m	434	–	534
Tillgång till driftsdata från verket	Ja	Nej	Ja
<i>Dagboksstudien</i>			
Antal utvalda hushåll	19	21	38
Antal deltagande personer	5	11	8
Studieperiod	9/9–24/9 2006	25/10–14/11 2006	1/6–18/6 2007

\*Vid 8 m/s på 10 m höjd vid verket, osäkerhet ±1 dB, uppgift från tillverkaren.

## 4.2 Tvärsnittsstudierna

Boende i hushåll i de 12 studieområdena som enligt preliminära ljudutbredningsberäkningar exponerades för 30 dB(A) eller mer av ljud från vindkraftverk valdes till studiepopulation för tvärsnittsstudierna. I områden med många hushåll reducerades antal hushåll i studiepopulationen slumpvis för att undersökningen inte skulle bli för stor och kostsam. En slumpvis utvald person i varje hushåll ombads svara på frågor i en enkät (n = 1 822). Enkäten handlade om upplevelse av faktorer i boendemiljön generellt, men innehöll också specifika frågor om vindkraft. Flera frågor mätte respons av ljud från vindkraftverk. Den fråga som används i denna rapport som mått på upplevelsen av ljud från vindkraftverk var: ”Ange 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 potentiella påverkansfaktorer varav vindkraftsljud var en. Frågan besvarades på en femgradig skala med skalstegen ”märker inte”, ”märker, men störs inte”, ”störs inte särskilt mycket”, ”störs ganska mycket” och ”störs mycket”. Benämningen ”märker ljud från vindkraftverk” används i den här rapporten för de fyra översta skalstegen (från ”märker, men störs inte” till ”mycket störd”). Benämningen ”störs av ljud från vindkraftverk” används för de två översta skalstegen (”störs ganska mycket” och ”störs mycket”). Deltagarna fick också ange vilka av åtta föreslagna ljudkaraktärer som var störande. Benämningarna

av ljudkaraktärerna fastställdes i en tidigare experimentell studie med syfte att undersöka betydelsen av frekvensfördelningen i ljud från vindkraftverk [Persson Waye och Öhrström 2002] och kompletterades i de här studierna med lokala benämningar. Attityden till vindkraftverk mättes i flera frågor. Den generella attityden och attityden till vindkraftverkens påverkan på landskapsbilden mättes med femgradiga skalor från ”mycket positiv” till ”mycket negativ”. Deltagarna fick också ta ställning till 14 omdömen om vindkraftverk som utvecklats av Karin Hammarlund och användes med hennes tillstånd. Känslighet för buller mättes med en fyrgradig skala från ”inte alls känslig” till ”mycket känslig”. Vidare innehöll enkäten frågor om ålder, kön och hälsa, så som förekomsten av långvariga sjukdomar, sömnbesvär och stressrelaterade symptom.

För varje person i studiegruppen beräknades nivån av vindkraftsljud utomhus vid deras bostad utifrån vindkraftverkens ljudeffektnivå (data från tillverkarna) och Naturvårdsverket ljudutbredningsmodell [2001]. I områden med flera vindkraftverk adderades ljudtrycksnivåerna vid bostaden logaritmiskt. Studiegruppen delades in efter de beräknade ljudnivåerna i 2,5 dB(A)-intervall så att andelen som stördes av ljudet vid olika ljudnivåer kunde jämföras och visas grafiskt.

En databas med alla variabler mätta i enkäten och beräknade ljudnivåer vid de svarandes bostad upprättades. Av de tillfrågade var det 1 095 personer som hade returnerat enkäten och svarat på de huvudfrågor som ingick i de fortsatta analyserna (svarsfrekvens: 60 %).

Resultatet presenteras i reella tal och som andel av antalet deltagare (%). För procenttal har 95 % konfidensintervall (KI) beräknats enligt Wilson metoden [Altman et al. 2000]. Konfidensintervallet indikerar inom vilka värden procenttalet återfinns med 95 % sannolikhet om undersökningen upprepas ett oändligt antal gånger i olika urval av populationen. För att undersöka samband mellan två variabler användes Spearmans rangkorrelationstest ( $r_s$ ). Resultatet av testet är ett tal mellan -1 och 1. Värden nära -1 och 1 innebär att det finns ett statistiskt samband (negativt respektive positivt) mellan variablerna vilket visas genom att p-värdet är <0,05; värden nära 0 innebär att det inte finns ett sådant samband. Skillnader mellan två grupper testades med Mann-Whitney U-test (Z); p-värden <0,05 tolkades som en statistiskt signifikant skillnad. För att undersöka sambandet mellan flera variabler användes binär logistiskt regression. Resultatet visas som oddskvoter (på engelska odds ratios = OR) med 95 % konfidensintervall. Om båda gränsvärdena för konfidensintervallet är >1 tolkas det som att det finns ett positivt samband; om båda gränsvärdena är <1 är sambandet negativt.

För att undersöka mer komplexa samband användes strukturell ekvationsmodellering. Först skapades en modell utifrån observationer i de tidigare analyserna. Modellen prövades sedan i olika grupper av deltagare i studien. Resultatet presenteras grafiskt i figur 4. Statistiskt signifikanta samband visas med heldragna linjer och standardiserade korrelationskoefficienter mellan 0 och 1; ju närmare 1, ju starkare samband. Streckade linjer visar att inget samband kunde påvisas.

## 4.3 Dagboksstudien

Personer boende kring vindkraftverken i de tre undersökningsområdena tillsändes ett brev med förfrågan om de ville delta i en studie med syfte att undersöka hur ofta ljudet från vindkraftverken hördes i deras hemmiljö. Urvalet var inte slumpmässigt, utan en person i varje hushåll inom 1 000 m från vindkraftverket som fanns med på adresslistor köpta av ett distributionsbolag och vars telefonnummer gick att få tag på, förfrågades. Personerna kontaktades sedan per telefon. Personer som avböjde att delta uteslöts från undersökningen. I några fall föreslog den avböjande personen själv en annan person inom samma hushåll och den personen inkluderas då i undersökningen efter sitt godkännande. Deltagarna fick arvode.

Varje deltagare fyllde i ett dagboksblad per dag under undersökningsperioden som var cirka 3 veckor (tabell 2). Dagboksbladet skickades in dagen efter för att undvika att deltagarna glömde fylla i dem och senare försökte komma ihåg uppgifterna i efterhand. Deltagarna ombads att för varje timme under dygnet notera var de befann sig (Inne, Ute kring bostaden, Promenad eller liknande i området, Inte hemma) och om de hörde ljud från vindkraftverket (Hörde inte, Hörde men stördes inte, Hörde och stördes). Dessutom uppmanades deltagarna att notera vilka andra tydliga ljud som hörde utomhus. Det fanns också plats för övriga kommentarer. I slutet av undersökningsperioden svarade deltagarna på en kort enkät med frågor om deras attityd till vindkraft och hur ljudkänsliga de upplevde sig vara. Data från vindkraftverket hämtades från sparade filer hos driftstatistiken. Data bestod av medelvindhastighet per timme vid navet, medelvärde per timme av rotorans varvtal och den elektriska medeleffekten per timme.

Resultatet från dagboksstudien redovisas i reella tal och procent. Samband mellan beräknad ljudnivå och andelen tillfällen då deltagarna hörde ljud från vindkraftverk vid utomhusvistelse studerades med linjär regression ( $r$ ). För att studera skillnaden i medelvärde av effekt, varvtal och vindhastighet mellan två situationer användes Student's  $t$ -test ( $t$ ).

## 4.4 Mätningar av ljud och meteorologi

Ljud från vindkraftverk spelades in och mättes (immissionsmätningar) med utrustning placerad i en mobil mätstation (husvagn). En mikrofon fästes dikt an 10 cm från centrum på en vertikal skiva (1 x 1,2 m) på utsidan av mätvagnen på en höjd av 1,5 m från marken. En primär vindskärm (diameter 10 cm) och en sekundär vindskärm (diameter 40 cm) placerades över mikrofonen. Ljudet spelades in i 10 minuter varje timme under 24 timmar varje dygn under inspelningsperioden.

Meteorologiska förhållanden mättes vid mätvagnen. Mätningarna gjordes med mätstation Davis Weather Monitor II, med logger. För varje enminutsperiod sparades vinddata från 10 m höjd (medelvärdesbildad hastighet och riktning samt toppvärde) och andra data från 1 m höjd (temperatur, relativ

luftfuktighet och statiskt lufttryck). Data hämtades också från vindkraftverket (navhöjd) i form av vindhastighet, uteffekt och rotnors varvtal genom driftstatistiken som Vattenfall AB ansvarar för. Data levererades som medeltal per 10-minutersperiod under mätperioden. På en av studieplatserna, Område G, misslyckades inhämtningen av data trots stora ansträngningar från tillverkaren och ägaren. Uppgifter från verket saknas därför.

Mätningar av verkets ljudeffektnivå (emissionsmätning) i område K utfördes så långt det var rimligt enligt standard [IEC 2002]. Standarden beskriver en metod för att bestämma den A-vägda ljudeffektnivån som funktion av vindhastighet vid 10 m höjd. Enligt denna metod mäter man ljudtrycksnivån nära verket, för att få god signalnivå i förhållande till brus och liten inverkan av atmosfäriska ljudutbredningsförhållanden, men samtidigt inte för nära verket i förhållande till ljudkällans storlek. Enligt standard mättes A-vägd nivå och tersbandsnivåer med mikrofon på en hård mätskiva i markplan, på ett avstånd 100 m från verket i vindriktningen. Den mätskiva som användes var rektangulär, med måtten 1,12 x 1,25 m, gjord av 12 mm plywood. Enligt standard mättes vindens hastighet och riktning i en punkt där verkets inverkan på luftflödet är liten. Vinddata och ljuddata medelvärdesbildades över perioder på en minut, både för verket i drift och för mätning av bakgrundsnivå. Vid denna mätplats fanns ett andra vindkraftverk, ca 300 m från det första, i sydlig riktning. Därför undveks emissionsmätningar vid nordlig vindriktning, då mätmikrofonen skulle ha hamnat mellan de två verken och man hade fått en oönskad påverkan av resultaten. Vid mätning av bakgrundsnivån var båda verken avstängda.

Enligt standard bestäms den A-vägda ljudtrycksnivån vid heltalsvärden hos vindhastigheten (meter per sekund). Bestämningen görs från ett andra ordningens polynom som anpassats till uppmätta ljudnivåer som funktion av vindhastighet. Ljudtrycksnivåerna medelvärdesbildas (energimässigt) över minst tre mätningar vid varje vindhastighet. Polynom anpassas både till mätningarna vid drift och till mätningarna av bakgrundsnivån. Den slutliga ljudeffektnivån för verket bestäms utgående från de två polynomen genom korrektion för bakgrundsnivån. Denna ljudeffektnivå användes sen för att beräkna ljudnivån vid immissionspunkten.

De akustiska mätningarna gjordes med ljudnivåmätare Brüel & Kjær 2260 med förlängningskabel till mikrofonen. Utrustningen kalibrerades innan och efter varje mätserie. För att minska vind-inducerat brus vid mikrofonen på mätskivan användes enligt standard både en primär och en sekundär vindskärm. Insättningsdämpningen för vindskydden mättes för diffust ljudfält i efterklangsrums och användes för att korrigera data (1 dB(A) inverkan).

## 4.5 Modellering av ljudutbredningen

Ljudnivån vid mätpunkten beräknades dels med den av Naturvårdsverket rekommenderade beräkningsmodellen [2001], dels med en parabolisk ekvationsmodell (PE-metoden). Naturvårdsverkets modell skiljer på utbredning över land och över vatten. Här användes den förenklade algoritmen för utbredning över land vid kortare avstånd än 1 km. Modellen förutsätter medvind 8 m/s på 10 m höjd. PE-metoden är en numerisk beräkningsmodell där hänsyn tas till förhållanden längs utbredningsvägen, t.ex. mark och vind där också andra vindhastighetsprofiler än logaritmisk kan användas. Följande parametrar inkluderades i modellen: vindhastighet på 10 m höjd för antagen logaritmisk profil, vindkraftsverkets akustiska uteffekt vid olika frekvenser hos ljudet, temperaturgradient och temperatur, relativ luftfuktighet och statiskt lufttryck (temperatur, luftfuktighet och lufttryck bestämmer luftabsorptionen). Ett urval av 12 uppmätta situationer i Område K där vindhastigheten varierade från 3,3 m/s till 9,1 m/s (10 m höjd) och ljud från vindkraftverk hördes på inspelningarna användes som ett beräkningsexempel.

## 5 Störningsupplevelser av ljud från vindkraftverk

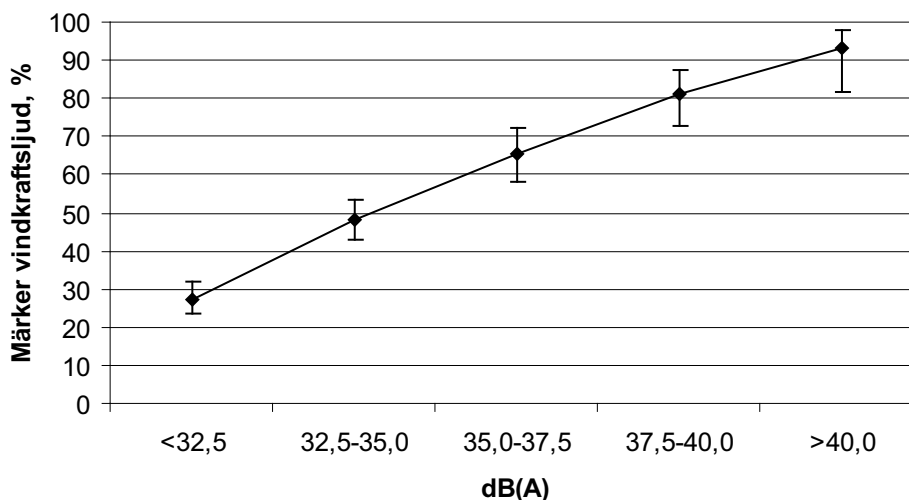
### 5.1 Samband mellan ljudnivå, hörbarhet och störning

För att undersöka sambandet mellan ljud från vindkraftverk och upplevelsen av ljudet delades personerna som svarat på enkäten in i grupper efter den beräknade ljudnivån vid deras bostad. Antal personer i de fem ljudnivå-intervallerna presenteras i tabell 3.

Tabell 3. Antal personer inom de fem ljudnivåintervallerna.

dB(A)	<32,5	32,5–35,0	35,0–37,5	37,5–40,0	>40,0	Totalt
n	445	332	168	106	44	1 095

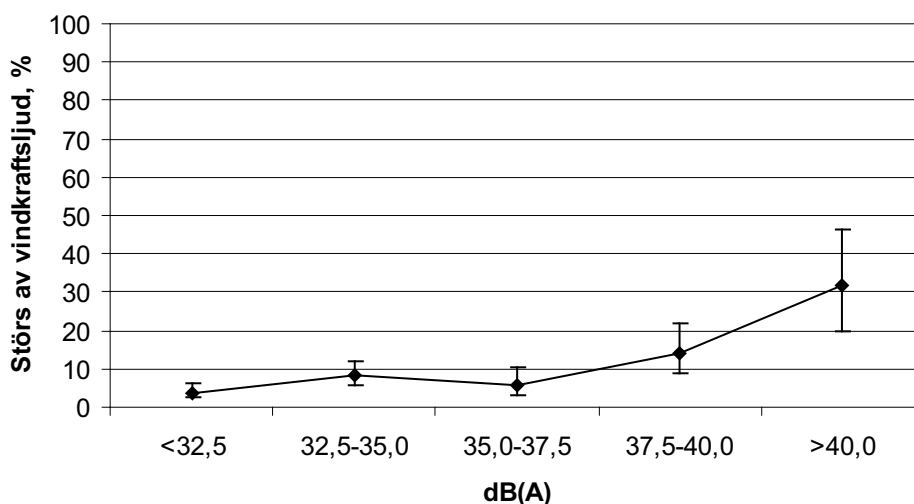
Det fanns ett statistiskt säkerställt samband mellan nivå av vindkraftsljud vid bostaden och andelen som märkte ljudet och/eller stördes av ljudet ( $r_s = 0,401$ ,  $n = 1\,095$ ,  $p < 0,001$ ). Andelen som märkte vindkraftsljud vid sin bostad var över 80 % i ljudintervallen 37,5–40 dB(A) och >40, 0 dB(A) (figur 1).



Figur 1. Andelen som märker ljud från vindkraftverk i relation till ljudnivåer vid bostaden med 95 % konfidensintervall (n = 1 095).

Andelen störda ökade också med ökande ljudnivå (figur 2). Andelen störda var lägre än 10 % i de lägre ljudintervallen, men ökade till 14 % i intervallet 37,5–40,0 dB(A) och till 32 % i intervallet >40, 0 dB(A). Osäkerheten i det högsta intervallet är dock stor på grund av få personer.

Av dem som stördes av ljud från vindkraftverk (n = 84) var det 85 % som angav att de stördes av den svischande karaktären i ljudet, 72 % av vinande, 57 % av rungande och 55 % av den pulserande karaktären. Mindre vanligt var att störas av skvalpande, skrapande, dovt ljud eller en ton.



Figur 2. Andelen som stördes ganska mycket eller mycket av ljud från vindkraftverk i relation till ljudnivåer vid bostaden med 95 % konfidensintervall (n = 1 095).

## 5.2 Omgivningsfaktorer som påverkar upplevelsen av ljud

Av personerna som deltog i studierna uppgav 78 % att de kunde se minst ett vindkraftverk från sin bostad (tabell 4). Andelen ökade med ökad ljudnivå. Mer än 90 % kunde se minst ett vindkraftverk från sin bostad i ljudnivå-intervallen över 35 dB(A). Andelen personer som bodde i områden med flack terräng, i jämförelse med kuperad terräng, var 66 %. Andelen personer som bodde i jordbruksområden, i jämförelse med villaområden, var 30 %.

Eftersom andelen personer som såg vindkraftverk och andelen personer som bodde i flack terräng inte var oberoende av ljudnivån användes multipel logistisk regression för att undersöka hur synbarhet, terräng och urbaniseringsgrad påverkar sannolikheten för att märka respektive störas av ljud från vindkraftverk.

Tabell 4. Synlighet, terräng och urbaniseringsgrad i förhållande till ljudnivå. Andel personer.

	<32,5	32,5-35,0	35,0-37,5	37,5-40,0	>40,0	Totalt
<i>Synbarhet, %</i>						
Ser	66	80	92	94	98	78
Ser inte	34	20	8	6	2	22
<i>Terräng, %</i>						
Platt	52	65	84	89	86	66
Kuperad	48	35	16	11	14	34
<i>Urbaniseringsgrad, %</i>						
Jordbruk	33	22	27	32	66	30
Villaområde	67	78	73	68	34	70

Sannolikheten att märka ljud från vindkraftverk ökade med ökad ljudnivå (tabell 5). Sannolikheten att höra ljudet var högre för personer som också såg vindkraftverk och för dem som bodde i jordbruksområden jämfört med dem som bodde i villaområde. Terrängen hade inget statistiskt signifikant inflytande på sannolikheten att höra ljud från vindkraftverk.

**Tabell 5. Samband mellan sannolikheten att höra ljud från vindkraftverk och synlighet, terräng och urbaniseringsgrad med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Märker ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	2,08	1,81–2,40
Synlighet (ser inte/ser)	2,40	1,67–3,45
Terräng (platt/kuperad)	0,78	0,57–1,07
Urbanisering (villa/jordbruk)	1,45	1,06–1,99

Sannolikheten att störas ganska mycket eller ganska mycket av ljud från vindkraftverk ökade också med ökad ljudnivå (tabell 6). Sannolikheten var större om vindkraftverken var synliga från bostaden. Av de 82 personerna som rapporterade att de var störda av ljud från vindkraftverk, så såg 81 personer minst ett vindkraftverk från sin bostad eller tomt. Det extremt höga sambandet mellan störning och synlighet innebär att siffrorna som redovisas i den logistiska regressionen för synlighet är överdrivna. Sannolikheten att störas var också högre i jordbrukslandskap, medan typen av terräng inte hade någon inverkan.

**Tabell 6. Samband mellan störning av ljud från vindkraftverk och synlighet, terräng och urbaniseringsgrad med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Störs av ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	1,46	1,22–1,75
Synlighet (ser inte/ser)	13,97*	1,90–102,83
Terräng (platt/kuperad)	0,99	0,53–1,87
Urbanisering (villa/jordbruk)	2,90	1,78–4,74

\*Överdrivet värde på grund av det starka sambandet mellan störning och synlighet.

### 5.3 Individuella faktorer med samband till upplevelsen av ljud

Medelåldern bland de svarande var 50 år (standardavvikelse: 15 år) och 59 % var kvinnor. Det fanns inget samband mellan upplevelsen av vindkraftsljud och ålder eller kön.

Av de svarande uppgav 51 % att de var känsliga eller mycket känsliga för ljud. Fler kvinnor än män angav att de var ljudkänsliga: 54 % av kvinnorna och 48 % av männen var känsliga eller mycket känsliga för buller ( $z = -3,04$ ,  $n = 1\,072$ ,  $p < 0,01$ ). Det fanns inget samband mellan ljudkänslighet och att märka ljud från vindkraftverk. Personer som rapporterade att de var ganska eller mycket ljudkänsliga märkte inte ljud från vindkraftverk i större grad än de som rapporterade att de inte var ljudkänsliga (tabell 7).

**Tabell 7. Samband mellan att märka ljud från vindkraftverk och ljudkänslighet med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Märker ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	2,29	2,00–2,62
Ljudkänslighet* (4-gradig skala från "inte alls känslig" till "mycket känslig")	1,15	0,99–1,34

\*Med hänsyn tagen till kön.



Personer som var ljudkänsliga var däremot oftare störda av ljudet från vindkraftverk än andra vid samma ljudnivå (tabell 8).

**Tabell 8. Samband mellan störning av ljud från vindkraftverk och ljudkänslighet med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Störs av ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	1,70	1,42–2,04
Ljudkänslighet* (4-gradig skala från "inte alls känslig" till "mycket känslig")	1,73	1,32–2,27

\*Med hänsyn tagen till kön.

Av de svarande angav 10 % att de var negativa eller mycket negativa till vindkraftverk, och 24 % att de var negativa till vindkraftverkens påverkan på landskapsbilden. Det fanns ett samband mellan de två attitydvariablerna ( $r_s = 0,603$ ,  $n = 1\,070$ ,  $p < 0,001$ ); personer som var negativa till vindkraftverk generellt var ofta också negativa till vindkraftverkens påverkan på landskapsbilden. Det fanns dock en grupp som inte var negativa till vindkraftverk generellt, men som var negativa till vindkraftverkens påverkan på landskapsbilden (15 %).

Det fanns inget samband mellan ljudnivå och inställningen till vindkraftverk ( $r_s = -0,005$ ,  $n = 1\,083$ ,  $p = 0,869$ ) eller inställningen till landskapspåverkan ( $r_s = 0,023$ ,  $n = 1079$ ,  $p = 0,445$ ). Personer som bodde nära vindkraftverken var alltså inte mer negativa än personer som bodde längre bort. Däremot fanns det ett samband mellan attityd och om man stördes av ljudet eller ej. Personer som stördes av ljud från vindkraftverk var oftare negativa till verken än de som inte stördes, oavsett ljudnivå (tabell 9). Det går inte att säga om de som stördes av ljudet blev negativa till vindkraftverk, eller om de som var negativa till vindkraftverk stördes lättare, bara att det fanns ett samband.

**Tabell 9. Samband mellan störning av ljud från vindkraftverk och attityd med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Störs av ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	1,67	1,39–2,01
Attityd till vindkraftverk (5-gradig skala från "mycket positiv" till "mycket negativ")	2,24	1,80–2,79

Personer som stördes av ljudet var också oftare negativa till vindkraftverkens inverkan på landskapsbilden än de som inte stördes (tabell 10). Inte heller här går det att säga vad som är orsak och vad som är verkan.

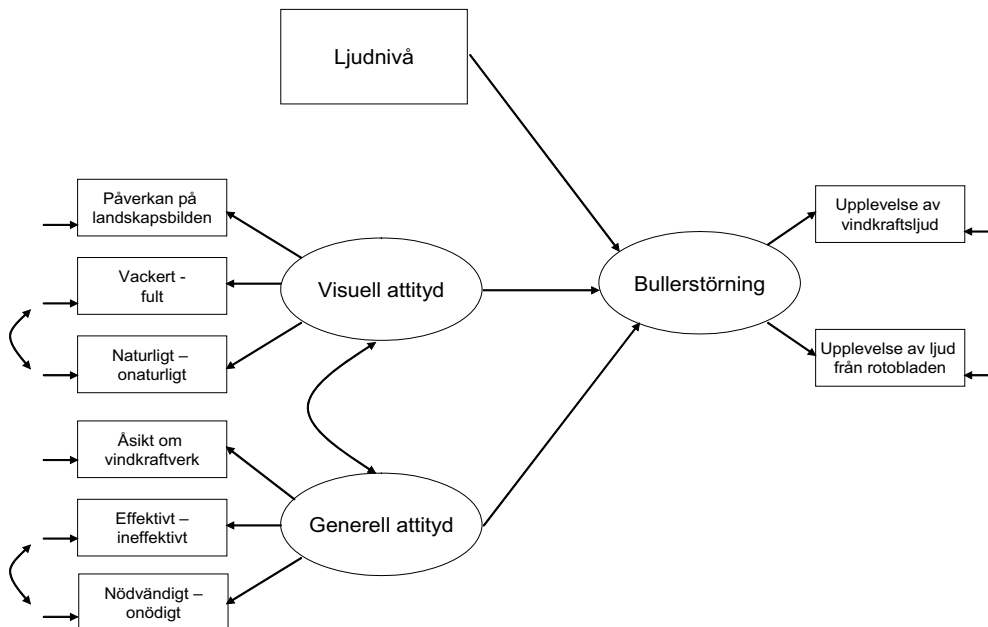
**Tabell 10. Samband mellan störning av ljud från vindkraftverk och visuell attityd med hänsyn tagen till ljudnivå.**

Störs av ljud från vindkraftverk	OR	95 % KI
Ljudnivå, 5 dB(A)-intervall	1,53	1,25–1,88
Attityd till vindkraftverks påverkan på landskapsbilden (5-gradig skala från "mycket positiv" till "mycket negativ")	5,24	3,86–7,10

Av de 14 beskrivningar av vindkraftverk som deltagarna i studien hade att ta ställning till var de fyra mest valda "miljövänligt" (80 %), "nödvändigt" (42 %), "effektivt" (33 %) och "fult" (31 %).

## 5.4 Samanalyser av påverkansfaktorer

För att undersöka hur vindkraftens visuella intryck påverkade bullerstörning i olika miljöer skapades en teoretisk modell som innehöll både latent (bakomliggande) variabler och mätta variabler (figur 3).



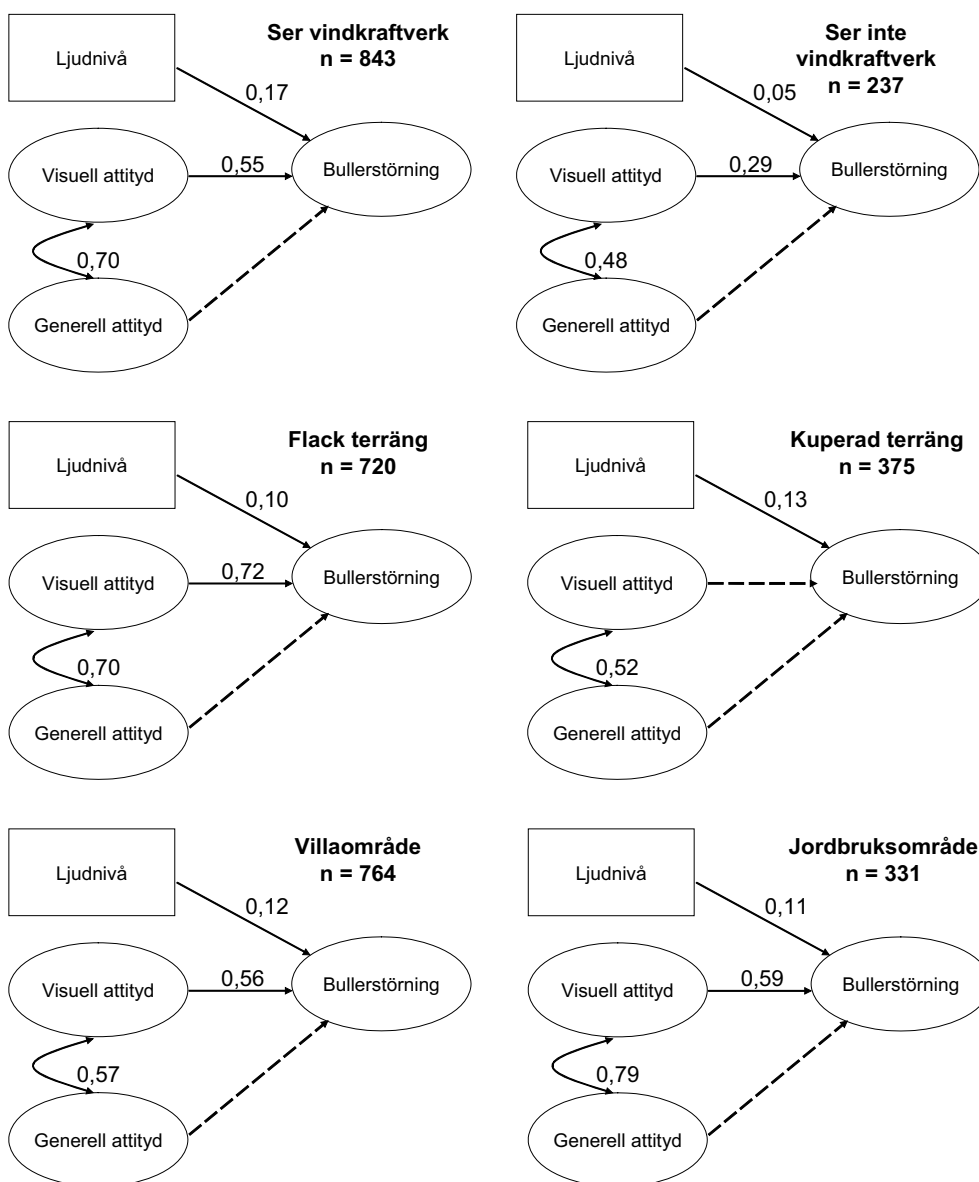
Figur 3. Teoretisk modell över hur den visuella och generella attityden till vindkraftverk påverkar risken att störas av ljud från vindkraftverk.

Bullerstörning antogs vara beroende av ljudnivån, men också av attityden till vindkraftverkens visuella påverkan i landskapet och av den generella attityden. Upplevelse av ljud, d.v.s. om de svarande i studierna hörde eller stördes av ljud från vindkraftverk, samt upplevelsen av ljud från rotorbladen antogs mäta bullerstörning. Visuell attityd mättes med frågan om vindkraftverkens påverkan på landskapsbilden och klassificering av vindkraftverken som vackra eller fula, och naturliga eller onaturliga. Den generella attityden mättes med frågan om inställningen till vindkraftverk och klassificeringen effektivt eller ineffektivt, och nödvändigt eller onödigt.

Modellen prövades bland svaranden som såg vindkraftverk från sin bostad i jämförelse med dem som inte såg vindkraftverk, bland dem som bodde i flack terräng jämfört med kuperad terräng och bland dem som bodde i villaområden jämfört med dem som bodde i jordbruksområden (figur 4). I alla grupper ökade sannolikheten att störas med ökad ljudnivå. Störst skillnad vad det mellan dem som såg vindkraftverk och dem som inte såg vindkraftverk. Bland dem som såg vindkraftverk förklarade ljudnivå en större del av variationen i störning än bland dem som inte såg vindkraftverk. I ingen av grupperna som modellen prövades i hade den generella attityden till vindkraftverk inflytande över störning av ljud från vindkraftverk. Däremot fanns det ett samband mellan den visuella attityden och bullerstörning i flera grupper. Sambandet var starkare bland dem som såg vindkraftverk från sin bostad än

bland dem som inte såg vindkraftverk. Sambandet var också starkare bland dem som bodde i flack terräng jämfört med dem som bodde i kuperad terräng, där sambandet inte var statistiskt signifikant. Skillnaden var liten mellan dem som bodde i villaområden och dem som bodde i landsbygdsområden.

Modellen passade data i alla grupper (normerad  $\chi^2 \leq 2,8$ ; CFI  $\geq 0,99$ ; RMSEA  $\leq 0,05$ ; för förklaring se Pedersen och Larsman [2008]).



Figur 4. Jämförelse mellan svaranden som såg vindkraftverk och dem som inte såg (översta raden), dem som bodde i flack terräng och dem som bodde i kuperad terräng (mellersta raden) och dem som bodde i villaområde och dem som bodde i jordbruksområden (nedersta raden). Heldragna linjer indikerar statistiska samband med den standardiserade korrelationskoefficienten utskrivna, streckade linjer betyder att inget statistiskt samband kunde påvisas.

## 5.5 Vindkraftsljuds påverkan på hälsa och välbefinnande

Föra att ytterligare undersöka hur vindkraftverksljud påverkar hälsa och välbefinnande bland dem som bor i närheten av verken studerades sambandet mellan ljudnivån och självrapporterad hälsa, annan än störning. Eftersom hälsa är beroende av ålder och kön så togs hänsyn till dessa parametrar i alla analyser. Det fanns inget samband mellan nivån av ljud från vindkraftverk och de hälsoparametrar som mättes i enkäten; långvarig sjukdom, diabetes, högt blodtryck, tinnitus, hjärt- kärlsjukdom, nedsatt hörsel. Det fanns inte heller något samband mellan ljudnivå och nedsatt välbefinnande eller stresssymptom; huvudvärk, onormal trötthet, värk i nacke, skuldror och leder, spänd och stressad, samt lättirriterad.

Av de svarande angav 25 % att deras sömn på senare tid inte varit särskilt bra, dålig eller mycket dålig. Det fanns inget samband mellan sömnkvalitet och ljudnivå från vindkraftverk. Däremot fanns det ett samband mellan att störas i sömnen av buller (nej/ja) och ljudnivå (OR = 1,16; 95 % KI: 1,00–1,34; med hänsyn tagen till ålder och kön; ljudnivå i 5 dB(A)-intervall). Personer i gruppen >40 dB(A) stördes oftare i sömnen av någon bullerkälla än andra personer (tabell 11).

**Tabell 11. Andelen svarande som angav att de stördes i sömnen av någon bullerkälla.**

	<32,5 n = 441	32,5–35,0 n = 328	35,0–37,5 n = 168	37,5–40,0 n = 106	>40,0 n = 44
Störs i sömnen av bullerkälla	12 %	16 %	14 %	15 %	25 %

## 5.6 Sambandet mellan störning av ljud från vindkraftverk och hälsa och välbefinnande

Det fanns inget samband mellan långvarig sjukdom och störning av ljud från vindkraftverk när hänsyn togs till ljudnivå, ålder och kön. Inte heller diabetes, högt blodtryck, tinnitus, hjärt- kärlsjukdom eller nedsatt hörsel var associerat med störning av ljud.

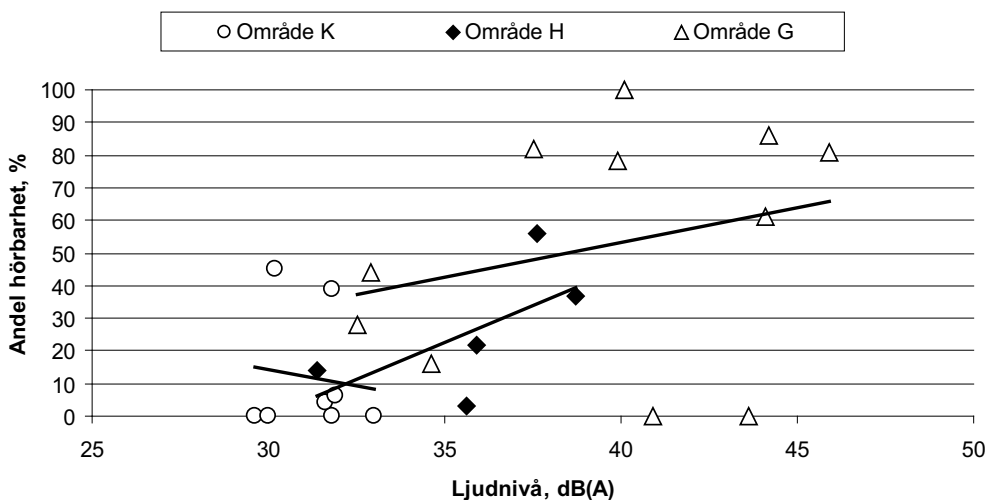
Personer som kände sig spända mer än en gång i veckan var oftare störda av ljud från vindkraftverk än andra (OR = 1,17; 95 % KI: 1,01–1,34; med hänsyn tagen till ljudnivå, ålder och kön). Personer som upplevde sig som lättirriterade var också oftare störda av ljudet än andra (OR = 1,33; 95 % KI: 1,14–1,55; med hänsyn tagen till ljudnivå, ålder och kön). Inget samband hittades mellan störning av vindkraftsljud och symptomen huvudvärk, onormal trötthet, eller värk i nacke, skuldror och leder.

Det fanns ett samband mellan sömnkvalitet och störning av ljud från vindkraftverk (OR = 1,33; 95 % KI: 1,03–1,71; med hänsyn tagen till ljudnivå, ålder och kön). Personer som upplevde sin sömn som dålig (5-gradig skala från ”mycket bra” till ”mycket dålig”) rapporterade oftare störning av ljud från vindkraftverk. Personer som stördes i sin sömn av en bullerkälla var också oftare störda av ljudet än andra (OR = 2,06; 95 % KI: 1,75–2,41; med hänsyn tagen till ljudnivå, ålder och kön).

## 6 Hur ofta ljud från vindkraftverk hörs

Totalt 24 personer fyllde i dagböcker som visade hur ofta de hörde ljud från vindkraftverk. Alla deltagare var permanentboende, medelåldern var 52 år (26–77 år) och 21 var kvinnor. De flesta av deltagarna såg ett eller flera vindkraftverk från sin tomt; endast tre deltagare såg inget alls. Det var stor skillnad i deltagarnas vanor. Deltagarna tillbringade mellan 52 % och 95 % av undersökningstiden hemma; medelvärdet var 76 %. Det var också stor skillnad i hur ofta de var ute. Deltagarna var i medeltal utomhus vid 59 tillfällena, men en deltagare var endast ute 10 gånger och en deltagare 140 gånger.

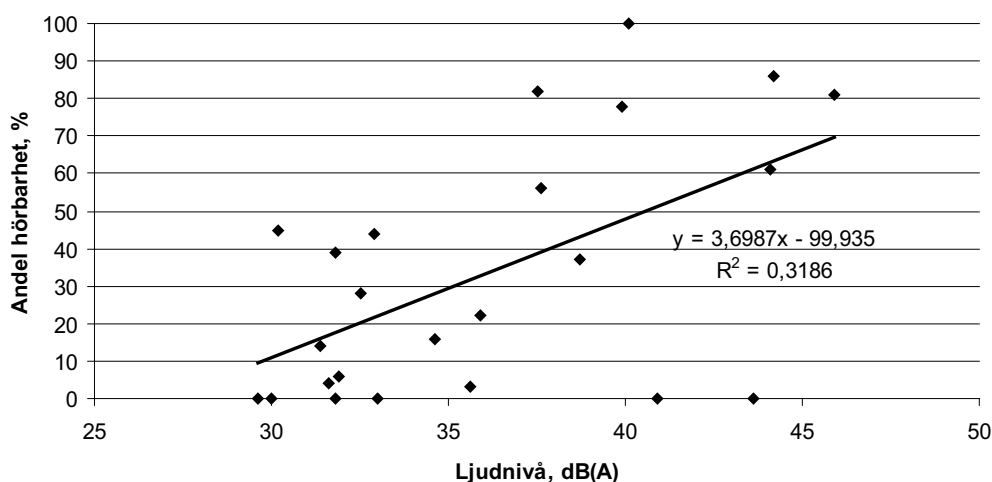
Fyra deltagare hörde aldrig verket under de cirka tre veckor som studien pågick. Den beräknade ljudnivån för dessa deltagare var <33,0 dB(A). En deltagare hörde verket vid endast ett tillfälle. En deltagare, med beräknad ljudnivå 40,1 dB(A) hörde verket vid varje utomhusvistelse. I övrigt varierade andelen utomhusvistelser då verket hördes mellan 14 % och 56 % i Område H, mellan 16 % och 86 % i Område G, och mellan 4 % och 45 % i Område K. Förhållandet mellan andelen av utomhusvistelser som verket hördes och den beräknade ljudnivån illustreras med en regressionslinje för varje område i figur 5.



Figur 5. Sambandet mellan beräknad ljudnivå och andelen av utomhusvistelse då verket hördes, uppdelat på de tre studieområdena.

När alla deltagare studerades med en enda regression (figur 6) var sambandet mellan beräknad ljudnivå och andelen tillfällen då ljudet var hörbart utomhus statistiskt signifikant ( $r = 0,564$ ,  $n = 24$ ,  $p < 0,01$ ). Sambandet illustreras här med en rät linje som visade sig passa data bättre än en logistisk funktion, men som inte kan generaliseras till att gälla andra ljudnivåer eller andra situationer.

Hörbarheten jämfördes med data från vindkraftverket, d.v.s. den momentana effekten, varvtalet och vindhastigheten, i de två områden där dessa var tillgängliga. För åtta av de nio deltagare som hört ljud från vindkraftverk minst en gång under perioden var medelvärdena av effekten, varvtalet och vindhastigheten högre när de hörde ljudet än när de inte hörde det (tabell 12). Skillnaden var dock inte statistiskt signifikant för fler än fyra deltagare.



Figur 6. Sambandet mellan beräknad ljudnivå och andelen av utomhusvistelse då verket hördes.

**Tabell 12. Skillnaden i medelvärden för effekt, varvtal och vindhastighet vid tillfällen då vindkraftverket inte hördes och då det hördes; för deltagare i Område K har data hämtats från närmsta verk.**

Deltagare	Hörs ej	Hörs	Skillnad	p-värde
<i>Effekt (kW)</i>				
H 1	68	137	69	<0,01
H 2	71	1	-70	0,456
H 3	68	126	58	<0,05
H 4	61	190	130	<0,001
H 5	68	151	83	<0,001
K 2	247	293	46	0,729
K 3	204	265	61	0,117
K 4	190	209	19	0,659
K 8	218	455	237	0,123
<i>Varvtal (rpm)</i>				
H 1	19,8	23,9	4,1	<0,05
H 2	20,0	13,9	-6,1	0,293
H 3	20,0	23,9	4,2	<0,01
H 4	19,4	25,7	6,3	<0,001
H 5	19,8	24,0	4,2	<0,05
K 2	12,8	14,7	1,9	0,354
K 3	12,6	13,2	0,7	0,291
K 4	11,7	12,7	1,1	0,234
K 8	12,7	16,5	3,8	0,139
<i>Vindhastighet (m/s)</i>				
H 1	4,79	6,08	1,29	<0,05
H 2	4,84	2,60	-2,24	0,251
H 3	4,79	6,06	1,27	<0,05
H 4	4,67	6,92	2,25	<0,001
H 5	4,80	6,06	1,26	<0,05
K 2	5,69	6,83	1,13	0,333
K 3	5,48	5,99	0,51	0,142
K 4	4,82	5,04	0,21	0,595
K 8	5,55	7,85	2,30	0,141

Materialet samanalyserades för att se om det var någon generell statistisk skillnad i effekt, varvtal och vindhastighet när verket hördes och inte hördes. Ett medelvärde av skillnaden i de tre variablerna för de nio deltagare som hörde ljud från vindkraftverk minst en gång under studieperioden beräknades. Skillnaden i effekt när vindkraftverket inte hördes och när det hördes var 70 kW. Skillnaden var statistiskt signifikant (tabell 13). Ingen statistiskt signifikant skillnad hittades för de övriga variablerna.

**Tabell 13. Medelskillnad i effekt, varvtal och vindhastighet för de nio deltagare i Område H och Område K som hörde ljud från vindkraftverk minst en gång under undersökningsperioden.**

	Medelskillnad	t	Frihetsgrader	p-värde
Effekt (kW)	70	2,54	8	<0,05
Varvtal (rpm)	2,2	1,87	8	0,098
Vindhastighet (m/s)	0,89	1,96	8	0,086

En intressant fråga är i vilka vindhastigheter vindkraftljudet hördes. Man skulle förvänta sig att fördelningen av vindhastigheten när ljudet inte hördes hade två centra: ett vid låga vindhastigheter då ljudeffektnivån var låg och ett vid höga vindhastigheter då andra ljud i omgivningen, t.ex. från träd, bör maskera vindkraftljudet. På motsvarande sätt borde fördelningen av hörbarheten ha ett centrum vid medelvind. Något sådant mönster observerades dock inte när sambandet mellan hörbarhet och vindhastighet studerades. För de fyra deltagare där skillnaden i vindhastighet var statistiskt signifikant var risken att höra ljud från vindkraftverk större om det blåste mer än 5 m/s än om det var mer vindstilla, men för de andra deltagarna gick det inte att hitta en sådan gräns.

Det gick inte heller att hitta något samband mellan vindriktning och hörbarhet. Det fanns ingen statistiskt signifikant förhöjd risk att höra ljudet om det blåste från vindkraftverket mot bostaden ( $\pm 45^\circ$ ) än om det blåste i någon annan riktning.

## 7 Ljudutbredning

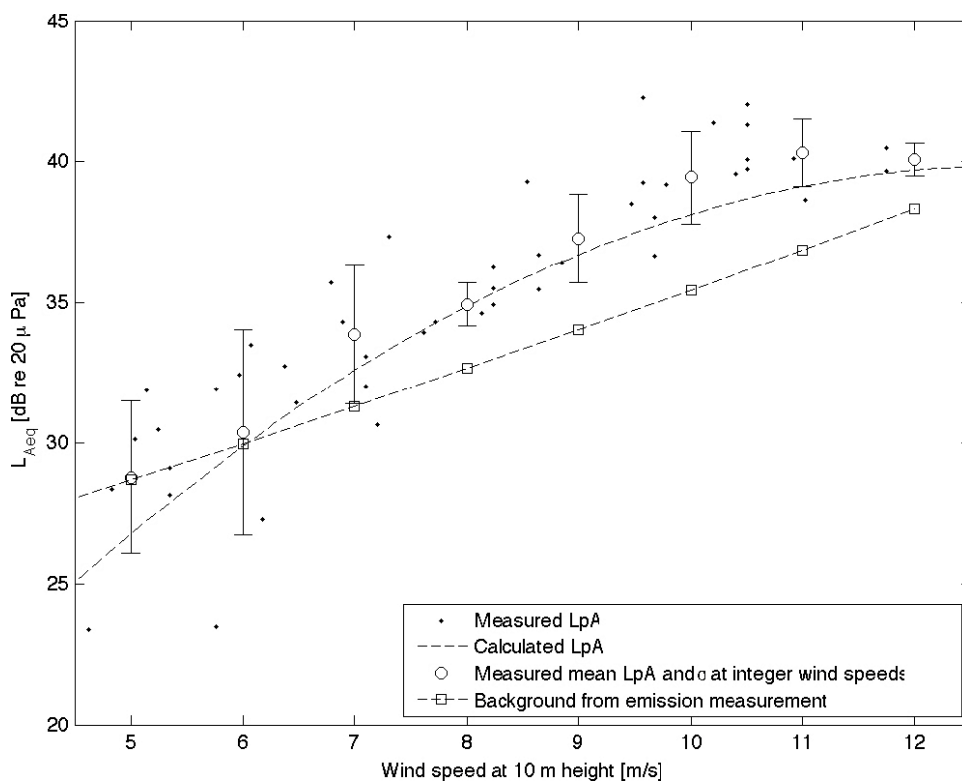
Ljudnivåerna vid immissionsmätningen mättes 550 m från vindkraftverket, med ett andra vindkraftverk på ytterligare ca 300 m avstånd. De tio, en minut långa, ljudsignaler som spelades in under en tiominutersperiod varje timme analyserades med avseende på A-vägd ljudtrycksnivå. Den resulterande A-vägda ljudtrycksnivån för varje sådan tiominutersperiod skattades som medianvärdet av de ingående nivåerna. Värdena plottades som funktion av vindhastighet vid 10 m höjd. Vindhastighet vid 10 m höjd beräknades utifrån den mätta vindhastigheten vid navet (höjd 65 m) från vindkraftverkets driftdata för samma mätperioder. Förhållandet mellan de beräknade vindhastigheterna på 10 m höjd och de mätta vid navhöjd är baserat på data från emissionsmätningarna och framtagna genom linjär regression. Att vindhastighet från navet har använts, i stället för vindhastigheten vid immissionspunkten, beror på att den senare är sämre korrelerad med ljudnivån eftersom ljudnivån huvudsakligen bestäms av den akustiska källstyrkan, d.v.s. av interaktionen mellan vindkraftverket och vinden vid verket.

Nedan sammanfattas resultaten för medvindsfallen (vindriktning inom  $\pm 45^\circ$  från riktningen källa–mottagare). Mätningarna har korrigerats med avseende på skattad inverkan av det andra vindkraftverket (1,5 dB(A)) och insättningsdämpning hos vindskydd (1 dB(A)). Genom att lyssna på ljudsignalerna kunde de en-minutersdata som innehöll störkällor exkluderas ur analysen. Data för vindhastigheter under 5 m/s hade generellt svag signal från vindkraftverket i förhållande till störkällor och har inte tagits med. De mätta nivåerna har jämförts med nivåer beräknade enligt Naturvårdsverket [2001]. För beräkningarna användes den uppmätta källstyrkan enligt emissionsmätningen (se kapitel 4.4). De mätta nivåerna har inte korrigerats för bakgrundsljudnivåer, eftersom bakgrundsljudet, som mättes i samband med emissionsmätningen, var för högt i förhållande till mätresultaten från immissionsmätningen, d.v.s. immissionsdata var inte 3 dB(A) starkare än den bakgrundsnivå som mättes med skiva på mark vid emissionsmätningen. En trolig anledning är att mätuppställningen vid immissionsmätningen, med den vertikala skivan på husvagnen, medförde mindre vind-inducerat buller än mätuppställningen vid emissionsmätningen, med skiva på mark.

De mätta A-vägda ljudtrycksnivåerna visas tillsammans med de beräknade i figur 7. För de mätta nivåerna grupperade till vindhastighet i heltal har dessutom medelvärde och standardavvikelse beräknats (visas med staplar).

Överensstämmelsen mellan mätta och beräknade data var god för vindhastigheter mellan 5 och 12 m/s. Skillnaden mellan uppmätta ljudnivåer och beräknade var inom den statistiska felmarginalen. Den förhållandevis stora spridningen kring medelvärdena av ljudnivån visar att ljudet från vindkraftverk kan variera betydligt i styrka vid en och samma vindhastighet. Genom att lyssna på inspelade ljudsignaler bekräftades också att verket var tydligt hörbart även vid relativt höga vindhastigheter, upp till 12 m/s. Avlyssningen gjordes dock med hörlurar inomhus och skiljer sig således från förhållanden utomhus där störande vindbrus kring huvud och öron interfererar med ljudupplevelsen.





Figur 7. Mätta och beräknade immissionsnivåer för medvindfall i relation till vindhastigheten på 10 meters höjd vid vindkraftverket.

Vid en jämförelse mellan beräkningar gjorda med Naturvårdsverkets beräkningsmodell [2001] och PE-metoden var skillnaden liten och inte signifikant. För den höga källposition som vindkraftverk utgör och det relativt sett korta avståndet (550 m) i förhållande till källhöjden ger således den meteorologiska variationens inverkan på ljudutbredningen en försumbar förändring av den A-vägda ljudtrycksnivån. Beräkning av buller från vindkraftverk vid enkla fall och kortare avstånd kan alltså göras med enklare metoder utan att resultatet blir mindre noggrant.

Mätningarna av ljudnivåerna på 550 meters avstånd från vindkraftverket visade större variation i ljudnivå vid en och samma vindhastighet än vad den avancerade ljudutbredningsmodellen (PE-metoden) visade, trots att den tog hänsyn till variationer i refraktionen under utbredningsvägen. Variationerna i ljudnivå beror därför troligen till största del av variationer i källstyrka, d.v.s. att emissionsnivån från vindkraftverk varierar.

## 8 Diskussion och slutsatser

Den sammanvägda analysen av de två störningsstudierna utförda vid Arbets- och miljömedicin, bekräftar och förstärker tidigare rapporterade data. Såväl hörbarhet som störning ökar med ökande ljudnivåer. Analyserna visar också att risken att störas av ljud var högre om verken var synliga från bostaden. Risken att störas ökade också om man bodde i jordbrukslandskap, medan terrängen inte hade någon inverkan. Resultaten bekräftar de resultat som redovisades efter en fallstudie på Gotland [Widing et al. 2005]. Andelen störda i jordbrukslandskap motsvarar andelen störda i Gotlandsstudien inom respektive ljudnivåintervall.

Ljud från vindkraftverk var inte direkt relaterat till någon av de andra hälsorelaterade variablerna som mättes i studierna, förutom att det fanns ett samband mellan ljudnivå och sömn. Sömnstörningar som beror på ljud från vindkraftverk är antagligen framförallt ett problem för människor som sover med fönstret på glänt. Detta bekräftas av att alla utom två av deltagarna som stördes i sömnen av buller angav att de sov med fönstret öppet eller på glänt. Att sova med öppet fönster är vanligt. Våra studier tyder på att ungefär 3/4 av människorna på landsbygden sover med fönstret på glänt sommartid och 18 % vintertid [Pedersen och Persson Waye 2004]. Det behövs dock ytterligare kunskap för att avgöra om sömnstörningar är ett problem som behöver beaktas vid framtida vindkraftetablering.

Metodiken att använda dagbok är förhållandevis lite använd i vetenskapliga studier, men visade sig fungera väl. Såväl det statistiskt säkerställda sambandet mellan hörbarhet och ljudnivå som skillnader i hörbarhet relaterat till momentan effekt från vindkraftverket bekräftar metodens validitet. Andelen utevistelser som verken hördes varierade från 4 till 86 % och var som tidigare beskrivits signifikant relaterat till beräknad ljudnivå. Dagboksstudien visade också att det är stor skillnad mellan personer när det gäller hur mycket de är hemma och hur mycket de vistas utomhus, vilket till en del kan förklara tidigare resultat där graden av störning vid en beräknad ljudnivå varierar mycket mellan individer.

Fältmätningarna av vindkraftverksljud (immissionmätningar) möjliggjordes genom att vi med den mobila mätvagnen kunde spela in data under flera veckor på respektive mätplats under olika meteorologiska förhållanden. Genom ett gott samarbete med tillverkare och ägare fick vi del av driftsstatistik från verken, även om problem uppstod på en av studieplatserna. Det var i våra studier inte möjligt att använda den bakgrunds nivå som mättes vid emissionsmätningen för att korrigera immissionsdata, då den var för hög. Detta kan innebära att de verkliga nivåerna av ljud från vindkraftverket på 550 meters avstånd är något lägre än de som uppmättes. Mätningarna överensstämde dock bra med beräknade nivåer, vilket talar för att hanteringen av bakgrunds-nivån skulle vara en mindre felkälla.

Hypotesen att PE-metoden skulle ge en bättre prediktion av mätta värden jämfört med Naturvårdsverkets beräkningsmetod [2001] kunde inte verifieras. Hypotesen byggde på antagandet att det uppstår en fokuseringseffekt i medvind. Denna fokusering kan t.ex. beskrivas med hjälp av en strålgångsmodell. Vid homogen atmosfär och platt mark har man två strålar från källa

till mottagare, en direkt och en markreflekterad. Vid ljudutbredning i medvind refrakteras ljudet ner mot marken och vid tillräckligt stark vindpåverkan kan en stråle reflekteras två eller flera gånger i marken. Ljudet från dessa multipelt reflekterade strålar adderas till direktljudet och till första markreflektionen. Beräkningar med PE-metoden visar att vindens påverkan på ljudutbredningen är liten och att enkla verktyg kan användas för att prediktera ekvivalent ljudnivå från vindkraftverk för kortare avstånd, här 550 m. Först vid längre avstånd kan man sannolikt förvänta sig en signifikant fokuseringseffekt i medvind. En fokuseringseffekt som uppstår vid stabil atmosfär när lufttemperaturen stiger med ökad höjd över marken (i stället för att den sjunker som är det vanligaste förhållandet) kan också ge förstärkt refraktion. För buller från vindkraftverk förväntas fokuseringseffekten p.g.a. positiv temperaturgradient vara ännu mindre än den från vind, och därför en påverkansfaktor endast vid ljudutbredning på långa avstånd.

Störst betydelse för osäkerheten vid beräkning av ljudnivån från vindkraftverk är osäkerheten vid källan, d.v.s. emissionsnivån. Vid mätning av emissionsnivån enligt standard kan vindens variation leda till felkällor i mätvärdet, eftersom verkens rotationshastighet inte anpassas simultant till förändringar av vindhastighet. Vindhastighetsprofilen, d.v.s. hur mycket vindhastigheten ökar med höjden över marken, kan vara annorlunda än den antagna, vilket också påverkar omräkningen till standardsituationen 8 m/s på 10 meters höjd. Dessutom, om tillverkarnas uppgift om emissionsnivå används, kräver det att emissionsnivåerna från ett enskilt verk inte avviker från typverket.

Den stora variationen i uppmätt ljudnivå vid en och samma vindhastighet skulle kunna innebära att människor tidvis exponeras för högre ljudnivåer än vad som beräknats vid standardsituationen 8 m/s. Dessutom indikerar resultaten att ljudet är hörbart även vid högre vindhastigheter. Att ljudet var hörbart vid vindhastigheter åtminstone upp till 12 m/s kunde säkerställas genom att lyssna på ljudsignalerna. Även om situationen inte var direkt jämförbar med lyssnande i en verklig situation (upptagning i mikrofonen hade dämpats genom två vindskärmar och i en verklig situation skulle vinden i sig orsaka ett brus kring öronen som påverkar hur lätt ljudet uppfattas), så är det troligt att ljud från vindkraftverk är hörbart vid vissa tillfällen med högre vindhastigheter. Resultaten från dagboksstudien pekar i samma riktning. Att hörbarheten av vindkraftverksljud skulle vara tydligast i vindhastigheter från 5 till 8 m/s som tidigare antagits kunde inte bekräftas. Tvärtom tycks risken att höra ljud från vindkraftverk öka från ca 5 m/s och någon avmattning i hörbarhet kunde inte ses upp till 10–12 m/s. Data skall tolkas mycket försiktigt med tanke på det låga antal personer för vilka vindhastighet var en signifikant faktor för hörbarhet, men de kan vara en indikation på att vindhastigheter utöver 8 m/s kan behöva beaktas vid beskrivningar av ljudexponeringen.

Sammantaget visar våra studier att möjligheten att uppfatta ljud och risken att störas av ljud från vindkraftverk ökar med ökade ljudnivåer. Inga direkta hälsoeffekter kan relateras till vindkraftsljud, men risken för sömnstörningar bör undersökas vidare. Den ljudutbredningsmodell som används vid tillståndsgivning för uppförande av vindkraftverk predikterar ljudnivån väl, men variationen i källljudnivå och möjligheten att höra ljudet vid höga vindhastigheter visar att kraven på presentationen i miljökonsekvensbeskrivningen av det ljud som de närboende kommer att exponeras för behöver utvidgas.

## 9 Referenser

- Altman D G, Machin D, Bryant T N, Gardner M J (2000). *Statistics with confidence*, 2nd ed. London: BMJ Books.
- Babisch W, Beule B, Schust M, Kersten N, Ising H (2005). Traffic noise and risk of myocardial infarction. *Epidemiology*, 16, 33–40.
- Bengtsson J, Persson Waye K, Kjellberg A (2004). Sound characteristics in low frequency noise and their relevance for the perception of pleasantness. *Acta Acoustica*, 90, 171–180.
- Bradley J S (1994). Annoyance caused by constant-amplitude and amplitude-modulated sound containing rumble. *Noise Control Engineering Journal*, 42, 203–208.
- Calvert G A (2001). Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 11, 1100–1123.
- IEC (2002). International Electrotechnical Commission: *IEC 61400-11: Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*, 2<sup>nd</sup> edition.
- Naturvårdsverket (2001). Ljud från vindkraftverk. Rapport nr 6241. Stockholm, Sverige.
- Pedersen E, Persson Waye K (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise: a dose-response relationship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116, 3460–3470.
- Pedersen E, Persson Waye K (2007) Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and wellbeing in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 64, 480–486.
- Pedersen E, Larman P (2008) The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28, 379–389.
- Persson Waye K, Öhrström E (2002). Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration*, 250, 65–73.
- Van den Berg G P (2006). The sound of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Doctoral thesis. Groningen, The Netherlands; Rijksuniversiteit Groningen.
- Widing A, Britse G, Wizelius T (2005). Vindkraftens miljöpåverkan, fallstudie av vindkraftverk i boendemiljö. Centrum för Vindkraftsinformation vid Högskolan på Gotland.

# 10 Redovisningar inom projektets period 2006–2008

## Doktorsavhandling

Pedersen E. Human response to wind turbine noise – perception, annoyance and moderating factors. Doctoral thesis. Göteborg University, 2007. <http://hdl.handle.net/2077/4431>

## Masterrapport

Lauret Ducosson I. Wind turbine noise propagation over flat ground-measurement and predictions using a parabolic equation method. Dept of Civil and Environmental Engineering, Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg Sweden. Master thesis 2006:10.

## Vetenskapliga artiklar

Pedersen E, Persson Wayne K. Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and wellbeing in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 2007, 64, 480–486. doi: 10.1136/oem.2006.031039.

Pedersen E, Hallberg L R-M and Persson Wayne K. Living in the vicinity of wind turbines – a grounded theory study. *Qualitative Research in Psychology*, 2007, 4 (1–2), 49–63. doi: 10.1080/14780880701473409.

Pedersen E, Persson Wayne K. Wind turbine – a low level noise source interfering with restoration? *Environmental Research Letters*, 2008, 3 (1), 015002. doi: 10.1088/1748-9326/3/1/015002

Pedersen E and Larsman P. The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 2008, 28, 379–389. doi: 10.1016/j.jenvp.2008.02.009

## Svenska rapporter

Pedersen E, Persson Wayne K. Ljud från vindkraftverk – hörbarhet i kuperad och flack terräng. Rapport från Arbets- och miljömedicin Sahlgrenska akademien, Göteborgs universitet, nr 120. ISSN-1650-4321, ISBN-978-91-7876-119-7.

## Internationella konferenser

Pedersen E, Persson Wayne K, Differences in perception and annoyance of wind turbine noise between dissimilar environs. In: Proceedings of the 6th European Conference on Noise Control, Tampere, Finland, 30 May–1 June 2006. Paper ID:164.

Pedersen E, Larsman P, Aesthetical aspects of attitude towards the noise source influencing noise annoyance example from a study on response to wind turbines. In: Proceedings of Internoise 2007, International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Istanbul, Turkey, 28–31 August 2007, Paper 833100.

# Människors upplevelser av ljud från vindkraftverk

RAPPORT 5956

NATURVÅRDSVERKET  
ISBN 978-91-620-5956-9  
ISSN 0282-7298

I samband med uppförandet av vindkraftverk görs vanligen en bedömning av hur människor som vistas i området kommer att påverkas. Syftet är bland annat att säkerställa att inte verken placeras så att ljudet påverkar de kringboende negativt. För att korrekt kunna beskriva hur ljudet kan komma att uppfattas behövs vetenskapligt baserat kunskapsunderlag.

I den här rapporten presenteras resultaten från flera studier som bland annat jämför tekniska beräkningar av ljudnivåer med faktiska upplevelser. Kunskapen är användbar vid planering och prövning av vindkraftanläggningar och kan utgöra underlag till miljökonsekvensbedömningar”

**Kunskapsprogrammet Vindval** samlar in, bygger upp och sprider fakta om vindkraftens påverkan på den marina miljön, på växter, djur, människor och landskap samt om människors upplevelser av vindkraftanläggningar. Vindval erbjuder medel till forskning inklusive kunskapssammanställningar, synteser kring effekter och upplevelser av vindkraft. Vindval styrs av en programkommitté med representanter från Boverket, Energimyndigheten, Fiskeriverket, länsstyrelserna, Naturvårdsverket, Riksantikvarieämbetet och vindkraftbranschen.

