



## Projektrapport:

# Upplevd störning av vindkraftsbuller, en jämförande studie av ljud från olika turbiner

### Författare:

#### **Karl Bolin**

Marcus Wallenberg Laboratoriet, Institutionen för Farkost- och Flygteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, Teknikringen 8, SE-100 44 Stockholm

Tel: 08-790 80 17, Fax: 08-790 61 22,

E-mail: [kbolin@kth.se](mailto:kbolin@kth.se)

#### **Mats E. Nilsson**

Gösta Ekman Laboratorium, Psykologiska institutionen, Stockholm Universitet, SE-106 91 Stockholm

E-mail: [mnn@psychology.su.se](mailto:mnn@psychology.su.se)

#### **Gösta Bluhm**

Institutet för miljömedicin, Karolinska Institutet, Box 210, SE-171 77 Stockholm E-mail:

[gosta.bluhm@ki.se](mailto:gosta.bluhm@ki.se)

## Sammanfattning

Projektets syfte var att undersöka om ljud från skilda typer av vindkraftverk uppfattas olika störande och om speciella ljudkaraktistiska påverkar hur störande de upplevs. Inspelningar utfördes av tio bullerstörda personer runt vindkraftverk under september och oktober år 2011. Beräkningar av psykoakustiska parametrar för ett urval av dessa inspelningar visade att högre nivåer av skarpa och lägre nivåer av tonalitet kunde observeras jämfört med tidigare ljudinspelningar vid vindkraftverk utan rapporterade störningar från närboende. Två lyssnings-experiment genomfördes också i detta projekt. Det första utfördes av den bullerstörda gruppen samt en referensgrupp och syftade till att jämföra A- respektive C-vägda ljudnivåers korrelationer med upplevd momentan störning av vindkraftsbuller. Resultaten tyder på att A-vägda ljudnivåer har högre korrelation till upplevd störning än C-vägda ljudnivåer samt att de bullerstörda uppfattar vindkraftsbuller som 4 dB mer störande än referensgruppen visavi ett referensljud. I det andra lyssningstestet undersöktes ett flertal ljudparametrars korrelation till upplevd momentan störning. Bland de akustiska parametrar som beskriver olika aspekter av ljud (frekvensinnehåll, tidsmönster, ljudstyrka), var mått relaterade till ljudstyrkan de viktigaste parametrarna för hur störande vindkraftsbuller upplevdes i lyssningsexperimenten.

## Innehållsförteckning:

1. Introduktion .....	3
1.1. Syfte .....	3
2. Metod .....	4
2.1 Lyssningsförsök 1 .....	5
2.1.1 Ljud i lyssningsförsöket.....	5
2.1.2 Undersökningsdeltagare .....	7
2.1.3 Procedur .....	7
2.2 Inspelningar av vindkraftsljud i boendemiljö.....	8
2.3 Lyssningsförsök 2.....	8
2.3.1 Ljud i lyssningsförsöket.....	8
2.3.2 Undersökningsdeltagare .....	9
2.3.3 Procedur .....	9
3. Resultat.....	9
3.1 Lyssningsförsök 1 .....	9
3.1.1 Reliabilitet hos deltagarnas lyssningbedömningar .....	9
3.1.2 Kvantifiering av upplevd störning .....	10
3.1.3 Samband mellan upplevd störning och ljudnivå.....	10
3.2 Inspelningar av vindkraftsljud i boendemiljö .....	12
3.3 Lyssningsförsök 2.....	14
3.3.2 Reliabilitet hos deltagarnas lyssningbedömningar .....	14
3.3.2 Kvantifiering av upplevd störning.....	14
3.3.3 Samband mellan upplevd störning och olika akustiska mått .....	14
4. Diskussion .....	16
5. Slutsatser .....	17
Referenser: .....	18
Bilaga A: Instruktioner till försökspersoner.....	20
Bilaga B: Hörlurarnas prestanda .....	21
Bilaga C: Beskrivning av psykoakustiska parametrar.....	22
Bilaga D: Ljudparametrar.....	24
Bilaga E: Beäkning av PNE.....	29

## Teckenförklaring:

Förkortning	Enhet	Förklaring
$R^2$		Andel förklarad varians
rms		Medelavvikelse från linjär estimation av data
$L_p$	dB	Ljudtrycksnivå utan vägningsfilter
$L_A$	dB	A-vägd ljudnivå
$L_C$	dB	C-vägd ljudnivå
$L_{ALF}$	dB	A-vägd ljudnivå endast för tersband under 250 Hz
PNE	dB	Pink Noise Equivalent (Motsvarande ljudnivå av rosa brus)
$N$	sone/phon	Ljudstyrka (Loudness)
$R$	asper	Grovhet (Roughness)
$S$	acum	Skärpa (Sharpness)
$FS$	vacil	Fluktuationsstyrka (Fluctuation strength)
$T$	tonal enhet	Tonalitet (Tonality)

## 1. Introduktion

Riksdagen har fattat beslut om att begränsa Sveriges klimatpåverkan (Proposition 2008/09:163). För att nå detta mål är vindkraftsenergin under kraftig utbyggnad i landet och har ett planeringsmål på 30 TWh elenergi år 2020. Vindkraft orsakar låga utsläppsnivåer av växthusgaser men påverkar miljön i närheten av anläggningarna, framförallt genom bullerstörning och visuell störning (Pedersen & Waye 2004; Pedersen & Waye 2007; Pedersen & Larsman 2008; Pedersen, v d Berg, Bakker & Bouma 2009). Jämförelser med andra bullerkällor visar att vid motsvarande ljudnivåer är en högre andel störda av vindkraftsbuller jämfört med andra bullerkällor (Hanssen *et al* 2011). Det finns riktlinjer i Sverige för att begränsa buller (Naturvårdsverket 2012). I riktlinjerna för vindkraftsbullret ingår ytterligare begränsningar om ljudet innehåller rena toner eftersom det då anses att bullret är mer störande. Denna rapport redovisar ett forskningsprojekt som haft till syfte att undersöka hur ljud från olika vindkraftverk uppfattas och om det finns speciella särdrag av ljudet (beräknade med hjälp av psykoakustiska parametrar) som gör dem störande. Studien är uppdelad i två olika lyssningsförsök samt inspelningar av vindkraftsbuller utförda av närboende när de ansåg sig störda.

### 1.1. Syfte

Projektets syfte var att i lyssningsförsök och genom analys av inspelningar undersöka hur störande vindkraftsljud är i relation till ett antal konventionella akustiska mått (A- och C-vägd ljudnivå) och i relation till ett antal mer avancerade mått, så kallade psykoakustiska parametrar (ljudstyrka, skärpa, grovhet, fluktuationsstyrka och tonalitet, se bilaga C för ytterligare beskrivning). För detta syfte genomfördes inom projektet inspelningar av vindkraftsbuller av personer, som bor nära vindkraftverk och som upplever sig vara störda

av vindkraftsljud i sin boendemiljö. På detta sätt analyserade projektet vindkraftsljud som de boende själva identifierat som störande. Såväl de nya inspelningarna som tidigare genomförda inspelningar (Tari & Wetterblad 2012, Bolin *et al* 2012) användes i de två lyssningsförsök och akustiska analyser som redovisas i denna rapport. Båda lyssningsförsöken fokuserar på momentan störning och kortvariga stimuli och det bör poängteras att studierna inte undersöker långvarig störning av vindkraftsbuller.

## 2. Metod

I projektet genomfördes inspelningar av vindkraftsljud och lyssningsförsök där personer bedömde hur störande de upplevde vindkraftsbuller. En unik aspekt av detta projekt är att det involverade personer som i sin boendemiljö är störda av vindkraftsljud. Dessa personer var dels med i lyssningsförsök där de bedömde olika vindkraftsljud (Lyssningsförsök 1) och dels bidrog de genom att spela in störande vindkraftsljud i sina hem.

Projektet omfattar tre delar:

- (1) Ett första lyssningsförsök (Lyssningsförsök 1) baserat på inspelningar av vindkraftsljud genomförda i tidigare undersökningar.
- (2) Inspe­lningar av vindkraftsljud hemma hos boende som upplever sig störda av vindkraftsbuller.
- (3) Ett andra lyssningsförsök (Lyssningsförsök 2) baserat på de inspelningar som genomfördes i projektets andra del.

Inspelningarna utfördes med två olika sorters inspelningsutrustning och deltagarna kontrollerade var och när de skedde. Längden på inspelningarna var cirka fem minuter och deltagarna antecknade om mätningarna var utförda inom- eller utomhus. Störningar från vinden är vanligt förekommande i inspelningar utomhus och den ena mätuppställningen var utrustad med ett vindskydd för att minska dessa störningar.

Lyssningstesterna utformades för att undersöka så många olika ljud som möjligt, utan att bli alltför tidsödande och tröttsamma för testpersonerna samt underlätta jämförelser med tidigare forskningsresultat. För att uppfylla dessa kriterier användes kortvariga ljudpresentationer på fyra sekunder i första testet och tre sekunder i andra testet. Dessa tidsspann befinner sig inom det så kallade ”psykologiska nuet” och förutsätter därmed inte lagring och framtagning ur långtidsminnet, se Kuwano, 2000. Liknande stimultider har använts av författarna i tidigare lyssningsexperiment (Bolin *et al* 2010, Nilsson 2007). Givetvis går det inte att likställa kortvariga ljudstimuli med långvarig exponering av buller som sker över månader och år. Bullerstörning under längre tid beror på en rad variabler som inte kan mätas i lyssningsförsök, till exempel effekten av att ljud inträffar vid vissa tidpunkter på dygnet, effekten av att ljudet sammanfaller med aktiviteter som kan störas av ljud, eller att ljudupplevelsen eventuellt samverkar med visuella intryck av vindkraftverken. Lyssningsstudier av den typ som här genomförts ger en bild av momentan störning, som främst beror på egenskaper hos ljudet (det vill säga, hur störande själva ljudet låter). Metodiken för projektets tre delar beskrivs nedan under avsnitt 2.1, 2.2 och 2.3.

## 2.1 Lyssningsförsök 1

Lyssningsförsök 1 hade två syften: (1) Att jämföra hur väl vindkraftsljuds A-vägda respektive C-vägda ljudnivå korrelerade med störningsbedömningarna och (2) att jämföra bedömningar från personer som störs av vindkraftsbuller i sin hemmiljö med bedömningar av personer som inte har erfarenhet av vindkraftsbuller i sin boendemiljö. Detta försök designades i projektets början innan vindkraftsinspelningar genomförts och därför användes vindkraftsljud inspelade i tidigare projekt (Tari & Wetterblad 2012, Bolin *et al* 2012). Anledningen till att detta ansågs intressant var att A-vägning huvudsakligen används som riktlinjer för externbuller men vid C-vägning ges mer vikt åt lågfrekvent ljud vilket tidigare har visat sig öka med större storlek på verken (Möller & Pedersen 2011) och skulle därför möjligtvis vara ett alternativ eller komplement till riktlinjer i A-vägda ljudnivåer.

### 2.1.1 Ljud i lyssningsförsöket

I försöket användes fem inspelningar av vindkraftsljud genomförda i tidigare projekt (se figur 1). Ljuden var inspelade på relativt nära avstånd till vindkraftsverken, 180 - 660 m (se tabell 1). Det är svårt att i lyssningsförsök använda inspelningar av vindkraftsljud på längre avstånd, eftersom bakgrundsljud då kan bli höga i förhållande till vindkraftsljudet och det är svårt att avgöra och separera vilken del av det inspelade ljudet som är genererat av vindkraftsverket och vilket som hör till bakgrunden. Av detta skäl justerades ljud inspelade på närmare avstånd, så att det efterliknade det förväntade ljudet på längre avstånd. Detta gjordes genom att beräkna effekten av geometrisk utbredning och atmosfäriska dämpning för tersband mellan 20 Hz och 20 kHz vid 1000 m och 2000 m ljudutbredning enligt ISO 9613 (ISO9613 1995) (med antagande om 20° C, 70% relativ fuktighet och 1 atm atmosfärstryck) och digitalt filtrera inspelningar därefter.

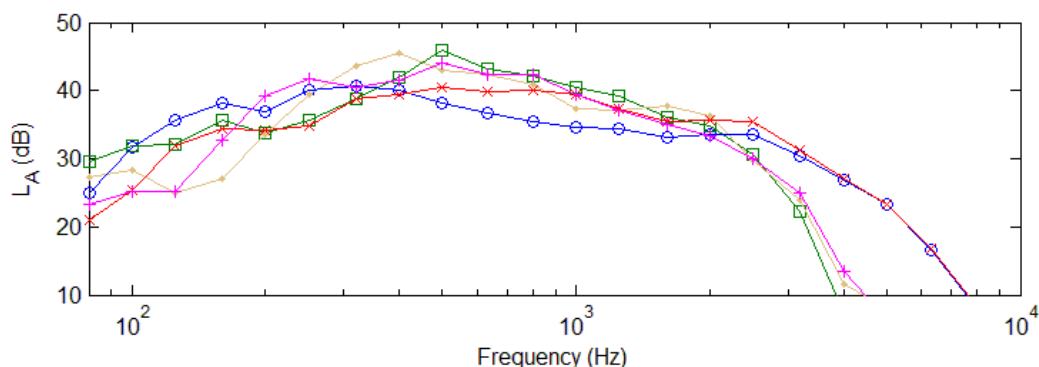


Figur 1: Fotografi från binauralinspelning av ljud från vindkraftverk.

Ljud nr	Antal vkv	Effekt [MW]	Avstånd [m]
1	1	0,85	180
2	3	2,0	300
3	2	2,0	470
4	1	2,0	660
5	1	0,85	220

Tabell 1: Data över inspelningsplatserna för de vindkraftsljud som användes i Ljyssningsförsök 1.

Tersbandsspektra från de fem olika originalinspelningarna kan observeras i figur 2. Ljuden är samtliga av bredbandig karaktär och saknar uppenbara tonala komponenter och de högsta tersbandsnivåerna observeras mellan 250 Hz och 500 Hz.



Figur 2: Visar tersbandsspektra för ljuden vid imissionspunkten för de fem inspelningarna.

Ljuden är representerade av 1 (-o-), 2 (-x-), 3 (-□-), 4 (-■-) and 5 (-+-).

Från originalinspelningar och avståndsjusterade inspelningar skapades 15 vindkraftsljud, vardera 4 s långt. För att varken favorisera A- eller C-vägning, justerades ljudnivån för några av ljuden (men med oförändrade relativa frekvensspektra) för att ge samma standardavvikelser (1,3 dB) för A- och C-vägd nivåer. De 15 ljuden presenterades vardera i åtta olika ljudnivåer med 2 dB steg mellan varje ljud, totalt fick alltså undersökningsdeltagarna bedöma  $15 \times 8 = 120$  experimentljud. Den högsta ljudnivån för respektive experimentljud visas i tabell 2 (ett ljud med värdet 50 dB i tabell 2 presenterades alltså i nivåerna 50, 48, 46, 44, 42, 40, 38 och 36 dB).

Dessutom presenterades ett antal skära brus i olika ljudnivåer (från 27,5 till 55 dB i 2,5 dB-steg). Dessa ljud utgjorde referensljud, vilka användes för att uttrycka upplevd störning i dB

hos ett lika störande skärt brus (för mer information om hur dessa beräkningar utfördes, se Bilaga E).

Vägning	Inspelning		+1 km		+2 km	
	L <sub>A</sub>	L <sub>C</sub>	L <sub>A</sub>	L <sub>C</sub>	L <sub>A</sub>	L <sub>C</sub>
Ljud 1	47,6	51,7	46,4	57,5	47,8	59,6
Ljud 2	48,3	54,4	47,0	55,3	47,6	57,2
Ljud 3	50,2	57,1	47,2	56,1	46,9	57,3
Ljud 4	50,4	56,6	48,8	56,3	46,7	55,3
Ljud 5	50,1	56,3	47,4	55,0	47,3	55,8

Tabell 2: Ljudnivåer (A- och C-vägda dB) för stimuli använda i lyssningsförsök 1.

### 2.1.2 Undersökningsdeltagare

Två grupper av undersökningsdeltagare medverkade i försöket. (1) Den ena gruppen, kallad fältgruppen, utgjordes av 11 personer boende nära vindkraftsverk och som stördes av vindkraftsbuller i sina hem. Dessa personer utförde testet vid hembesök i samband med att ljudutrustning för inspelningar installerades i deras hem (se avsnitt 2.2). (2) Den andra gruppen, benämnd referensgruppen, bestod av tjugo anställda och studenter vid KTH. Tabell 3 redovisar de båda gruppernas ålder och könsfördelning.

Grupp	Antal män	Antal kvinnor	Medianålder	Högsta ålder	Lägsta ålder
Fält	5	6	49	71	34
Referens	13	7	25	36	21

Tabell 3: Information om deltagare i Lyssningsförsök 1.

### 2.1.3 Procedur

Varje deltagare testades individuellt och bedömde fyra serier av experimentljud och referensljud presenterade i slumpvis ordning. Ljuden spelades upp i hörlurar och deltagaren angav efter varje ljudpresentation hur störande han eller hon upplevde ljudet. Upplevd störning bedömdes med metoden fri magnitudestimation, där lyssnaren gör sina bedömningar genom att ange siffror som motsvarar hur störande ljudet upplevs (se Berglund 1991, Nilsson 2007; skriftliga instruktioner, se bilaga A).

Fältgruppen testades i ett tyst rum i sin egen bostad. Hörlurar av typen Bose QuietComfort 15, med aktiv ljuddämpning av externt ljud användes för att undvika att försökspersonerna påverkades av ovidkommande externt ljud under testet. Referensgruppen bedömde ljuden i ett ljudlaboratorium vid KTH med hörlurar av typ AKG-501k. Experimentljuden korrigerades för hörlurarnas respektive inverkan på ljudens frekvensinnehåll (se bilaga B för data om hörlurarnas prestanda).

## 2.2 Inspelningar av vindkraftsljud i boendemiljö

Inspelningar av vindkraftsljud genomfördes i hemmet hos tio personer som var störda av vindkraftsbuller. De tio bostäderna låg kring åtta vindkraftsanläggningar, samtliga i Götaland, från Skåne i söder till Östergötland i norr.

Inspelningsutrustningen placerades i hemmet hos deltagarna under en veckas tid. Personal från KTH instruerade deltagarna hur utrustning skulle användas och uppmanade dem sedan att spela in ljud så snart de upplevde sig störda av vindkraftsbuller. Inspelningar genomfördes både utomhus och inomhus på platser där de boende upplevde sig som störda.

Inspelningarna utfördes under fem veckor i september och oktober år 2011. Två olika mätutrustningar användes. Det ena systemet bestod av en så kallad huvud-torso simulator (format som en människa med mikrofoner placerade i hörgångarna) för binauralinspelning av ljud (se figur 1). Denna inspelningsteknik möjliggör realistisk återuppspelning av ljudmiljöer i hörlurar och delar av dessa inspelningar användes i lyssningsförsök 2. Ett grafiskt gränssnitt som hanterade inspelningarna skapades under projektet och deltagarna startade inspelningarna genom att klicka på en knapp och gav sedan information om var inspelningarna utfördes till datorprogrammet. Inspelningarna pågick därefter i fem minuter varefter de automatiskt avslutades. Det andra systemet bestod av en så kallad ambisonicsmikrofon som möjliggör mycket realistisk återgivning av ljud med ett flertal högtalare. Mikrofonen var kopplad till en enhet för lagring av inspelningarna och inspelningarna startades och avslutades genom knapptryckningar på enheten. Inspelningsplats och tidpunkt noterades i ett formulär för dessa inspelningar.

## 2.3 Lyssningsförsök 2

Lyssningsförsök 2 syftade till att undersöka om upplevd störning av vindkraftsljud, inklusive de ljud som spelades in av boende kring vindkraftverk (se Avsnitt 2.2), kan förklaras av specifika akustiska egenskaper hos vindkraftsljud. För detta syfte beräknades ett antal så kallade *psykoakustiska parametrar*, som utvecklats inom forskning om ljudkvalitet. Dessa parametrar har bland annat använts inom produktutveckling, inte minst inom bil- och flygindustrin, för att avgöra vilka egenskaper hos produktljud som bör åtgärdas för att göra dem mindre störande. De psykoakustiska parametrarna beräknas från detaljerad information om ljudens frekvensinnehåll och tidsmönster. En detaljerad beskrivning av de mått som användes ges i bilaga C.

### 2.3.1 Ljud i lyssningsförsöket

I Lyssningsförsök 2 användes fem vindkraftsljud vid mätplatser beskrivna i tabell 4. Två ljud (nr 1 och 2) återanvändes från Lyssningsförsök 1 (motsvarande ljud i Lyssningsförsök 1 var nr 4 och 5) samt tre utvalda ljudfiler (nr 3-5 i tabell 4) från projektets mätningar. I likhet med Lyssningsförsök 1 användes skärt brus som referensljud. Anledningen till att använda äldre inspelningar var att undersöka om det fanns skillnader i hur dessa upplevdes jämfört med inspelningarna från projektet. Det skära bruset inkluderades för att möjliggöra jämförelser med Lyssningstest 1.



Ljud nr	Antal vkv	Effekt [MW]	Avstånd [m]
1	1	2,0	660
2	1	0,85	220
3	4	2,3	500
4	19	2,0	1000
5	1	2,0	700

Tabell 4: Data över inspelningsplatserna för de vindkraftsljud som användes i Lyssningsförsök 2.

De fem inspelade ljuden presenterades i åtta olika ljudnivåer med 2 dB steg mellan varje ljud från 34 dB till 48 dB i 2 dB steg och skärt brus spelades upp i tio olika ljudnivåer från 27,5 till 55 dB i 2,5 dB-steg. Dessa ljud utgjorde referensljud, vilka användes för att uttrycka upplevd störning i dB hos ett lika störande skärt brus (för beräkningar, se Bilaga E).

### 2.3.2 Undersökningsdeltagare

Fjorton personer deltog i lyssningsförsöket varav nio var kvinnor, medianåldern var 28 år, den yngsta 22 år och den äldste 63 år. Deltagarna rekryterades bland studenter och personal vid KTH. Projektets budget medgav tyvärr inte att deltagarna som utförde mätningarna inkluderades som försökspersoner i denna lyssningsstudie.

### 2.3.3 Procedur

Varje deltagare testades individuellt och bedömde fyra serier av de sex experimentljuden presenterades i slumpvis ordning. Ljuden spelades upp i hörlurar och deltagaren angav efter varje ljudpresentation hur störande han eller hon upplevde ljudet. Upplevd störning bedömdes med samma metod som i Lyssningsförsök 1 (avsnitt 2.1). Ljuden bedömdes i ett ljudlaboratorium vid KTH med hörlurar av typ AKG-501k, med samma korrigering som i Lyssningsförsök 1 (se bilaga B).

## 3. Resultat

### 3.1 Lyssningsförsök 1

#### 3.1.1 Reliabilitet hos deltagarnas lyssningbedömningar

För att bedöma reliabiliteten i deltagarnas skattningar korrelerades medelvärden för varje deltagares två första med medelvärden för de två sista skattningarna av varje ljud. Reliabiliteten var god, korrelationskoefficienterna varierade från 0,45 till 0,91 (medel = 0,65). Undantaget var två personer i fältgruppen, som hade korrelationskoefficienter på 0,04 och 0,17. Dessa personers bedömningar var alltså inte repeterbara, möjligen därför att de hade misstolkat instruktionen. Av detta skäl uteslöts dessa två lyssnares svar från de analyser som redovisas nedan.

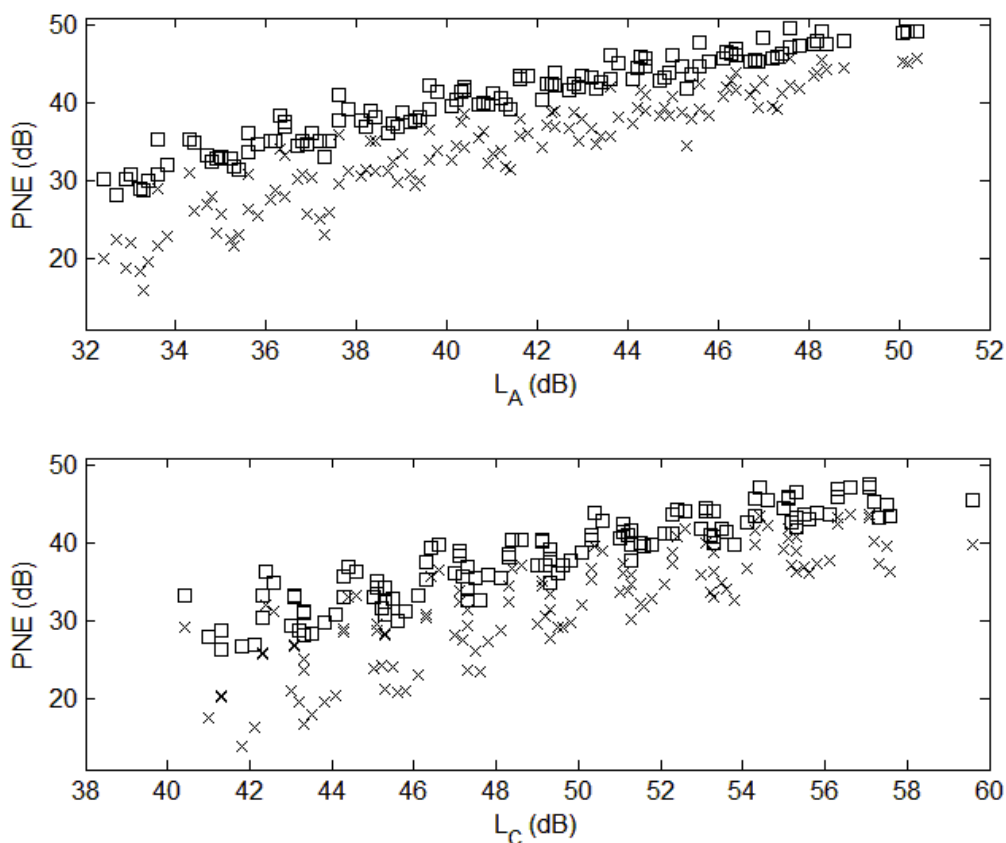
### 3.1.2 Kvantifiering av upplevd störning

I lyssningsförsöket användes skära brus som referensljud. Syftet med detta var att kunna uttrycka skattningar av upplevd störning i ljudnivåer hos lika störande skärt brus (PNE, *Pink Noise Equivalent sound level*). Den främsta fördelen med detta är effekten av olikheter i hur enskilda lyssnare använder skattningsskalor minimeras, eftersom lyssnarnas bedömning relateras till ett referensljud som bedömts med samma skattningsmetod (Kuwano, et al., 1989; Berglund, 1991; Nilsson, 2007). Det enda antagande som görs är därför att om en lyssnare tilldelat två ljud ungefär samma värden så upplever han eller hon de två ljuden som ungefär lika störande. För detaljer, se Bilaga E.

### 3.1.3 Samband mellan upplevd störning och ljudnivå

Figur 3 visar medelskattningar av upplevd störning, uttryckt som medelvärden av PNE, som en funktion av A-vägd ljudnivå (övre diagrammet) och C-vägd ljudnivå (nedre diagrammet). Två aspekter av figuren är särskilt framträdande: (1) De två lyssnargrupperna skiljer sig åt (kryss och fyrkanter sammanfaller inte), och (2) Spridningen i PNE för en given nivå är mindre för A-vägd (övre diagrammet) än för C-vägd ljudnivå (nedre diagrammet). Dessa resultat diskuteras nedan.

- 1) Fältgruppen (fyrkanter) visar uppenbarligen en ökad störning av vindkraftsljud jämfört med referensgruppen (kryss). Skillnaden verkar vara något mer uttalad för låga ljudnivåer av vindkraftsljud medan resultaten ser ut att konvergera vid högre ljudnivåer. Den genomsnittliga PNE-nivån var 4,3 dB högre för fältgruppen jämfört med referensgruppen. Detta kan tyda på en ökad känslighet för vindkraftsljud i fältgruppen jämfört med referensgruppen. Det skall dock betonas att försöksgrupperna bestod av ett fåtal personer och att endast fem olika vindkraftsinspelningar jämfördes. Dock anses resultaten peka i en intressant riktning eftersom kvantitativa skillnader mellan olika grupper kan observeras vilket inte är möjligt med konventionella metoder med magnitудestimation som saknar referensljud.
- 2) För en given ljudnivå, är spridningen i PNE mindre för A-vägd än för C-vägd ljudnivå. Detta tyder på att A-vägd ljudnivå är en bättre prediktor av upplevd störning än C-vägd ljudnivå. Skillnaden kan kvantifieras genom att anpassa en linjär funktion till sambandet och uttrycka den sammantagna spridningen längs linjen som andel förklarad varians ( $R^2$ ) eller som medelavvikelse från linje (rms-avvikelse).  $R^2$  är ett relativt mått på anpassningen, och varierar från 0.0 (inget samband mellan ljudnivå och störning) till 1.0 (perfekt samband, alla punkter ligger perfekt på en linje). Den genomsnittliga avvikelsen i y-led från linjen anges av rms-avvikelsen, och är alltså ett mått med enheten PNE (dB).



Figur 3: Graferna visar skattad störning (uttryckt i PNE) som en funktion av A-vägd ljudnivå ( $L_A$ ) i det övre och C-vägd ljudnivå ( $L_C$ ) i den nedre figuren. Resultat från referensgruppen visas som (x) och fältgruppen som ( $\square$ ).

Som framgår av tabell 5 är kurvanpassningen bättre (högre  $R^2$ -värden, lägre rms-avvikelser) för A- än för C-vägd nivåer i båda grupperna, vilket indikerar att A-vägd ljudnivå är något bättre som indikator på upplevd störning av vindkraftsbuller.

Ytterligare en modell testades, som förutom A-vägd ljudnivå också inkluderar skillnaden mellan A- och C-vägd ljudnivå ( $L_C - L_A$ ).  $L_C - L_A$  är ett mått på den relativa andelen ljudenergi i den lågfrekventa delen av ljudets spektrum. Detta mått har använts i tidigare studier av störning av vägtrafikbuller (Nilsson, 2007; Nilsson et al., 2009) och där visats sig förklara en viss andel av variationen i upplevd störning som inte förklaras av A-vägd ljudnivå. För resultaten i denna rapport, förklarade dock  $L_C - L_A$  en relativt liten del av variationen i upplevd störning ( $R^2$  ökade endast marginellt). Detta kan bero på att variationen i lågfrekvent innehåll mellan de olika vindkraftsljuden var litet, och att  $L_C - L_A$  därför inte bidrog med att förklara variation i störning mellan olika vindkraftsljud.

Lyssnargrupp	Linjär regressionsmodell	R <sup>2</sup>	rms-avvikelse (dB)
Fältgrupp	$PNE = a + bL_A$	0,92	2,2
	$PNE = a + bL_C$	0,86	3,3
	$PNE = a + bL_A + c[L_C - L_A]$	0,93	2,2
Referensgrupp	$PNE = a + bL_A$	0,89	3,0
	$PNE = a + bL_C$	0,71	4,1
	$PNE = a + bL_A + c[L_C - L_A]$	0,91	2,9

Fotnot. PNE: upplevd störning, uttryckt i ljudnivå (dB) hos lika störande skört brus;  $L_A$ : A-vägd ljudnivå,  $L_C$ : C-vägd ljudnivå,  $L_C - L_A$  = skillanden mellan C- och A-vägd ljudnivå. R<sup>2</sup>: Andel förklarad varians; rms-avvikelse: Genomsnittlig avvikelse i PNE från den linjära modellen.

Tabell 5: Kurvanpassning ( $R^2$ , rms-avvikelse) för tre linjära modeller av sambandet störning (PNE) och A-vägd eller C-vägd ljudnivå, separat för fältgruppen och referensgruppen.

### 3.2 Inspelningar av vindkraftsljud i boendemiljö

Inspelningar hos boende störda av vindkraftsbuller genomfördes för att undersöka om dessa ljud hade speciella akustiska egenskaper som kan förklara upplevd störning. För detta syfte genomfördes inte bara konventionella beräkningar av A- och C-vägd ljudnivå, utan också mätningar av så kallade psykoakustiska parametrar som beskriver egenskaper hos ljud som inte fångas av de konventionella måtten. I detta avsnitt redovisas analyser av de ljud som användes i Lyssningsförsök 2 (för samtliga mätresultat se bilaga D). Korrelationer med upplevelseskattningar från detta lyssningsförsök ges i avsnitt 3.3.

De psykoakustiska parametrar som undersöktes var:

1. Ljudstyrka,  $N$ , (engelskans loudness) i enheterna sone och phon.
2. Skärpa,  $S$ , (engelskans sharpness) i enheten acum.
3. Fluktuationsstyrka,  $FS$ , (engelskans fluctuation strength) i enheten vacil.
4. Grovhet,  $R$ , (engelskans roughness) i enheten asper
5. Tonalitet,  $T$ , (engelskans tonality) i enheten tonal enhet

Dessa parametrar utgår i samtliga fall utom ett (tonalitet) ifrån modeller beskrivna av Zwicker & Fastl (Zwicker & Fastl, 1999). En utförligare beskrivning av beräkningar av dessa parametrar och vilken mjukvara som använts ges i bilaga C.

Tabell 6 ger korrelationskoefficienter ( $R$ ) mellan samtliga mått, samt medelvärde ( $M$ ) och standardavvikelse ( $\sigma$ ) för vardera mått. Som framgår av tabellen är korrelationerna mellan måtten för ljudstyrka ( $L_A, L_C$  &  $N$ ) höga, vilket innebär att de mäter liknande aspekt hos ljuden. De övriga korrelationerna är betydligt lägre vilket innebär att sambandet mellan

parametrarna är litet och att de därmed beskriver olika aspekter av ljuden. De relativa skillnaderna (dynamiken) för de olika parametrarna fås genom att dividera standardavvikelserna med medelvärdena för respektive parameter. De olika parametrarnas inbördes dynamik varierar mellan 34 % och 10 %, med relativt hög variation i de psykoakustiska parametrarna som inte beskriver ljudstyrkan. Denna icke marginella dynamik underlättade undersökningar om i vilken utsträckning dessa variationer kan förklara variation i upplevd störning av de olika vindkraftsljuden. Dessa samband redovisas i avsnitt 3.3 (fig. 6).

Parameter	$L_A$	$L_C$	$L_{ALF}$	$N$	$FS$	$R$	$S$	$T$	$M$	$\sigma$	$\sigma/M$
$L_A$	1	0,96	0,83	0,95	0,41	0,29	0,17	0,08	41,3	4,8	12 %
$L_C$		1	0,92	0,85	0,31	0,10	0,05	0,15	49,4	4,9	10 %
$L_{ALF}$			1	0,66	0,34	0,13	0,18	0,32	32,3	5,2	16 %
$N$				1	0,37	0,43	0,44	0,13	56,4	6,4	11 %
$FS$					1	0,12	0,24	0,16	0,14	0,04	30 %
$R$						1	0,41	0,17	0,23	0,04	18 %
$S$							1	0,62	0,59	0,20	34 %
$T$								1	0,05	0,01	20 %

Tabell 6: Korrelationskoefficienter mellan de undersökta akustiska parametrarna samt medelvärde ( $M$ ) och standardavvikelse ( $\sigma$ ).

En jämförelse med tidigare publicerade psykoakustiska för vindkraftsbuller i (Persson & Öhrström 2002) påbörjades under projektet eftersom det ansågs intressant att analysera om ljudkaraktärer från vindkraft har ändrat sig i och med utvecklingen av betydligt större verk. Tyvärr visade det sig att det ej var möjligt att jämföra de psykoakustiska parametrarna eftersom tidigare publicerade data verkar ha förväxlat ljudstyrkeenheterna sone och phon vilket leder till förvanskningar av övriga beräknade parametrar. Dessutom bör det noteras att inspelningsmetodiken skiljer sig mellan de två projekten. Mikrofonerna var monterade på en horisontell platta lagd på marken vid inspelningarna rapporterade i Persson & Öhrström medan mikrofonerna var monterade på 1.7 m höjd i detta projekt. Fördelen med att spela in ljud i markhöjd är att störningar från vinden i mikrofonerna minskar men nackdelen är att ljudet från markreflektionen inte blir densamma som vid högre höjder p.g.a. interferens.

## 3.3 Lyssningsförsök 2

### 3.3.2 Reliabilitet hos deltagarnas lyssningbedömningar

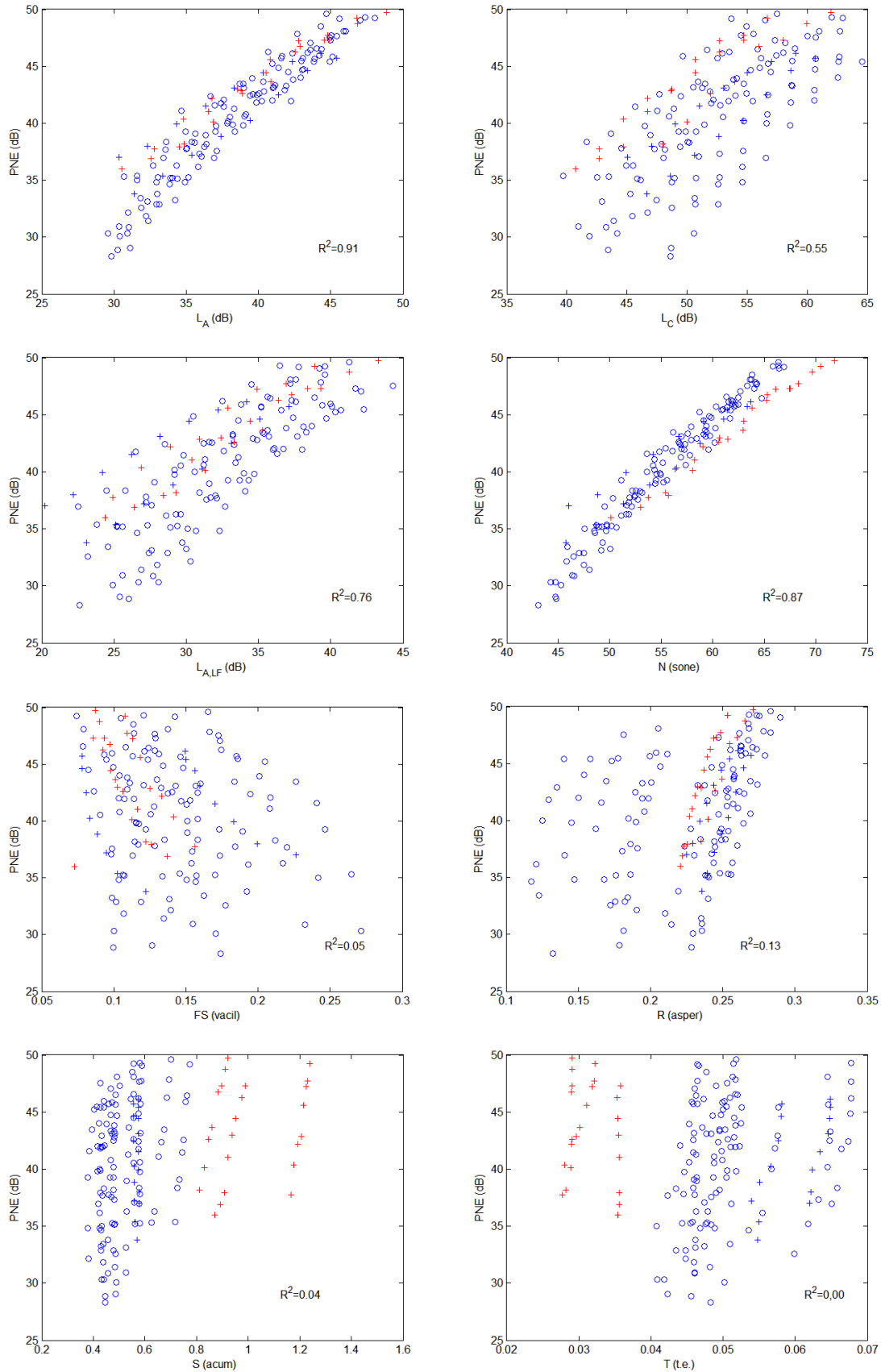
På samma sätt som i Lyssningsförsök 1, bedömdes reliabiliteten i deltagarnas skattningar genom att korrelera medelvärden för varje deltagares två första med medelvärden för de två sista skattningarna av varje ljud. Reliabiliteten var genomgående god, korrelationskoefficienterna varierade från 0,55 till 0,88 (medel = 0,72). Samtliga lyssnares skattningar togs därför med i de analyser som redovisas nedan.

### 3.3.2 Kvantifiering av upplevd störning

Upplevd störning kvantifieras på samma sätt som i Lyssningsförsök 1 (se avsnitt 3.1.2), och uttrycktes alltså som PNE, det vill säga, som ljudnivå hos lika störande skärt brus.

### 3.3.3 Samband mellan upplevd störning och olika akustiska mått

Figur 4 visar PNE på y-axeln som funktion av olika ljudparametrar (x-axeln) samt korrelationskoefficienter mellan PNE och respektive ljudparameter. De fyra översta graferna talar för att den perceptuella störningen är proportionell mot olika mått av ljudstyrka med  $R^2$ -värden mellan 0,91 och 0,55. Det finns ingen tydlig skillnad mellan tidigare inspelningar (blåa markörer) och inspelningar av bullerstörda (röda +) i dessa fyra grafer beroende på att ljudstyrkan modifierades till liknande storleksordning för alla ljuden. För de återstående ljudkvantiteterna, fluktuationsstyrka, grovhet, skärpa och tonalitet, visas inte någon tydlig trend med avseende på PNE och låga  $R^2$ -värden (0,00-0,13) antyder att det saknas ett linjärt samband mellan dessa parametrar och hur störande ljuden ansågs i testerna. Det är uppenbart att ljud inspelade av bullerstörda hade högre skärpa och lägre tonalitet än tidigare inspelningar. Dessa indikationer bör dock tolkas med mycket stor försiktighet på grund av de fåtal stimuli som har använts. Vidare hade skärpa och tonalitet lägst  $R^2$ -värden av samtliga parametrar vilket antyder att de inte betraktades som viktiga för hur störande ljuden ansågs i lyssningstesten.



Figur 4: Visar intra-individuell störning PNE (på y-axeln) som funktion av de åtta beräknade ljudkvantiteterna på x-axeln. Ringar motsvarar ljud från test 1 och + markerar ljud från test 2 där tidigare inspelningar är blåfärgade medan inspelningar av bullerstörda är rödfärgade.  $R^2$  värdet redovisas för respektive linjär regression i graferna.

## 4. Diskussion

Metodiken att låta bullerstörda personer runt vindkraftverk själva utföra inspelningar fungerade generellt sett bra. Instruktioner på plats samt skriftliga manualer om mätutrustningen var i de flesta fall tillräckliga för att försökspersonerna själva skulle kunna sköta mätningarna. För binauralmätningarna användes inte vindskydd för mikrofonerna, anledningen var att det sådana vindskydd även påverkar ljudet i mätningarna .

I det andra lyssningstestet fanns alternativet att använda flerkanaliga högtalarsystem, dock valdes hörlursuppspelningar. Anledningen var att detta gav en betydande tidsbesparing jämfört med ambisonicuppspelningar och därmed kunde fler testpersoner undersökas samt att det förenklade jämförelser mellan de två olika testen. Testmetodiken med presentation av ljud i ambisonicmiljö ger givetvis en ökad ekologisk validitet eftersom testpersoner befinner sig i en mer realistisk, om än mindre kontrollerad lyssningsmiljö där bland annat huvudrörelser kan användas för att lokalisera ljuden. I Lyssningstest 1 användes även hörlurar vilket var naturligt med tanke på att tidigare inspelningar var gjorda med binauralhuvud. Detta gjorde det möjligt för fältgruppen att ingå i experimentet och att observera skillnader mellan kortvarig störning orsakad av vindkraftsbuller i denna grupp jämfört med referensgruppen. Skillnaderna i PNE mellan fältgruppen och referensgruppen i Lyssningstest 1 indikerar att fältgruppen var mer känslig för vindkraftsbuller än för skärt brus. Detta är en intressant observation som belyser att fältgruppen kan göra åtskillnad mellan det skära bruset och vindkraftsbullret och uppfattar det senare som mer störande jämfört med försökspersonerna i referensgruppen trots att det inte var de egna verken de lyssnade på.

Från beräkningarna av inspelningarnas psykoakustiska parametrar kunde det observeras att inspelningarna utförda av bullerstörda hade högre skärpa och lägre tonalitet jämfört med vindkraftsbuller från tidigare projekt, dessa indikationer bör tolkas mycket försiktigt eftersom endast ett fåtal ljud analyserades och vid Lyssningsexperiment 2 (med en icke bullerstörd grupp) saknade dessa variabler signifikant betydelse för hur störande ljud ansågs vara. Möjligtvis var de bullerstörda mer känsliga för dessa ljudparametrar.

Tidigare test med (artificiella) amplitudmodulationer av vindkraftsbuller (Lee *et al* 2011) visade ett samband mellan upplevd störning och amplitudmodulationer. De aktuella testresultaten indikerar dock att jämfört med ljudnivån på vindkraftverken är parametern fluktuationsstyrka (som korrelerar med modulationen) av mindre betydelse för hur störande testpersonerna uppfattade vindkraftsbuller. Det kan noteras att uppenbara amplitudmodulationer saknades i de stimuli som användes här eftersom sådana var svåra att finna i inspelningarna utförda före och under projektet. Orsaken till avsaknaden kan vara att modulationer är ett intermittent fenomen och uppkommer i olika omfattning vid olika verk och att dessa hann avta innan testpersonerna startade inspelningarna. Tidigare undersökningar tyder på att de främst uppstår på längre avstånd från verken än vad som undersökts i denna rapport (v d Berg 2004, DiNapoli 2011, Larsson 2012). Detta innebär att frågeställningen om modulationer i vindkraftsljud och dess inverkan på störning ej kunnat besvaras under projektet.

Det kan diskuteras om tiden för ljudstimuli i lyssningsförsöken är tillräcklig för försökspersonerna att bedöma olika ljudparametrar eller om längre stimultider skulle ge andra resultat. Denna frågeställning har inte undersökts i denna rapport och författarna känner heller inte till någon systematisk undersökning av detta förutom försök av Kuwano 2000 där kontinuerliga utvärderingar av bullerstörning visade högst korrelation med



ljudstimuli inom ca tre sekunder, dock bör noteras att de försöken ej utvärderade vindkraftsbuller.

Sammanfattningsvis tyder resultaten från lyssningstesterna som genomfördes på att ljudstyrkan är den mest avgörande faktorn för hur störande försökspersonerna uppfattade vindkraftsbuller. Experimenten har inkluderat ljudupptagningar utförda av bullerstörda vilket tidigare inte är studerat. Projektet har varit nydanande när det kommer till inspelningsmetodiken där de bullerutsatta själva fick spela in ljuden vid egna valda tillfällen, något som oss veterligt inte tidigare har gjorts för vindkraftsbuller eller annan bullerkälla. Vidare har ljudparametrar av vindkraftsbuller undersökts som tidigare bara har blivit rapporterade från betydligt äldre verk (Persson Waye & Öhrström 2002).

## 5. Slutsatser

Följande slutsatser och erfarenheter kan anses uppnått i projektet:

1. De ljudparametrar som främst påverkade kortvarig störning av vindkraftsbuller gäller ljudstyrkan. Ytterligare undersökta akustiska parametrar; fluktuation, tonalitet, grovhet och skärpa, verkade inte ha varit av större betydelse för hur störande vindkraftsbuller uppfattades i de lyssningsförsök som utfördes under projektet.
2. A-vägda ljudnivåer visade högre korrelation till störning än C-vägda ljudnivåer.
3. Försöket att låta närboende själva spela in när de ansåg sig störda föll väl ut. Deltagarna försåg projektet med mätningar som förhoppningsvis kan komma till ytterligare användning i kommande studier.
4. Boende vid vindkraftverk som var störda av buller uppfattade ljudet som ca 4 dB mer störande än en referensgrupp som normalt inte är exponerade för vindkraftsbuller.
5. Analysen av de mätningar som utfördes av närboende bullerstörda visade att de skiljde sig från resultaten från tidigare inspelningar genom en högre nivå av Zwicker-storheten skärpa och en lägre nivå av tonalitet.

## Tack till

Författarna riktar sin tacksamhet till alla försökspersoner och medarbetare som deltagit i projektet, utfört mätningar, deltagit i lyssningsförsök och hjälp till med frakt och riggning av mätutrustningen. Ett stort tack riktas även till Naturvårdsverket för de beviljade medel ur Miljöforskningsanslaget som gjorde det möjligt att utföra projektet samt till Henning Theorell som hjälpte författarna med att finna deltagare till studien som var bullerstörda av vindkraft.

## Referenser:

- Berglund B., Quality assurance in environmental psychophysics. In S.J. Bolanowski & G.A. Gescheider (Eds.), *Ratio Scaling of Psychological Magnitudes—In Honor of the Memory of S.S. Stevens*. Hillsdale: Erlbaum; 140-162, 1991
- Bolin K., Khan S., Nilsson M. E., The potential of natural sounds to mask wind turbine noise, *Acta Acoustica united with Acustica*, 96, 131-137, 2010
- Bolin K., Kedhammar A., Nilsson M.E., The Influence of Background Sounds on Loudness and Annoyance of Wind Turbine Noise, *Acta Acoustica united with Acustica*, 98, 741-748, 2012
- Di Napoli C., Long distance amplitude modulation of wind turbine noise. *Proceedings från Wind Turbine Noise*, Rom, 2011
- Hanssen S.A., Vos H., Eisses A.R. & Pedersen E., A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources, *J. Acoust. Soc. Am.*, 130, pp 3746-3753, 2011
- Kuwano S., Namba S. & Miura H., Advantages and disadvantages of A-weighted sound pressure level in relation to subjective impression of environmental noises, *Noise Control Eng.*, 33, pp 107-115, 1989
- Kuwano S. Temporal aspects in the evaluation of environmental noise. In D. Cassereau (Ed.), *Inter Noise 2000* (Vol. Keynote lectures, pp. 109-119). Poughkeepsie, NY: Noise Control Foundation. 2000
- Lee S., Kim K., Choi W., & Lee S., Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise, *Noise Control Eng. J.*, 59, pp 38-46, 2011
- Larsson C., Ljudutbredning påverkan av väder och vind, presentation vid Nationella Vindkraftskonferensen, Kalmar,  
[http://www.natverketforvindbruk.se/Global/Nationella%20Vind/2012/F%C3%B6rdjupningar/Tema%20Ljud/Larsson\\_Nat\\_Vk-konf\\_Kalmar\\_2012.pdf](http://www.natverketforvindbruk.se/Global/Nationella%20Vind/2012/F%C3%B6rdjupningar/Tema%20Ljud/Larsson_Nat_Vk-konf_Kalmar_2012.pdf) , 2012
- Möller H. & Pedersen C. S., Low-frequency noise from large wind turbines, *J. Acoust. Soc. Am.*, 129, pp 3727-3744, 2011
- Naturvårdsverket 2012, <http://www.naturvardsverket.se/sv/Start/Verksamheter-med-miljopaverkan/Buller/Vindkraft/Matning-och-berakning-av-ljud-fran-vindkraft/Berakningar-av-vindkraftsljud/>
- Nilsson M.E., A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term ljudstyrka or annoyance of road-traffic sound. *Journal of Sound and Vibration*, 302, pp 197–207, 2007
- Nilsson, M.E., Alvarsson, J., Rådsten-Ekman, M., & Bolin, K, Loudness of fountain and road traffic sounds in a city park. *Proceedings of the Sixteenth International Congress on Sound and Vibration*. Krakow, Poland: International Congress on Sound and Vibration., 2009
- Zwicker E. & Fastl H., *Psychoacoustics- Facts and Models*, 2nd ed, Berlin Heidelberg, 1999
- ISO9613 International Organization for Standardization, Switzerland, Attenuation of sound during propagation outdoors- Part 1: Atmospheric absorption, 1995
- Naturvårdsverket,
- Pedersen, E., & Waye, K. P., Perception and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116(6), 3460-3470, 2004

Pedersen, E., & Waye, K. P., Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(7), 480-486., 2007

Pedersen, E., & Larsman, P., The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 28(4), 379-389, 2008

Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R., & Bouma, J., Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), 634-643, 2009

Persson Waye K. & Öhrström E., Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise, *Journal of Sound and Vibration*, 250, pp 65-73, 2002

Proposition 2008/09:163, En sammanhållen klimat- och energipolitik – Energi, <http://www.regeringen.se/content/1/c6/12/27/85/65e0c6f1.pdf>

Tari A. & Wetterblad V., Lågfrekvent buller hos vindkraftverk och trafik, Examensarbete vid Marcus Wallenberglaboratoriet, KTH, 2012

van den Berg G.P. , Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, *Journal of Sound and Vibration*, 277, pp. 955-970. 2004

## **Bilaga A: Instruktioner till försökspersoner.**

### **Instruktion**

I det här försöket kommer du att få lyssna till ett antal ljud. Din uppgift är att bedöma hur störande du upplever dessa ljud. Tänk dig att du sitter i en trädgård och kopplar av. Hur störande skulle ljuden upplevas i denna situation?

Du gör bedömningarna genom att ange siffror som du tycker överensstämmer med din upplevelse av hur störande ljuden låter. Du får använda vilka siffror du vill men du skall alltid gå tillväga på följande sätt: Det första ljudet du hör ger du en siffra som du tycker passar för hur störande ljudet låter. Följande ljud ger du sedan siffror som motsvarar förhållandena mellan störupplevelserna. Exempel: Om du ger det första ljudet siffran 60 och du upplever det andra ljudet som dubbelt så störande så svarar du 120, om nästa ljud upplevs som en tredjedel så störande som det andra ljudet så svarar du 40, o.s.v. Du bestämmer själv vilka siffror du vill använda. Alla positiva tal får användas, såväl heltal som decimaltal. Efter varje ljud skriver du in ditt svar på datorn. Det är viktigt att du lyssnar på hela ljudet innan du gör din bedömning.

Vi skall först köra en övningsomgång där du får prova att bedöma några ljud. De ljud du får höra under provomgången är representativa för de ljud som du kommer att få höra under själva försöket.

Observera att det inte finns några rätta eller felaktiga svar. Vi är intresserade av hur just du upplever dessa ljud. Försök därför att inta en så naiv attityd som möjligt och svara spontant enligt hur du verkligen upplever de olika ljuden.

Har du några frågor?

### **Instruction**

In this test you will listen to different sounds. Your task is to judge how annoying you perceive these noises. Imagine you are sitting in a garden and relaxing. How annoying would you perceive the noises in that situation?

Judge the annoyance by assigning numbers you think correspond to your degree of annoyance from the noises. You may use any positive numbers you want, integers as well as non-integers. You should always do like this: The first noise you hear you assign a number that corresponds to your perceived annoyance. The following noises should be in a ratio from the earlier number. Example: If the first noise is assigned 60 and you perceive the second noise as twice as annoying assign 120 to the second noise, if next noise is perceived as a third as annoying as the second assign 40 and so fourth. You decide which positive numbers to use. After each noise type your judgment on the computer. It is important that you listen to the entire noise before you make your decision.

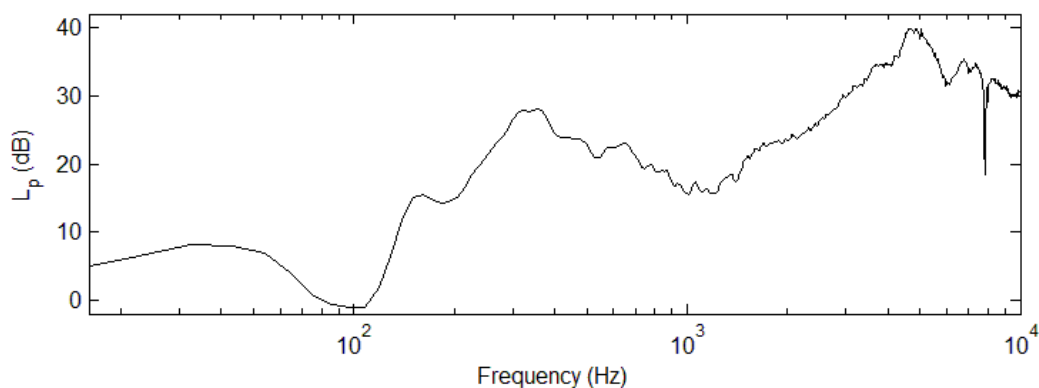
We will begin with a test session where you may judge a couple of noises. These noises are representative of the noises in the actual test.

Please note that there are no correct or incorrect answers. We are interested of your perception of these noises. Therefore try to assume a naive attitude and judge the noises as spontaneously as possible.

Do you have any questions?

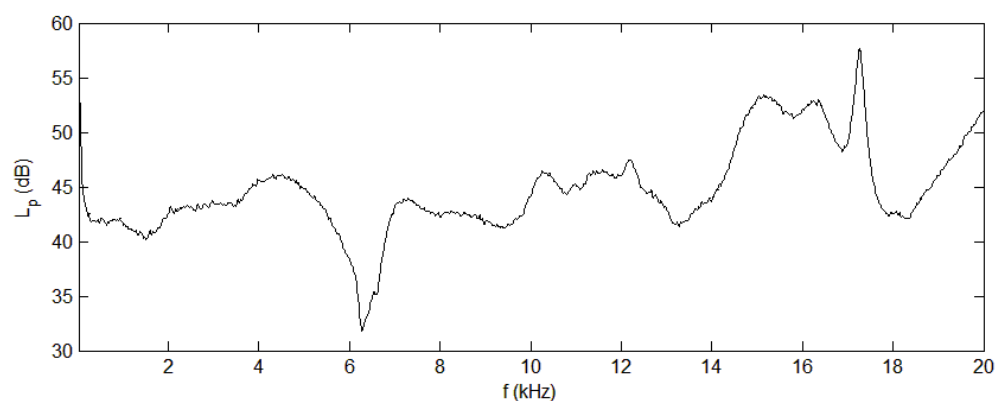
## Bilaga B: Hörlurarnas prestanda

Ljuddämpning för Bose QuietComfort 15 uppmätt i MWLs efterklangsrum och en bredbandig bullerkälla (Bruel & Kjaer) ger dämning i olika frekvenser som kan observeras i figur A1:



Figur A1: Dämning i dB för indirekt infallande ljud för hörlurar Bose QuietComfort 15.

Figur A2 ger frekvensvarsfunktionen för Bose QuietComfort 15.



Figur A2: Frekvensvarsfunktion för hörlurarna.

Frekvensvarsfunktionen för AKG501k erhöles från tidigare publicerade resultat för AKG500 från Möller H, Hammershöi D, Jensen C. B. och Sörensen M. F., *Transfer characteristics of Headphones Measured on Human Ears*, Journal of Audio Engineering Society, vol. 43, pp 203-217, 1995 och kontakt med företaget AKG som försäkrat att skillnaden i frekvensvarsfunktion mellan modellerna är marginell.

## Bilaga C: Beskrivning av psykoakustiska parametrar

Psykoakustiska parametrar har analyserats på KTH/MWL i MATLAB-baserade mjukvaror samt med hjälp av det kommersiella programmet MTS Sound Quality 3.7.5. Följande mått, som nedan beskrivs i detalj, beräknades:

1. Ljudstyrka,  $N$ , (engelskans loudness),
2. Skärpa,  $S$ , (engelskans sharpness) i enheten acum,
3. Fluktuationsstyrka,  $FS$ , (engelskans fluctuation strength) i enheten vacil,
4. Grovhet,  $R$ , (engelskans roughness) i enheten asper,
5. Tonalitet,  $T$ , (engelskans tonality) i enheten tonal enhet

1. Ljudstyrka,  $N$  (i enheten sone), beräknas som integralen av specifik ljudstyrka  $N'$  för de 25 olika kritiska banden,  $z$  med enheten Bark som ungefär motsvarar tersbandsfrekvenser i den fysiska rymden. Uttrycket för ljudstyrka kan ses i ekvation (1) nedan

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N'(z) dz, \quad N'(z) = 0,08 \left( \frac{E_{TQ}(z)}{E_0} \right)^{0,23} \left[ \left( 0,5 + 0,5 \frac{E(z)}{E_{TQ}(z)} \right)^{0,23} - 1 \right] \frac{\text{sonne}}{\text{Bark}} \quad (1)$$

där  $E_{TQ}(z)$  är excitationens tröskeln i tystnad,  $E_0$  är excitationen som korresponderar till referensintensiteten  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

2. Skärpa,  $S$  (i enheten acum), ges också av en integral av  $N'$  över  $z$  men i detta fall viktad med en faktor,  $g(z)z$ , och normerat med ljudstyrka, uttrycket ges i ekvation (2) som

$$S = 0,11 \frac{\int N' g(z) z dz}{N} \text{ acum} \quad (2)$$

Hörselorganet uppfattar temporala förändringar av ljud,  $\Delta L$ , så kallade fluktuationer olika beroende på med vilken frekvens,  $f_{\text{mod}}$ , fluktuationerna sker. För långsamma förändringar registreras de enskilda cyklerna och ljudet blir modulerat, hörselns känslighet för denna typ av förändringar är maximal för 4 Hz och beskrivs av den psykoakustiska storheten.

3. Fluktuationsstyrka,  $FS$  (i enheten vacil), som ges i ekvation (3). Amplitudmodulationer som ofta diskuteras i vindkraftsbullersammanhang återges av  $FS$  och därför är detta ett mått som anses intressant i detta projekt.

$$FS = \frac{0,008 \int \Delta L / \text{dB Bark} dz}{(f_{\text{mod}} / 4 \text{ Hz}) + (4 \text{ Hz} / f_{\text{mod}})} \text{ vacil} \quad (3)$$

4. För fluktuationer med frekvenser över 15 Hz hörs enskilda cykler mindre och en mer kontinuerlig känsla uppkommer som beskrivs av ljudets Grovhet,  $R$  (i enheten asper), som beskriver hur hörselorganet uppfattar fluktuationer över 15 Hz. För att beräkna  $R$  används formel (4)

$$R = 0,3 \frac{f_{\text{mod}}}{\text{kHz}} \int \frac{\Delta L(z) dz}{\text{dB / Bark}} \text{ asper} \quad (4)$$

5. Tonalitet,  $T$ , är ett mått som beskriver andelen av toner, d.v.s. smalbandiga toppar i frekvensspektra. Den ansågs vara intressant att analysera eftersom tonala komponenter generellt anses orsaka ökande störningar vilket har resulterat i ett +5 dB tillägg för tonala vindkraftsbuller enligt Naturvårdsverkets riktlinjer. Eftersom flera beräkningsalgoritmer för denna storhet finns redovisade så kan denna storhet endast jämföras om samma beräkningsmetod används. I denna rapport är det tonalitet som beräknas i programvaran MTS Sound Quality 3.7.5 som avses och används. De matematiska uttryck som beräknar Tonalitet i datorprogrammet finns redovisade i (Terhart E. *et al*, 1982)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> E. Terhardt, G. Stoll, & M. Seewann, Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals, J. Acoust. Soc. Am. 71, 679 (1982)

## Bilaga D: Ljudparametrar

Tabell med resultat från lyssningsförsök ( $||A||$ ) akustiska mätningar och använda i principal-komponents-uppdelning och regressionsanalys (avsnitt 3.2 och 3.3).

	Vkv nr	$  A  $	$L_{asil}$ (dB)	$L_A$ (dB)	$L_C$ (dB)	$L_{ALF}$ (dB)	Loud (phon)	Fluct str (vacil)	Roughness (asper)	Skärpa (acum)	Tonalitet (t.u.)
Test 1											
Imission	1	0,61	30,2	33,6	43,1	27,3	48,7	0,26	0,25	0,62	0,048
		0,66	31,1	35,6	45,1	29,3	51,6	0,22	0,26	0,64	0,048
		0,85	35,3	37,6	47,1	31,3	54,3	0,21	0,26	0,65	0,049
		0,91	36,3	39,6	49,1	33,3	56,9	0,19	0,26	0,66	0,049
		0,95	37,3	41,6	51,1	35,3	59,4	0,18	0,27	0,67	0,050
		1,14	39,7	43,6	53,1	37,3	61,8	0,17	0,27	0,68	0,051
		1,32	41,1	45,6	55,1	39,3	64,1	0,17	0,28	0,69	0,052
		1,43	42,6	47,6	57,1	41,3	66,4	0,17	0,28	0,70	0,052
	2	0,64	30,3	34,3	40,4	23,8	49,7	0,15	0,25	0,72	0,046
		0,71	32,6	36,3	42,4	25,8	52,5	0,14	0,25	0,73	0,046
		0,74	33,5	38,3	44,4	27,8	55,2	0,19	0,25	0,73	0,046
		0,85	35,5	40,3	46,4	29,8	57,7	0,15	0,26	0,74	0,046
		0,88	36,5	42,3	48,4	31,8	60,2	0,14	0,26	0,75	0,046
		1,08	39,3	44,3	50,4	33,8	62,5	0,13	0,27	0,76	0,046
		1,17	40,0	46,3	52,4	35,8	64,7	0,12	0,27	0,76	0,046
		1,35	42,5	48,3	54,4	37,8	66,9	0,14	0,28	0,77	0,046
	3	0,62	30,0	36,2	43,1	25,6	49,0	0,11	0,24	0,56	0,048
		0,68	31,5	38,2	45,1	27,6	51,7	0,10	0,24	0,56	0,047
		0,80	34,6	40,2	47,1	29,6	54,2	0,09	0,25	0,56	0,049
		0,92	36,7	42,2	49,1	31,6	56,7	0,09	0,25	0,56	0,051
		1,02	38,0	44,2	51,1	33,6	59,1	0,08	0,26	0,56	0,051
		1,15	40,0	46,2	53,1	35,6	61,4	0,08	0,26	0,56	0,052
		1,26	41,4	48,2	55,1	37,6	63,6	0,08	0,27	0,55	0,051
		1,38	42,2	50,2	57,1	39,6	65,8	0,07	0,27	0,56	0,051
	4	0,67	31,7	36,4	42,6	22,5	49,5	0,17	0,23	0,58	0,065
		0,72	32,8	38,4	44,6	24,5	52,2	0,16	0,23	0,58	0,066
		0,86	36,0	40,4	46,6	26,5	54,8	0,15	0,24	0,58	0,066
		0,90	36,4	42,4	48,6	28,5	57,3	0,14	0,24	0,58	0,067
		1,03	38,6	44,4	50,6	30,5	59,6	0,13	0,25	0,57	0,068



		1,15	39,9	46,4	52,6	32,5	61,9	0,13	0,26	0,58	0,068
		1,27	41,0	48,4	54,6	34,5	64,2	0,13	0,26	0,58	0,068
		1,39	42,5	50,4	56,6	36,5	66,4	0,12	0,27	0,58	0,068
		0,61	29,3	36,1	42,3	25,2	49,7	0,17	0,26	0,58	0,044
	5	0,68	31,6	38,1	44,3	27,2	52,4	0,13	0,26	0,58	0,045
		0,76	33,6	40,1	46,3	29,2	55,0	0,12	0,26	0,58	0,045
		0,83	34,4	42,1	48,3	31,2	57,4	0,13	0,27	0,58	0,045
		0,93	36,8	44,1	50,3	33,2	59,7	0,12	0,27	0,58	0,046
		1,11	39,0	46,1	52,3	35,2	62,1	0,11	0,28	0,58	0,046
		1,27	41,1	48,1	54,3	37,2	64,3	0,11	0,28	0,59	0,046
		1,41	42,3	50,1	56,3	39,2	66,5	0,11	0,29	0,59	0,047
Test 1 1km	1	0,49	25,1	32,4	43,5	28,1	44,8	0,27	0,24	0,43	0,041
		0,61	29,3	34,4	45,5	30,1	47,6	0,24	0,24	0,43	0,041
		0,71	31,8	36,4	47,5	32,1	50,3	0,22	0,24	0,44	0,042
		0,73	32,7	38,4	49,5	34,1	52,9	0,21	0,25	0,44	0,043
		0,87	35,6	40,4	51,5	36,1	55,4	0,21	0,25	0,44	0,044
		1,05	37,6	42,4	53,5	38,1	57,9	0,20	0,26	0,45	0,045
		1,18	39,2	44,4	55,5	40,1	60,3	0,19	0,26	0,46	0,046
		1,25	40,1	46,4	57,5	42,1	62,7	0,17	0,27	0,47	0,046
	2	0,50	25,5	33,0	41,3	25,6	46,3	0,15	0,24	0,53	0,046
		0,56	27,9	35,0	43,3	27,6	49,2	0,14	0,24	0,53	0,046
		0,65	30,8	37,0	45,3	29,6	51,8	0,15	0,24	0,53	0,046
		0,75	33,1	39,0	47,3	31,6	54,4	0,15	0,25	0,53	0,046
		0,84	34,9	41,0	49,3	33,6	56,9	0,13	0,25	0,53	0,046
		0,93	36,9	43,0	51,3	35,6	59,2	0,13	0,26	0,54	0,047
		1,10	39,7	45,0	53,3	37,6	61,6	0,12	0,26	0,54	0,047
		1,37	41,4	47,0	55,3	39,6	63,8	0,11	0,27	0,55	0,048
	3	0,45	24,0	33,2	42,1	25,4	44,7	0,13	0,18	0,49	0,042
		0,55	27,3	35,2	44,1	27,4	47,5	0,12	0,18	0,48	0,043
		0,61	29,4	37,2	46,1	29,4	50,2	0,11	0,19	0,47	0,045
		0,68	31,7	39,2	48,1	31,4	52,7	0,10	0,19	0,47	0,048
		0,80	34,7	41,2	50,1	33,4	55,2	0,10	0,20	0,47	0,050
		0,96	37,0	43,2	52,1	35,4	57,5	0,11	0,20	0,47	0,049
		1,05	38,3	45,2	54,1	37,4	59,9	0,10	0,21	0,47	0,050
		1,15	39,3	47,2	56,1	39,4	62,2	0,09	0,21	0,47	0,050

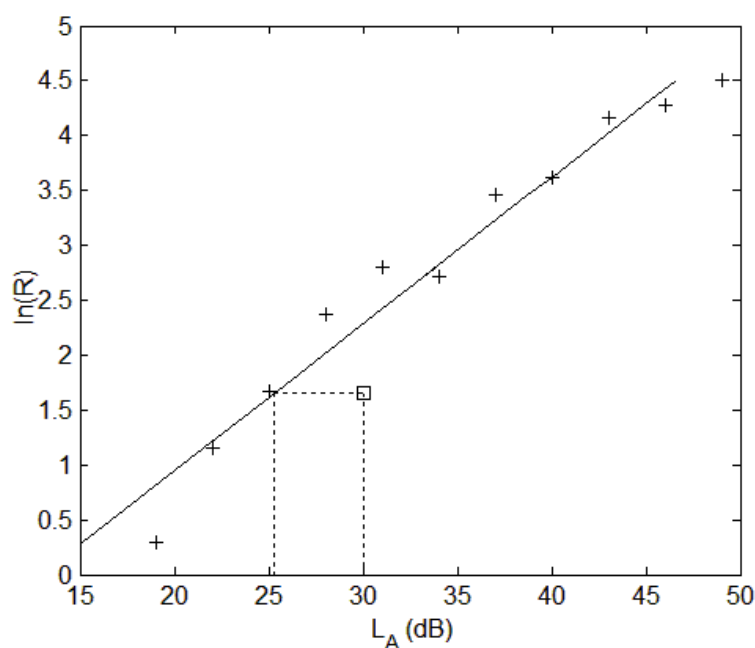
4	0,55	28,0	34,8	42,3	23,2	46,5	0,18	0,17	0,49	0,060	
	0,62	30,1	36,8	44,3	25,2	49,2	0,16	0,18	0,48	0,062	
	0,67	31,9	38,8	46,3	27,2	51,8	0,15	0,18	0,48	0,063	
	0,80	34,5	40,8	48,3	29,2	54,3	0,16	0,18	0,48	0,064	
	0,88	36,4	42,8	50,3	31,2	56,7	0,16	0,19	0,48	0,065	
	0,96	37,3	44,8	52,3	33,2	59,1	0,16	0,19	0,48	0,065	
	1,11	39,3	46,8	54,3	35,2	61,4	0,15	0,20	0,49	0,065	
	1,31	41,5	48,8	56,3	37,2	63,7	0,14	0,21	0,49	0,064	
5	0,48	25,1	33,4	41,0	24,9	45,3	0,17	0,23	0,49	0,050	
	0,52	26,2	35,4	43,0	26,9	48,0	0,13	0,24	0,48	0,048	
	0,61	29,3	37,4	45,0	28,9	50,7	0,13	0,24	0,48	0,048	
	0,73	32,4	39,4	47,0	30,9	53,1	0,11	0,24	0,48	0,050	
	0,77	33,0	41,4	49,0	32,9	55,5	0,12	0,25	0,48	0,051	
	0,92	36,6	43,4	51,0	34,9	57,9	0,11	0,25	0,48	0,052	
	1,01	37,2	45,4	53,0	36,9	60,2	0,11	0,26	0,48	0,052	
	1,21	39,8	47,4	55,0	38,9	62,5	0,11	0,26	0,49	0,052	
Test 1 2 km	1	0,54	27,2	33,8	45,6	30,3	45,8	0,14	0,19	0,38	0,045
		0,62	29,5	35,8	47,6	32,3	48,5	0,15	0,17	0,38	0,047
		0,77	33,4	37,8	49,6	34,3	51,1	0,25	0,16	0,38	0,049
		0,89	35,4	39,8	51,6	36,3	53,6	0,24	0,17	0,39	0,050
		1,04	37,1	41,8	53,6	38,3	56,2	0,23	0,17	0,39	0,050
		1,16	38,7	43,8	55,6	40,3	58,7	0,20	0,17	0,40	0,050
		1,17	38,7	45,8	57,6	42,3	61,0	0,19	0,18	0,41	0,050
		1,33	40,6	47,8	59,6	44,3	63,3	0,17	0,18	0,43	0,051
2	0,50	25,7	33,6	43,2	27,7	46,6	0,23	0,21	0,46	0,046	
	0,58	28,5	35,6	45,2	29,7	49,3	0,19	0,22	0,46	0,046	
	0,70	31,8	37,6	47,2	31,7	51,9	0,18	0,22	0,46	0,046	
	0,76	33,1	39,6	49,2	33,7	54,5	0,17	0,23	0,46	0,046	
	0,93	36,3	41,6	51,2	35,7	56,9	0,16	0,23	0,47	0,048	
	0,99	36,4	43,6	53,2	37,7	59,3	0,14	0,24	0,48	0,048	
	1,07	38,1	45,6	55,2	39,7	61,7	0,15	0,24	0,49	0,049	
	1,29	40,5	47,6	57,2	41,7	64,0	0,13	0,25	0,50	0,049	
3	0,48	25,0	32,9	43,3	26,7	44,3	0,10	0,18	0,44	0,042	
	0,54	27,5	34,9	45,3	28,7	47,0	0,10	0,18	0,43	0,045	
	0,62	29,4	36,9	47,3	30,7	49,6	0,10	0,15	0,42	0,049	

		0,66	30,9	38,9	49,3	32,7	52,1	0,11	0,14	0,42	0,051
		0,79	33,7	40,9	51,3	34,7	54,6	0,12	0,15	0,42	0,052
		0,89	35,7	42,9	53,3	36,7	57,0	0,10	0,15	0,42	0,052
		1,04	37,4	44,9	55,3	38,7	59,4	0,10	0,15	0,42	0,052
		1,09	38,7	46,9	57,3	40,7	61,7	0,09	0,16	0,43	0,053
	4	0,45	24,0	32,7	41,3	22,6	43,1	0,17	0,13	0,45	0,048
		0,58	28,7	34,7	43,3	24,6	45,9	0,16	0,12	0,44	0,051
		0,61	29,7	36,7	45,3	26,6	48,5	0,16	0,12	0,43	0,054
		0,66	30,9	38,7	47,3	28,6	51,1	0,19	0,12	0,43	0,055
		0,81	34,5	40,7	49,3	30,6	53,6	0,15	0,13	0,42	0,057
		0,94	36,1	42,7	51,3	32,6	56,1	0,15	0,13	0,43	0,057
		0,95	36,8	44,7	53,3	34,6	58,4	0,13	0,14	0,43	0,058
		1,09	38,9	46,7	55,3	36,6	60,9	0,12	0,14	0,44	0,058
	5	0,45	23,5	33,3	41,8	26,0	44,8	0,10	0,23	0,44	0,046
		0,52	26,0	35,3	43,8	28,0	47,5	0,11	0,21	0,44	0,046
		0,57	27,4	37,3	45,8	30,0	50,1	0,10	0,18	0,43	0,047
		0,72	32,0	39,3	47,8	32,0	52,5	0,12	0,19	0,43	0,049
		0,79	33,7	41,3	49,8	34,0	54,9	0,12	0,19	0,43	0,051
		0,90	35,5	43,3	51,8	36,0	57,2	0,11	0,19	0,43	0,051
		0,97	35,1	45,3	53,8	38,0	59,6	0,11	0,20	0,43	0,052
		1,18	39,1	47,3	55,8	40,0	61,9	0,10	0,20	0,44	0,050
Test 2	1	0,53	25,5	34,0	41,1	23,1	45,8	0,12	0,24	0,57	0,055
		0,60	27,1	36,0	43,1	25,1	48,6	0,10	0,24	0,56	0,055
		0,66	28,9	38,0	45,1	27,1	51,3	0,09	0,24	0,56	0,054
		0,74	30,6	40,0	47,1	29,1	53,9	0,09	0,25	0,56	0,055
		0,83	32,0	42,0	49,1	31,1	56,4	0,08	0,25	0,56	0,057
		0,96	34,2	44,0	51,1	33,1	58,8	0,08	0,26	0,56	0,058
		1,13	36,4	46,0	53,1	35,1	61,1	0,08	0,26	0,56	0,058
		1,20	37,5	48,0	55,1	37,1	63,3	0,08	0,27	0,56	0,058
	2	0,67	28,8	34,0	40,1	20,2	46,0	0,23	0,23	0,58	0,062
		0,71	29,7	36,0	42,1	22,2	48,9	0,20	0,23	0,58	0,062
		0,82	31,7	38,0	44,1	24,2	51,6	0,18	0,23	0,58	0,062
		0,92	33,3	40,0	46,1	26,2	54,2	0,17	0,24	0,57	0,063
		1,01	34,9	42,0	48,1	28,2	56,7	0,16	0,24	0,57	0,065
		1,11	36,2	44,0	50,1	30,2	59,1	0,16	0,25	0,57	0,065

	1,19	37,2	46,0	52,1	32,2	61,4	0,15	0,25	0,57	0,065
	1,24	37,9	48,0	54,1	34,2	63,7	0,15	0,26	0,58	0,065
3	0,69	29,5	36,3	42,2	24,9	53,7	0,16	0,22	1,17	0,028
	0,83	32,1	38,3	44,2	26,9	56,5	0,14	0,23	1,18	0,028
	0,94	34,0	40,3	46,2	28,9	59,0	0,13	0,23	1,19	0,029
	0,99	34,6	42,3	48,2	30,9	61,5	0,13	0,24	1,21	0,030
	1,19	37,4	44,3	50,2	32,9	63,8	0,12	0,24	1,22	0,031
	1,33	39,0	46,3	52,2	34,9	66,1	0,11	0,24	1,22	0,032
	1,38	39,5	48,3	54,2	36,9	68,3	0,11	0,25	1,23	0,032
	1,53	41,0	50,3	56,2	38,9	70,5	0,11	0,25	1,24	0,032
4	0,72	29,9	38,5	46,9	29,3	55,4	0,12	0,24	0,81	0,028
	0,81	31,8	40,5	48,9	31,3	58,1	0,11	0,24	0,83	0,029
	0,96	34,4	42,5	50,9	33,3	60,6	0,11	0,24	0,85	0,029
	1,04	35,4	44,5	52,9	35,3	63,0	0,10	0,25	0,86	0,030
	1,29	38,5	46,5	54,9	37,3	65,3	0,10	0,25	0,88	0,029
	1,34	39,1	48,5	56,9	39,3	67,5	0,09	0,26	0,90	0,029
	1,48	40,5	50,5	58,9	41,3	69,7	0,09	0,27	0,91	0,029
	1,59	41,5	52,5	60,9	43,3	71,8	0,09	0,27	0,92	0,029
5	0,62	27,8	34,0	39,9	24,4	50,1	0,07	0,22	0,87	0,035
	0,65	28,7	36,0	41,9	26,4	53,0	0,14	0,22	0,89	0,036
	0,71	29,7	38,0	43,9	28,4	55,7	0,13	0,23	0,91	0,036
	0,87	32,8	40,0	45,9	30,4	58,2	0,12	0,23	0,92	0,036
	1,00	34,7	42,0	47,9	32,4	60,7	0,10	0,23	0,94	0,036
	1,11	36,2	44,0	49,9	34,4	63,0	0,10	0,24	0,95	0,035
	1,26	38,0	46,0	51,9	36,4	65,2	0,09	0,24	0,97	0,035
	1,35	39,0	48,0	53,9	38,4	67,4	0,09	0,25	0,99	0,036

## Bilaga E: Beäkning av PNE

Figur E1 visar principen bakom beräkningar av PNE. Kryssen visar en lyssnares genomsnittliga skattning ( $R_{\text{skärtbrus}}$ ) av olika ljudnivåer av skärt brus, dessa estimeras med en linjär funktion,  $\ln(R_{\text{skärtbrus}}) = a + bL_A$  (sambandet med ljudnivå är approximativt linjärt efter logaritmisk-transformation av  $R_{\text{skärtbrus}}$ ). Denna approximation användes sedan för att uttrycka en skattning av vindkraftsljud (fyrkant) i decibel, genom att beräkna  $[\ln(R_{\text{vkljud}}) - a]/b$ , där  $R_{\text{vkljud}}$  är en genomsnittlig skattning av ett vindkraftsljud. I figurens exempel har vindkraftsljudet en akustik nivå = 30 dBA ( $L_{Aeq}$ ), men en störningsnivå (= 26 dBA (PNE)). Det vill säga, lyssnaren bedömde vindkraftsljudet som lika störande som ett skärt brus med nivån 26 dBA.



Figur E1: Illustrerar hur skattningar av skärt brus (+) approximeras av en funktion (-). Fyrkanten beskriver en skattning av vindkraftsljud med ljudnivån 30 dB som uppfattas som lika störande som ca 26 dB skärt brus.