

Ljud från vindkraftverk i kuperad terräng

Vindval, projektnummer 40969–1

Författare: Kristina Conrady, Jesper Alvarsson, Karl Bolin
och Anna Rutgersson

Innehåll

FÖRORD

FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.

1.	SAMMANFATTNING	6
2.	SUMMARY	7
3.	INLEDNING	8
4.	MÄTPLATSER	10
4.1.	Karsholm	10
4.2.	Jädraås	11
4.3.	Malå	11
5.	MÄTNINGAR AV LJUD OCH METEOROLOGI	13
5.1.	Metod	13
5.2.	Meteorologiska förhållanden	13
5.3.	Akustiska förhållanden	17
5.4.	Ljud vid olika väderförhållanden	18
5.4.1.	Jämförelse av de tre mätplatserna	18
5.4.2.	Fokus på Malå	20
5.5.	Amplitudmodulerat ljud	22
5.6.	Sammanfattning	26
6.	LJUDUTBREDNINGSBERÄKNINGAR	27
6.1.	Ljudutbredningsalgoritm	27
6.2.	Markdata	28
6.2.1.	Modellering av terrängvariationer	28
6.2.2.	Modellering av markimpedans	30
6.3.	Väderdata	32
6.4.	Ljuddata från vindkraftverken	34
6.5.	Beräkningsresultat	35
6.5.1.	Beräkningstider	35
6.5.2.	Beräkningsresultat	36
6.6.	Sammanfattning	38
7.	VALIDERING MOT STÖRNINGSUPPLEVELSE	40
7.1.	Frågeformulär	40
7.1.1.	Mätningsspecifikation	40

7.1.2.	Urval	40
7.1.3.	Enkätfrågor	41
7.1.4.	Utvärdering av modelleringsmodell med och utan terräng gentemot störning	42
7.1.5.	Databearbetning	42
7.1.6.	Kontroll och bearbetning av variabler inför multipel regression	43
7.1.7.	Proportion störda samtliga deltagare	45
7.1.8.	Störning i vindkraftparkerna i Karsholm, Malå och Jädraås	46
7.1.9.	Prediktion av störning från vindkraftverk	47
7.2.	Dagboksundersökning	50
7.2.1.	Urval	50
7.2.2.	Dagbok och frågor	50
7.2.3.	Resultat	51
7.3.	Sammanfattning validering	54

1. Sammanfattning

I projektet har ljud kring tre vindkraftsparker undersökts. Platserna har valts för att ge en god inblick i effekter av vindkraftsetableringar i komplex terräng d.v.s. med höjdvariationer mellan verk och mottagare och skog i området samt för att ge en geografisk spridning över Sverige och innefattar Karsholm, Kristianstads kommun, Jädraås i Falu och Ockelbo kommun och Ytterberg i Malå kommun. Vidare är etableringarna relativt moderna och innehåller (år 2018) relativt moderna verk men med olika många verk för de olika platserna, Karsholm fem, Ytterberg 18 och Jädraås 66 st. Detta sammantaget ger att urvalet av parker anses representativt för nutida vindkraftsetableringar i Sverige.

Projektet har haft tre huvudsyften; (i) att utföra och analysera långtidsmätningar av vindkraftsljud vid parkerna, (ii) att studera hur närboende reagerar på vindkraftsbuller och (iii) att undersöka om ljudutbredningsalgoritmer kan användas för att estimerar ljudmätningarna och bullerupplevelserna.

Ljudmätningarna visar att de tre platserna har olika ljudmiljöer. Den tystaste platsen är Malå, medan ljudtrycksnivåer är högre i Karsholm och Jädraås. Vindkraftverken i Jädraås är dock oftare den dominerande ljudkällan än vindkraftverken i Karsholm och Malå. Amplitudmodulationer uppstår oftare under vintern och sällsyntare under sommaren i Malåmätningarna. Dessa variationer är observerade mer ofta på natten än under dagen. Ett tydligt beroende av amplitudmodulationer på vindriktning har också noterats.

Resultat från undersökningen av störningsupplevelse indikerar att gränsvärdet på 40 L_{Aeq} innebär att det kommer finnas cirka 15 procent av boende som upplever störning från vindkraftsbuller. De utbredningsmodeller som användes predikerade bullerstörning, och terrängmodellen var en bättre prediktor än planmarksmodellen. Värt att poängtera att detta gäller trots att modellen beräknar det momentana ljudtrycket vid skattningstillfället och frågorna handlar om generell störning av buller. De faktorer som bäst predikerar bullerstörning från vindkraftverk påverkas av fler faktorer än enbart bullerexponering och att psykologiska faktorer är de som förklarar största delen av variationen i bullerstörning.

Ljudutbredningsberäkningarna i projektet beaktar lokala meteorologiska förhållanden och data om utbredningsterrängen, dessa har givit god överensstämmelse med tidigare publicerade data. Ljudutbredningsberäkningar har utförts vid ca 10 000 tillfällen och resultaten från Malå visar att beräkningarna har högre ljudnivå än mätningarna, speciellt för de tidiga månaderna på året vilket sannolikt beror på att marken är snötäckt och därmed reflekterar betydligt mindre än vid barmark.

2. Summary

In the following project, noise at three wind farms has been investigated. The parks have been chosen with geographic spread across Sweden and include Karsholm, Kristianstad municipality, Jädraås in Falu and Ockelbo municipality and Ytterberg in Malå municipality. The project has had three main purposes: (i) performing and analysing long-term measurements of wind turbine sound at the parks, (ii) studying how residents respond to wind turbine sound, and (iii) investigating whether sound propagation algorithms can be used to estimate sound measurements and noise perception.

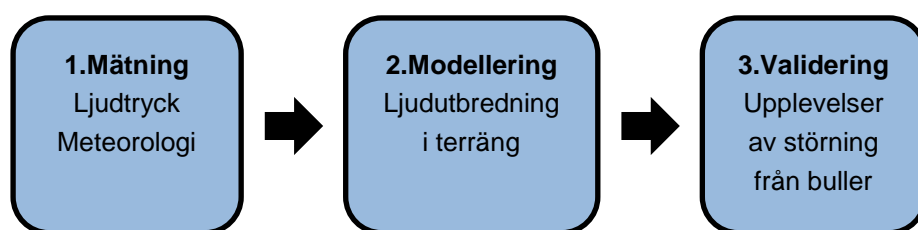
The sound measurements show that the three locations have different sound environments. The quietest location is Malå, while sound pressure levels are higher in Karsholm and Jädraås. However, wind turbines in Jädraås are more often the dominant sound source than wind farms in Karsholm and Malå. Amplitude modulation occurs more often during winter and rarely during summer at the Malå site. In addition, these variations are more often observed at night than during the day. A clear dependence on amplitude modulation on wind direction has also been observed.

Results from the investigation of disturbance experience indicate that the threshold of 40 L_{Aeq} means that there will be about 15 percent of the residents experiencing disturbance from wind turbine noise. The used propagation models predicted noise disturbance, and the terrain model performed better than the flat-ground model. Note that this applies, even though the model calculates the instantaneous sound pressure at the time of the assessment and the questions are about general noise disturbance. The factors that predict noise disturbance from wind turbines to the highest extent rely on more factors than noise exposure only. Moreover, psychological factors are the ones that explain most of the variation in noise disturbance.

The sound propagation calculations in the project take local meteorological conditions into account and terrain data which have given good consistency with previously published data. Sound spreading calculations have been performed at approximately 10,000 occasions and the results from Malå show that the calculations have a higher sound level than the measurements, especially for the early months of the year, which is likely to be because the ground is snow-covered and thus reflects significantly less than normally bare ground.

3. Inledning

Vindval har tilldelat Uppsala universitet, Institutionen för Geovetenskaper och Kungliga Tekniska högskolan, Marcus Wallenberg Laboratoriet för Ljud och Vibrationsforskning, medel för att studera upplevelser av ljud från vindkraftverk i kuperad terräng relaterad till ljudmätning. Projektets mål är att mäta ljud och variationer av väder och årstider kring tre vindkraftsparker under lång tid, att modellera ljudutbredningen samt att koppla de beräknade exponeringsvärdena till närboendes upplevelser av störning från vindkraft.



Utbyggnad och drift av moderna vindkraftverk i skogsmiljö är viktiga frågor ur både ett näringslivs-politiskt och ett energipolitiskt perspektiv. Ljud är en av de mest betydelsefulla miljöfaktorerna vid planering och drift av vindkraftverk. Tidigare epidemiologisk forskning inom Vindval tyder på att relativt hög andel av de boende blir störda av vindkraftsljud, jämfört med exempelvis störning från trafikbuller (Pedersen et. al. & Vindval, 2009). Forskning om hur vindkraftverk med effekt över 500 kW påverkar närboende och hur mindre vindkraftverk i kuperad skogsterräng finns, men inte som kombinerade faktorer (Pedersen et.al. 2009, Pedersen and Larsman, 2008). Det är i kuperad skogsterräng som utbyggnad och planering av modern vindkraft är störst och därför har projektet haft som mål att undersöka hur ljudutbredningen och upplevelsen av störning från buller påverkas under dessa förhållanden.

Resultat från de avslutade projekten ”Ljud från vindkraftverk, modell-validering-mätning” på Uppsala universitet och ”Avancerad modellering av ljudutbredning i komplex terräng” på KTH, (finansierade av Energimyndigheten) visade att meteorologiska förhållanden starkt påverkar ljudutbredning från vindkraftverk samt att dagens stora rotorblad kan generera amplitudmodulerat ljud som hörs på stora avstånd. Dessutom genereras amplitudmodulerat ljud vid väderförhållanden som är vanlig förekommande under kvällar, nätter och morgnar. Vid dessa tidpunkter är det också vanligt att vindhastigheten nära marken är låg, under dessa förhållanden är maskering från träd och andra vindinducerade ljudkällor svag och därmed ökar hörbarheten av vindkraftsljud. Vinden på navhöjd kan samtidigt till och med vara högre under kvällar och nätter vilket innebär starkare ljud och att ljudet därmed sprids extra långt. I kuperad terräng uppträder fokuseringseffekter och utsläckningseffekter som medför att där är ljudnivån idag svår att prediktera under realistiska väderförhållanden.

Med bakgrund från tidigare forskning och de tidigare genomförda projekten är nuvarande modeller för ljudutbredning och ljudstörning i flera avseenden svårtillämpbar vid etablering av vindkraftparker i kuperad terräng. Detta projekt har därmed bedömt att följande tre forskningsluckor ska kunna fyllas av projektet:

- (i) De rekommenderade ljudnivåer från vindkraftverk för boende nära vindkraftverk, grundar sig till största delen på studier utförda i slättnområden och med relativt små vindkraftverk. Exempelvis definieras i den senaste stora epidemiologiska undersökningen av bl.a. Eja Pedersen (Janssen et al, 2011), ett större vindkraftverk utifrån en effekt överstigande 500 kW, vilket idag anses vara ett litet vindkraftverk. Det finns därmed intresse för att beskriva ljudstörningar runt större verk i kuperad terräng.
- (ii) Sedan många år används begreppet ”vindskyddat läge”. Det behövs dock mer detaljerade undersökningar eftersom resultat visat att effekten inte är låst till en fast punkt, utan uppkommer beroende på de meteorologiska förhållandena. Detta kartläggs i projektet genom terrängmodellering.
- (iii) Slutligen avser projektdeltagarna att i relation till de tidigare genomförda projekten och Vindvals utlysning att undersöka hur upplevelse av lågfrekvent ljud påverkar den upplevda störningen från vindkraftverk.

Metodiken för att studera dessa tre frågeställningar var att mäta lokala ljud och meteorologiska förhållanden, koppla dessa till avancerade beräkningsmodeller för ljudutbredning som tar hänsyn till terrängvariationer och slutligen validera dessa beräkningar mot störningsupplevelser hos boende kring vindkraftparker. Kunskapen från denna tvärvetenskapliga metodik (meteorologi, akustik och psykologi) ger möjlighet för vindkraftsprojektörer att på ett mer effektivt sett vidta bullerreducerande åtgärder för att minska störning hos närboende. Nuvarande schablonmässiga system inom ”wind-sector management”, där effekten hos vindkraftverken anpassas efter vindriktning och vindstyrka, har ännu inte kunnat visa att störningen minskar hos närboende. Projektet avser att ge en kunskapsgrund för att utveckla dessa schablonmodeller, genom att i tidsdomän kunna predicera vilken typ av anpassning som mest effektivt minskar den upplevda störningen.

4. Mätplatser

Tre mätplatser i närheten av vindkraftparker valdes för mätningarna (se figur 4.1). De viktigaste kriterierna för valet var: låg bakgrunds nivå av ljud, kuperad terräng, ett läge öster om vindkraftparken, skog eller träd för att minska vindhastigheten vid mikrofonen kombinerat med ett öppet landskap för de meteorologiska masterna. Valet av mätutrustning syftade till att mäta både ljud och meteorologiska parametrar i gränsskiktet närmast marken för att ge en god bild av hur de lokala meteorologiska parametrarna påverkar ljudnivån. I figur 4.2 visas den meteorologiska masten och ljudstationen i Malå. Mätinstrumenten är liknande på samtliga tre mätplatser. För de akustiska mätningarna användes en NOR140 ljudnivåmätare och en NOR1214 utomhus ½"-mikrofon med en regnhuva och ett vindskydd vid varje mätplats. Mikrofonen placerades i en höjd av 1,5 m under sommaren. Beroende på snödjupet varierade avståndet från mikrofonen till ytan. NOR140 mäter ljudspektra i 1/3-oktavband i frekvensområdet 10-20.000 Hz. För analyserna av amplitudmodulering samplades de momentana A-viktade 1/3-oktav-ljudtrycksnivåerna vid en tidsupplösning av 8 Hz. Instrumenthöjder och meteorologiska parametrarna för Karsholm, Jädraås och Malå visas i tabell 4.1.



Figur 4.1. Karta över Sverige med den tre mätplatserna Karsholm, Jädraås och Malå (från Lantmäteriet, modifierad).

4.1. Karsholm

Karsholm är den sydligaste av mätplatserna. Det ligger i Kristianstads kommun och på latitud 56,13° N och longitud 14,25° E. Vindkraftparken består av fem REpower MM92 2050 kW vindkraftverk med en navhöjd på 100 m, och är placerad på en ås

som höjer sig cirka 60–90 m.ö.h. Den meteorologiska masten och ljudstationen placerades cirka 1 km öster om vindkraftparken på cirka 10 m.ö.h (för höjdkarta se figur 6.2). Data från meteorologiska mätningar och ljudmätningar är insamlat från december 2015 till april 2017.

Målsättningen var att de akustiska mätningarna skulle utföras i en tyst miljö. Ljudstationen placeras i skogsmiljö på 150 m avstånd från ett fritidshus. Det finns inga trafikerade vägar i närheten och bakgrundsnyvån är därför låg. En kraftledning i närheten från ljudstationen ledde tyvärr till relativt höga bakgrundsnyvåer när luftfuktigheten var förhöjd och vid nederbörd.

4.2. Jädraås

Jädraås vindkraftspark är den största anläggningen som undersöks i detta projekt. Parken ligger i Falu och i Ockelbo kommuner och på 60,81° N, 16,43° E.

Vindkraftparken består av 66 stycken Vestas V112 3MW vindkraftverk med en navhöjd på 119 m och är placerade på cirka 250 till 370 m höga backar. Den meteorologiska masten och ljudstationen ligger cirka 1 km i östlig riktning och 3 km i sydöstlig riktning från vindkraftparken på cirka 270 m över havet. Data från meteorologiska mätningar är insamlat från maj 2016 till juli 2017, medan ljudmätningar insamlades från juli 2016 till juni 2017.

I Jädraås var ljudstationen inte placerad i en tät skog, men några träd och buskar fanns runt mätplatsen vilket medför att vindförhållandena kan tänkas medföra störningar på ljudmätningarna. För att minimera vindinducerat ljud på mikrofonen, användes ett tjockt vindskydd. Avstånden från det närmaste huset var cirka 150 m. I Jädraås var bakgrundsnyvån något högre än vid de andra stationerna, sannolikt eftersom fler människor bodde i närheten av mätplatsen eller för att vinden påverkade ljudmätningarna trots vindskyddet.

4.3. Malå

Den nordligaste av mätplatserna var Malå. Mätningen gjordes i närheten av orten Nåda i Malå kommun, på 65,09° N, 18,87° E. Vindkraftparken består av 22 stycken Vestas V90 vindkraftverk med en navhöjd på 105 m, och som är placerade på en 460 till 510 m hög ås. Den meteorologiska masten och ljudstationen låg 1 km sydöstlig från vindkraftparken på cirka 420 m över havet. Data från meteorologiska mätningar insamlades från augusti 2016 till juni 2017, medan ljudmätningar insamlades från oktober 2016 till juni 2017.

Ljudstationen i Malå låg i en skog, 200 m från det närmaste bebyggelse och fotografier från platsen kan ses figur 4.2. Bakgrundsnyvån var i stort sett låg, men snöskotrar var en noterbar ljudkälla vintertid.



Figur 4.2. a) Meteorologisk mast och b) ljudstation i Malå.

Tabell 4.1. Instrumenthöjder vid de meteorologiska masterna i Karsholm, Jädraås och Malå område och de motsvarande parametrarna: lufttryck, p, temperatur, T, vindhastighet, u, vindriktning, wd, and relativ luftfuktighet, RH.

Mark	Höjd [m]			Parameter
	Karsholm	Jädraås	Malå	p
nivå 1	0,8	0,8	1,18	T
	0,8	0,8	1,3	u, wd
	1,6	1,6	2,02	RH
nivå 2	1,6	1,6	1,88	T
	1,85	1,85	2,33	u, wd
nivå 3	3,7	3,51	3,62	T
	4,35	4,35	4,64	u, wd

5. Mätningar av ljud och meteorologi

5.1. Metod

För att skilja mellan ljud från vindkraftverk och andra ljudkällor användes ett flertal kriterier för att filtrera bort mätningar som anses innehålla annat än vindkraftsljud.

Det första filtret sorterar ut 10-min intervall, där 95:e och 5:e percentilen av den ekvivalenta ljudtrycksnivån, L_{Aeq} , varierar mer än 4 dBA. Detta filter valdes eftersom ljud från vindkraftverk som mäts på flera hundra meters avstånd har relativt liten variabilitet. Ljud från andra källor varierar generellt väsentligt mer. Denna filtrering benämns filter 1.

Ett andra filter, filter 2, introduceras efter ovanligt höga ljudnivåer (L_{Aeq}) observerades i Karsholm, på grund av att den närliggande kraftledningen dominerade ljudbilden vid vissa meteorologiska omständigheter. Filter 2 avvisar mätningar för vilka ljud från vindkraftverk inte är den dominerande källan. Mer information om filter 2 finns i avsnitt 5.3. Andelen av de totala mätningarna efter filtrering presenteras i tabell 5.1.

Tabell 5.1. Andelen av de totala mätningarna som filter 1 eller filter 1 och filter 2 används.

Filter	Andelen av totala mätningarna [%]		
	Karsholm	Jädraås	Malå
filter 1	16,5	17,9	17,7
filter 1 + filter 2	2,7	12,6	2,9

5.2. Meteorologiska förhållanden

Om inte annat anges, presenteras meteorologiska parametrar på två olika sätt. I det första fallet (period 1) är mätperioden för Karsholm vald, eftersom den är kortast och de tre områdena jämförs endast med den här perioden. Observera att perioden täcker december 2015 till april 2016 för Karsholm, men december 2016 till april 2017 för övriga platser. I det andra fallet (period 2) jämförs data från hela perioderna, även om mätperioderna är olika för varje studieområde. Den första metoden är vald för att jämföra de meteorologiska förhållandena under vilka de akustiska mätningarna genomfördes. Den andra metoden är vald för att visa de meteorologiska förhållandena vid de tre områdena.

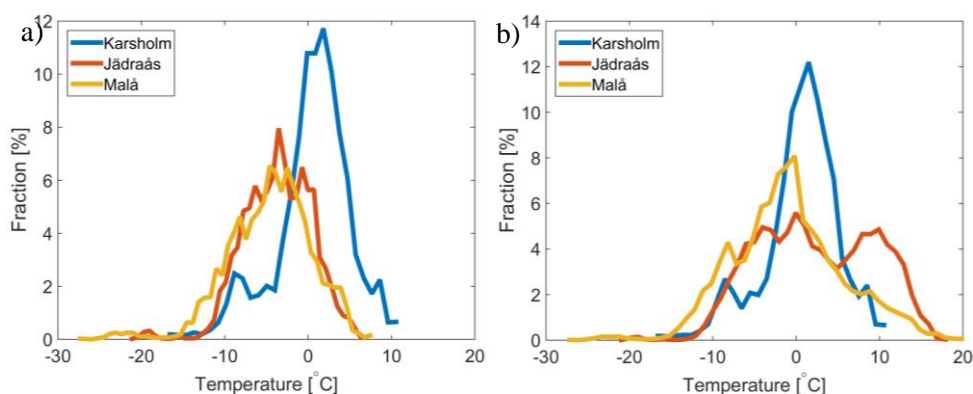
Temperatur och fuktighet

I figur 5.1a visas temperaturen på de tre platserna för december till april 2015/16 vid Karsholm, och samma månader men ett år senare vid Jädraås och Malå (period 1). Den genomsnittliga temperaturen i Karsholm är ungefär 5 °C högre än vid de andra platserna, vilket är rimligt eftersom det är den sydligaste platsen.

Fördelningarna i Jädraås och Malå skiljer sig inte klart från varandra. Temperaturer under $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ är emellertid vanligare i Malå.

Temperaturintervallet på lägsta mätnivån (för period 2) är störst i Malå, och varierar mellan $-27,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figur 5.1b). I Jädraås och Karsholm är intervallet mindre, och varierar mellan $-21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $18,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, respektive $-17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $11,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Medeltemperaturen i Karsholm är $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, den är $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Jädraås och $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Malå. Den oftast uppmätta temperaturen är ungefär $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Karsholm och $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ i Malå. För båda platserna kan också ett lägre maximum i frekvens ses vid cirka $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. I Jädraås visar temperaturfördelningen högre sannolikheter för temperaturer runt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ jämfört med andra temperaturer, men inget klart maximum kan hittas.

Det begränsade temperaturintervallet och den relativt låga medeltemperaturen i Karsholm kan förklaras av den korta mätperioden som endast omfattar delar av vintern 2015/16 och våren 2016. Den ökade sannolikheten för temperaturer runt $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vid Jädraås kan vara ett resultat av juni och juli inkluderas två gånger under mätperioden, medan övriga månader ingår endast en gång.

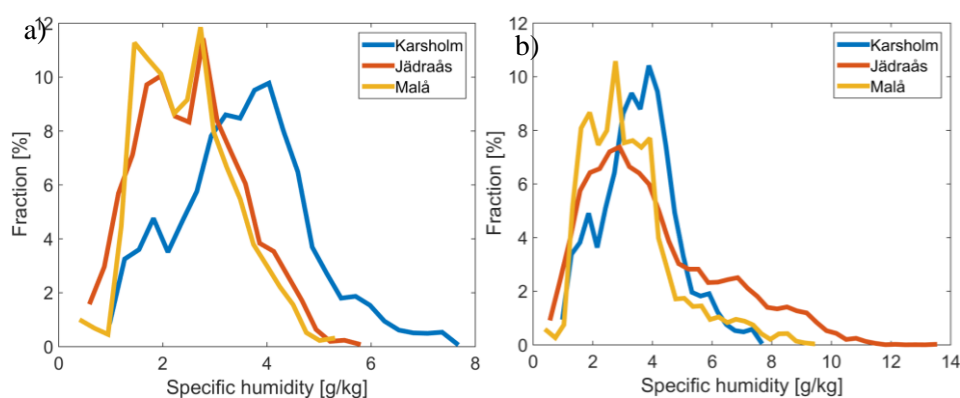


Figur 5.1. Temperaturfördelning på nivå 1 i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) för a) december till april (2015/16 för Karsholm, 2016/17 för Jädraås och Malå) och b) alla data (medelvärdesbildningsintervall: $1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Den specifika fuktigheten varierar mest i Karsholm, nämligen mellan $0,9\text{ g/kg}$ och $7,8\text{ g/kg}$ för perioden 1 (figur 5.2a). I Jädraås varierar den specifika fuktigheten mellan $0,5\text{ g/kg}$ och $5,9\text{ g/kg}$, medan den varierar mellan $0,3\text{ g/kg}$ och $5,4\text{ g/kg}$ i Malå. Den genomsnittliga specifika luftfuktigheten är högst i Jädraås ($3,6\text{ g/kg}$) och lägre i Karsholm och Malå (båda $2,5\text{ g/kg}$). Frekvensfördelningarna visar maximalt ca 4 g/kg i Karsholm och cirka 3 g/kg i Jädraås och Malå. Malå og Jädraås visar en andra spik på ca $1,5\text{ g/kg}$ respektive ca $2,0\text{ g/kg}$.

För perioden 2 varierar den specifika fuktigheten mest i Jädraås, nämligen mellan $0,4\text{ g/kg}$ och $13,6\text{ g/kg}$ (figur 5.2a). I Karsholm varierar den specifika fuktigheten mellan $0,9\text{ g/kg}$ och $7,8\text{ g/kg}$, medan den varierar mellan $0,3\text{ g/kg}$ och $9,5\text{ g/kg}$ i Malå. Den genomsnittliga specifika luftfuktigheten är högst i Jädraås ($4,1\text{ g/kg}$) och lägre i Karsholm ($3,6\text{ g/kg}$) och Malå ($3,2\text{ g/kg}$). Frekvensfördelningarna visar maximalt ca 4 g/kg i Karsholm och cirka $2,5\text{ g/kg}$ i Jädraås och Malå. Alla tre frekvensfördelningarna visar positiv skevhet.

Den specifika fuktigheten är ett mått på mängden vattenånga i ett luftpaket. Luft med högre temperaturer kan hålla mer vattenånga än luft med lägre temperatur. Generellt är den specifika luftfuktigheten högre i södra Sverige än i norra Sverige och högre under sommaren än under vintern. Resultaten visar dock en lägre genomsnittlig specifik fuktighet i Karsholm än i Jädraås, trots att den ligger flera hundra kilometer söder om Jädraås. Anledningen till detta är skillnaden i mätperioderna. Mätningarna från Karsholm representerar endast en vinter och en vår, som vanligen är torrare än sommar och höst.

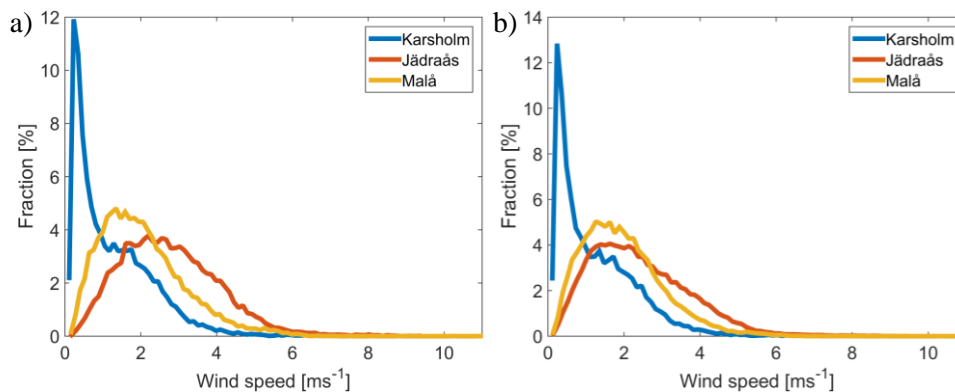


Figur 5.2. Fördelning av specifik fuktighet i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) för a) december till april (2015/16 för Karsholm, 2016/17 för Jädraås och Malå) och b) alla data (medelvärdesbildningsintervall: 0,3 g/kg).

Vindhastighet och vindriktning

Fördelningen av vindhastigheter vid Karsholm visar en framträdande topp på ca 0,25 m/s (figur 5.3). 50 % av de uppmätta vindhastigheterna är lägre än 1 m/s, och vindhastigheter högre än 5 m/s observeras sällan. Därför är medelvindhastigheten i Karsholm endast 1,2 m/s. Den genomsnittliga vindhastigheten i Jädraås är ungefär dubbelt så hög, och vindhastigheten är mer jämnt fördelad än i Karsholm, men skev åt högre vindhastigheter. Vindhastigheter i Malå fördelas på samma sätt som i Jädraås. Den genomsnittliga vindhastigheten i Malå är med 2,0 m/s lite lägre och fördelningen är mindre skev. Skillnaderna mellan fördelningarna av vindhastigheten i hela datamaterialet och under jämförelseperioden är relativt små. Huvudskillnaderna är att medelvindhastigheten i Karsholm är 0,4 m/s lägre, och fördelningen är mindre skev under jämförelseperioden.

Resultaten i Jädraås och Malå matchar i regel fördelningar av vindhastigheter några meter över marken. På grund av den kraftiga effekten av friktion är vindhastigheterna generellt låga och högre vindhastigheter observeras sällan. Spiken på ca 0,25 m/s i Karsholm kopplas till en lokal effekt som inte analyseras närmare. Om vindturbinerna är i drift vid låga vindhastigheter nära marken ökar sannolikheten att ljudet från vindkraftverken mäts utan störningar pga att vindinducerade ljudet i vegetationen minskar om vindhastigheten är låg vilket resulterar i en minskad maskering.



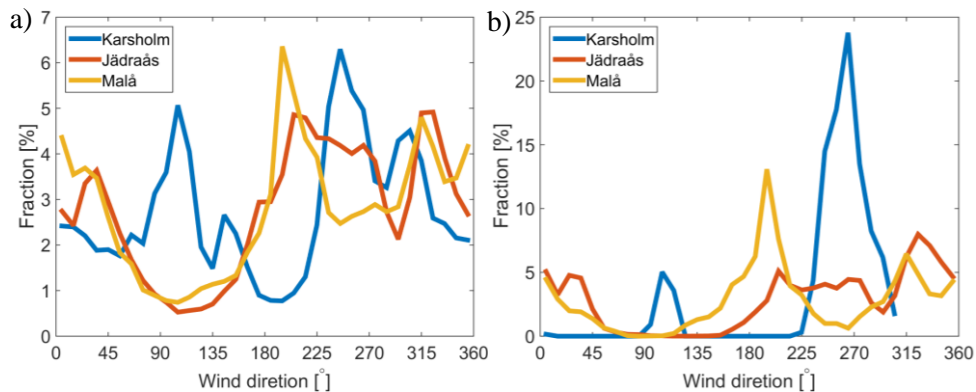
Figur 5.3. Fördelning av vindhastighet på nivå 3 i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) för a) december till april (2015/16 för Karsholm, 2016/17 för Jädraås och Malå) och b) alla data (medelvärdesbildningsintervall: 0,1 m/s).

De vanligaste vindriktningarna i Karsholm är cirka 100° och runt 270° (figur 5.4a). Dessa vindsektorer är ännu mer uttalade, då enbart vindhastigheter större än 3 m/s beaktas (figur 5.4b). Eftersom mätstationen ligger nedströms vindkraftverken för vindriktningar mellan 260° och 315° , faller ett av frekvensmaxima i denna sektor. Därför är medvindförhållanden vanliga. Östliga vindriktningarna är inte vanligt förekommande i Sverige. Vindriktningar runt 100° är dock den näst mest observerade vindriktningen i Karsholm. Vindmönstren kan förklaras utifrån topografien i området. Vidare representerar vindförhållandena vid stationerna bara ett tunt skikt nära marken (översta nivåerna överskrider inte 5 m), där lokala egenskaper kan ha en ganska tydlig effekt.

I Jädraås finns ett maximum vid vindriktningar runt 330° för lägre och högre vindhastigheter. En förklaring kan vara dominerande västliga vindar som delvis kanaliseras längs Jädraån, en å som är orienterad i sydöstlig riktning. Styrning runt många kullar i området kan orsaka obestämd frekvensfördelning. Den låga andelen av östliga och sydöstliga vindar är orsak av dominerande västliga vindar, som är typiska för dessa breddgrader. Medvindssektorn ligger mellan 155° och 295° , eftersom vindkraftverken fördelas syd-sydost till nordväst om mätplatsen. På grund av den ganska brett vindriktningsintervallet med vindar från vindkraftparken, ligger majoriteten av de uppmätta vindriktningarna inom denna sektor.

Frekvensfördelningen för vindriktningar i Malå ser delvis ut som den i Jädraås, speciellt om lägre vindhastigheter ingår (figur 5.4a). Högsta toppen på 195° kan orsakas av styrning längs den östra sluttningen av en 483 m hög kulle belägen sydväst om mätplatsen. Det lokala maximumet på cirka 315° kan förklaras av avrinning av kall luft. Avrinning av kall luft är vindar som orsakas av kalla luftmassor som strömmar nedåt. Eftersom den meteorologiska masten ligger på en sluttning som är orienterad sydöstra, är avrinning av kall luft en rimlig förklaring till maximum vid 315° . Sektorn som ligger nedströms från vindkraftverken ligger mellan 275° och 340° , vilket inte täcker majoriteten av data.

Resultatet för perioden december-april (ej visat) skiljer sig inte signifikant från resultaten i figur 5.4. Det visar att vindriktningen är mycket mer beroende av platsen än av säsongsvariationer i väderförhållandena.



Figur 5.4. Fördelning av vindriktning för vindhastigheter a) större än 1 m/s och b) större än 3 m/s på nivå 3 i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) (medelvärdesbildningsintervall: 1°).

5.3. Akustiska förhållanden

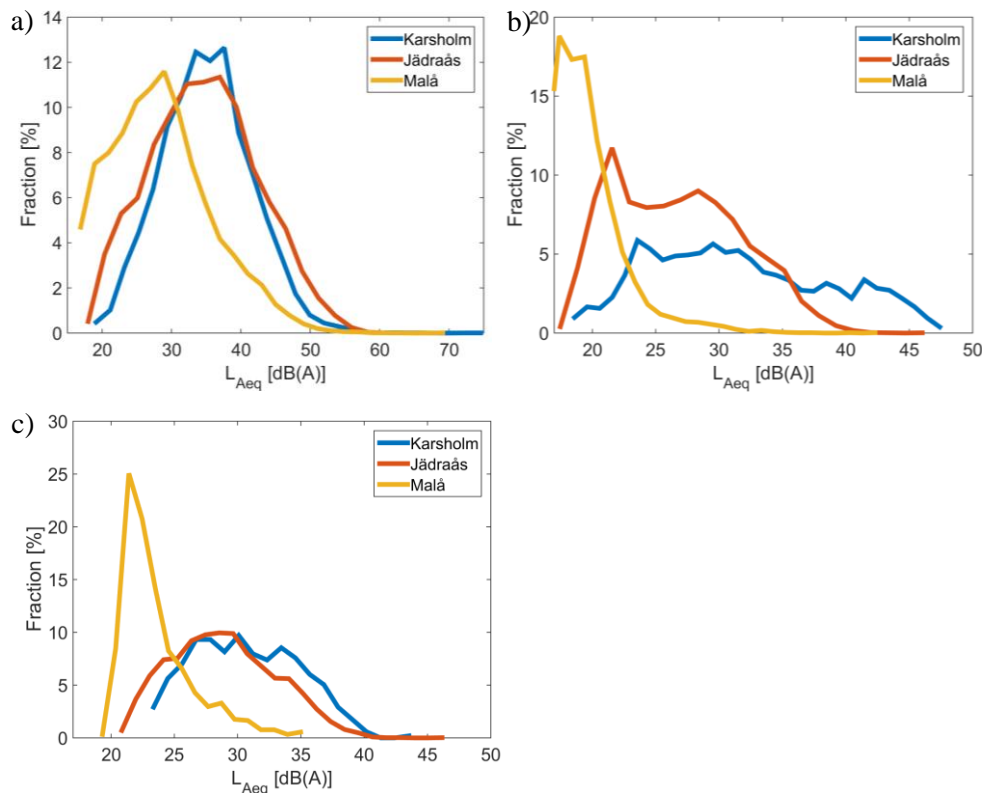
Ljudmiljön skiljer sig mellan stationerna, speciellt för Malå (figur 5.5a). Den genomsnittliga L_{Aeq} vid Malå är 29 dBA, medan den ligger ca 35 dBA på övriga platser. Den tystaste platsen är Malå med L_{Aeq} , mellan 16 och 70 dBA och den bullrigaste är Karsholm, där L_{Aeq} ligger mellan 18 och 76 dBA. Efter användning av filter 1 är skillnader i medelvärdet L_{Aeq} tydligare (figur 5.5b). Den genomsnittliga L_{Aeq} varierar mellan 20 dBA i Malå och 32 dBA i Karsholm. Minima och maxima är emellertid mer liknande; minima varierar mellan 16 och 18 dBA, maxima mellan 43 och 48 dBA.

Fördelningen av L_{Aeq} för Karsholm (figur 5.5b) visar att cirka 25 % av värdena är högre än 37,5 dBA. Baserat på kontrollprogrammet är gränsvärdet som inte bör överskridas på mikrofonens plats. En närmare titt på frekvensspektra för dessa höga L_{Aeq} avslöjar tillvaron av en ibland dominerande ljudkälla som överlagrar ljudet från vindkraftverker. Ljudkällan kan identifieras som en högspänningsledning några meter från mikrofonen.

Kraftledningar genererar två typer av ljud (Sames och Goossens; 2015). För det första är det ett lågfrekvent surrljud, som kan identifieras i ett spektrum som en spik vid 80 Hz. För det andra finns det ett fräsande ljud, med ett maximum runt 2000 till 2500 Hz. Båda ljuden identifierades i några av spektra och därför införs ett andra filterkriterium, kallat filter 2. Kriteriet filtrerar ut 10-min intervaller om motsvarande spektrum har ett spik vid 80 Hz eller, om L_{Aeq} vid 2000 eller 2500 Hz är mindre än 5 dBA lägre än L_{Aeq} vid 630 Hz. Den sistnämnda antas vara den frekvens, där L_{Aeq} når sitt maximum för vindturbinljud på mikrofonens plats. Filtret används på data på alla tre platser för att göra dem jämförbara, och visas i figur 5.5c.

Efter användning av båda filtrena överstiger 5 % av L_{Aeq} i Karsholm gränsvärdet på 37,5 dBA. Det är slående att det andra kriteriet filtrerar ut ett stort antal L_{Aeq} under 25 dBA på alla platser. Anledningen till att dessa data filtreras bort är att intervaller på 10 min endast erhålls om det finns en tydlig indikation på vindturbinljud i motsvarande spektrum. Därför används endast det första filtret för att upprätthålla

ett rimligt antal datapunkter för följande analyser, och att inte felaktigt försumma data, som innehåller ljud från vindkraftverk.



Figur 5.5. Ljudnivå, L_{Aeq} , i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) för a) alla data, b) efter användning av filter 1 och c) efter användning av båda filter.

5.4. Ljud vid olika väderförhållanden

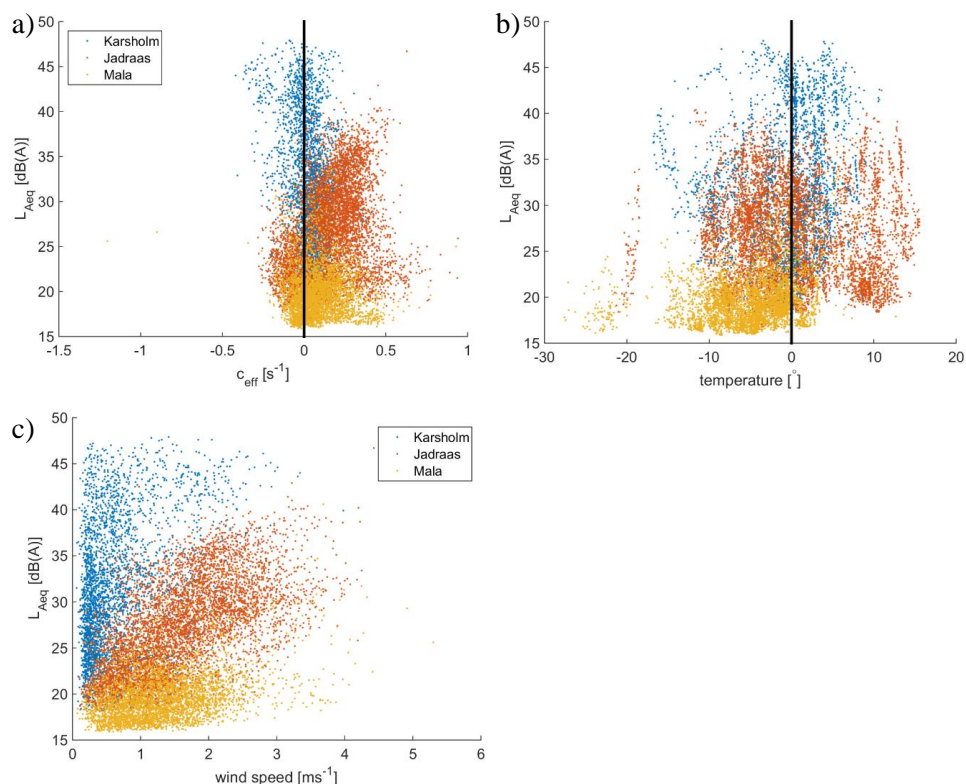
5.4.1. Jämförelse av de tre mätplatserna

I detta avsnitt undersöks beroendet av L_{Aeq} på flera meteorologiska parametrar. Observera att resultaten i Karsholm kanske inte är representativa, eftersom de kan innehålla ljud från en ytterligare, periodvis dominerande källa (se avsnitt 5.3). Först studeras den effektiva ljudhastighetsgradienten, c_{eff} . Tecknet på c_{eff} anger, om ljudvågorna är böjda nedåt: $c_{eff} > 0$, eller böjda uppåt: $c_{eff} < 0$. Denna böjning kallas refraktion. Refraktion mot marken resulterar vanligen i högre ljudtrycksnivåer än refraktion bort från marken.

Det finns inget tydligt beroende av c_{eff} på L_{Aeq} (figur 5.6a), speciellt för mätningarna från Karsholm. I Jädraås förekommer L_{Aeq} över 35 dBA, när c_{eff} är mellan 0 och $0,5 \text{ s}^{-1}$. En trend som L_{Aeq} ökar med ökande c_{eff} kan observeras. Emellertid förekommer L_{Aeq} under 25 dBA på alla uppmätta nivåer. I Malå ligger L_{Aeq} inte över 25 dBA, om $c_{eff} > 0,35 \text{ s}^{-1}$, och högsta L_{Aeq} hittas nära $c_{eff} = 0 \text{ s}^{-1}$. Andra studier visade effekten av c_{eff} på ljudutbredning på grund av refraktion (t.ex. Öhlund och Larsson, 2015). I dessa studier beräknas c_{eff} mellan marken och nivåer ovanför navhöjd, medan i denna studie endast meteorologiska data var tillgängliga vid ett tunt skikt nära marken, som kan vara orsaken till de olika resultaten.

Såsom visas i figur 5.6b, kan inget tydligt mönster ses avseende en potentiell påverkan av temperaturen på L_{Aeq} . En vag trend mot lägre L_{Aeq} för lägre temperaturer, och en ökning av L_{Aeq} med ökande temperatur observeras dock i Malå. Temperaturer under fryspunkten kan sammanfalla med ett snötäcke, vilket kan bero på snötypen, dämpa ljudet. Däremot kan temperaturer runt fryspunkten sammanfalla med skare, som reflekterar ljudet och kan leda till en förstärkning. Dessutom är bar marken utan snö oftast hårdare än ett snölager, och resulterar därför i högre L_{Aeq} .

Förutom Karsholm ökar L_{Aeq} med ökande vindhastigheter (figur 5.6c). I Jädraås ökar L_{Aeq} i genomsnitt med cirka 7 dBA per 1 m/s. Ökningen i Malå är cirka 1,5 dBA per 1 m/s. Skillnaden i grafernas riktningskoefficient kan orsakas av flera parametrar. För det första varierar vindhastighetsdifferens mellan mätnivån (ca 4 m) och navhöjd mellan platserna. Skälen till detta kan vara atmosfärens stabilitet, topografi eller skydd av vegetation eller konstruktioner. Det senare bör vara ganska litet, eftersom platserna för meteorologiska masterna valdes med avseende på att minimera skyddsnivån. För det andra skiljer sig turbintyperna, och därmed deras ljudeffektnivåerna, och i vilken mån de beror på vindhastighet. För det tredje inducerar vinden ljud i vegetationen, konstruktioner och, i ett ogynnsamt fall, i mikrofonen. Mikrofonerna i Karsholm och Malå placerades i en skog, för att minska vindhastigheten som attackerade mikrofonen. Vid Jädraås användes ytterligare ett tjockt vindskydd för att minska det vindinducerade ljudet. Vidare mättes de flesta av de valda daterna under årstider när lövträden saknar lövverk.



Figur 5.6. Ljudnivå, L_{Aeq} , i Karsholm (blå), Jädraås (röd) och Malå (gul) för beroende på a) effektiv ljudhastighetsgradient (vertikal linje: gräns mellan uppåtböjning och nedåtböjning av ljudvägor), b) temperatur (vertikal linje: fryspunkt av rent vatten) och c) vindhastighet.

I tabell 5.2 visas genomsnittlig L_{Aeq} för med- och motvindsektorn för olika vindhastighetsintervaller. Bortsett från Karsholm är L_{Aeq} tydligt högre när mikrofonen ligger nedströms vindkraftverken jämfört med det uppströmsfallet. I Jädraås är det, beroende av vindhastigheten, 4,9 till 10,3 dBA högre, och vid Malå varierar skillnaden mellan 2,3 och 11,9 dBA. Resultaten i Jädraås och Malå avslöjar också en ökning av L_{Aeq} med ökande vindhastigheter under nedströmsförhållanden, men inte för uppströmsförhållanden.

Tabell 5.2. Medelljudnivå, L_{Aeq} , på dBA för de tre platsen, olika vindhastighetsintervaller och med- och motvind.

	Karsholm			Jädraås			Malå		
min. vindhastighet [m/s]	1,5	2,5	3	1,5	2,5	3	1,5	2,5	3
$L_{Aeq, medvind}$ [dBA]	33,4	35,5	39,9	31,9	35,5	37,7	25,0	30,7	34,6
$L_{Aeq, motvind}$ [dBA]	33,3	---	---	27,0	27,4	27,4	22,7	22,2	22,7

5.4.2. Fokus på Malå

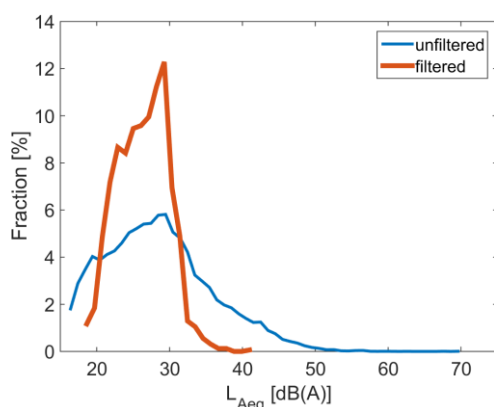
1. DET FÖRBÄTTRADE FILTRET

En metodik föra att erhålla ljudmätningar från vindkraftverken utan andra ljudstörningar testas och jämförs med de ofiltrerade data i denna sektion. Filtret appliceras endast på Malå-data, eftersom inga driftsdata från vindkraftparkerna i Karsholm och Jädraås finns tillgängliga. Filtret är baserat på fyra kriterier:

- Det normaliserade uppmätta ljudspektrat måste likna det normaliserade emitterade ljudspektrumet med hänsyn till atmosfärsabsorptionen och dämpningen av olika frekvenser genom vegetation. Data väljs om skillnaderna mellan dessa spektra inte överstiger 1 dB. Detta kriterium är valt att avvisa mätningar om vindkraftsljud inte är den dominerande ljudkällan på grund av maskering av t.ex. fågelsång, ljud som genereras av jordbruk eller boende, eller andra.
- Skillnaden mellan 5: e och 95: e percentilen inom ett 10-minutersintervall får inte överstiga 4 dB och /eller mätningen måste identifieras som amplitudmodulerad (baserat på metoden från Lundmark (2011), se även avsnitt 5.5). Eftersom ljud från vindkraftverk (om det inte är modulerat) brukar ha en ganska stabil karaktär, avvisas mätningar som visar högre variation. Om signalen är amplitudmodulerad inkluderas mätningen.
- Medianen av rotationsfrekvensen för alla vindkraftverk måste vara 10 varv/min.
- Vindhastigheten mätt vid den högsta nivån av meteorologiska masten får inte överstiga 2 m/s. Detta kriterium är valt för att minimera risken för att maskeras av vindinducerat ljud i vegetationen eller i mikrofonen.

2. VINDKRAFTSLJUD I MALÅ

Ljudmätningarna som detekteras som vindkraftsljud ligger i storleksordningen mellan 20 och 30 dBA (se fig 5.7) med högsta förekomsten mellan 28 till 29 dBA. Ljudnivåer över 41 dBA avfärdas som vindkraftsljud. Jämfört med de ofiltrerade mätningarna är fördelningen av den filtrerade datamängden relativt normalfördelad och inte så snedställd. Fördelningen av de ofiltrerade mätningarna är bredare och jämnare fördelad mellan 18 och 34 dBA. Högsta förekomsten är dock cirka 28 och 29 dBA som för filtrerade data.



Figur 5.7. Ljudnivå, L_{Aeq} , i Malå för alla data (ofiltrerat, blå) och efter användning av avancerat filter (filtrerat, röd).

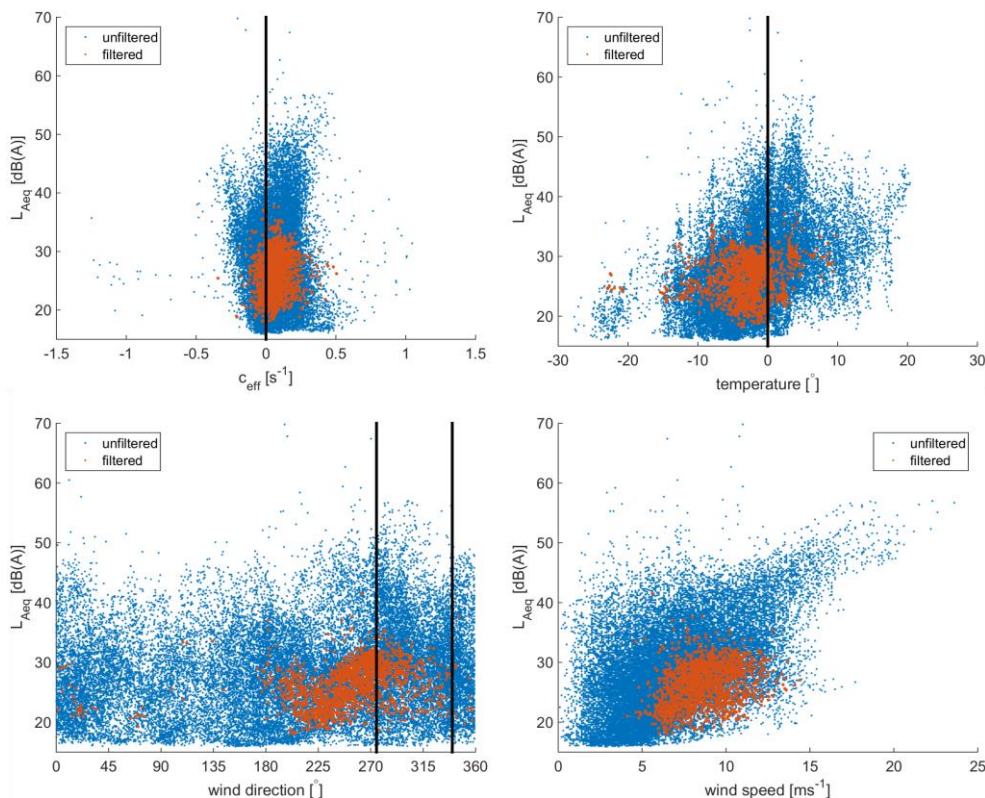
3. BEROENDE PÅ METEOROLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

Som jämförelsebasis visas också de ofiltrerade data. En liten trend av en ökning av L_{Aeq} med ökande c_{eff} för den filtrerade data kan ses i Figur 5.8a. Beroendet av L_{Aeq} på c_{eff} är mer uttalat för filtrerade data än för ofiltrerade såväl som den filtrerade data som applicerar filtret (se Figur 5.6a).

För temperaturer över 0 °C ökar L_{Aeq} med ökande temperatur (Figur 5.8b). Denna trend kan emellertid inte observeras för temperaturer under 0 °C. Orsaken kan vara förändringen i markförhållanden när temperaturen stiger över fryspunkten. Under perioder med minusgrader finns olika typer av snö med olika egenskaper. Vissa är akustiskt mjuka, som nyfallen snö, vilket leder till ljudabsorption i marken. Andra snötyper är akustiskt hårdare, som våt snö eller snö med frusna lager, vilket leder till reflektion och högre ljudnivåer.

Mätningarna identifierade som vindturbinljud uppträdde huvudsakligen under vindriktningar mellan 180 och 340° (Figur 5.8c). Det kan finnas flera anledningar till att de andra vindriktningarna i stor utsträckning avvisas, eftersom filtret är baserat på flera kriterier. Det indikerar dock att vindkraftsljudet sällan detekterades för vindriktningar från 340° till 180°. L_{Aeq} är störst för vindriktningar runt 270°, vilket ligger något utanför nedströms-sektorn. På grund av refraktionen bör vindkraftsljudet vara högre nedåt från vindkraftverket än i andra riktningar. Skälet till övergången av maximalt i L_{Aeq} mot riktningar mot vindriktningen kan bero på en förändring av vindriktningen med höjd och därmed en förändring i banans ljudförökning.

L_{Aeq} ökar med ökande vindhastighet vid navets höjd (Figur 5.8d). Denna korrelation kan förklaras av turbinens rotationsfrekvens beroende på vindhastighet och korrelationen mellan ljudgenerering och rotationsfrekvens. Dessutom leder en större vindhastighet vid navets höjd till högre vindskjuvning. Det leder till nedåtgående böjning av ljudvågorna (se figur 5.8a).



Figur 5.8. Ljudnivå, L_{Aeq} , i Malå för beroende på a) effektiv ljudhastighetsgradient (vertikal linje: gräns mellan uppåtböjning och nedåtböjning av ljudvågor), b) temperatur (vertikal linje: fryspunkt av rent vatten), c) vindriktning (intervall mellan vertikala linjer: medvindsektor) och d) vindhastighet.

5.5. Amplitudmodulerat ljud

Ljud från vindkraftverk uppfattas ibland som mer irriterande, även om ljudtrycksnivån är inte högre under dessa perioder. Flera studier (t.ex. Pedersen och Wayne, 2004, Yoon et al., 2016) visar att en anledning till detta kan vara amplitudmodulering (AM). Amplitudmodulerat ljud kännetecknas av en periodisk variation av ljudstyrka över tiden. Orsaken till AM är ännu inte fullständigt klarlagd. Larsson och Öhlund (2014) observerar AM under 33 % av tiden i en mät punkt i södra Sverige, och under 19 % av tiden i norra Sverige. Metoden som beskrivs av Larsson och Öhlund (2014), bygger på Lundmark (2011) användes för att identifiera AM. För detta användes en FFT av de A-vägda ljudtrycksnivåerna (av 10 till 630 Hz 1/3-oktavband) inom ett tidsintervall på 15 s för att alstra ett AM-spektrum. Maximalt värde på detta AM-spektrum mellan 0,6

och 1 Hz (typisk rotationsfrekvens för 3-bladiga vindkraftverk) definieras som AM-faktor. De 15 s intervaller för vilka AM-faktorn är lika med eller överstigande 0,4 dBA/Hz identifieras som amplitudmodulerad. De 15-s intervaller som identifieras som amplitudmodulerade används endast för analyserna om rotationsfrekvensen är lika med eller över 10 rpm.

I detta avsnitt analyseras hur ofta AM observeras under specifika perioder (månad, dag) och om det är beroende av olika meteorologiska parametrar (stabilitet, vindriktning). Förekomsten av AM definieras som

$$F_{AM} = \frac{N_{AM}}{N_{all}},$$

där N_{AM} är antalet av 15-s intervaller för vilka AM detekteras, och N_{all} är det totala antalet av 15-s intervaller för varje specifik period eller för varje intervall av en parameter.

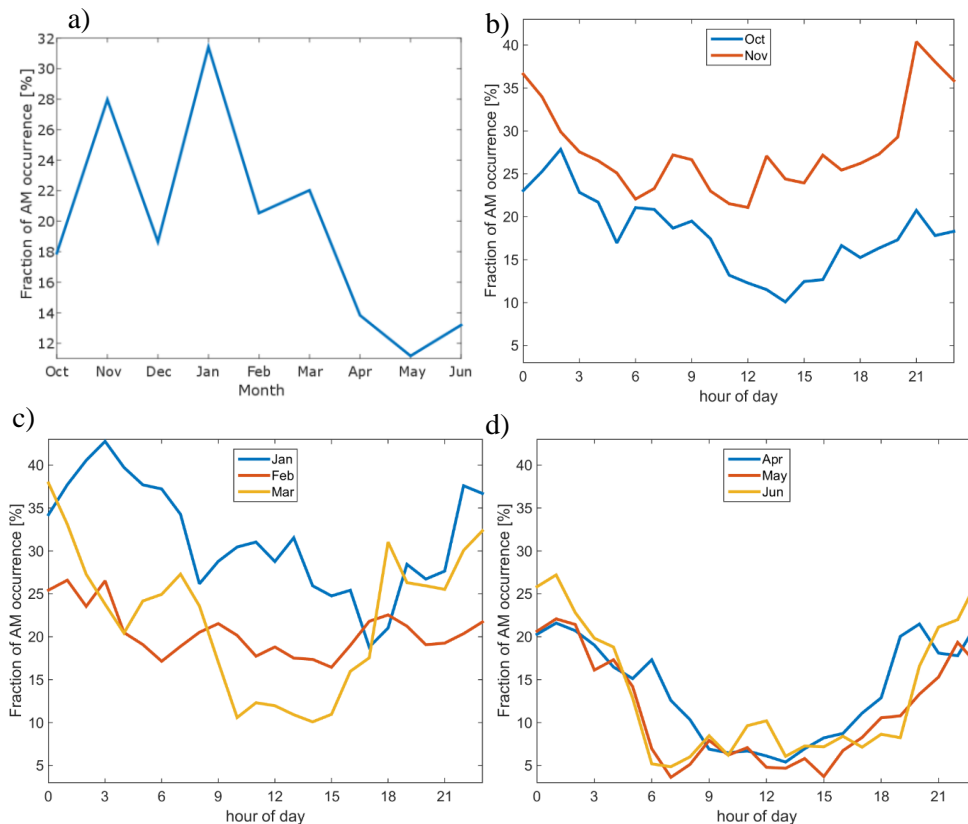
AM observeras omkring 20 % av tiden (Figur 5.9a). Förekomsten är högre under vintern (cirka 30 % exklusive december), och lägre under april till juni (13 % av tiden). Förekomsten under december är relativt låg jämfört med november och januari. På grund av begränsad mängd data från december (mer än 2/3 saknas) kan resultatet emellertid inte anses representativt.

En tendens till en dygns cykel, med lägre förekomster under dagen och högre förekomster under natten, finns för varje månad som visas i Figur 5.9b-d.

Dygns cykeln är tydligast för april till juni, när F_{AM} minskar till mindre än 10 % under dagen.

Liksom månatliga medelvärden, är maxima av F_{AM} tendentiellt högre under vintern, och lägre under vår och sommar. Högsta maxima för F_{AM} beräknas för januari, 43 %, och november, 40 %, medan de är hälften så höga för april och maj. Maxima uppstår under dagens första timmar och senast i januari, mellan 3.00 och 4.00. November månad sticker ut, eftersom det maximala är mellan 21.00 och 22.00. Säsongsskillnaderna är ännu tydligare, när minima av F_{AM} analyseras. Medan minima är cirka 4 till 5 % mellan april och juni, är de fyra gånger högre i november, januari och februari. Minima framträder mellan 12.00 och 18.00 med undantag för maj och juni. För dessa månader är minimumet mellan 7.00 och 8.00, och F_{AM} förblir under 10 % till kvällen (18.00 – 20.00).

Den årliga variationen av F_{AM} lyfter frågan om vilka atmosfäriska förhållanden som leder fram till AM. Under vintern är atmosfären oftare och starkare stabilt skiktad, jämfört med andra tider på året. Detsamma gäller för de dagliga variationerna från mars till juni. Atmosfären under dessa månader är vanligen instabilt skiktad under dagen, och stabilt skiktad under natten. Övergångstiderna mellan dessa två tillstånd är huvudsakligen beroende av soluppgång och solnedgång. Det förklarar också frånvaron av en (klar) dygns cykel för övriga månader. Under vintern är tidsperioden med dagsljus ganska kort vid Malås breddgrader. Dessutom är solhöjden relativt låg, vilket minskar skillnaderna mellan dag och natt.

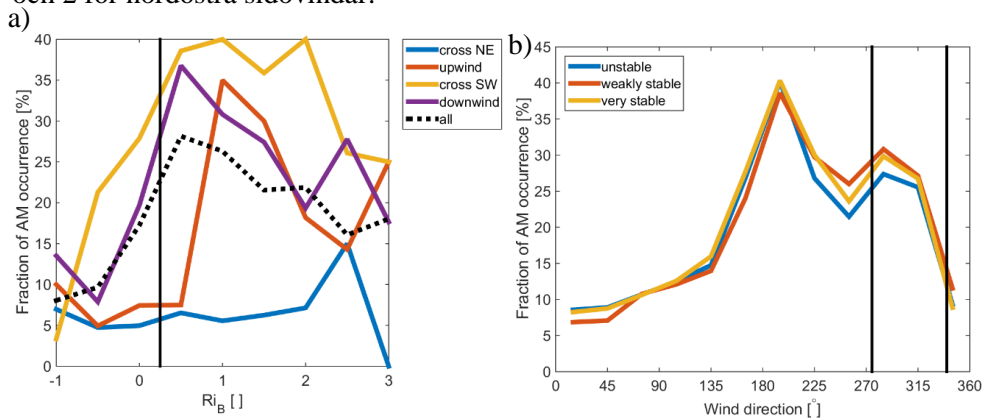


Figur 5.9. a) Års- och dygnsvariationer av förekomsten av AM i Malå under b) oktober och november 2016, c) januari, februari och mars 2017 och d) april, maj and juni 2017.

För att undersöka beroende av AM på atmosfärstabilitet, används en dimensionslös storhet, som kallas bulk Richardsonsantal, Ri_B . Ri_B är förhållandet påverkan av buoyancy och vindskjuvning på turbulensen. Buoyancy innebär, att flytkrafter undertrycker eller producerar turbulens, och motverkar turbulensproduktionen på grund av skillnader i vindhastighet. Då Ri_B är positiv, är atmosfären stabilt skiktad, om Ri_B överskrider det kritiska värdet på 0,25, turbulensen är kraftigt undertryckt. I Figur 5.10a visas F_{AM} beroende på Ri_B för alla data (streckad linje), och delas in i de fyra vindsektorerna (heldragna linjer). När det gäller den första är F_{AM} med omkring 28 % högst för Ri_B mellan 0,25 och 0,75 och minskande med ökande Ri_B till omkring 16 % till 18 %. För Ri_B mellan -0,25 och 0,25, är F_{AM} omkring 17 % och lägre, eller omkring 10 % för Ri_B mindre än -0,25. Det betyder att den övergripande potentialen för AM är högst under något stabila förhållanden, och avtar när stabiliteten ökar eller minskar. Potentialen för AM är den lägsta för instabila förhållanden.

Effekten av stabilitet på F_{AM} är beroende av vindriktning. För vindriktningar inom med- och motvindsektorn och vindsektorn i sydvästriktningen är resultaten i stort sett lika med resultaten när ingen skillnad görs mellan de olika sektorerna: högsta F_{AM} för svagt stabila förhållanden, och tendensen minskar med både ökande och

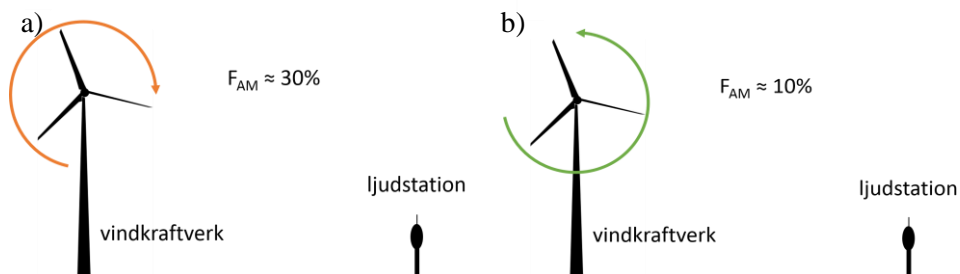
minskande stabilitet. Däremot finns det en nästan konstant F_{AM} för Ri_B mellan -1 och 2 för nordöstra sidovindar.



Figur 5.10. Förekomsten av AM beroende på a) Ri_B och b) vindriktning på nivå 3 i Malå. Intervaller är respektive 0,5 och 30°. Vertikala linjerna markerar: a) kritiskt Ri_B , $Ri_c = 0,25$ på och b) medvindsektorn.

Eftersom det finns en klar skillnad i vindriktningar i figur 10a, analyseras beroendet av F_{AM} beroende på vindriktning för instabila, svagt stabila och mycket stabila förhållanden, och visas i Figur 5.9b. AM är vanligare för den sydvästra sidovindssektorn (185° - 250°) och några medvindsriktningar, än den nordöstra sidovindssektorn (5° - 70°) och motvindsektorn (95° - 160°). Skillnader mellan instabila, svagt stabila och mycket stabila förhållanden kan generellt ses för nordöst- och sydväst- till västvindar.

Ett icke symmetriskt mönster för effekten av vindriktningen på AM (Figur 5.10b) har tidigare visats av Larsson och Öhlund (2014). I deras studie analyseras AM på två olika ställen. Mätplatsen Dragaliden, är jämförbar med Malå, eftersom de liknar varandra på flera punkter. Båda platserna ligger i kuperad terräng i norra Sverige, har liknande klimat, och avståndet mellan närmaste vindkraftverk och mikrofonen är ca 1 km. En liknande analys av data från Dragaliden visar en F_{AM} på 30 % för en sidovindssektor, medan den är 10 % för den motsatta sidovindssektorn. Det matchar resultatet i Malå. Sidovindssektorn med högre F_{AM} är i båda fallen den, för vilken vinden gör vindturbinerna roterande i riktning mot den akustiska stationen (se Figur 5.11).



Figur 5.11. Schematisk illustration av skillnaden i rotationsriktning av ett vindkraftverk i förhållande till stället av den mätpunkten, och förekomsten av AM för a) rotation i riktning mot och b) bort mätpunkten. Vinden är riktad a) på och b) riktad ut av ritytan.

I motsats till resultaten från Dragaliden och Malå, visar den andra mätplatsen som användes av Larsson och Öhlunds, F_{AM} på cirka 30 % för både sidovindsektorerna. Denna plats ligger dock i flack terräng i södra Sverige, och har därför ett annat klimat. Dessutom är avståndet mellan vindkraftverk och mikrofon mindre än hälften av det i Dragaliden och Malå.

5.6. Sammanfattning

Alla tre platser uppvisar olika ljudmiljöer. Den tystaste platsen är Malå, medan ljudtrycksnivåerna är högre i Karsholm och Jädraås. Vindkraftverken i Jädraås är dock oftare den dominerande ljudkällan än vindkraftverken i Karsholm och Malå. En orsak till den höga ljudtrycksnivån i Karsholm är kraftledningarna nära mätpunkten. Ljudet som härstammar från kraftledningarna överlagrar ljudet från vindkraftverk och ökar därigenom den uppmätta ljudtrycksnivån.

Ett förbättrat, mer avancerat filter användes vid de akustiska mätningarna på Malå-mätplatsen. Detta filter tar hänsyn till spektral likhet, ljudnivåns variation, vindkraftverkens rotationsfrekvens och vindinducerad ljud i närheten av den akustiska stationen. Nivån på vindturbinljudet identifieras huvudsakligen i intervallet mellan 20 och 30 dBA med maximalt cirka 28 till 29 dBA. Analysen avslöjade en tendens till en ökning av L_{Aeq} med ökande c_{eff} . L_{Aeq} ökar också med ökande temperatur, dock endast för temperaturer över 0 °C. På grund av filtret avvisas nästan alla L_{Aeq} mätningar för vindriktningar mellan 340 och 180. Maximat ligger något utanför medvindssektorn. L_{Aeq} ökar med ökande vindhastighet vid navets höjd, vilket beror på ökningen i rotationsfrekvensen och ökningen av vindskjuvning.

AM i Malå är vanligare under vintern och mer sällsynt under sommaren. Dessutom är AM vanligare på natten än under dagtid. Detta kan förklaras med att AM är beroende på stabilitet, med förhöjd förekomst vid stabila förhållanden (som är vanligare på vintern och natten). Beroende av AM på vindriktning är tydligt. Förekomsten av AM ökas väsentligt, när vinden kommer från sydväst (SV-sidovindsektor) och från västnordväst (medvindsektor). AM är minst vanligt förekommande under norra och nordöstra vindar (NO-sidovindsektor). Denna skillnad i förekomsten av AM för de två sidovindsektorerna observerades också i studien av Larsson och Öhlund (2014). Denna asymmetri verkar emellertid bero på faktorer som landskap, klimat och /eller avstånd från vindkraftverken.

6. Ljudutbredningsberäkningar

Det har funnits två syften med att arbeta med beräkningar av ljudutbredning i detta projekt. Det första har varit för att jämföra prediktioner med mätningar från de mikrofoner som användes vid de olika vindkraftsparkerna, och det andra syftet har varit att beräkna en ljuddos för besvärsestimationer som samlades in under projektet. Ljudutbredningsberäkningarna och de använda ingångsvärdena i modellen beskrivs nedan.

6.1. Ljudutbredningsalgoritm

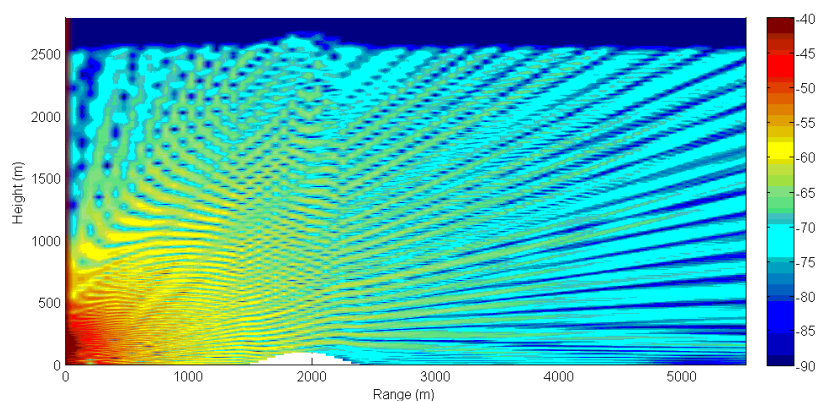
Målsättningen med denna del av rapport är att ge en översiktlig beskrivning av hur ljudutbredningsberäkningarna har genomförts. För en mer teknisk beskrivning hänvisas till korrespondens med projektdeltagare Karl Bolin (kbolin@kth.se). För ljudutbredningsberäkningar av godtycklig atmosfär används i detta projekt en lösning av vågekvationen baserad på en så kallad parabolisk ekvation. Paraboliska ekvationer löser vågutbredningsekvationen stegvis i ett tvärsnitt åt gången. Huvudantagandet vid den paraboliska ekvationen i ett cylindriskt koordinatsystem är att lösningen negligerar differentialen δ_{rr} , d.v.s. andraderivatan i radiell utbredningsriktning. För mer ingående information om paraboliska ekvationer generellt hänvisas till Salomons, (2002).

Den numeriska lösningen av den paraboliska ekvationen som använts i detta projekt benämns vanligtvis Green's Function Parabolic Equation (GFPE) och bygger som namnet indikerar på en Greensfunktion som använts som lösning på den paraboliska ekvationen. För härledning av lösningen hänvisas till Gilbert & Di (1993) och Salomons (2002) och Gilbert (2015). Fördelen med denna algoritm jämfört med andra mer konventionella lösningar av den paraboliska ekvationen är dess höga beräkningshastighet som huvudsakligen kommer sig av två faktorer. Dels används Fouriertransformen som ”propageringsmotor” vilken är en effektiv beräkningsalgoritm, dels är lösningen stabil upp till steglängder av ca 10 våglängder (λ) (jämfört med 0,1 λ för den vanligaste lösningsmetoden av PE) vilket innebär att 1/100 så många steg är nödvändiga för beräkningen. Den numeriska lösningen som använts har tidigare validerats i Bolin et al (2009) och Bolin et al (2014) och efter att det upptäcktes (Bolin et al 2014) att numeriska instabiliteter kan uppstå har denna anpassats enligt Gilbert (2015) för att undvika risken för dylika numeriska artefakter.

Kuperad terräng är en utmaning för GFPE-algoritmen vilken kräver ett kartesiskt koordinatsystem för att kunna lösas. I detta projekt anses det intressant att undersöka terrängeffekter från utbredning av ljud från vindkraft och därmed finns det ett behov av att inkludera denna effekt i GFPE-lösaren. Terrängvariationer har inkluderats i en mycket närbesläktad algoritm, den s.k. Beilis & Teppert Parabolic Equation (BTPE), se Parakkal et al (2012), genom att införa refraktionsbidrag motsvarande terrängens inverkan. Detta refraktionsbidrag har med lätthet inkluderats i den implementerade GFPE algoritmen och visar goda jämförelser med BTPE resultat som i sin tur visat god överensstämmelse med mätningar. Därmed

anses det att ljudutbredningsberäkningar använts i projektet som är snabba nog att kunna behandla stora mätserier, godtyckliga terrängförhållanden och atmosfäriska förhållanden samt är numeriskt stabila.

För att beräkningshastigheten ska vara rimlig (för de 100 mottagningspunkterna, 24 tersbanden och 5–66 vindkraftverken) samtidigt som noggrannhet eftersträvas har horisontella och vertikala steglängder som rekommenderas i litteratur (Salomons 2001) använts i ljudutbredningsberäkningarna. Dessa är 10λ i horisontell riktning och 0.1λ i vertikal höjd. Vidare har ljudutbredning på avstånd över 5 km ansetts ge obetydliga tillskott till det totala ljudet och därmed negligerats och beräkningsdomänen har begränsats till maxbeloppet av 8 navhöjder eller utbredningslängden/5 eller 200λ vilket i praktiken gör att beräkningshöjder mellan 800–1000 m. Dessa val anses ge en god noggrannhet av ljudutbredningen. Jämförelser med tidigare publicerad forskning om ljudutbredning över komplex terräng har genomförts, och visar möjliga resultat. I figur 6.1 visas ett fall med ljudutbredning över en kulle vid ca 2 km och en konstant ljudhastighetsprofil.



Figur 6.1: Referensfall för ljudutbredningsberäkning över en kulle vid ca 2 km avstånd och en konstant ljudhastighetsprofil. En ljudskugga bakom kullen kan observeras som successivt fylls med ljudenergi.

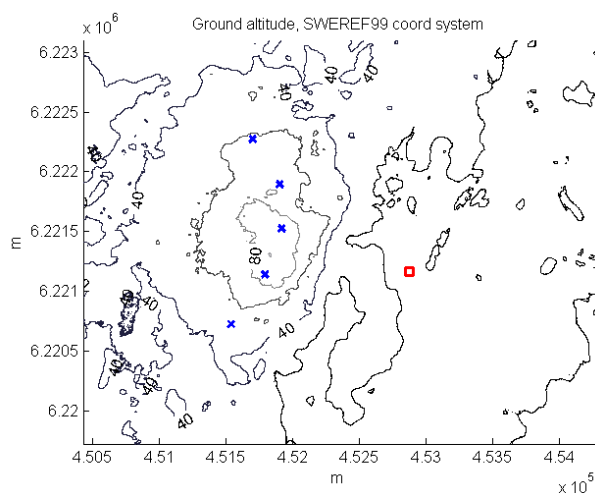
6.2. Markdata

Markens akustiska hårdhet och markhöjden mellan verket och mottagaren hör till parametrar som behöver uppskattas för att ljudutbredning till marknära positioner ska kunna bedömas noggrant. Dessa data finns direkt och indirekt tillgängliga för Sveriges yta från två olika databaser. Data om markhöjd har erhållits från Lantmäteriet och data om terrängtyp har erhållits från Naturvårdsverket.

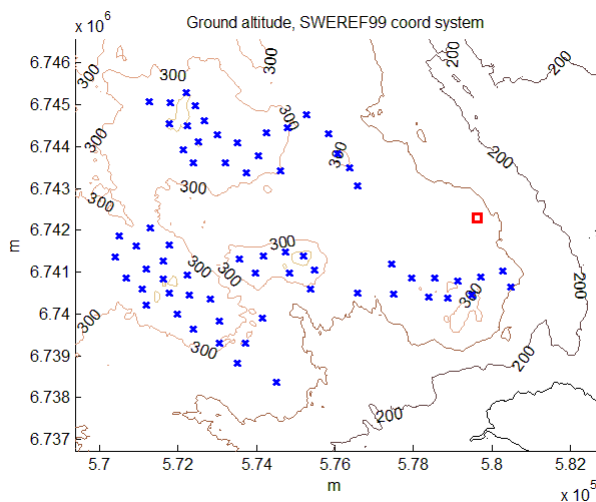
6.2.1. Modellering av terrängvariationer

Prioritet i projektet har varit att undersöka hur kuperad terräng påverkar ljudutbredningen och ljudutbredningsalgoritmer för att inkludera variationer i markhöjd är som tidigare nämnts inkluderade i projektet. Data för de lokala terrängförhållandena har använts från Lantmäteriets databas som tillhandahåller dessa tjänster till universitet via hemsidan <https://zeus.slu.se/get/?drop=get/>. De höjddata som använts i beräkningarna har en upplösning på 50×50 m och finns

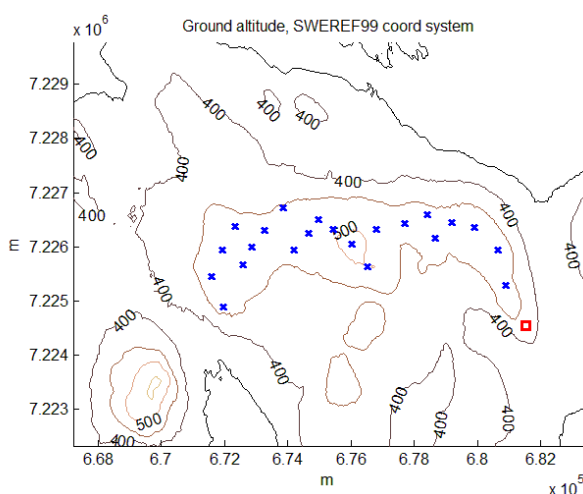
tillgänglig för hela Sverige. Höjdkurvorna för de tre olika vindkraftsparkerna visas i figur 6.2, 6.3 och 6.4 där även positionerna för vindkraftverk och mätpunkter finns angivna. Från dessa data har markhöjden för de aktuella sträckorna för ljudutbredningarna interpolerats.



Figur 6.2: Figuren visar en höjdkarta över Karsholms vindkraftspark, vindkraftverkens positioner är markerade med blå kryss (x) och mätpunkten med en röd fyrkant (□). Som ses befinner sig vindkraftverken på en höjd med mätpunkten i dalen öster om verken så vid en dominerande V-SV vindriktning medför att en hög andel medvindsförhållanden kan förväntas.



Figur 6.3: Figuren visar en höjdkarta över Jädraås vindkraftspark, vindkraftverkens positioner är markerade med blå kryss och mätpunkten med en röd fyrkant.



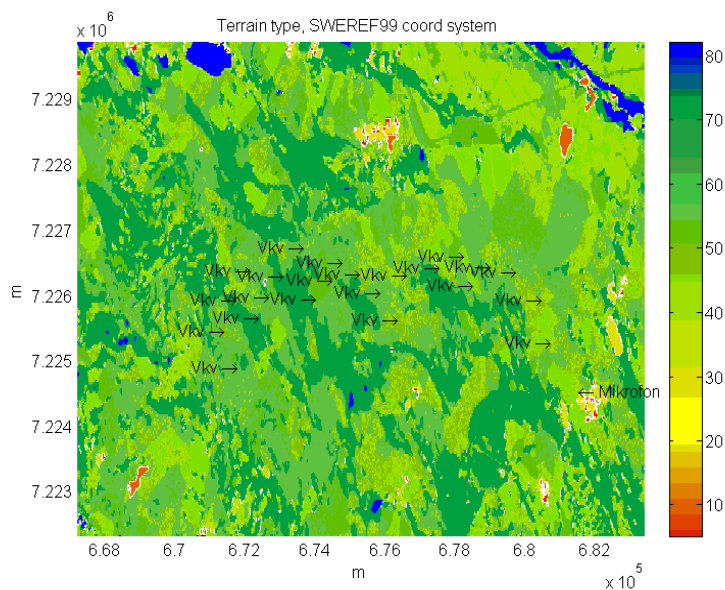
Figur 6.4: Figuren visar en höjdkarta över Malås vindkraftspark, vindkraftverkens positioner är markerade med blå kryss och mätpunkten med en röd fyrkant.

Alla tre vindkraftsparker är positionerade på höjdformationer och mätpunkterna valda i lägre terräng, förhållanden som är representativa för dagens vindkraftsetableringar respektive närliggande bostäder.

6.2.2. Modellering av markimpedans

Andelen av akustisk energi som reflekteras från marken varierar med marktyp och vinkel på infallande ljudstråle vid antagande om att infallande våg är av typen planvåg. I detta projekt har en modell utvecklad av Delany & Bazely (1970) använts för att estimeras impedansvillkoret som sker vid markreflektioner. Denna modell är baserad på en parameter och har visat god noggrannhet för höga frekvenser men mindre god noggrannhet för lägre frekvenser men har fördelen att experimentella data finns tillgängliga för den parameter, flödesresistiviteten, som behöver estimeras Sohlman et al (2004) som kan kopplas till den Europeiska databasen (CORINE) för marktäckelse som i Sverige har en upplösning på 25 x 25 m vilket gör att den lokala marktypen och markimpedansen för ljudutbredningen kan modelleras för alla beräkningsfall. I nuvarande mjukvara tas inte hänsyn till det rådande snödjupet vilket ger modifieringar av markens akustiska hårdhet, snö ger sannolikt en mer dämpad reflex än de flesta barmarkstyper och detta skulle kunna tas hänsyn till genom att koppla den till lokal meteorologisk information från AROME om rådande snöförhållanden.

Kartor över terrängtyper för de tre aktuella vindkraftsparkerna visas i figur 6.5, 6.6 och 6.7. Som kan observeras är de största ytorna klassade som CORINE-typer nummer 40–60 vilket innebär dominerande skogsterräng runt samtliga parker med mer inslag av terrängtyper nummer 25-40 för Karsholm vilket är olika typer av öppen terräng och åkermark medan de blå områdena representerar vatten och de röda områdena bebyggelse.



Figur 6.7: Marktäcke vid Malå vindkraftspark, kartan visar terrängtyp enligt CORINE-databasen.

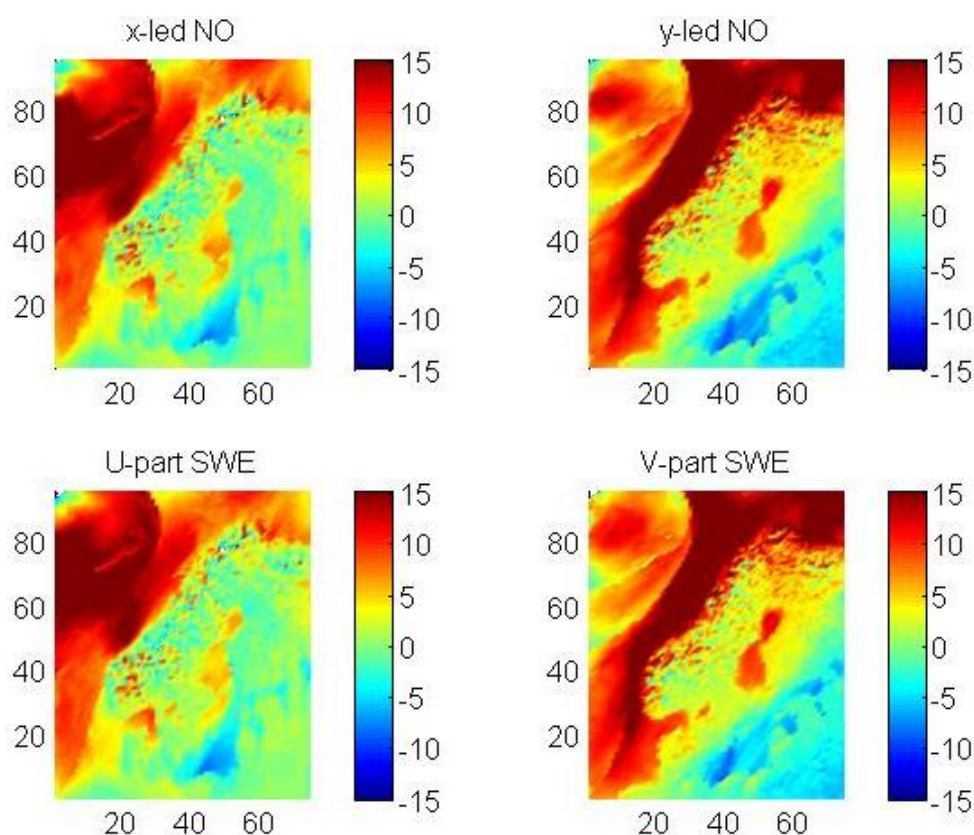
6.3. Väderdata

Projektets målsättning har varit att inkludera väderdata i ljudutbredningsberäkningar för att kunna utföra lokala och tidsupplösta beräkningar av ljudutbredningen. I detta sammanhang har data från den meteorologiska prognosmodellen AROME använts för att läsa aktuellt väder och beräkna aktuell ljudhastighetsprofil. AROMEs huvuduppgift är att förse ett flertal nationella meteorologiska institut med väderprognoser och är därmed inte specifikt anpassat för att prognostisera vindkraft eller vindkraftsbuller men fördelen är att väderdata finns över hela Skandinavien och att en prognos finns för varje timme. Den horisontella gridstorleken på ARMOE är 2,5 x 2,5 km och den vertikala profilen är tryckberoende och delas upp i 65 nivåer. Ljudhastighetsprofilen har beräknats från de elva lägsta vertikala punkterna i AROME vilket ungefär motsvarar upp till en höjd av 1 km vilket anses vara en tillräcklig höjd för att inkludera ljudenergin som når mottagare i beräkningarna som är på maximalt 5 km avstånd.

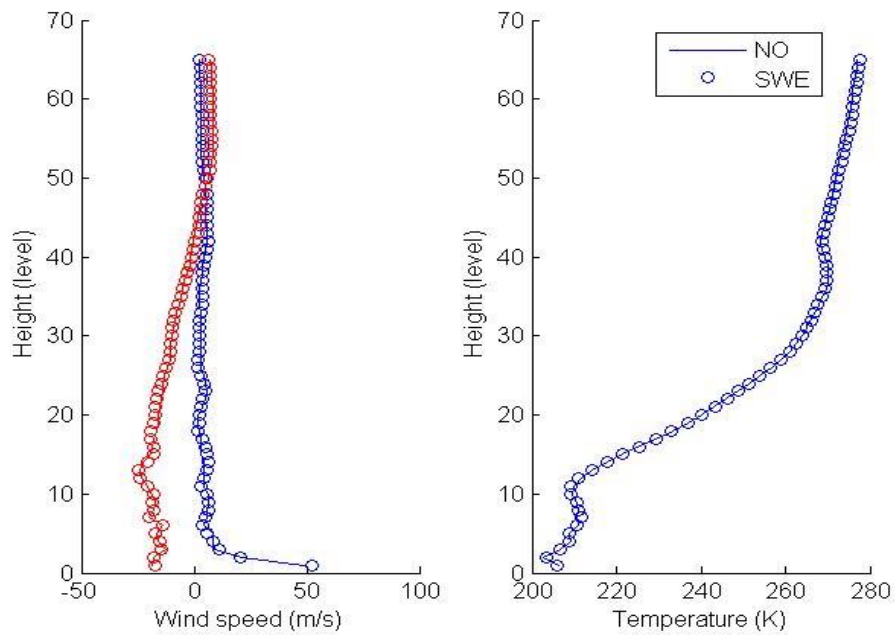
Tillgängligheten av AROME data varierar för detta projekt. De väderdata som används som är tidigare än 2016-11-08 är tillhandahållna från SMHI medan senare data har laddats ner fritt från Norska väderinstitutets hemsida. Dessa dataformat skiljer sig delvis åt och för att säkerställa att samma data behandlas visas jämförelser för tidpunkten 07:00 2017-01-06 nedan, dels för vindstyrkor på 10 m höjd över hela beräkningsområdet i figur 6.8 dels i figur 6.9 där vindhastighetsprofilen och temperaturprofilen för AROME-punkten i det sydvästra hörnet. Noteras bör att profilen indexeras enligt AROME definierar höjdpunkt nr 1 som den högst upp i atmosfären som är ca 10 km upp från markytan, därav de höga vindhastigheterna och låga temperaturerna som ses i figur 6.9. Marginella

skillnader kan även observeras i profilerna vilket beror på att väderdata från Norge finns tillgängliga från väderprognosen utfärdad vid midnatt och i rådande fall alltså utgör en prognos 7 h fram i tiden medan de svenska väderdata finns tillgängliga fyra gånger per dygn (klockan 00, 06, 12 & 18) och i detta fall utgör data från väderprognosen 1 h framåt från klockan 06.

Slutsatsen från denna och andra, här ej redovisade, jämförelser av väderdata är att dessa parametrar behandlas korrekt i programmet för ljudutbredning och att både de norska och svenska AROME-data bör ge en lokal tidsupplöst bild av de meteorologiska parametrar som avgör ljudutbredningen.



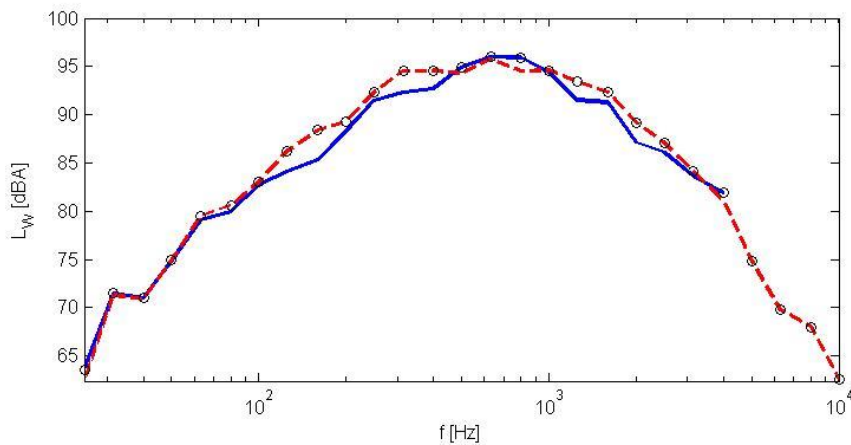
Figur 6.8: Väderkarta över vindstyrkor, de övre graferna visar norska data och de undre visar svenska data. På den vänstra sidan visas västliga vindstyrkor (negativa värden innebär östliga vindar) medan de högra graferna visar nordliga vindstyrkor.



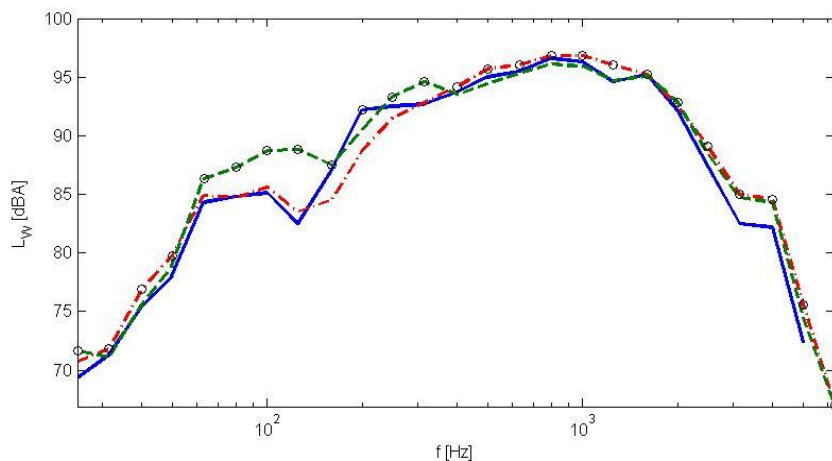
Figur 6.9: Profiler av vindhastigheter (vänster) och temperatur (höger) visas från AROME-data. De svenska värdena visas som cirklar medan de norska prognoserna är sträck.

6.4. Ljuddata från vindkraftverken

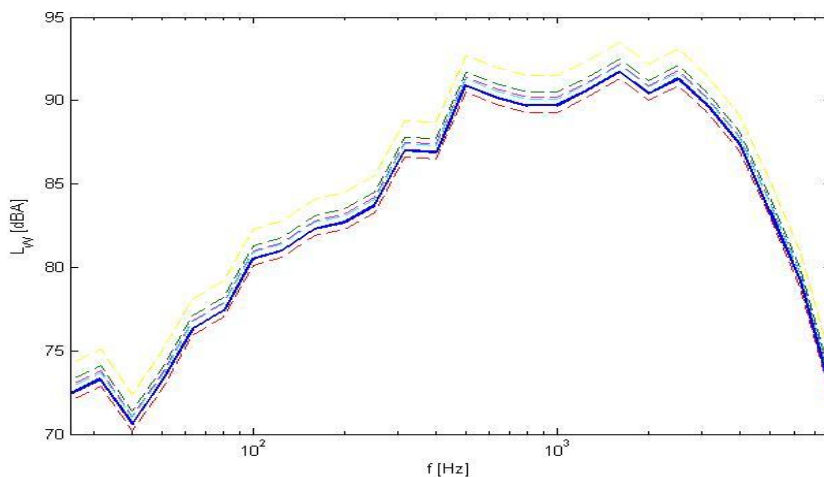
Tillgängliga ljudemissionsmätningar finns för verk i samtliga parker med redovisade ljudeffekter för verken vilka beräknats enligt gällande standard (IEC61400-11).



Figur 6.10 Tersbandsspektra av ljudeffekten från emissionsmätningar från av två av vindkraftverken vid Karsholm.



Figur 6.11 Tersbandsspektra av ljudeffekten från emissionsmätningar från av tre av vindkraftverken vid Jädraås.



Figur 6.12 Tersbandsspektra av ljudeffekten från emissionsmätningar från av sju av vindkraftverken vid Ytterberg. Den helstreckade kurvan representerar mätningar från vindkraftverket närmast mittpositionen vid Malå.

6.5. Beräkningsresultat

I detta kapitel delredovisas resultaten från de ljudutbredningsberäkningar som är utförda i projektet. Beräkningarna är utförda dels för de tillfällen det finns loggade ljudmätningar, dels för de tillfällen då det registrerats bullerupplevelser från den epidemiologiska delen projektet vilka rapporteras i kapitel 7.

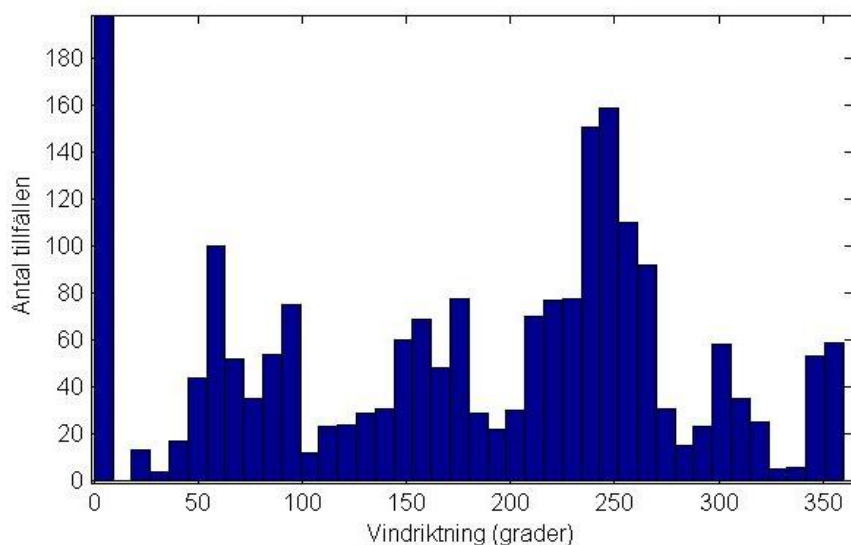
6.5.1. Beräkningstider

För beräkningar har en dator med processorn Intel Xeon E5 2699 v 3 använts vilken innehåller 36 processorer med två trådar på varje processor. En beräkning per vädertillfälle för Malå (18 frekvenser (tersband 20–1000 Hz), 22 vindkraftverk) tar i genomsnitt 2 minuter. Eftersom långtidsmätningar finns registrerade för 10 minuters ekvivalentvärden under relativt långa perioder är den sammanlagda

beräkningstiden för Malå ca en månad vilket i dags dato (2018-02-28) ej hunnit uppnås. Därför redovisas inkompleta beräkningar i denna del.

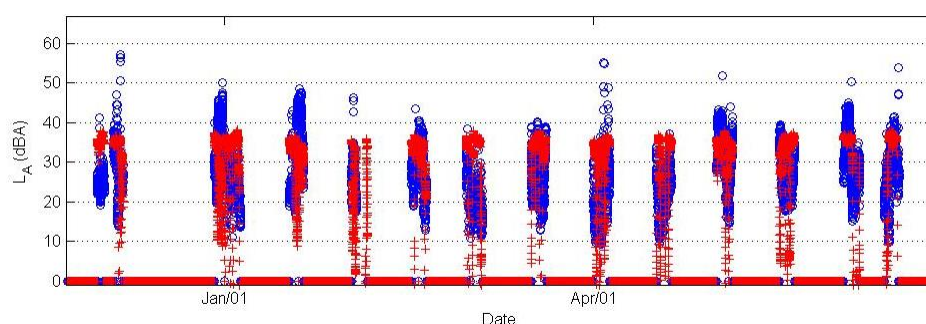
6.5.2. Beräkningsresultat

De aktuella vindriktningarna vid navhöjd på verken i Malå från AROME-data visas i figur 6.13. Som kan observeras är SV vindar vanliga vilket motsvarar sidvindsförhållanden till det närmsta verket.



Figur 6.13: Vindriktningar vid navhöjd beräknade av AROME-data vid de tillfällen ljudutbretningsberäkningar utförs.

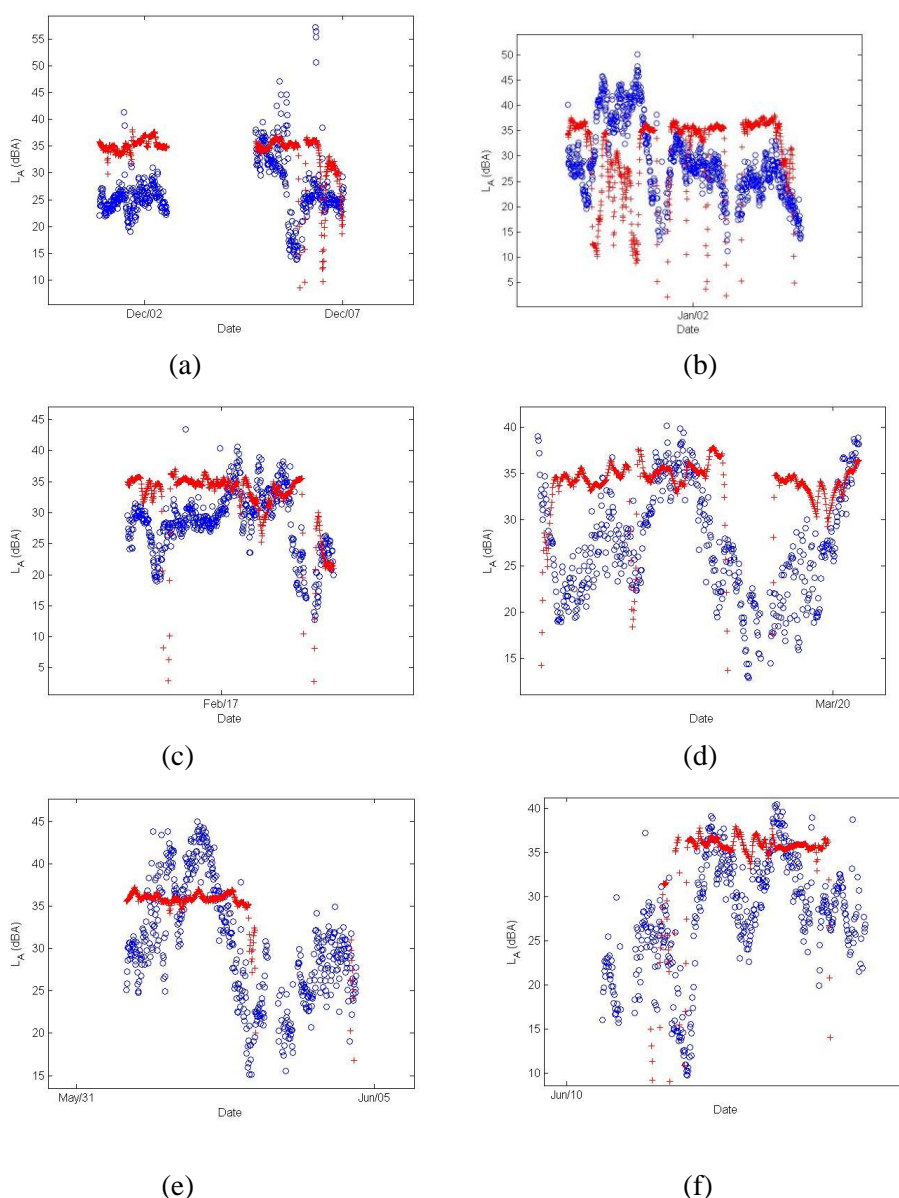
I figur 6.14 redovisas de samtida ljudutbretningsberäkningar och ljudmätningar som är utförda under projektet, sammanlagt uppgår detta till 9278 tillfällen. Mätdata i denna graf är inte filtrerat vilket medför att samtliga mätningar visas och att uppmätta toppnivåer är högre än beräknade.



Figur 6.14: Beräknad (+) och uppmätt (o) A-vägd ljudnivå för vindkraftverken vid Malå.

Figur 6.14 presenterar så pass omfattande datamängder att förstoringar ges i figur 6.15 (a-f). Ett par trender är tydliga i dessa förstoringar. Beräkningarna överskattar uppmätta värden i 6.15 a-d vilket sammanfaller med att marken sannolikt är snötäckt och därmed är den antagna markreflektionen sannolikt lägre med tanke på snöns möjligheter att dämpa markreflektionen. En lägre variation av ljudnivåer kan

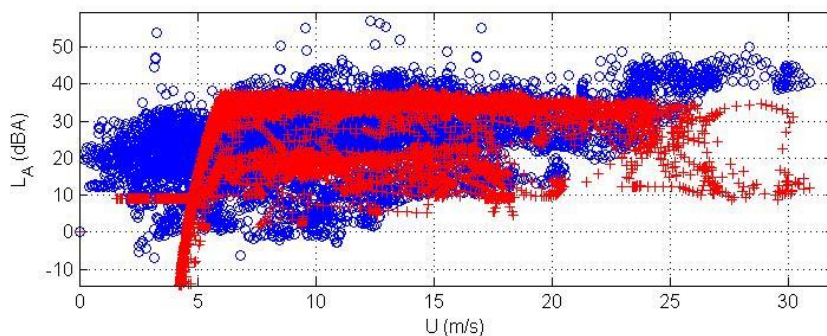
vidare ses i beräkningsresultat jämfört med mätningarna. Detta kan delvis bero på att mätdata är ofiltrerade och därmed innehåller andra ljudkällor än vindkraftsljud och vidare används vindhastigheten vid navhöjd för att anta ljudeffekten från verken i beräkningarna och driftsvariationer som förekommer har därmed inte tagits hänsyn till. Det bör dock i detta sammanhang observeras att för snötäckt mark minskar ljudnivån och för Malå ser detta ut att kunna ge en observerbar effekt genom minskande ljudnivåer vintertid. Författarna till denna rapport ser ingen logisk anledning till att liknande minskning bör ske i de delar av Sverige som för tillfället har snötäcke.



Figur 6.15: Beräknad (+) och uppmätt (o) A-vägd ljudnivå för vindkraftverken vid Malå. Figurerna är förstoringar av data från figur 6.14.

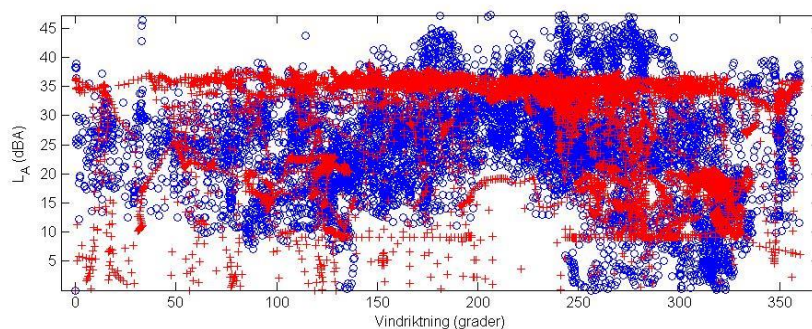
Figur 6.16 visar samma data som i figur 6.14 men sorterat efter vindhastighet vid navhöjd. En stor spridning kan ses i mätningarna med en trend av ökande ljudnivå

med avseende på vindhastigheten. En tydlig uppdelning av resultaten kan ses för de beräknade data sannolikt vilket motsvarar höga ljudnivåer för tillfällen med nedböjande refraktion (medvindsförhållanden) och låga ljudnivåer för tillfällen med uppåtböjande refraktion (motvinds- eller sidvindsförhållanden).



Figur 6.16: Beräknad (+) och uppmätt (o) A-vägd ljudnivå för vindkraftverken vid Malå vid olika vindhastigheter på navhöjd (U).

Figur 6.17 visar ljudnivåer som funktion av vindriktning vid navhöjd. Mätningarna har högre maximala värden för sydliga (180°) och västliga (250° - 300°) vindriktningar vilket inte kan observeras i beräkningarna. Som kan observeras finns inga tydliga trender i beräkningsdata av att med- och motvindsförhållanden separeras. Detta kan sannolikt förklaras dels av det relativt korta avståndet mellan närmaste verk och mätpunkten och att ljudeffektens variation med vindhastighet inte inkluderas i grafen, dels av att temperaturgradienten kan ha en betydande roll för hur uppåtböjande eller nedåtböjande ljudet strålar från verken.



Figur 6.17: Beräknad (+) och uppmätt (o) A-vägd ljudnivå för vindkraftverken vid Malå vid olika vindriktningar på navhöjd.

6.6. Sammanfattning

Ljudutbredningsberäkningar som kopplar lokala meteorologiska förhållanden och utbredningsterräng har implementerats i projektet och givit god överensstämmelse med tidigare publicerade data. Ljudutbredningsberäkningar har utförts vid ca 10 000 tillfällen vid dels de vid de tillfällen och platser där störningsestimat finns tillgängliga och dels för de kontinuerliga mätningarna vid Malå. Resultaten från Malå visar att beräkningarna har högre ljudnivå än mätningarna, speciellt för de tidiga månaderna på året vilket sannolikt beror på att marken är snötäckt och

därmed reflekterar betydligt mindre ljud än den barmark som är antaget vid beräkningarna. Detta ger indikationer på att områden som har en betydande snösäsong kan erhålla en lägre ljudnivå än områden där snö är mindre vanligt förekommande. Högre noggrannhet observeras för beräkningarna i juni när marken sannolikt inte längre är täckt av snö och därmed blir impedansvillkoren mer noggrant modellerade.

En tydlig trend av skillnader i uppåt- och nedåtböjande ljudstrålar kan observeras för vindstyrkor högre än 5 m/s. Denna uppdelning kan inte korreleras till vindriktningen, vilket möjligtvis kan förklaras med att temperaturgradienten spelar stor roll för uppåtböjande eller nedåtböjande ljudstrålar till marken.

7. Validering mot störningsupplevelse

7.1. Frågeformulär

7.1.1. Mätningssprocedur

Datansamlingen via enkät skedde i samarbete med ett projekt inom Vindval som leddes av RISE Research Institutes of Sweden - Department of Energy Technology. Därmed utökades insamlingen till från de tre vindkraftparkerna i denna studie till totalt sju vindkraftparker. Detta möjliggjorde ett större urval och en större statistisk säkerhet i delar av analysen. Valideringen av ljudnivåberäkningarna, gjordes dock enbart från urvalet från Karsholm, Jädraås och Malå.

7.1.2. Urval

Populationen för enkäten var boende runt sju svenska vindkraftparker (koordinater i parantes enligt RT90): Brattön (N: 6505865,962, E: 1267775,772), Malå (N: 7226940,471, E: 1640777,473), Årjäng (N: 6595667,369, E: 1285799,976), Jädraås (N: 6743932,828, E: 1530281,002), Möckelsjöberget (N: 6961521,481, E: 1605722,678), Karsholm (N: 6224289,437, E: 1401642,356) och Skaveröd (N: 6524728,214, E: 1246565,625). Samtliga boenden inom fem kilometers avstånd från vindkraftparkerna valdes ut, vilket var 2905 individer. Av dessa individer valdes en boende per hushåll ut slumpmässigt, efter detta återstod 1462 deltagare. Till deltagarna skickades mellan ett till tre utskick via post. De första två utskicken innehöll inloggningsuppgifter till enkäten, för svar via internet, det sista utskicket innehöll en pappersenkät med ett förfrankerat returkuvert. När en deltagare svarat registrerades detta anonymt, så endast de deltagare som inte svarat fick påminnelser. Totalt valde 624 deltagare att besvara enkäten (42,7 procent). I tabell 7.1 beskrivs deltagarnas demografi.

Tabell 7.1. Demografisk data och bakgrundsvariabler. Antalet svarande per fråga och kategori. Procent av antalet svarande på frågan inom parantes.

Kön n=595 ^a	Kvinna 260 (43,6%)	Man 336 (56,4%)			
Ålder n=582 ^a	18–35 år 31 (5,3%)	36–50 år 116 (19,9%)	51–65 år 203 (34,9%)	65–80 år 203 (34,9%)	80 år+ 35 (6,0%)
Utbildning n=573 ^a	Grund- /Folkskola 117 (19,3%)	Gymnasium 164 (27,0 %)	Eftergymn. utb. 0–3 år 133 (21,9 %)	Eftergymn. utb. 3+ år 159 (26,2%)	
Område n =607 ^a	Årjäng 99 (16,3%)	Brattön 130 (21,4%)	Jädraås 13 (2,1%)	Karsholm 178 (29,3%)	
	Malå 19 (3,1%)	Möckelsjö- berget 121 (19,9%)	Skaveröd 47 (7,7%)		
Boendetyp n=554 ^a	Permanentboende 528 (89,5%)		Fritidsboende 62 (10,5%)		
Boendear n=554 ^a	0–5 år 73 (13,2%)	6–15 år 124 (22,4%)	16–30 år 162 (29,2%)	31–50 år 148 (26,7%)	51 år+ 47 (8,5%)
Antal boende n=577 ^a	1 vuxen 107 (18,5%)	2+ vuxna 272 (47,1%)	1 vuxen 1+ barn 28 (4,9%)	2+ vuxna 1+ barn 170 (29,5%)	

^a n=Antalet svarande per fråga

7.1.3. Enkätfrågor

Frågorna i enkäten handlade övergripande om deltagarnas: boendesituation, livstörhållanden, sovrummets orientering gentemot vindkraftverken, bullerstörning, visuell påverkan från vindkraftverken, annan upplevd påverkan från vindkraftverken, generella attityder kring vindkraft, ekonomisk ersättning från vindkraftsparken, demografi, hälsa, ljudkänslighet och negativa känslolägen (negative affectivity). För en detaljerad beskrivning av innehållet i enkäten se Bilaga 1. Majoriteten av frågorna har tidigare använts i forskning kring

vindkraftbuller och valdes ut eftersom de i tidigare studier visat sig ha effekter på upplevelsen av bullerstörning.

I missivbrevet beskrevs studiens syfte, att undersöka effekterna av vindkraftsbuller vid en av de sju vindkraftparkerna. Dessutom tydliggjordes, att deltagande i enkäten skedde utan ersättning samt kompletterande uppgifter kring bullerexponering skulle insamlas. Slutligen beskrevs att personuppgifterna hanterades enligt Offentlighets- och sekretesslagen 24 kap. 8 § (SFS 2009:400).

7.1.4. Utvärdering av modelleringsmodell med och utan terräng gentemot störning

För att avgöra om beräkningarna från modelleringsmodellerna går att använda för att predicera bullerstörning från vindkraftverk gjordes två korrelationsanalyser (pearson). Dessa visade att det fanns ett statistiskt signifikant samband mellan bullerstörning och både modelleringsmodellen med terräng ($r=0,257$, $p=0,018$) samt modelleringsmodellen utan terräng ($r=0,243$, $p=0,025$). En förbättring av korrelationskoefficienten på 5,8 procent, indikerar att modelleringsmodellen med terräng (terrängmodellen) är att föredra om inga andra faktorer begränsar valet av modell.

7.1.5. Databearbetning

I enkäten ingick två psykologiska skalor, vilket betyder att flera frågor slås samman för att ge en mer heltäckande bild av en egenskap. Skalorna mätte ljudkänslighet och negativa känslolägen (negative affectivity). För att kontrollera att frågorna mätte upplevelsen på ett liknande sätt gjordes reliabilitetsanalyser. Analyserna visade att båda skalorna hade hög intern reliabilitet (Cronbachs $\alpha_{\text{ljudkänslighet}} = 0,802$ och Cronbachs $\alpha_{\text{negativa känslolägen}} = 0,801$). Därmed slogs svaren på de enskilda frågorna samman för varje deltagare och medelvärdet av dessa svar användes i analyserna.

I frågeformuläret användes en standardiserad fråga kring hur buller (Folkhälsomyndigheten, 2017), i det här fallet från vindkraft påverkar olika typer av aktiviteter, till exempel, samtal, vila, sömn och utomhusvistelse. För att undersöka om dessa typer av störning kunde delas in i större enheter gjordes en principalkomponentanalys (rotation: VARIMAX). Anledningen till detta var att få mer övergripande förståelse av störningsupplevelser, men även att minska antalet variabler i senare analyser. Resultatet från analysen visade att 80,2 procent av svaren kunde aggregerat förklaras av två komponenter. Den första komponenten var kopplad till frågor kring avkoppling, som: sömnstörning, störd vila och svårt att vistas utomhus ($h^2=0,510$). Komponentens kallas fortsättningsvis ”Störd avkoppling”. Den andra komponenten var kopplad till frågor som rörde svårigheter att lyssna och kommunicera ($h^2=0,290$). Vilket relaterade till skattningar av svårighet att, samtala, tala i telefon samt att se på TV (kallas Störning av kommunikation). Komponentladdningen (regression) för varje individ, för båda komponenterna, användes i senare analyser som en indikation på individens störningsupplevelse.

Störning från bullerkällor utvärderades med en ISO standardiserad fråga (ISO, 2003). I den svenska översättningen mäter frågan bullerstörning på en femgradig skala från: ”inte alls störd” till ”väldigt mycket” (Folkhälsomyndigheten, 2017). Skalan kan användas i sitt femgradiga originalutförande. Ett vanligt förekommande sätt inom epidemiologiska studier är dock att dela upp svaren i inte störd och störd av buller. Detta görs för att mäta antalet personer som är störda av buller som i och med detta på ett enklare sätt beskriver hur fördelningen av störning hos en grupp människor ser ut. Praxis är att göra en gränsdragning vid de två översta kategorierna (mycket och väldigt mycket). Dessa personer betecknas som störda av buller. Personer som skattar störning på de tre undre kategorierna (inte alls, lite och måttligt) betecknas som icke störda av buller. Detta är ett konservativt sätt att tolka antalet personer som är störda av buller, eftersom samtliga deltagare som svarar mer än inte alls störd av buller, upplever någon form av störning. Denna omkodning genomfördes på svaren på bullerstörning från samtliga ljudkällor (se fråga 11 i bilaga xx). Vid förutsägelser (prediktion) av proportion störda krävs logistiska regressionsmodeller. Powerberäkningar inför dessa visade att det krävdes och vid en powerberäkning (*G*Power*, 2014) var deltagarantalet på 86 personer för litet för att genomföra denna typ av regression (Demidenko, 2007). Därmed utfördes istället linjära regressionsanalyser på hela bullerstörningsskalan (1. inte alls störd av buller, till 5. väldigt mycket störd av buller). Deltagarantalet för dessa med: sex prediktorer, $f^2=0,20$, power = 0,80, $\alpha = 0,05$ var 75 deltagare (*G*Power*, 2014). Multikollinarieteten utvärderades genom variansinflationsfaktor (VIF) och ansågs vara acceptabelt om värdet på VIF var under 10 (Dormann et al., 2013). Bearbetningen av data och samtliga analyser utfördes i IBM SPSS Statistics Version 24 (IBM SPSS Statistics, 2016)

7.1.6. Kontroll och bearbetning av variabler inför multipel regression

Inför regressionsanalyserna på svaren från Karsholm, Malå Ytterberg och Jädraås utvärderades det linjära sambandet mellan variablerna och bullerstörning kontrollerades med en korrelationsanalys (pearson). P-värdet behövde vara mindre än .20 för att variabeln skulle accepteras som prediktor (Michaud et al., 2016). Analysen visade att 22 variabler uppfyllde kriteriet (se Tabell 7.2).

Tabell 7.2. Korrelation mellan upplevd bullerstörning och 34 variabler.

Variabel	r ^a	p ^b	n ^c	Uppfyller p < .2
Störd av blinkande ljus	0,370	0	85	ja
Störd av skuggspel	0,545	0	85	ja
Etablering av VKP negativ för området	0,618	0	85	ja
Etablering av VKP negativ för deltagaren	0,665	0	85	ja
Störning av lågfrekvent ljud	0,969	0	84	ja
Upplevd ljudnivå	0,898	0	84	ja
Upplevd påverkan på landskap	0,626	0	84	ja
Upplevd säkerhetsrisk	0,507	0	84	ja
Upplevd störning av samtal (skala)	0,825	0	84	ja
Vindkraft som hållbar energikälla	0,641	0	83	ja
VKV synligt vid huset utomhus	0,363	0,001	82	ja
Kön	-0,304	0,005	85	ja
Störning av avkoppling (skala)	0,302	0,005	84	ja
Vindkraftverk synligt i omgivningen	0,311	0,005	81	ja
Modelleringsmodell med terräng	0,257	0,018	85	ja
Sovrum mot VKP	-0,252	0,020	85	ja
Utbildningsnivå	0,249	0,021	85	ja
Modelleringsmodell utan terräng	0,243	0,025	85	ja
VKP synlig i bostaden	0,210	0,060	81	ja
Ålder	-0,182	0,095	85	ja
Ljudkänslighet	0,169	0,122	85	ja
Negativt känsloläge	-0,141	0,199	85	ja
Upplevda vibrationer	0,523	0	75	nej
Attityd till vindkraftverk	-0,688	0	72	nej
Har tinnitus	-0,117	0,288	85	nej
Har nedsatt hörsel	-0,096	0,382	85	nej
Självs kattad hälsa	0,076	0,496	83	nej
Sover med öppet fönster	-0,071	0,518	85	nej
Får arrende från vindkraftägaren	-0,025	0,821	85	nej
Äger sin bostad	0,025	0,822	84	nej
Boendeår	0,024	0,830	81	nej
Årsinkomst	-0,007	0,949	83	nej

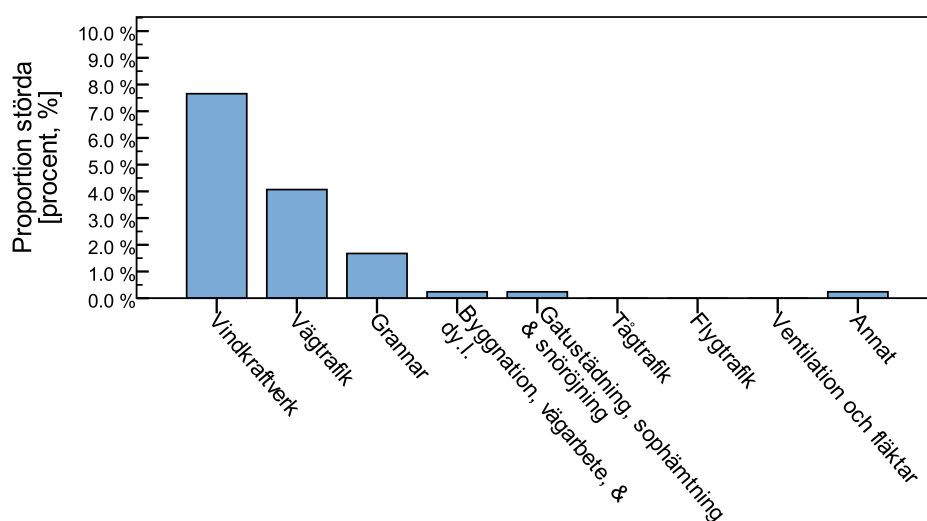
^a r=korrelationskoefficient (pearson), ^b p=statistisk signifikans, ^c n=antal svar på frågan.

I enkäter finns ofta frågor som deltagare av olika anledningar valt att inte svara på, dessa kallas saknade uppgifter (eng. missing data). Ett vanligt sätt att hantera saknade uppgifter är att ta bort de kombinationer av svarsvärden där minst ett av

värdena saknas. Detta tillvägagångssätt har dock visat sig snedvridda analysresultatet (Dong & Peng, 2013) och är därmed olämpligt som metod för att hantera saknad data (Wilkinson & Task Force on Statistical Inference, 1999). Ett annat sätt att hantera saknade uppgifter som inte medför samma risk för snedvridning är imputation. Detta innebär att det saknade värdet ersätts med ett värde som inte förändrar variabelns statistiska egenskaper (Dong & Peng, 2013). En imputering gjordes därmed efter generering av deskriptiv statistik innan regressionsanalyserna utfördes. Analysen inför imputationen visade att totalt 2,1 procent av värdena saknades, men att de fördelade sig så att 53,9 procent av variablerna och 36,1 procent av deltagarna hade ett eller flera saknade värden. Gällande valet av imputeringsmetod finns det flera olika metoder som kan användas beroende på vilken orsak som bedöms ligga bakom att deltagaren inte svarat på frågan (Kang, 2013). Den metod som valdes i denna studie var multipel imputation, på grund av flexibiliteten och hanteringen både kontinuerliga (ex. ålder, inkomst) och kategoriska variabler (ex. kön). Metoden kräver inte heller att variablerna är multivariat normalfördelade (Lee & Carlin, 2010), en fördelning som fem variabler inte uppfyllde. I den multipla imputationen skapades 20 separata dataset med imputerade värden (Hendry, Naidoo, Zewotir, North, & Mentz, 2014). Separata analyser gjordes på samtliga dataset och resultaten från dessa sammanvägdes till det slutgiltiga resultatet. Totalt imputerades 46 värden samtliga med linjär regression som metod.

7.1.7. Proportion störda samtliga deltagare

För att undersöka hur framträdande vindkraftverken är som källa till ljudstörning jämfördes samtliga ljudkällor gentemot proportion störda. Figur 7.1 visar att vindkraftverken är den vanligaste störningskällan hos deltagarna 1,75 gånger fler deltagare upplever ljuden från vindkraftverken (7,2 %) som störande jämfört med ljud från vägtrafik (4,1 %).



Figur 7.1. Proportion störda av nio ljudkällorna i (fråga 11, ISO). X-axeln beskriver ljudkällorna, y-axeln beskriver antalet deltagare som upplevdes sig störda i procent.

Proportion störda av vindkraft jämfördes också mellan de sju vindkraftparkerna i studien. De två vindkraftparker kring vilka flest deltagare upplevde sig störda av buller var, Karsholm (13,4 %) samt Skaveröd (13,3 %). Därefter var flest deltagare störda i Malå Ytterberg (5,3 %) samt i Årjäng (5,2 %). Förhållandevis färre deltagare var störda i Brattön (3,9 %) och i Möckelsjöberget (3,3 %). Inga deltagare rapporterade sig vara störda i Jädraås.

7.1.8. Störning i vindkraftparkerna i Karsholm, Malå och Jädraås

Nedan följer analyser av ljudutbredningsberäkningarna kring vindkraftparkerna Karsholm, Malå och Jädraås samt störningsupplevelsen hos deltagarna i dessa områden. I detta delurval av enkäten valde 86 personer att delta, därmed var deltagarkriteriet för linjär regression uppfyllt (se metod). Av deltagarna var 48,8 procent kvinnor och 51,2 procent män. Medelålder var 57,4 år (SD=11,3). Två olika exponeringsberäkningar användes i analysen. Dels de beräknade värdena från modelleringsmodellen med terräng, dels de värdena från kommersiellt använda exponeringsberäkningar som gjordes innan eller under driften av vindkraftparkerna (Eriksson, 2013; Hansson, 2013; King, 2008). I figur 7.2 visas relationen mellan de två olika exponeringsvärdesberäkningarna och proportion bullerstörda. Sambandet mellan modelleringsmodellen och proportion bullerstörda ses en gradvis ökning av antalet störda med ökad exponering. Avsaknaden av störning vid 40 LA_{eq,15min} beror på att endast två deltagare var exponerade för dessa nivåer och ingen av dessa upplevde sig störda. Jämförelsen mellan de kommersiella exponeringsberäkningarna och proportion störda finns inga deltagare som är exponerade för 40 LA_{eq}, men både vid 35 LA_{eq} och vid ett boende som enligt modellen inte är exponerade upplever sig drygt 15 procent vara störda. I och med det relativt låga deltagarantalet bör resultatet tolkas med viss försiktighet. I båda fallen indikeras dock resultatet att det även under 40 LA_{eq} finns boende som upplever störning av buller.



Figur 7.2. Proportion störda deltagare i relation till beräknad bullerexponering. Till vänster beskrivs relationen mellan den momentana bullerexponeringen och antalet deltagare som upplever sig störda. Y axeln beskriver i båda graferna proportionen störda i procent. Till vänster beskriver X-axeln LA_{eq} för 15 minuter i fyra aggregerade kategorier. Till höger beskrivs exponering enligt kommersiella exponeringsmodeller.

7.1.9. Prediktion av störning från vindkraftverk

För att utvärdera möjligheten att förutsäga störningsupplevelsen från vinkraftsbuller gjordes två linjära hierarkiska regressionsanalyser (stepwise). En regression för att utifrån variabler som är kända vid etablering av vindkraftverk predicera antalet störda. Den andra regressionsanalysen utfördes på samtliga variabler som ingick i frågeformuläret som tidigare forskning visat vara relevant för störningsupplevelsen. Båda regressionerna använde ett medelvärde av parametrarna från de 20 imputerade datamатriserna.

1. PREDIKTION MED VID ETABLERING KÄNDA PARAMETRAR

Fyra variabler bedömdes vara kända vid etablering av en vindkraftpark. Underlaget för modelleringsmodellen med terräng, ålder, kön samt om vindkraftverket upplevdes var synligt från bostaden. Den hierarkiska regressionsanalysen utfördes genom att i block 1 predicera bullerstörning från modelleringsmodellen med terräng, i block två lades: ålder, kön och om vindkraftverket upplevdes vara synligt från bostaden (stepwise). Resultatet visade att de variabler som bidrog till en statistiskt signifikant modell var modelleringsmodellen med terräng, kön och ålder. Tillsammans svarade de för 17,3 procent (R^2), 14,3 (adjusted R^2) av variationen ($F_{3,82}=5,72$, $p=0,001$). Värt att notera är att terrängmodellen predicerar ljudnivån momentant under tiden som deltagaren fyller i enkäten och ett samband med bullerstörning indikerar att deltagarens svar till viss del påverkas av hur mycket buller som för tillfället finns i omgivningen. En sammanlagd förklarad varians på 17,3 procent är dock lågt och gör det svårt att förutsäga störning utifrån de variabler som används i modellen. I modell tre där variabeln ålder lades till var inte terrängmodellen längre statistiskt signifikant bidragande.

Tabell 7.3. Resultat för hierarkisk regressionsanalys gentemot bullerstörning utifrån ljudutbredning, kön och ålder.

Steg	Variabel	Ostandardiserade		Standardiserade	p	F	R ²
		koefficienter		koefficienter			
		B	SE	β			
1	Intercept	0,429	0,223		0,054	5,96	0,07
	Terrängmodellen	0,028	0,011	0,257	0,015*		
2	Intercept	1,488	0,477		0,002*	6,20	0,13
	Terrängmodellen	0,023	0,011	0,21245	0,041*		
	Kön	-0,660	0,265	-0,25865	0,013*		
3	Intercept	2,995	0,875		0,001*	4,16	0,17
	Terrängmodellen	0,020	0,011	0,1906	0,063		
	Kön	-0,735	0,263	-0,28785	0,005*		
	Ålder	-0,024	0,012	-0,2075	0,041*		

B = ostandardiserad regressionkoefficient, SE = standardfelet, β = standardiserad regressionskoefficient, p = statistisk signifikansnivå, F = F-värdet, R² = förklarad varians, * = statistiskt signifikant

2. PREDIKTION MED SAMTLIGA VARIABLER

Nästa regressionsmodell var en fortsättning på de kända variablerna i ovanstående analys. Tillägg till denna modell gjordes i ett fjärde analyssteg (stepwise). De variabler som lades till i analyssteget var: störning från blinkande ljus, störning från skuggspel, VKV upplevda påverkat närområdet, VKV påverkan på person, upplevelse av lågfrekvent buller, upplevd ljudnivå, VKV upplevda påverkan på landskap, orolighet för säkerhet, störning av samtal (skala), allmän ljudkaraktär, attityd till vindkraft som hållbart energialternativ, VKV synligt utomhus vid bostad, störd avkoppling (skala), VKV synligt 1 km från bostad, utbildningsnivå, VKV synligt inifrån bostad, ljudkänslighet (skala), negativt känsloläge (skala), upplevda vibrationer från VKV samt generell attityd till VKP.

Resultatet av analysen visade att de faktorer som förklarar den största delen av variationen förutom de tre faktorerna kända faktorerna (terrängmodellen, kön och ålder) var ytterligare tre variabler: upplevelser av lågfrekvent ljud, ljudkänslighet samt störd avkoppling. Tillsammans förklarade dessa variabler i genomsnitt 95.4 procent (R^2), 95,0 procent (adjusted R^2), av variationen ($F_{6,79}=272,8$, $p<0,001$). I den slutgiltiga modellen (steg 6) var fyra koefficienter statistisk signifikanta, det vill säga tolkningsbara som prediktorer till störningsupplevelsen. Dessa koefficienter var: kön, upplevelse av lågfrekvent buller, ljudkänslighet samt störd avkoppling. I rangordning är tolkningen av dessa att: upplevelse av lågfrekvent buller ökar störningsupplevelse med 0,836 per steg, störd avkoppling ökar störningsupplevelsen med 0,082 per steg, ljudkänslighet ökar bullerstörningen med 0,067 per steg och att vara man ökar bullerstörningen med 0,062 jämfört med att vara kvinna. Eftersom intercept-koefficienten inte var statistiskt signifikant skrivs inte regressionskvationen ut, i och med att denna blir svårtolkad.

Tabell 7.4. Resultat för hierarkisk regressionsanalys gentemot bullerstörning med variablerna ljudutbredning, kön, ålder och i steg två tillagda: upplevd störning från lågfrekvent ljud, ljudkänslighet samt störning av avkoppling.

Steg	Variabel	Ostandardiserade		Standardiserade			
		koefficienter		koefficienter	p	F	R ²
		B	SE	B			
4	Intercept	0,356	0,242		0,145	343,0	,944
	Terrängmodellen	0,001	0,875	0,257	0,015*		
	Kön	-0,171	0,071	-0,067	0,019*		
	Ålder	-0,002	0,003	-0,015	0,573		
	Uppl. lågfrekvent buller	0,928	0,028	0,949	<,001*		
5	Intercept	0,141	0,242		0,562	302,8	,950
	Terrängmodellen	0,000	0,003	0,003	0,901		
	Kön	-0,166	0,068	-0,065	0,017*		
	Ålder	-0,003	0,003	-0,023	0,382		
	Uppl. lågfrekvent buller	0,920	0,027	0,941	<0,001*		
	Ljudkänslighet	0,097	0,033	0,075	0,004*		
6	Intercept	0,190	0,234		0,419	272,8	,954
	Terrängmodellen	0,0001	0,003	0,001	0,940		
	Kön	-0,159	0,065	-0,062	0,018*		
	Ålder	-0,003	0,003	-0,022	0,383		
	Uppl. lågfrekvent buller	0,836	0,041	0,855	<0,001*		
	Ljudkänslighet	0,087	0,032	0,067	0,008*		
	Störd vid avkoppling	0,082	0,031	0,109	0,010*		

B = ostandardiserad regressionkoefficient, SE = standardfelet, β = standardiserad regressionskoefficient, p = statistisk signifikansnivå, F = F-värdet, R² = förklarad varians, * = statistiskt signifikant

3. SAMMANFATTNING FRÅGEFORMULÄR

Resultatet indikerar att gränsvärdet på 40 L_{Aeq} innebär att det kommer finnas boende som upplever störning. Cirka 15 procent enligt kommersiella exponeringsmodeller. De ljudutbredningsmodeller som användes predicerade bullerstörning, och terrängmodellen var en bättre prediktor än planmarksmodellen. Bullerstörning från vindkraftverk påverkas av flera faktorer än enbart bullerexponering och att psykologiska faktorer är de som i denna studie förklarar största delen av variationen i bullerstörning. Även i planeringsskedet finns det finns demografiska variabler med prediktiv förmåga, kön och ålder, som inför byggnation av vindkraft skulle kunna användas för att förbättra bedömningen av bullerstörning. En begränsning i resultatet är att analyserna endast baserar sig på ett mindre antal deltagare samt att endast vissa koefficienter är signifikanta. Därmed behöver resultatet kontrolleras mot större datamaterial.

7.2. Dagboksundersökning

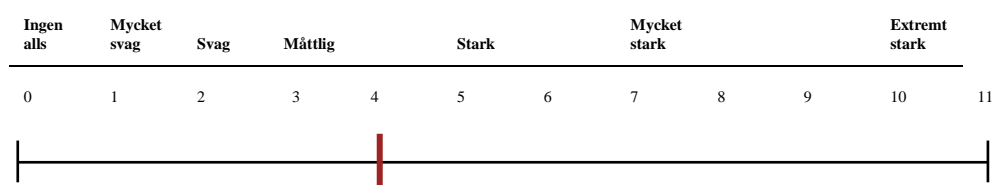
7.2.1. Urval

Urvalet till dagboksundersökningen var boende runt vindkraftparkerna: Karsholm, Jädraås och Malå. Under projektet framkom det att driftdata från Karsholm inte skulle vara tillgänglig för kontinuerlig modellering av ljudkällan. Detta medförde att inbjudan till deltagande i dagboksundersökningen endast gick ut till boende runt Jädraås och Malå. Totalt skickades inbjudan ut till 69 personer. Av dessa svarade fem personer att de var intresserade av att delta i dagboksundersökningen. Av dessa valde i slutändan två deltagare att skicka in sina svar.

7.2.2. Dagbok och frågor

I projektet utvecklades dagboken i två format. Ett elektroniskt format där deltagarna via en mobiltelefonapp kunde skicka in sina svar, och analogt format en dagbok i pappersformat där deltagarna skickade tillbaka sina svar via ett förfrankerat returkuvert. För båda deltagarna valdes det analoga formatet.

Frågorna i dagboken var uppdelade i två utfallsvariabler. Den första variabeln undersökte momentan bullerstörning. Deltagaren var instruerad att 2–5 gånger per dag skatta sin störningsupplevelse på grund av ljuden från de närliggande vindkraftverken. Skalan som användes var 11-gradig [1 till 11], baserad på Borg CR10 skalan. Till skillnad från vanliga skalor är de verbala ankaren till siffrorna inte jämt distribuerade utan baseras på den mänskliga upplevelsen av styrkan på ett stimuli (Borg, 2006). Skattningen gjordes på en kontinuerlig skala genom att deltagaren drog ett streck på skalan som motsvarande upplevelsen av bullerstörning (se figur 7.3).



Figur 7.3. Skattningsskalan för störning av ljud från vindkraftverk.

Deltagarna instruerades att genomföra skattningen på en öppen plats 50 meter från bostaden i riktning mot vindkraftparken. Exponeringen bestämdes sedan efter GPS koordinaten på boningshuset på fastigheten, samt det datum och tid som deltagaren angav för skattningen. Ljudexponeringen beräknades som ett medelvärde för de senaste 15 minuterna innan skattningen utifrån terrängmodellen.

Utöver störningsupplevelsen undersöktes även deltagarnas sömnkvalitet. Denna del av dagboken innehåller frågor om hur mycket sömn deltagaren behövde för att känna sig utvilad, om deltagaren var en utpräglad morgon- eller kvällsmänniska, hur mycket deltagaren sovit natten innan skattningen, samt ett skattningsformulär med sex vanliga sömnstörningsproblem. Förutom de två första frågorna skattades

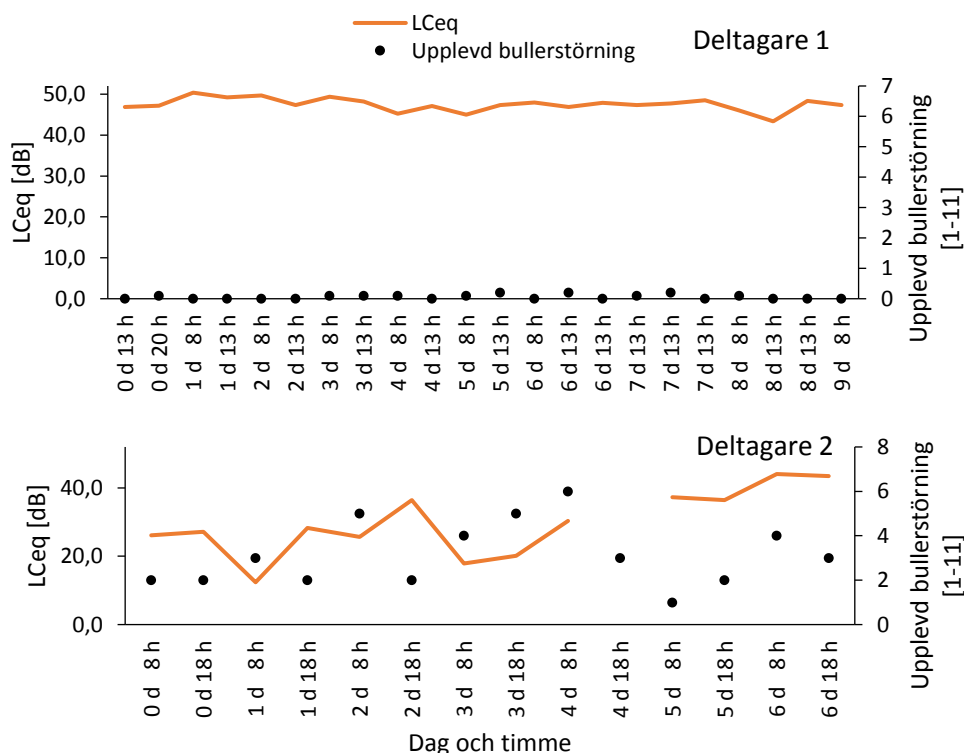
samtliga i relation till föregående natts sömn på en femgradig skala: 1. Inte alls - 5. Väldigt mycket. Ljudexponeringen beräknades som ett under natten innan skattningen och sömnlängden enligt terrängmodellen.

7.2.3. Resultat

Det mycket låga antalet deltagare i dagboksundersökningen (n=2) medför att det inte går det att utifrån resultatet göra djupgående analyser. Nedan presenteras resultatet därför deskriptiv och exemplifierande kring hur analyser av större datamängder skulle kan analyseras för att undersöka kontinuerligt buller- och sömnstörning från vindkraftverk.

1. BULLERSTÖRNING

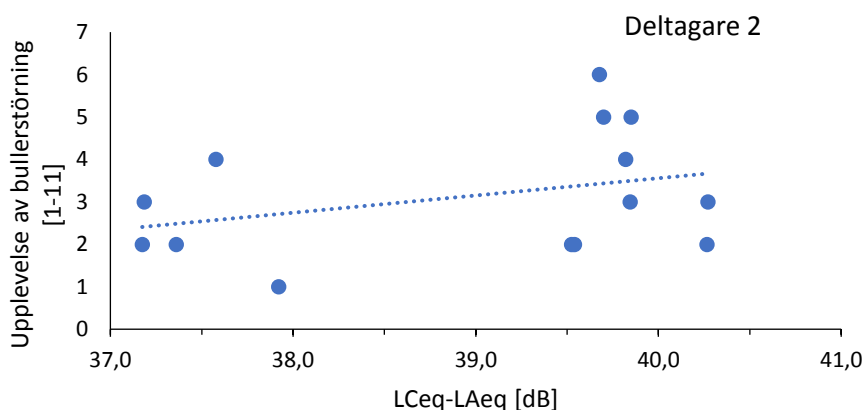
De två deltagarnas upplevelse av störning från vindkraftljud var mycket olika. Den första deltagaren upplevde mycket låg nivå av störning, medan den andra deltagaren hade en högre nivå av upplevd störning, men även större variationer över tid (se figur 7.4). För den första deltagaren var den genomsnittliga skattningen sett utifrån de verbala ankaren i skattningsskalan, ingen upplevelse av störning, medan den genomsnittliga skattningen för den andra deltagaren var, måttlig störning. Den genomsnittliga exponeringen var dock högre för den första deltagaren för både LAeq (differens = 18,3 dB) och LCeq (differens = 15,0 dB).



Figur 7.4. Ljudexponering [LCeq]. På X-axel beskrivs skattningstidpunkt i dagar och timmar från skattningens början. På den vänstra Y-axeln beskrivs exponeringen i LCeq och på den högra Y-axeln beskrivs den nivån av störningsupplevelsen. Den heldragna linjen beskriver exponeringen och punkterna beskriver skattningen av bullerstörning.

Tidsserier och analyser av dessa data från intensiva störningsskattningar är framför allt användbart för att undersöka generella trender sett över tid (Brockwell, Davis, & Calder, 2002). Tidsserieanalyser kan undersöka generella trender kopplade till tidpunkt på dagen eller veckodag, samt om bulleråtgärder förändrat den generella störningsnivån. För att undersöka boendes upplevelser av bullerstörning och hur dessa kan förklaras av bakomliggande variabler kan exponerings och störnings fokuserade analyser ge tydligare resultat

För denna typ av analyser jämförs exponeringsnivåer av vindkraftljud med individens skattningar av bullerstörning utan tidsdomän. Genom jämförelse mellan exponering och störning kan individens känslighet för ljudexponeringen modelleras. Resultatet från modellen kan sedan användas för att tillsammans med modellresultat från hos andra boende runt vindkraftparken för att predicera vilka faktorer som är viktiga för bullerstörning för boende runt vindkraftparken. För att modellera individens störning kan valfri kurvlinjär modell anpassas till individens data, vanligast är dock linjära modeller ($y=b_0+b_1x$). En individs störningsdata som modelleras utifrån en linjär modell ger två mått på individens störningsupplevelse. Den linjära modellens skärningen med y-axeln [b_0] indikerar individens störningsupplevelse utan exponering från vindkraftbuller och lutningen på linjen [b_1] indikerar förändringen i individens störningsupplevelse beroende förändringar i ljudtryck. Koefficienterna (b_0 , b_1) som indikerar individens störningsupplevelse kan därefter användas som prediktorer i modeller som jämför fler boende runt vindkraftparken. Exempel på sådana modeller är regressionsmodellerna som användes vid analysen av frågeformulären. Nedan visas ett diagram med den andra deltagarens bullerexponering och upplevelse av bullerstörning. Deltagare 1 störning innehöll för lite variation för att genomföra analysen. Den streckade linjen är enligt ovan beskriven linjär modellering av störningsupplevelsen (se figur 7.5). Exponeringsvärdet i figuren är $L_{Ceq}-L_{Aeq}$ [LC-LA], ett mått som indikerar mängden lågfrekvensinnehåll i ljudet (Nilsson, 2007).

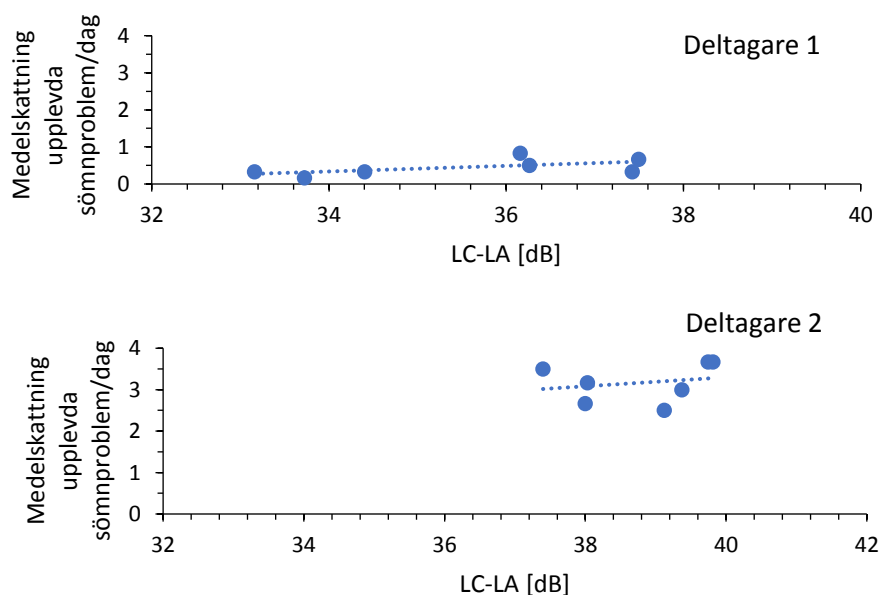


Figur 7.5. Exempel på individuell skalning av exponeringsupplevelse. X-axeln beskriver skillnaden mellan L_{Ceq} och L_{Aeq} , vilket indikerar lågfrekvensinnehållet i ljudet. Y-axeln beskriver skattningen av bullerstörning. Den streckade linjen beskriver anpassningen av en linjär modell till data.

Den linjära modelleringen i Figur 7.5 ger att individens grundstörningsnivå utan exponering för vindkraftsbuller är -12,7 (störning utan vindkraftsbuller) och att individen för varje dB ökning i LC-LA ökar sin störning med 0,41 (förändring i upplevelse vid förändring i exponering).

2. SÖMNSTÖRNING

Vid jämförelse mellan de två deltagarnas sömnstörning fanns även där vissa skillnader. Den första deltagaren upplevde generellt mindre sömnstörning än den andra deltagaren. Även för sömnstörning kan en linjär modell anpassas för att beskriva individens generella sömnstörning och hur sömnstörningen påverkas av ökad exponering för ljud. I nedanstående figur (7.6) är ökningen av sömnstörning på grund av ökad exponering [LC-LA] samma, 0,1 per ökad decibel. Däremot är grundnivån av sömnstörning för den första deltagaren -2,24 och för den andra deltagaren -1,03.



Figur 7.6. Exempel på beskrivning av sambandet mellan ljudexponering och sömnstörning. X-axeln beskriver skillnaden mellan LC-LA [dB] och Y-axeln beskriver genomsnittliga skattningen för sömnproblemen per dag.

3. SAMMANFATTNING DAGBOK

Användningen av intensiva standardiserade störningsmätningar kan med fördel användas som utfallsmått vid utvärdering av vindkraftsstörning när ljudexponeringsdata håller samma eller högre tidsupplösning. Kontinuerliga standardiserade skattningar kan vid jämförelse med exponeringsvärden från utbredningsberäkningar ge en bild av individers momentana störning av vindkraftsljud och hur störningen varierar beroende på ljudtryck. Modellering av detta kan sedan användas för att ge bra estimat för jämförelser mellan individer. Viljan att delta i dagboksundersökningen var betydligt lägre än förväntat. Detta kan bero på flera anledningar. Informationen till boende kan ha varit dåligt anpassad till

de boendes behov, ersättningen (700 SEK) kan ha varit för låg, och de längre mätperioderna kan upplevts som en för stor ansträngning för de boende. Att mindre än tre procent av de personer som blev inbjudna att delta i undersökningen visar på att det sannolikt behövs flera åtgärder för öka deltagandet tillräckligt mycket för att resultaten skall bli generaliserbart.

7.3. Sammanfattning validering

- Störning upplevs på lägre nivåer än 35 dB och det är därmed viktigt att tydligt kommunicera detta till boende vid etablering av vindkraftparker.
- Modellering av terräng ger en förbättrad exponeringsbestämning jämfört med modeller som utan hänsyn till terräng
- Flera faktorer förutom bullerexponering påverkar bullerstörningen vilka de flesta inte är tillgängliga vid planering av vindkraftparker. De variabler som har en prediktiv förmåga och är tillgängliga vid planering av parker är ålder och kön på boende i området.
- Standardiserade mätningar av momentan störning kan användas för att analysera effekter av momentan bullerexponering beräknad med utbredningsmodeller.
- Informationen från momentan bullerstörning kan användas för att modellera individens upplevelse inför jämförelser mellan flera boende runt vindkraftverken.

Referenslista

- Bakdash, J. Z., & Marusich, L. R. (2017). Repeated measures correlation. *Frontiers in psychology*, 8, 456.
- Bolin K., Boué M., & Karasalo I, (2009) Long range sound propagation over a sea surface, *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 2191–2197.
- Bolin, K., Almgren, M., Ohlsson, E., & Karasalo, I. (2014). “Long term estimations of low frequency noise levels over water from an off-shore wind farm,” *J. Acoust. Soc. Am.* 135, 1106–1114.
- Borg, E., & Kaijser, L. (2006). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 16(1), 57-69.
- Brockwell, P. J., Davis, R. A., & Calder, M. V. (2002). *Introduction to time series and forecasting* (Vol. 2). New York: springer.
- Delany M. E. & Bazley E. N (1970). Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoust.* 3, 105–116.
- Demidenko, E. (2007). Sample size determination for logistic regression revisited. *Statistics in Medicine*, 26(18), 3385–3397. <https://doi.org/10.1002/sim.2771>.
- Dong, Y., & Peng, C.-Y. J. (2013). Principled missing data methods for researchers. *SpringerPlus*, 2. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-222>.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>.
- Eriksson, C. (2013). Ljudimmissionsberäkning av ljud från vindkraftverk (No. 584685) (p. 8). ÅF.
- Fredriksson J, 586317 Rapport A/B/C Emissionsmätning Jädraås vkv 44/45/50 131128, ÅF-Infrastrnicture AB, 2014-03-26.
- Fredriksson, J. och Appelqvist P., 584685 Rapport A Emissionsmätning Karsholm vkv 1 130917, ÅF-Infrastrnicture AB, 2013-09-17.
- Fredriksson, J. och Appelqvist P., 584685 Rapport 8 Emissionsmätning Karsholm vkv 5 130917, ÅF-Infrastrnicture AB, 2013-09-17.

G*Power. (2014). (Version 3.1.9.2). Universität Kiel.

Gilbert K. E. (2015) "A numerically stable formulation of the Green's function parabolic equation: Subtracting the surface-wave pole." *J Acoust Soc Am.* 137,EL8-14.

Gilbert, K. E., and Di, X. (1993). "A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere," *J. Acoust. Soc. Am.* 94, p. 2343–2352.

Hansson, H. (2013). *Miljökonsekvensbeskrivning Jädraås vindkraftpark (bilaga 3)*. Ownpower Projects AB.

Hendry, G. M., Naidoo, R. N., Zewotir, T., North, D., & Mentz, G. (2014). Model development including interactions with multiple imputed data. *BMC Medical Research Methodology*, 14. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-14-136>.

IBM SPSS Statistics. (2016). (Version 24). Armonk, NY: IBM.

IEC 61400-11:2012 Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques.

ISO, Acoustics-Assessment of noise annoyance by means of social and socioacoustic surveys. ISO/TS 15666:2003(E), 2003, ISO: Geneva, Switzerland.

Folkhälsomyndigheten, 2017. *Miljöhälsorapport 2017*.
<https://www.folkhalsomyndigheten.se/publicerat-material>.

Kang, H. (2013). The prevention and handling of the missing data. *Korean Journal of Anesthesiology*, 64(5), 402–406. <https://doi.org/10.4097/kjae.2013.64.5.402>

King, P. (2008). *Assessment of the Acoustic Impact of the Proposed Ytterberg Wind Farm* (No. 01906-00349). RES-group.

Larsson, C., & Öhlund, O. (2014). Amplitude modulation of sound from wind turbines under various meteorological conditions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 135. <https://doi.org/10.1121/1.4836135>.

Lee, K. J., & Carlin, J. B. (2010). Multiple imputation for missing data: fully conditional specification versus multivariate normal imputation. *American Journal of Epidemiology*, 171(5), 624–632. <https://doi.org/10.1093/aje/kwp425>.

Lundmark, G. (2011). Measurement of swish noise, a new method. Forth International Meeting of Wind Turbine Noise, INCE/Europe, Rome, Italy.

Michaud, D. S., Keith, S. E., Feder, K., Voicescu, S. A., Marro, L., Than, J., van den Berg, F. (2016). Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3), 1455–1466. <https://doi.org/10.1121/1.4942390>.

Nilsson, M. E. (2007). A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound. *Journal of Sound and Vibration*, 302(1-2), 197-207.

Parakkal, S and Gilbert, K. E. and Di, X. (2012), “Application of the Beilis and Tappert parabolic equation to long-range sound propagation over irregular terrain” *The Journal of the Acoustical Society of America*, **131**, p.1039-46.

Pedersen, E., & Waye, K. P. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose – response relationship. *J. Acoust. Soc. Am.*, 116, 3460 – 3470. <https://doi.org/10.1121/1.1815091>.

Salomons, E.M. (2002) *Computational Atmospheric Acoustics* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 335 pp.

Sames, P., & Goossens, M. (2015). *Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen. Umwelt und Geologie, Lärmschutz in Hessen, Heft 5.* ISBN 978-3-89026-576-6.

SFS (2009:400) 24 kap. 8 § Offentlighets- och sekretesslagen. Svensk författningssamling.

Sohlman M, Jonasson H & Gustafsson A, (2004), Using Satellite data for the determination of the acoustic impedance of ground, Report to the Swedish National Space Board 2004-12 by Metria, Sweden.

Wilkinson, L., & Task Force on Statistical Inference. (1999). Statistical methods in psychology journals: Guidelines and explanations. *American Psychologist*, 54(8), 594–604. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.54.8.594>.

Yoon, K., Gwak, D.Y., Seong, Y. et al. (2016). Effects of amplitude modulation on perception of wind turbine noise. *J Mech. Sci. Technol.*, 30, 4503 – 4509. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0918-7>.

Öhlund, O. & Larsson, C. (2015). Meteorological effects on wind turbine sound propagation. *Appl. Acoust.*, 89, 34 – 41. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.009>.