

Simulering av vindkraftljud med beräkningsmodellen Nord2000

Johanna Thorén

Referat

Simulering av vindkraftljud med beräkningsmodellen Nord2000

Johanna Thorén

Vindkraft är idag den snabbast växande energikällan i både Sverige och världen. Det planeras för utbyggnad på många olika platser och i framtiden kommer långt många fler människor än idag leva med vindkraftverk i sin närhet. Ljud från vindkraftverk är ofta det som oroar och stör närboende vid en etablering, och därför är det mycket viktigt att beräkningar av ljudnivåer är så korrekta som möjligt. Nord2000 är en nyutvecklad beräkningsmodell för samhällsbuller som omnämns i Naturvårdsverkets reviderade rapport om ljud från vindkraftverk. I den här studien ligger fokus på hur meteorologi och terräng påverkar ljudutbredningen då beräkningar görs med Nord2000-modellen samt hur väl resultaten stämmer överens med mätningar.

Resultatet visar att Nord2000 är lämplig för beräkningar av vindkraftljud under förutsättning att inte uppåtrefraktion av ljudstrålar i atmosfären råder. Parametrar som leder till uppåtrefraktion är exempelvis motvind och negativ temperaturgradient kombinerat med svag vind. Användaren av modellen måste ha en viss förståelse för meteorologi för att kunna tillgodogöra sig nyttan av alla parametrar som finns. I platt terräng ger beräkningar små variationer av ljudnivån beroende på väder. Mätningarna visar dock att det förekommer ganska stora väderberoende ljudnivåvariationer även i platt terräng. I kuperad terräng får meteorologin en större betydelse i beräkningarna, men modellen missar fortfarande de ljudtoppar som kan mätas upp. Idag finns inga riktlinjer från Naturvårdsverket om hur Nord2000 ska användas vid beräkningar vilket är nödvändigt i framtiden för att säkerställa att modellen används på ett enhetligt sätt. Om Nord2000 används vid olämpliga förhållanden finns en risk att förtroendet för modellen minskar.

Nyckelord: Vindkraft, buller, ljudutbredning, Nord2000

Institutionen för geovetenskaper, Luft-, vatten och landskapslära, Uppsala Universitet
Villavägen 16 SE-752 36 UPPSALA
ISSN 1401-5765

Abstract

Simulation of wind power sound calculated with the Nord2000 model

Johanna Thorén

Wind power of today is the fastest growing energy source both in Sweden and the world. Since there are plans for many new building sites many more people will in the future have windmills close to their housing. The fear of noise from windmills is a major concern during the planning of new objects; it is therefore vital that calculations of sound power levels are done correctly. Focus in this study is on how meteorology and terrain parameters effect sound propagation, when calculations are made with the Nord2000 model and also how well calculated and measured sound power levels correlate.

The result shows that Nord2000 is suitable for wind power sound calculations when there is no upward refraction of sound rays in the atmosphere. Upwind conditions and negative temperature gradient in combination with light wind speeds are two parameters resulting in upward reflexion. To be able to use Nord2000 correctly, the user needs some knowledge of meteorology. In flat terrain, calculations give only small variations in sound power levels due to weather changes. Measurements show however that there are rather big variations even in flat terrain. In complex terrain with height variations, meteorology has a greater impact on the calculated sound power levels. Yet the model does not calculate the sound peaks that can be measured.

Keywords: Wind power, noise, sound propagation, Nord2000

Department of Earth Sciences, Program for Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala University
Villavägen 16 SE-752 36 UPPSALA
ISSN 1401-5765

Populärvetenskaplig sammanfattning

Simulering av vindkraftljud med beräkningsmodellen Nord2000

Johanna Thorén

Vindkraft är den kommersiella energikälla jämte solenergi som är mest väderberoende, vilket gör att det inte är svårt att se kopplingen mellan meteorologi, ellära och maskinteknik. Men vädret och då framförallt vinden påverkar inte bara vindkraftsverkens produktion utan också ljudalstring och ljudutbredning. När man talar om vindkraftljud, är det ofta själva verkets ljudalstring det handlar om, något som tillverkarna har tagit fasta på och jobbat med att minska sen den tidiga generationens vindkraftverk. Det är framförallt det mekaniska ljudet som har byggts bort och kvarstår gör ett aerodynamiskt svischande ljud som uppstår då bladen skär genom luften och passerar tornet. Produktions- och ljudalstringskalkyler finns normalt att tillgå från tillverkarna för olika vindhastigheter. Ljudutbredningen däremot glöms ofta bort i sammanhanget och den ligger till grund för den här rapporten. I och med att det idag byggs vindkraft på så många platser och i nya typer av miljöer såsom exempelvis fjäll och skog får ljudutbredningen en mer betydande roll. Att bara räkna med att ljudutbredningen är avståndsberoende ger inte en korrekt bild av verkligheten och mer sofistikerade modeller krävs för att göra bra beräkningar.

Nord2000 är en ljudutbredningsmodell utvecklad sen den senare delen av nittioalet med stöd av det Nordiska Ministerrådet. Tanken med projektet var att skapa en gemensam utbredningsmodell för olika typer av samhällsbuller anpassad till nordiska förhållanden. Den är inte specifikt utvecklad för att beskriva vindkraftljud, men har förutsättningar att kunna göra det. Två stora skillnader med Nord2000-modellen jämfört med den av Naturvårdsverket utvecklade modell som används idag är att man kan beskriva såväl terräng som meteorologi på ett mer avancerat sätt. Ett inbyggt problem med modellen är att atmosfären inte är ett statiskt medium utan ständig i rörelse, vilket gör att en enda beräkning aldrig kan representera mer än ljudnivån just vid de aktuella förhållandena oavsett hur bra modellen är.

Den här rapporten har två olika frågeställningar, dels att titta på hur känslig modellen i sig är för olika parametrar, dels att titta på hur väl den verkar stämma överens med mätningar. Ett antal parametrar kontrolleras genom beräkningar med olika värden och förutsättningar, och utvärderas sedan för att ge en uppfattning om hur noga man behöver ange dem i framtida beräkningar. Jämförelsen mellan mätning och beräkning är baserad på en mätserie och ger inte ett fullständigt svar på hur bra modellen är, utan mer en indikation på vilka situationer den ger bättre eller sämre resultat för.

Resultatet av beräkningarna med Nord2000 visar att modellen är dålig på att hantera situationer med så kallad uppåtrefaktion. Det innebär ljudhastigheten avtar med höjden, vilket böjer av ljudstrålarna uppåt och skapar en skuggzon. I verkligheten innebär inte en skuggzon att det blir totalt tyst på en plats, exempelvis turbulens i atmosfären gör att den skarpa gräns som modellen räknar med suddas ut. Modellberäkningar kan leda till sänkta ljudnivåer med så mycket som 30 dB för enbart en liten förändring hos någon av de refractionsskapande parametrarna, t ex vindriktning eller temperaturgradient.

Jämförelsen mellan beräkningar med Nord2000 och uppmätta ljudnivåer, visar också på att modellen missar de ljudtoppar som uppstår i verkligheten. Modellen klarar inte heller av att

beskriva normala ljudvariationer då terrängen är låg eller platt. Med en mer kuperad terräng däremot får de meteorologiska parametrarna större betydelse och ger de förväntade variationerna i ljudnivåer som teorin och mätning indikerar, med undantag för att lokala ljudtoppar som inte uppstår.

I och med att Nord2000-modellen, till skillnad från dagens använda modell från Naturvårdsverket, kan ta med meteorologi och terräng i beräkningarna kan den ge en bättre bild av de variationer i ljudnivå vädret ger upphov till. Det borde kunna leda till att personer som är utsatta för vindkraftljud kan få en bättre förståelse för variationerna och kanske i större utsträckning acceptera att det låter mer vissa dagar. En annan möjlig användning av kunskapen kring väder och ljudutbredning är att man under vissa specifika meteorologiska förhållanden drar ner effekten på vindkraftverken för att de ska låta mindre.

En förutsättning för att Nord2000 ska kunna användas kommersiellt är att Naturvårdsverket ger klara riktlinjer om hur modellen ska användas vid beräkningar. Den har så många parametrar som exempelvis kan påverka refraktionen att en oerfaren användare riskerar att räkna fram felaktiga ljudnivåer, utan att reflektera över varför. Detta kan i förlängningen leda till att förtroendet för modellen sjunker.

Förord

Det här examensarbetet är gjort inom Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala Universitet och omfattar 30 högskolepoäng. Arbetet är utfört under vårterminen 2009 på WSP Akustik i Stockholm under uppsikt av handledare Lisa Granå. Ämnesgranskare från institutionen för geovetenskaper vid Uppsala Universitet har varit Conny Larsson.

Stort tack till alla trevliga kollegor på WSP Akustik för hjälp med akustiska frågor och trevliga luncher. Ett särskilt tack till Lisa och Conny för alla svar mina stora och små frågor.

Slutligen ett speciellt tack till Eja Pedersen från Högskolan i Halmstad och Jens Forssén från Chalmers för de mätdata som används för att jämföra beräkning och mätning.

Johanna Thorén

Stockholm, juni 2009

Innehållsförteckning

INLEDNING	1
1.1 BAKGRUND.....	1
1.1.1 Vindkraftsutvecklingen i världen och Sverige	1
1.1.2 Tillståndsprocess och regler i Sverige för vindkraftsutbyggnad	2
1.2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNING	3
2 METOD	4
2.1 LITTERATURSTUDIE	4
2.2 TESTPLAN.....	4
2.3 BERÄKNING OCH ANALYS AV RESULTAT	4
3 TEORI	5
3.1 LJUD.....	5
3.1.1 Ljudutbredning.....	6
3.1.2 A-vägning.....	6
3.1.3 Ljudemission från vindkraftverk.....	6
3.2 METEOROLOGIS INVERKAN PÅ LJUDUTBREDNING	7
3.2.1 Refraktion.....	8
3.2.2 Absorption.....	11
3.2.3 Atmosfärisk turbulens.....	12
3.3 TERRÄNGENS INVERKAN PÅ LJUDUTBREDNING	13
3.3.1 Markimpedans.....	13
3.3.2 Råhetsklass och råhetslängd.....	14
3.4 BERÄKNINGSMODELLER	14
3.4.1 Naturvårdsverkets modell.....	15
3.5 NORD2000 – FÖRDJUPNING OCH TEORI.....	15
3.5.1 Ekvationer	15
3.5.2 Fresnelzon.....	17
3.5.3 Refraktion i atmosfären.....	17
3.5.4 Inkoherens.....	18
3.6 TESTPLAN.....	18
3.6.1 Basfall	18
3.6.2 Terräng.....	18
3.6.3 Meteorologi.....	19
3.6.4 Konstanta värden	20
3.6.5 Ljuddata	20
3.6.6 Jämförelse med mätdata.....	20
4 RESULTAT OCH OBSERVATIONER AV NORD2000-BERÄKNINGAR	21
4.1 FREKVENSBEROENDE PÅVERKAN	21
4.2 METEOROLOGISKA PARAMETRAR.....	21
4.2.1 Vindriktning.....	21
4.2.2 Vindhastighet.....	23
4.2.3 Relativa fuktigheten.....	25
4.2.4 Temperatur.....	25
4.2.5 Temperaturgradient	25
4.2.6 Råhetslängd.....	27
4.2.7 Turbulens.....	28
4.3 TERRÄNG.....	28
4.3.1 Kulle.....	29
4.3.2 Sluttning	29
4.3.3 Platt terräng.....	30
4.3.4 Markimpedans.....	30

4.3.5	Skog.....	31
5	RESULTAT AV JÄMFÖRELSE MED ANDRA MODELLER OCH MÄTNING	33
5.1	NATURVÅRDSVERKETS BERÄKNINGSMODELL	33
5.2	NORD2000 JÄMFÖRT MED MÄTNINGAR	33
5.2.1	Analysering av mätdata.....	33
5.2.2	Jämförelse mellan Nord2000 och mätning.....	35
6	DISKUSSION	38
7	SLUTSATS.....	42
7.1	FRAMTIDA ARBETE.....	42
	LITTERATURFÖRTECKNING	43
	APPENDIX.....	I
A.	PARAMETRAR.....	I
B.	LJUDDATA VINDKRAFTVERK (SOUND POWER).....	II
C.	UNDERLAG TILL PARAMETRARNAS FREKVENSBEROENDE.....	IV

Ordlista	Förklaring
Ljudimmision	Det ljud som når en mottagare
Ljudemission	Det ljud som en källa sänder ut
Refraktion	Krökning (av ljudstrålar)
Temperaturinversion	Temperaturlöslagande med höjden
Adiabat	Det naturliga temperaturavtagandet med höjden pga. minskat lufttryck
Atmosfärisk skiktning	Vertikala temperaturvariationer i atmosfären
Ekvivalentnivå	Logaritmisk medelljudnivå under en viss tidsperiod
Low Level Jet	Luftströmning på låg höjd som orsakar cylindrisk ljudutbredning

Förkortning	Förklaring
MIUU	Meteorologiska Institutionen Uppsala Universitet
GWEC	Global Wind Energy Council
NV	Naturvårdsverket
JASA	Journal of the Acoustical Society of America
vkv	Vindkraftverk

Inledning

1.1 Bakgrund

Utvecklandet av nya beräkningsmetoder för ljudutbredning utomhus är idag en aktuell fråga, inte minst på grund av den pågående planeringen av en stor vindkraftsutbyggnad i Sverige och världen. Ljud från vindkraftverk är en relativt ny typ av samhällsbuller, som i och med den snabba nyetableringen av vindkraft berör fler och fler människor för varje år.

I Sverige används en av Naturvårdsverket utvecklad modell för beräkning av ljudimmission från vindkraftverk. Metoden finns beskriven i skriften *Ljud från vindkraftverk* med tillhörande beräkningsmallar för landbaserade aggregat på kort och långt avstånd, samt havsbaserade aggregat (Naturvårdsverket, 2001). I skriften påtalas att beräkningarna är lämpade för vindkraftverk placerade i platt terräng och att det inte är känt hur väl de stämmer i kuperad terräng. I en reviderad version av *Ljud från Vindkraftverk* utgiven i februari 2009 finns Nord2000-modellen omnämnd som en mer detaljerad beräkningsmodell vilken t ex kan användas i mer komplicerade terräng- och vindförhållanden (Naturvårdsverket, 2009).

År 1996 beslutade Nordiska Ministerrådet att man med stöd av den samlade kunskap inom ljudutbredning utomhus som uppnåtts de senaste 20 åren, skulle utveckla en ny beräkningsmetod. Projektet gick under namnet *Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000* och genomfördes under åren 1996-2001. Resultatet blev en gemensam utbredningsmodell för flera olika typer av samhällsbuller, anpassad till dagens datorkapacitet (DELTA, 2002). Under 2007-2009 genomförs en fortsättning på projektet med syftet att sprida modellen globalt, samt att visa hur den kan hjälpa till att öka produktionseffektiviteten vid vindkraftsetablering.

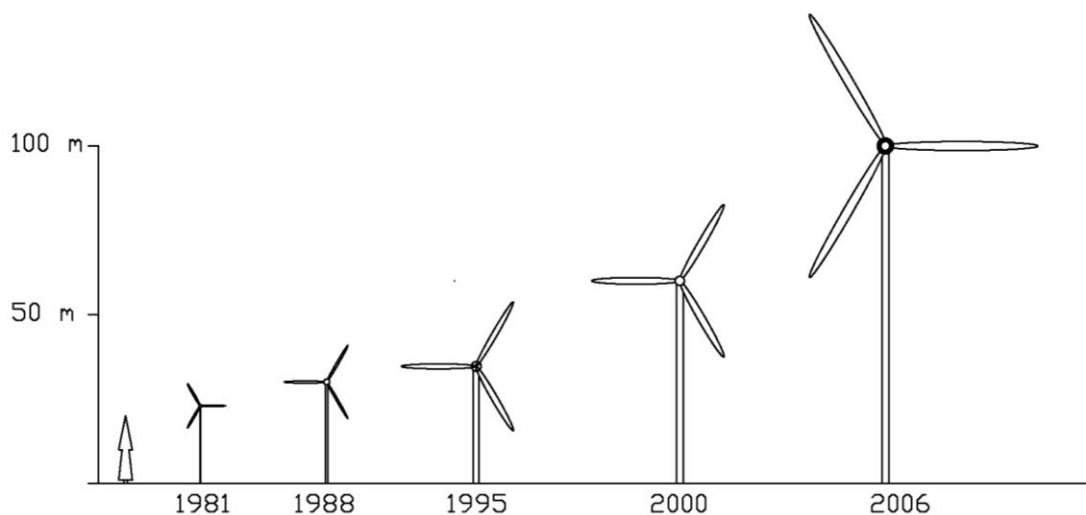
1.1.1 Vindkraftsutvecklingen i världen och Sverige

De senaste åren har en explosionsartad ökning av vindkraftsutbyggnad skett över stora delar av världen. *The Global Wind Energy Council* redovisade i sin årliga rapport att det totala installerade kapaciteten i världen ökade med 28,8 % under 2008. Det innebär att jorden idag har mer än 120,8 GW installerad effekt. I Sverige ökade den installerade effekten vindkraftel med 0,236 GW år 2008 vilket resulterade i en sammanlagd installerad effekt på 1,021 GW (GWEC, 2009). Riksdagens mål är att det år 2015 ska kunna produceras 10 TWh el från vindkraft om året i Sverige, att jämföras mot dagens ca 1,4 TWh (april 2008). Energimyndigheten har lämnat ett uppdaterat mål till regeringen som föreslår en utbyggnad till 30 TWh el från vindkraft år 2020 (Energimyndigheten, 2008).

Vindkraftens miljöpåverkan är en komplex fråga, då utbyggnad leder till mindre utsläpp växthusgaser på global nivå, men kan ge negativa effekter på lokal nivå. Det finns regionala och globala beslut kring utbyggnad, men det är ofta på lokal nivå som tillstånd ges, vilken gör att dessa effekter väger tungt i planering och tillståndsprocess. I *The European Wind Associations* rapport *Strategic Research Agenda 2008-2030* tar man upp ljudpåverkan som ett miljöpåverkande område i behov av mer forskning (EWEA, 2008). De skriver att forskning behövs inom beräkning, reducering och övervakning av ljudnivåer.

Nya modeller för vindberäkningar, främst MIUU-modellen (utvecklad av Meteorologiska Institutionen, Uppsala Universitet) har visat att Sveriges vindpotential är bättre än vad som tidigare uppskattats. Bland annat visar modellen att det blåser relativt mycket över stora delar av Sveriges skogar. Denna insikt i kombination med den snabba utvecklingen inom vindkraftteknik har lett till att många tidigare ej aktuella områden plötsligt ses som lämpliga för vindkraftutbyggnad. Den här utvecklingen innebär att långt många fler människor än idag kommer att leva med vindkraftverk i sin närmiljö i framtiden. I en undersökning om störningar från vindkraftverk konstateras att störningen från vindkraftljud ökar med ökade ljudnivåer (Pedersen, 2007). Även synligheten av vindkraftverken och bakgrundsljudnivåer spelar in i hur störda folk upplever sig att vara av vindkraftverken. Hur störande man upplever ljudet är i de flesta fall mycket individuellt.

Etablering av vindkraft i nya typer av terrängar såsom fjäll- eller skogsmiljöer har också blivit möjlig i och med vindkraftverkens storleksökning och tekniska utveckling. Kuperad terräng och skogsmiljö skapar mer turbulens i de nedre skikten av atmosfären, vilket normalt leder till en energiförlust i vinden vilken i vindkraftsammanhang kan kompenseras för genom att bygga högre torn. Tornhöjderna i dag ligger ofta på 80-100 meter, att jämföra med de tidiga kommersiella verken från 80-talet med tornhöjder på runt 20 meter (Fig. 1). En annan teknisk komponent som är under utveckling är generatorer lämpade för lägre vindhastigheter, vilket ytterligare skulle öka antalet platser aktuella för utbyggnad.



Figur 1 Storleksutvecklingen hos några typiska vindkraftverk. (Källa: föfattare)

1.1.2 Tillståndsprocess och regler i Sverige för vindkraftsutbyggnad

Vid projektering av vindkraftsutbyggnad är det första steget att hitta en plats med bra vindförutsättningar. Därefter inleds en förstudie innehållande momenten markupplåtelse, produktionskalkyl, ekonomisk kalkyl och miljökrav. En tillståndsansökan om bygglov måste lämnas in till kommunen och i de fall den sammanlagda installerade kapaciteten av en anläggning är större än 25 MW krävs även ett miljötillstånd från länsstyrelsen (Wizelius, 2007). Enligt ett

förslag från Miljöprocessutredningen (utgiven i oktober 2008) skall vindkrafttillstånd i framtiden endast prövas efter miljölagstiftningen och miljöbalken. Den parallella prövning som idag sker enligt plan- och bygglagen skall därmed slopas för att snabbare beslut om tillstånd ska kunna göras (Regeringen, 2008).

Vid såväl bygglov och som miljötillstånd är ljudfrågan en viktig del. Vid en tillståndsansökan måste ljudutbredningsberäkningar lämnas in och godkännas. Riktvärden för hur mycket ljud som får spridas från vindkraftverken kommer från Naturvårdsverkets *Extern industribuller – Allmänna råd (RR 1978:5)* Riktvärdet anger att ekvivalentnivån bör ligga på maximalt 40 dB(A) vid bostadshus och 35 dB(A) vid planlagd fritidsbebyggelse och områden för rörligt friluftsliv där naturupplevelsen är en viktig faktor. Ekvivalentnivåerna anges i vindkraftsammanhang för 10 minuter, vilket i praktiken innebär att de blir maximalnivåer. Noterbart är att riktvärdet för industribuller är satt för att man ska kunna sova med öppet fönster (ett fönster på glänt ska dämpa ljudet med 10 dB(A) vilket innebär att ljudnivån i sovrummet blir max 30 dB(A)). Vindkraften måste alltid hålla sig under den ljudnivån, då man räknar med att det är en konstant ljudkälla över dygnet. I praktiken leder det till av vindkraften till skillnad från annat industribuller bedöms efter dygnets hårdaste kriterier oavsett hur bakgrunds nivåerna ser ut. Riktvärdet på 40 dB(A) vid bostadshus motsvarar en ljudnivå anpassad till att kunna sova inomhus med öppet fönster.

Beräkningar av ljudnivåerna ska enligt rekommendation från Naturvårdsverket, Boverket och Energimyndigheten göras för vindhastigheten 8 m/s på 10 meters höjd i medvind, från källa mot mottagare. Enligt danska beräkningsmodeller från 80-talet ska dessa meteorologiska förhållanden ge ett mått på ett värsta scenario för vindkraftljud. Vid högre vindhastigheter anses naturliga maskeringseffekter som vind- och vegetationsbrus ha större inverkan på ljudnivåerna än vindkraftverken i sig.

1.2 Syfte och frågeställning

Syftet med den här rapporten är att titta på känsligheten hos olika parametrar i Nord2000-modellen för ljudutbredning då den appliceras på vindkraft. Tyngdpunkten ligger kring meteorologins och terrängens betydelse vid ljudutbredningen. Utöver detta ingår också en diskussion kring modellens begränsningar i nuläget samt hur väl den överensstämmer med verkligheten. Huvudsakliga frågor som ska besvaras är:

- Hur stor är känsligheten hos olika parametrar och med hur stor noggrannhet ska dessa behandlas vid beräkningar med Nord2000?
- För vilka parametrar kan standardvärden användas?
- Vilka parametervärden bör undvikas vid beräkningar?
- Hur väl stämmer beräkningar med Nord2000 överens med uppmätta ljudnivåer?
- Vilken inverkan har användandet av Nord2000 istället för Naturvårdsverkets befintliga modell vid planering av vindkraftsetableringar?

2 Metod

Arbetet är uppdelat i fyra huvuddelar bestående av en litteraturstudie, identifiering av parametrar och testplan, implementering av testplanen och beräkning samt slutligen analys och diskussion kring resultaten.

2.1 Litteraturstudie

I den inledande delen av arbetet behandlas befintlig litteratur rörande ljudutbredning utomhus samt avhandlingar och uppsatser rörande vindkraftsljud. Även rapporter om Nord2000-modellen och programmet exSound går igenom. Resultatet av litteraturstudien redovisas under teorikapitlet.

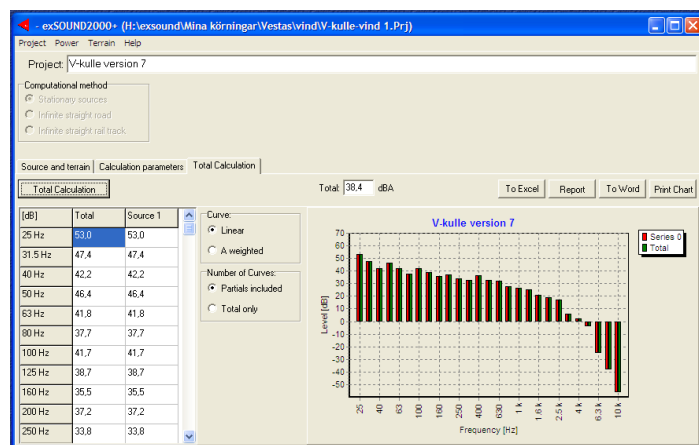
2.2 Testplan

Utarbetandet av en testplan inleds genom en identifiering av intressanta parametrar, samt en skiss över hur dessa kan kontrolleras på bästa sätt.

Under punkten ingår också insamling av data, som ska användas under kommande beräkningar. Data som samlas in är framförallt konstanta parametrar som ej varieras under körningarna, såsom exempelvis ljudemissionsdata från vindkraftsverkstillverkarna samt vissa meteorologiska värden.

2.3 Beräkning och analys av resultat

Den framtagna testplanen implementeras i programmet exSound (Fig. 2). Programvaran är en direkt applikation av Nord2000-modellen utvecklad av Delta Acoustics. Den utför punktberäkningar, och anger ljudnivån i dB för tersband. Dessutom anges en resulterande dB(A)-nivå, vilket är det värde som används i de flesta graferna i resultatdelen.



Figur 2 Exempel på hur miljön i ExSound ser ut. Resultat av beräkning

I ExSound görs också beräkningar med utgångspunkt från en specifik mätningsekvens, för att verifiera överensstämmandet mellan mätning och Nord2000-beräkningar.

Resultaten av beräkningarna presenteras i text och grafisk form parameter för parameter. En diskussion av resultaten genomförs med hjälp av teori och litteratur.

3 Teori

3.1 Ljud

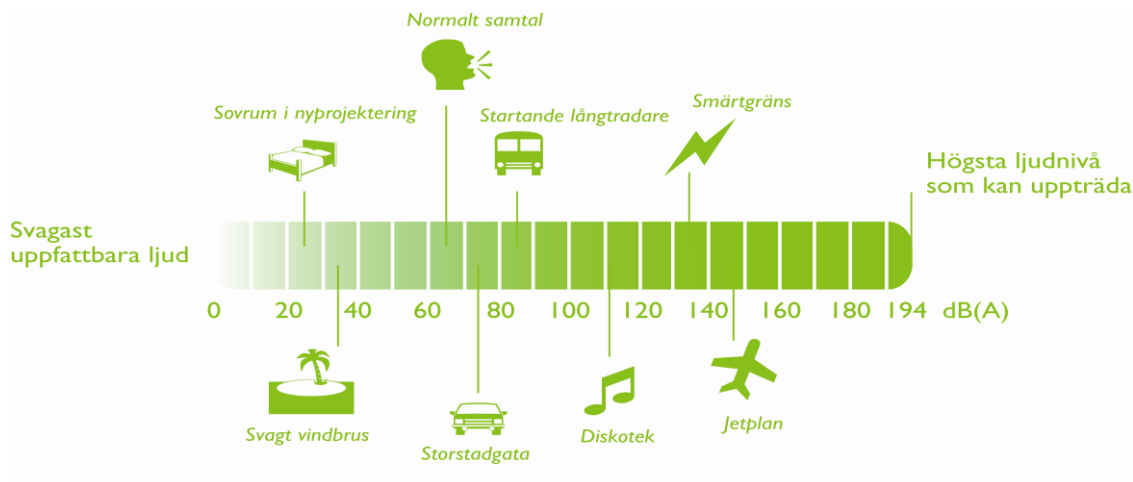
Tryck- och densitetsförändringarna i ett medium, såsom luft eller vatten, ger vid mätning ett mått på ljudtryck i enheten Pascal (Pa). Denna kan i sin tur översättas till ljudtrycksnivå enligt ekvation (1), vilken uttrycks i decibel (dB). Referenstrycket p_{ref} är ett mått på det lägsta ljudtryck människan kan uppfatta ljud på. Tabell 1 visar några exempel hur ljudtryck och ljudnivå kan uttryckas i språkliga termer.

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2} = 20 \log \frac{p}{p_{ref}} \quad (1)$$

$$p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

Tabell 1. Exempel på relationen mellan ljudtryck och ljudtrycksnivåer.

Ljudtryck, Pa	Ljudtrycksnivå, dB	Typiska ljud vid denna nivå
$2,0 \cdot 10^{-5}$	0	Ungefärlig hörselgräns
$1,1 \cdot 10^{-3}$	35	Maximalnivå vid rekreativ område av ljud från vindkraftverk ¹
$2,0 \cdot 10^{-3}$	40	Maximalnivå vid bostadshus av ljud från vindkraftverk ¹
$2,0 \cdot 10^{-2}$	60	Vanlig samtalston
$6,3 \cdot 10^1$	130	Smärtgräns



¹ Enligt Naturvårdsverkets rekommendationer.

3.1.1 Ljudutbredning

Den geometriska spridningen av ljud från en punktkälla, sker som vågfronter i alla riktningar. Den utsända effekten p ger på avståndet r ljudintensiteten I enligt ekvation (2).

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2)$$

I det teoretiska fallet då ljudkällan befinner sig i fritt fält kan ljudtrycket L_p beräknas enligt ekvation (3).

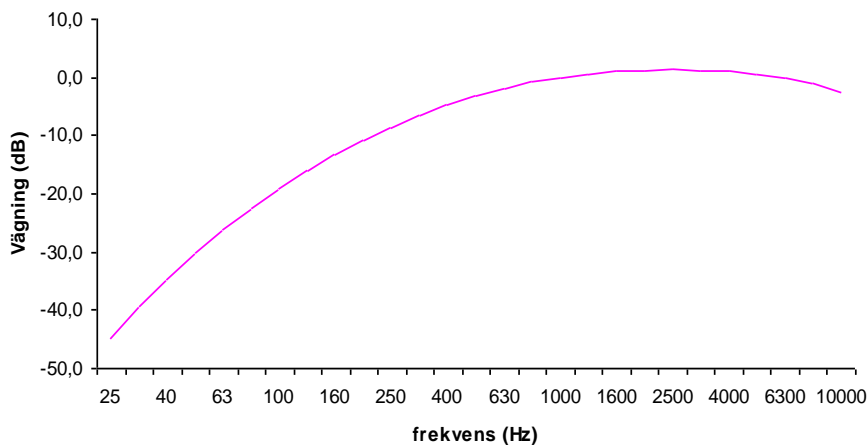
$$L_p = L_0 - 20 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) \quad (3)$$

L_0 = ljudtrycket på avståndet r_0

Från en punktkälla sker således ljudutbredningen sfäriskt och en avståndsfördubbling ger en minskning av ljudnivån på 6 decibel.

3.1.2 A-vägning

Det mänskliga örat har olika känslighet för olika frekvenser, vilket vid beräkning av ljudeffekt kompenseras för genom användandet av så kallade vägningsfilter. Det innebär i praktiken att den uppmätta ljudtrycksnivån justeras för varje frekvens. En justerad ljudtrycksnivå kallas *ljudnivå* (Bodén m fl., 1999). Det i vindkraftsammanhang aktuella vägningsfiltret benämns A-filter (Fig. 3). Den justerade ljudnivån anges i dB(A).



Figur 3 A-filter för vägning av ljudtrycksnivå.

3.1.3 Ljudemission från vindkraftverk

Vindkraftverk alstrar två olika typer av ljud, mekaniskt och aerodynamiskt. Det mekaniska ljudet har dock näst intill byggts bort de senaste åren, och kvarstår gör ett svischande ljud som uppstår då bladet skär genom luften samt då det passerar tornet. På moderna vindkraftverk har

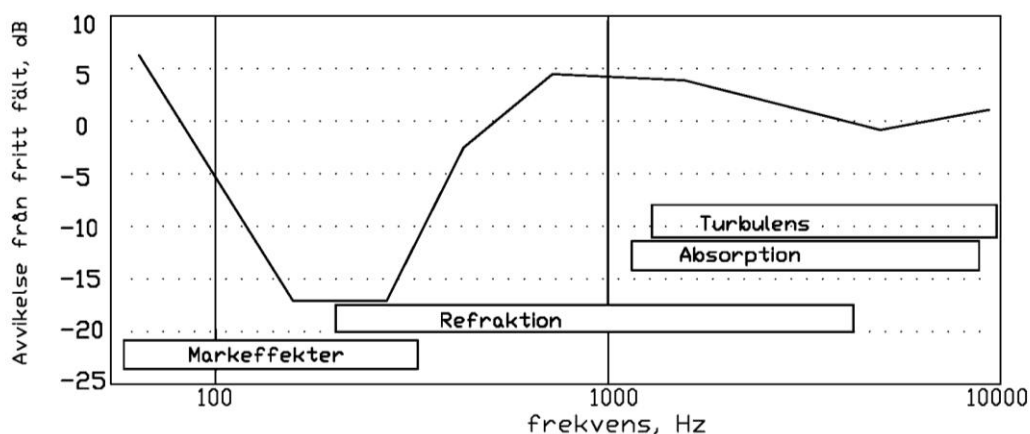
bladprofilen anpassats för att minska ljudemissionen, vilket gör att moderna verk generellt uppfattas som tystare än äldre verk trots att de nästan alltid är av en större modell. Rotorhastigheten spelar också roll i sammanhanget. Moderna verk har uteslutande variabelt varvtal vilket gör att det aerodynamiska ljudet ökar med vindens eget brus. Då vindkraftverken uppnått sin maxkapacitet vid cirka 12 m/s ökar de inte längre sin hastighet, varvid även ljudalstringen hålls på en konstant nivå. Vindens eget brus däremot fortsätter att öka med vindhastighet, vilken i praktiken gör att maskeringseffekterna ökar och vindkraftsverkets ljudemission får en mindre betydande roll.

Vindkraftverk alstrar ett bredbandigt ljud främst inom frekvensområdet 63-4000 Hz. Frekvensområdet kan jämföras med det som orsakas av vinden i vegetation av olika slag (Energimyndigheten, 2008). Det har uppkommit en viss debatt om huruvida den större typen av vindkraftverk ger ifrån sig lågfrekvent ljud. Det finns inte mycket studerat inom området men en rapport från Delta Acoustics konstaterar att vindkraftverken inte utsänder något infraljud (DELTA, 2008).

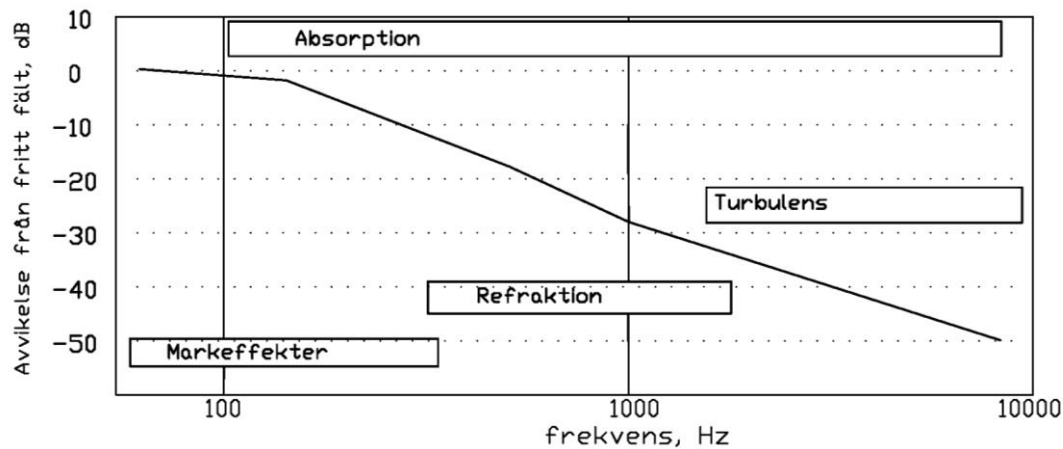
3.2 Meteorologins inverkan på ljudutbredning

I och med att ljud är förändringar av tryck och densitet i det medium det befinner sig i, blir ljudutbredning utomhus mer komplext än teorin indikerar. Utöver grundläggande teoretisk akustik måste även de meteorologiska förhållandena och terrängens inverkan tas med i beräkningarna.

De meteorologiska parametrar som inverkar på ljudutbredningen är refraktion (krökning av ljudstrålar), turbulens och absorption. Parametrarna påverkar ljudutbredningen olika mycket beroende av frekvens. En dämpningskurva för korta avstånd uppmätt med både ljudkälla och mottagare nära marken ses i Figur 4. Dämpningskurvan för långa avstånd är uppmätt då ljudkällan är på hög nivå, i form av ett flygplan och mottagaren nära marken (Fig. 5). Vilken av de två kurvorna som stämmer bäst överens med fallet vindkraft då ljudkällan befinner sig på en medelhög nivå (70-110 m) och mottagaren på medellångt avstånd (ca 500 m) är oklart.



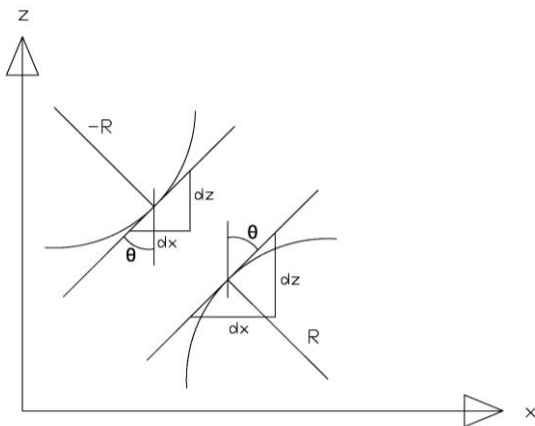
Figur 4 Dämpningskurva korta avstånd. Exempel på olika parametrars inverkan på ljudutbredningen beroende på frekvens över korta avstånd ($\approx 50 - 200$), då källa och mottagare båda är placerade någon meters höjd (Larsson, 2006).



Figur 5 Dämpningskurva långa avstånd. Exempel på olika parametrars inverkan på ljudutbredningen beroende av frekvens över långa avstånd, då källa är placerad högt (1-2 km) och mottagare finns på marknivå (Larsson, 2006).

3.2.1 Refraktion

Refraktion innebär att ljudstrålar kröks, i stället för att följa den linjära bana som den grundläggande akustiken anger. Positiv refraction är när krökningsradien R är positiv och ljudstrålarna viker av nedåt enligt Figur 6. Med en negativ krökningsradie R , viker ljudet av uppåt och negativ refraction uppstår. Hur stor refractionen blir beror av temperatur, vindhastighet, temperaturgradient och vindgradient. Dessa fyra parametrar är i och med detta de som bestämmer den resulterande ljudhastighetsprofilen.



Figur 6 Refraktion i teorin, illustration av definitionen av negativ och positiv krökningsradie, R (Larsson, 2006).

3.2.1.1 Temperatur

Lufttemperaturens inverkan på ljudutbredningshastigheten kan beskrivas genom följande formel för ljudhastighet c ;

$$c = 20,05(T)^{0,5} \quad (4)$$

Där c anges i m/s och T i Kelvin (K).

I ekvation (4) ges uttrycket med en konstant anpassad för att luft beter sig som en ideal gas. Analytiskt kan man av detta se att ljudhastigheten ökar med ökande temperatur. En grad Celsius skillnad motsvarar en ungefärlig ljudhastighetskillnad på 0,6 m/s.

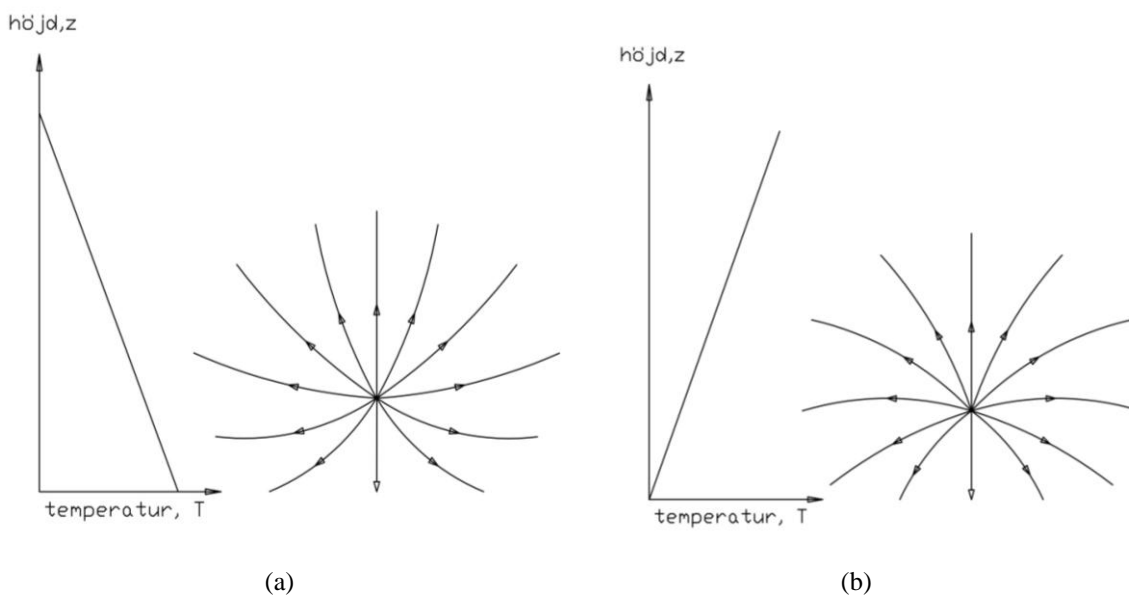
3.2.1.2 Vind

Motvind bromsar upp utbredningshastigheten, vilket gör att det är viktigt att ta hänsyn till från vilket håll och med vilken styrka det blåser vid ljudutbredningsberäkningar. Ett sätt att ta hänsyn till detta är att använda sig av effektiva ljudhastigheten c_{eff} vilket är en approximerad sammanvägning av ljudhastigheten c och vindhastigheten u (ekv.5).

$$c_{eff}(z) = c(z) + u(z) \quad (5)$$

3.2.1.3 Temperaturgradient

Temperaturens förändring med höjden, dvs. temperaturgradienten, är en direkt orsak till att refraction uppstår. En positiv eller negativ temperaturgradient påverkar ljudstrålarnas refraction och ger viktiga konsekvenser för hur långt ljudet sprids. Vid stabil skiktning får ljudstrålarna en nedåtkrökning vid positiv temperaturgradient (Fig. 7(b)), något som är vanligast nattetid. Motsatta förhållande med en uppåtkrökning av ljudstrålarna uppnås dagtid enligt Figur 7(a).



Figur 7 Refraktion hos en ljudstråle med inverkan från temperaturgradient. (a) negativ temperaturgradient vilket typiskt inträffar dagtid, (b) en positiv temperaturgradient (så kallad inversion) vilket vanligtvis inträffar nattetid (Larsson, 2006).

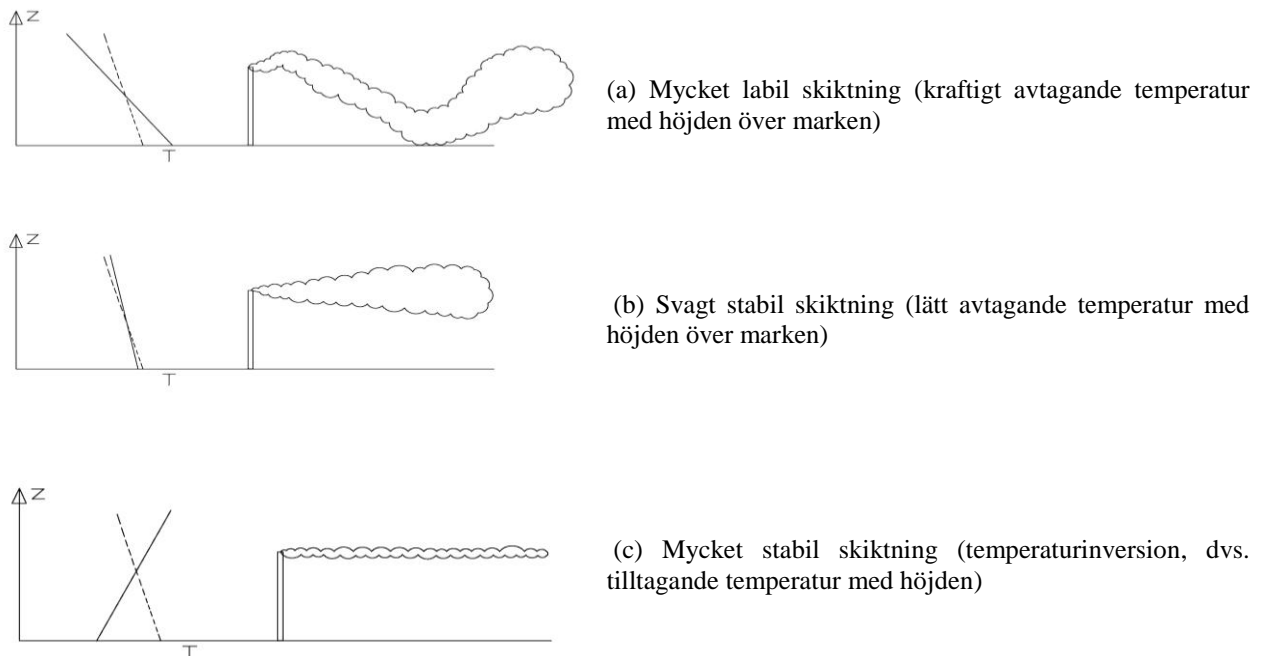
Krökningsradien kan beräknas genom följande ekvation:

$$R = \frac{2T}{\sin \theta \frac{dT}{dz}} \quad (6)$$

Där R anges i meter, $\frac{dT}{dz}$ är den vertikala temperaturgradienten och θ definieras enligt Figur 6.

Den naturliga temperaturvariationen med höjden, som enbart beror av tryck- och densitetsskillnader kallas adiabat, och ligger för torr luft på $-0,0098^{\circ}\text{C}/\text{m}$ och för fuktig luft på cirka $-0,006^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (Chen & Johansson, 2003). Då temperaturen avtar långsammare än de adiabatiska förhållandena eller om temperaturen ökar med höjden är atmosfären stabilt skiktad. Då temperaturen avtar snabbare med höjden än de adiabatiska förhållandena talar man om en instabil skiktning i atmosfären (Ackerman & Knox, 2003).

Temperaturgradienten är vanligen inte linjär utan logaritmisk. Det förekommer även att temperaturgradienten växlar mellan att vara positiv och negativ med höjden, speciellt kvällstid då avkylning av marken inträffar, samt på förmiddagen då marken börjar värmas upp igen (Larsson, 2006). Stabiliteten i det marknära skiktet beroende av temperaturgradienten kan illustreras med röken från en skorsten enligt Figur 8. Den heldragna linjen anger temperaturgradienten och den streckade linjen anger torradiabaten.



Figur 8 Stabiliteten i marknära skikt illustrerad som en rökplyms beteende (fritt efter Liljequist, 1985).

Vid en vindhastighet på 8 m/s, vilket ofta används för ljudberäkningar i vindkraftsammanhang är luften så pass omblandad att temperaturgradienten blir liten och därmed inte spelar en stor roll för resulterande ljudnivå. Det är vid lägre vindhastigheter som temperaturgradienten spelar in och påverkar refraktionen.

3.2.1.4 Vindgradient

Vindens förändring med höjden leder på motsvarande sätt som temperaturgradienten till refraktion. Vid motvind böjs ljudstrålarna av uppåt, och motsatt sker vid medvind. I ekvation (7) anges hur krökningsradien R beror av temperatur- och vindgradient (Larsson, 2006).

$$R = \frac{c_0 [1 + \frac{2u}{c_0} \sin \theta + (\frac{u}{c_0})^2]^{3/2}}{\frac{10}{T^{1/2}} \frac{dT}{dz} (\sin \theta - \frac{u}{c_0} \cos 2\theta) + \frac{du}{dz} (1 + \frac{u}{c_0} \sin^3 \theta)} \quad (7)$$

Där R anger Radien i meter, u är vindhastigheten i m/s, c_0 är ljudhastigheten i m/s, $\frac{du}{dz}$ är vindhastighetsprofilen, $\frac{dT}{dz}$ är temperaturgradienten och $\sin \theta$ definieras enligt Figur 6.

Inverterad ger R ett mått på krökningen, ekvation (8). (Observera att $\theta = 90^\circ \rightarrow \sin \theta = 1, \cos 2\theta = -1$)

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{10}{T^{1/2}} \frac{dT}{dz} (1 + \frac{u}{c_0}) + \frac{du}{dz} (1 + \frac{u}{c_0})}{c_0 [1 + \frac{2u}{c_0} + (\frac{u}{c_0})^2]^{3/2}} \quad (8)$$

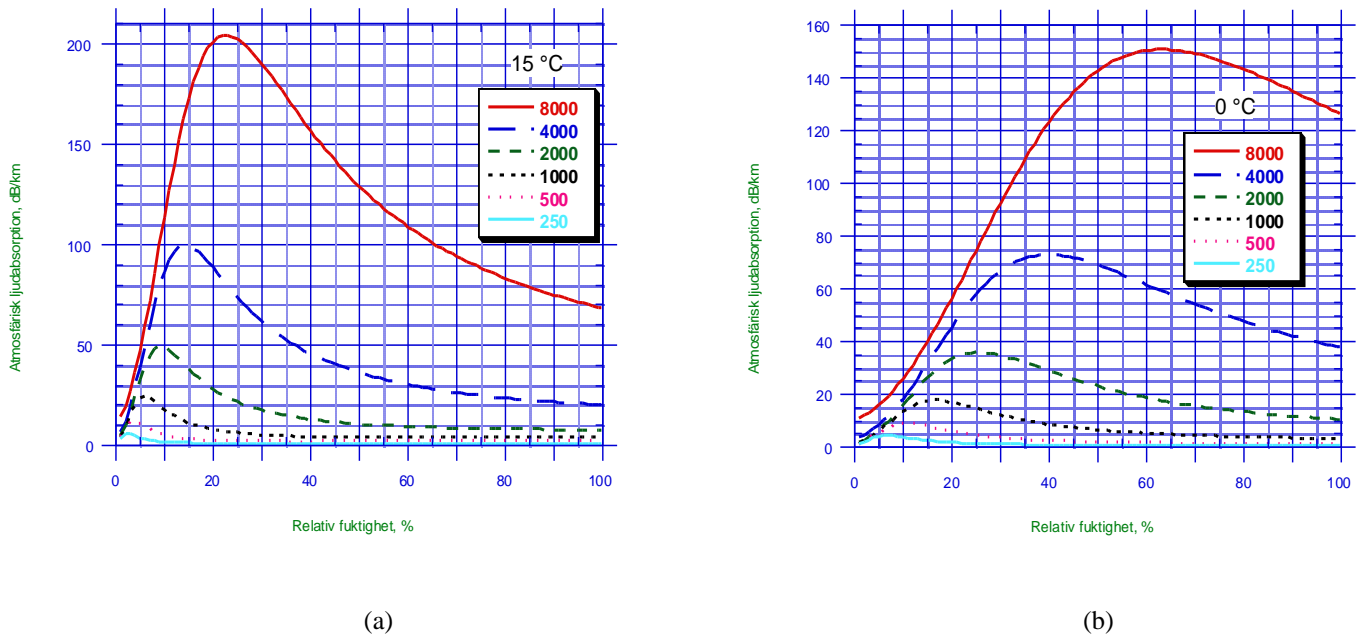
Både vind- och temperaturgradients brukar vid mätningar anges som medelvärden över 10 min.

Vindgradienten approximeras ofta med ett logaritmiskt beroende med höjden, med antagandet om neutral skiktning. Som startvärde för beräkningar av vindgradienten används vindhastigheten på en specifik höjd (t.ex. 10 meter) och markens råhetslängd. I de fall stabil skiktning råder (temperaturinversion) kan inte vindgradienten längre beskrivas på detta sätt. Enligt en studie utförd i Nederländerna (van der Berg, 2004) kan den verkliga vindhastigheten vid navet på ett vindkraftverk många gånger vara 2-3 gånger större än vad beräkningar med logaritmisk profil anger.

3.2.2 Absorption

I teorin för ljudhastighet antas att luft är en ideal gas. Det är inte fallet i verkligheten, bland annat förekommer det i atmosfären absorptionseffekter som varierar i betydelse beroende av frekvens, avstånd och relativ fuktighet. På korta avstånd (några meter) kan effekten ignoreras, medan den på längre avstånd uppåt några hundra meter får en relevant betydelse. Absorptionen minskar generellt med fuktigheten, undantagsvis för torr luft då den allra minsta absorptionen sker.

Internationella standardiserade beräkningar av absorptionen finns i ISO 9613-1. Dessa är utförda för 15° C och en relativ fuktighet på 70 %. Tillämpningen av den internationella standarden är utbredd och accepterad, dock visar mätningar gjorda i Sverige att den verkliga absorptionen kan se mycket annorlunda ut (Larsson, 2006). Ur Figur 9 kan exempelvis utläsas att absorptionen i lägre temperaturer resulterar i lägre dämpning, samt att kurvorna är förskjutna åt högre fuktighet för samtliga frekvenser.



Figur 9 (a) visar absorptionen enligt ISO 9613-1. (b) visar dämpningen vid en temperatur på 0° C (Larsson, 2006) . Publicerad med tillstånd från upphovsmannen.

3.2.3 Atmosfärisk turbulens

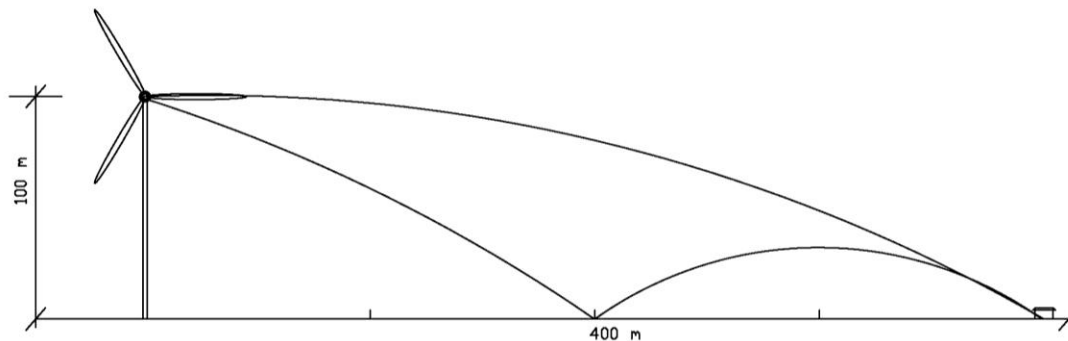
Turbulens i atmosfären ger upphov till fluktuationer av vind och temperatur. Som omnämnts tidigare i kapitlet anges vind- och temperaturgradienter som medelvärden (ofta över tio minuter), så för att ge en mer korrekt bild av gradienternas natur måste även den atmosfäriska turbulensen anges. Turbulens är en av de svåraste parametrarna att såväl mäta som förutspå, vilket leder till att lämpliga data för en specifik plats kan vara svåra att få tag på.

I de fall då uppåtrefraktion av ljudstrålarna sker och så kallade *skuggzoner* uppstår, spelar turbulensen en stor roll. Skuggzoner som i en atmosfär utan turbulens uppfattas som tysta, kan i turbulenta förhållanden få högre ljudnivåer (Salomons, 2001). Vid inverkan av turbulens begränsas teoretiskt dämpningen i en skuggzon till maximalt 20-25 dB (Crocker, 2007). Turbulens kan i vissa fall leda till lägre *ekvivalentnivåer*, men framför allt ses en ökning av antalet ljudtoppar med ökad turbulens. Detta kan göra ljudet lättare att uppfatta för mänskliga örat (Granå, 2009).

En normalvarm sommardag ligger strukturparametern för vindturbulens C_v^2 mellan 0,0012 – 0,235 (Ostashev, 1997). Rekommenderat värde i Nord2000 på vindturbulensen är för en normalturbulent atmosfär 0,12. En annan benämning för vindturbulens som är mer vanligt förekommande i meteorologiska sammanhang är *mekanisk turbulens*.

3.3 Terrängens inverkan på ljudutbredning

Teoretiskt reflekteras ljud av markytan enligt Snells lag (dvs. en reflekterad stråle färdas i samma vinkel från normalen till markytan som inkommande stråle). Utöver markens lutning och ojämnheter spelar det även roll hur markens absorberande egenskaper ser ut. Terrängen har också betydelse för vindprofilens utseende, vilket gör att terräng och meteorologi ej kan ses som två oberoende parametrar i ljudutbredningen. Figur 10 visar ett exempel på hur ljudet reflekteras i medvind vid negativ refraktion och platt, hård mark.



Figur 10 Ljudstrålarnas väg vid refraction, platt mark och medvind. Bild av författare.

Terrängprofilens påverkan på ljudutbredningen är framförallt att skärmande och reflekterande effekter uppstår. En kuperad terräng leder till att så kallade skuggzoner, men också till att fenomen som eko och andra reflektioner uppstår. I ett de fall då en ljudkälla är placerat mycket högre än mottagaren, vilket är fallet för vindkraftljud kan vindhastigheten skilja sig mycket mellan de två höjderna. Låga vindhastigheter hos mottagaren kan leda till att det bakgrundsljud som teoretiskt skulle ha maskerat en del av källjudet inte uppstår och resulterande ljudnivå uppfattas som högre än vad den skulle ha gjort annars.

3.3.1 Markimpedans

Impedansen är ett mått på markytans effekt på ljudstrålarna. Främsta effekten av markimpedansen sker i att inkommande ljud färförskjuts, men även effekter som ren absorption uppstår. Markimpedansen blir liten för hård mark, såsom asfalt eller en vattenyta, och den avtar i betydelse med avståndet från källan. För långa avstånd har de meteorologiska effekterna större inverkan på ljudutbredningen än markimpedansen (Hallberg, 2007). I många fall skiljer man endast mellan hård eller mjuk mark, vilket är en förenkling som kan användas då vidare information om markens egenskaper ej finns tillgängliga. Markens egenskaper bör beskrivas så specifikt som möjligt för att ge en korrekt bild av verkligheten. En svårighet som uppstår i och med att markimpedans-klasserna är klassificerad i ord (Tabell 2), är att tolkningen ligger hos användaren och på så sätt utger en felkälla att ta hänsyn till (SINTEF, 1997). I ljudutbredningsmodeller ges varje mark-klass ett motsvarande numeriskt värde σ i enheten Nsm^{-4} .

Tabell 2. Indelning av mark-klasser i Nord2000.

Mark-klass	Beskrivning (fritt översatt från engelska)
A	Mycket mjuk mark (snö eller mosslik)
B	Mjuk skogsmark (kort tät ljung eller tjock mossa)
C	Icke kompakt, lös mark (torv, gräs eller lös jord)
D	Normal icke kompakt mark (skogsmark, betesfält)
E	Kompakt mark och grus (kompakt gårdsplan, parkområde)
F	Kompakt tät mark (grusväg, parkeringsplats)
G	Hård mark (asfalt, betong, vatten)

3.3.2 Råhetsklass och råhetslängd

Markens *råhetsklass* anges utifrån de lokala variationerna i höjd längs markytan. En skrovligare markyta ger upphov till större dispersion och annorlunda spridning av ljudstrålarna. Råhetsklassen är en markparameter. Ett annat mått på råheten är *råhetslängd*, vilket är en parameter som påverkar vindhastighetsprofilen och därmed är en markparameter som påverkar meteorologin. I praktiken används råhetslängden vid omräkning av vindhastigheten på mätthöjden, till vindhastigheten vid navhöjd enligt ekvation (9). Tabellerade värden för z_0 i olika terrängar finns i såväl Nord2000 som i Naturvårdsverkets modell.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (9)$$

Där u är vindhastighet i m/s, z är höjd i m, u_* är friktionshastighet i m/s, κ är von Kármáns konstant ($\approx 0,41$) och z_0 är råhetslängd i m.

3.4 Beräkningsmodeller

Dagens beräkningsmodeller för ljudutbredning kan delas in i två huvudkategorier; referensmodeller och ingenjörmodeller. Referensmodeller utför noggranna men långsamma beräkningar, några exempel på sådana är:

- Linearized Euler
- Parabolic Equation Model (PE)
- Fast Field Program (FFP)
- Boundary Element Method (BEM)

Ingenjörmodeller verifieras mot referensmodellerna, men är förenklade för att få realistiska beräkningstider. Ingenjörmodellerna bygger på geometrisk strålgångsteori indelat i två klasser:

- Straight rays (SRAY), då neutral atmosfär (ingen refraktion) råder
- Curved rays (CRAY), då påverkan från vind- och temperaturgradient leder till refraktion.

(Sveriges Provningsinstitut, 2006)

3.4.1 Naturvårdsverkets modell

I Sverige används Naturvårdsverkets modell för beräkning av ljudimmission. Denna finns beskriven i skriften en reviderad version av *Ljud från vindkraftverk rapport 6241* utgiven i februari 2009 (Konceptversionen skall resultera i den nya rapporten *Ljud från vindkraftverk, rapport 5933*). Till denna rapport hör också tre excel-baserade beräkningsmallar för fallen landbaserade aggregat för kort och långt avstånd samt havsbaserade aggregat. I skriften påtalas att beräkningarna är lämpade för vindkraftverk placerade i platt terräng, hur väl de stämmer i kuperad terräng är inte känt. Även de ljudeffekter från aggregaten som vindkraftverktillverkarna redovisar är beräknade för platt terräng.

Naturvårdsverkets beräkningsmodell är endast applicerbar för platt, hård mark utan vegetation. Inga meteorologiska parametrar förutom vindhastighet går att variera i modellen. De parametrar som går att variera är:

- Markens råhetslängd
- Vindhastighet
- Vindkraftsverkets ljudeffektnivå
- Ljudeffektsnivåns variation med vindhastigheten
- Mottagarens höjd och avstånd till vindkraftverk

3.5 Nord2000 – fördjupning och teori

Nord2000 bygger på den internationella standarden *ISO 9613-2, Acoustics - Attenuation of Sound during Propagation Outdoors - Part 2: General Method of Calculation*. Det är en semianalytisk strålgångsmodell (*semi-analytical ray tracing modell*), som räknar med cirkulära strålbånar för de meteorologiska förhållanden som orsakar refraktion. De parametrar som går att variera i modellen finns listade i Appendix A.

3.5.1 Ekvationer

Modellen är 2-dimensionell med möjlighet att variera förhållanden i terräng, meteorologi och vegetation (eller bebyggelse). För en punktkälla (vilket är fallet för ett vindkraftverk) beräknas ljudtrycksnivån L_R (dB) hos mottagaren enligt ekvation (10):

$$L_R = L_W + \Delta L_d + \Delta L_a + \Delta L_t + \Delta L_s + \Delta L_r \quad (10)$$

L_W = ljudtrycksnivå i det berörda frekvensbandet

ΔL_d = effekt av spridning

ΔL_a = effekt av luftabsorption

ΔL_t = effekt av terräng

ΔL_s = effekt av vegetation/bebyggelse

ΔL_r = effekt av hinder och markegenskaper då tillägg från reflekterat ljud beräknas.

Samtliga termer ovan behandlas i modellen som oberoende och kan därmed beräknas separat, undantaget är att ett visst beroende kan finnas mellan terräng och vegetationszoner eller bebyggelse.

Den sfäriska spridningen är oberoende av frekvens och beräknas med ekvation (11), där R är avståndet mellan källa och mottagare uttryckt i meter.

$$\Delta L_d = -10 \log(4\pi R^2) \quad (11)$$

Luftabsorptionen är beräknad enligt ISO 9613-1 där A_0 står för "pure tone attenuation".

$$\Delta L_a = -A_0 (1,0053255 - 0,00122622A_0)^{1,6} \quad (12)$$

Terrängprofilen beskrivs med hjälp av linjesegment som bildar en platt, dalformad eller kullig terräng. För de tre olika terrängtyperna modifieras beräkningarna beroende på om det är en homogen eller komplex markyta (dvs. beroende om mark-klassen varierar eller ej), samt om refraktion i atmosfären existerar.

$$\Delta L_t = r_{kulle} \Delta L_{kulle} + (1 - r_{kulle}) \Delta L_{ejkulle} \quad (13)$$

där

$$\Delta L_{ejkulle} = r_{platt} \Delta L_{platt} + (1 - r_{platt}) \Delta L_{dal}$$

Där r -termerna beror av källans och mottagarens höjd samt högsta punkten i terrängen. Ingen övre begränsning över antalet segment finns i modellen, men för att få realistiska beräkningstider bör inte fler än 10-15 segment användas. För varje segment definieras utöver längd och lutning även den akustiska impedansen samt markens råhetsklass.

Vegetationszoner eller bebyggelse beskrivs i modellen som så kallade *scattering zones*. Dess inverkan på ljudutbredningen beskrivs enligt ekvation (14).

$$\Delta L_s = k_f T k_p A_e (R_{sc}) \quad (14)$$

Där T är en funktion av zonens densitet (observera att T i detta fall inte är temperatur), höjd och storlek, A_e är en korrektionsterm, k_f en frekvensvägningsterm och k_p en proportionalitetskonstant.

Ljud som reflekteras av exempelvis en byggnadsfasad eller ett bullerplank beskrivs enligt följande ekvation;

$$\Delta L_r = 10 \log(\rho_E) + 20 \log\left(\frac{S_{refl}}{S_{Fz}}\right) \quad (15)$$

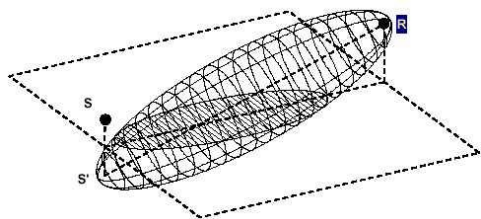
Där ρ_E är en energirefleksions-koefficient, S_{refl} är ytstorleken av en fresnelzon och S_{Fz} är hela fresnelzonens yta (för beskrivning av fresnelzon se nedan).

3.5.2 Fresnelzon

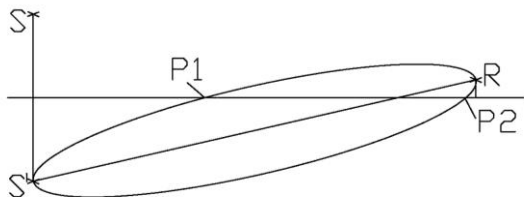
I Nord2000 används fresnelzoner för att beskriva inom vilket område kring en ljudstråle som ljudnivån hos mottagaren påverkas. Storleken av fresnelzonen (Figur 11) är frekvensberoende enligt ekvation (16). Ju högre frekvens desto mer avsmalnad ellipsoid. Då modellen är 2-dimensionell förenklas fresnelzonen enligt Figur 12.

$$|SP| + |RP| - |SR| = F_\lambda \lambda \quad (16)$$

Där F_λ är en fraktion av våglängden λ .



Figur 11 Konceptbild av en Fresnel-ellipsoid (DELTA, 2002).



Figur 12 Endimensionell Fresnelzon, såsom den används i den två-dimensionella modellen (bild av författare).

3.5.3 Refraktion i atmosfären

De meteorologiska förhållandena kan i Nord2000 varieras genom ändring av vindhastighet, vindriktning, temperaturgradient, turbulens och temperatur. De första tre av dessa parametrar påverkar hur den slutliga vertikala ljudhastighetsprofilen ser ut vilken i sin tur påverkar refractionen (krökningen av ljudstrålarna). I modellen behandlas refractionen genom en förlängning av ljudstrålarnas väg mellan källa och mottagare. Ljudstrålens väg beskrivs av termen R i ekvation (11).

I Nord2000-modellen används en heuristisk modell för att beräkna refractionen, vilken räknar fram en krökt strålgång i stället för rak. Den heuristiska modellen antar att ljudhastighetsprofilen varierar linjärt med höjden, vilket är en förenkling av verkligheten där denna profil ofta kan approximeras med en logaritmisk kurva. Anledningen till antagandet är att en linjär såväl vind- som temperaturprofil betydligt förenklar beräkningarna och minskar kapacitetsåtgång och beräkningstider. En jämförelse av den heuristiska modellen med en FFP-kod (Fast Field Program) där ljudprofilen antas logaritmisk, visar en adekvat överensstämmelse i fallet svagt positiv refraction. För starkare refractioner eller negativa dito kan i de testade fallen inte en lika stark överensstämmelse hittas (SINTEF, 1999). I en jämförelse mellan Nord2000 och den europeiska utbredningsmodellen Harmonoise konstateras att ingendera av de två modellerna kan beräkna fall med negativ refraction på ett signifikant säkert sätt (Jónsson & Jacobsen, 2008).

3.5.4 Inkoherens

Inkoherens mellan ljustrålar kan beskrivas som en utsuddning av de interferenseffekter som sker i teoretiska strålgångar, där yttre miljöfaktorer inte spelar in. Absorption och atmosfärisk turbulens är två parametrar som leder till inkoherens. Luftfuktighet och temperatur påverkar hur stor absorptionen blir, vilken i modellen har en dämpande effekt på ljudutbredningen. Atmosfärisk turbulens kan anges för både vind (i enheten $m^{4/3}s^{-2}$) och temperatur (i enheten Ks^{-2}). I modellen finns rekommenderade standardvärden för en normalturbulent atmosfär på $0,12 m^{4/3}s^{-2}$ för vinden och $0,008 Ks^{-2}$ för temperaturen (DELTA, 2002).

3.6 Testplan

Fokus i den här rapporten är att titta på de parametrar som styr de meteorologiska förhållandena och modellens beteende vid kuperade terrängförhållanden. Samtliga beräkningar är gjorda med mottagaren placerad 500 meter från källan, vilket är ett ofta rekommenderat minsta avstånd mellan bostadshus och vindkraftverk. Vid detta avstånd ligger ljudnivåerna ofta kring de 40 dB(A) som är riktvärdet för vindkraftljud vid bostad.

3.6.1 Basfall

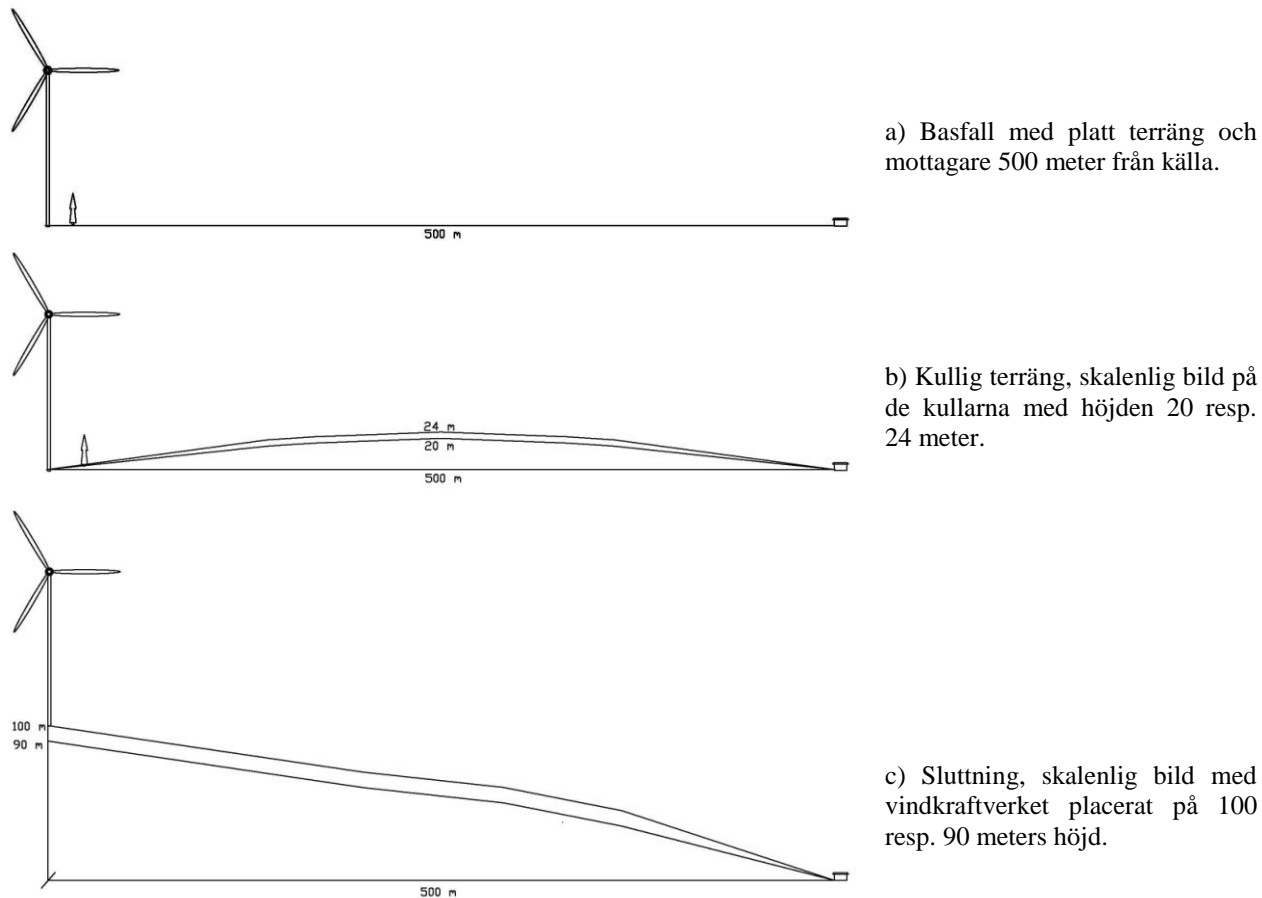
Ett basfall är framtaget som referens. Basfallet baseras på samma indata som Naturvårdsverkets beräkningsmodell, vilket innebär att ingen hänsyn har tagits till väderförhållanden eller terräng. Enligt de bestämmelser som finns utförs modelleringen med följande indata: 8 m/s vid 10 meters höjd, ingen vegetation, normala markförhållanden, platt terräng och svag medvind.

3.6.2 Terräng

Beräkningar genomförs med tre typer av terräng (Fig. 13) dels för att jämföra sinsemellan, dels för att se hur olika parametrar slår i olika terrängtyper.

- **Platt terräng.** Med mottagare placerad 500 meter från vindkraftverket.
- **Kulle mellan vindkraftverk och mottagare:** I de flesta beräkningarna har två kullar med samma geometri men olika höjd används. Högsta punkten på kullarna är 20 eller 24 meter. Mottagare placerad på 500 meters avstånd även i detta fall.
- **Vindkraftverk på höjd eller mottagare i sänka:** Höjden på vilken vindkraftverket placeras sätts till 90 eller 100 meter. Mottagaren är fortfarande placerad på 500 meters avstånd i det horisontella planet.

I övrigt varierar mark-klass som ger ett mått på markimpedansen. I de fall då markimpedansens effekter inte ska kontrolleras, sätts mark-klassen till D. Markens råhetsklass (observera att detta ej är parametern råhetslängd) sätts som standard till noll.



Figur 13 Exempelterränger som används i beräkningarna.

3.6.3 Meteorologi

Följande parametrar varierar i beräkningarna:

Vindhastigheter: Varieras från 0 m/s till 18 m/s.

Vindriktning: Varieras från rak medvind (0°) till rak motvind (180°).

Temperaturgradient: Varieras mellan $-0,1^\circ\text{C}/\text{m}$ och $+1,0^\circ\text{C}/\text{m}$.

Råhetslängd: Varieras mellan 0,001 - 2

Luftfuktighet: Varieras mellan 0 – 100 %

Noteras bör att temperaturgradienter på över $+0,05^\circ\text{C}/\text{m}$ knappast förekommer då det blåser 8 m/s eller mer på 10 meters höjd. Vid så pass stark vind är luftskiktet generellt omblandad och temperaturgradienten inte speciellt stor. I och med att modellen endast approximerar en enda temperaturgradient för hela profilen, kan en stor positiv temperaturgradient dock återspegla de fall då en kraftig gradient uppstår i det nedersta skiktet t ex upp till 10 meter samtidigt som en mindre eller ingen gradient existerar högre upp i luftskiktet, där också starkare vindar råder.

3.6.4 Konstanta värden

Konstanta värden som inte varierar under beräkningarna är:

- Ljudemissionsdata från vindkraftverken hämtad från tillverkarna (se appendix B)
- Absorption antas existera i samtliga beräkningar (kan anges som på eller av).
- Luftfuktigheten sätts till 70 % för alla fall utom när denna parameter ska kontrolleras.
- Turbulensen behåller de rekommenderade värden som anges av modellen, förutom i det fall då turbulensen ska kontrolleras.
- I samtliga fall då det inte är vindriktningen som ska kontrolleras, sätts den till rak medvind, 0° (dvs. vind från källa mot mottagare). I några fall kompletteras medvind med rak motvind.
- Vinden anges på 10 meters höjd
- Mottagare är placerad 500 meter från källa.
- Standardavvikelse av vind sätts till det rekommenderade värdet 0,5 m/s.
- Standardavvikelse av temperaturgradient sätts till 0 enligt rekommendation.
- Temperaturen sätts till 15°C

3.6.5 Ljuddata

Ljudeffektnivåer för tre olika vindkraftverk (Enercon E82, Siemens SWT 2,3 och Vestas V90) har hämtats från tillverkarna (se appendix B). Om inget annat anges används Vestas-verket som ljudkälla i beräkningarna.

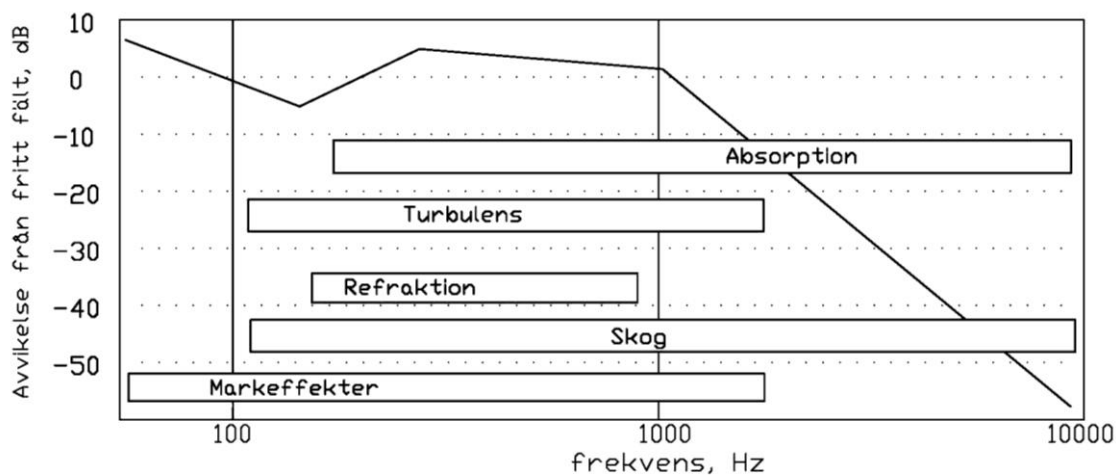
3.6.6 Jämförelse med mätdata

Med utgångspunkt i mätdata erhållen av Eja Pedersen, Högskolan i Halmstad och Jens Forssén, Chalmers genomförs två olika utvärderingar. I den första utvärderingen kontrolleras sambandet mellan uppmätta meteorologiska parametervärden och uppmätta ljudnivåer. I den andra görs en jämförelse mellan beräknade och uppmätta ljudnivåer. I jämförelsen specificeras geografiska och meteorologiska förhållanden i beräkningsprogrammet till att stämma överens med mättillfället. Likaså information om typen av vindkraftverk och dess emissionsdata hämtas från mätningarna. Jämförelsen är gjort för en specifik mätsekvens på en specifik plats vilket innebär att den inte ger en fullständig utvärdering av modellens tillförlitlighet, utan visar på dess beteende i en situation.

4 Resultat och observationer av Nord2000-beräkningar

4.1 Frekvensberoende påverkan

I beräkningar gjorda med Nord2000-modellen syns det tydligt att skog och absorption har dämpande effekt på ljudutbredningen relativt fritt fält. Markeffekter, turbulens och refraktion kan däremot ha både dämpande och förstärkande effekt. Markeffekterna rör alla frekvenser, men framför allt de låga upp till ca 1000 Hz. Simulerad skog, vilket också kan ses som en markeffekt påverkar däremot dämpande över hela spannet från ca 100 – 10000 Hz, något mer dämpande vid högre frekvenser. Absorptionen har en kraftigt dämpande effekt på frekvenser från cirka 1000 Hz och högre. Turbulens och refraktion agerar båda såväl dämpande som förstärkande på ljudutbredningen jämfört med i fritt fält. Resultatet av beräkningarna visar att det mest varierande området är mellan 125 – 1000 Hz. Mönstret ser liknande ut för platt och kuperad terräng, men vindriktning, mark-klass och skog ger större frekvensvariationer i kuperad terräng. Temperaturgradient däremot ser ut att ha något mindre inverkan över kuperad än platt terräng. I Figur 14 ses en tolkning av hur olika parametrar påverkar ljudutbredningen, utifrån beräkningar med Nord2000. Resultatet visar en blandning av hur påverkan vid kortare och längre avstånd (Fig. 4 och Fig. 5) ter sig. Beräkningarna för de olika parametrarna är i figuren nedan gjorda över platt mark, vilket innebär att ljudskugga och effekter av eventuellt strykande infall inte borde uppstå.



Figur 14 Uppsattade dämpningsområden för olika parametrar med Nord2000-beräkningar. Källa på 80 meters höjd 500 meter från mottagare. (se appendix C för underlag till tolkning).

4.2 Meteorologiska parametrar

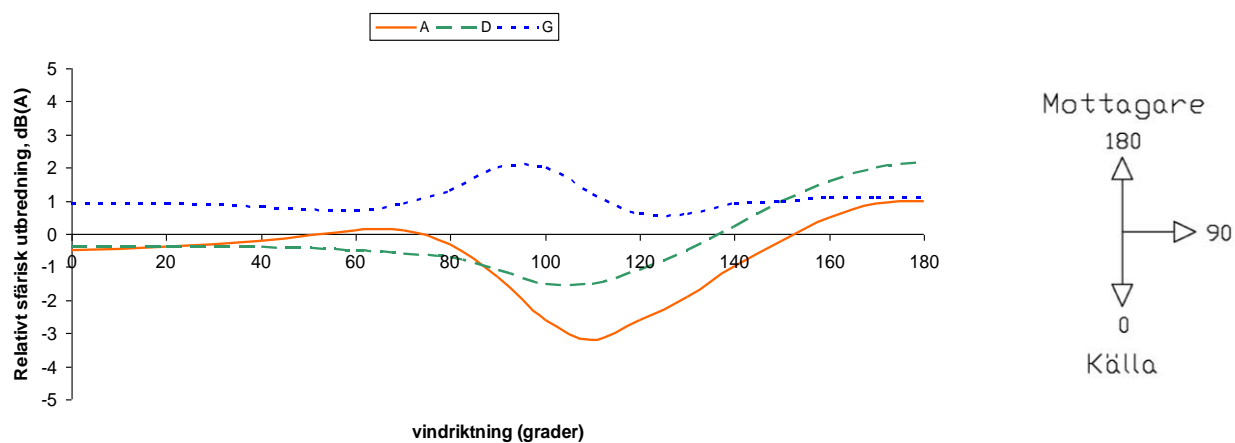
De meteorologiska parametrarna påverkar refraktion, absorption och till viss del turbulens. Vindriktning, vindhastighet, marktemperatur, temperaturgradient och råkylslängd påverkar refraktionen. Luftfuktighet och temperatur är de parametrar som påverkar absorptionen och de parametrar som påverkar turbulens är benämnda som turbulensparametrar.

4.2.1 Vindriktning

Vindriktningen definieras i grader riktat från källa till mottagare. Det innebär att 0° motsvarar rak medvind, 90° sidovind och 180° rak motvind.

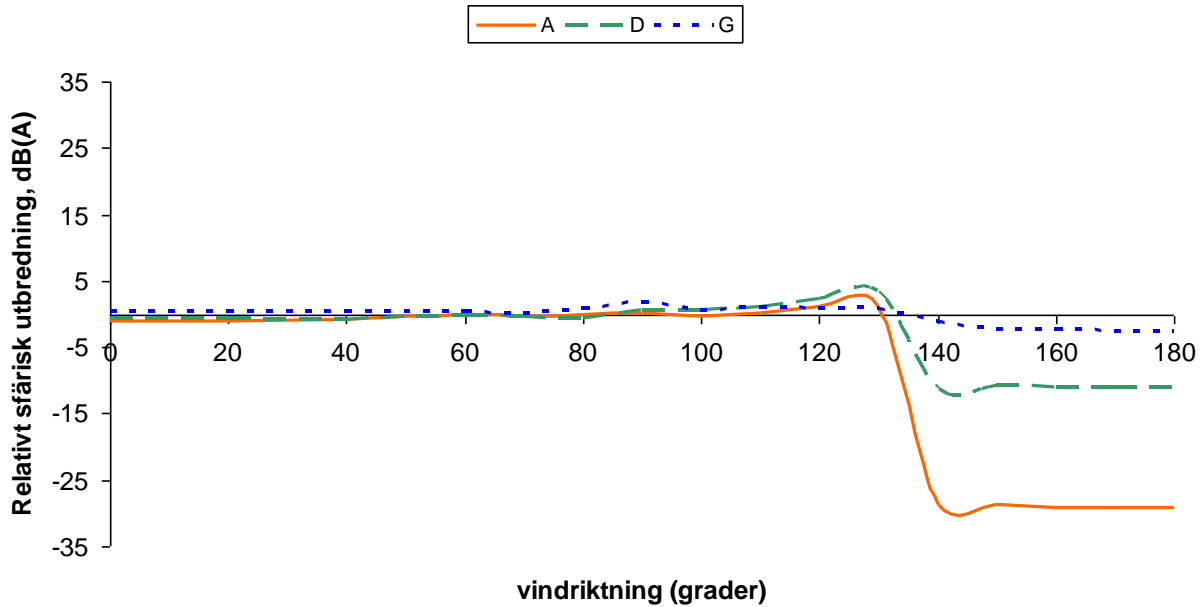
Vid beräkningar gjorda för basfallet, med *platt terräng* varierar ljudnivåerna marginellt med vindriktningen (0-2 dB(A)). Noterbart är dock att för de mjukaste mark-klasserna A, B och C fås de lägsta ljudnivåerna i medvind och de högsta ljudnivåerna i motvind. Medan de hårdare mark-klasserna D, E, F och G ger det förväntade resultatet med högst ljudnivåer i medvind och lägst i motvind. Storleken av såväl avtagande som tilltagande av ljudnivåer ökar med högre vindstyrkor, men det är aldrig tal om större ljudnivåskillnader än någon decibel.

Vid beräkningar med *kuperad terräng*, uppnås ett mer varierat resultat. I Figur 15 visas hur ljudnivåerna hålls relativt stabila i medvind (0-60°) för att sedan öka eller minska vid små förändringar av vindriktningen. I båda fallen då man använder sig av en mjuk mark (A och D) ges de högsta ljudnivåerna då det blåser rak motvind. Jämfört med sfärisk utbredning ligger ljudnivåerna mellan 4 dB(A) lägre och 3 dB(A) högre.



Figur 15 Exempel på hur ljudnivåerna varierar med vindriktning för kullig terräng (kulle med maxhöjd 20 meter), temperaturgradient på $-0,01^\circ/\text{m}$ och en vindhastighet på 8 m/s på 10 meters mäthöjd. För markklasserna A, D, G.

Figur 15 är inte en generell bild av hur ljudnivåerna varierar med vindriktningen, utan visar endast ett typfall. Generellt ger beräkningar i medvind (0-60°) stabila nivåer som inte varierar speciellt mycket med vindriktning. Då vindriktningen sätts till sidovind (runt 90°) eller motvind (120-180°) blir skillnaderna i ljudnivå hos mottagaren betydligt större. En typisk variation är att det vid sned motvind initialt uppstår en ökning av ljudnivån, på upp till 6 dB(A) jämfört med sfärisk utbredning. Om vinden justeras till en rakare motvind uppkommer en snabb sänkning av ljudnivån. Hur stor sänkning som uppstår beror på terräng, mark-klass och vindhastighet.

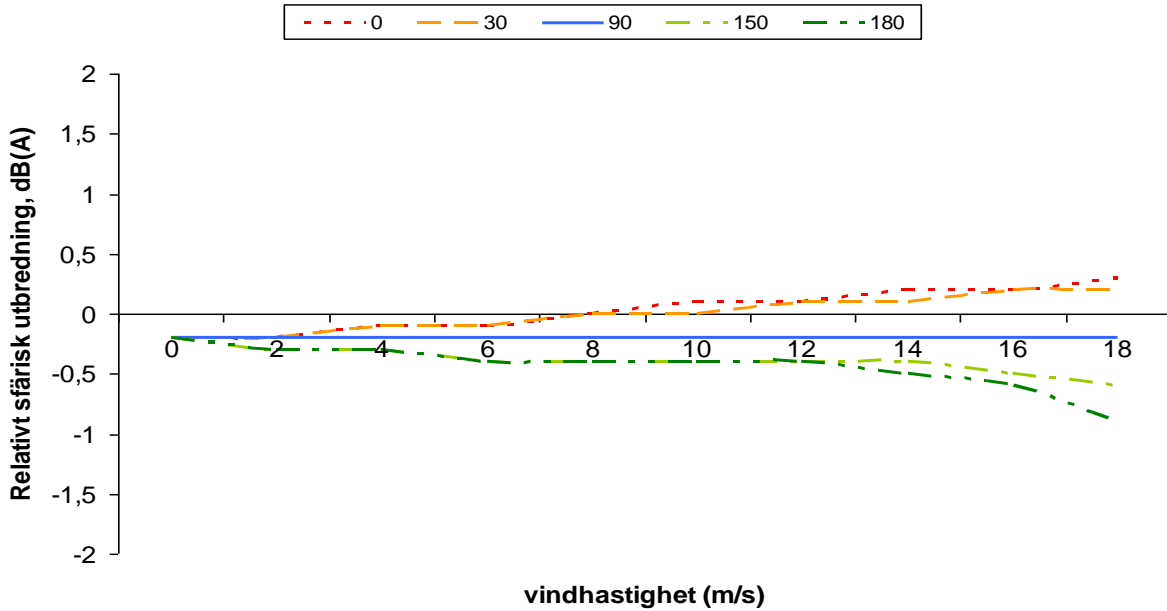


Figur 16 Kulle med höjd 24 meter. Ingen temperaturgradient, vindhastighet 8 m/s på 10 meters mätthöjd.

Med en kuperad terräng blir denna sänkning av ljudnivån ibland hela 30 dB(A), vid endast en liten justering av vindriktningen. Detta skulle i praktiken innebära att mottagaren hamnat i ljudskugga relativt vindkraftverket sett. Ett illustrerat exempel på fenomenet syns i Figur 16, där en terräng med en 24 meter hög kulle är använd i beräkningarna.

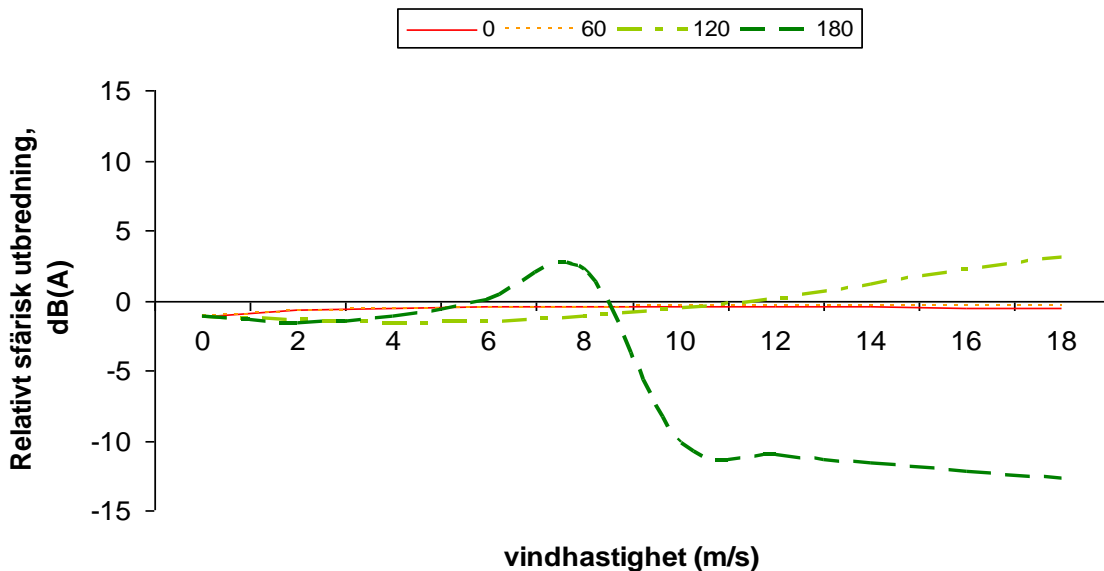
4.2.2 Vindhastighet

Ökad vindhastighet bör enligt teorin ha en ökande effekt på ljudnivån vid mottagaren. I basfallet ses, i analogi med detta antagande, tilltagande ljudnivåer för starkare medvind, och avtagande ljudnivåer i starkare motvind (Fig. 17). Dock blir varken tilltagandet eller ökandet av ljudnivå större än någon decibel trots en ökning av vindhastigheten med 18 m/s. I beräkningarna har enbart en emissionsnivå från vindkraftverket används, varvid endast ljudutbredningen påverkar resultatet och inte den naturliga ökning av alstrat ljud som skulle ha uppkommit i verkligheten. I fallet då vinden blåser med rät vinkel mot utbredningsriktningen (90°) ses ingen förändring i ljudnivå med ökad vindhastighet. Detta då modellen endast räknar med komponenten i utbredningsriktningen, något som vid 90° inte existerar.



Figur 17 Ljudnivåer vid olika vindhastighet och vindriktningar. Mottagare belägen 500 meter från vindkraftverk och ingen temperaturgradient.

För kuperad terräng ser resultatet annorlunda ut. I Figur 18 ses till exempel att ljudnivåerna inte ökar med ökande vindhastighet i rak medvind eller sidovind, däremot får man i fallet med sned motvind (120°) de högsta ljudnivåerna då det blåser starkare. För rak motvind (180°) kan man se en ljudnivåtopp som sedan abrupt följs av en sänkning av ljudnivån med drygt 10 dB(A), då vindhastigheten ökar. Det förekommer i flera testade fall (varierande terräng och temperaturgradienter) att en ökning av ljudnivåerna relativt sfärisk utbredning, fås då det blåser en stark motvind. En viss förskjutning av kurvorna uppstår, men storleken på avvikelserna är i stort sett desamma för de testade fallen med en ökning på max 5 dB(A) och sänkning på 15 dB(A).

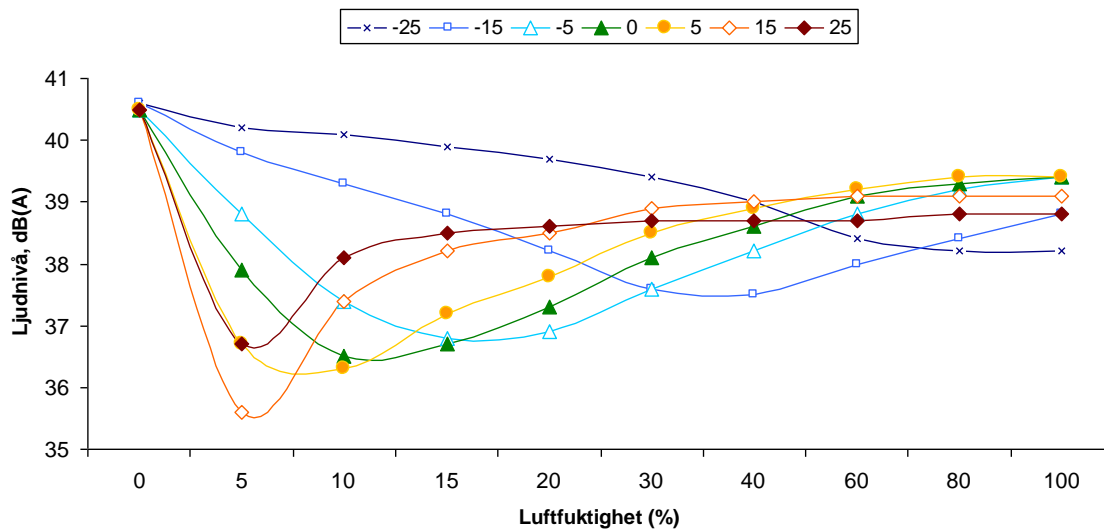


Figur 18 Ljudnivåer hos mottagaren vid olika vindhastigheter och vindriktningar. Kullig terräng mellan källa och mottagare.

4.2.3 Relativa fuktigheten

Den relativa fuktigheten, som i standardmätningar och beräkningar sätts till 70 % vid 15 °C, ger vid en variation från 0-100 % ett utslag på -3 dB(A) till +2 dB(A) jämfört med sfärisk utbredning. De lägsta ljudnivåerna, dvs. den största dämpningen sker enligt Nord2000 vid ungefär 5 % luftfuktighet. Parameterns beteende är oberoende av terrängens beskaffenhet. Den lägsta dämpningen, som ger högst ljudnivåer uppstår då luftfuktigheten sätts till 0 % (dvs. ingen luftabsorption förekommer).

För andra temperaturer ser dämpningen annorlunda ut (Fig. 19) . Lägre temperaturer ger en flackare kurva med störst dämpning vid högre luftfuktighet. Högre temperaturer ger en skarpare kurva, med mindre intervall i vilket den största dämpningen kan hittas.



Figur 19 Ljudnivå beroende på luftfuktighet och lufttemperatur.

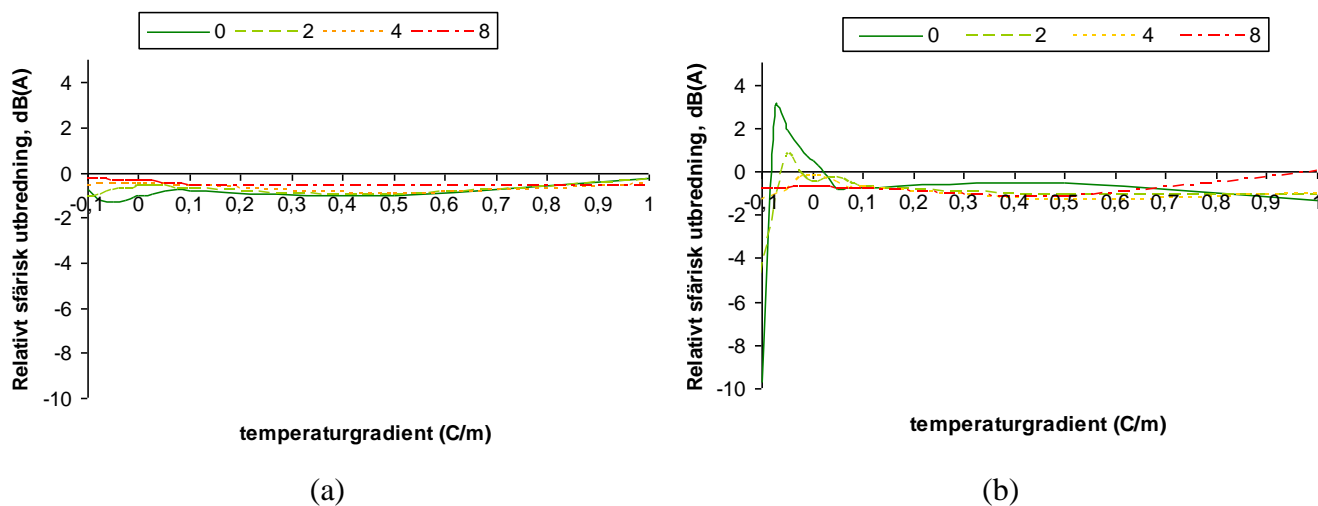
4.2.4 Temperatur

Temperaturen i sig påverkar absorptionen samt i viss mån den temperaturberoende vindhastigheten. Som parameter i beräkningarna ger den inte något stort utslag, men är viktig att känna till för att en korrekt absorption ska kunna beräknas. Dessutom ger temperaturen information om sådant som är självklart i verkligheten men glöms då det hamnar på pappret, t e x vilken årstid eller tid på dygnet det handlar om.

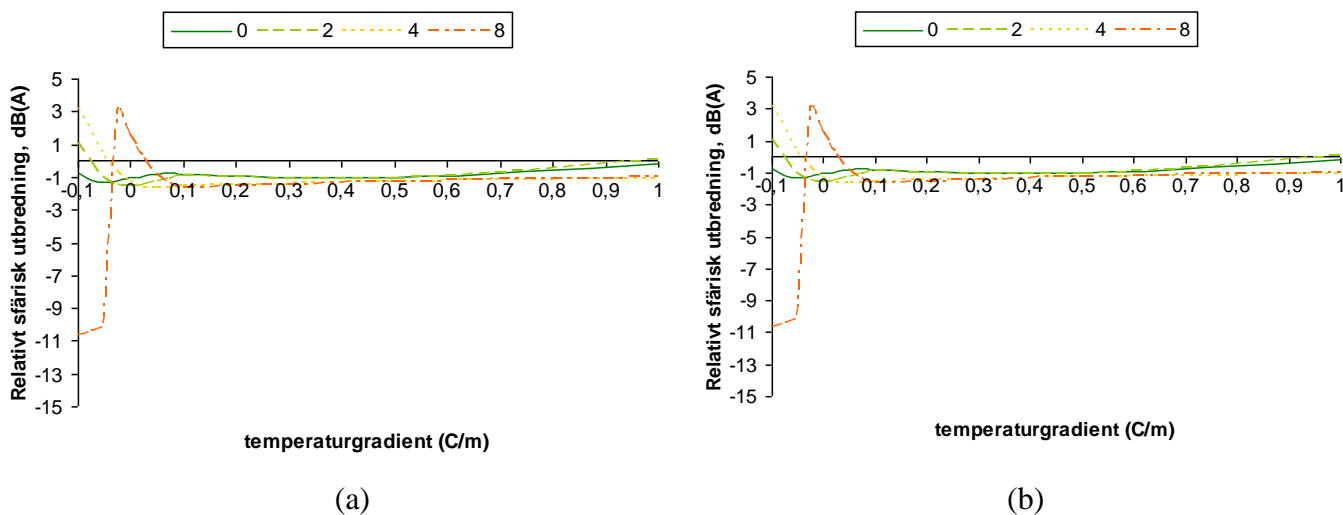
4.2.5 Temperaturgradient

Temperaturgradienten har i varierats mellan $-0,1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ till $+1,0^{\circ}\text{C}/\text{m}$ för olika terrängtyper, vindriktningar och vindhastigheter. För de beräknade fallen med *platt terräng* och en mottagare placerad på 500 meters avstånd, ger en variation av temperaturgradienten ett mycket marginellt utslag på under 1 dB(A). Temperaturgradienten orsakar variation av ljudnivåerna i platt terräng först på drygt 1500 meters avstånd. I vindkraftsammanhang är dessa avstånd emellertid oftast inte intressanta då ljudnivåerna då så gott som alltid ligger under det mest strikta riktvärdet på 35 dB(A).

Däremot kan en ändring av temperaturgradienten ge utslag i de fall en *kuperad terräng* är inlagd i modellen. I de beräknade fallen med *medvind* spelar temperaturgradienten i många fall ingen större roll, den ger upphov till ljudnivå-skillnader på ca ± 2 dB(A). I Figur 20(a) där terrängen utgörs av en kulle med högsta punkt på 20 meter, kan man se att ljudnivå inte varierar vare sig för olika temperaturgradients (x-axeln) eller olika vindhastigheter. I Figur 20(b) där kullen är 24 meter hög, kan man däremot utläsa en variation av ljudnivåerna för negativa temperaturgradients och låga vindhastigheter.



Figur 20 Ljudnivåer vid olika temperaturgradients och vindhastigheter i medvind (a) terräng med en kulle med maxhöjd 20 meter, (b) terräng: kulle med maxhöjd 24 meter.



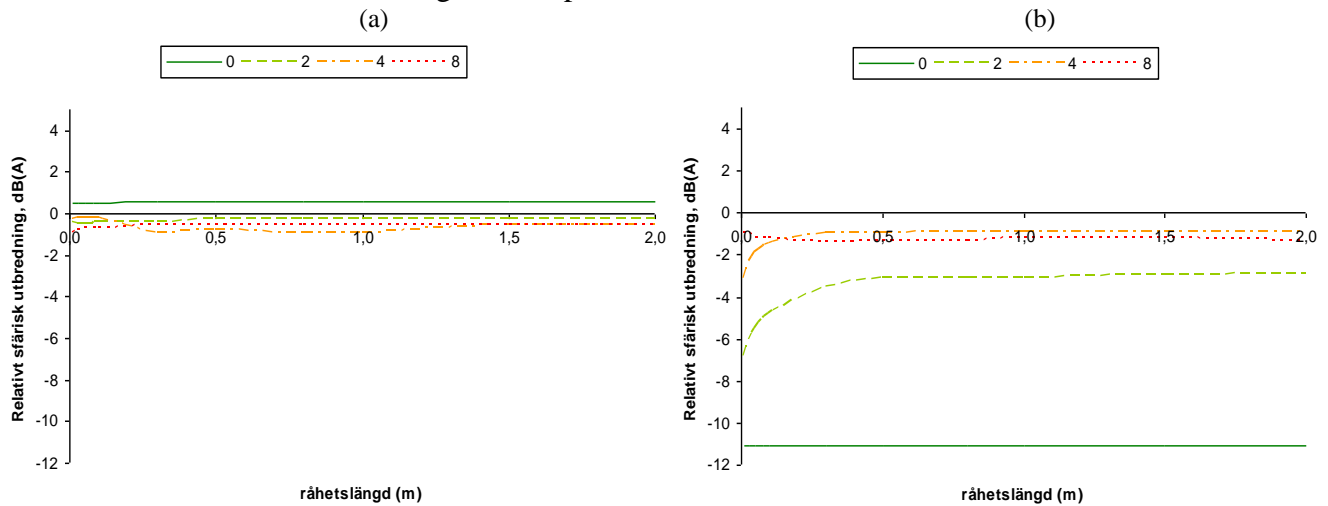
Figur 21 Ljudnivåer vid olika temperaturgradients för (a) kulle med maxhöjd 20 meter och (b) kulle med maxhöjd 24 meter. Motvind för samtliga vindhastigheter.

Variationer beroende på temperaturgradient blir större i *motvind*, vilket kan ses i Figur 21. Liknande som för medvindsfallet blir variationerna mindre vid positiv temperaturgradient. Den typiska ökningen är då ljudnivån ökar snabbt och ger en ca 4 dB(A) högre nivå jämfört med

sfärisk utbredning, för att sedan minska igen tills en stabil ljudnivå nås. Variationerna sker oftast då temperaturgradienten ligger mellan $\pm 0,05^\circ\text{C}/\text{m}$ och blir större då terrängen är mer kuperad.

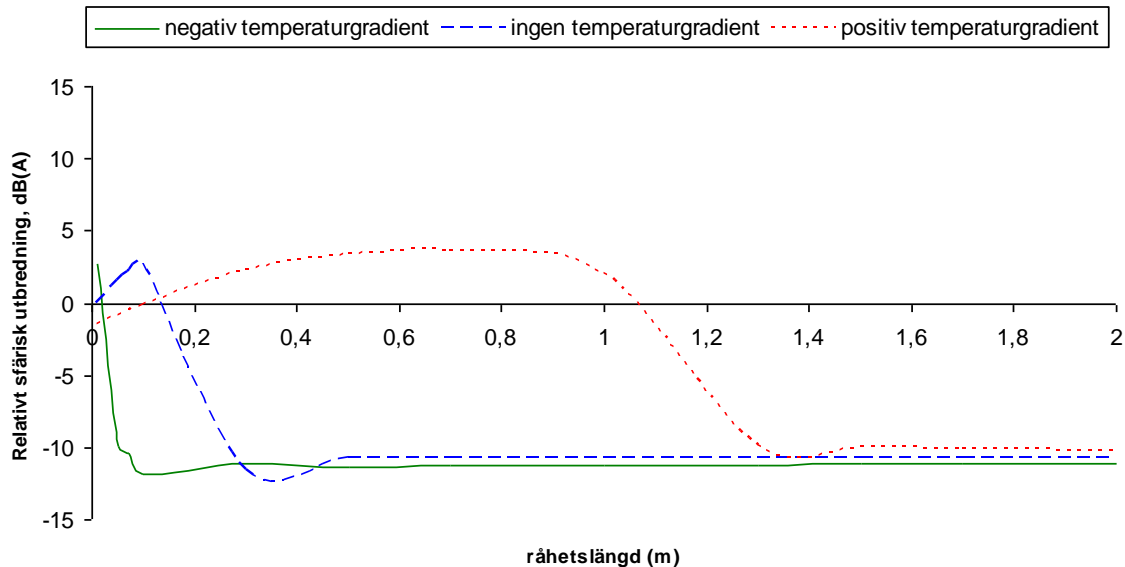
4.2.6 Råhetslängd

Råhetslängden har marginell eller ingen påverkan på ljudnivåerna vid platt eller låg terräng (Fig. 22(a)). Med ökande höjdskillnader i terrängen (Fig. 22(b)), som ger större risk för skärmningseffekter, kan en liten variation av ljudnivåer på grund av ökad råhetslängd ses. Variationerna blir störst vid låga vindar på 0-2 m/s.



Figur 22 Ljudnivåer med varierande råhetslängd för olika höga kullar. Medvind 0, 2, 4 och 8 m/s. (a) Terräng: Kulle med maxhöjd 24 meter (b) Terräng: Kulle med maxhöjd 28 meter

Vid en simulerad motvind uppstår flera fall av stor variation av ljudnivån, beroende på råhetslängd. I dessa fall ses initialt en höjning av ljudnivån med 3-5 dB(A) jämfört med sfärisk spridning, för att sedan minska med runt 15 dB(A) (Fig. 23). Fenomenet uppstår i alla olika kuperade fall som är beräknade (dvs. för kullig och sluttande terräng, positiv och negativ temperaturgradient).



Figur 23 Illustration av ljudnivå-variationerna för olika råhetslängder och temperaturgradienter. Kullig terräng och motvind råder.

Då råhetslängden sätts till noll, beräknas ljudnivån i samtliga undersökta terräng, vindhastigheter och temperaturgradienter till 11,7 dB. Värdet noll på råhetslängden bör därför undvikas.

4.2.7 Turbulens

Mekanisk turbulens

Om den mekaniska turbulensen, som i Nord2000 benämns som vindturbulensen varierar från 0-1,2 $m^{4/3}s^{-2}$, för olika terräng, temperaturgradienter och vindhastigheter ger detta marginell påverkan på ljudnivåerna (0-2 dB(A)). Rekommenderat värde på 0,12 $m^{4/3}s^{-2}$ motsvarar en normalturbulent atmosfär.

Termisk turbulens

Då temperaturturbulensen varierar från 0,001 – 8 Ks^{-2} (med en tiopotens intervall), ger detta endast en ytterst marginell skillnad i ljudnivå (0-1 dB(A)). Rekommenderat värde ligger på 0,008 Ks^{-2} .

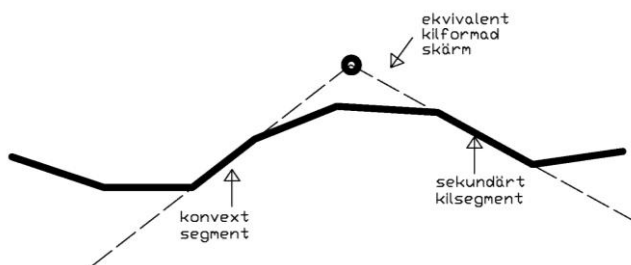
4.3 Terräng

Generellt kan slutsatsen dras att terrängen har en stor inverkan på ljudnivåerna beräknade med Nord2000-modellen. Samtliga fall med avvikande ljudnivåer, både den omskrivna ökningen med 6 dB(A) och det skarpa avtagandet uppstår i de fall en kuperad terräng har approximerats. Vilken upplösning terrängdata är angiven i verkar spela en stor roll för vilka ljudnivåer som räknas fram. Små variationer (t.ex. 0,5 meter i höjddled) visar sig göra en tydlig skillnad i var och när en ljudskugga med medföljande sänkning av ljudnivån uppstår. Nästan alla parametrar beter sig olika i platt jämfört med kuperad terräng.

4.3.1 Kulle

Både placering och höjd av en kulle i terrängen påverkar ljudutbredningen. En stor känslighet syns just vid den geometri där den direkta ljudstrålen är precis på gränsen mellan att nå mottagaren med eller utan en markreflektion. Ljudnivåskillnader på 10 dB(A) kan uppnås med en liten justering av kullens höjd eller förskjutning.

För den resulterande ljudnivån spelar höjden större roll än bredden på en kulle. Om en kulle med samma maxhöjd smalnas av ger detta inga stora utslag på resulterande ljudnivå. Detta kan förklaras med att diffraktionen över den kulliga terrängen beräknas enligt Hadden och Pierces formel, som använder sig av ett kilformat hinder. Terrängen approximeras således att passa in i denna formel enligt Figur 24 (DELTA, 2002).



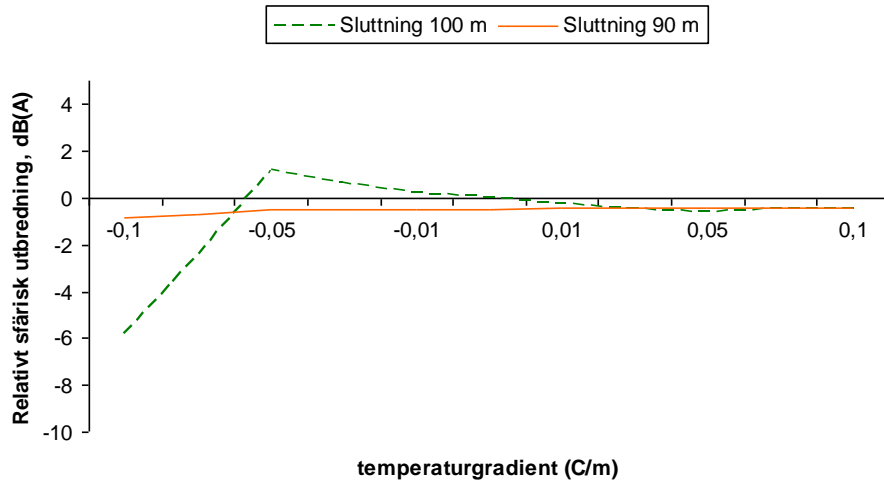
Figur 24 Skiss över hur modellen approximerar en kullig terräng. (fri tolkning från Delta, 2002)

Däremot påverkar placeringen av kullen en del. En kulle placerad nära mottagaren skapar ibland en skuggzon (tänk bullerplank) som i modellen ger ett skarpt utslag på ljudnivån. Hur kantig kullen beskrivs (dvs. med hur många segment den byggs upp i modellen) påverkar resulterande ljudnivåer olika från fall till fall.

4.3.2 Sluttning

För att kontrollera hur lutningen på en sluttning påverkar ljudutbredningen har samma absoluta avstånd mellan sändare och mottagare som när båda är placerade på samma höjdnivå bibehållits. Därefter har höjden där sändaren (vindkraftverket) är placerad justerats och utefter detta bestämt avståndet i x-led. Resultatet av beräkningarna visar inte på någon skillnad alls beroende på hur brant sluttningen är, oavsett vindhastighet och temperaturgradient.

En annan variant för att kontrollera hur modellen beter sig i en sluttande terräng är den som har tillämpats i de flesta beräkningsfallen. De olika sluttningar som används i beräkningarna har samma geometri, men högsta punkten varierar varvid sluttningarna blir olika branta. I de flesta beräknade fall har vindkraftverket placerats 90 eller 100 meter ovanför mottagarens nivå (Fig. 11). De största skillnaderna mellan sluttningarna på 100 och 90 meter ses då *motvindsberäkningar* görs. Men även i en del fall med *medvind* uppkommer skillnader, i Figur 25 syns ett exempel på hur man med den högre sluttningen får en variation av ljudnivåerna beroende på temperaturgradient, medan sluttningen med sin högsta punkt på 90 meter ger en mycket begränsad variation.



Figur 25 Exempel där höjd och lutning på sluttning gör utslag på resulterande ljudnivåer hos mottagare. Lätt medvind 2 m/s.

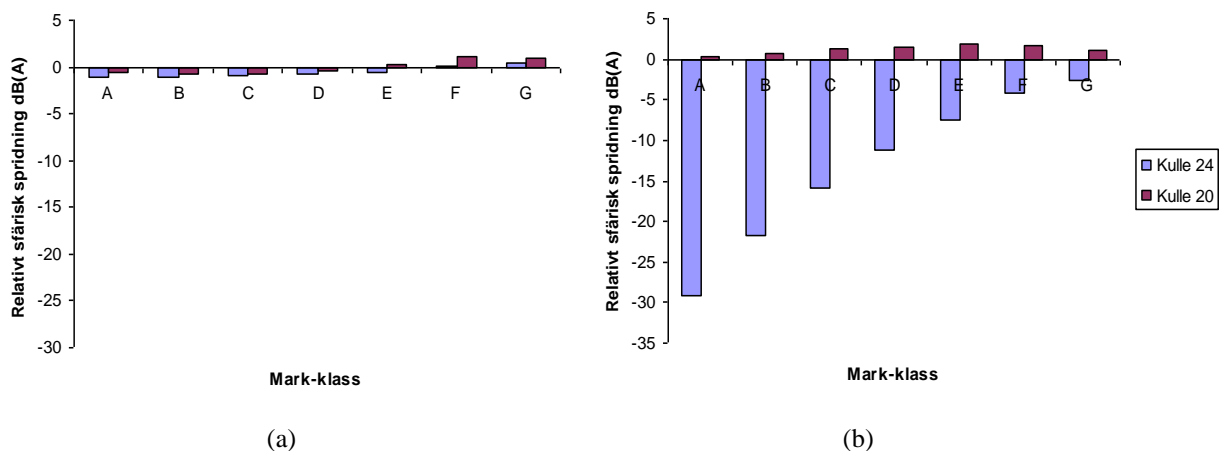
4.3.3 Platt terräng

Vid platt terräng, som används i det så kallade basfallet, beter sig modellen som teorin indikerar, såväl i medvind som motvind.

4.3.4 Markimpedans

Markimpedansen ger i *medvind* inte något större utslag (1-3 dB(A) på ljudnivåerna (Fig. 26 (a)). En viss tendens ses att det blir något större skillnader mellan olika mark-klasser när det blåser låga vindar under 3 m/s. Likaså kan man se tendenser till att mark-klassen får större betydelse då terrängen är mer kuperad.

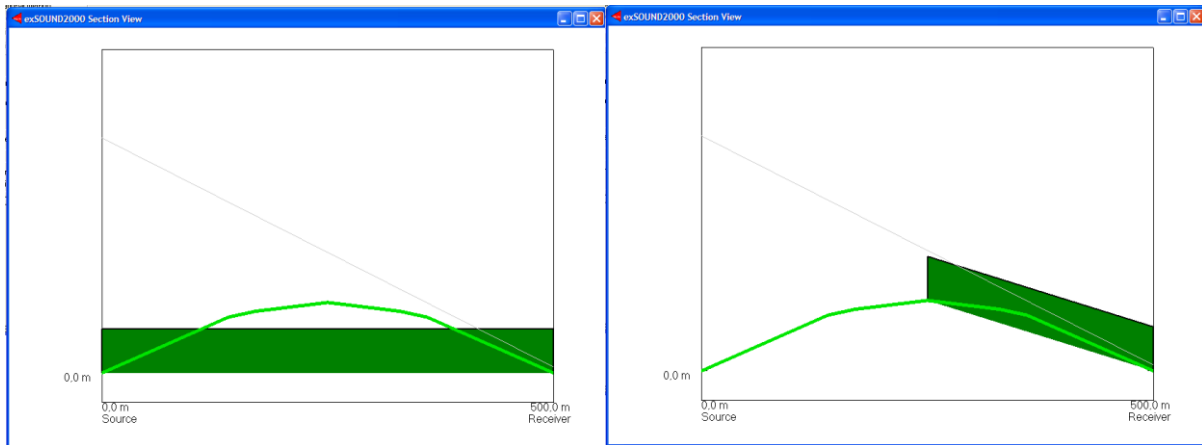
Vid *motvind* och vindhastighet på 8 m/s kan en tydlig skillnad i ljudnivå beroende på mark-klass ses. Hur mycket markimpedansen påverkar beror i sin tur på terrängens beskaffenhet. I Figur 26 (b) kan skillnaden mellan två olika höga kullar ses. För den högre kullen kan en tydlig effekt av mark-klassen ses. Att det blir så stora skillnader i resultatet för olika höga kullar tyder på att skuggeffekter uppstår i det ena fallet.



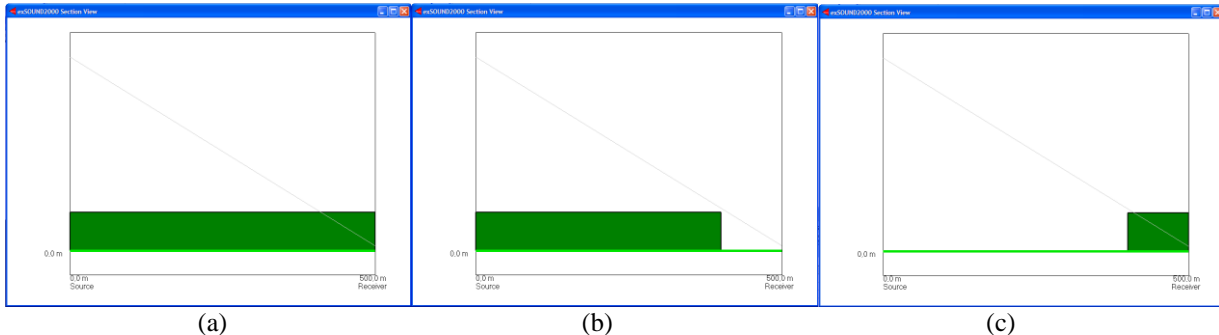
Figur 26 Variationer i ljudnivå beroende på mark-klass för två kullar med olika höjd. (a) medvind (b) motvind

4.3.5 Skog

En så kallad *Scattering zone* läggs in i programmet för att simulera en stads- eller skogsmiljö. I Figur 27 illustreras två exempel på hur en skog kan simuleras. Programmet har begränsat antalet scattering-zoner till en, vilket gör att den inte kan följa markprofilen utan endast illustreras med ett medelvärde över start- och ändpunkt. I just detta fall blir resultatet på ljudnivån dock desamma. Den resulterande ljudnivån blir ca 34 dB(A) som kan jämföras med samma förutsättning utan skogszon som landar på ca 38 dB(A).



Figur 27 Illustration av hur programmet simulerar skog vid kuperad terräng. Endast en scattering zone kan användas. Kullen är 24 meter hög, ingen temperaturgradient, trädhöjd på 15 meter, stamdiameter 0,2 m.



Figur 28 Illustration av hur programmet simulerar olika *scattering zones* (a) simulerad skog längs hela markytan mellan vindkraftverk och mottagare (b) skog längs större delen av markytan, men ej där mottagaren befinner sig (c) endast skog där mottagaren befinner sig

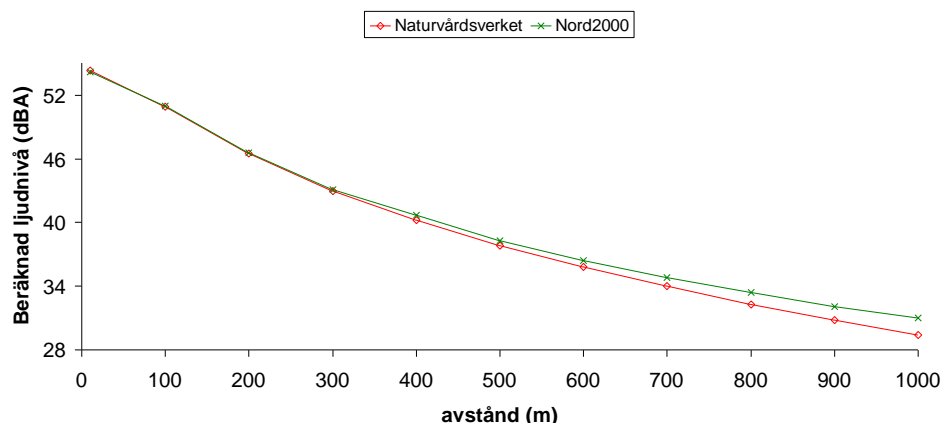
Då skogen sträcker sig hela vägen mellan vindkraftverk och hus (Fig. 28(a)) kan man se en dämpande effekt på ljudnivån. I fallet då skogen upphör 100 meter innan mottagaren (Fig. 28(b)) har skogen inte någon dämpande effekt på ljudet alls. I det beräknade fallet där mottagare men inte vindkraftverk befinner sig i skogen (Fig. 28(c)), blir utfallet på ljudnivån exakt likadant som i det första fallet med skogsterrängen längs hela markprofilen. Av detta kan man konstatera att skogens dämpande effekt enligt modellen framförallt uppstår då mottagaren befinner sig i eller mycket nära skogen.

Den viktigaste parametern i Nord2000-modellens beräkningar av scattering zones är hur lång väg ljudet färdas genom den aktuella zonen. Det innebär att ingen hänsyn till den del av skogen som inte ligger inom den direkta ljudstrålens bana tas. Inte heller tas någon hänsyn till den eventuella effekt av turbulens som kan uppstå ovanför trädtopparna.

5 Resultat av jämförelse med andra modeller och mätning

5.1 Naturvårdsverkets beräkningsmodell

Ljudnivån enligt Naturvårdsverkets modell är de första hundra meterna så gott som linjärt avtagande med knappt 3 dB per 100 meter. En jämförelse mellan Naturvårdsverkets modell och Nord2000 (Fig. 29) med lika parametrar inmatade, visar på ett gott överensstämmande mellan modellerna i basfallet. Nord2000 beräknar en något lägre dämpning vid större avstånd. Skillnaden mellan modellerna kan bero på att Nord2000 räknar med att ljudet reflekteras mot marken samt att impedansen inte kan elimineras som påverkande parameter.



Figur 29 Jämförelse mellan Naturvårdsverkets modell och Nord2000. Meteorologiska förutsättningar är 8 m/s på 10 meters mätthöjd.

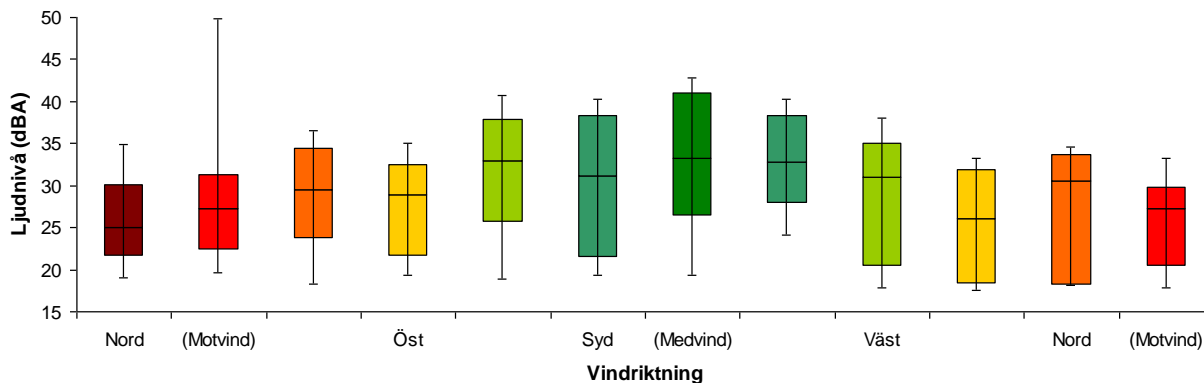
5.2 Nord2000 jämfört med mätningar

5.2.1 Analysering av mätdata

En serie med 511 stycken mätningar erhållna från Eja Pedersen, Högskolan i Halmstad och Jens Forssén, Chalmers har analyserats för att kunna jämföras med resultat från Nord2000-beräkningar. Mätningarna är gjorda på ett avstånd av 530 meter från vindkraftverket (Pedersen & Forssén, 2009).

Vindriktning

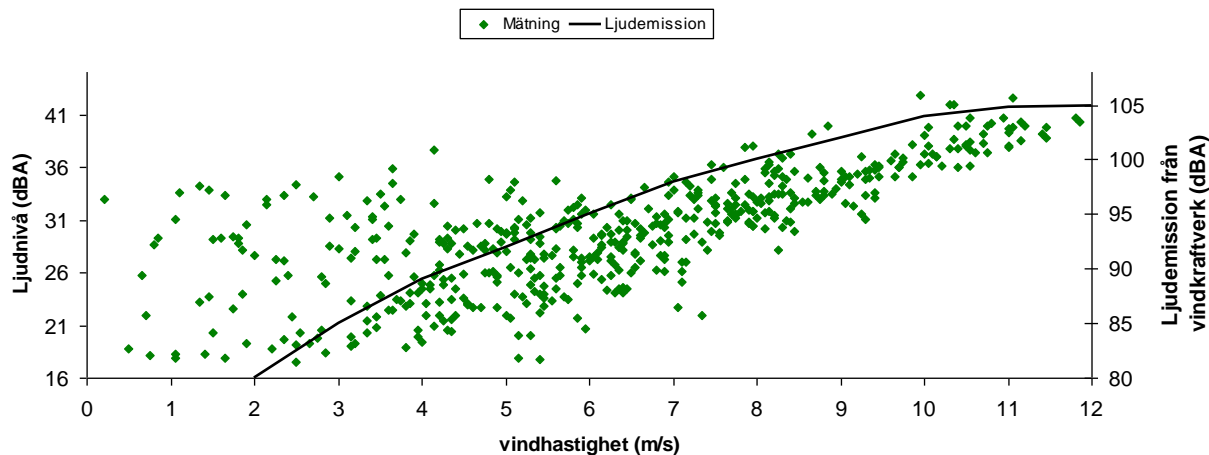
I de mätningar som är gjorda kan man utläsa att vindriktningar har betydelse för resulterande ljudnivåer (Fig. 30). Medvind resulterar i högre ljudnivåer än sido- och motvind. Dock berättar inte mätdata hela sanningen, då även vindhastigheten spelar roll och en viss vindriktning kan domineras av starkare vindar. I det aktuella fallet är den förhärskande vindriktningen ostlig, dvs. det blåste under mätsekvensen oftast ifrån öst. Figur 30 visar ljudnivåer i ett 90-procentigt konfidensintervall samt min- och maxnivåer för varje vindriktning.



Figur 30 Ljudnivåer vid olika vindriktningar samt indikerade min- och maxnivåer. Baserat på data från mätningar (Pedersen & Forssén, 2009)

Vindhastighet

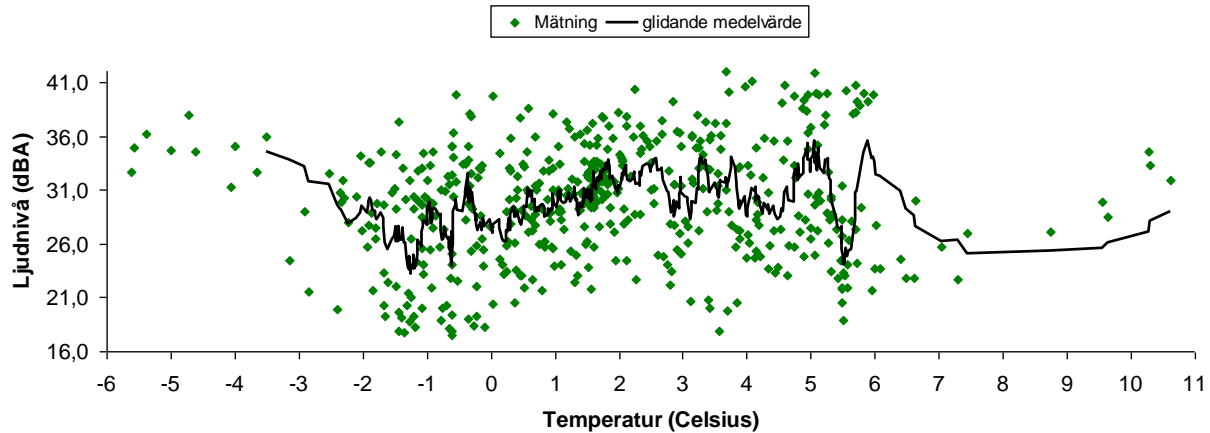
I mätningarna kan en tydlig korrelation mellan ljudnivå och vindhastighet ses (Fig. 31). Den uppmätta ljudnivå-ökningen är i samma storleksordning som emissionsökningen från vindkraftverket. Det blir på grund av detta svårt att entydigt tolka hur mycket *ljudutbredningen* påverkas av vindhastigheten. Ljudemissionskurvan som används för jämförelse i Figur 31 kommer från vindkraftverkstillverkaren och startar vid 2 m/s.



Figur 31 Vindhastighet med motsvarande beräknade ljudnivåer samt ljudemission från vindkraftverket. Samtliga mätpunkter i mätsekvensen.

Temperatur

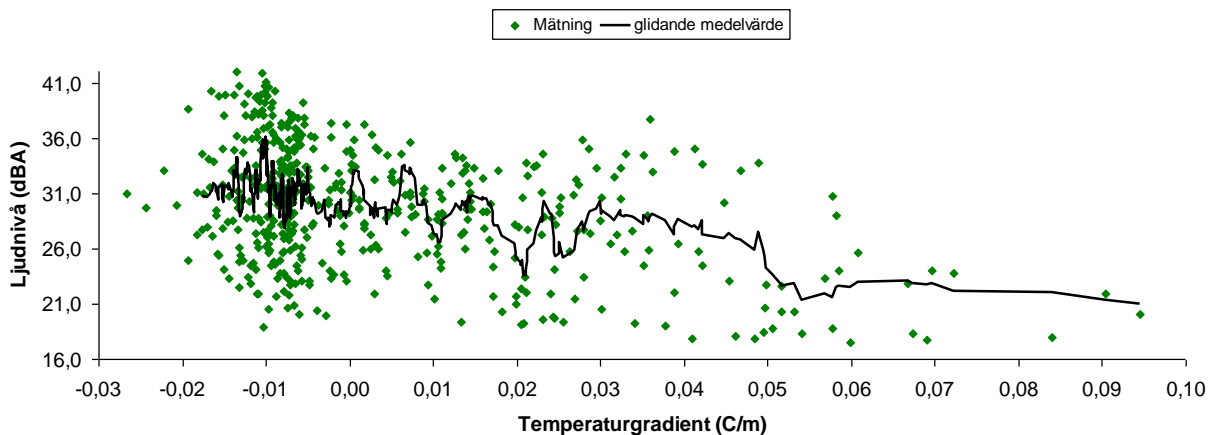
Under mätsekvensen varierade temperaturen ca 20 grader, i intervallet ± 10 °C. Temperaturen i sig ser inte ut att påverka ljudutbredningen vilket kan ses i Figur 32.



Figur 32 Lufttemperatur och ljudnivåer.

Temperaturgradient

Vanligast förekommande temperaturgradienten är $-0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$, vilket kan ses i Figur 33. Vid detta värde syns också den största spridningen i uppmätta ljudnivåer. Från mätningarna kan man se en trend att ljudnivåerna minskar med ökande temperaturgradient. Vid vidare kontroll av enskilda mätvärden kan dock konstateras att de låga ljudnivåerna vid de högsta temperaturgradienterna samtliga är uppmätta vid låga vindhastigheter (under 5 m/s) och motvind.



Figur 33 Temperaturgradient och ljudnivåer.

5.2.2 Jämförelse mellan Nord2000 och mätning

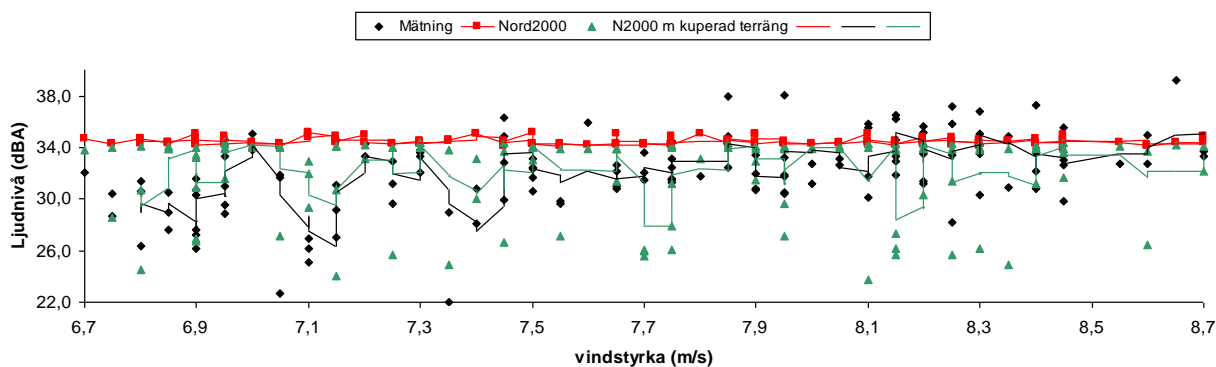
I beräkningarna med Nord2000 har två olika terrängtyper används, en plattare och en mer kuperad. Den plattare terrängen är mer lik de verkliga geografiska förutsättningarna, medan den mer kuperade terrängen är ett försök att få med komplexiteten i landskapet såsom småhus, enstaka träd och annat som annars inte syns i beräkningarna. Ingen hänsyn till luftfuktighet har tagits förutom att lufttemperatur angivits. Mark-klass har inte ändrats mellan olika beräkningar, det är dock möjligt att det under vissa mättillfällen var snö på marken vilket kan ha påverkat mätresultaten. Endast mätningar gjorda vid vindhastigheter mellan 6,7 och 8,7 m/s har används,

då emissionsdata för vindkraftverket är angiven för 7,7 m/s. Detta för att vindhastighetsberoende ljudemissions-skillnader ska kunna elimineras som påverkande parameter. Temperaturgradienten har beräknats utifrån temperaturskillnaden mellan mätaren på marken och navhöjd. I och med att såväl låga som höga vindhastigheter har plockats bort har antalet mät- och beräkningpunkter sjunkit till 128 stycken. Jämförelsen ger inte ett mått på osäkerheten hos modellen, men indikerar i vilka sammanhang den tenderar att ge ett mer osäkert resultat.

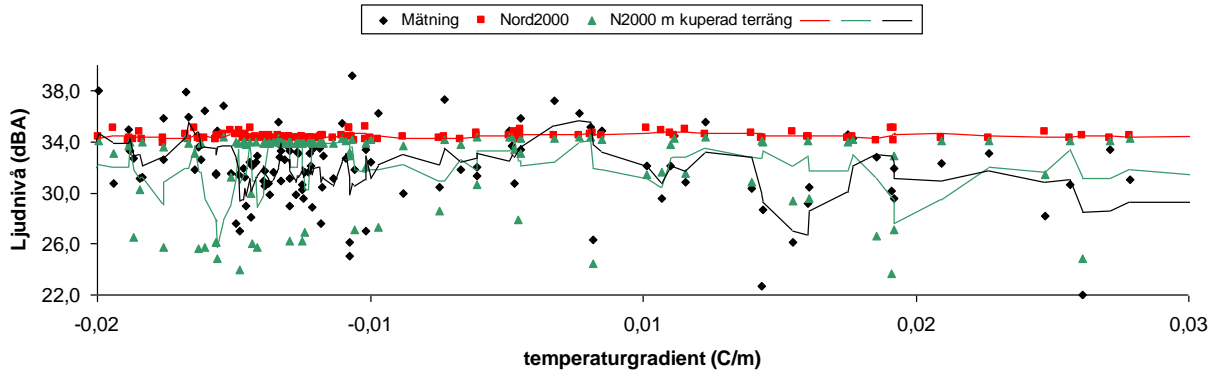
Som synes i Figur 34-37 beräknas ljudnivåerna i *platt terräng* (-□- röd serie) i de allra flesta fall till högre än de uppmätta. Medelvärdet ligger på 34,5 dBA jämfört med *mätning* (-◆- svart serie) och Nord2000-beräkning med *kuperad terräng* (-▲- grön serie) som ligger på 32,0 respektive 32,1 dBA. De små variationer som Nord2000 genererar då en platt terräng är antagen och källan befinner sig högre än mottagaren är inte en bra bild av verklighetens variationer. I kuperad terräng däremot ser det ut som att modellen klarar av att beskriva variationerna på ett mer korrekt sätt. Beräkningarna med kuperad terräng ger dock aldrig de toppar som kunnat mätas upp, utan ligger stadigt med högsta nivåer på cirka 2 dBA över medelvärdet. Beräkningarna ger ljudnivådalar av ungefär samma storlek men med högre frekvens än i mätningarna.

Beräkningarna stämmer bra överens med mätning vid vindhastigheter runt 7,7 m/s (vilket är den vindhastighet som emissionsdata är angiven för). Nord2000 visar dock inte på att vindhastigheten ska ha någon större påverkan på ljudutbredningen (Fig. 34).

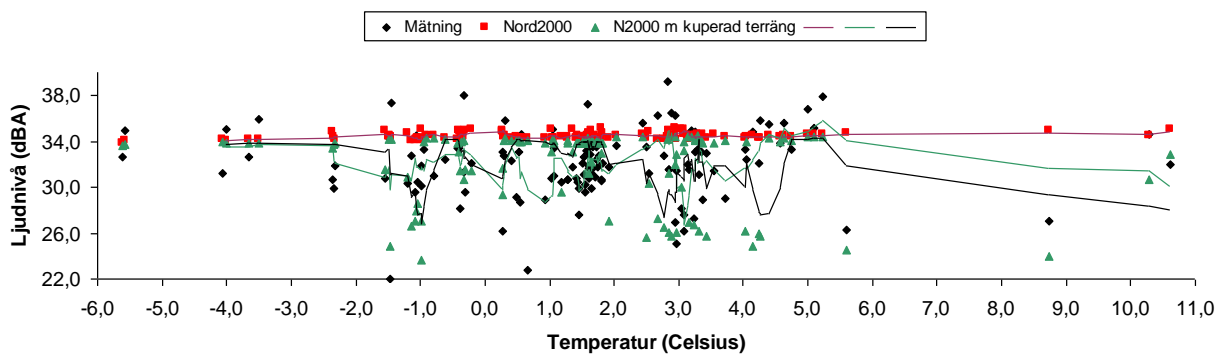
I Figur 35 ses att modellen underskattar ljudnivåerna vid negativa temperaturgradienter medan en ökad överensstämmelse vid positiva temperaturgradienter kan skönjas. Lufttemperatur i sig ser inte ut att vara en parameter som påverkar de resulterande ljudnivåerna (Fig. 36). I Figur 37 syns hur beräkning och mätning skiljer sig markant i de fall sido- eller motvind råder. Vid medvindsförhållanden missar modellen de fluktuationer som uppstår enligt mätning, men håller sig på en medelnivå lik den verkliga. För motvind finns få mät- och beräkningpunkter, men de som finns indikerar att Nord2000 underskattar ljudnivåerna.



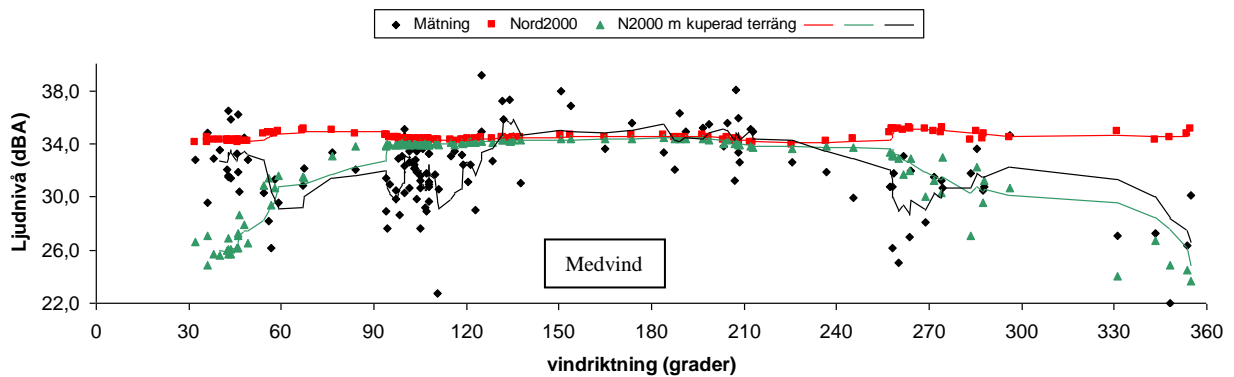
Figur 34 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade ljudnivåer. En plattare och en mer kuperad terräng har använts i Nord2000-beräkningarna. Linjerna anger glidande medelvärde över 4 mätpunkter.



Figur 35 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade ljudnivåer. Sorterade efter stigande temperaturgradient.



Figur 36 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade ljudnivåer. Sorterade efter stigande temperatur.



Figur 37 Jämförelse mellan uppmätta och beräknade ljudnivåer. Sorterade efter vindriktning där medvind råder mellan 125-214 grader. Övriga gradtal sido- eller motvind.

6 Diskussion

Modellen är inte utvecklad för vindkraft

Nord2000-modellen är utvecklad för trafik som oftast rör sig i marknivå, och är mycket noggrant beskriven just för reflektioner och dämpningar orsakade av hinder och skärmar. Vindkraftverk är placerade högt relativt mottagare. I och med detta spelar vädervariationer en större roll för ljudutbredningen från vindkraftverk än för andra källor till samhällsbuller såsom exempelvis trafik. I och med att väderparametrarna i Nord2000 till stor del är förenklade exempelvis genom en linjär vindhastighets- och temperaturgradient blir även avvikelserna större från hur verkligheten ser ut. Några kända utbredningsfenomen kan teoretiskt förklaras bort redan från början, exempelvis fokuseringspunkter och *Low Level Jets*. Dessa orsakas av att ljudhastigheten är olika på olika höjd över mark (här talar vi om några meter till någon kilometer upp i atmosfären) vilket inte fångas upp av modellen som beskriver ljudet i Fresnelzoner mellan källa och mottagare. Inte heller stark nedåtrefraktion (orsakad av ex. mycket stor positiv temperaturgradient de första metrarna ovan mark) kan beskrivas i och med att endast en linjär vindhastighetsprofil approximeras för hela profilen och därmed missar modellen de lokala fokuseringspunkter som kan uppstå vid en varierande vindhastighetsprofil. I jämförelsen mellan mätning och beräkning kan man se att Nord2000 aldrig beräknar högre ljudnivåer än 2-3 decibel över medelnivån, medan de uppmätta värdena kan ligga så mycket som 8 decibel över medelnivån.

Beräkningar med Nord2000 kan dock till skillnad från Naturvårdsverkets modell ta hänsyn till meteorologi och terräng, vilket gör det till en lämpligare modell att använda. Vid planering av en vindkraftsetablering kan Nord2000-beräkningar leda till en bättre förståelse om ljudnivåernas väderberoende variationer. I slutändan borde det leda till en större acceptans av att vindkraftverk låter olika mycket olika dagar. En annan lösning är också att reglera ner effekten på vindkraftverken under de meteorologiska förhållanden som leder till högst ljudnivåer.

Platt terräng ger för liten variation och uppåtrefraktion ger risk för låga nivåer

Jämförelsen mellan mätning och beräkning visade även att Nord2000-modellens beräknade ljudnivåer stämde bättre överens med uppmätta resultat vid positiva temperaturgradienter (inversion) än negativa. Som tidigare beskrivits i teorikapitlet är negativa temperaturgradienter en orsak till uppåtrefraktion. Efter ytterligare beräkningar och kontrollerande av parametrar, samt med stöd av litteratur (Jónsson & Jacobsen, 2008) kan slutsatsen dras att Nord2000 är dålig på beräkningar då uppåtrefraktion uppstår. Därmed är det inte sagt att uppåtrefraktion inte existerar i verklighetens atmosfär vid de aktuella väderförhållandena, utan endast att modellen är dålig på att beräkna ljudnivåerna i dessa fall. Således bör dessa situationer undvikas vid beräkningar. Det stora problemet i sammanhanget är att så pass många olika parametrar kan vara orsaken till refraktionen att det är svårt att säga vilka värden man ska undvika. Vid planering av vindkraftparker borde detta inte leda till några större problem eftersom det finns riktlinjer om vilka meteorologiska förhållanden man ska använda sig av i beräkningar. Däremot är det mycket viktigt vid mätning att vara uppmärksam på om uppåtrefraktion är trolig och undvika att jämföra dessa uppmätta värden med beräknade.

Det är viktigt att poängtera att i följande stycke rörande uppåtrefraktion gäller då en kuperad terräng är beskriven.

Med utgångspunkt från beräkningar gjorda i motvindsförhållanden kan det mer stor säkerhet sägas att just *motvind*, sned såväl som rak sådan är en direkt orsak till att modellen räknar med refraktion. I jämförelsen mellan uppmätta nivåer och beräknade syns tydligt att Nord2000 underskattar ljudnivåerna vid motvindsförhållanden. Det är också i motvindsfallet som en dämpning på så mycket som 30 decibel kan uppstå, vid en justering av vindriktningen med endast några grader. Den andra parametern som ger utslag på liknande sätt är *temperaturgradienten*. Figureerna 20 och 21 visar att fenomenet främst uppstår med kombinationen kuperad terräng och låga vindar, och allra vanligast förekommande för negativa temperaturgradienter.

Avvikelse och antagligen för lågt beräknade ljudnivåer uppstår framförallt då en kuperad terräng är antagen. I de fall en platt terräng är använd spelar vare sig markförhållanden eller meteorologiska förhållanden en speciellt stor roll för beräknade nivåer, det rör sig om någon decibels variation. Vid platt terräng och avstånd runt 500 meter är det framförallt ljudemissionen från verket och avståndet mellan turbin och mottagare som spelar roll för resulterande ljudnivåer, vilket stämmer överens med Naturvårdsverkets beräkningsmodell.

I de beräkningar gjorda för platt terräng (Fig. 34-37) förekommer vare sig toppar eller dalar i ljudnivå trots att 128 stycken olika vädersituationer är beräknade. Vilket visar på att modellen kräver en viss komplexitet i terrängen för att kunna beskriva variationer orsakade av väder. Möjligt är att verkligheten ser så pass komplex ut med elskåp, stolpar, passerande bilar, staket, grindar, diken eller enstaka träd att man i beräkningar gör en alldeles för enkel beskrivning om man endast använder sig av markens höjdvariation och markklass. Jämförelsen mellan mätning och beräkning visade i analogi med detta att överensstämmelsen blev bättre när en överdrivet kuperad terräng antogs. Positivt i det fallet är att beräkningarna visade på ljudnivåvariationer av samma storlek som mätningarna, negativt är att låga ljudnivåer (dalar) uppstod oftare. Beräkningarna kunde heller aldrig fånga upp de ljudnivåtoppar som mättes upp. När man i praktiken planerar en vindkraftpark är det knappast troligt att man räknar på ljudnivåvariationerna över tiden, utan snarare är man intresserad av någon slags ekvivalentnivå eller möjligen maxinivå. I och med detta borde inte de små variationerna i platt terräng leda till något problem, men det är fortfarande viktigt att förstå hur modellen beter sig i de fallen. För att verifiera hur väl modellen behandlar de meteorologiska parametrarna i mycket kuperad terräng måste många fler mätningar och jämförelser göras. Jämförelsen i den här rapporten är enbart gjord för ett fall i en relativt slät terräng.

I kuperad terräng uppstår också fall med skuggzoner som inte är orsakade av refraktion, utan av skärmning. *Mark-klassen* är i vissa sådana fall en slående parameter, men det är oftare i kombination med uppåtrefraktion som mark-klassen spelar stor roll.

Emissionsdata för olika vindhastigheter

Emissionsnivåer från vindkraftverken vid olika vindhastigheter spelar en så betydande roll för ljudnivåerna att det i många fall är nödvändigt att ha tillgång till emissionsdata för olika vindhastighet. Beräkningarna gjorda i det här arbetet visar dock att vindhastigheten inte spelar speciellt stor roll för själva ljudutbredningen (Fig. 17 och Fig. 18). Om tillräcklig kunskap om ljudemissionens beroende av vindhastighet finns, går det att i efterhand kompensera för detta.

Parametervärden som bör undvikas

Det finns framförallt en parameter som är viktigare än andra att vara försiktig med och det är vindriktningen. Så länge som inga justeringar i modellen görs bör *motvind* (sned och rak sådan) undvikas i beräkningar. Görs detta har den vanligaste orsaken till uppåtrefraktion eliminerats. För de andra parametrarna temperaturgradient och terrängprofil är det svårare att säga när uppåtrefraktionen kommer att uppstå och därför kan inte generella rekommendationer göras. Värdet noll på *råhetslängd* ska undvikas då modellen inte klarar av att göra beräkningar med denna inställning.

Parametrar som inte behöver varieras

Lufttemperatur ger å ena sidan inte ett så stort utslag i beräkningarna att det är en av de viktigare parametrarna att ta hänsyn till, men å andra sidan är det en meteorologisk parameter som är lätt att få tag på och som kan säga någonting om andra förutsättningar i närheten. Vid en mätning kan lufttemperaturen ge en indikation om markens tillstånd, till exempel snöklädd eller genomfrusen, även om noteringar om detta inte finns tillgängliga. Temperaturen kan också indikera om naturliga maskeringseffekter såsom lövbrus eller vågskvalp förekommer eller inte, vilket kan förklara varför klagomål på ljudnivåer kommer in vid just en tidpunkt. Detta gör att lufttemperaturen inte alltid ska avfärdas som en onödig parameter. I jämförelsen mellan beräkning och mätning togs ingen hänsyn till *luftfuktigheten*. Det är möjligt att ett annat resultat skulle ha uppnåtts om detta gjorts. Dock kan man se i Figur 19 att dämpningen beroende på luftfuktighet inte skiljer sig mer än några decibel vid de aktuella temperaturerna.

Variation av *turbulensparametrarna*, ger i Nord2000-beräkningarna ett mycket liten utslag. I modellbeskrivningen tas upp hur turbulensen påverkar inkoherensen mellan ljudstrålar och motverkar interferens. Den påverkan turbulensen har på ljudutbredningen generellt är oklart beskriven och vid kontroll av parametern visar det att ljudnivåerna varierar mycket marginellt på grund av denna. Det är allmänt erkänt att turbulens är mycket svårt att beskriva (Ackerman, 2003), vilket gör att parametern är svår att ta hänsyn till oavsett om den är korrekt beskriven i modellen eller inte. Med bakgrund av föregående resonemang kan turbulensparametrarnas rekommenderade värden behållas i beräkningar (om inte mätdata för platsen finns att tillgå).

Standardvariationer av vind och temperatur är också två parametrar som inte varierar mer än marginellt vid beräkningar. Om informationen finns att tillgå så ska den såklart användas, men i annat fall kan de i modellbeskrivningen rekommenderade värdena behållas vid beräkning.

Många parametrar kräver kunskap och vägledning

Ett problem med Nord2000-modellen är det som också skulle kunna vara dess styrka nämligen det stora antalet parametrar. Om användaren av Nord2000 har en god kännedom om att modellen gör opålitliga beräkningar vid uppåtrefraktion kan sådana tillfällen undvikas. För att undvika dessa situationer krävs det dock att användaren dessutom har tillräckliga kunskaper om meteorologi, vilken gör att modellen för många blir svårhanterlig. Riktlinjer kring de vanligaste orsakerna till uppåtrefraktion är ett verktyg till hur man kan säkerställa att modellen används på ett korrekt sätt. Om en oerfaren användare räknar fram låga nivåer utan att ifrågasätta varför, riskerar förtroendet för modellen att sjunka. Lämpligen görs fler beräkningar med små variationer av de misstänkta parametrarna i de fall en ljudnivå under den förväntade har räknats fram. Genom att göra en serie med beräkningar kan också en bättre uppfattning om områdets ljudmiljö uppnås, än om endast enstaka värden beräknas.

I och med att Naturvårdsverket i sin nya reviderade rapport om ljud från vindkraftverk nämner Nord2000 som en lämplig beräkningsmetod, borde de också ange med tydliga riktlinjer om hur den ska användas. Annars finns risken att den används på fel sätt vilket kan sänka förtroendet för modellens giltighet. I skriften står det också att Nord2000 är att rekommendera då mottagare ligger uppströms ett vindkraftverk relativt den härsknande vindriktningen, dvs. att det råder motvind. Den här rapporten visar däremot på motsatsen, nämligen att Nord2000 är direkt olämplig att använda i motvindsberäkningar.

7 Slutsats

Nord2000-modellen är ett lämpligt verktyg att använda vid beräkningar av ljud från vindkraftverk, under förutsättning att användaren förstår parametrarnas betydelse. Beräknade värden bör alltid kontrolleras mot vanlig sfärisk utbredning, och ifrågasättas i de fall ett mycket avvikande värde räknas fram. Med utgångspunkt från beräkningar i Nord2000 gjorda för olika typer av väder kan en bild av ljudnivåns variation beskrivas. Detta kan användas för att ge en större förståelse och förhoppningsvis leda till en mindre irritation över ljud orsakat av vindkraftverk hos berörda personer.

Meteorologiska förhållanden som leder till uppåtrefraktion av ljudstrålarna ska undvikas i beräkningar. Två vanliga parametrar som leder till uppåtrefraktion är motvind och negativ temperaturgradient i kombination med svag vind.

Då beräkningar med Nord2000 görs för platt terräng ger inte de meteorologiska parametrarna de variationer i ljudnivå som mätningar visar på. I kuperad terräng däremot uppstår väderberoende variationer men hur väl de stämmer överens med verkligheten måste kontrolleras ytterligare mot mätningar. Den lilla jämförelse som är gjord mellan mätning och beräkning visar dock att överensstämmelsen ser relativt god ut, under förutsättning att uppåtrefraktion undviks.

Naturvårdsverket måste ge klara riktlinjer om vilka förutsättningar som gäller när Nord2000 ska användas i beräkningar, annars riskerar man att modellen används på fel sätt och förtroendet för den sjunker.

7.1 Framtida arbete

För att Nord2000-modellen ska uppnå sin fulla potential behöver den förbättras på vissa håll. I dagens läge kan endast en linjär ljudhastighetsprofil approximeras, vilket leder till att många meteorologiska situationer som leder till låga eller höga ljudnivåer inte kan beräknas. En förbättring vore att kunna dela upp modellen i horisontella skikt, där meteorologin specificeras för varje enskilt skikt. Då skulle även Low Level Jets, fokuseringspunkter samt stora temperaturgradienter nära marken kunna simuleras.

Modellen behöver också valideras vidare med mätningar i kuperad terräng för att justeringar i ekvationerna rörande dessa fall ska kunna göras.

Litteraturförteckning

Ackerman, S. & Knox, J. (2003). *Meteorology; understaning the atmosphere*. Pacific Grove, CA: Cole Pub. Co.

Chen, D. & Johansson, B. (2003). *Temperaturens höjdberoende: en studie i Indalsälvens avrinningsområde*. Norrköping: Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut.

Crocker, M. J. (2007). *Handbook of noise and vibration control*. Hoboken, N.J: John Wiley, cop.

DELTA. (den 19 december 2008). *DELTA Acoustics*. Hämtat från Project report Low Frequency Noise from Large Wind Turbines: www.delta.dk den 18 december 2008

DELTA. (2002). *Nord2000 Nordic Environmental Noise Prediction Methods Summary Report*. Hämtat från Delta Acoustics: www.delta.dk/Nord2000 den 8 december 2008

Energimyndigheten. (2008). *Främjande av vindkraft - Mål och förutsättning*. Hämtat från Energimyndigheten: www.energimyndigheten.se den 09 december 2008

EWEA. (2008). *The European Wind Associations Strategic Research Agenda 2008-2030*. Hämtat från The European Wind Associations: www.ewea.org den 9 december 2008

Granå, L. (Januari - Juni 2009). (J. Thorén, Intervjuare)

GWEC. (2009). *Wind power statistics 2008*. Hämtat från Global Wind Energy Council: <http://www.gwec.net> den 10 februari 2009

Hallberg, J. (den 29 november 2007). *Ljudlandskap*. Hämtat från Impedans: www.ljudlandskap.acoustics.nu/ljudbok den 26 mars 2009

Jónsson, G. & Jacobsen, F. (Mars/April 2008). A Comparison of Two Engineering Models for Outdoor Sound Propagation: Harmonoise and Nord2000. *Acta Acustica undited with Acustica*, 94, ss. 282-289.

Larsson, C. (2006). *Bullerutbredning*. Uppsala: Uppsala Universitet. Institutionen för geovetenskaper.

Liljequist, G. (1985). *Kompendium: Meteorologi*. Uppsala: Uppsala Universitet.

Naturvårdsverket. (2001). *Ljud från vindkraftverk, rapport 6241*. Stockholm: Naturvårdsverket.

Naturvårdsverket. (2009). *reviderad version av Ljud från vindkraftverk*. Hämtat från www.naturvardsverket.se den 10 mars 2009

Ostashev, V. (1997). *Acoustics in moving inhomogenous media*. London: E & FN Spon.

Pedersen, E. (2007). *Human Response to wind turbine noise: perception, annoyance and moderating factors*. Göteborg: Department of Public Health and Community Medicine.

Pedersen, E. & Forssén, J. (2009). Mätdata: ljudmätningar från vindkraftverk samt meteorologiska data. *ej publicerade mottagna via e-mail* .

Regeringen. (oktober 2008). *Miljöprocessutredningen*. Hämtat från Regeringen: www.regeringen.se den 10 februari 2009

Salomons, E. M. (2001). *Computational atmospheric acoustics*. Dordrecht: Kluwer Academic, cop. .

SINTEF. (1997). *Definition and preliminary Acoustical Classification of Ground Types N2000 Sub-project 1997-7*. Trondheim: Stiftelsen för industriell og teknisk forskning ved NTH.

SINTEF. (1999). *Some effects of using linear sound speed profiles in outdoor sound propagation calculations*. Trondheim: Stiftelsen for industriell og teknisk forskning ved NTH.

Sveriges Provningsinstitut. (den 11 oktober 2006). *Svensk vindenergi*. Hämtat från http://www.vindenergi.org/underlag/ljudseminarium/gustafson_vindkraftseminarium.pdf den 20 februari 2009

van der Berg, G. (2004). Effects of the wind profile at night in wind turbine sound. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)* , 277 (4-5), 955-70.

Wizelius, T. (2007). *Vindkraft i teori och praktik*. Lund: Studentlitteratur.

Appendix

A. Parametrar

Beskrivning av de parametrar som går att variera i exSound följer nedan:

Markparametrar

Benämning	Index (enhet)	Beskrivning
1. Ground type	GT	Ett mått på markens egenskaper
1a Ground class	(A-G)	Då endast mjuk eller hård mark kan definieras används bokstäverna D och G
1b Ground type	σ (Nsm ⁻⁴)	Numeriskt värde kopplat till bokstäverna.
2. Ground roughness		Ett mått på markens råhet (skrovlighet)
2a. Roughness class	Nil, Small, Medium, Large	
2b. Ground roughness	(m)	Anges med ett värde mellan 0 och 1.

Ljudkälla

Benämning	Index (enhet)	Beskrivning
Duration	(s, min, h, days)	Källans ”tid”
Direction	(°)	Ljudkällans placering relativt mottagare
Source correction	dB	
Reference time	(s, min, h, days)	

Meteorologiska parametrar

Benämning	Index (enhet)	Beskrivning
Height of wind	Z (m)	Den höjd som vinden är mätt på.
Wind speed	U(z) (m/s)	Medelvind på den specifika höjden
Roughness length	Z ₀ (m)	Beror av markens egenskaper.
Wind direction	(°)	Anger från vilket håll det blåser
Standard deviation of wind speed	(m/s)	Standardavvikelse från medelvind, beror av markens egenskaper.
Temp. at ground	(K) eller (C)	
Temp gradient	(°/m)	Temperaturskillnad med höjden
Standard deviation of Temp. gradient	(°)	Rekommenderat värde 0
Turbulence strength, wind	C _v ² (m ^{4/3} s ⁻²)	Rekommenderat värde 0,12
Turbulence strength, temp.	C _t ² (Ks ⁻²)	Rekommenderat värde 0,008
Relative humidity	(%)	

Zon-indelning

Benämning	Index (enhet)	Beskrivning
nQ skog	nQ (m ⁻¹)	Sammanvägning av densiteten och storlek av skog
Densitet av skog	n'' (m ⁻²)	
Stamdiameter	d (m)	Medeldiametern av trädens stammar
Mean height	(m)	Zonens medelhöjd
Absorption coefficient		Mått på medelenergi-absorptionskoefficienten

B. Ljuddata vindkraftverk (Sound power)

Ljuddata i dB(A) från följande vindkraftverk har används.

- Enercon, E82 2MW,
 - diameter 82 m, höjd 98 m.
- Vestas, V90 3MW,
 - diameter 90 m, höjd 80 m. (Från Source dB version 1.1 (databas från Imagine-projekt). (Lisa Granå))
- Siemens SWT-2.3-93, 2,3 MW
 - Lwa, ref 107,0 dBA vid 8m/s vid 10 meters höjd. ANSATS: höjd 90 m

Ljudnivåer från Enercon och Siemens hämtades angivna i 1/3-tersband, varvid ljudnivåer för ”samtliga” frekvenser har räknats ut enligt formel: -4,8 dB

Ljudnivåer för de tre lägsta frekvenserna har för dessa två vindkraftverk satts till 70dB, då detta kan ses som en rimlig nivå.

De framräknade samt angivna nivåerna i dB(A) har räknats om till dB för att kunna matas in i exSound.

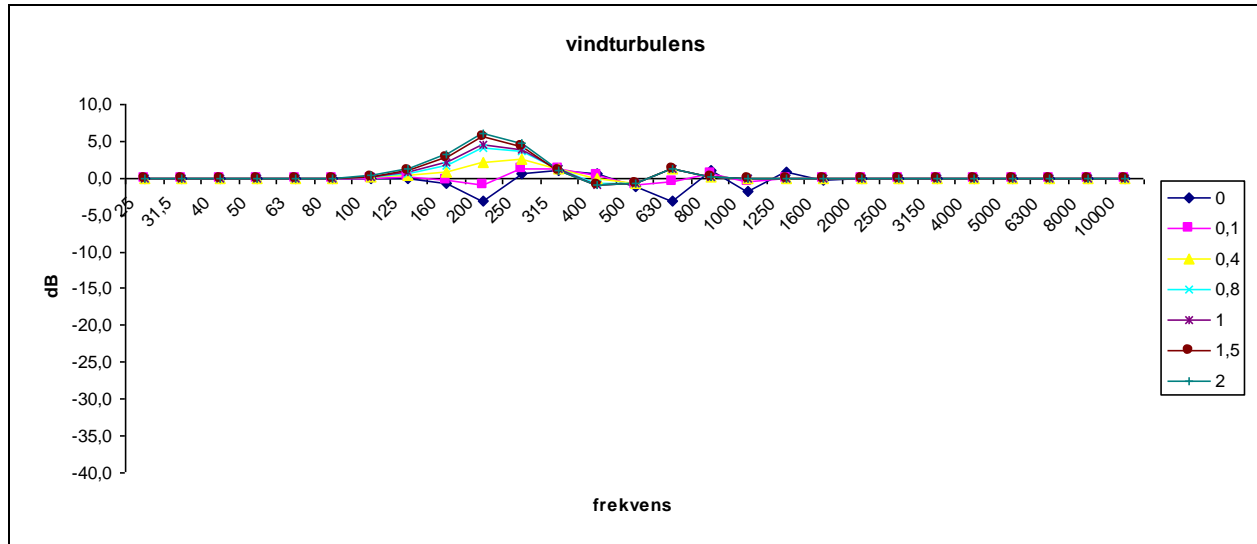
	Enercon	E 82	Vestas	V90	Siemens	SWT 2.3 -93
Hz	dB(A)	dB	dB(A)	dB	dB(A)	dB
25	70*	114,7	71,1	115,8	70*	114,7
31,5	70*	109,4	71,1	110,5	70*	109,4
40	70*	104,6	71,1	105,7	70*	104,6
50	78,5	108,7	80,3	110,5	81,5	111,7
63	78,5	104,7	80,3	106,5	81,5	107,7
80	78,5	101	80,3	102,8	81,5	104
100	85,9	105	87,8	106,9	90,5	109,6
125	85,9	102	87,8	103,9	90,5	106,6
160	85,9	99,3	87,8	101,2	90,5	103,9
200	88,7	99,6	93,2	104,1	97,2	108,1
250	88,7	97,3	93,2	101,8	97,2	105,8
315	88,7	95,3	93,2	99,8	97,2	103,8
400	92,0	96,8	95,2	100	97,8	102,6
500	92,0	95,2	95,2	98,4	97,8	101
630	92,0	93,9	95,2	97,1	97,8	99,7
800	93,7	94,5	92,2	93	94,2	95
1000	93,7	93,7	92,2	92,2	94,2	94,2
1250	93,7	93,1	92,2	91,6	94,2	93,6
1600	88,5	87,5	88,8	87,8	90,2	89,2
2000	88,5	87,3	88,8	87,6	90,2	89
2500	88,5	87,2	88,8	87,5	90,2	88,9
3150	76,8	75,6	80,5	79,3	85,4	84,2
4000	76,8	75,8	80,5	79,5	85,4	84,4
5000	76,8	76,3	80,5	80	85,4	84,9

6300	71,9	72	68,8	68,9	80,6	80,7
8000	71,9	73	68,8	69,9	80,6	81,7
10000	71,9	74,4	68,8	71,3	80,6	83,1
Total	102,5*		104,1*		107,0*	

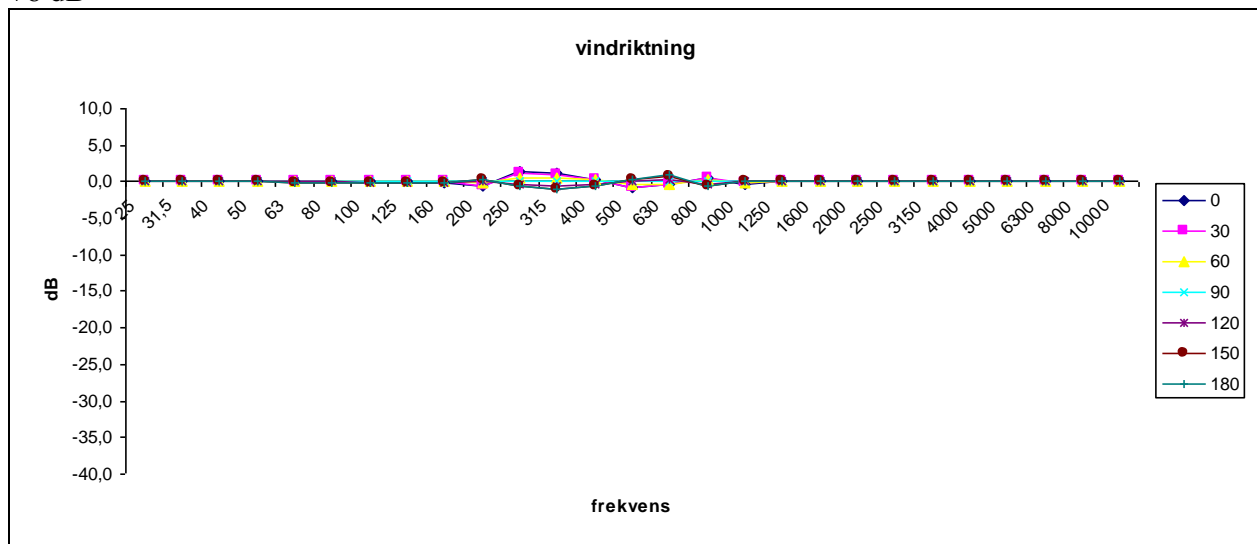
*uträknad enligt: $L_{p_{tot}} = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{L_{p_m}/10}$

C. Underlag till parametrarnas frekvensberoende

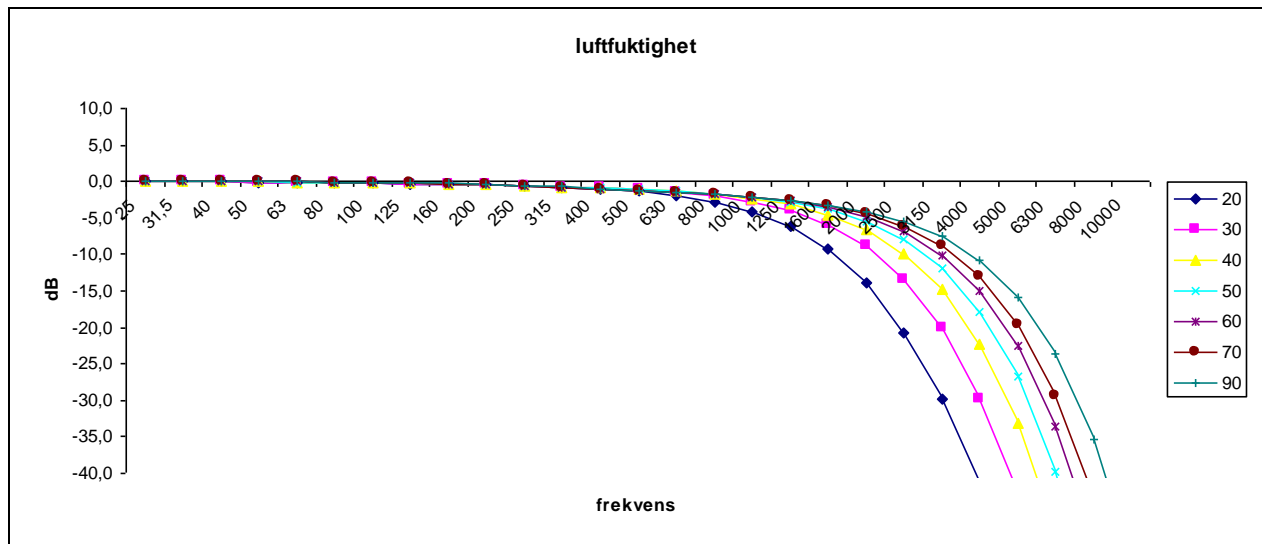
Sammanställning av resulterande ljudnivåer i tersband. Redovisade som avvikelse från geometrisk spridning, parameter för parameter.



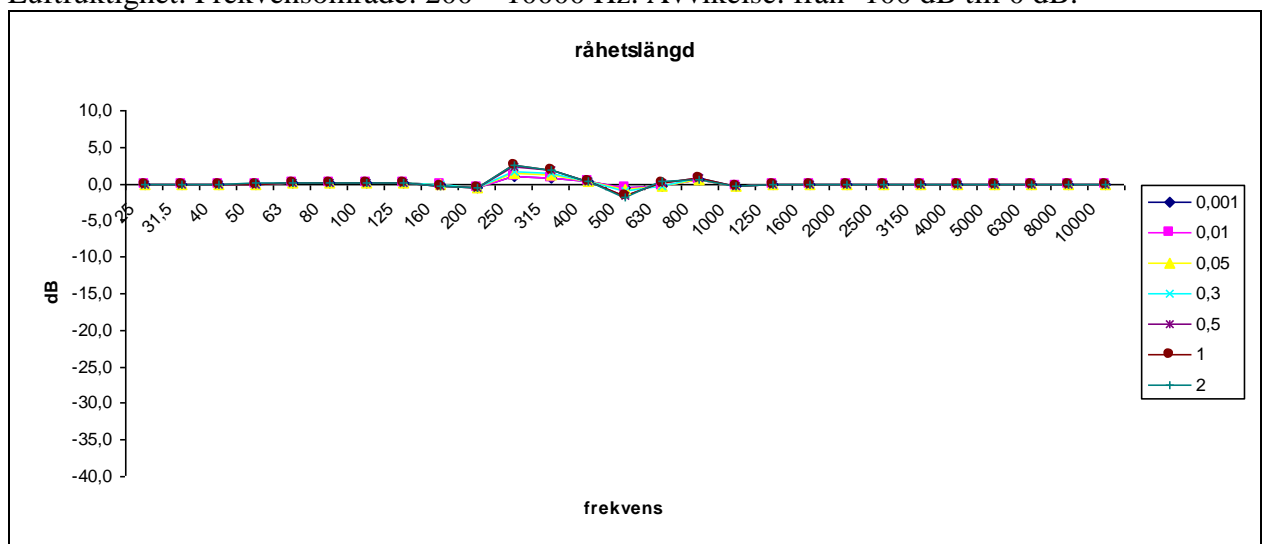
Mekanisk turbulens (Vindturbulens). Frekvensområde: 100 – 1600 Hz. Avvikelse: från -3 dB till +6 dB



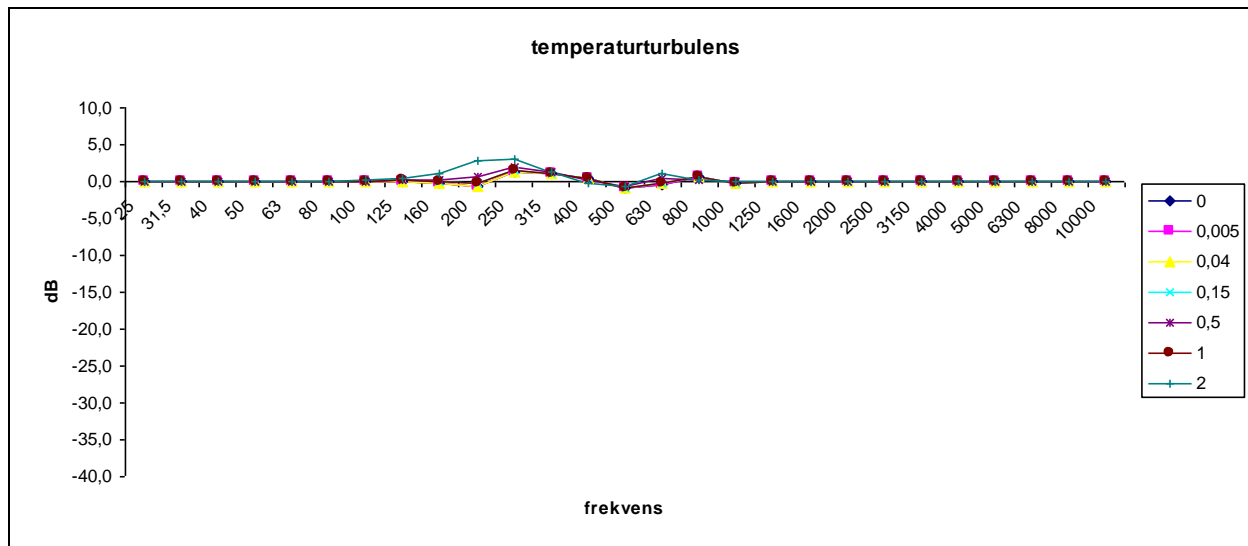
Vindriktning. Frekvensområde: 200 – 1000 Hz. Avvikelse: från -1 dB till +2 dB



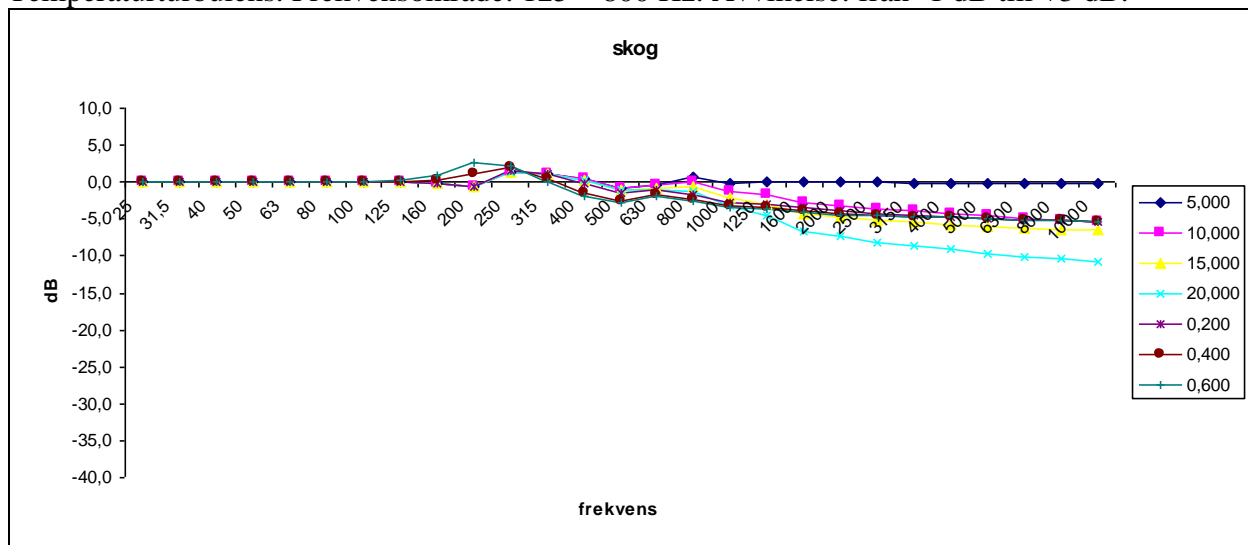
Luftfuktighet: Frekvensområde: 200 – 10000 Hz. Avvikelse: från -100 dB till 0 dB.



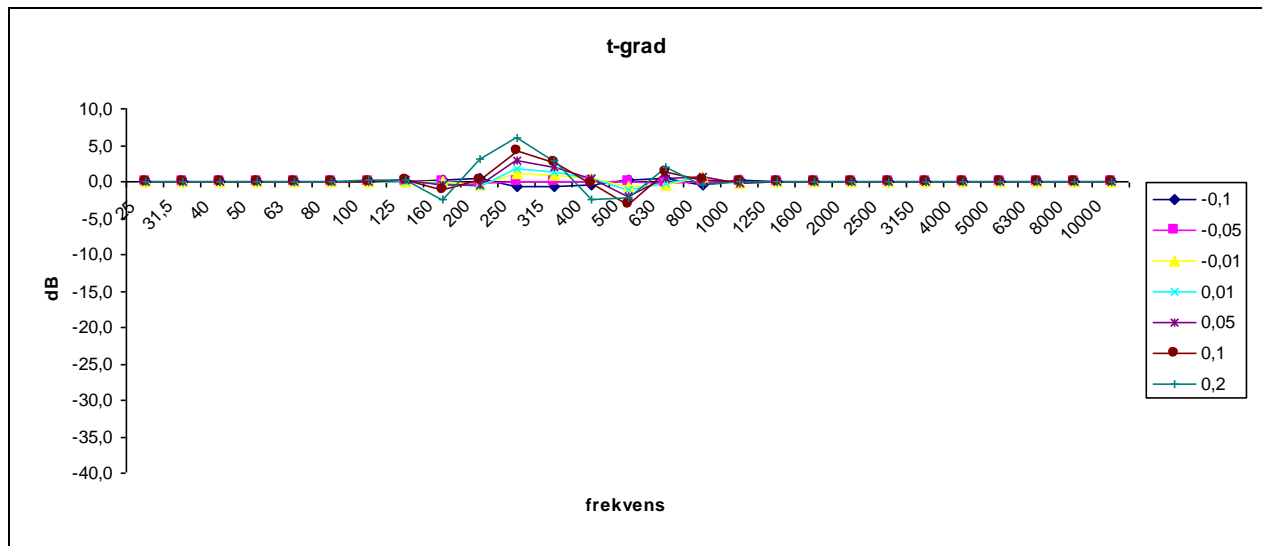
Råhetslängd: Frekvensområde: 200 – 1000 Hz. Avvikelse: från -2 dB till + 3 dB



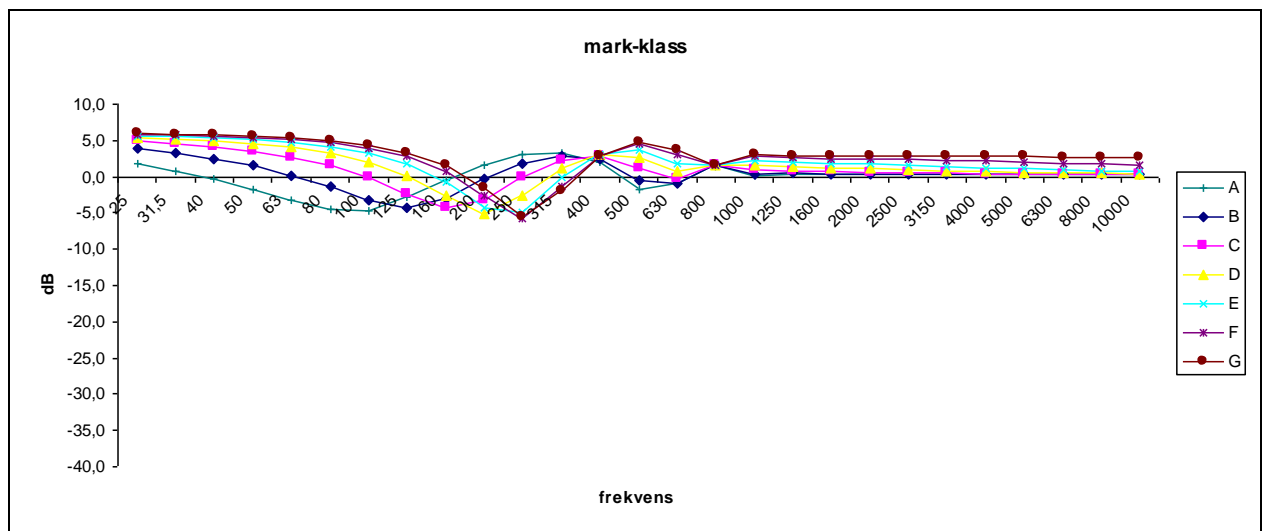
Temperaturlurbulens. Frekvensområde: 125 – 800 Hz. Avvikelse: från -1 dB till +3 dB.



Skog. Frekvensområde: 125 – 10000 Hz. Avvikelse: från -11 dB till +3 dB.



Temperaturgradient. Frekvensområde: 125-1000 Hz. Avvikelse: från -3 dB till +6 dB



Mark-klass (Impedans). Frekvensområde: 0- 10000 Hz (framför allt 0-1000 Hz). Avvikelse: från -6 dB till +6 dB.