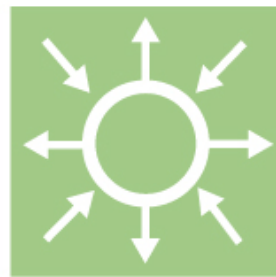


Prediktering av vindkraftsbuller baserad på
detaljerad meteorologisk och geografisk
information

Elforsk rapport 09:01



B L Andersson, K Bolin, A Cederholm, I Karasalo

Januari 2009

Prediktering av vindkraftsbuller baserad på detaljerad meteorologisk och geografisk information

Elforsk rapport 09:01

Förord

Denna rapport utgör slutrapportering för projektet Prediktering av Vindkraftsbuller (V-233) som genomförts inom ramen för det grundläggande programmet inom forskningsprogrammet Vindforsk.

Projektet har finansierats av Energimyndigheten som projekt P 30560-1.

Målsättningen med projektet har varit att utvärdera tillförlitligheten hos prediktion av bullerutbredning med avancerade metoder, som utnyttjar detaljerade data om geografi och aktuella atmosfärsförhållanden och beräknar ljudfältet genom direkt numerisk lösning av de styrande ekvationerna. Prediktion av bullernivåer med sådan metodik blir noggrannare och återger bullrets variationer med tiden på ett realistiskt sätt, och ger därmed bättre underlag för tillståndsprovningar vid projektering av vindkraftsanläggningar.

Projektet har genomförts i samarbete mellan Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) och Marcus Wallenberg Laboratoriet (MWL) för Ljud och Vibrationsforskning på KTH, där FOI har ansvarat för projektledningen.

Värdefulla synpunkter har lämnats av projektets referensgrupp: Sten Ljunggren, Professor emeritus, KTH/ Institutionen för Byggvetenskap, (Sten.Ljunggren@byv.kth.se), samt Hans Ohlsson, WPD Scandinavia AB, (h.ohlsson@wpd.se).

Stockholm januari 2009

Anders Björck

Programledare Vindforsk II

Sammanfattning

Denna rapport beskriver metodik och resultat från en modellbaserad analys av ljudutbrednings- och atmosfärsdata insamlat i Vindforsk projektet TRANS. Avsikten med analysen är att utvärdera noggrannheten hos avancerade metoder för bullerprediktion som utnyttjar detaljerade data om geografi och aktuella atmosfärsförhållanden till att beräkna ljudfältet genom direkt numerisk lösning av de styrande ekvationerna.

Resultaten styrker att prediktioner av ljudutbredning med metoder av ovannämnt slag blir noggranna och återger bullrets variationer med tiden på ett realistiskt sätt. Sådana metoder bör därmed kunna användas för noggranna prediktioner av t.ex. årsmedelvärden, extremvärden eller annan statistik för bullerutbredning från vindkraftverk. Resultaten visar vidare att den använda atmosfärsmodellen måste inkludera en beskrivning av turbulent vind, för att predikterade bullernivåer i perioder av ljudskugga inte skall bli orealistiskt låga.

Summary

This report describes methodology and results from a model-based analysis of sound transmission and atmospheric data collected in the Vindforsk project TRANS. The purpose of the analysis is to assess the accuracy of advanced methods for noise prediction in which detailed data on the local geography and atmospheric conditions is used for computation of the soundfield by direct numerical solution of the governing equations.

The results confirm that sound propagation predictions with methods of the above mentioned type are accurate and reproduce observed variations of the noise level as function of time in a realistic way. Methods of this type should thus be applicable for prediction of annual averages, extreme values or other statistics of noise propagation from wind power plants. The results show further that the employed atmospheric model must include a description of turbulent wind to ensure predicted noise levels to remain realistically high during periods of sound shadow.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Mätdata	2
3	Atmosfärmodell, utvärderingsmetod	4
4	Metod för beräkning av ljudutbredning	5
5	Resultat	7
6	Slutsatser	11
7	Referenser	12

1 Inledning

Denna rapport utgör slutrapportering för projektet Prediktering av Vindkraftsbuller (V-233) [1], som genomförts inom ramen för forskningsprogrammet Vindforsk [2]. Projektet har genomförts i samarbete mellan Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI) och Marcus Wallenberg Laboratoriet (MWL) för Ljud och Vibrationsforskning på KTH, där FOI har ansvarat för projektledningen.

Buller är idag ett stort miljöproblem och utgör en av de största utmaningarna i samhället för framtiden. Den tekniska utvecklingen bidrar till en mera effektiv energiproduktion, men också till att nya utmaningar på miljösidan behöver belysas och då speciellt buller från vindkraftverk. Vissa länder har redan idag detaljerade regleringar på detta område, däribland Sverige [3], men för att dessa regleringar ska kunna efterlevas finns ett behov av mera tillförlitliga mät- och predikteringsmetoder och rekommendationer för dessa.

I Sverige har Naturvårdsverket rekommenderat den s.k. standardmodellen [3], som används idag för bedömning av vindkraftsbuller. Denna modell är relativt enkel att använda, men tar inte hänsyn till de varierande och ofta komplicerade väder- och markförhållanden som råder i praktiken. Variationer i väder- och markförhållanden påverkar ljudutbredningen i atmosfären, vilket kan resultera i att predikterade bullernivåer med standardmodellen, i jämförelse med de verkliga, kan bli missvisande.

Målsättningen med detta projekt har varit att utvärdera tillförlitligheten hos prediktion av bullerutbredning med mera avancerade metoder, som utnyttjar detaljerade data om geografi och aktuella atmosfärsförhållanden och beräknar ljudfältet genom direkt numerisk lösning av de styrande ekvationerna. Prediktion av bullernivåer med sådan metodik blir noggrannare och återger bullrets variationer med tiden på ett realistiskt sätt, och ger därmed bättre underlag för tillståndsprovningar vid projektering av vindkraftsanläggningar.

Utvärderingen har genomförts genom modellbaserad analys av mätdata insamlad i Vindforsk projektet TRANS [4] under en vecka i juni 2005. Mätdata omfattar dels transmissionsförluster för ljudutbredning från Utgrundens fyr till Hammarby på Öland, dels meteorologiska data från sonderingar vid Hammarby samt från mastmonterade sensorer vid Utgrunden. Analysen utgörs av prediktioner av medelvärde och varians för transmissionsförlusten och jämförelse av prediktionerna med mätdata. Vid prediktionerna har atmosfärsfältet ansatts att vara sammansatt av ett horisontellt invariant fält överlagrat med ett turbulent vindfält, och statistiken för predikterade transmissionsförluster bildas genom Monte Carlo simuleringar i vilka ljudfältet beräknas för 50 slumpmässiga realiseringar av det turbulenta vindfältet vid varje hel timma från 15/6 kl 09:00 till 21/6 kl 21:00, 2005.

2 Mätdata

Mätdata som ligger till grund för analysen har hämtats från ett fältförsök som genomfördes 15-21 juni 2005 [4]. Generellt inträffar majoriteten av bullerstörningar från vindkraftverk under sommarperioden då utomhusaktiviteter är som vanligast och oftast kopplade till semester. Studier visar dessutom att sannolikheten för att jetströmmar/lokala vindmaxima (jmf. eng. low level jets) inträffar på låg höjd är störst under sommarhalvåret. Dylika meteorologiska förhållanden påverkar ljudutbredningen genom att fånga ljudet i en kanal mellan marken och höjden av lokala vindmaxima och därmed minskas spridningen av ljudet [5].

Fältförsöket genomfördes i Kalmarsund och på Öland. Två olika slags högtalare placerades på Utgrundens fyr 9 km från land och på höjden 30 m. Mottagarantennen placerades på Öland 750 m från kusten, 7 m ovanför havsnivån. Den första källan producerade ljud kring frekvensen 80 Hz, medan den andra källan producerade ljud kring 200 och 400 Hz (grundton och första övertonen). Högtalarna var riktade mot mottagarplatsen. Vid varje mätning genomfördes referensmätningar med mikrofoner placerade 1 m framför respektive högtalare. Källstyrkan var 113 dB från 80 Hz-högtalaren och 130 dB från 200 Hz- och 400 Hz-sirenen. Högtalarna varierade med 1 % i frekvens och så mycket som 20 dB i källstyrka [4]. Som mottagarantenn användes åtta halvtumsmikrofoner placerade i en rad parallellt med riktningen mot fyren. Mikrofonerna placerades 1,7 m ovanför marken. Avståndet mellan mikrofonerna var 40 cm för att optimera riktningsdiagrammet på den akustiska antennen för 200 Hz-ljudet.

Meteorologiska data registrerades genom radiosondering och teodolitföljning av ballonger vid Hammarby samt av sensorer på en 90 m hög meteorologisk mast vid Utgrundens fyr. Data från Utgrunden inkluderade de horisontella vindhastighetkomponenterna (u, v), temperaturen (T) och den relativa luftfuktigheten (h). Data från Hammarby inkluderade även lufttrycket (p). Atmosfärdata används sedan för att beräkna den effektiva ljudhastigheten, som är summan av ljudhastigheten i luft och vindhastighetens komponent i utbredningsriktningen [6]. En mer detaljerad genomgång av fältförsöket och beskrivning av signalbehandlingen återfinns i slutrapporteringen av TRANS-projektet genomfört inom ramen för Vindforsk [4].

I projektets initialskede anskaffades kompletterande atmosfärdata via FM METOCC från SMHIs arkiverade körningar av prognosmodellen HIRLAM [7] under mätveckan. Dessa data utgörs av tabeller av (p, T, h, u, v) för var tredje timma i de fyra hörnen av den cell i (den dåvarande) HIRLAM-gridden som innehåller Utgrunden och Hammarby. Avsikten var att som del av det nuvarande projektet utvärdera om kvaliteten hos HIRLAM-data är tillräcklig för noggranna lokala bullerprediktioner. En sådan utvärdering är motiverad då bullerprediktion baserad på HIRLAM-data skulle erbjuda ett antal fördelar:

- HIRLAM-data finns tillgängliga på en rikstäckade grid, varför bullerprediktion kan göras vid valfri plats utan krav på tidskrävande och kostsamma lokala meteorologiska mätningar.

- HIRLAM-data beskriver atmosfärsvariationer som funktion av tre rumskoordinater, och möjliggör bullerprediktioner där effekten av sådana variationer inkluderas på ett realistiskt sätt.
- HIRLAM-modellen underhålls och vidareutvecklas fortlöpande vilket gör att kvaliteten på HIRLAM-data successivt förbättras, genom större rums- och tidsupplösning, förbättrade metoder för modellering av atmosfärsdynamiken och för dataassimilation.
- Arkiverade HIRLAM-data kan användas för t.ex. statistiska undersökningar av bullerutbredningen som funktion av årstid och vädertyp, och för kartläggning och kvantifiering av maximala bullernivåer.

En utvärdering av HIRLAM-baserad bullerprediktion visade sig dock inte rymmas i den tillgängliga budgetramen, och den genomförda analysen har därför baserats enbart på atmosfärsdata från TRANS-projektets mätningar vid Hammarby och Utgrunden.

3 Atmosfärmodell, utvärderingsmetod

Ljudutbredningsmodellering kräver atmosfärsindata i form av ljudhastighet, absorption och täthet som funktioner av horisontella avståndet r till källan och höjden z i vertikalplanet genom käll- och mottagarpunkterna. Dessa kan beräknas – under antagande om nära horisontell ljudutbredning och måttlig vindhastighet [6, Kap. 4.3 och B5] - ur de primära atmosfärsstorheterna lufttryck p , temperatur T , relativ fuktighet h , och de horisontella vindhastighetskomponenterna u och v .

Vid bullerprediktionerna har följande antaganden gjorts för att beräkna fullständiga atmosfärsfält ur mätdata från Hammarby och Utgrunden:

- Atmosfärsfältet är sammansatt av ett horisontellt invariant fält överlagrat med ett turbulent vindfält.
- Det avståndsoberoende atmosfärsfältets parametrar som funktion av höjd och tid bestäms ur radiosond- och vindballongdata vid Hammarby, interpolerade i höjd- och tidsled.
- Det turbulenta vindfältet är en realisering av ett stationärt stokastiskt fält. Vindfältets vågtalsspektrum är summan av två termer proportionella mot varianserna av vindhastigheten respektive temperaturen [6]. Dessa varianser erhålls från mätdata från den meteorologiska masten vid Utgrunden interpolerade till aktuell tidpunkt.

Med denna atmosfärmodell är också ljudhastighetsfältet i atmosfären och ljudfältet som genereras av källan stokastiska fält, och transmissionsförlusten (TL) från källan till mottagaren en stokastisk variabel. Utvärderingen har gjorts genom att beräkna statistik från Monte Carlo-simuleringar av den predikterade transmissionsförlusten för 50 slumpmässiga realiseringar av det turbulenta vindfältet varje hel timma under mätperioden, och jämföra prediktionernas medelvärde och spridning med mätdata.

4 Metod för beräkning av ljudutbredning

Projektet har haft tillgång till programvaror utvecklade vid FOI för ett antal etablerade och väl utprovade metoder för beräkning av ljudutbredning i skiktade media som atmosfären eller havsvatten. Dessa programvaror inkluderar en strålgångsmetod (XRAY [8]), en parabolisk-vågekvationsmetod (Jeltsch Energy-conserving PE Method, JEPE [9]), en normal-modmetod och en transformintegralmetod (XFEM [10]). I projektet har vidare implementerats en snabb version av en PE-metod skraddarsydd för atmosfärsutbredning, Green's Function Parabolic Equation Method (GFPE) av Gilbert och Di [11]. GFPE har implementerats dels i högnivåspråk, dels i FORTRAN som en ny modul i programmet JEPE. Samtliga metoder är implementerade för exekvering i multiprocessormiljö under MPI.

Av ovannämnda metoder är normal-mod- och transformintegralmetoderna tillämpbara endast när geometri och medieparametrar kan ansättas att vara avståndsberoende. PE-metoderna JEPE och GFPE är tillämpbara i svagt avståndsberoende media och kan hantera utbredning med elevationsvinklar upp till en metodberoende gräns som för JEPE är ca 15° , 32° , 64° beroende på val av diskretiseringsschema. Strålgångsmetoden medger beräkning av ljudfält i avståndsberoende media men kan ha sämre noggrannhet vid låga frekvenser och klarar inte korrekt prediktion av ljudnivåer i ljudfältets skuggzoner. Beräkningstiden för strålgångsmetoden är frekvensberoende medan den för de övriga metoderna växer snabbt med frekvens.

Några karakteristika för ljudutbredningen under mätperioden är

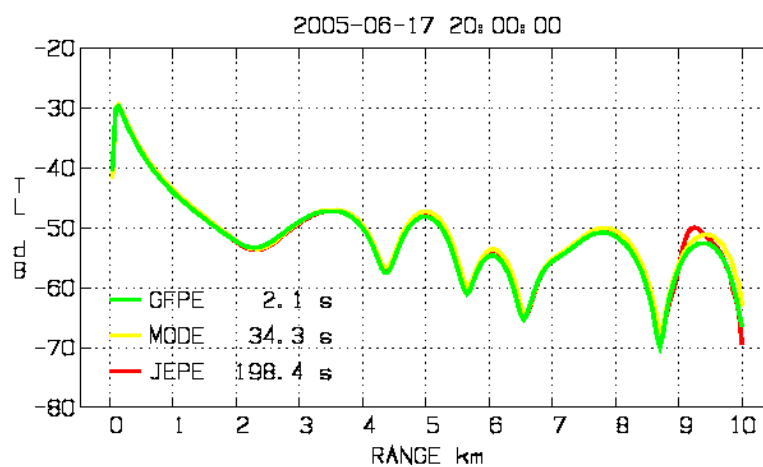
- Väderförhållandena var sådana att mottagaren under sammanlagt ca två tredjedelar av mätveckan låg i ljudskugga pga en uppåt avtagande effektiv ljudhastighet.
- Geometrin är svagt avståndsberoende mellan strandlinjen och mottagaren.
- Ljudhastighetsfältet är avstånds- och höjdberoende då vindfältet modelleras som turbulent.
- Impedansen vid nedre randen är avståndsberoende då den har olika värden för havsyta respektive mark.

Med dessa ljudfältskarakteristika är enligt ovan en PE-metod det lämpligaste valet vid de måttliga frekvenser (upp till 400 Hz) som använts vid TRANS-projektets mätningar.

Figur 1 nedan visar en jämförelse mellan dels predikterad TL till havsytan och marken vid 80 Hz som funktion av avstånd till källan, dels beräkningstider för normal-modmetoden samt PE-metoderna JEPE och GFPE. Geometri- och atmosfärsfält har approximerats att vara avståndsberoende med atmosfärsdata erhållna från mätningarna i Hammarby interpolerade till 17 juni kl 20:00. De predikterade TL-värdena ses överensstämma väl medan beräkningstiderna för normal-mod respektive JEPE är ca 16 respektive 94

gänger längre än den för GFPE. Bullerprediktionerna i utvärderingen har därför genomförts med GFPE-metoden.

Modellen för det turbulenta vindfältet beskrivs i Salomons [6, Appendix I och J], och medger val mellan två typer av vågtalsspektra, von Karman spektrum respektive Gaussiskt spektrum. Turbulensmodeller av denna typ kan implementeras i PE-metoder som en höjd- och avståndsberoende fasfaktor i metodens propagator, utan att beräkna det turbulenta vindfältet explicit [6]. På detta sätt kan Monte Carlo-simuleringar av den predikterade transmissionsförlusten genomföras på ett effektivt och beräkningsmässigt enkelt sätt.

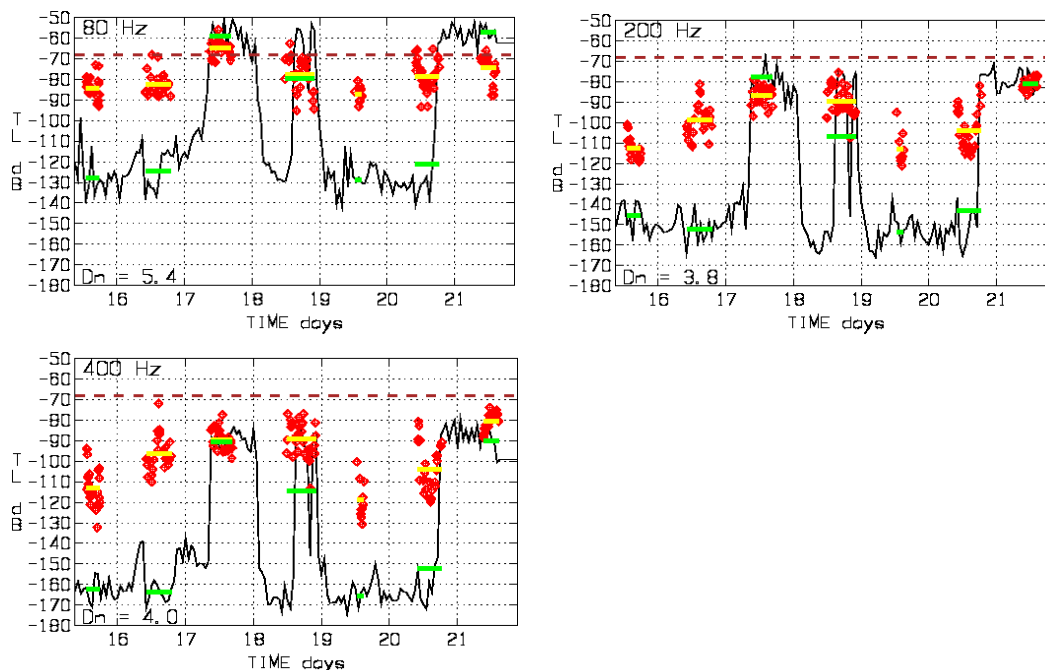


Figur 1: TL till havsytan och marken vid 80 Hz som funktion av avstånd till källan predikterad med JEPE (röd), normal-mod (gul) och GFPE (grön), samt exekveringstiden i sekunder för respektive metod.

5 Resultat

De svarta kurvorna i Figur 2 visar den predikterade transmissionsförlusten (TL) under mätveckan under antagandet att vindfältet är fritt från turbulens (laminärt), med atmosfärsdata beräknade ur radiosond- och vindballongdata vid Hammarby genom interpolation i höjd- och tidsled på tidigare beskrivet sätt. De röda romberna visar mätdata och de gula och gröna horisontella linjestyckena är medelvärden av uppmätt respektive predikterad TL inom mätperioderna respektive dag. De streckade bruna linjerna är transmissionsförlusten enligt naturvårdverkets standardmodell, med brytpunkten mellan sfärisk och cylindrisk utbredning satt till 700 m enligt resultat från TRANS projektet [4]. I figurerna visas vidare värdet av ett normerat mått D_n av skillnaden mellan predikterad och uppmätt TL, definierad som medelvärdet över de sju mätdagarna av kvoten mellan avståndet mellan den gula och den gröna linjen dividerat med standardavvikelsen för dagens mätdata.

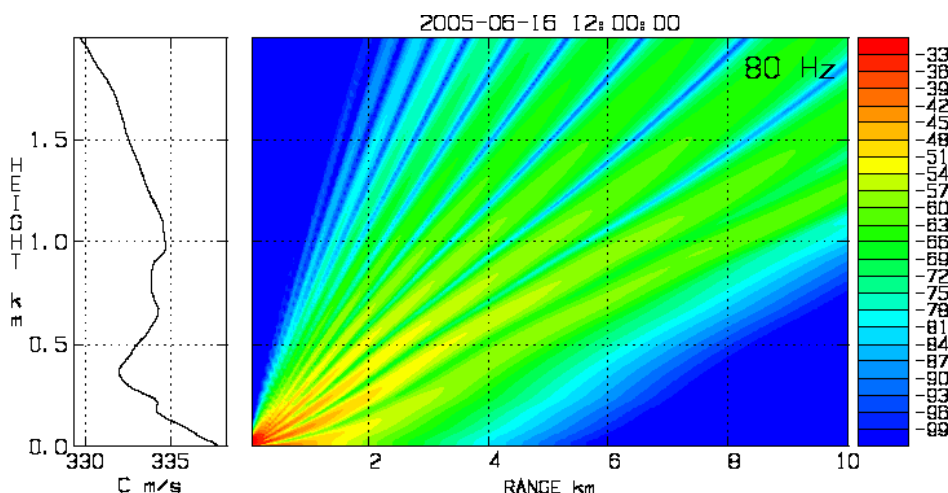
Man noterar att den predikterade transmissionsförlusten för varje frekvens växlar mellan två nivåer åtskilda med ca 60-70 dB och vidare att prediktionerna av de höga nivåerna överensstämmer rimligt väl med mätdata medan de låga predikterade nivåerna systematiskt underskattar mätdata med ca 30-60 dB.



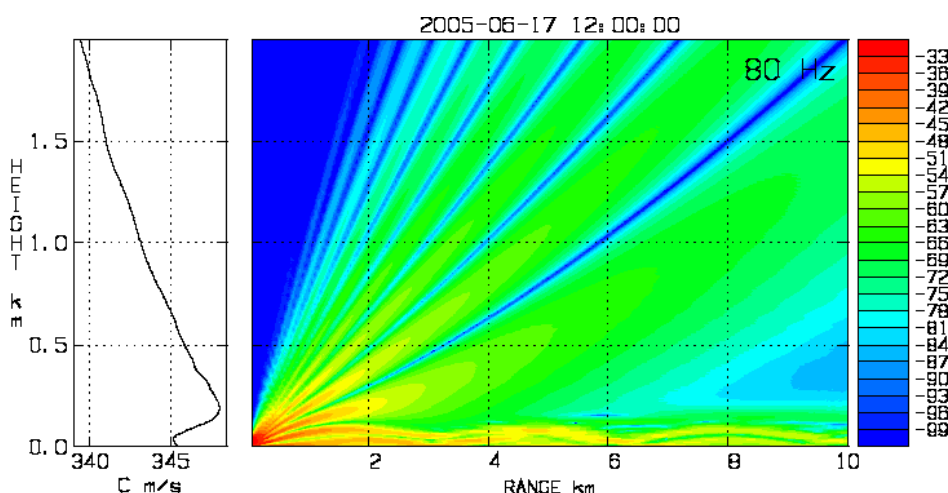
Figur 2: Svart: Predikterad TL under mätveckan med laminärt vindfält enligt data vid Hammarby. Röd: Uppmätt TL. Gul och grön: Medelvärden av uppmätt respektive predikterad TL bildade över mätperioderna under respektive dag.

De låga ljudnivåerna i Figur 2 uppträder i väderlägen då den effektiva ljudhastigheten avtar monotont eller nära monotont med höjden upp till några

hundra meters höjd. Det utsända ljudet böjs då av uppåt och mottagaren hamnar i ljudskugga, som framgår i Figur 3 som visar ljudhastighetsprofil och predikerat ljudfält vid frekvensen 80 Hz den 16:e juni kl 12:00. De höga ljudnivåerna i Figur 2 uppstår när ljudhastigheten som funktion av höjden har ett minimum nära källhöjden, så att källan ligger i en ljudkanal och den geometriska utbredningsförlusten blir endast cylindrisk. Enligt Figur 2 rådde ett sådant väderläge bl.a. under en stor del av dygnet den 17 juni, vilket illustreras i Figur 4 som visar ljudhastighetsprofilen och det predikerade ljudfältet vid 80 Hz den 17:e juni kl 12:00.



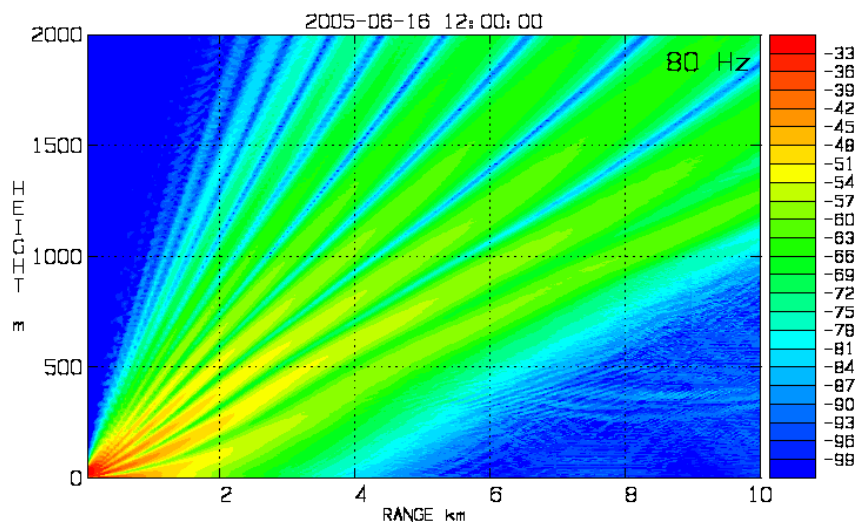
Figur 3: Effektiv ljudhastighetsprofil och ljudfält kl 12 den 16:e juni. Uppåt avtagande ljudhastighet, ljudskugga vid mottagaren. Vindfältet modellerat som laminärt.



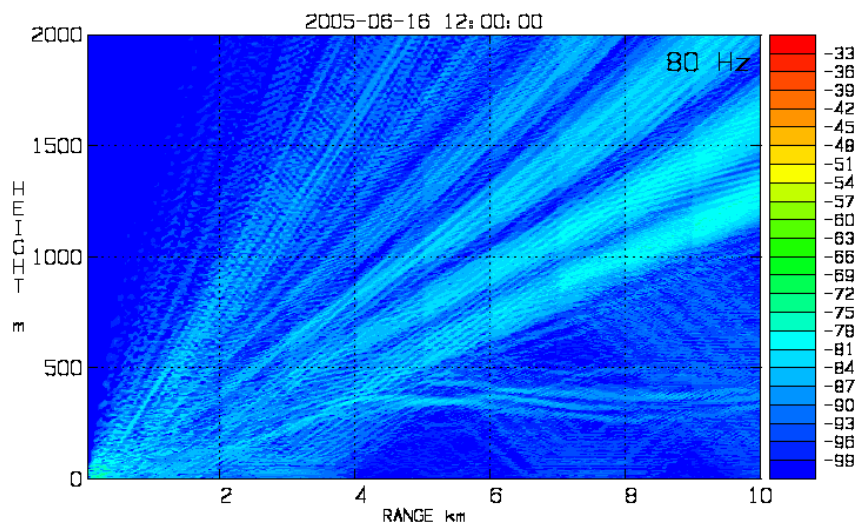
Figur 4: Effektiv ljudhastighetsprofil och ljudfält kl 12 den 17:e juni. Ljudkanal upp till ca 200 m höjd ger cylindrisk utbredning till mottagaren. Vindfältet modellerat som laminärt.

Figurerna 5 och 6 illustrerar effekten på ljudfältet i Figur 3 av att ett turbulent vindfält adderas till det laminära fältet den 16:e juni kl 12:00. Turbulensen inducerar slumpmässiga variationer i ljudhastigheten som funktion av avstånd och höjd med längdskalor som bestäms av det turbulenta vindfältets

vågtalespektrum. Effekten av sådana inhomogeniteter är att en liten andel av ljudenergin sprids i slumpmässiga riktningar varigenom ljudnivån i en skuggzon kan öka signifikant i dB, dvs ökningen är stor relativt den mycket låga nivån i skuggzonen vid laminärt vindfält.



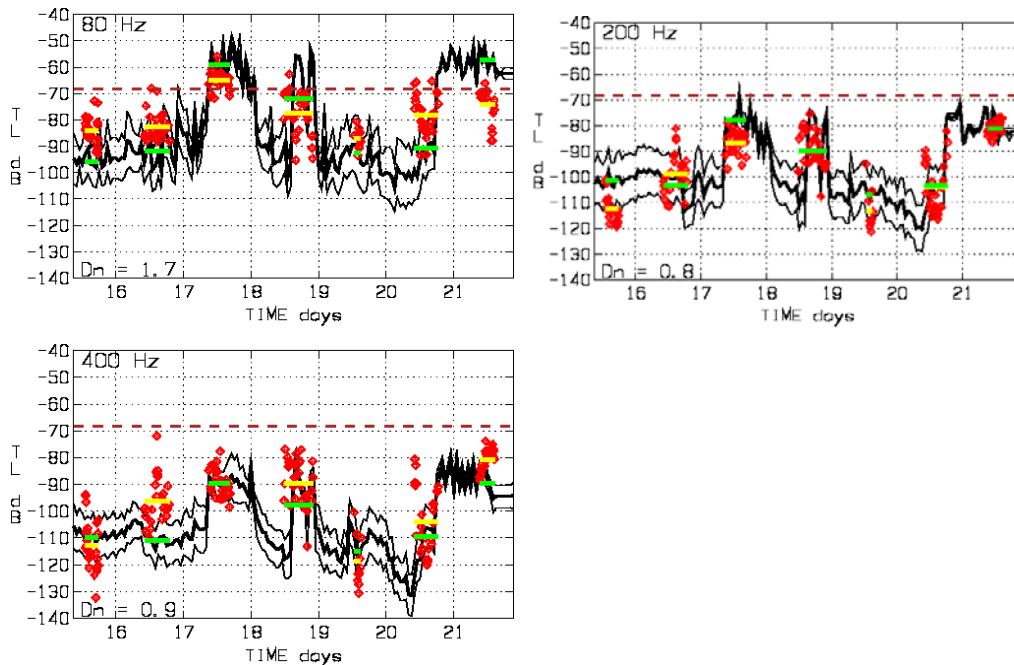
Figur 5: Ljudfältet kl 12:00 den 16:e juni när vindfältet modelleras som turbulent.



Figur 6: Det av turbulens spridda ljudfältet: Skillnaden mellan fältet i Figur 5 och fältet i Figur 3.

I Figur 7 jämförs den uppmätta transmissionsförlusten med modellprediktioner under antagandet att vindfältet är turbulent, med turbulensen modellerad på ovan beskrivet sätt. De tjocka svarta kurvorna visar medelvärdet av den predikterade transmissionsförlusten över 50 slumpmässiga realiseringar av det turbulenta vindfältet vid varje hel timma under mätperioden från 15/6 09.00 till 21/6 21.00, 2005. De tunna svarta kurvorna visar medelvärdet \pm standardavvikelsen och har inkluderats för att visa spridningen av den predikterade transmissionsförlusten, dvs de illustrerar känsligheten hos transmissionsförlusten m.a.p. små störningar av vindfältet.

Storheten D_n i Figur 7 är ett normerat mått av skillnaden mellan predikerat TL-medelvärde och uppmätt TL definierat på samma sätt som i Figur 2.



Figur 7: Tjock svart: Medelvärdet av den predikerade transmissionsförlusten över 50 slumpmässiga realiseringar av ett turbulent vindfält vid varje hel timma under mätveckan; Tunn svart: Medelvärdet \pm standardavvikelsen hos predikerad TL. Röd: Uppmätt TL. Gul och grön: Medelvärden av uppmätt respektive predikerad TL bildade över mätperioderna under respektive dag.

Ur en jämförelse mellan figurerna 2 och 7 framgår att den mest framträdande effekten av turbulens är en signifikant höjning av de låga ljudnivåerna, vilken uppstår genom att inhomogeniteterna ('turbulerna') sprider ljudet i slumpmässiga riktningar så att ljudfältets skuggregioner blir mindre distinkta, jfr Figur 5 och 6. Turbulensens inverkan på de höga ljudnivåerna - vid perioder av cylindrisk utbredning - är som väntat liten då absolutvärdet av den turbulenta termen i ljudfältet är litet jämfört med maxvärdet hos ljudfältet vid laminärt vindfält.

Man noterar att överensstämmelsen med mätdata därigenom har signifikant förbättrats, och är rikligt god i hela mätperioden för samtliga frekvenser. De största avvikelserna uppträder vid middagstid 16/6 och 20/6.

6 Slutsatser

Projektets huvudresultat illustreras i Figur 7. Slutsatserna är i sammandrag:

- Resultaten styrker att prediktion av ljudutbredning med metoder som utnyttjar detaljerade meteorologiska och geografiska data blir noggranna och återger bullrets variationer med tiden på ett realistiskt sätt.
- Resultaten indikerar att sådana metoder kan användas för noggranna prediktioner av t.ex. årsmedelvärden, extremvärden eller annan statistik för bullerutbredning från vindkraftverk.
- Resultaten visar att atmosfärsmodellen måste inkludera en beskrivning av turbulent vind – och bullerprediktionsmetoden måste kunna hantera motsvarande avstånds- och höjdberoende ljudhastighetsfält – för att prediktioner av bullernivåer i ljudskuggor inte skall bli orealistiskt låga, se Figur 2.
- Noggrannheten i miljödata (meteorologiska och geografiska data) är avgörande för noggrannheten i predikterade bullernivåer.

En frågeställning som projektet inte behandlat är noggrannheten hos bullerprediktioner baserade på atmosfärsdata från HIRLAM-modellen. Sådana prediktioner skulle erbjuda intressanta fördelar vid en tänkt operationell användning av bullerprediktionsverktyg av den typ som utvärderats här, se kapitel 2 Mätdata ovan. En utvärdering av HIRLAM-baserad bullerprediktion vore därför väl motiverad.

7 Referenser

- [1] Vindforsk, Ansökan om forskningsstöd, Prediktering av vindkraftsbuller baserad på detaljerad meteorologisk och geografisk information, fortsättning, FOI diarienummer 07-772, 2007.
- [2] Vindforsk, Programbeskrivning Vindforsk 06-08, Version 2007-02-14, 2007.
- [3] Naturvårdsverket, Energimyndigheten och Boverket. Ljud från vindkraftverk, Rapport 6241, 2001.
- [4] M. Boué, Long-range outdoor sound propagation over sea, Applications to wind turbine noise, TRITA-AVE 2007:22, KTH, 2007.
- [5] L. Johansson, Sound propagation around off-shore wind turbines, Licentiatavhandling, KTH, 2003.
- [6] E.M. Salomons, Computational atmospheric acoustics, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [7] P. Undén, et. al, HIRLAM-5 Scientific Documentation, <http://hirlam.org>, december 2002.
- [8] B.L. Andersson, A. Cederholm, I. Karasalo, U. Tengzelius, Modelling of long-range noise propagation in the atmosphere, Proceedings of the 8th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics, Heraklion, Crete, p. 229-237, 2007.
- [9] I. Karasalo, A. Sundström, JEPE- a high-order PE-model for range-dependent fluid media, Third European Conference on Underwater Acoustics, FORTH-IACM, Heraklion, Greece, p. 189-194, 1996.
- [10] I. Karasalo, Exact finite elements for wave propagation in range-independent fluid-solid media, Journal of Sound and Vibration, 172(5), p. 671-688, 1994.
- [11] K.E Gilbert, X. Di, A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere, Journal of Acoustical Society of America 94 (4), p. 2343-2352, 1993.