

NV dnr 382-6897-07 Rv

Ljud från vindkraftverk

Reviderad utgåva av rapp 6241

Koncept
26 feb 2009

Beställningar:

Naturvårdsverket

Tel 08-698 10 00, fax 08-20 29 25
E-post: resistrator@naturvardsverket.se
Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm
Internet: www.naturvardsverket.se

Rapport: Ljud från vindkraftverk
ISBN 91-620-...-7

Beräkningsmodell i Excel "Ljud från landbaserade vindkraftverk"
ISBN 91-620-6249-2

Beräkningsmodell i Excel "Ljud från havsbaserade vindkraftverk"
ISBN 91-620-6250-2

Förord

I föreliggande rapport beskrivs utifrån aktuell kunskap, olika aspekter på ljud från vindkraftverk. Det gäller hur det alstras, utbreder sig, maskeras och kan åtgärdas. I rapporten redovisas också modeller för hur ljud från vindkraftverk bör beräknas i olika situationer och vilken precision och osäkerhet som finns vid beräkningen. De nu redovisade modellerna bygger på material som ursprungligen fanns i ”Buller från vindkraftverk”, bilaga 3 [S. Ljunggren och G. Lundmark] och som sedan bearbetades och kompletterades av prof. Sten Ljunggren, Institutionen för Byggnadsteknik, KTH, och som 2001 gavs ut som Naturvårdsverkets rapport 6241, Ljud från vindkraft .

Modellerna i rapporten finns också som användarvänliga program för beräkning i Excel, framtagna av Gunnar Lundmark, Lundmark Akustik & Vibration.

Inför denna nya utgåva av rapporten har revideringen av modellen för utbredning till havs gjorts av professor Mats Åbom, KTH. Det nya maskeringsavsnittet har skrivits av teknisk licentiat Karl Bolin, KTH. Teknisk doktor Martin Almgren, ÅF Ingemansson, har slutligen bidragit med kompletteringar av olika slag. Den nya, reviderade, ”Ljud från vindkraftverk”, rapport 5933, ersätter den gamla rapporten.

Rapporten ges ut gemensamt av Naturvårdsverket, Energimyndigheten och Boverket.

Stockholm i februari 2009

Kerstin Cederlöf
Direktör

Ulf Troedsson
Överdirektör

Birgitta Palmberger
Avdelningschef

Naturvårdsverket

Boverket

Energimyndigheten

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----------|
| FÖRORD | 3 |
| SAMMANFATTNING | 7 |
| LJUDALSTRING | 8 |
| AERODYNAMISKT LJUD..... | 8 |
| MEKANISKT LJUD | 8 |
| LJUDDATA | 8 |
| KARAKTÄR PÅ LJUDET FRÅN VINDKRAFTVERK | 9 |
| <i>Rena toner</i> | 9 |
| <i>Amplitudmodulering</i> | 10 |
| <i>Lågfrekventdunkande ljud</i> | 10 |
| <i>Infraljud</i> | 10 |
| BESTÄMNING AV LJUDDATA FÖR ETT VINDKRAFTVERK | 10 |
| OMRÄKNING AV LJUDDATA TILL AKTUELL PLATS..... | 11 |
| LJUDUTBREDNING | 12 |
| GEOMETRISK UTBREDNINGSDÄMPNING | 12 |
| VINDFÖRHÅLLANDEN – VINDGRADIENT - MARKDÄMPNING | 12 |
| TEMPERATURFÖRHÅLLANDEN (TEMPERATURGRADIENT) | 13 |
| ABSORPTION I LUFTEN | 14 |
| LJUDUTBREDNING ÖVER VATTEN PÅ STORA AVSTÅND..... | 15 |
| VARFÖR HÖRS BULLERKÄLLOR SÅ TYDLIGT PÅ NATTEN? | 16 |
| MASKERING | 18 |
| BERÄKNING AV LJUDIMMISSION | 21 |
| PRECISION OCH SÄKERHETSMARGINAL | 21 |
| EN TILLBAKABLICK | 22 |
| BESTÄMNING AV AKTUELL LJUDEFFEKTIVÅ | 22 |
| BERÄKNING AV LJUDUTBREDNING..... | 25 |
| <i>Ljudutbredning över land på avstånd upp till 1000 m</i> | 25 |
| <i>Ljudutbredning över land på avstånd över 1000 m</i> | 25 |
| <i>Ljudutbredning över hav</i> | 26 |
| SAMTIDIG LJUDIMMISSION FRÅN FLERA AGGREGAT | 27 |
| EXEMPEL PÅ LJUDBERÄKNINGAR | 28 |
| LANDBASERAT AGGREGAT, KORT AVSTÅND | 28 |
| LANDBASERAT AGGREGAT, LÅNGT AVSTÅND | 29 |
| HAVSBASERADE AGGREGAT | 29 |
| DATA SOM BEHÖVS | 31 |
| ALLMÄNT | 31 |
| MASKINUPPGIFTER..... | 31 |
| BERÄKNINGAR OCH REDOVISNINGAR..... | 31 |

| | |
|---|-----------|
| KONTROLL OCH ÅTGÄRDER VID BEFINTLIGA VERK | 33 |
| EMISSIONSMÄTNINGAR..... | 33 |
| IMMISSIONSMÄTNINGAR | 33 |
| MÖJLIGHETER MINSKA LJUD FRÅN BEFINTLIGT VINDKRAFTVERK | 33 |
| <i>Efterhandsåtgärder för att sänka ljudnivån.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Sänkning av varvtal eller begränsning av drifttid</i> | <i>34</i> |
| <i>Inverkan av naturligt vindbrus på subjektiva störningar.....</i> | <i>34</i> |
| BILAGA 1. NÅGRA AKUSTISKA BEGREPP..... | 35 |
| LJUD - BULLER - INFRALJUD..... | 35 |
| LJUDNIVÅ | 35 |
| ADDITION AV LJUDNIVÅER | 37 |
| FREKVENSSPEKTRA | 38 |
| LJUDEFFEKTIVÅ..... | 39 |
| REFERENSER..... | 40 |

Sammanfattning

I kapitel ”Ljudalstring” beskrivs hur ljud från vindkraftverk alstras och vilken karaktär ljudet har. Här berörs också hur ljudet från ett aggregat kan bestämmas och hur ljuddata kan omräknas till en viss plats. I kapitlet ”Ljudutbredning” redovisas hur ljud från vindkraftverk sprids i omgivningen under olika förhållanden exempelvis markens beskaffenhet och påverkan från vind och temperatur. Även topografin påverkar ljudutbredningen, men i de förenklade beräkningsmodellerna angivna i denna rapport, försummas den inverkan. Topografiska höjdskillnader ger oftast en sänkning av ljudnivån, men kan i enstaka fall med konkava terrängtyper ge en höjning med några decibel. I kapitlet ”Maskering” diskuteras under vilka förhållanden ljud från vindkraftverk kan maskeras av andra ljud i omgivningen exempelvis brus från träd.

I kapitel ”Beräkning av ljudimmission från vindkraftverk” redovisas beräkningsmodeller för ljudimmission. För markbaserade vindkraftverk redovisas två modeller, en för korta och en för långa avstånd. För havsbaserade aggregat redovisas en modell som är framtagen för ljudutbredning på stora avstånd. De presenterade modellerna förväntas ge i genomsnitt rätt värde för de givna förutsättningarna, varför ingen säkerhetsmarginal ingår i beräkningsformlerna. Exempel på tillämpning av modellerna redovisas i kapitlet ”Exempel på ljudberäkningar”.

I kapitlet ”Redovisning av ljudimmission kring vindkraftverk – vilka data behövs?” listas vilka uppgifter, som behövs för att göra en beräkning av ljudutbredning för ett visst verk på en viss plats. Här anges också hur dessa beräkningar kan presenteras. I kapitlet ”Kontroll och åtgärder vid befintliga verk” anges vilka uppföljande mätningar som kan göras vid befintliga verk. Olika åtgärder för att minska störningar berörs också.

I Bilaga 1 förklaras några akustiska begrepp och ljud från vindkraftverk jämförs med andra ljudkällor.

Ljudalstring

Vindkraftverk alstrar dels aerodynamiskt ljud som framför allt kommer från bladen (ett svischande ljud), dels mekaniskt ljud från främst växellådan (ett skorrande mekaniskt ljud, ibland med hörbara toner). Det har förekommit att även generator, kraftelektronik, kylfläktar och pumpar gett ljud med tydliga toner. Mekaniska ljud och ljud från generator etc är numera sällsynta.

Aerodynamiskt ljud

Hos moderna serietillverkade aggregat är normalt det aerodynamiska ljudet från bladen dominerande. Det bestäms i huvudsak av bladspetsastigheten, bladens form (inte minst bakkantens tjocklek) och turbulensen i luften. Det aerodynamiska ljudet har ungefär samma karaktär som naturligt vindbrus. Det är därför inte ovanligt att ljudet från ett vindkraftverk vid kraftig vind överröstas av det naturliga vindbruset från träd och buskar och därigenom blir omöjligt att uppfatta. Detta fenomen kallas maskering.

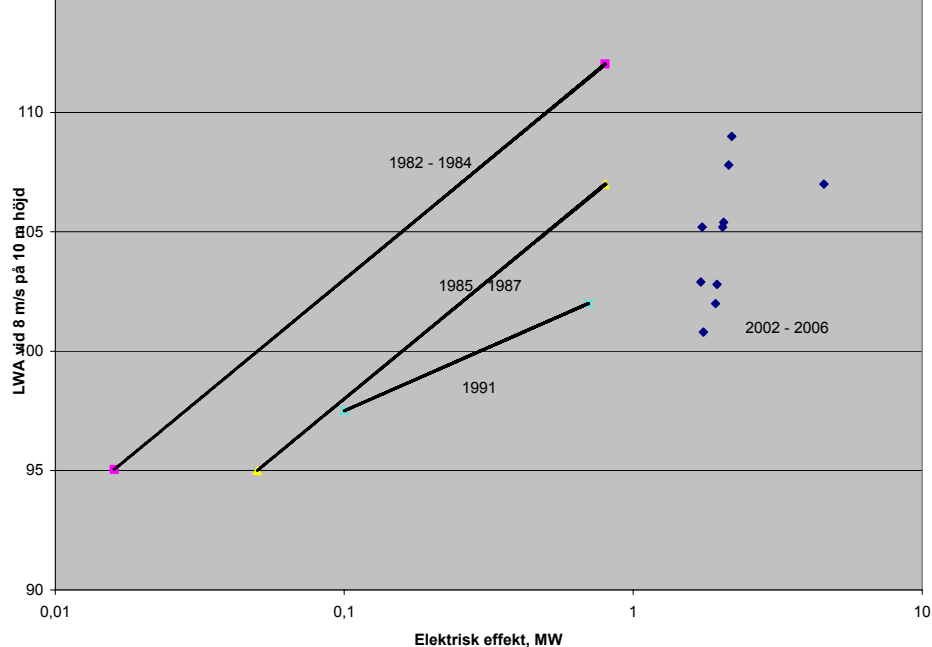
Mekaniskt ljud

Mekaniskt ljud är normalt svagare än det aerodynamiska ljudet, men upplevs ofta som mer störande eftersom det har en helt annan karaktär än vindbruset. Det mekaniska ljudet bestäms till stor del av detaljkonstruktionen av växel, infästningar mm.

Ljudutstrålningen kan ske via maskinhus och torn (speciellt när tornet är utformat som en stålcyllinder) samt i vissa fall via nav och blad. Då det gäller förekomst av mekaniskt ljud är vindkraftverk av olika fabrikat erfarenhetsmässigt olika. Moderna serietillverkade aggregat ger sällan problem med mekaniskt ljud. För vindkraftverk placerade i havet kan mekaniska ljud fortplantas ut i vattnet, men ljudet är ofta svagt i förhållande till ljud från fartyg och naturligt förekommande undervattensljud.

Ljuddata

Tillverkare av vindkraftverk kan normalt redovisa och garantera ljuddata i form av en ljudeffektnivå, $L_{WA, ref}$. Ljudeffekten bestäms vid olika vindhastigheter i navhöjd. Ofta anges ljudeffekten vid den vindstyrka som motsvarar 8 m/s på höjden 10 m. I vindkraftbranschen används ofta ordet källjud istället för ljudeffektnivå för att särskilja det från ljudtrycksnivå. Förklaringar av de akustiska fackuttrycken finns i Bilaga 1 i slutet av denna rapport. I figur 1 redovisas av fabrikanter redovisade ljudeffektnivåer som funktion av den elektriska märkeffekten för vanliga vindkraftverk d.v.s. aggregat med horisontell axel och med rotorn på uppströmssidan av tornet. De redovisade kurvorna är regressionslinjer som erhållits från mätta värden på ett antal aggregat och där mätningarna är gjorda på samma sätt. Regressionslinjerna är framtagna vid olika tillfällen och man ser i diagrammet en tydligt sjunkande tendens för ljudeffektnivån. En jämförelse mellan de båda övre kurvorna visar sålunda att nivån i genomsnitt sjönk med 5 dB under den aktuella treårsperioden. Dessa båda kurvor har erhållits från mätningar utförda i Danmark och avser därför troligen enbart danska aggregat. Ljudeffektnivåerna märkta 2002 – 2006 är resultat av ljudemissionsmätningar utförda enligt IEC 61400-11 [IEC] och är relaterade till verklig elektrisk uteffekt.



Figur 1 Utveckling hos vindkraftverkens ljudalstring. Figuren visar A-vägd ljudeffektnivå som funktion av elektrisk uteffekt vid 8 m/s på 10 m höjd. Den övre heldragna kurvan avser aggregat mätta 1982-84; den heldragna kurvan därunder aggregat mätta 1985-87 [M. Ohlrich, J. Jakobsen och B. Andersen]. Den heldragna kurvan därunder är framtagen år 1991 med hjälp av fabrikantuppgifter [S. Ljunggren och Gunnar Lundmark, 1995]. Värdena märkta 2002 – 2006 är fabrikantuppgifter mätta enligt referens [IEC] sammanställda av Martin Almgren, ÅF-Ingemansson 2008.

Vindkraftverk idag, 2009, regleras normalt med både bladvinkelinställning (pitchreglering) och varvtalsreglering. Reglering kan ofta göras för att ge en lägre ljudalstring på bekostnad av den elektriska effekten. När det är vindstilla står rotorn stilla. När vinden börjar blåsa finns mät- och regleringssystem som vrider turbinhuset med rotorn så att den vänds mot vinden och rotorn börjar snurra. Vid en vindhastighet om 3 – 4 m/s börjar vindkraftverket producera elektrisk ström och ljudet kan bli märkbart intill vindkraftverket. Ljudemissionen ökar med ökande vindhastighet upp till 8, 9 eller 10 m/s. Däröver kan ljudemissionen sjunka något eller vara konstant vid ökande vindhastigheter. När vindhastigheten blir mycket hög, kanske 22 – 24 m/s stängs elproduktionen av och rotorn bromsas in för att minska risken för skada.

Karaktär på ljudet från vindkraftverk

En dominerande del av ljudet i ett vindkraftverk är av aerodynamiskt ursprung och alstras vid bladens passage genom luften. Detta ljud är av bredbandig karaktär och upplevs vanligen som ett svischande ljud. Ljudet kan beskrivas som ett bredbandigt brus där det mest framträdande frekvensområdet är 63 – 4000 Hz. Fysikaliskt har ljudet stora likheter med det ljud som alstras av vinden i vegetation av olika slag. Ofta förekommer också amplitudmodulationer och sällsynt ett dunkande ljud vid vindkraftverk, se vidare nedan.

Tidigare har det inte varit ovanligt att vindkraftverk alstrar hörbart maskinellt ljud. Detta ljud hade då vanligen sitt ursprung i växellådan. Hörbart maskinellt ljud har fysikaliskt karaktären av rena toner vilket ofta upplevs som ett malande ljud. Maskinellt ljud är i dag ovanligt vid serietillverkade aggregat.

Rena toner

Förekomst av ”rena toner” eller tydligt hörbara tonkomponenter är negativt på flera sätt. Framför allt upplevs dessa som mer störande än "normalt" ljud. Det kan, även om det numera är ganska sällsynt, inträffa att vindkraftverk alstrar buller i form av rena toner. Detta är inte något

speciellt för vindkraftverk, utan kan också förekomma exempelvis utanför bullriga industrier. I Naturvårdsverkets skrift ”Externt industribuller – Allmänna råd” [Naturvårdsverket, 1983] anges därför att om ljudet innehåller ofta återkommande impulser eller hörbara tonkomponenter skall kraven på ljudnivå skärpas med 5 dB(A)-enheter. Denna skärpning är aktuell även för vindkraftverk, se Naturvårdsverkets vägledning.

Närvaro av rena toner kan också ha en annan negativ effekt. Ljud som innehåller rena toner är nämligen lätta att uppfatta även vid närvaro av annat ljud. Detta medför därför att ljud från ett vindkraftverk som innehåller rena toner inte så lätt maskeras av det naturliga vindbruset.

För ett otränat öra kan det vara svårt att avgöra om ett ljud innehåller rena toner eller ej. Det finns därför en objektiv metod för detta i ljudemissionsmätningens standarden enligt IEC [IEC] eller i ISO 1996-2:2007 bilaga C. Analysen av tonernas hörbarhet ska ske för ljud vid bostaden eller annat ljudkänsligt område. Med ISO 1996-2 beräknas ett tillägg K_t som läggs till uppmätt ljudnivå. Ett tillägg på 5 dB motsvarar en sänkning av riktvärdet med 5 dBA, t ex från 40 till 35 dBA vid förekomst av rena toner. Om det beräknade tillägget blir mindre än 5 dB motsvarar det sänkning av riktvärdet på motsvarande sätt. Tillägg större än 5 dB bör inte tillämpas.

Amplitudmodulering

På korta avstånd från ett aggregat varierar alltid aggregatets styrka med tiden allteftersom bladen roterar. Ofta är ljudnivån som högst när ett av bladen är som närmast lyssnaren eller när ett blad sveper ner genom luftlager med olika vindhastighet. Denna typ av s k amplitudmodulation kan också inträffa på större avstånd. Mycket litet är känt om hur viktig denna effekt är i praktiken. Det är dock sannolikt att modulationen ökar ljudets hörbarhet och därmed minskar möjligheten till maskering och tenderar att göra ljudet mer störande.

Lågfrekvent dunkande ljud

Det är väl känt att vindkraftverk, på vilka rotorn är placerad i lä om tornet kan ge ett kraftigt lågfrekvent dunkande ljud. Aggregat med läplacerad rotor är därför mycket sällsynta numera. Gjorda studier har visat att även vissa aggregat med lovartplacerad rotor kan ge likartade störningar [K.P. Shepherd och H. H. Hubbard]. Europeiska maskintillverkare är medvetna om detta och därför är detta fenomen sällsynt i Sverige.

Infraljud

Mätningar av infraljudsnivåerna från normala typer av vindkraftaggregat har visat på så låga nivåer att de är helt utan betydelse ur störningssynpunkt för människor [H. Remmers och K. Betke samt Leventhall].

Bestämning av ljuddata för ett vindkraftverk

Det finns flera metoder för hur man bestämmer ljuddata från ett vindkraftverk. En av de äldsta av dessa härstammar från danska Miljöstyrelsen, och framgår i sin nuvarande form [Bekendtgørelse]. Nyare metoder har därför tagits fram, se IEC 61400-11 [IEC]. Den internationella standarden IEC 61400-11 finns i svensk version SS-EN 61 400-11, men den svenska standarden dröjer. Den svenska är dock en exakt kopia av den internationella. Vindkrafttillverkare anlitar numer oftast ackrediterade mätlaboratorier för bestämning av ljudemissionen. Normalt bestäms ljudalstringen för en aggregattyp genom mätning på ett enda aggregat. Eftersom ljudalstringen varierar något från aggregat till aggregat är det klart att resultatet från en enda mätning är behäftat med en viss osäkerhet. Detta problem har lösts genom att man deklarerar ljuddata genom en speciell internationellt standardiserad procedur. Deklaterade ljuddata innefattar

då en så stor säkerhetsmarginal att man vid en kontrollmätning ytterst sällan får en högre bullervärden än vad som är deklarerat.

Omräkning av ljuddata till aktuell plats

Ljuddata hänförs normalt till en vindhastighet på 8 m/s mätt på 10 m höjd. Anledningen till detta är att 10 m är en referenshöjd inom meteorologin. Det är dock naturligtvis inte vindhastigheten på denna höjd som är bestämmande för ljudalstringen, utan i stället ett medelvärde av vindhastigheten över vindkraftverkets rotor. Det har visats att detta medelvärde kan approximeras med den vindhastighet som råder vid aggregatets nav, d.v.s. vid rotorns mitt.

Normalt ökar vindhastigheten med höjden över marken. Vid navet blåser det alltså betydligt kraftigare än på 10 m höjd. Detta är en effekt som tas hänsyn till vid redovisningen av ljuddata. Det skall dock observeras att skillnaden i vindhastighet på navhöjd respektive 10 m höjd beror på hur terrängen är beskaffad. De ljuddata som redovisas av en fabrikant förutsätter att terrängen är förhållandevis slät. Om terrängen däremot är kuperad, blir skillnaden i vindhastighet vid navhöjd respektive 10 m större. Detta hade stor betydelse för den äldre sortens vindkraftverk där ljudalstringen i dB ökade linjärt med ökande vindhastighet. Så är dock inte fallet med dagens (2008) verk. Om man vid en ljudmissionsberäkning alltid väljer maximal av tillverkaren deklarerad ljudeffekt är man på den säkra sidan. Med god kunskap om vindhastighetens höjdberoende vid aktuell lokalisering och tänkt vindkraftverks ljudmission vid olika vindhastighet och effektproduktion kan noggrannare bestämning av ljudeffekten vid driftsmedelvärdet av vindhastigheten göras.

Vid en ljudmissionsmätning enligt IEC 61400-11 [IEC], dvs bestämning av ett aggregats ljud-effekt, bestäms först ljudeffekten vid verklig vindhastighet över rotorn. Vindhastigheten bestäms ur den producerade elektriska effekten och ett samband mellan elektrisk effekt och vindhastighet vid navhöjd. Därefter sker en omräkning till referensförhållanden som motsvarar markråhetslängden 0,05 m till vindhastigheten på 10 m höjd under antagande av en logaritmisk vindhastighetsprofil. Verkligen uppskattad råhetslängd vid mätplatsen används då som indata. Likadant ska ske vid ljudmissionsmätning enligt Elforsk 98:24 [S. Ljunggren, 1998]. Vindhastigheten vid navhöjd bestäms ur den producerade elektriska effekten och ett samband mellan elektrisk effekt och vindhastighet vid navhöjd. Därefter räknas vindhastigheten om till 10 m höjd under antagande av en logaritmisk vindhastighetsprofil. Vindhastighet vid navhöjd finns således både vid ljudmissionsmätning och ljudmissionsmätning. I undantagsfall finns inte tillräckligt bra data för elproduktionen. Data ska finnas som medelvärden i de korta tidsperioder för vilka ljudmätningen görs, normalt 1 – 10 minuter. Ibland finns inte heller sambandet mellan producerad elektrisk effekt och vindhastighet vid navhöjd.

Ljudutbredning

Ljudnivån avtar med avståndet från ett vindkraftverk. Detta beror i första hand på att ljudenergin fördelas över ett allt större område. Denna typ av nivåminskning kan kallas geometrisk utbredningsdämpning.

Ljudutbredningen påverkas även av de meteorologiska förhållandena, främst vindförhållanden och lufttemperatur. Det är här vindstyrkans och lufttemperaturens variation med höjden som har betydelse (de s k vind- och temperaturgradienterna). Dessutom påverkas ljudutbredningen av markens egenskaper, i form av så kallad markdämpning. För vindkraftverk där bullerkällan är placerad på hög höjd över marken, upp till cirka 100 meter (2008) och kanske högre, blir dock markdämpningen kraftigt beroende av de meteorologiska förhållandena. Därför diskuteras markdämpning här tillsammans med vindförhållandena.

Geometrisk utbredningsdämpning

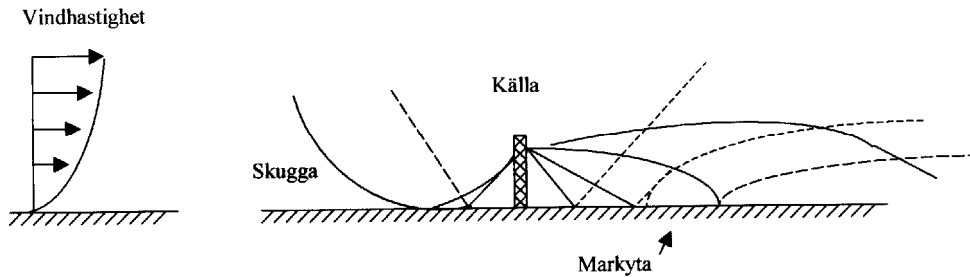
På avstånd större än ca 100 m från vindkraftverket kan man räkna med att ljudenergin sprids över en halvsfär som blir större allt eftersom avståndet ökar. Vid en avståndsfördubbling ökar halvsfärens area 4 gånger. Detta medför att ljudnivån (som är en logaritmisk storhet som närmast beskriver störintrycket) blir 6 dB lägre per avståndsfördubbling.

Den geometriska utbredningsdämpningen är huvudorsaken till att ljudnivån blir allt lägre då man avlägsnar sig från ett vindkraftverk.

Vindförhållanden – vindgradient - markdämpning

På hög höjd över mark är vindhastigheten tämligen konstant över stora höjdintervall. Nära marken bromsas vinden upp av markens skrovlighet. Vid ljudutbredning nedströms vindkraftverket, d.v.s. i medvind, adderas vindhastigheten till ljudvågans normala utbredningshastighet, och ljudvågorna får en ljudutbredningshastighet som ökar med höjden över marken. Detta medför att ljudvågorna tenderar att böjas ner mot marken. Marken får i detta fall bara en liten inverkan på ljudutbredningen.

Uppströms vindkraftverken blir förhållandena de omvända, d.v.s. ljudvågorna tenderar att böjas uppåt. Ljudvågorna träffar markytan med en flack infallsvinkel vilket resulterar i en markdämpning. Ljudnivån blir därför lägre uppströms än nedströms. I vissa fall kan ljudnivån uppströms bli väldigt låg, på grund av att en "ljudskugga" bildas.



Figur 2. Ljudutbredning kring ett vindkraftverk vid närvaro av vindhastighetsgradient.

Mätningar och beräkningar av ljudnivå vid vindkraftverk utföres normalt endast för medvindsfallet. Vid motvind blir beräkningsosäkerheten betydligt större, speciellt på stora avstånd. Mätresultat varierar betydligt mera mellan olika mättillfällen vid motvind än vid medvind. I de fall då en vindriktning är förhärskande och en bostad ligger uppströms vindkraftverket kan hänsyn tas till detta. Den beräkningsmodell som finns redovisad i ”Noise Immission from Wind Turbines.” [J. Kragh et. al. ,1998] rekommenderas för detta fall, se även Nord2000 som är en vidareutveckling.

Temperaturförhållanden (temperaturgradient)

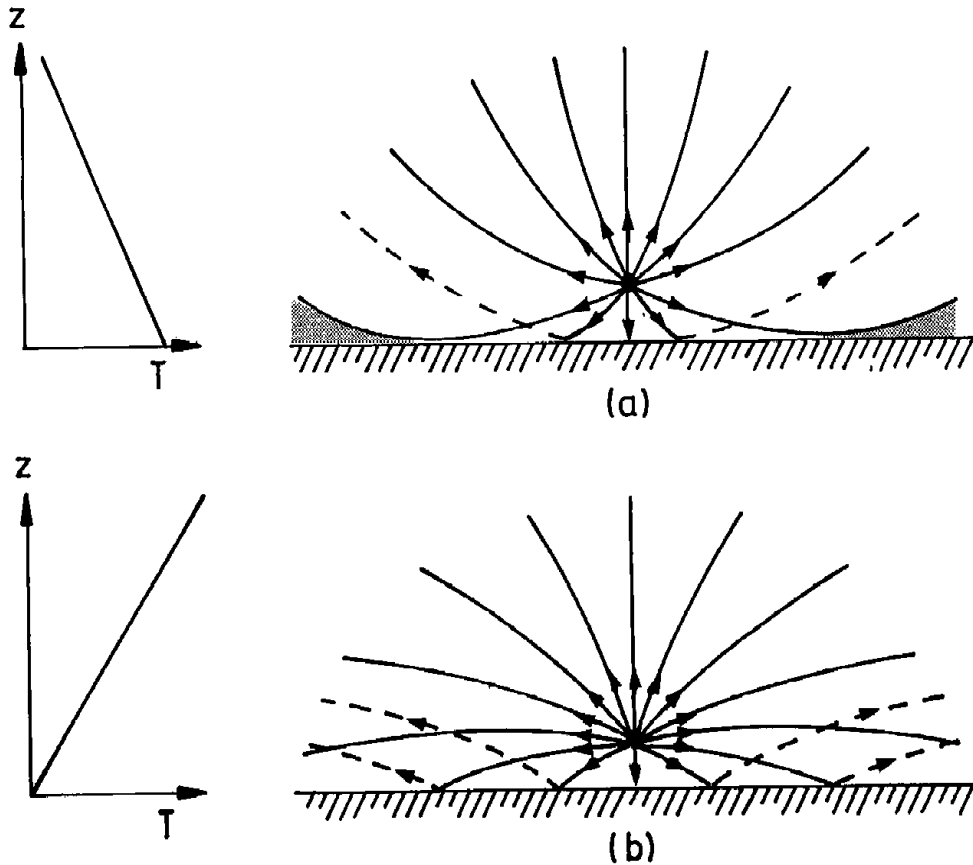
Ljudets utbredningshastighet ökar med ökande lufttemperatur. Temperaturen variation med höjden över marken bestäms bland annat av strålningsförhållandena, som främst är beroende av solhöjd över horisonten och molnighet.

Dagtid vid klart väder är det vanligt att lufttemperaturen avtar med höjden över mark, s.k. negativ temperaturgradient. Då tenderar ljudvågorna att böjas uppåt, vilket medför extra dämpning av ljudnivån då man avlägsnar sig från källan.

Nattetid framför allt under klara, vindstilla nätter är det vanligt att lufttemperaturen ökar med höjden över marken, s k temperaturinversion. Detta medför att ljudvågorna böjs neråt. Ljudkällor kan då höras på stora avstånd.

Vid vissa tillfällen uppkommer en höjdinversion. Temperaturen minskar först med höjden för att sedan öka inom ett högre luftskikt. Då kan ljud breda ut sig över mycket stora avstånd med liten dämpning. Vid molnigt väder är det vanligt att lufttemperaturen inte varierar särskilt mycket med höjden över mark.

Temperaturgradienten har störst betydelse för ljudutbredningen då det är vindstilla och vid mycket svag vind. Vindförhållandena får därför oftast större betydelse än temperaturförhållandena för ljudutbredningen vid vindkraftverk.



Figur 3. Illustration av ljudvågornas avböjning vid positiv (a) (kallare högre upp) och negativ temperaturgradient (b) (varmare högre upp). Reflektade strålgångar har streckats i diagrammet [C. Larsson, 1994 och 1:1997]. Skillnaderna mellan hur vind- och temperaturförhållandena ser ut över land och över hav är av största betydelse för ljudutbredningen. Man kan förvänta sig att havsbaserade vindkraftverk hörs tydligare under vår och sommar när vattnet är kallt och temperaturen i luften är högre. Den gränsyta som bildas mellan havs- och landpåverkade skikt är också av betydelse för vindkraftverk.

Kanaliserings av vinden längs dalgångar i fjällterräng ger också upphov till speciella ljudutbredningsförhållanden som bör beaktas.

Absorption i luften

Ljudabsorptionen i luften varierar med frekvens, fuktighet och temperatur på ett komplicerat sätt. Denna typ av dämpning är störst för höga frekvenser. Nära vindkraftverket kan det "svischande" ljudet från bladen ha en nästan väsende karaktär. På större avstånd blir ljudet dovre samtidigt som nivån blir lägre. Detta beror på att frekvensspektrat förändras på grund av luftabsorptionen.

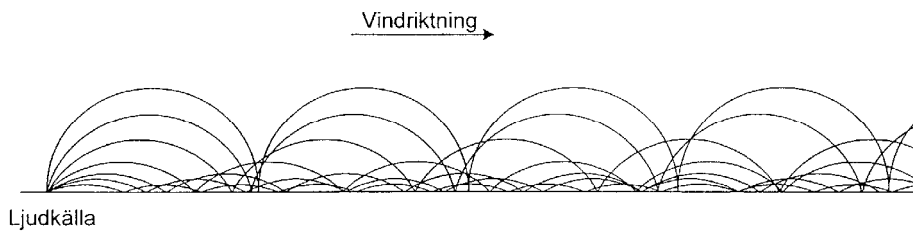
Luftdämpningen avtar med ökande relativ fukthalt. För svenska förhållanden finns värden redovisade [C. Larsson, 1997] och i Naturvårdsverkets rapport 5417, finns typiska luftabsorptionsvärden angivna för olika platser i Sverige. Vid översiktliga beräkningar och vid tillfällen när aggregatets frekvensspektrum inte är känt antas luftabsorptionen vara 5 dB/km.

Det skall observeras att detta värde egentligen är för högt med tanke på enbart luftabsorptionen. Utförda mätningar har dock visat att även marken ger en viss nivå-sänkande effekt. Värdet

på 5 dB/km inkluderar inverkan av markeffekten. Det är i och för sig möjligt att ta hänsyn till markeffekten på annat sätt, men genom valet av 5 dB/km erhålls samma modell för ljudutbredningen som länge använts i Danmark.

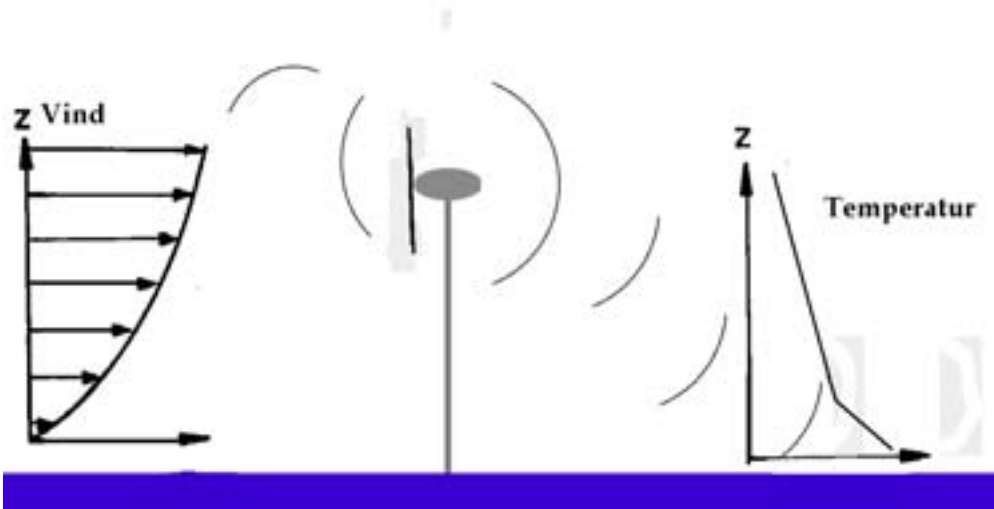
Ljudutbredning över vatten på stora avstånd

Vatten är akustiskt sett synnerligen hårt. Detta innebär att en ljudvåg som faller in mot en vattenyta reflekteras mycket effektivt. Ljudutbredningen från ett havsbaserat vindkraftverk blir därför i princip annorlunda än kring ett markbaserat aggregat, se figur 4. I medvindsfallet kommer ljudstrålarna att böjas av ned mot vattenytan. Eftersom vattenytan reflekterar strålarna mycket effektivt får man på stora avstånd det utbredningsmönster med multipelreflexer som visas i figuren. Detta medför att ljudstrålarna i huvudsak utbreder sig inom ett skikt närmast vattnet och att den geometriska utbredningsdämpningen blir väsentligt mindre än vid utbredning över land. Över vatten bör man därför räkna med en dämpning av 3 dB per avståndsdubbling i stället för 6 dB, som används över land. I praktiken måste man dock förvänta sig att denna idealiserade bild kommer att störas av inverkan av vågorna på vattenytan. Bilden kan också störas av att temperaturens och vindens variation med höjden inte motsvarar ett perfekt medvindsfall över hela skiktet där ljudutbredning sker. Det är för närvarande inte känt i vilken omfattning detta påverkar utbredningsdämpningen.

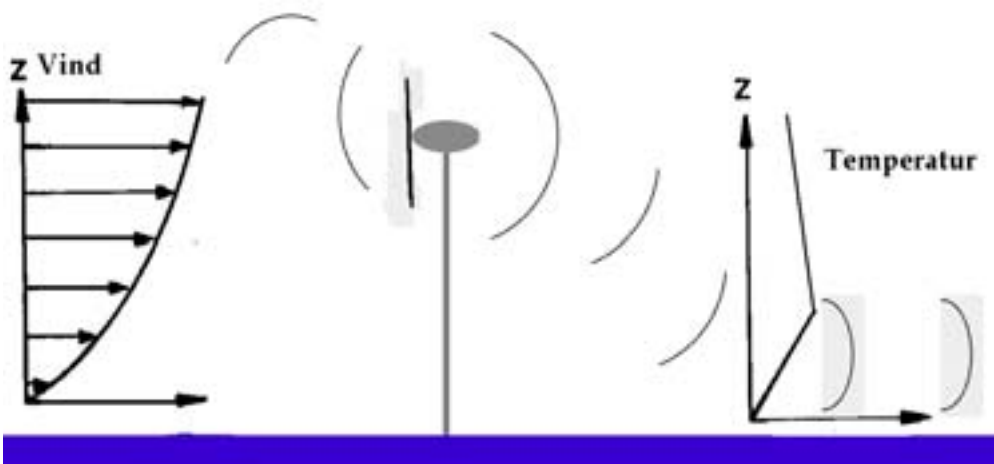


Figur 4. Ljudutbredning på stora avstånd över vatten.

När ljudutbredningen sker över en vattenyta kommer vatten- och lufttemperaturen däremot att ha en avgörande betydelse. Ljudnivån blir lägre under hösten på grund av ljudutbredning i kall luft över varmt vatten, se figur 5. Ljudvågorna böjs av uppåt. För en person, som står på marken, kommer inte vindkraftverken att kunna höras lika långt. Under vårförsommar när vattnet är kallare än luften kommer ljudet att böjas ner och fångas in i ett mycket grunt skikt närmast vattenytan. Vindkraftverken kommer då att kunna höras betydligt längre bort. Skiktets tjocklek kan variera mellan ungefär 200 – 1000 meter. Det är medelhöjden i detta skikt som ger brytpunkten i modellen.



a



b

Figur 5. Schematisk figur över ljudutbredning under a: höst, förvinter och b: vår, försommar.

Varför hörs bullerkällor så tydligt på natten?

Under sommarhalvårets kvällar kan man höra ljud på långa avstånd

Några timmar innan solnedgången börjar en markinversion byggas upp. Med markinversion menas att temperaturen ökar med höjden över marken. Det innebär att vindhastigheten minskar eller det blir helt vindstilla nära marken. Ett vanligt talesätt är att det mojnar mot kvällen. Högre upp vid navet på vindkraftverket blåser det lika mycket som tidigare. Ljudalstringen fortsätter och vindhastighetsskillnaderna mellan denna vind på navhöjd och ingen eller liten vind vid marken ger istället en ansamling av ljud nära marken. Det är lätt att förstå att eventuella maskeringsljud minskar kraftigt. Lövbrus försvinner. Vågskvalp kan förekomma så vida inte en motriktad vind exempelvis landbris uppkommer [C. Larsson, 1999].

Dessutom inverkar det förhållandet att bakgrundsnivån från andra källor, t ex trafik, arbetsmaskiner, fåglar, människor etc. är låg på natten, vilket medför att andra ljud kan bli mer framträdande.

Maskering

Vid maskering av vindkraftsbuller bör hänsyn tas till naturligt bakgrundsljud. För närvarande finns det inte kunskap om hur kombinationer av vindkraftsbuller och andra artificiella bullerkällor påverkar upplevelsen av vindkraftsbuller. Det finns dock exempel på vindkraftverk utmed motorväg, där vindkraftsljudet inte är hörbart trots att det är 40 dBA.

För att bestämma ljudnivån på det maskerande ljudet bör antingen mätningar eller om möjligt beräkningar utföras. Naturliga bakgrundsljud alstras framförallt av vegetation och vågor, även av forsande vatten. Trädens ljudalstring orsakas av vinden och ökar därmed med ökande vindstyrka men havets brus är korrelerat till våghöjden. Ljudnivåer för olika typfall av dessa ljudkällor visas i tabell 1 och 2. Alltså beror beräkningar av maskering på vindhastigheten när vegetationsljud finns vid immissionsplatsen. I kustmiljöer beror däremot maskeringen av våghöjden och därmed bör ljudemissionen från vindkraftverket anpassas efter denna och inte efter vindhastigheten.

Det förekommer dock tillfällen, då det är vindstilla eller mycket låg vind vid marken samtidigt som vindhastigheten på vindkraftverkets navhöjd är åtskilliga m/s högre. Denna kraftigare vindhastighetsgradient kan också förstärkas genom förekomst av ”low level jet”, som är maximum i vertikala led av vinden i de lägsta 500 - 100 metrarna. Det har också visats att bergknallar kan ge lä för vissa vindriktningar varvid den naturliga bakgrundsnivån kan bli förhållandevis låg. Denna effekt kan uppträda i kuperad terräng. I dessa fall blir vindkraftverket mer hörbart och risken för störning ökar.

Maskering definieras som ”processen när ett ljuds hörtröskel höjs p.g.a. närvaron av andra ljud”. Denna process ska däremot inte blandas samman med vid vilka förhållanden vindkraftsljud är störande. Angående total maskering d.v.s. när vindkraftsljudet blir ohörbart i omgivningarna med naturligt bakgrundsljud visar tester och modeller att denna gräns varierar beroende på vilken typ av bakgrundsljud som är aktuellt samt om vindkraftsljudet är amplitudmodulerat (motsvarande enstaka vindkraftverk eller vindkraftspark på kortare avstånd än 2 km) eller inte amplitudmodulerat (vindkraftspark på längre avstånd). Amplitudmodulering yttrar sig som det svischande ljud man kan höra nära ett verk där det kommer ett ”svisch” vid varje bladpassage.

Om maskering påverkar störningar från vindkraftsbuller har i dagsläget inte explicit utretts. Undersökningar [K Bolin] tyder dock på att vindkraftverken inte hörs om ljudet från vindkraftverken har en ljudnivå som är 10 dB(A) lägre än bakgrundsljudet. Som underlag för bedömning av bakgrundsljud rekommenderas långtidsmätningar på den aktuella platsen. Det är dock viktigt att undvika att andra källor än det naturliga (vindrelaterade) bakgrundsljudet inkluderas d.v.s. andra bullerkällor bör bestämmas separat och subtraheras. Ett sätt att minska inverkan av momentana ljudtoppar från fordonspassager och andra källor är att bestämma $L_{A,90}$ -nivån i tio- eller femminutersperioder. Det är den nivå som överskrider 90% av mättiden. Ljudet från vindkraften är relativt konstant under en tio- eller femminutersperiod, medan ljudet från en enstaka fordonspassage eller fågelläte är kortvarigt. Alternativt kan vind- eller våghöjdsdata kombineras med de modeller som utvecklats vid Tekniska Högskolan i Stockholm (KTH) [O. Fégeant, 2001; K. Bolin; P. Appelqvist] som kan nyttjas för att prediktera bakgrundsbuller. En sådan beräkning kräver dock information om den vegetation som finns i ett visst område.

Ljud från barrträd och lövträd skiljer sig markant från varandra [O. Fégeant, 2001; K. Bolin; P. Appelqvist]. Det beror förutom antalet träd och trädhöjd även på vindhastigheten och

andra meteorologiska parametrar. I tabell 1 visas resultat från simuleringar för olika skogskanter. Ljudemission från lövskog minskar när löven faller av, därför bör beräkningar utföras både för träd med och utan löv. Ljudnivåer från träd utan löv är låga och därmed uppstår inte någon markant maskerande effekt. Barrträd uppvisar inte variationer och därför är maskeringen oberoende av årstid.

| Art | Gran | Tall | Asp | Björk | Ek |
|---|------|------|-----|-------|----|
| $L_{eq,A}$, dB(A), H=10m, skogskant | 49 | 47 | 58 | 51 | 46 |
| $L_{eq,A}$, dB(A), H=20m, skogskant | 57 | 55 | 65 | 58 | 53 |
| $L_{eq,A}$, dB(A), H=10m, enstaka träd | 34 | 32 | 43 | 36 | 31 |
| $L_{eq,A}$, dB(A), H=20m, enstaka träd | 42 | 39 | 53 | 46 | 41 |

Tabell 1: Typiska ljudnivåer 20 m från källan med trädhöjd H, vindhastigheten på 10 m höjd är 5 m/s.

För att beräkna ljudimmissionen vid godtycklig vindhastighet, U i m/s, ska följande formel användas:

$$L_{eq,A}(U) = L_{eq,A,tabell} + 10 \log(0.2 \cdot U)^3 \quad (1)$$

I de fall då vågbrus maskerar vindkraftverket bör våghöjden bestämma tillåten ljudnivå från vindkraftverket (vid ”maskeringsfall”). Vågbrus beror på våghöjden, som brukar anges som signifikant våghöjd H_s [10]. Mätningar av ljud vid olika våghöjder visas i tabell 2. Våghöjder och vågriktning kan erhållas från SMHI:s vågbojar eller från mjukvara som kan prediktera våghöjd och riktning.

| Våghöjd, H_s , m | 0.15 | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| $L_{eq,A}$ | 30 | 47 | 50 | 57 | 62 | 69 |
| | | | | | | |

Tabell 2: Typiska immissionsnivåer ca 20 m från strandkant.

$L_{A90,10min}$ percentilen bör användas som maskerande ljudnivå. När denna ska beräknas bör 3 dB subtraheras från tabell 1 och 2. Stora vegetationsområden och stränder bör betraktas som en linjekälla (geometrisk spridningsdämpningen blir 3 dB per distansdubbling) medan mindre områden bör betraktas som en punktkälla (geometrisk spridningsdämpningen blir 6 dB per distansdubbling). Vid platser med låg vindhastighet och därmed lågt vegetationsljud bör speciell försiktighet iakttas. I dessa lägen bör vindhastighet och bakgrundsljud för aktuell position avgöra maskeringspotential, inte vindförhållandena vid vindkraftverket eftersom vindhastigheterna vid vindkraftverket och immissionspunkten inte nödvändigtvis är desamma.

Bakgrundsljudet bör bestämmas dels vid referensvindhastigheten 8 m/s på 10 m höjd, men även vid de vindhastigheter som täcks in av driftsmedelvärdet för vinden och den vindhastighet vid vilken maximal ljudemission sker enligt ljudemissionsmätning för verket.

För att beräkna maskeringen av vindkraftljud i naturliga bakgrundsljud bör följande algoritm användas:

- Bestämning av bakgrundsljud:
 - Mätning av bakgrundsljud (förslagsvis $L_{A90,10min}$) som funktion av vindhastighet eller våghöjd beroende på typen av bakgrundsljud.
 - Beräkning av bakgrundsljud (L_{A90}) för vindhastigheter mellan i detta fall 5 m/s till 12 m/s.
- Subtrahera 3 dB från $L_{A,eq}$ -nivån för att få $L_{A,90}$ nivån samt beräkna avståndsdämpning enligt ovanstående text om metod 1b har använts.
- Subtrahera 10 dB(A) från ljudnivån L_{A90} av bakgrundsljudet för att erhålla en nivå av vindkraftljudet som troligen inte hörs

Exempel:

Vindkraftverk ska byggas i ett område. Aktuell immissionspunkt är en bostad belägen 40 m från en skogskant med ca 10 m höga björkar. När hörs troligen inte vindkraftverket ?

- Alternativ 1 b) används. Miljön överensstämmer med ett typfall från tabell 1, därför anses mätningar ej nödvändiga. Enligt tabell 1 är ljudnivån $L_{A,eq}=51$ dB(A) vid $U_{10}=5$ m/s. Beräkna ljudnivån från ekvation (1) för vindhastigheter mellan 5 m/s och 12 m/s.

| | | | | | | | | |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| U_{10} (m/s) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $L_{A,eq}$ | 51 | 53 | 55 | 57 | 59 | 60 | 61 | 62 |

- Kompensera $L_{A,eq}$ till L_{A90} d.v.s. subtrahera 3 dB(A) samt beräkna avståndsdämpningen i detta fall en avståndsdubbling från 20 m i tabell till 40 m, subtrahera alltså ytterligare 3 dB(A) (linjekälla, se ovan).

| | | | | | | | | |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| U_{10} (m/s) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $L_{A,90}$ | 45 | 47 | 49 | 51 | 53 | 54 | 55 | 56 |

- Subtrahera i ovanstående tabell med 10 dB(A) för att visa vid vilka ljudnivåer ljudet från vindkraftsverken ($L_{A,eq,Vkv}$) troligen inte hörs.

| | | | | | | | | |
|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| U_{10} (m/s) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $L_{A,eq,Vkv}$ | 35 | 37 | 39 | 41 | 43 | 44 | 45 | 46 |

Beräkning av ljudimmission

I det följande redovisas beräkningsmodeller för ljudimmission. För landbaserade vindkraftverk redovisas två modeller, en för korta och en för långa avstånd. För havsbaserade aggregat redovisas en modell som är avsedd för stora avstånd. Beräkningsmodellerna gäller för alla typer av vindkraftverk.

Modellerna överensstämmer med dem som redovisades i den tidigare rapporten 6241 "Ljud från vindkraftverk"[Naturvårdsverket. 2001], med undantag för modellen för ljudutbredning över vatten och modellen för omräkning av ljudeffekt vid olika markrähet.

För beräkning av ljudutbredning på stora avstånd över hav kan modellerna för vindkraft på land ge en underskattning av ljudnivån för vissa väderförhållanden. En speciell modell för ljudutbredning över vatten fanns därför beskriven i Rapport 6241.. Baserat på bl a nya mätningar från Kalmarssund [M. Boué; M. Åbom and M. Boué] visas här en omarbetning av modellen för ljudutbredning över vatten. Den viktigaste ändringen ligger i att det avstånd där spridningen i modellen övergår från sfärisk till cylindrisk är ändrat. Det kan här påpekas att den modifierade modellen bygger på mätningar från ett område i Östersjön (Kalmarssund) och en viss tid av året (i juni månad). Vid försöken som ligger till grund för revisionen av modellen användes en ljudkälla på höjden 30 m över vattenytan och ljudet mättes vid 80, 200 och 400 m på 9,75 km avstånd. Dagens vindkraftverk (2009) har navhöjder på 80 – 100 m, vilket innebär förutsättningarna ändrats vilket bör observeras. Erfarenheter från mätningar och upplevelser av ljud från nya havsbaserade vindkraftverk kan ge ytterligare underlag för utveckling av modellen.

Viktigt vid bedömning av ljudimmission från vindkraft liksom från alla externa ljudkällor är insikten att transmissionsförhållandena i atmosfären varierar väldigt mycket över tiden. Vid mätningarna i Kalmarssund varierade ljudnivån med ± 35 dB. De modeller som beskrivs här ger en uppskattning av en förväntad genomsnittlig immissionsnivå. För att bedöma risken för störning måste även maskering, dvs att vindkraftljud kan döljas av andra ljudkällor, beaktas. Särskilt intressant är här sk naturligt (vindalstrat) bakgrundsljud som vindsus från vegetation samt vågbrus. Ett särskilt avsnitt om detta ingår i denna rapport.

Precision och säkerhetsmarginal

Modellerna för ljudutbredning över mark förväntas i genomsnitt ge rätt värde. Någon säkerhetsmarginal ingår sålunda inte i beräkningsformlerna. Avvikelserna från fall till fall har studerats och visats uppgå till maximalt ± 1 dB vid ljudutbredning över relativt slät mark [J. Kragh, et al, 1998]. Det är inte känt hur väl formelerna stämmer i kuperad terräng. Kuperad terräng kan skärma av ljudet, vilket ger en lägre ljudnivå, men konkava ytor i starkt kuperad terräng kan ge en ökning av ljudnivån jämfört med plan mark. Beräkningsmodellen Nord2000 tar hänsyn till detta fenomen [B. Plovsing, 2001; Nord2000, 2002]. Ytterligare fenomen som kan beaktas av mer detaljerade beräkningsmodeller är dämpning orsakad av ljudutbredning över skogsmark med porös yta, träd som sprider ljudet och ljudreflektion i hårda ytor som sjöar och bergsytor.

Leverantörernas uppgifter på ljudeffekt från aggregaten har erfarenhetsmässigt visat sig vara tillförlitliga. Erfarenheterna avser dock aggregat placerade på slät mark. Det är inte känt hur väl uppgivna ljuddata stämmer i kuperad terräng.

Modellen för ljudutbredning över vatten är som nämnts uppbyggd på grundval av ett fåtal mätresultat. Som alternativ till en beräkning kan mätningar av ljudutbredningen utföras. Sådana

mätningar måste avse relevanta meteorologiska situationer, vilket naturligtvis måste dokumenteras väl.

I varje enskilt fall måste behovet av säkerhetsmarginal bedömas med utgångspunkt från hur känslig ljudsituationen är, terrängförhållandena, m.m.

En tillbakablick

De första riktlinjerna för hur ljudimmission från vindkraftverk kan beräknas publicerades i början på 1980-talet av danska Miljöstyrelsen. Enligt denna skrift avses med ljudimmission den A-vägda ljudtrycksnivån, L_A , i aktuell punkt (immissionspunkten) vid en vindhastighet av 8 m/s mätt på 10 m höjd. I samma skrift gavs också en enkel formel för beräkningen av ljudimmissionen,

$$L_A = L_{WA} - 8 - 20 \log(r) - 0,005 \cdot r,$$

L_{WA} = aggregatets A-vägda ljudeffektnivå vid 8 m/s (d.v.s. ett mått på hur mycket akustisk effekt som aggregatet avger),

r = avståndet i meter från observationspunkt till vindkraftverkets nav.

Den sista termen i formeln representerar luftabsorptionen, det vill säga den oundvikliga absorption som alltid uppträder när ljud utbreder sig i luften.

Det skall observeras att värden beräknade på detta sätt gäller i medvind, det vill säga när vinden blåser från aggregatet mot beräkningspunkten (inom ± 45 grader). Vid andra vindriktningar, erhålls andra nivåer. Tvärs vindriktningen är nivåer vanligtvis ungefär desamma som i vindriktningen men med större fluktuationer, medan nivån i motvind vanligtvis är något eller mycket lägre på stora avstånd. Valet av medvind för beräkningarna är helt i överensstämmelse med svensk och nordisk praxis. Anledningen till att man valt medvindsfallet som referens är framför allt att eventuella kontrollmätningar då får bättre noggrannhet.

På senare tid har stora framsteg gjorts vad beträffar mätning av ljudeffektnivån hos vindkraftverk. Nya mätprocedurer ger säkrare värden och möjlighet att ta åtminstone en viss hänsyn till hur den aktuella terrängen är beskaffad, se referens [5]. Resultat från långtidsmätningar av luftabsorptionen har publicerats vilket gör att också ljudutbredningen kan beräknas på ett säkrare sätt [C. Larsson, 1997]. Vidare har ljudutbredningsmätningar utförts vilka givit en god uppfattning om markens inverkan, åtminstone på relativt plan mark.

För relativt korta avstånd över mark anges i modellen för ljudutbredning över land på avstånd upp till 1000 m samma faktor för luftabsorptionen som i den ovan nämnda danska modellen. Detta ger en överskattning av luftdämpningen, som dock på aktuella avstånd kompenseras av markens inverkan. Det kan kommenteras att valet av denna konstruktion i hög grad motiveras av en önskan att få samma beräkningsmodell som i Danmark.

Bestämning av aktuell ljudeffektnivå

Erforderliga uppgifter

För att kunna beräkna ljudförhållandena i omgivningen av ett eller flera vindkraftverk fordras följande data:

- A-vägd ljudeffekt (L_{WA}) normalt baserad på en referenshastighet av 8 m/s på höjden 10 m, men även baserat på vindhastigheter 6 – 10 m/s på 10 meters höjd.
- Vid stora avstånd mellan aggregat och mottagare (mer än 1000 m) fordras dessutom uppgifter om hur ljudeffekten är fördelad över oktavbanden mellan 63 Hz- 4000 Hz.
- Uppgifter om beskaffenheten hos terrängen så att råhetslängden kan uppskattas.
- Avstånd och riktning från vindkraftverken till beräkningspunkten.

Ljuddata bestämda av tillverkare enligt aktuell standard, dvs enligt IEC [IEC], avser ett referensfall där den s k råhetslängden är 0,05 m. Utgångspunkten är den uppmätta ljudeffektnivån L_{WA} (apparent sound power level enligt IEC) som svarar mot en antagen logaritmisk vindprofil med 8 m/s på en höjd av 10 m. Detta värde skall korrigeras beroende på beskaffenheten hos terrängen omkring aggregatet samt till den vindhastighet som svarar mot önskat driftsfall. Terrängen karaktäriseras därvid genom sin råhetslängd z_0 , vilken kan uppskattas ur tabell 1.

Tabell 1: Markråhetslängd

| Typ av terräng | Markråhetslängd, z_0 , i m |
|--|------------------------------|
| Förortsbebyggelse, landsortsstäder Skog, skogsbälten Många träd och/eller större buskar | 0,3 |
| Jordbruksområden med få byggnader, träd, etc, Flygplatser eller områden med utspridda träd och byggnader | 0,05 |
| Vattenytor (sjöar, fjärdar, öppet hav) Bar mark Slät yta av snö, sand eller klippt gräs Landningsbana på en flygplats | 0,01 |

Vid stora nivåskillnader i terrängen kan värdet 0,3 användas. I de fall terrängens råhetslängd varierar i olika riktningar sett från aggregatet, bestäms först det vinkelområde som är mest kritiskt för ljudimmissionen. Råhetslängden z_0 bestäms därefter för motsvarande sektor i motsatt riktning. Vid beräkning med Nord2000 [Nord2000], som är en mer detaljerad modell, inverkar råhetslängden även på vindhastighetsgradienten mellan källa och mottagare, vilket i sin tur påverkar ljudutbredningsdämpningen.

Den korrigerade ljudeffektnivån $L_{WA,korr}$ fås ur sambandet

$$L_{WA,korr} = L_{WA} + k \cdot (v_{drift} - 8) + k \cdot \Delta v_h,$$

där L_{WA} är den mätta ljudeffektnivån enligt IEC [IEC], v_{drift} är vindhastigheten svarande mot i första hand driftsmedelvärde vid navhöjd (v_{nav}) omräknat till 10 m höjd. Om 8 m/s på 10 m höjd nyttjas

försviner denna korrektion. Faktorn k är ljudnivåns beroende av vindhastigheten (på 10 m höjd) i dB(A)/m/s enligt tillverkarens specifikation. Driftsmedelvärde vid 10 m höjd beräknas enligt

$$v_{drift} = \frac{5.3 \cdot v_{nav}}{\ln(H/0.05)},$$

där H är aggregatets navhöjd. Inverkan av ytråheten Δv_h beräknas enligt

$$\Delta v_h = v_h \left(\frac{\ln(H/z_0)}{\ln(10/z_0)} \cdot \frac{5.3}{\ln(H/0.05)} - 1 \right),$$

där råhetslängden z_0 bestäms enligt tabellen ovan.

Vid kontrollmätning enligt IEC [IEC] på befintliga vindkraftverk skall i första hand vinddata baseras på aggregatens aktuella produktion och vindeffektkurva. I andra hand nyttjas data från anemometrar i navhöjd och i sista hand data från markbaserade mätmaster med höjden 10 m. Dessa rekommendationer är särskilt viktiga för fallet med vindkraftverk i skogsområden.

Det är inte alltid korrekt att anta att faktorn k är en konstant, t ex 1,0 dB/m/s. För moderna vindkraftverk ökar ljudeffekten med vindhastigheten upp till ca 8 eller 10 m/s (mätt på 10 m höjd). Däröver är ljudeffekten ungefär konstant eller kan till och med avta något. Vid beräkningen bör därför maximal uppmätt ljudeffektnivå (eller maximal garanterad ljudeffektnivå) användas i beräkningen i stället för den korrigerade ljudeffekten. Korrektionen med en konstant k leder till att vindkraftverk i skogsterräng får för hög ljudemission enligt beräkning.

Ljudemissionen för vindkraftverk bestäms vanligtvis för verk som står på plan slät mark. Om ett verk placeras i kuperad skogig terräng är det inte otänkbart att luftens anströmning mot rotorn blir mer turbulent och ojämn. Det kan leda till högre ljudalstring, vilket man bör vara observant på i planeringen av anläggningen.

Skogen ökar mängden friktionsskapad turbulens (=mekaniskt skapad turbulens) jämfört med över ett slättlandskap. På 50 m höjd är typiska medelvärden på turbulensintensiteten över skog 0,20-0,25, medan värdena på 100 m höjd ligger på 0,15-0,20 och på 150 m höjd under 0,15. Men mycket stora variationer finns i turbulensintensiteten vid enskilda tillfällen, inom hela höjdiintervallet från 50-150 m, från i princip nästan laminär strömning med mycket låg turbulensintensitet (<0.04) till episoder med extremt hög turbulensintensitet (>0.35). Detta sammanhänger delvis med en variation av turbulensintensiteten med vindhastigheten, men framförallt beror skillnaderna på olikheter i atmosfärens termiska skiktning, d.v.s. hur temperaturen varierar med höjden. Instabil skiktning då temperaturen avtar med ökande höjd leder till stor termisk produktion av turbulens och därmed hög turbulensintensitet, medan stabil skiktning med kallast närmast marken leder till låg turbulensintensitet och en följd av termisk dämpning av turbulensen. Skogslandskapets påverkan på turbulensen kan sträcka sig upp till flera hundra meters höjd under dagförhållanden med instabil skiktning [H. Bergström].

Beräkning av ljudutbredning

Beräkningarna utförs normalt i två steg. Först beräknas ljudnivån för varje aggregat för sig hos mottagaren (närmaste bostad). Därefter adderas bidragen från varje aggregat samman enligt den formel, som anges i nästa avsnitt.

Ljudutbredning över land på avstånd upp till 1000 m

Denna beräkningsmodell är användbar vid lokalisering av enstaka aggregat. Ljudnivån i immissionspunkten, L_A , beräknas på följande sätt

$$L_A = L_{WA, \text{korr}} - 8 - 20 \cdot \log(r) - 0,005 \cdot r$$

där r är avståndet i meter från immissionspunkten till mitten på navet på vindkraftverket.

Ljudutbredning över land på avstånd över 1000 m

Denna modell kan bli aktuell vid lokalisering av grupper med ett större antal aggregat.

I detta fall beräknas ljudtrycksnivån i immissionspunkten, L_A , som

$$L_A = L_{WA, \text{korr}} - 10 - 20 \cdot \log_{10}(r) - \Delta L_a$$

där

$$\Delta L_a = 10 \cdot \log_{10}(\sum 10^{(L_i + A_i)/10}) - 10 \cdot \log_{10}(\sum 10^{(L_i + A_i - r \cdot a_i)/10})$$

och där

L_i = oktavbandsvärden¹ för ljudeffektnivå från och med 63 Hz till och med 4000 Hz (L_i är nivån vid 63 Hz och L_7 nivån vid 4000 Hz) enligt tillverkarens specifikation eller uppmätta. Notera att oktavbandsvärdena ska vara ovägda

A_i = A-vägningen vid samma frekvenser. Denna ges av följande tabell

| | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Frekvens Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| A_i, dB | -26 | -16 | -9 | -3 | 0 | +1 | +1 |

a_i = luftabsorptionen i oktavband per meter som ges av följande tabell (schablonmetod). För en exaktare skattning tillämpas SS-ISO 9613-1 [SS-ISO] baserat på medeltemperatur och medelfuktighet vid mätplatsen för olika årstider.

| | | | | | | | |
|-----------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Frekvens | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
|-----------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|

¹ Dessa värden beskriver ljudeffektens fördelning som funktion av frekvensen och kan även ges som en nivå relativt ett givet frekvensband.

| | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Hz | | | | | | | |
| a_i, dB | 0,0001 | 0,0003 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0032 | 0,0079 | 0,0220 |

r = avståndet i meter från immissionspunkten till mitten på navet på vindkraftverket.

I Naturvårdsverkets rapport 5417, Metod för immissionsmätning av externt industribuller [Naturvårdsverket, 2005] finns i appendix 6 en tabell med luftabsorption för olika platser i Sverige.

Ljudutbredning över hav

På grund av avsaknaden av markdämpning kommer ljudspridningen i medvindsriktningen att tendera mot ett fält som sprider sig över en cylindrisk yta och avtar långsammare än över land. Detta gör att för avstånd större än cirka 700 meter gäller [M. Boué; M. Åbom and M. Boué]:

$$L_A = L_{WA, \text{kor}} - 8 - 20 \cdot \log_{10}(r) - \Delta L_a + 10 \cdot \log_{10}(r / 700)$$

där

$$\Delta L_a = 10 \cdot \log_{10}(\sum 10^{(L_i + A_i)/10}) - 10 \cdot \log_{10}(\sum 10^{(L_i + A_i - r \cdot a_i)/10})$$

och där

L_i = oktavbandsvärden för ljudeffektnivån från och med 63 Hz till och med 4000 Hz (L_i är nivån vid 63 Hz och L_7 nivån vid 4000 Hz), enligt tillverkarens specifikation eller uppmätta,

A_i = A-vägningen vid samma frekvenser,

| | | | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Frekvens Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| A_i, dB | -26 | -16 | -9 | -3 | 0 | +1 | +1 |

a_i = luftabsorptionen i oktavband per meter (schablonmetod). För en exaktare skattning tillämpas SS-ISO 9613-1 [SS-ISO] baserat på medeltemperatur och medelfuktighet vid mätplatsen för olika årstider.

| | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Frekvens Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| a_i, dB | 0,0001 | 0,0003 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0032 | 0,0079 | 0,0220 |

r = avståndet i meter från immissionspunkten till mitten på navet på vindkraftverket.

För avstånd kortare än 700 meter kan formeln för korta avstånd över land tillämpas. Siffran 700 meter bygger på ett medelvärde över alla vindriktningar och kommer från mätningar utförda av KTH [M. Boué; M. Åbom and M. Boué] i Kalmarssund under perioden juni 2005 och juni 2006.

Om ljudet från havsbaserade aggregat först utbredds över vatten och sedan över ett stycke land tillämpas formel över vatten fram till strandkant. Därefter tillämpas formeln för land ($r > 1000$ m) med $L_{WA,korr} = L_A(\text{strandkant})$ och termen $20 \log_{10} r$ utbytt mot $20 \log_{10} (r / r_{\text{strandkant}})$. I formeln för utbredningsdämpning byts r mot $\Delta r = r - r_{\text{strandkant}}$. Vid övergången vatten-land uppstår en reflexion av ljud som för låga frekvenser kan uppgå till c:a 3 dB [L. Johansson]. En eventuell sådan effekt är inkluderad i de data som utgör underlaget för modellen, dvs i värdet 700 meter för brytpunkten, varför ingen ytterligare korrektion bör göras.

Samtidig ljudimmission från flera aggregat

I detta fall beräknas ljudnivån L_{Aj} från vardera aggregatet j . Den totala ljudnivån $L_{A,tot}$ adderas därefter samman enligt formeln

$$L_{A,tot} = 10 \cdot \log(\sum 10^{L_{Aj}/10}).$$

.

Exempel på ljudberäkningar

Nedan visas exempel på hur de olika dämpningsmekanismerna bidrar till den totala ljudutbredningsdämpningen (vi förutsätter en ljudeffektnivå motsvarande ett 1.5MW aggregat) i en punkt på avståndet 300 m från ett vindkraftverk.

Landbaserat aggregat, kort avstånd

Aggregatet förutsätts ha en ljudeffektnivå på 99 dB(A) vid 8 m/s mätt enligt referens [5]. Navhöjden är 60 m. Antag att ljudeffektnivån har ett vindhastighetsberoende på $k = 1,0$ dB per m/s. Närmaste granne bor på 300 m avstånd från aggregatet. Området i motsatt riktning bedöms ha en markråhet om $z_0 = 0,3$ m.

Ljudeffektnivån korrigeras först enligt avsnitt ”Bestämning av aktuell ljudeffektnivå”, d.v.s.

$$\Delta v_h = v_h \left(\frac{\ln(H/z_0)}{\ln(h/z_0)} \cdot \frac{\ln(h/0,05)}{\ln(H/0,05)} - 1 \right)$$

Med $v_h = 8$, $H = 60$, $h = 10$ och $z_0 = 0,3$ blir $\Delta v_h = 1,0$ m/s. Den korrigerade ljudeffektnivån blir således $99 + 1 \times 1 = 100$ dB(A) om ljudeffektnivån ökar linjärt med ökande vindhastighet från 8 m/s och uppåt.

Ljudnivån på 300 m avstånd kan nu beräknas med formeln:

$$L_A = L_{WA, \text{korr}} - 8 - 20 \cdot \log(r) - 0,005 \cdot r$$

där r är avståndet till aggregatets nav,

$$r = \sqrt{(300^2 + 60^2)} = 305,94 \text{ m.}$$

Insättning ger $L_A = 40,9$ dB(A).

På större avstånd sjunker nivån relativt långsamt med avståndet. Sålunda blir på 330 m avstånd:

$$r = \sqrt{(330^2 + 60^2)} = 335,41 \text{ m}$$

och nivån $L_A = 39,8$ dB.

På 360 m avstånd blir analogt $r = 364,97$ m och $L_A = 39,0$ dB(A).

Landbaserat aggregat, långt avstånd

I detta fall förutsätts en grupp av 10 aggregat och ett avstånd till närmaste granne är 1100,1120,1140,1160,1180,1200,1220,1240,1260 och 1280 m. Aggregaten och terrängsituationen förutsätts vara desamma som i föregående exempel. Aggregatet förutsätts ha följande relativa (referens 1 kHz oktaven) spektrumfördelning.

| | | | | | | |
|---------------------|----|-----|-----|-----|------|------|
| Frekvens, Hz | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| L _p , dB | 10 | 2 | 2 | 0 | 0 | -5 |

Luftabsorptionen beräknas här enligt formeln:

$$\Delta L_a = 10 \cdot \log(\sum 10^{(L_i + A_i)/10}) - 10 \cdot \log(\sum 10^{(L_i + A_i - r \cdot a_i)/10})$$

Insatta värden ger här för vardera aggregatet:

| Avstånd | ΔL_a | L _A |
|---------|--------------|----------------|
| 1100 | 3,0 | 26,2 |
| 1120 | 3,1 | 26,0 |
| 1140 | 3,1 | 25,8 |
| 1160 | 3,1 | 25,6 |
| 1180 | 3,2 | 25,4 |
| 1200 | 3,2 | 25,2 |
| 1220 | 3,3 | 25,0 |
| 1240 | 3,3 | 24,8 |
| 1260 | 3,4 | 24,6 |
| 1280 | 3,4 | 24,5 |

Insättning av dessa värden i formeln för addition av nivåer ger den totala nivån från samtliga aggregat till L_A = 35,3 dB(A), om ljudeffektnivån ökar linjärt med ökande vindhastighet från 8 m/s och uppåt .

Havsbaseade aggregat

I detta fall förutsätts 50 aggregat med data enligt ovan. I detta fall bedöms "markråheten" vara 0,01. Den aktuella ljudeffekten blir därför 98,5 dB(A).

För en översiktlig handberäkning kan man använda ett genomsnittligt avstånd till närmast störkänsliga punkt. Detta förutsätts här vara 10 km.

Luftabsorptionen beräknas åter enligt formeln:

$$\Delta L_a = 10 \cdot \log(\sum 10^{(L_i + A_i)/10}) - 10 \cdot \log(\sum 10^{(L_i + A_i - r \cdot a_i)/10})$$

vilket här ger $\Delta L_a = 12,9$ dB.

Ljudnivån från ett aggregat på 10 km avstånd kan nu beräknas enligt formeln:

$$L_A = L_{WA, \text{kor}} - 8 - 20 \cdot \log_{10}(r) - \Delta L_a + 10 \cdot \log_{10}(r / 700).$$

Med en ljudeffekt på 98,5 dB(A) blir ljudnivån 9,1 dB(A).

Den totala nivån från 50 aggregat kan beräknas enligt formeln:

$$L_{A, \text{tot}} = 10 \cdot \log(\sum 10^{L_{Ai}/10})$$

vilket här ger

$$L_{A, \text{tot}} = 10 \cdot \log(50 \times 10^{9.1/10}) = 26 \text{ dB(A)}$$

Data som behövs

Vid lokalisering av vindkraftverk är ljudet en viktig fråga och för att kunna göra en bedömning av ljudutbredning och eventuella störningar behövs följande uppgifter.

Allmänt

Redovisning på karta (lämplig skala: 1:10 000) av läge för vindkraftverket(en), bebyggelse, frilufts- och rekreationsområden samt terrängförhållanden samt de markråhetsklasser som omger vindkraftsgruppen.

- Avstånd till närliggande bostäder och andra känsliga områden i meter.
- Uppgifter om förhärskande vindriktning kan också vara av intresse.
- Vid beräkning med detaljerade modeller såsom General Prediction Method och Nord2000 (se ref-lista sist i rapp), behövs information om höjdlinjer i terränger och marktyper (t ex mjuk mark eller hård mark)

Maskinuppgifter

- Fabrikat
- Typ
- Typgodkännande
- Märkeffekt
- Navhöjd
- (Startvind)
- Varvtal (ett eller flera)
- Ljuddata, $L_{WA,ref}$ dB(A) re 1 pW (vid 8 m/s och mätt enligt IEC [IEC])
- Förekomst av toner
- Ljudeffektens variation med vindhastigheten i dB vid olika vindhastigheter eller en faktor k i dB per m/s
- Ljuddata enligt mät rapport:.....
- Om aggregatet har mer än ett varvtal redovisas ljuddata mätta vid olika varvtal
- Bakgrundsnivå från andra ljudkällor

Beräkningar och redovisningar

Beräknad ljudnivå vid de närmaste bostäderna och ev. rekreationsområden och andra ljudkänsliga områden redovisas. Inom områden där verken etableras etappvis, görs en samlad ljudnivå-redovisning för varje tillkommande verk eller grupp av verk. Beräkningarna utförs i normalfallet för medvindförhållanden, d.v.s. "värsta" fall. Redovisningen bör avse vindstyrkan 8 m/s på höjden 10 m, och bör kompletteras med det driftsfall som ger högst ljudeffekt.

Ljudnivån på olika avstånd från vindkraftverket kan också redovisas på karta där ljudnivåer på 45, 40 och 35 dB(A) framgår.

Kontroll och åtgärder vid befintliga verk

När det blir aktuellt att mäta ljud från etablerade verk är det viktigt att först noga tänka igenom syftet med mätningen. I praktiken finns det då två huvudprinciper: antingen vill man kontrollera ljudalstringen hos ljudkällan eller också vill man bestämma ljudnivån i en viss punkt i omgivningen. I det första fallet gör man då en emissionsmätning och i det andra en immissionsmätning.

Emissionsmätningar

För mätning av emissionen hos ett vindkraftverk finns det noggranna instruktioner. I Sverige liksom i de flesta andra länder används en metod som standardiserats av IEC [IEC]. Metoden går i korthet ut på att man mäter på ett standardiserat avstånd från mittpunkten på tornets bas. Detta avstånd är lika med tornhöjden plus radien hos rotorn. Mikrofonen placeras på en speciell mätskiva som läggs på marken. Eftersom vindhastigheten är liten närmast marken minimeras därigenom inverkan av det vindbrus som alstras i mikrofonen. Man mäter sedan i en punkt nedströms aggregatet kompletterat med punkter i ytterligare tre riktningar om ljudet blir olika i olika riktningar. Ur dessa mätresultat kan ljudeffektnivån beräknas. En kontroll av förekomsten av rena toner görs också.

Immissionsmätningar

Immissionsmätningar är svåra att utföra kring vindkraftverk. Anledningen är att det naturliga vindbruset gör det svårt att med säkerhet bestämma enbart aggregatets ljud. Man måste därför vanligtvis göra på så sätt att man först bestämmer ljudnivån från både aggregat och samtliga andra ljudkällor i den aktuella punkten. Därefter stängs aggregatet av och ljudnivån bestäms igen. Därefter kan ljudnivån från enbart aggregat beräknas. Det är då viktigt att de båda mätningarna görs vid samma vindstyrka på mätplatsen. Mätningen ska göras vid flera vindhastigheter.

Normalt utför man i Sverige immissionsmätningarna under speciella vind- och temperaturgradientförhållanden. Hur detta går till framgår av ”Mätning av bullerimmission från vindkraftverk.” [S. Ljunggren, 1998]. Enligt denna metod bestäms ljudtrycksnivån vid olika vindhastigheter. Ursprungligen var tanken att nivån vid 8 m/s på 10 m höjd skulle rapporteras, men nivån kan redovisas även vid andra vindhastigheter. Det finns också en metod som specificerar hur mätningar kan utföras under andra väderleksförhållanden, [S. Ljunggren, 1997].

Ljudutbredningen kring vindkraftverk placerade på slät mark är förhållandevis väl studerad. Beräkningar av ljudutbredningen kan därför utföras med god precision. I sådana fall där bakgrundsnivån är hög och marken plan kan det därför vara vettigt att ersätta en immissionsmätning med en emissionsmätning. Emissionsmätningar är betydligt enklare och billigare att utföra för enstaka verk på plan mark. Om det rör sig om många verk i en vindkraftpark eller angränsande parker, blir metoden med emissionsmätning mycket kostsam eftersom ljudbidraget från alla verk bör bestämmas

Möjligheter minska ljud från befintligt vindkraftverk

Vid lokaliseringen av vindkraftverk är det viktigt att göra en ljudprognos för den aktuella platsen. Det är också viktigt att föra in ljudkrav i kontraktet med leverantören. De ljuddämpande

åtgärder som kan bli aktuella i efterhand beror på om det aerodynamiska eller det mekaniska ljudet dominerar. Ett första steg vid ljudproblem är därför att identifiera storkällorna.

Efterhandsåtgärder för att sänka ljudnivån

Alstringen av aerodynamiskt ljud kan i vissa fall sänkas genom ändring av styrningen av driften, exempelvis ändring av bladvinkel. Det finns inga generella regler för hur detta kan utföras utan kontakt måste tas med tillverkaren i varje enskilt fall för att undersöka vilka åtgärder, om några, som kan bli aktuella.

Mekaniskt ljud från ett aggregat kan bero på slitage eller ett haveri av någon komponent. Även i detta fall är kontakt med tillverkaren den naturliga startpunkten för en renovering.

Sänkning av varvtal eller begränsning av drifttid

Vindkraftverk körs normalt kontinuerligt när vind finns tillgänglig. Risken för att närboende upplever störande buller är ofta störst på kvällar och nätter då bakgrundsnivåer från andra källor är låga och då markinversionen kan göra att vindkraftverken går trots att det är vindstilla på marken. Genom att sänka varvtalet eller inte köra aggregatet på kväll och natt kan en sådan besvärlig situation behärskas.

Inverkan av naturligt vindbrus på subjektiva störningar

Erfarenheten har visat att en viktig faktor när personer har känt sig störda av buller från vindkraftverk, är inte bara styrkan hos ljudet från vindkraftverket utan också hur mycket ljud av annat slag, exempelvis naturligt vindbrus, som finns på platsen. Om det naturliga vindbruset har en förhållandevis hög nivå, kan detta göra det omöjligt att uppfatta aggregatljudet, se vidare avsnittet om maskering. Å andra sidan visar också erfarenheten att avsaknad av annat ljud kan göra ljudet från ett vindkraftaggregat mer störande subjektivt sett än i normalfallet. Eftersom låga bakgrundsnivåer ofta uppträder vid vissa vindriktningar, kan en begränsning av driften under sådana omständigheter ge en minskning av störningarna i besvärliga situationer.

BILAGA 1. Några akustiska begrepp

Ljud - buller - infraljud

Ljud kan betraktas som mekaniska svängningar i ett medium. Ofta begränsas definitionen till att enbart gälla sådana svängningar som kan uppfattas med hörseln, men fysikaliskt sett kan ljud uppträda i alla medier. Svängningsrörelsens periodicitet, uttryckt exempelvis som antalet svängningar per sekund, benämns frekvens. Den internationellt standardiserade enheten för frekvens är Hertz med beteckningen Hz. 1 Hz är lika med en period per sekund. Den subjektiva upplevelsen av den fysikaliska storheten frekvens kallas ofta tonhöjd. I figur B1 ges en illustration till frekvensbegreppet.

För att ett ljud skall vara hörbart på normalt sätt med hörseln krävs att energiinnehållet ligger inom frekvensintervallet ca 20 - ca 20.000 Hz. Gränserna är något diffusa och varierar med ljudets styrka och inte minst från person till person. Infraljud definieras som ljud där energiinnehållet ligger vid 20 Hz eller lägre frekvens. Ultraljud definieras analogt som ljud där frekvensen är 20000 Hz eller högre.

Det finns ingen rent fysikalisk definition av begreppet "buller". I stället utgår man från en persons uppfattning om ljudet och definierar buller som "icke önskvärt ljud". Detta medför naturligtvis att definitionen inte är entydig eftersom olika personer kan ha olika uppfattning. För det praktiska bullerarbetet är dock definitionen av grundläggande betydelse och mycket användbar. Ett mycket typiskt exempel på skillnaden mellan ljud och buller har man i vindkraftsammanhang, där det naturliga vindbrus som vinden orsakar i vegetationen bör kallas ljud och inte buller. Ljud från vindkraftverk som har en högre ljudnivå än ett riktvärde för ljud från vindkraftverk bedöms vara buller. Det är uppenbart att ljudet kan vara starkare än bullret i ett fall som detta. Ljudet kan då fungera som en "akustisk parfym" och trots att det ger en höjning av den fysikaliska styrkan minskar de upplevda störningarna.

Närvaro av ljud i gaser, och då exempelvis i luft, yttrar sig bl. a. som variationer i lufttrycket. Eftersom tryck allmänt mäts i enheten Pascal, Pa (numerärt lika med N/m^2), kan ljudets styrka också uttryckas i Pascal. Denna enhet är dock opraktisk och föga relaterad till människors uppfattning av ljud. Därför används i stället logaritmiska storheter. Ljudtrycket uttrycks sålunda i den logaritmiska ljudtrycksnivån. Om medelvärdet av det aktuella ljudtrycket betecknas med p så definieras ljudtrycksnivån L_p som:

$$L_p = 20 \log (p/p_0) , \quad (A1)$$

där \log betecknar den vanliga 10-logaritmen och p_0 är ett internationellt standardiserat referensvärde, $p_0 = 20 \mu Pa$.

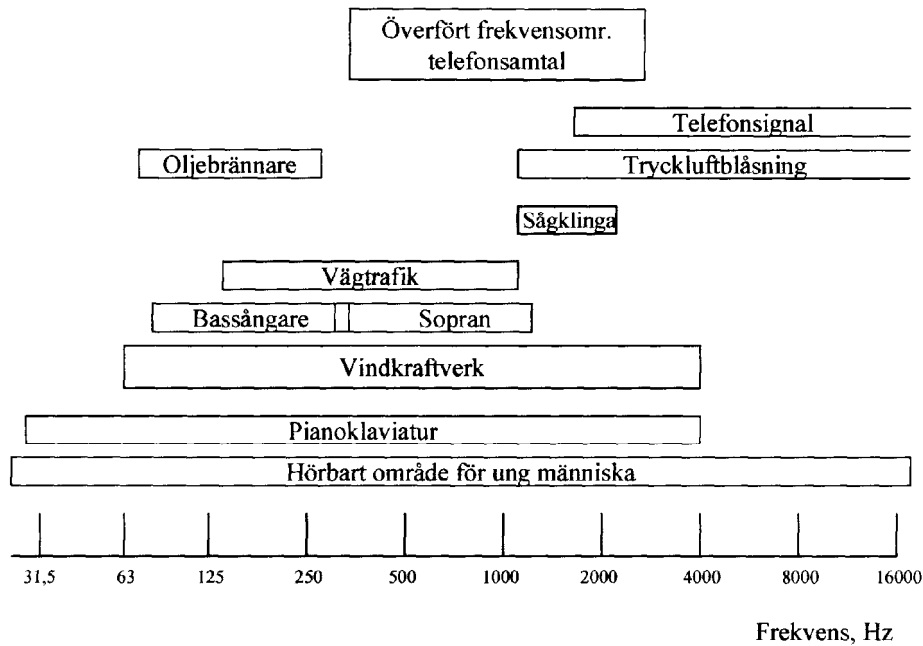
Den till ljudtrycksnivån hörande enheten kallas decibel med beteckningen dB re 20 μPa . Ofta skriver man bara dB.

Ljudnivå

Människors känslighet för ljud varierar med ljudets frekvens. Vid normala ljudtrycksnivåer är känsligheten störst inom frekvensområdet 2000 - 5000 Hz. Känsligheten sjunker sedan mot såväl lägre som högre frekvenser. För att en fysikalisk beskrivning av ett ljud med ett enda mä-

tetal skall visa överensstämmelse med upplevd styrka fordras därför att hänsyn tas till denna variation i känsligheten.

Det finns åtskilliga sätt att utföra en sådan manipulation. Den i särklass vanligaste kallas A-vägning. Motsvarande storhet heter ljudnivå med beteckningen L_A . Enheten är fortfarande decibel, men för att visa att A-vägning har skett används ofta beteckningen dB(A) eller dBA. A-vägningen kan enkelt utföras med hjälp av en normal ljudnivåmätare. I Tabell B1 ges några exempel på typiska ljudnivåer.



Figur B1. Några olika ljudkällors och aktivitetens huvudsakliga frekvensinnehåll jämfört med det frekvensområde som uppfattas av hörseln på normalt sätt.

Under laboratorieförhållanden har det visat sig att den minsta ändring i ljudtrycksnivå som är uppfattbar ligger på ca 1 dB eller strax därunder. Under mer vardagliga förhållanden har motsvarande ändring rapporterats vara av storleksordningen 3 dB. Den ändring i nivå som fördras för att ett ljud skall uppfattas som dubbelt så starkt sägs konventionellt vara 10 dB; analogt sägs en minskning med 10 dB motsvara en halvering av den upplevda styrkan.

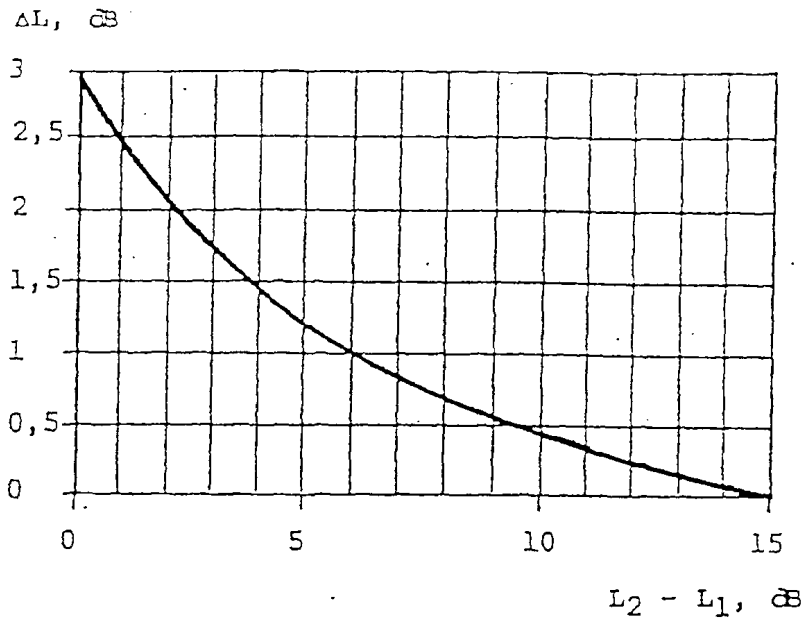
Tabell B1. Exempel på typiska ljudnivåer.

| | |
|-----------------|---|
| 0 - 15 dB(A) | Svagast uppfattbara ljud |
| 30 - 35 dB(A) | Bakgrundsnivå i bostadsrum med mekanisk ventilation |
| 50 - 60 dB(A) | Medelljudnivå på mycket tyst stadsgata |
| 60 - 65 dB(A) | Samtal på kort avstånd |
| 65 - 75 dB(A) | Landande jettflygplan på 1000 m höjd |
| 80 - 85 dB(A) | Snälltåg med 100 km/h på 100 m avstånd |
| 85 dB(A) | Risk för hörselskada vid långvarig exponering |
| 90 - 95 dB(A) | Startande långtradare på 5-10 m avstånd |
| 120 - 130 dB(A) | Smärtgräns |

Addition av ljudnivåer

Eftersom ljudnivån är en logaritmisk storhet kan vanliga regler för addition inte användas utan additionen måste utföras på ett sätt som motsvarar en addition av energiinnehållet. En sådan addition kan lätt utföras med hjälp av diagrammet i Figur B2.

I figuren är $L_1 - L_2$ skillnaden mellan de två nivåer som skall adderas. Diagrammet ger en kvantitet ΔL som skall adderas till den högre av de båda nivåerna L_1 och L_2 . Således blir exempelvis $50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} = 53 \text{ dB}$; $50 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 60,4 \text{ dB} \cong 60 \text{ dB}$. Genom upprepad användning kan diagrammet utnyttjas för addition av godtyckligt antal nivåer; $50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} + 54 \text{ dB} = 53 \text{ dB} + 54 \text{ dB} = 56,5 \text{ dB} \cong 57 \text{ dB}$.



Figur B2. Hjälpdigram för addition av två ljudtrycksnivåer eller ljudnivåer.

Frekvensspektra

Fördelningen av ljudenergi på olika frekvensområden varierar från fall till fall och framgår inte direkt av ett entalsvärde av typen dB(A). Det kan därför finnas anledning att göra en noggrannare beskrivning av ett ljud. Ofta används därvid ett frekvensspektrum.

I ett frekvensspektrum redovisas ljudtrycksnivån fördelad på olika frekvensband. Frekvensbanden kan väljas på olika sätt; till de vanligare hör de s. k. oktavbanden. Oktavbanden utmärks av att den övre gränzfrequensen är dubbelt så hög som den undre. Oktavbanden anges med hjälp av sina mittfrekvenser; bl. a. följande frekvenser är internationellt standardiserade:

63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 Hz.

Har ljudet hög ljudtrycksnivå inom relativt smala frekvensband kan en finare uppdelning av frekvensområdet vara lämplig. Därvid används bl. a. ters- eller 1/3-oktavband. Dessa frekvensband är en tredjedel så breda som oktavbanden, varför ljudtrycksnivån i varje band alltid blir lägre i tersbanden än i motsvarande oktavband. Aktuella mittfrekvenser för oktavbanden framgår av figur B1.

Om frekvensspektrat innehåller rena toner (d.v.s. ljud med klart uppfattbar tonhöjd), är det lämpligt att göra en smalbandsanalys. Denna utförs då vanligen med konstant bandbredd; i vindkraftlitteraturen ser man ofta analyser med bandbredden 1 - 10 Hz.

Ljudeffektnivå

Som framgår ovan beskriver ljudnivån styrkan hos ett ljud i en viss punkt. Denna styrka beror dels på hur mycket ljud som avges av ljudkällan men också på bland annat avståndet från källan. Hur mycket ljud källan avger redovisas i storheten ljudeffektnivå. Speciellt för vindkraftverk brukar man använda en A-vägd ljudeffektnivå som erhålls ur mätningar utförda vid en vindhastighet av 8 m/s (mätt på 10 m höjd). Denna ljudeffektnivå betecknas $L_{WA,ref}$ och definieras som

$$L_{WA,ref} = 10 \log(W_{A,ref} / W_0)$$

där $W_{A,ref}$ är den avgivna effekten i watt under referensförhållanden och W_0 referenseffekten, $W_0=1$ pW. Ljudeffektnivån anges också i decibel, dB. För att göra det tydligt att nivån avser ljudeffekt och inte ljudtryck och för att undvika sammanblandning av de två storheterna bör man skriva ut den fullständiga beteckningen som är dB re 1 pW.

Har man tillgång till denna ljudeffektnivå kan ljudnivån beräknas på olika avstånd från vindkraftverket på det sätt som redovisas i skriften.

Referenser

- M. Almgren (2006): "Ljud från vindkraft. Utredning inför Naturvårdsverkets allmänna råd". Elforsk rapport 06:02
- P. Appelqvist, "Maskering av vindkraftljud via naturligt bakgrundsljud – särskilt havsbrus", MWL, The Marcus Wallenberg Laboratory for Sound and Vibration Research, TRITA-AVE 2006:100, ISSN-1651-7660
- Bekendtgørelse nr. 304 af 14. maj 1991.(1991): "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller." Dansk lagtext inom området Energi og Forsyning.
- B. Berglund et al (1981): "Loudness (or annoyance) summation of combined community noise", Journal of Acoustical Society of America 70, 1628-1634.
- H. Bergström (2009): Muntlig referens, Hans Bergström, fil.dr. i meteorologi vid Uppsala universitet.
- M Boué (2007), "Long range sound propagation over the sea with application to wind turbine sound". Report from KTH, TRITA-AVE 2007:22.
- K. Bolin (2006), "Masking of Wind Turbine Noise", KTH/TRITA 06/86
- Boverket (2008): "Vindkraftshandboken. Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenomåden".
- Danish Acoustical Laboratory (1982): Environmental noise from industrial plants. General prediction method. Report 32, 1982 (även ibland refererad som "DAL 32")
- O. Fégeant (1998): "Measurement of the Environmental Noise at the Torseröd Wind Turbine Site." KTH, Avdelningen för byggnadsteknik, arbetsrapport 1998:2.
- O. Fégeant (2001): "Noise from Wind Turbines", KTH-BYT/R 01/184
- H. Klug (1997): "Noise from wind turbines or: How many megawatts can you get for 100 dB(A)?" European Wind Energy Conference, Dublin. Proceedings, s 124-127.
- IEC: "Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques". IEC 61 400-11 second edition (Ed 2.1) 2006-11. Standarden finns i en svensk version SS-EN 61 400-11 som är en kopia av IEC 61 400-11. Utgivningen av den svenska publiceringen ligger efter i tiden.
- P. Janssen (2004): "The interaction of Ocean Waves and Wind", Cambridge University Press, London.
- L. Johansson (2003): "Sound Propagation around Off-Shore Wind Turbines". Inst för Byggnader och installationer, KTH. Avdelningen för Byggnadsteknik, Bulletin 192, 2003.
- J. Kragh, D. Theofiloyiannakos, H. Klug, T. Osten, B. Andersen, N. van der Borg, S. Ljunggren, O. Fégeant, R. J. Whitson, J. Bass, D. Englich, C. Eichenlaub och R. Weber (1998): "Noise Immission from Wind Turbines." Final Report of Project JOR3-CT95-0065. Delta, rapport AV 1509/98.

- C. Larsson (1994): "Meteorological effects on sound propagation. Current topics in acoustical research." Council of Scientific Information, India.
- C. Larsson (1997): "Atmosfärisk absorption av ljud, svenska normalförhållanden." Meteorologiska institutionen, Uppsala universitet.
- C. Larsson (1997): "Atmospheric Absorption Conditions for Horizontal Sound Propagation." Applied Acoustics 50, pp. 231-245.
- C. Larsson (1999): "Ljudutbredning från vindkraftverk - mätningar 1998-1999." Institutionen för geovetenskaper, meteorologi, Uppsala.
- G, Leventhall (2005): "How The 'Mythology' Of Infrasound And Low Frequency Noise Related To Wind Turbines Might Have Developed Wind Turbine Noise" Conference WTN 2005, Berlin
- S. Ljunggren (ed) (1994): "Recommended Practices for Wind Testing: 4. Acoustics. Measurement of Noise Emission from Wind Turbines." 3rd Edition 1994. IEA. *
- S. Ljunggren och G. Lundmark (1995): "Buller från vindkraftverk." Bilaga till "Etablering av vindkraft på land". Allmänna råd 1995:1. Boverket
- S. Ljunggren (ed) (1997): "Recommended Practices for Wind Testing: 10. Acoustics. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations." 1st Edition 1997. IEA. *
- S. Ljunggren (1998): "Mätning av bullerimmission från vindkraftverk." Elforsk rapport 98:24.
- Naturvårdsverket (1983): "Externt industribuller - allmänna råd." RR 1978:5, 2:a uppl. 1983. Statens Naturvårdsverk.
- Naturvårdsverket (1984): "Metod för immissionsmätning av externt industribuller." Statens Naturvårdsverk, meddelande 6/1984.
- Naturvårdsverket (2001); "Ljud från vindkraftverk" Boverket, Energimyndigheten, Naturvårdsverket, rapport 6241.
- Naturvårdsverket (2005) "Metod för immissionsmätning av externt industribuller", rapport 5417 (remissutgåva)
- Nord2000 (2002) Nordic Environmental Noise Prediction Methods, Nord2000. Summary report. General Nordic Sound Propagation Model and Applications in Source-Related Prediction Methods, Delta Report AV 1719/01, Revised 30 June 2002, Lyngby, Danmark
- M. Ohlrich, J. Jakobsen och B. Andersen (1987): "Støj fra mindre vindmøller." Lydteknisk Institut IISN 0105-2853.
- E. Pedersen (2007): "Human response to wind turbine noise. Perception, annoyance and moderating factors". Göteborgs universitet.
- B. Plovsing (2001): Nord2000. Comprehensive model for predicting outdoor sound propagation. Experience from validating the model., Proceedings Inter-Noise 2001, The Hague
- H. Remmers och K. Betke (1998): "Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall." Fortschritte der Akustik - DAGA 98, pp 472-473. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Oldenburg 1998.

- E. Rudolphi (1998): "Wind turbine noise emission. Wind speed measurements below hub height give poor accuracy." Nordic Acoustical Meeting, Stockholm 1998. Proceedings, pp. 127-132.
- K. P. Shepherd och H. H. Hubbard (1991): "Physical Characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines." Noise control engineering journal, Vol 36, No 1, s 5-15.
- Socialstyrelsen (1996): "Socialstyrelsens allmänna råd om buller inomhus och höga ljudnivåer." SOSFS 1996:7 (M).
- SS-ISO 9613-1 Akustik – Dämpning av ljud under utbredning utomhus – Del 1: Beräkning av atmosfärens absorption. Fastställd 1995-05-05
- M. Åbom and M. Boué (2007), Long range sound propagation over the sea with application to wind turbine sound. Conference proc. Wind Turbine Noise, Lyon, France.
- L. Örtegren (1996): Privat kommunikation.

