



Ljud från vindkraftverk

BOVERKET • ENERGIMYNDIGHETEN • NATURVÅRDSVERKET

dec 2001



Rapport 6241

Elektronisk publikation

Laddas ner som pdf-fil från
Naturvårdsverkets bokhandel på Internet
Miljöbokhandeln
www.miljobokhandeln.com

Pappersutskrift

Beställs från Kundtjänst
Tel 08-698 12 00, fax 08-698 15 15
E-post: kundtjanst@environ.se
Naturvårdsverket, Kundtjänst,
SE-106 48 Stockholm

Internet: www.environ.se

Rapport: Ljud från vindkraftverk
ISBN 91-620-6241-7

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

Beräkningsmodell i Excel "Ljud från havsbaserade vindkraftverk"
ISBN 91-620-6250-6

Förord

Skriften ”Lokalisering av vindkraft på land” Allmänna råd 1995:1 [Boverket], redovisar de lagregler och övriga bestämmelser som då gällde för etablering av vindkraftverk på land. I skriften ges bl. a. råd om hur vindkraften kan eller bör hanteras i den fysiska planeringen. Boverket har fått ett regeringsuppdrag att göra en översyn av skriften tillsammans med berörda centrala verk. Denna översyn skall redovisas till regeringen den 1 mars 2002.

Till skriften ”Lokalisering av vindkraft på land” finns en bilaga 3 ”Buller från vindkraftverk” [S. Ljunggren och G. Lundmark]. Många frågor från företag och allmänhet gäller ljud från vindkraftverk. Ny kunskap och behovet av en modell för ljudutbredning över vatten har gjort att de ansvariga verken bedömt det angeläget att uppdatera denna bilaga med nya modeller för beräkning av ljud från vindkraftverk.

I ”Ljud från vindkraftverk” 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 ersätter den som redovisas i bilaga 3 ”Buller från vindkraftverk” [S. Ljunggren och G. Lundmark].

Modellerna presenteras också som två användarvänliga program för beräkning i Excel, dels ”Ljud från landbaserade vindkraftverk ” och dels ”Ljud från havsbaserade vindkraftverk”. Båda dessa program har tagits fram av Gunnar Lundmark, Lundmark Akustik & Vibration.

”Ljud från vindkraftverk” har tagits fram efter en bearbetning och komplettering gjord av prof. Sten Ljunggren, Institutionen för Byggnadsteknik, KTH samt efter remissbehandling. Rapporten ges ut gemensamt av Naturvårdsverket, Energimyndigheten och Boverket.

Kerstin Cederlöf
Avdelningschef

Ulf Troedsson
Divisionschef

Stefan Jakélius
Avdelningschef

Naturvårdsverket

Boverket

Energimyndigheten

Innehållsförteckning

FÖRORD	3
SAMMANFATTNING	6
LJUDALSTRING	7
AERODYNAMISKT LJUD.....	7
MEKANISKT LJUD	7
LJUDDATA	7
KARAKTÄR PÅ LJUDET FRÅN VINDKRAFTVERK.....	9
<i>Rena toner</i>	9
<i>Amplitudmodulering</i>	9
<i>Dunkande ljud – lågfrekvent ljud</i>	9
<i>Infraljud</i>	10
BESTÄMNING AV LJUDDATA FÖR ETT VINDKRAFTVERK.....	10
OMRÄKNING AV LJUDDATA TILL AKTUELL PLATS.....	10
LJUDUTBREDNING	11
GEOMETRISK UTBREDNINGSDÄMPNING	11
VINDFÖRHÅLLANDEN – VINDGRADIENT - MARKDÄMPNING.....	11
TEMPERATURFÖRHÅLLANDEN (TEMPERATURGRADIENT)	12
ABSORPTION I LUFTEN	13
LJUDUTBREDNING ÖVER VATTEN PÅ STORA AVSTÅND.....	14
VARFÖR HÖRS BULLERKÄLLOR SÅ TYDLIGT PÅ NATTEN?	16
MASKERING	17
BERÄKNING AV LJUDIMMISSION FRÅN VINDKRAFTVERK	20
PRECISION OCH SÄKERHETSMARGINAL	20
EN TILLBAKABLICK.....	20
BESTÄMNING AV AKTUELL LJUDEFFEKTIVÅ	21
LJUDUTBREDNING.....	22
<i>Ljudutbredning över land på avstånd upp till 1000 m</i>	22
<i>Ljudutbredning över land på avstånd över 1000 m</i>	22
<i>Ljudutbredning över vatten</i>	23
SAMTIDIG LJUDIMMISSION FRÅN FLERA AGGREGAT.....	24
EXEMPEL PÅ LJUDBERÄKNINGAR	25
LANDBASERAT AGGREGAT, KORT AVSTÅND.....	25
LANDBASERAT AGGREGAT, LÅNGT AVSTÅND.....	26
HAVSBASERADE AGGREGAT	26
REDOVISNING AV LJUDIMMISSION KRING VINDKRAFTVERK – VILKA DATA BEHÖVS?	28
ALLMÄNT	28
MASKINUPPGIFTER	28

BERÄKNINGAR OCH REDOVISNINGAR	28
KONTROLL OCH ÅTGÄRDER VID BEFINTLIGA VERK.....	29
EMISSIONSMÄTNINGAR.....	29
IMMISSIONSMÄTNINGAR	29
MÖJLIGHETER ATT MINSKA LJUD FRÅN BEFINTLIGT VINDKRAFTVERK	29
<i>Efterhandsåtgärder för att sänka ljudnivån.....</i>	<i>29</i>
<i>Sänkning av varvtal eller begränsning av drifttid</i>	<i>30</i>
<i>Inverkan av naturligt vindbrus på subjektiva störningar.....</i>	<i>30</i>
BILAGA 1. NÅGRA AKUSTISKA BEGREPP.....	31
LJUD - BULLER - INFRALJUD	31
LJUDNIVÅ	31
ADDITION AV LJUDNIVÅER	33
FREKVENSSPEKTRA	34
LJUDEFFEKTIVÅ.....	35
REFERENSER	36

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 detta är ännu dåligt kartlagt. 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 som bygger på de senaste rönen och som därför också skiljer sig från de beräkningar som tidigare gjorts. För markbaserade vindkraftverk redovisas två modeller, en för korta och en för långa avstånd. För havsbaserade aggregat redovisas en preliminär modell som primärt är avsedd för stora avstånd. De presenterade modellerna förväntas ge i genomsnitt rätt värde, 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) och dels mekaniskt ljud från främst växel (ett skorrande mekaniskt ljud, ofta med hörbara toner). Det har förekommit att även generator, kraftelektronik (vid variabelt varvtal) och pumpar gett ljud med tydliga toner. Detta är numera sällsynt.

Aerodynamiskt ljud

Hos moderna serietillverkade aggregat är normalt det aerodynamiska bullret från bladen dominerande. Det bestäms i huvudsak av bladspets hastigheten, bladens form (inte minst bakkantens tjocklek) och turbulensen i luften. Det aerodynamiska bullret 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.

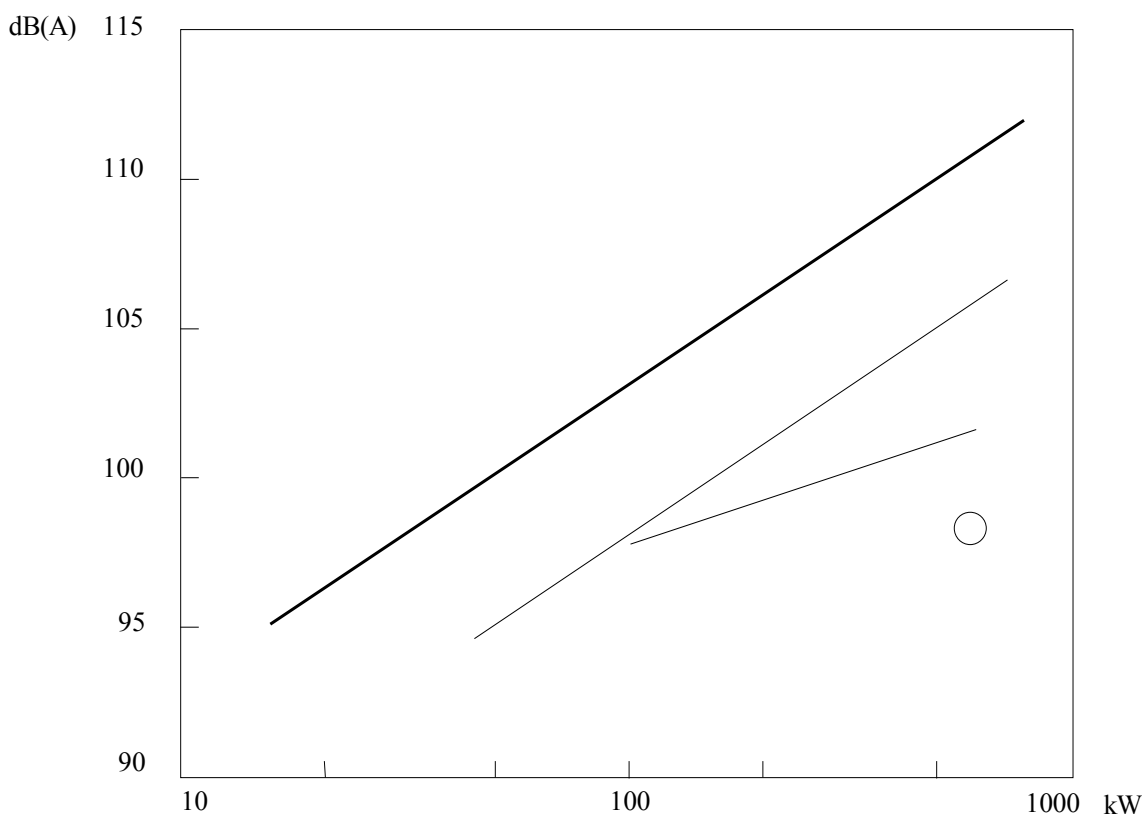
Mekaniskt ljud

Mekaniskt ljud är normalt svagare än det aerodynamiska ljudet, men upplevs ofta som mera 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 stälcyylinder) samt i vissa fall via nav och blad. Då det gäller förekomst av mekaniskt ljud är vindkraftverk av olika fabrikat erfarenhetsmässigt mycket olika. Moderna serietillverkade aggregat ger sällan problem med mekaniskt ljud.

Ljuddata

Tillverkare av vindkraftverk kan normalt redovisa ljuddata i form av en ljudeffektnivå, LWA, ref, som bestäms vid en vindstyrka på 8 m/s mätt på höjden 10 m. 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.



Figur 1. Utveckling hos vindkraftverkens ljudalstring. Figuren visar A-vägd ljudeffektnivå som funktion av elektrisk uteffekt. Den tjocka heldragna kurvan avser aggregat mätta 1982-84; den tunnare kurvan aggregat mätta 1985-87 [M. Ohlrich, J. Jakobsen och B. Andersen]. Den streckade kurvan är framtagen år 1991 med hjälp av fabrikantuppgifter [S. Ljunggren och Gunnar Lundmark, 1995]. Den runda ringen avser slutligen medelvärdet för fem aggregattyper som ingick i Nuteks teknikupphandling 1996, [L. Örtegren].

Den streckade linjen är framtagen år 1991 i Sverige. Den skiljer sig från de båda andra bland annat genom en svagare lutning. En anledning till detta kan vara att nyare aggregat tenderar inte bara att vara tystare än äldre, utan också större. För aggregat med en elektrisk uteffekt av 500-600 kW är skillnaden åter ca 5 dB relativt förhållandena 1985-87. Slutligen kan noteras att medelvärdet för fem aktuella aggregattyper i Nuteks anbudstävlan ligger ytterligare 2,5 dB längre ned.

Det har påpekats att moderna aggregat tenderar att ge ungefär samma ljudeffektnivå, knappt 100 dB(A), oberoende av den elektriska uteffekten [H. Klug].

Hos vindkraftverk med konstant varvtal är ljudeffekten svagt beroende av vindhastigheten. Normalt ökar ljudets styrka med ca 0,5-1 dB per m/s i ökning av vindhastighet. Ett vindkraftverk med ljudeffektnivån 100 dB(A) vid 8 m/s kan därför förväntas ha en effektnivå om 98-99 dB(A) vid 6 m/s.

Hos vissa andra typer av aggregat är varvtalet kraftigt beroende av vindhastigheten; lågt varvtal vid låga hastigheter och vice versa. Eftersom ljudeffekten hos ett vindkraftverk är kraftigt beroende av bladspets hastigheten innebär detta att aggregat med två fasta varvtal eller kontinuerligt varierande varvtal ger lägre ljudalstring vid svaga vindar, d.v.s. just vid de tillfällen när risken för störningar är störst, vilket beror på att bakgrundsnivån från naturligt vindbrus då är låg.

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 väsande eller 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 är negativ på flera sätt. Framför allt upplevs rena toner 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.

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 som ursprungligen tagits fram för bedömning av externt industribuller [Naturvårdsverket, 1984]. För att utnyttja denna metod för ljud från vindkraftverk utgår man från en mätning som gjorts på relativt kort avstånd från tornet enligt de internationella reglerna för emissionsmätningar [IEC, 1998]. Detta avstånd är normalt lika med aggregatets navhöjd plus rotorradie. De rena tonernas styrka i förhållande till det svischande ljudet från bladen bestämmer då om de rena tonerna skall anses vara störande eller ej. Utvärdering kan utföras enligt IEC:s metod [IEC, 1998]. Det skall dock observeras att ett tillägg till denna metod är under utarbetande och kommer att publiceras som en internationell standard av IEC. Detta tillägg handlar om utvärdering av toner som varierar i styrka eller frekvens.

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. 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 minskar möjligheten till maskering och tenderar att göra ljudet mer störande.

Dunkande ljud – lågfrekvent 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]. Denna effekt kan naturligtvis också tänkas uppträda vid andra, d.v.s. i praktiken högre, vindhastigheter än 8 m/s, d.v.s. den vindhastighet då ljudet

mäts. 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].

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]. Denna metod används fortfarande av många fabrikanter, speciellt i Danmark. Metoden är dock osäker och kan ge en underskattning av ljudalstringen [E. Rudolphi]. Nyare metoder har därför tagits fram, den ena inom IEA (International Energy Agency) [S. Ljunggren, 1994], och den andra inom IEC (International Electric Commission) [IEC, 1998]. Dessa båda metoder är mycket lika och den version som utgetts av IEC är numera svensk (och också dansk) standard.

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. För andra typer av maskiner har detta problem lösts genom att man deklarerar ljuddata genom en speciell 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. Arbete med att ta fram en standard för en sådan procedur pågår i Europa (CENELEC), men är ännu inte avslutat.

Omräkning av ljuddata till aktuell plats

Alla ljuddata hänför sig till en vindhastighet på 8 m/s mätt på 10 m höjd. 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 och därigenom ljudalstringen större vid samma vindhastighet mätt på 10 m höjd. I avsnitt "Bestämning av aktuell ljudeffektnivå" visas hur man kan korrigera fabrikantens ljuddata i detta avseende.

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 vindförhållandena 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, 20 - 40 m eller mer, blir dock markdämpningen kraftigt beroende av de meteorologiska förhållandena. Därför diskuteras markdämpning här tillsammans med vindförhållandena.

Geometrisk utbredningsdämpning

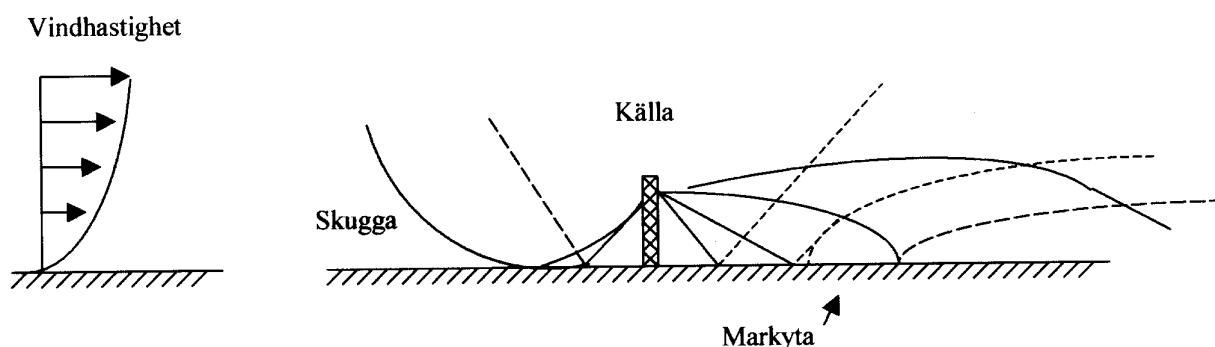
På avstånd större än ca 100 m från vindkraftverket kan man räkna med att ljudenergin sprids över en halvsfär som blir större allt eftersom avståndet ökar. Vid en avståndsfördubbling ökar halvsfärens area 4 gånger. Detta medför att ljudnivån (som är en logaritmisk storhet som närmast beskriver störintrycket)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

Temperaturförhållanden (temperaturgradient)

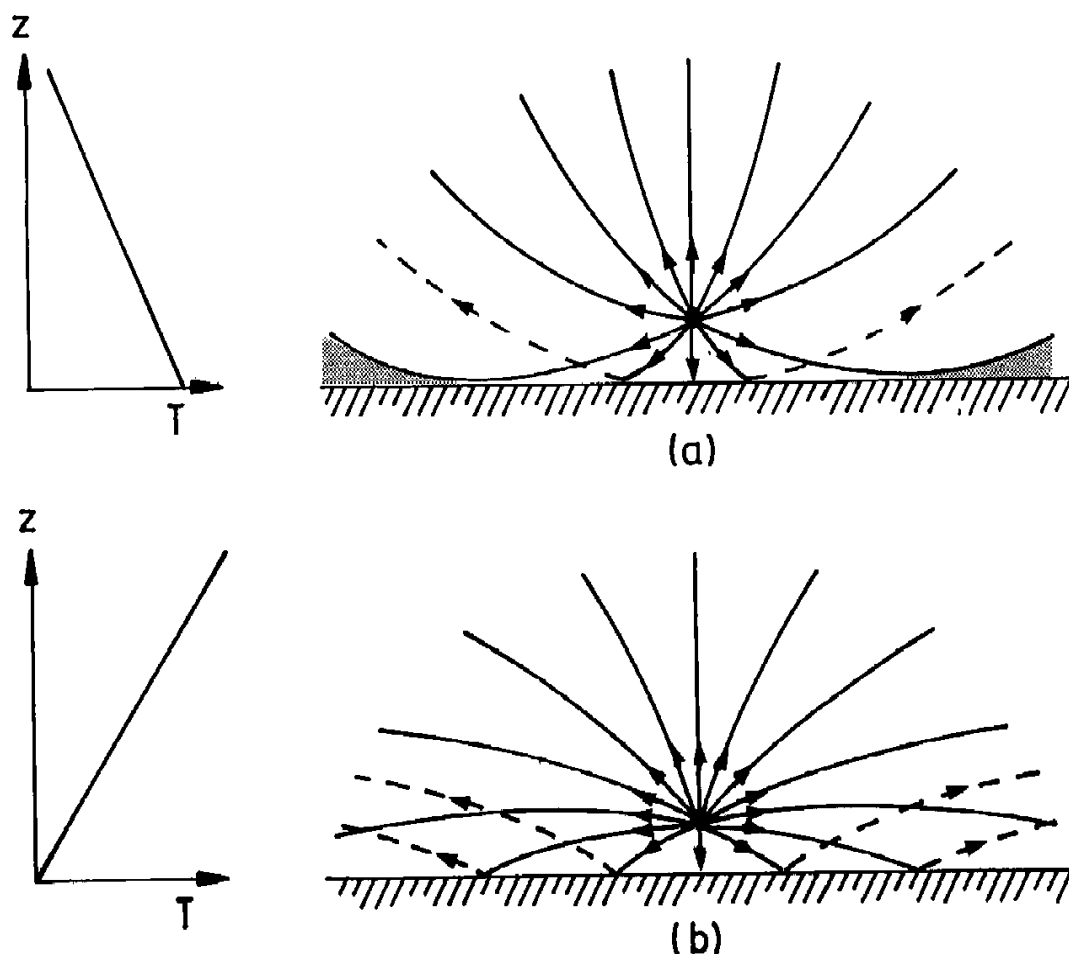
Ljudets utbredningshastighet ökar med ökande lufttemperatur. Temperaturen variation med höjden över marken bestäms bland annat av strålningsförhållandena, som främst är beroende av solhöjd över horisonten och molnighet.

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 mark 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 avbøjning 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 landpaverkade 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 do-vare. Detta beror på att frekvensspektrat förändras på grund av luftabsorptionen.

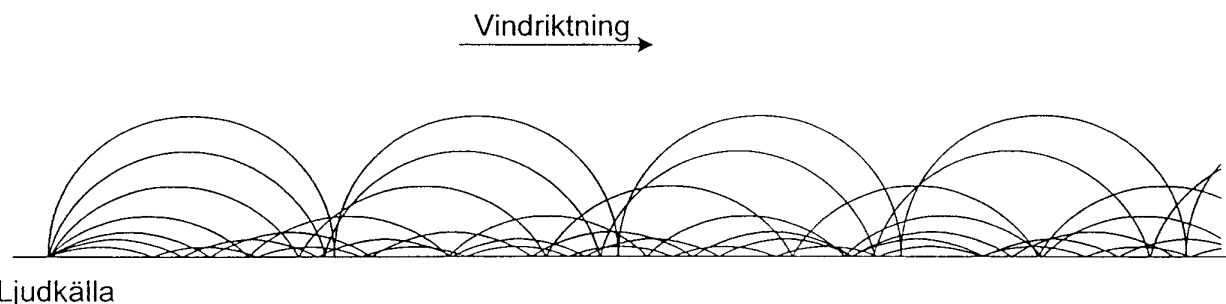
Luftdämpningen avtar med ökande relativ fukthalt. För svenska förhållanden finns värden redovisade [C. Larsson, 1997]. Vid översiktliga beräkningar och vid tillfällen när aggregatets frekvensspektrum inte är känt antas luftabsorptionen vara 5 dB/km.

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.

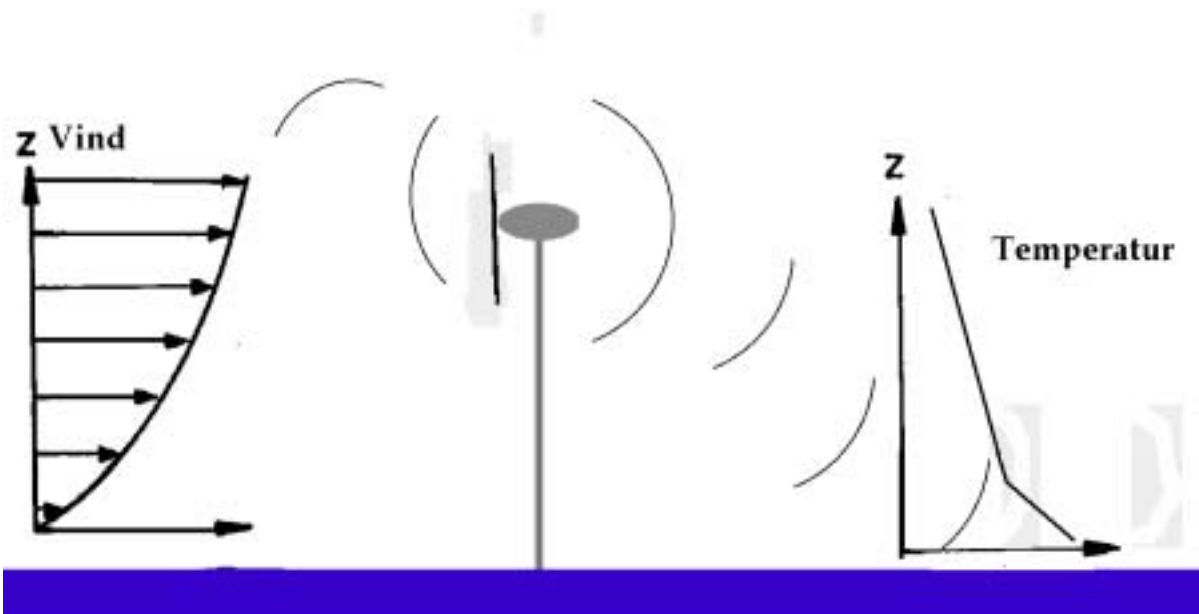
Ljudutbredning över vatten på stora avstånd

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. Det är för närvarande inte känt i vilken omfattning detta påverkar utbredningsdämpningen.

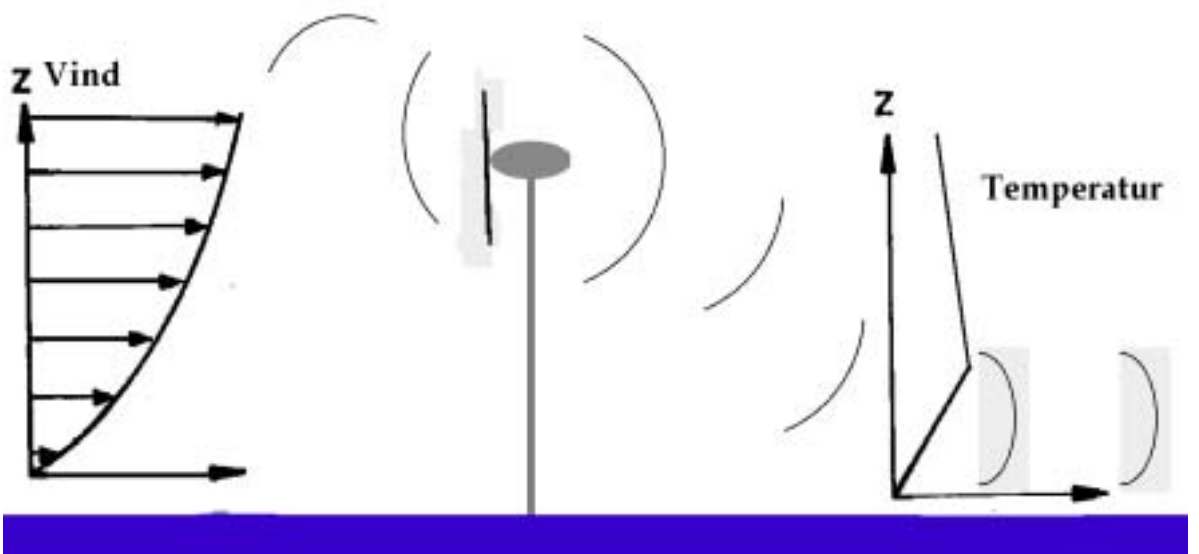


Figur 4. Ljudutbredning på stora avstånd över vatten.

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.



a



b

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

Varför hörs bullerkällor så tydligt på natten?

En kväll under sommarhalvåret. Solen börjar närma sig horisonten. Människor sätter sig och äter kvällsmat eller dricker kaffe i bersån. Dagens aktiviteter summeras och tankar kräver stillhet och tystnad. Då är det störst sannolikhet för att höra det närbelägna vindkraftverket. Varför?

Några timmar innan solnedgång 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].

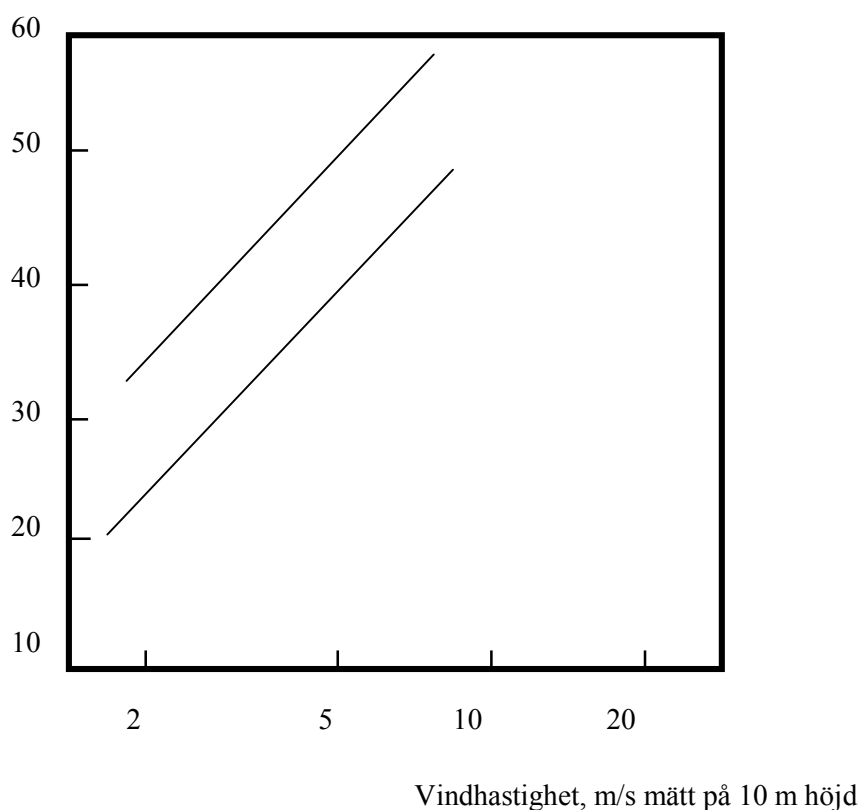
Subjektivt upplevs ofta att enstaka ljudkällor hörs mycket tydligt under vindstilla sommarnätter. Dessutom inverkar det förhållandet att bakgrundsnivån från andra källor, t ex trafik, arbetsmaskiner, fåglar, människor etc. är låg på natten, vilket medför att ljud från exempelvis ett vindkraftverk kan bli mer framträdande. Denna faktor är normalt viktigare än de meteorologiska förhållandena.

Maskering

Som nämnts ovan kan det brus som av vinden alstras i träd, byggnader etc. vara av en nivå som gör det svårt eller omöjligt att uppfatta ljud från ett aggregat. Denna "maskering" är därför av stor praktisk betydelse, men jämförelsevis dåligt utforskad.

Nivån på det naturliga vindbruset beror i huvudsak på vindhastigheten och mängden höga föremål i närheten av observationspunkten. I figur 6 redovisas några typiska exempel på detta. Även ljudnivån från ett vindkraftaggregat varierar med vindens styrka. Denna variation är dock liten jämfört med det naturliga vindbrusets. Detta medför att aggregat generellt sett hörs bäst vid låga vindhastigheter när det naturliga vindbruset har låg nivå.

Ljudnivå dB(A) på 1,5 m över mark



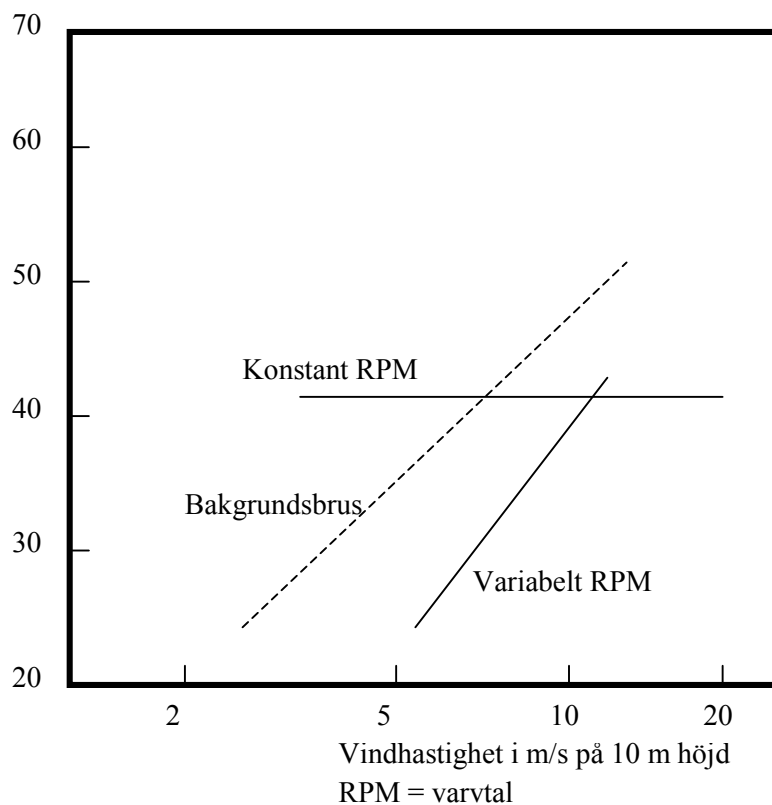
Figur 6. Naturligt vindbrus på 1,5 m höjd över marken som funktion av vindhastigheten mätt på 10 m höjd. Den övre kurvan gäller i en omgivning av höga träd, den undre i en omgivning av låga byggnader.

Det har påpekats att om ett vindkraftaggregat körs med ett varvtal som är proportionellt mot vindhastigheten kan även ljudnivån från aggregatet förväntas bli kraftigt beroende av vindhastigheten. Teoretiska överläggningar och mätresultat visar att om ljudnivån är LA1 vid varvtalet RPM1, kan ljudnivån LA2 vid ett annat varvtal RPM2 beräknas på följande sätt:

$$L_{A2} = L_{A1} + 50 \log \text{RPM}_2 / \text{RPM}_1.$$

Detta medför att ljudalstringen blir relativt låg vid låga vindhastigheter, något som är eftersträvansvärt. Vid höga vindhastigheter brukar aggregat av denna typ övergå till drift med ett konstant varvtal, varför inte heller förhållandena vid mycket höga vindhastigheter ger några speciella problem. Förhållandena framgår tydligt av figur 7 som visar beräknade ljudnivåer på ett avstånd av 300 m från ett hypotetiskt aggregat i megawattklassen.

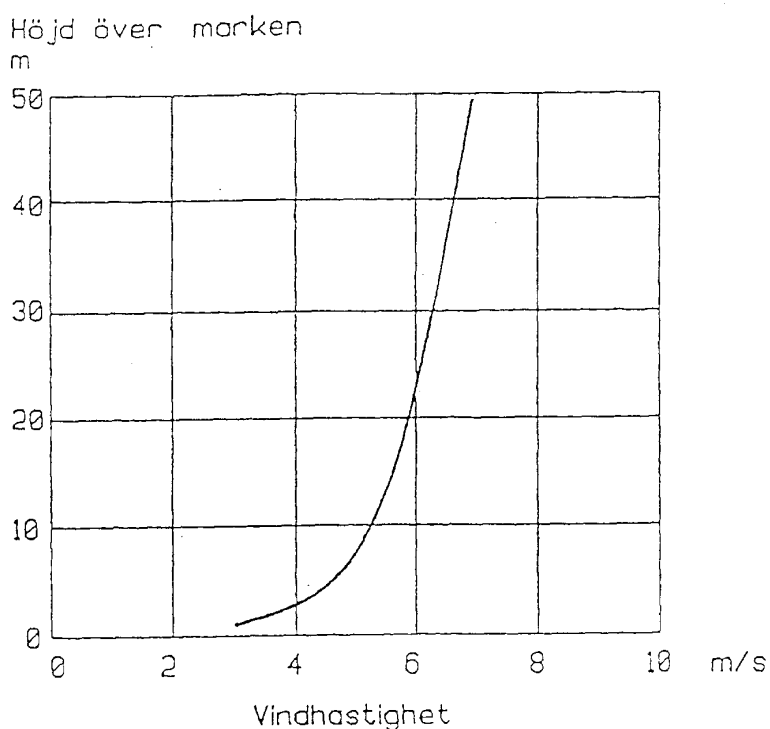
Ljudnivå dB(A) på 1,5 m



Figur 7. Ljudnivå från ett aggregat i megawattklassen med variabelt varvtal samt naturligt vindbrus som funktion av vindhastigheten.

Det skall observeras att nivåerna i figur 6 avser ekvivalentnivåer, d.v.s. medelvärden över en viss tid. Även om bakgrundsbrusnivån i figuren är klart högre än nivån från aggregatet för alla vindhastigheter, kan därför inte aggregatljudet förutsättas bli maskerat under alla förhållanden. Detta beror på att nivåerna hela tiden fluktuerar, varför aggregatet under kortare tider likväl kan bli hörbart.

För stora aggregat tillkommer en annan faktor. Aggregatets ljud bestäms av vindhastigheten på tämligen hög höjd medan det naturliga vindbruset orsakas av vinden på väsentligt lägre höjder. Normalt sker en samvariation mellan hastigheten på hög och låg höjd på det sätt som förutsetts i figur 8.



Figur 8. Ett vanligt exempel på hur vindhastigheten ökar med ökande höjd över markytan.

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 ett vertikalt vindmaximum i de lägsta hundra metrarna.

Det har också visats att bergknallar kan ge lä för vissa vindriktningar varvid den naturliga bakgrunds-nivån kan bli förhållandevis låg. Denna effekt kan uppträda i kuperad terräng exempelvis på västkusten.

Det finns ännu inte tillräckligt underlag för att förutsäga när maskering kan komma att inträffa. Det är därför svårt att ta hänsyn till denna effekt vid bedömning i enskilda fall.

Beräkning av ljudimmission från vindkraftverk

I det följande redovisas beräkningsmodeller för ljudimmission som bygger på de senaste rönen och som därför också skiljer sig från de beräkningar som tidigare gjorts. För markbaserade vindkraftverk redovisas två modeller, en för korta och en för långa avstånd. För havsbaserade aggregat redovisas en preliminär modell som primärt är avsedd för stora avstånd. Beräkningsmodellerna gäller för alla typer av vindkraftverk.

Precision och säkerhetsmarginal

Modellerna för ljudutbredning över mark förväntas i genomsnitt ge rätt värde. Någon säkerhetsmarginal ingår sålunda inte i beräkningsformlerna. Avvikelse 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.

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. Modellen bedöms ge en säker uppskattning av ljudimmissionen. 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 $\square 45^\circ$). 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 lägre. Valet av medvind för beräkningarna är helt i överensstämmelse med svensk och nordisk praxis. Anled-

ningen till att man valt medvindsfallet som referens är framför allt att eventuella kontrollmätningar då blir förhållandevis enkla att utföra.

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. [IEC,1998]. 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

För att kunna beräkna ljudimmissionen fordras ett antal uppgifter från en emissionsmätning utförd antingen enligt ref. IEC, 1998 eller S. Ljunggren,1994, se avsnitt ”Bestämning av ljud-data för ett vindkraftverk”. Ref. IEC, 1998 är numera både dansk och svensk standard.

Utgångspunkten är den uppmätta ljudeffektnivån LWA (apparent sound power level enligt IEC). Detta värde skall korrigeras beroende på beskaffenheten hos terrängen omkring aggregatet. Terrängen karakteriseras därvid genom sin råhetslängd z_0 , vilken kan uppskattas ur tabell 1.

Tabell 1:Markråhetsklasser

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

Vid stora nivåskillnader i terrängen kan värdet 0,3 användas. I det fall terrängens rähetslängd varierar i olika riktningar sett från aggregatet, bestäms först det vinkelområde som är mest kritiskt för ljudimmissionen. Rähetslängden z_0 bestäms därefter för motsvarande sektor i motsatt riktning.

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

$$L_{WA,korr} = L_{WA,mätt} + k \cdot \Delta v_h$$

där $L_{WA,mätt}$ är den mätta ljudeffektnivån, k är ljudnivåns beroende av vindhastigheten (på 10 m höjd) i dB/m/s och där Δv_h beräknas enligt

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

och där H är aggregatets navhöjd, h är 10 m och z_0 rähetslängden bestämd enligt ovan.

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

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

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

Ljudutbredning över land på avstånd över 1000 m

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

I detta fall beräknas ljudtrycksnivån i immissionspunkten, L_A , som

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

där

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

och där

L_i = uppmätta oktavbandsvärden från och med 63 Hz till och med 4000 Hz (L_1 är nivån vid 63 Hz och L_7 nivån vid 4000 Hz).

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.

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.

Ljudutbredning över vatten

Teoretiskt korrekta beräkningsmodeller som är validerade gentemot mätvärden saknas på avstånd som är mer än några hundra meter. I brist på sådana modeller beräknas ljudnivån i immissionspunkten på följande sätt (modellen bygger på vissa, men få, svenska, danska och holländska mätdata). Denna beräkningsmodell ger en övre gräns för vad ljudet kan tänkas uppgå till.

$$LA = LWA, \text{ korr} - 8 - 20 \cdot \log(r) - \Delta L_a + 10 \cdot \log(r/200),$$

där

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

och där

L_i = uppmätta oktavbandsvärden från och med 63 Hz till och med 4000 Hz (L_1 är nivån vid 63 Hz och L_7 nivån vid 4000 Hz).

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.

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.

Om avståndet r är mindre än 200 m används samma formel som vid ljudutbredning över mark.

Samtidig ljudimmission från flera aggregat

I detta fall beräknas ljudnivån L_{Ai} från vardera aggregatet i . Den totala ljudnivån adderas därefter samman enligt formeln:

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

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) mätt enligt IEC [IEC, 1998]. Navhöjden är 60 m. 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).

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 spektrum.

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).

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:

$$L_A = L_{WA, \text{korrr}} - 8 - 20 \cdot \log(r) + \Delta L_a + 10 \cdot \log(r / 200),$$

Med en ljudeffekt på 98,5 dB(A) blir ljudnivån 14,6 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

$$L_{A, \text{tot}} = 10 \cdot \log(50 \times 10^{14,6/10}) = 31,6 \text{ dB(A)}$$

Redovisning av ljudimmission kring vindkraftverk – vilka data 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.

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, 1998)
- Förekomst av toner
- Ljudeffektens variation med vindhastigheten (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 ljudnivåredovisning för varje tillkommande verk eller grupp av verk. Beräkningarna utförs i normalfallet för medvindsförhållanden, d.v.s. "värsta" fall. Redovisningen bör avse vindstyrkan 8 m/s på höjden 10 m, och kan kompletteras med ljudnivåer även vid lägre vindstyrkor. Detta gäller speciellt aggregat med variabelt varvtal.

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 bulleralstringen 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, 1998]. 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 fyra punkter runt om aggregatet och kan ur dessa mätresultat beräkna ljudeffektnivån. 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 buller. 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; dessutom måste naturligtvis hela mätningen ske vid vindhastigheter nära 8 m/s (på 10 m höjd).

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]. 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.

Möjligheter att 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 störkällorna.

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 bakgrunds nivåer 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 bakgrunds nivåer 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 vindbruset 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/m²), 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 p₀ är ett internationellt standardiserat referensvärde, p₀ = 20 μPa.

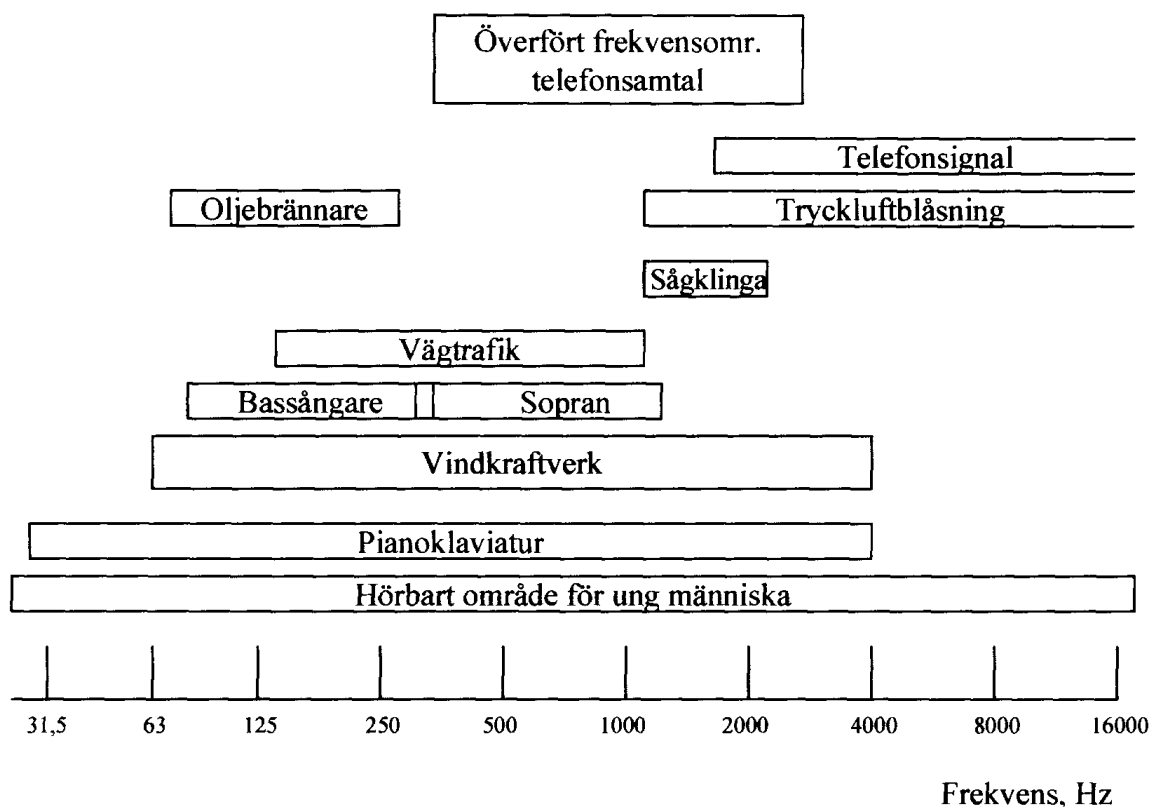
Den till ljudtrycksnivån hörande enheten kallas decibel med beteckningen dB.

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 LA. 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.

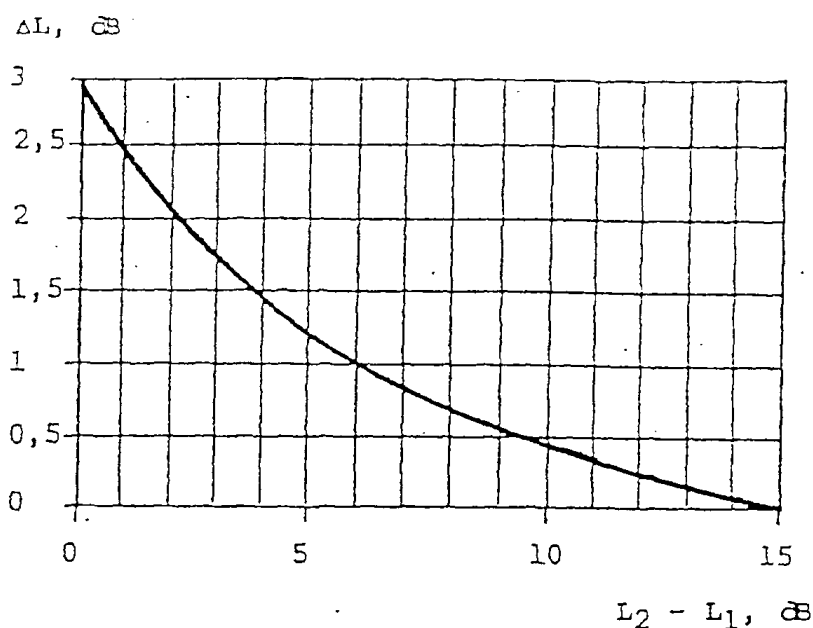
Tabell B1. Exempel på typiska ljudnivåer.

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 gränshfrekvensen 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 bullret 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 tersbanden framgår av figur B1.

Om frekvensspektret 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

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

där $W_{A,ref}$ är den avgivna effekten i watt under referensförhållanden och W_0 referenseffekten, $W_0 = 1 \text{ pW}$.

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

Referenser

- Bekendtgørelse nr. 304 af 14. maj 1991.(1991): ”Bekendtgørelse om støj fra vindmøller.” Dansk lagtext inom området Energi og Forsyning.
- Boverket (1995): ”Etablering av vindkraftverk på land.” Allmänna råd 1995:1.
- O. Fégeant (1998): ”Measurement of the Environmental Noise at the Torseröd Wind Turbine Site.” KTH, Avdelningen för byggnadsteknik, arbetsrapport 1998:2.
- IEC (1998): ”Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques”. IEC 61400-11.
- 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.
- J. Kragh, D. Theofiloyiannakos, H. Klug, T. Osten, B. Andersen, N. van der Borg, S. Ljunggren, O. Fégeant, R. J. Whitson, J. Bass, D. English, 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.
- 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.
- M. Ohlrich, J. Jakobsen och B. Andersen (1987): ”Støj fra mindre vindmøller.” Lydteknisk Institut IISN 0105-2853.

- 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).
- L. Örtegren (1996): Privat kommunikation.

* Skrifterna kan beställas från Flygtekniska Försöksanstalten (FFA), Vindkraftsektionen, Box 11 021, 161 11 Bromma.

Ljud från vindkraftverk

Hur uppstår ljud från vindkraftverk och hur sprids ljudet i omgivningen? I rapporten ges svar på hur ljudet alstras och hur markstruktur, vind och temperatur kan påverka ljudets utbredning från vindkraftverken.

I rapporten presenteras också modeller för beräkning av ljudets utbredning från vindkraftverken. Tre modeller presenteras för beräkning i olika situationer. För ljudutbredning över land presenteras två modeller en för kort avstånd och en för längre avstånd. En modell presenteras för beräkning av ljudets utbredning över vatten.

Rapporten har tagits fram gemensamt av Naturvårdsverket, Boverket och Energimyndigheten och är en bearbetning och uppdatering av Bilaga 3 "Buller från vindkraftverk" till skriften "Lokalisering av vindkraftverk på land" Allmänna råd 1995:1, Boverket.

Rapport: Ljud från vindkraftverk

ISBN 91-620-6241-7

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

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

