

MÄTNING AV BULLERIMMISSION FRÅN VINDKRAFTVERK

Elforsk rapport 98:24

Sten Ljunggren

MÄTNING AV BULLERIMMISSION FRÅN VINDKRAFTVERK

Elforsk rapport 98:24

**Sten Ljunggren
Institutionen för Byggnader och Installationer
Kungl Tekniska Högskolan**

Elforsk projekt 2081

Oktober 1998

Förord

I denna handledning redovisas teknik för att mäta och karakterisera bullerimmission från enstaka vindkraftverk eller från grupper av aggregat. Skriften utgör en något bearbetad översättning av en rekommendation utgiven av "International Energy Agency", referens [1]. Denna IEA-handledning kompletterar en tidigare utgiven handledning som behandlar bestämningen av den akustiska källstyrkan hos ett vindkraftverk, referens [2].

I Sverige liksom i åtskilliga andra länder har handledningar publicerats med regler för mätning av bullerimmission från industrier. Det är dock i allmänhet inte möjligt att direkt tillämpa dessa regler för mätningar av buller från vindkraftverk, eftersom mätningar i det senare fallet med nödvändighet måste utföras vid förhållandevis höga vindstyrkor, ett fall som uttryckligen utesluts i industribullerhandledningarna.

I föreliggande skrift redovisas två metoder för att mäta bullerimmission från vindkraftverk. I båda beskrivs det bredbandiga bullret med den ekvivalenta ljudnivån. Speciell uppmärksamhet riktas mot problemet med korrigering för bakgrundsnivåer och metoder redovisas också för att förbättra signal/brus-förhållandet.

Handledningen skiljer sig från den ursprungliga IEA-skriften, referens [1], genom att speciella väderleksförhållanden föreskrivs. Dessa redovisas som ett frivilligt alternativ i IEA-skriften. Vidare har metoderna för mätning vid godtycklig vindhastighet samt av A-vägda percentiler utelutits, eftersom sådana mätningar för närvarande inte bedöms vara aktuella för svenskt bruk.

Foreword

This guide recommends techniques and methods which will enable a characterisation of the noise immission from a wind turbine or a group of wind turbines at a noise receptor location. It has been developed through a slight modification and translation into Swedish of a recent IEA document, reference [1].

The modifications from the IEA document are the following:

- special requirements for the weather conditions during the measurements are prescribed. The weather conditions agree with those given in the IEA document as Appendix 2 'Measurement at preferred propagation conditions for improved measurement reproducibility',
- method A of the IEA document has been left out since it does not conform with the Swedish guidelines for noise immission from wind turbines,
- the method for the A-weighted percentiles has also been left out as the Swedish guidelines only use the equivalent continuous A-weighted sound pressure level for the description of noise immission from wind turbines.

Innehållsförteckning

1. Syfte

2. Användningsområde

3. Definitioner

- 3.1 A -vägd ljudtrycksnivå, L_{pA} , i decibel
- 3.2 Ekvivalent kontinuerlig A -vägd ljudtrycksnivå, $L_{Aeq,T}$, i decibel
- 3.3 Tonalitet
- 3.4 Allmänljud
- 3.5 Bakgrundsbuller

4. Instrument

- 4.1 Akustiska instrument
 - 4.1.1 Utrustning för att bestämma ekvivalent kontinuerlig A -vägd ljudtrycksnivå
 - 4.1.2 Utrustning för att bestämma smalbandsspektra
 - 4.1.3 Kalibrator
 - 4.1.4 Inspelning av data
- 4.2 Vindskydd
- 4.3 Mätskivor
 - 4.3.1 Stor mätskiva
 - 4.3.2 Liten mätskiva
- 4.4 Icke-akustisk mätutrustning
 - 4.4.1 Vindhastighet
 - 4.4.2 Vindriktning
 - 4.4.3 Temperatur
 - 4.4.4 Lokalt atmosfärtryck
 - 4.4.5 Annan utrustning
- 4.5 Kalibrering och verifiering

5. Mätning av ekvivalent kontinuerlig A -vägd ljudtrycksnivå

- 5.1 Översiktlig beskrivning av metoderna
- 5.2 Positioner för mätning av ljudnivåer
 - 5.2.1 Fritt fält
 - 5.2.2 Position på en husfasad
 - 5.2.3 Position på stor mätskiva
- 5.3 Bestämning av vindhastighet vid aggregatet eller aggregaten
 - 5.3.1 Bestämning av vindhastighet från elektrisk uteffekt och vind/effekt-kurvan
 - 5.3.2 Bestämning av vindhastighet med en anemometer vid navhöjd
 - 5.3.3 Bestämning av vindhastighet med en anemometer på 10 m höjd
- 5.4 Bestämning av vindhastighet vid mottagaren
- 5.5 Bestämning av vindriktning
- 5.6 Mätteknik
 - 5.6.1 Metod B

- 5.6.2 Metod C
- 5.7 Väderleksförhållanden
 - 5.7.1 Vindriktning
 - 5.7.2 Temperaturgradient
 - 5.7.3 Markförhållanden
- 5.8 Mätteknik vid fall av lågt signal/brus-förhållande
 - 5.8.1 Byte av tidpunkt för mätning
 - 5.8.2 Förflyttning av mikrofon
 - 5.8.3 Användning av extra vindsydd
 - 5.8.4 Användning av stor mätskiva
 - 5.8.5 Approximativa procedurer
 - 5.8.5.1 Mätning vid reducerad vindhastighet
 - 5.8.5.2 Mätning på reducerat avstånd

6. Mätteknik för smalbandsspektra

- 6.1 Mätpositioner
- 6.2 Metod I
- 6.3 Metod II
- 6.4 Mätning av bakgrundsbuller

7. Härledda resultat

- 7.1 Korrektion av värden erhållna med mätskiva
- 7.2 Korrektion av ekvivalenta nivåer för bakgrundsbuller
- 7.3 Konvertering av vindhastighet mätt vid aggregat
- 7.4 Bestämning av korrigerad ekvivalentnivå vid 8 m/s
- 7.5 Korrektion av värden erhållna vid reducerad vindhastighet
- 7.6 Korrektion av värden erhållna på reducerat avstånd
- 7.7 Bestämning av tonnivåer
 - 7.7.1 Klassificering av linjer i spektret
 - 7.7.2 Beräkning av nivån hos maskerande brus
 - 7.7.3 Beräkning av tonnivå
 - 7.7.4 Beräkning av tonalitet

8. Osäkerhet

9. Information att dokumentera och rapportera

- 9.1 Beskrivning av mätpunkter
- 9.2 Beskrivning av vindkraftaggregatet(-en)
- 9.3 Instrument
- 9.4 Akustiska data
- 9.5 Icke-akustiska data

10. Referenser

Appendix. Val av frifältspositioner

1. Syfte

Syftet med denna handledning är att definiera och beskriva metoder för att mäta och beskriva bullerimmission från vindkraftverk, dvs buller i känsliga punkter i närheten av aggregatet eller aggregaten.

Metoderna har utformats så att de kan användas av

- tillverkare,
- entreprenörer,
- aggregatägare,
- myndigheter med planeringsansvar,
- ingenjörer verksamma inom forskning och utveckling,

med syfte att verifiera bullernivåers överensstämmelse med immissionsgränsvärden.

Att mäta bullerimmission från vindkraftverk är en komplex uppgift. En handledning av denna art kan inte täcka alla tänkbara problem såsom

- bestämning av vindhastighet,
- val av åtgärd vid lågt signal/brus-förhållande,
- bestämning av inverkan av reflexer från byggnader och andra vertikala ytor.

Det rekommenderas därför kraftigt att de mätningar som beskrivs i denna handledning alltid utförs av erfarna akustiker.

2. Användningsområde

Denna handledning ger primärt information om de instrument, metoder för mätningar och behandling av mätvärden som är nödvändiga för att bestämma bullerimmissionen från ett enskilda vindkraftverk eller en grupp av aggregat. Handledningen kan tillämpas på alla storlekar och typer av aggregat; den är dock begränsad till enbart vindkraftverk.

Mätningar enligt denna handledning utförs nedströms aggregatet eller aggregaten, i princip enligt de riktlinjer som anges i Naturvårdsverkets handledning för mätning av externt industribuller, referens [3]. Bullerimmissionen beskrivs av dess ekvivalenta kontinuerliga A-vägda ljudtrycksnivå, samt, där så är aktuellt, av smalbandsspektra.

Psyko-akustiska aspekter och gränsvärden för bullerimmission behandlas inte i denna skrift. Här hänvisas i stället till Boverkets allmänna råd för etablering av vindkraft till lands, referens [4].

3. Definitioner

3.1 *A*-vägd ljudtrycksnivå L_{pA} , i decibel

Värdet av ljudtrycksnivån bestämd med frekvensvägning *A* (se IEC Publication 651, referens [5]). Referensljudtrycket är 20 µPa. Den *A*-vägda ljudtrycksnivån benämns i denna skrift också "ljudnivån".

3.2 Ekvivalent kontinuerlig *A*-vägd ljudtrycksnivå, $L_{Aeq,T}$, i decibel

Värdet av den *A*-vägda ljudtrycksnivån hos ett kontinuerligt, stadigvarande ljud som, inom ett specificerat tidsintervall *T*, har samma kvadratiska medelvärde som det aktuella, tidsvarierande ljudet. Den ekvivalenta kontinuerliga *A*-vägda ljudtrycksnivån ges av uttrycket

$$L_{Aeq,T} = 10 \lg \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right), \quad (1)$$

där $L_{Aeq,T}$ är den ekvivalenta kontinuerliga *A*-vägda ljudtrycksnivån i decibel bestämd över en tid *T* som börjar vid t_1 och slutar vid t_2 ,
 p_0 är referensljudtrycket, 20 µPa,
 $p_A(t)$ är det momentana *A*-vägda ljudtrycket hos det aktuella ljudet.

3.3 Tonalitet

Skillnaden i nivå mellan en eller flera toner och det maskerande bruset i det kritiska band som är centrerat kring tonen eller tonerna, se vidare avsnitt 7.7.4.

3.4 Allmänljud

Det existerande ljudet i en punkt med undantag för ljudet från aktuellt eller aktuella aggregat.

3.5 Bakgrundsbuller

Bakgrundsbuller definieras som allt interfererande ljud vid ett mättillfälle. Allmänbullret är därför en del av bakgrundsbullret. Annat bakgrundsbuller kan vara sådant som alstras av vinden vid mikrofonens membran, elektriskt brus i instrumenten etc.

4. Instrument

4.1 Akustiska instrument

4.1.1 Utrustning för bestämning av ekvivalent kontinuerlig A-vägd ljudtrycksnivå

Utrustningen skall fylla kraven för ljudnivåmätare typ 1 enligt IEC Publication 804, referens [6]. Mikrofonkapselns diameter får inte överskrida 13 mm.

4.1.2 Utrustning för bestämning av smalbandsspektra

Förutom de krav på ljudnivåmätare och mikrofon som ges i avsnitt 4.1.1, gäller kravet att utrustningen skall ha en konstant frekvensrespons över området 45 Hz till 5600 Hz.

FFT-analysatorer skall ha en upplösning på minst 400 linjer och en övre gränshänsyn i realtid på 5 kHz. Det skall vara möjligt att välja följande frekvensupplösning:

<u>Tonfrekvens, Hz</u>	<u>Upplösning, Hz</u>
< 2000	2,0 - 5,0
> 2000	2,0 - 12,5

Det skall vidare vara möjligt att använda en tidsvägning som approximativt överensstämmer med den standardiserade tidsvägningen 'F', se vidare avsnitt 7.3.

4.1.3 Kalibrator

Den akustiska kalibratoren skall ha en noggrannhet som är lika med eller bättre än ± 0.3 dB (klass 1 enligt IEC 942, referens [7]) inom aktuellt temperaturområde.

4.1.4 Inspelning av data

När inspelning av data utgör en väsentlig del av mätproceduren, skall hela mätkedjan uppfylla kraven för instrument typ 1 i IEC 651. Apparaturens dynamiska egenskaper måste beaktas: signal/brus-förhållandet skall vara minst 50 dB.

4.2 Vindskydd

Beroende på syftet med mätningarna och på förhållandena på platsen kan mikrofonen vara fristående eller monterad på en mätskiva.

Det vindskydd som används tillsammans med en fristående mikrofon skall bestå av ett primärt och om så erfordras av ett sekundärt vindskydd. Det primära vindskyddet skall bestå av en sfär av poröst material med öppen struktur och med en diameter på ca 90 mm. Sfären skall vara centrerad kring mikrofonmembranet. Det sekundära vindskyddet kan användas när signal/brus-förhållandet behöver förbättras vid låga frekvenser, se referens [8] och [9]. Det kan exempelvis bestå av en sfärisk trådställning, 250 mm i diameter, som är täckt med ett 25 mm tjockt lager av ett poröst material med en porositet av 4 till 8 porer

per 10 mm. Det sekundära vindskyddet skall också centreras kring mikrofonmembranet. Frekvensresponsen hos hela mikrofonsystemet måste dokumenteras.

Som ett alternativ kan man använda det vindskydd som beskrivs i referens [10]. Detta är särskilt användbart om oktavbandsvärden ej erfordras.

När mikrofonen monteras på en vertikal mätskiva skall både det primära och, om aktuellt, det sekundära vindskyddet halveras. De två halvsfäriska skydden skall centreras kring mikrofonmembranet och monteras stabilt till mätskivan.

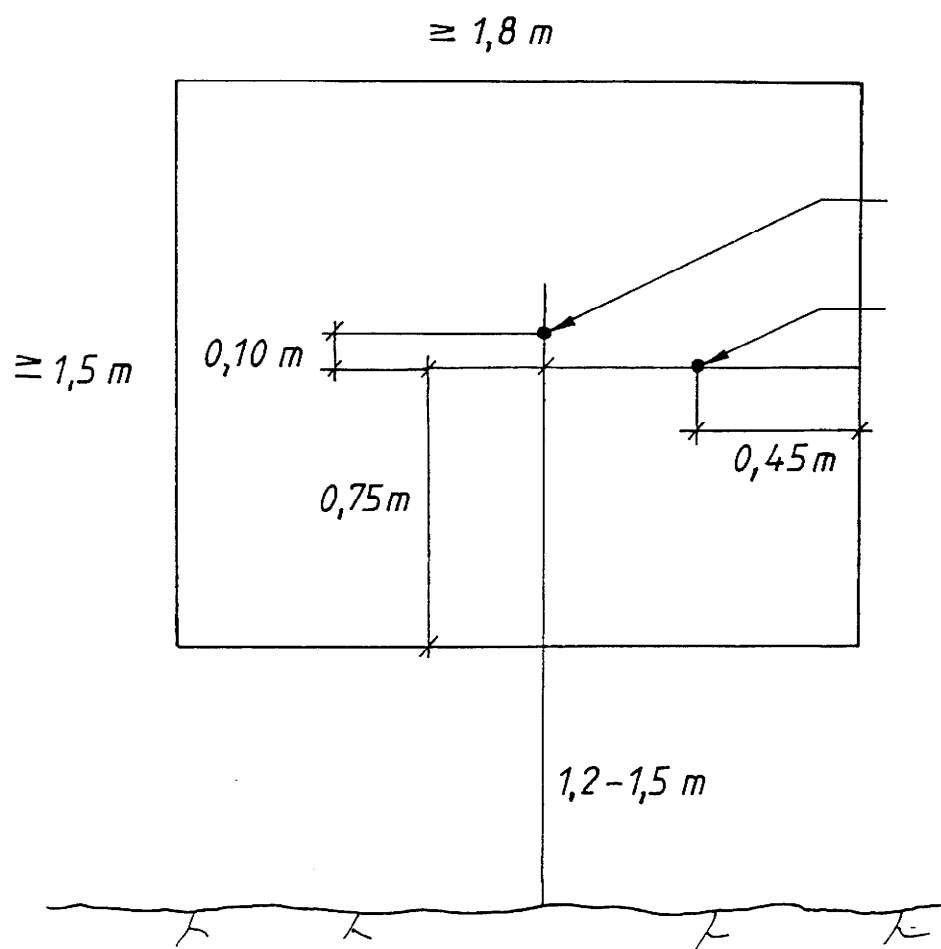
4.3 Mätskivor

En stor respektive liten mätskiva kan användas. Den stora skivan används för mätningar på avstånd från byggnader när signal/brus-förhållandet är lågt. Den lilla används vid mätning på husfasader för att åstadkomma en väl definierad reflekterande yta.

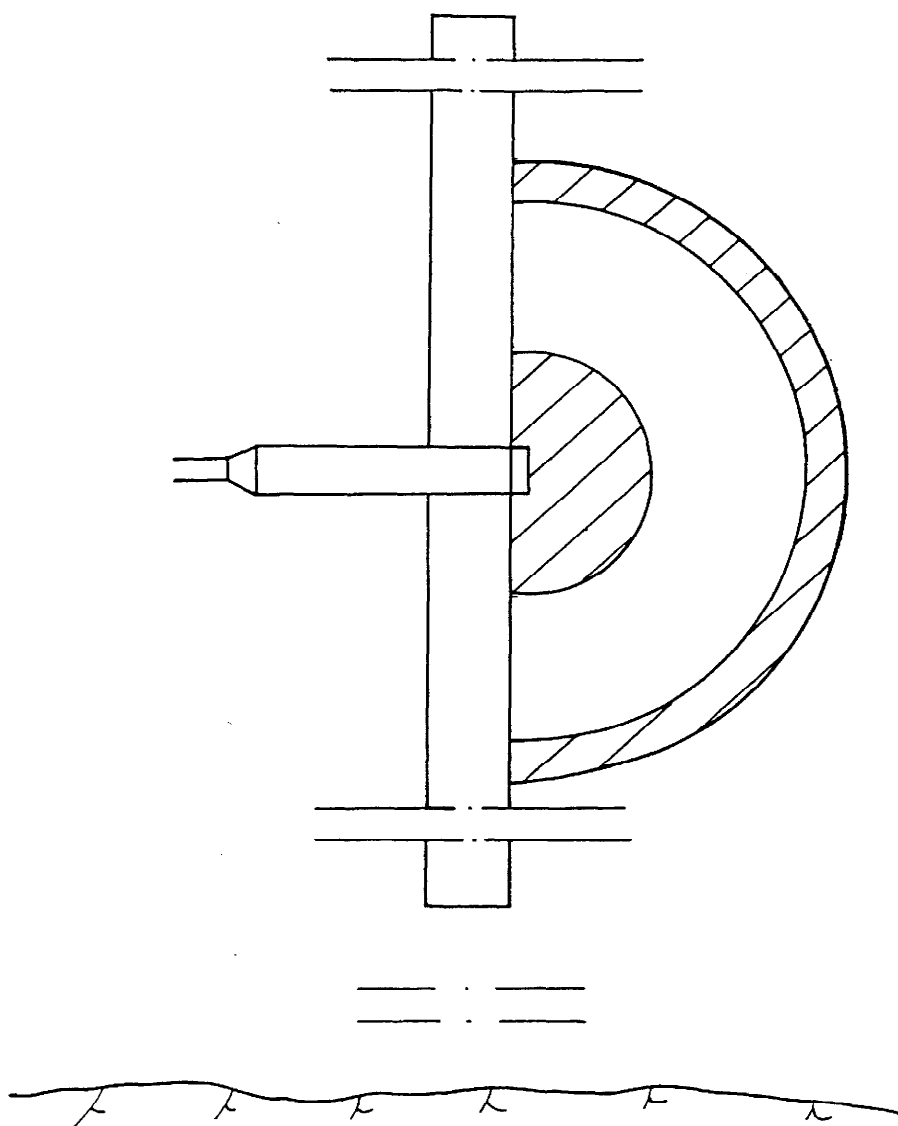
4.3.1 Stor mätskiva

Den stora mätskivan skall vara rektangulär och i planet minst 1,5 m x 1,8 m. Den skall vara plan och tillverkad av ett material som är akustiskt hårt, exempelvis plywood eller spånskiva med en tjocklek av minst 12 mm. Skivan skall monteras med långsidorna parallellt med marken. De båda rekommenderade mikrofonpositionerna framgår av figur 4.1.

Mikrofonen skall monteras med membranet i liv med ena sidan av skivan enligt figur 4.2.



Figur 4.1 Montering av mikrofon på den stora mätskivan sedd framifrån. Mikrofonposition A används när skivan utnyttjas för att minska inverkan av ljudkällor eller reflekterande ytor som skärmas av skivan. Mikrofonposition B används när skivan utnyttjas för att minska vindalstrat mikrofonbuller.

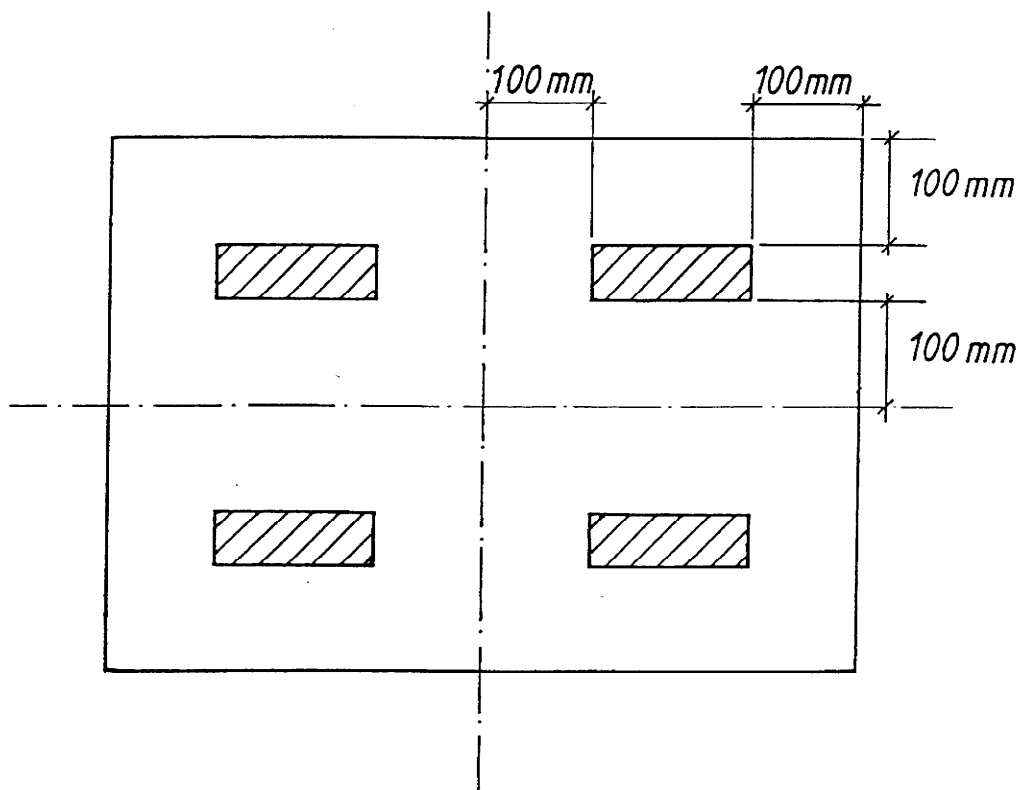


Figur 4.2 Montering av mikrofonen på den stora mätskivan. Vertikalsektion (ej i skala).

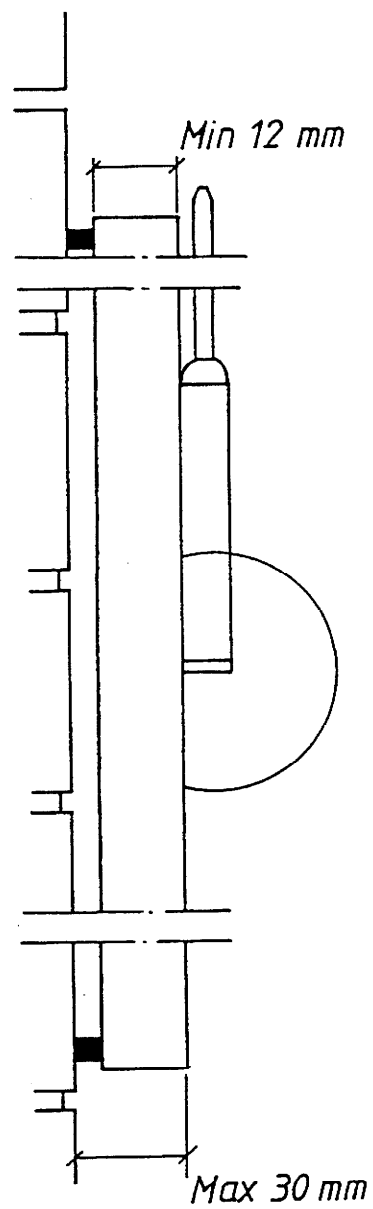
4.3.2 Liten mätskiva

Dimensionerna hos den lilla mätskivan skall vara minst 0,5 m x 0,7 m. Skivan skall vara plan och gjord av ett akustiskt hårt material, exempelvis plywood eller spånskiva med en tjocklek av minst 12 mm och maximalt 30 mm.

När mikrofonen är monterad på skivan får avståndet mellan mikrofonens mittpunkt och skivans yta inte vara större än 8 mm. Mikrofonmembranet skall monteras minst 100 mm från skivans kanter och symmetrilinjer, se Figur 4.3, och i vertikal riktning med membranet under förförstärkaren på det sätt som visas i Figur 4.4.



Figur 4.3 Placering av mikrofonen på den lilla mätskivan.



Figur 4.4 Montering av liten mätskiva på en husfasad.

4.4 Icke-akustisk mätutrustning

4.4.1 Vindhastighet

Anemometrar skall ha en noggrannhet av $\pm 0,2$ m/s eller bättre i vindhastighetsintervallet 4 - 12 m/s.

Anemometrar som endast används i samband med korrigering av bakgrundsbuller kan vara enklare; dock skall noggrannheten vara $\pm 0,4$ m/s eller bättre i vindhastighetsintervallet 4 - 12 m/s.

4.4.2 Vindriktning

Utrustningen för bestämning av vindriktning skall ha en noggrannhet av $\pm 5^\circ$ eller bättre.

4.4.3 Temperatur

Temperaturen skall bestämmas med en skärmad termometer eller annan lämplig temperaturgivare. Utrustningen skall ha en noggrannhet inom ± 1 °C eller bättre inom det temperaturområde som råder vid mätningarna.

4.4.4 Lokalt atmosfärtryck

En barometer skall användas för bestämningen av det lokala atmosfäriska trycket. Den skall ha en noggrannhet av ± 1 kPa eller bättre inom det tryckområde som råder vid mätningarna.

4.4.5 Annan utrustning

Utrustning som används för att mäta höjd och avstånd skall ge en precision av $\pm 2\%$ eller bättre.

Utrustning som används för vinkelmätningar skall ge en precision av $\pm 5^\circ$ eller bättre.

4.5 Kalibrering och verifiering

Hela den akustiska mätkedjan skall kalibreras vid åtminstone en frekvens före och efter mätningarna. Åtminstone följande utrustning skall kontrolleras regelbundet och kalibreras med spårbarhet till primärt kalibreringslaboratorium. Den maximala tiden från senaste kalibrering av denna typ får inte överstiga följande värden:

- akustisk kalibrator: 12 månader,
- mikrofon: 24 månader,
- integrerande ljudnivåmätare: 24 månader,
- spektrumanalysator: 36 månader,
- inspelningssystem: 24 månader,
- anemometer: 12 månader.

5. Mätning av ekvivalent kontinuerlig A-vägd ljudtrycksnivå

I denna handledning redovisas hur bredbandigt buller från vindkraftverk kan beskrivas med den ekvivalenta kontinuerliga A-vägda ljudtrycksnivå, $L_{Aeq,T}$. I den underliggande IEA-skriften beskrivs dessutom hur A-vägda percentiler kan användas. Eftersom percentiler vanligen inte används i Sverige för närvarande, har beskrivningen här begränsats till $L_{Aeq,T}$.

5.1 Översiktlig beskrivning av metoderna

Ett stort problem när man mäter bullerimmission från vindturbiner är inverkan av bakgrundsbuller orsakat av exempelvis

- vind vid mikrofonmembranet,
- vindens inverkan på närbelägna träd, buskar och byggnader,
- trafik på närbelägna vägar och järnvägar,
- flygplan och industrier,
- aktiviteter hos djur och människor,
- vattendrag eller vågor vid en strand.

En komplicerande faktor är också att det måste förutsättas att det buller som alstras av aktuella vindkraftaggregat varierar med vindhastigheten vid turbinen medan bakgrundsbullret varierar med vindhastigheten i immissionspunktens omgivning.

I många fall i praktiken är ljudnivån från ett vindkraftaggregat av samma storleksordning som ljudnivån från bakgrundsbullerkällorna. Detta medför att det är mycket viktigt att korrigera mätta ljudnivåer för bakgrundsbullrets inverkan. Det finns dock också situationer där det är tillräckligt att mäta det totala bullret från aggregat och bakgrundsbullerkällor. Detta är exempelvis fallet om syftet med mätningen är att verifiera att nivån från ett aggregat underskrider ett visst värde och samtidigt detta värde underskrids av den mätta totalnivån.

Av dessa skäl redovisas här två olika mätmetoder med olika komplexitet (och precision). Dessa metoder, som översiktligt beskrivs i det följande, benämns här metod B och C. I den underliggande IEA-skriften beskrivs dessutom en metod A som dock inte bedöms vara aktuell för svenskt bruk (eftersom ljudnivån inte bestäms vid någon viss vindhastighet).

Metod B. Mätning av total ljudnivå vid 8 m/s

Enligt denna metod mäts den sammanlagrade ljudnivån från vindkraftaggregat och bakgrundskällor. Vindhastigheten mäts vid aggregatet eller aggregaten med antingen en anemometer eller från den elektriska uteffekten tillsammans med vind/effekt-kurvan. Vindhastigheten omräknas till en höjd av 10 m. Ljudnivån mäts vid olika vindhastigheter och plottas i ett diagram som funktion av vindhastigheten vid 10 m höjd. De uppmätta ljudnivåerna approximeras med en rät linje och ljudnivån vid den akustiska referensvindhastigheten bestäms från denna linje.

Det värde som man får på detta sätt skall betraktas som en övre gräns för aggregatbullret

vid den akustiska referensvindhastigheten. Detta innebär att ett resultat från en mätning enligt denna metod kan användas för att visa att ljudnivån från ett eller flera aggregat är lägre än ett specificerat gränsvärde men aldrig för att visa att ljudnivån överskrider ett visst värde.

Det skall observeras att i punkter som är aktuella för immissionsmätningar är vanligtvis ljudnivån från aktuella vindkraftverk nära ett specificerat gränsvärde. Samtidigt är vanligtvis bakgrunds-nivån av samma storleksordning som aggregatets eller aggregatens ljudnivå. Detta medför att den mätta totalnivån i många fall blir högre än gränsvärdet. Eftersom resultaten enligt denna metod endast kan användas för de fall den totala ljudnivån är lägre än gränsvärdet är det uppenbart att metoden är av begränsad användbarhet.

Metod C. Mätning av ljudnivå från enbart aggregat vid 8 m/s

Enligt denna metod mäts den totala ljudnivån från aggregat och alla andra ljudkällor i immissionspunkten tillsammans med vindhastigheten i två punkter: vid aggregatet och vid immissionspunkten. På detta sätt erhålls ett antal värden vid olika vindhastigheter. Bakgrunds-nivån mäts (med aktuella aggregat ur drift) tillsammans med vindhastigheten i immissionspunkten. De båda grupperna av ljudnivåer plottas i ett diagram som funktion av vindhastigheten vid immissionspunkten. Bakgrunds-nivåerna approximeras med en linje (med hjälp av en regressionsteknik) och ljudnivåerna från enbart aggregat bestäms utifrån var och en av de mätta totalnivåerna.

Den vindhastighet som mätts vid aggregatet eller aggregaten konverteras, om så är aktuellt, till 10 m höjd. De bakgrundskorrigerade ljudnivåerna plottas slutligen i ett diagram som funktion av den omräknade vindhastigheten och nivån vid 8 m/s bestäms från linjen.

5.2 Mätpositioner för ljudnivåer

Valet av mätposition bestäms i första hand av syftet med mätningen. Förhållandena på platsen kan dock också påverka valet av mikrofonposition och hur mikrofonen monteras.

Mätningar kan utföras med en fristående mikrofon eller med mikrofonen monterad på en vertikal mätskiva. I första hand rekommenderas användningen av en fristående mikrofon på en höjd av 1,2 - 1,5 m. En sådan mikrofonposition kan användas förutsatt att signal/brus-förhållandet är tillräckligt högt (minst 3 dB och helst 6 dB eller mer, se avsnitt 7.2) och att avståndet till alla reflekterande ytor är tillräckligt stort, se Appendix 1.

Två typer av mätskiva beskrivs i denna handledning. En liten mätskiva kan användas för mätningar på byggnaders fasader. Mätskivan har då till syfte att åstadkomma en väl definierad reflekterande yta. En större skiva kan användas för att undertrycka bakgrundsbuller eller ljud som reflekteras från närliggande vertikala ytor, se avsnitt 5.2.3.

5.2.1 Frifältspositioner

Om syftet med mätningen är att bestämma den aktuella nivån i en viss punkt skall

naturligtvis mikrofonen placeras i denna punkt.

Det skall dock observeras att de svenska riktlinjerna för bullerimmission, se referens [4], förutsätter att nivån mäts utan inverkan av reflexer från vertikala ytor, exempelvis husfasader. Om mätningen avser kontroll enligt dessa riktlinjer, skall därför mikrofonpositionen väljas så att nivån hos det ljud som reflekteras i vertikala ytor är minst 6 dB lägre än nivån hos aggregatets eller aggregatens buller, se vidare Appendix 1 för mer information. Om det inte är möjligt att finna en sådan punkt, kan man i stället utnyttja nedan beskrivna teknik med en stor fristående skiva eller en liten skiva monterad på en husfasad.

5.2.2 Mikrofonposition på en husfasad

Den lilla mätskivan placeras på en husfasad som vetter mot det aktuella aggregatet eller aggregaten och med mikrofonen på den yttre sida av skivan. Mätskivan beskrivs i avsnitt 4.3.2. Samma mikrofonhöjd skall användas som för en fristående mikrofon.

Skivan skall vara parallell med fasaden. Avståndet mellan den yttre sidan av skivan och fasaden får inte överskrida 30 mm, se Figur 4.3. Skivans normal skall peka mot centrumlinjen av vindkraftaggregatets torn inom $\pm 45^\circ$ (vid en grupp av turbiner väljs tornet till det aggregat som bedöms ge det högsta bidraget till den totala ljudnivån). Mikrofonen skall dessutom vara minst 0,75 m från fasadens hörn, öppna fönster och större diskontinuiteter och minst 1,0 m från takets underkant.

5.2.3 Mikrofonposition på stor mätskiva

Vid mätning skall skivan vara placerad i vertikal riktning (inom $\pm 5^\circ$) och med långsidorna parallella med marken. Skivans normal skall peka mot centrumlinjen av aggregatets torn inom $\pm 45^\circ$ (vid en grupp av turbiner väljs tornet till det aggregat som bedöms ge det högsta bidraget till den totala ljudnivån). Mikrofonen skall placeras på en höjd av 1,2 - 1,5 m över marken och på den sida som är vänd mot aggregatet. Om mätningen avser en grupp av aggregat måste alla aggregaten befinna sig framför skivan.

Fördelarna med att använda en stor mätskiva är följande:

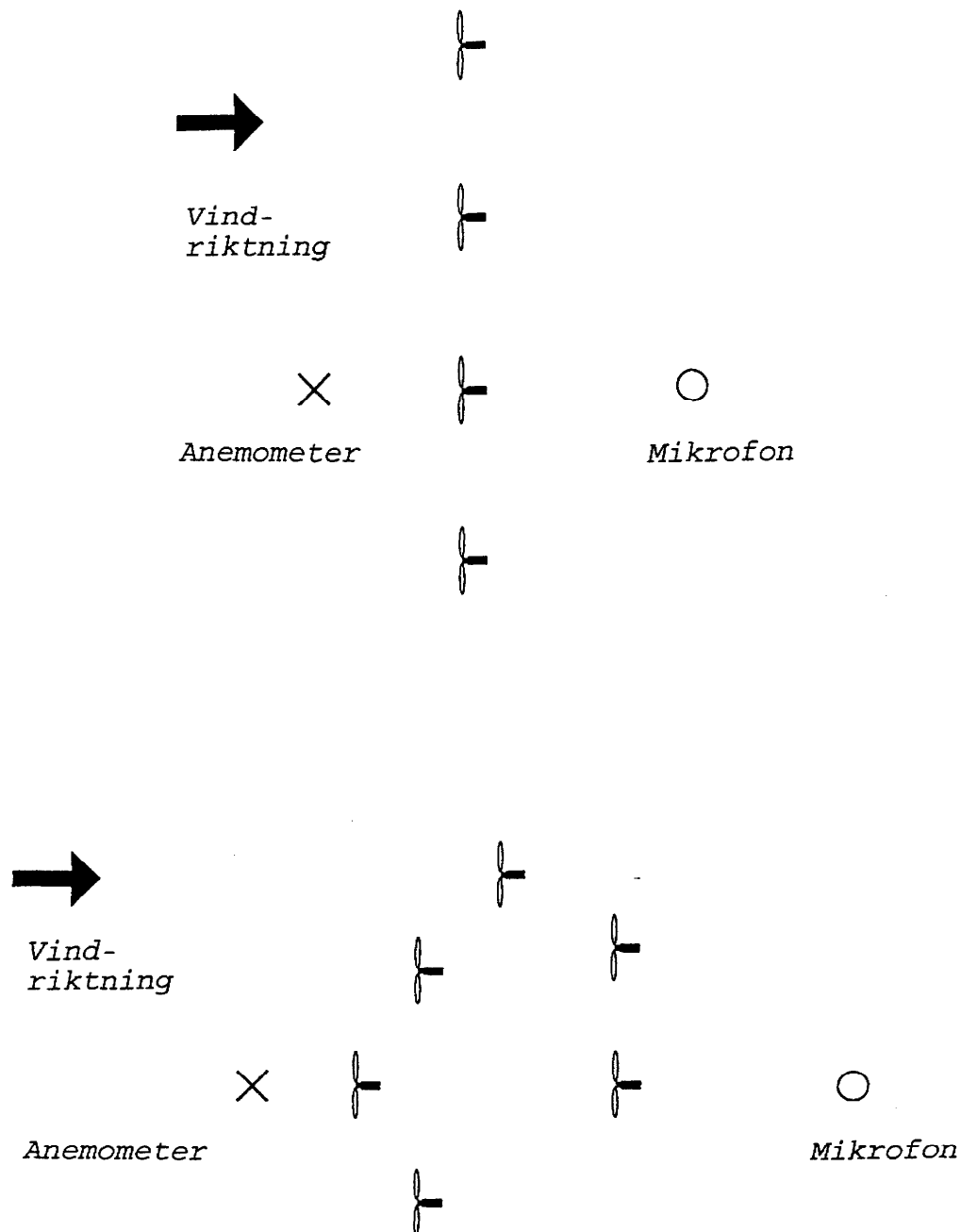
- minskad inverkan av ljud som reflekteras från vertikala ytor bakom skivan,
- ökat signal/brus-förhållande med avseende på allmänljudet (i fall där viktiga allmänljudkällor befinner sig bakom skivan),
- ökat signal/brus-förhållande med avseende på det bakgrundsljud som alstras av turbulent vind omkring mikrofonens membran.

De rekommenderade mikrofonpositionerna visas i Figur 4.1.

5.3 Bestämning av vindhastighet vid aggregatet eller aggregaten

Vindhastigheten skall bestämmas enligt en av följande metoder och i första hand vid navhöjd enligt avsnitt 5.3.1 and 5.3.2.

Om det är fråga om en grupp av aggregat skall vindhastigheten mätas i en punkt som är relevant för bulleralstringen. Följande två exempel, se Figur 5.1, är avsedda som riktlinjer.



Figur 5.1 I den övre delen av figuren illustreras ett fall där vindhastigheten i första hand skall bestämmas vid det närmaste aggregatet. I den situation som illustreras i den undre delen av figuren skall vindhastigheten bestämmas i en ostörd position i närheten av hela gruppen av aggregat.

I det första fallet förutsätts en dominerande del av bullret vara alstrat av ett aggregat som arbetar i ostörd vind och förhållandevis nära mikrofonen. Vindhastigheten skall då bestämmas från den elektriska uteffekten hos detta aggregat eller från en anemometer placerad i ett ostört läge i närheten av aggregatet.

I det andra fallet förutsätts flera aggregat ge väsentliga bidrag. Det är dessutom inte självklart att vinden är ostörd vid aggregatet närmast mikrofonen. Vindhastigheten skall i detta fall bestämmas antingen från den elektriska uteffekten hos ett ostört aggregat eller från en anemometer placerad i ett ostört läge i närheten av aggregaten.

5.3.1 Bestämning av vindhastighet från elektrisk uteffekt och vind/effekt-kurvan

Enligt denna metod bestäms vindhastigheten med hjälp av den momentana elektriska uteffekten och en spårbar vind/effektkurva erhållen för ett aggregat av samma typ som den aktuella maskinen och med samma komponenter och inställningar.

Om vind/effekt-kurvan har mätts i överensstämmelse med den procedur som beskrivs i referens [11] ger vind/effekt-kurvan sambandet mellan vindhastighet vid navhöjd och den nettoeffekt som aggregatet levererar till nätet, förutsatt att luftens täthet är 1.225 kg/m^3 . Vid en mätning kan man inte förutsätta att tätheten har exakt detta värde varför den elektriska effekten måste konverteras till en standardiserad effekt på följande sätt:

$$P_s = P_m \frac{t_K}{t_{ref}} \cdot \frac{p_{ref}}{p} \quad (2)$$

där P_s är standardiserad effekt (kW),
 P_m är mätt effekt (kW),
 t_K är lufttemperaturen i K, $t_K = t_C + 273$, där
 t_C är lufttemperaturen i °C,
 t_{ref} är 288 K,
 p är lufttrycket i kPa,
 p_{ref} är 101,3 kPa.

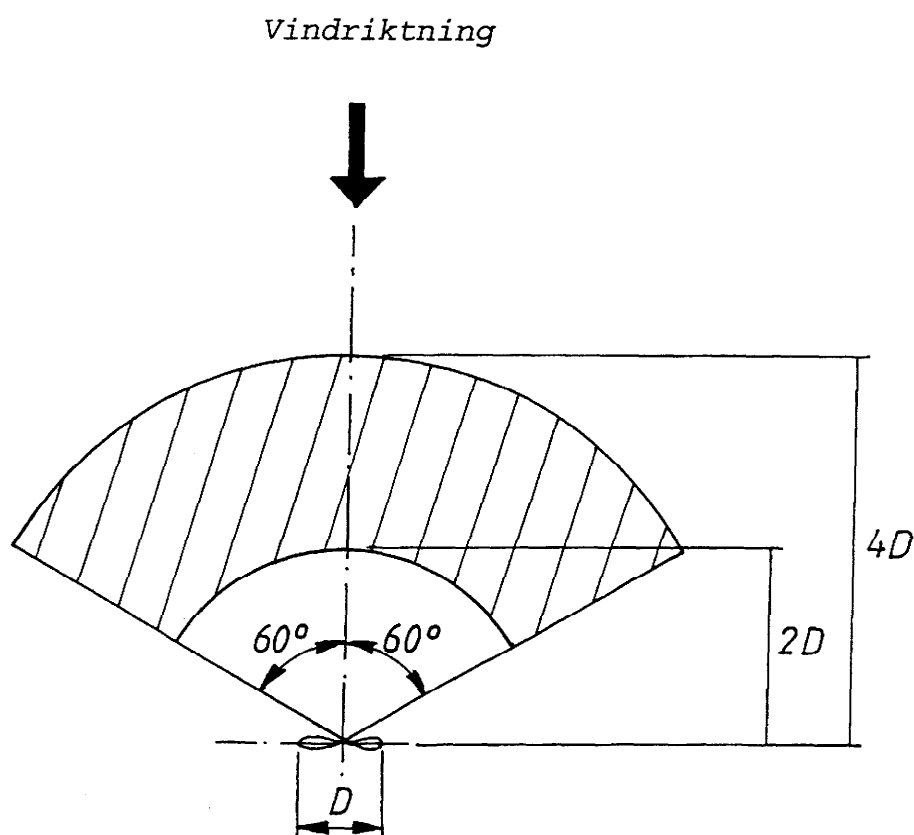
Efter denna konvertering erhålls vindhastigheten vid navhöjd genom att avläsa vind/effekt-kurvan vid effekten P_s .

För pitchkontrollerade aggregat hänvisas till referens [11].

5.3.2 Bestämning av vindhastighet med en anemometer vid navhöjd

Enligt denna metod mäts vindhastigheten med en anemometer som är placerad på en höjd över den lokala marken som är lika med aggregatets navhöjd $\pm 25\%$. Anemometern får dock inte placeras på en höjd under 10 m. I fallet med ett enstaka aggregat skall

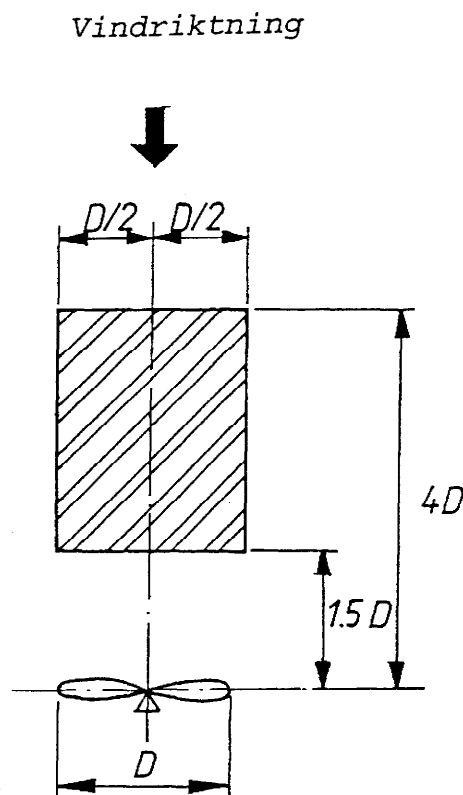
anemometern placeras uppströms aggregatet inom $\pm 60^\circ$ och på ett avstånd av mellan två och fyra rotordiametrar från rotorns centrum, se Figur 5.2. Under hela mätningen får anemometern inte befinna sig i vaken bakom någon del av aggregatets rotor eller annan strukturel, se referens [11].



Figur 5.2 Placering av anemometer vid aggregatet för det fall att anemometern är placerad vid navhöjd. D är diametern hos aggregatets rotor.

5.3.3 Bestämning av vindhastighet med en anemometer på 10 m höjd

I de fall när det är svårt eller omöjligt att mäta vindhastigheten på navhöjd kan den i stället mätas på en höjd av 10 m över den lokala marken. Vid ett enstaka aggregat skall anemometern placeras uppströms aggregatet och på ett horisontellt avstånd av mellan en och en halv och fyra rotordiametrar från rotorn. Anemometern får vidare inte vara på större avstånd än en rotordiameter från en linje som går genom navets mittpunkt och är parallell med både vindriktningen och marken, se Figur 5.3. Under mätningen får anemometern ej befinna sig i vaken bakom någon del av vindturbinens rotor, torn eller maskinhus, se referens [11].



Figur 5.3 Placering av anemometer vid aggregatet för det fall att anemometern placeras på 10 m höjd. D är diametern hos aggregatets rotor.

5.4 Bestämning av vindhastighet vid immissionspunkten

När vindhastigheten mäts vid immissionspunkten skall anemometern placeras i en öppen position i terrängen i närheten av mikrofonen och på en höjd av 10 m över marken. Punkten skall vara representativ med hänsyn till det vindalstrade allmänljudet i immissionspunkten.

5.5 Bestämning av vindriktning

Vindriktningen skall bestämmas vid ungefär samma punkt som vindhastigheten. När vindhastigheten mäts vid både aggregatet och immissionspunkten, är det tillräckligt att bestämma vindriktningen vid enbart aggregatet.

5.6 Mätteknik

De mätningar som beskrivs i detta avsnitt skall alltid vara övervakade så att resultatet inte kan påverkas av ovidkommande ljud.

5.6.1 Metod B

Med aggregatet eller aggregaten i gång mäts samtidigt $L_{Aeq,T}$ och vindhastigheten vid aggregatet(-en). Det aritmetiska medelvärdet av vindhastigheten bestäms för samma tidsintervall som $L_{Aeq,T}$. Mättiden skall vara 1-10 minuter för varje datapar. Minst 10 datapar skall bestämmas. Av dessa skall minst tre avse en vindhastighet på mellan 6 och 8

m/s och minst tre en vindhastighet på mellan 8 och 10 m/s. Den totala mättiden skall vara minst 30 minuter varav minst 10 minuter för vardera gruppen av datapar över respektive under 8 m/s.

Vindriktningen skall bestämmas enligt avsnitt 5.5.

5.6.2 Metod C

Med aggregatet eller aggregaten i gång mäts samtidigt $L_{Aeq,T}$ vid immissionspunkten och vindhastigheterna vid både aggregatet(-en) och immissionspunkten. Det aritmetiska medelvärdet av vindhastigheterna bestäms för samma tidsintervall som $L_{Aeq,T}$. Mättiden skall vara 1-10 minuter för varje tripplett av data. Minst 10 tripletter skall bestämmas. Av dessa skall minst tre avse en vindhastighet på mellan 6 och 8 m/s och minst tre en vindhastighet på mellan 8 och 10 m/s. Den totala mättiden skall vara minst 30 minuter varav minst 10 minuter för vardera gruppen av tripletter över respektive under 8 m/s.

Vidare mäts $L_{Aeq,T}$ hos bakgrundsljudet med aggregatet(-en) tagna ur drift. Denna mätning utförs omedelbart före och/eller efter mätningen av den totala ljudnivån. Samtidigt med mätningen av bakgrundsljudet bestäms vindhastigheten vid immissionspunkten. Mättiden skall vara 1-10 minuter för varje datapar. Minst 10 datapar skall bestämmas. Av dessa skall minst tre avse en vindhastighet på mellan 6 och 8 m/s och minst tre en vindhastighet på mellan 8 och 10 m/s. Den totala mättiden skall vara minst 30 minuter varav minst 10 minuter för vardera gruppen av datapar över respektive under 8 m/s.

Om mätningarna utförs vid ett enstaka aggregat och avståndet d mellan aggregat och dess anemometer är stort på så sätt att

$$d \geq 0.1 v_{av} T_{av}, \quad (3)$$

där v_{av} är ett representativt medelvärde av vindhastigheten under mätningarna,
 T_{av} är den medelvärdestid som används,

skall en korrektion utföras för den tid Δt som det tar för vinden att passera sträckan mellan anemometer och aggregat:

$$\Delta t = d / v_{av}, \quad (4)$$

där d är avståndet från anemometern till aggregatet i vindriktningen.

Vid utvärdering av $L_{Aeq,T}$ skall Δt användas som en delay för medelvärdesbildningen; alternativt kan T_{av} ökas så att villkoret i ekvation (3) uppfylls.

Ingen korrektion av denna typ skall utföras för grupper av aggregat.

Vindriktningen skall bestämmas enligt avsnitt 5.5.

5.7 Väderleksförhållanden

5.7.1 Vindriktning

Generellt sett skall mätningarna utföras när vinden blåser från vindkraftverket (eller det aggregat som ger högst ljudnivå i immissionspunkten) mot mätpunkten inom $\pm 45^\circ$.

Det skall dock observeras att ljudnivån från ett aggregat kan vara systematiskt högre uppströms eller vid sidan om aggregatet än nedströms. Detta beror i sådana fall vanligtvis på utstrålning av maskinellt buller. Eftersom maskinellt buller ofta har formen av rena toner är denna effekt av stor betydelse.

Direktivitet och närvaro av rena toner skall därför kontrolleras. Detta kan göras på två sätt. Det bästa sättet är att utnyttja resultat från en emissionsmätning utförd enligt referens [2] eller en liknande procedur. Om direktiviteten uppströms eller vid sidan av aggregatet är 3 dB eller mer eller om rena toner är viktigare där än nerströms skall mätningarna också utföras vid de vindriktningar (inom $\pm 45^\circ$) som motsvarar den högsta direktiviteten och/eller den högsta tonnivån.

Om sådan information ej är tillgänglig, skall en lyssningsundersökning utföras. En begränsning till immissionsmätning enbart nerströms aggregatet är då tillåtlig om inga toner hörs uppströms eller vid sidan om aggregatet. I motsatt fall måste resultaten från en emissionsmätning utnyttjas.

5.7.2 Temperaturgradient

Som grundläggande krav gäller att i intervallet upp till 10 m höjd skall temperaturgradienten, dT/dz (där T är temperaturen och z är höjden över marken), ligga inom intervallet $-0.05^\circ \text{ C/m} < dT/dz < 0.05^\circ \text{ C/m}$. Denna temperaturgradient beror huvudsakligen på vindhastigheten, solhöjden och molntäcket. Kravet kan förväntas vara uppfyllt om (se referens [12]):

- mätningen utförs under natten (dvs en timme före solnedgång till en timme efter soluppgång), eller
- mätningen utförs under dagtid (en timme efter soluppgång till en timme före solnedgång) och molntäcket är minst 4/8.

5.7.3 Markförhållanden

Mätningar kan ej utföras när det är snö på marken.

5.8 Mätteknik vid fall av lågt signal/brus-förhållande

Som påpekats ovan påverkas mätresultat erhållna kring ett vindkraftverk av bakgrundsbuller av olika slag. Om den ekvivalenta kontinuerliga *A*-vägda ljudtrycksnivån från aggregat och bakgrundskällor är minst 3 dB över nivån från enbart bakgrundskällorna, kan $L_{Aeq,T}$ från enbart aggregat erhållas genom en beräkningsmässig korrektion enligt avsnitt 7.2. Om däremot skillnaden mellan totalnivå och bakgrundsnivå är 3 dB eller mindre, är det omöjligt att beräkna bullret från enbart aggregat. I sådana fall kan någon eller några av nedanstående metoder användas.

5.8.1 Byte av tidpunkt för mätning

I vissa fall är bakgrundsnivån avhängig av verksamheter som varierar med dygnets timmar. Typiska exempel är här trafikbuller, fågelsång samt ljud från lekande barn. I sådana fall kan signal/brus-förhållandet förbättras genom att mätningar utförs under natten i stället för under dagen.

5.8.2 Förflyttning av mikrofon

I sådana fall där bakgrundsbullret alstras av källor vid eller nära mikrofonen, kan det vara gynnsamt att förflytta mikrofonen till ett mer vindskyddat läge eller till en punkt på större avstånd från aktuella bakgrundskällor. En sådan förflyttning är tillåten förutsatt att den nya mätpunkten uppfyller följande villkor:

- mikrofonen är på samma höjd över marken (mätt på respektive plats) som i den ursprungliga positionen,
- den nya positionen har samma typ av terräng som den ursprungliga (liten skillnad i markimpedans),
- samma avstånd till vindkraftverket (respektive det eller de dominerande aggregaten) inom $\pm 5\%$,
- vinkeln mot aggregatets rotorplan är densamma som hos den ursprungliga mätpunkten inom $\pm 5^\circ$ (för mätningar nerströms tillåts dock en avvikelse på $\pm 10^\circ$). För en grupp av aggregat skall vinkeln relateras till det aggregat som ger dominerande bidrag till ljudnivån i den ursprungliga mätpunkten,
- liknande förhållande med avseende på skärmning av aggregatbullret som hos den ursprungliga punkten.

Det skall observeras att om mikrofonen flyttas, kan det bli nödvändigt att också flytta immissionspunktens anemometer, eftersom denna alltid skall vara nära mikrofonen.

5.8.3 Användning av extra vindskydd

I det fall att signal/brus-förhållandet är lågt på grund av mikrofonbrus, kan ett sekundärt vindskydd ge en hjälp. Exempel på sådana vindskydd ges i avsnitt 4.2. Det skall observeras att vindskydd av denna typ kan påverka frekvensgången. I sådana fall skall en korrektion göras för vindskyddets inverkan.

5.8.4 Användning av stor mätskiva

Som redan beskrivits i avsnitt 5.2.3, kan den stora mätskivan användas för att minska inverkan av ljud reflekterat från vertikala ytor bakom skivan, vindinducerat mikrofonbrus (dess effekt kan jämföras med den hos ett sekundärt vindskydd) och inverkan av allmänljud alstrat av källor som är skärmade av skivan.

Om skivan primärt används för att minska vindinducerat brus, skall mikrofonen placeras så nära punkt *B* i Figur 4.1 som möjligt (stagnationspunkten på skivan).

Om skivan primärt används för att minska inverkan av källor (inklusive reflekterande ytor) som skärmas av skivan skall mikrofonen placeras i punkt *A* i Figur 4.1.

5.8.5 Approximativa procedurer

När problem uppstår med signal/brus-förhållandet, skall i första hand användas en eller flera av de metoder som beskrivs i avsnitt 5.8.1 - 5.8.4. Om ingen av dessa är tillämpbar eller ger otillräcklig effekt, kan följande approximativa metoder användas. Det skall dock observeras att mätprecisionen blir sämre i sådana fall.

5.8.5.1 Mätning vid reducerad vindhastighet

Ljudnivån från såväl ett vindkraftverk som bakgrundskällorna måste förutsättas variera med vindhastigheten. I många fall i praktiken och speciellt hos aggregat med horisontell turbinaxel, tenderar dock bakgrundsnivån att avta snabbare med minskande vindhastighet än aggregatbullret. En förbättring av signal/brus-förhållandet kan därför erhållas genom att man mäter vid reducerad vindhastighet, naturligtvis förutsatt att aggregatetbullrets variation med vindhastigheten är känd.

Det måste dock påpekas att ljudutbredningen kring ett vindkraftverk påverkas av vindhastigheten, och i synnerhet uppströms och nerströms aggregatet. Det är för närvarande inte möjligt att ge kvantitativa data på denna effekt. För att en acceptabel precision skall erhållas får därför inte minskningen i vindhastighet vara större än 2 m/s.

Denna teknik kan användas om vindriktningen inte ändras och källstyrkan hos vindkraftaggregatet är känd som funktion av vindhastigheten. Metoden kan också användas för en grupp av aggregat förutsatt att alla aggregat har samma vindhastighetsberoende. Den korrektion av mätvärdet som skall utföras ges i avsnitt 7.6.

Denna teknik för att förbättra signal/brus-förhållandet bör endast användas tillsammans med metod C.

5.8.5.2 Mätningar på reducerat avstånd

En minskning av mätavståndet ger i allmänhet en förbättring av signal/brus-förhållandet. För ett enstaka aggregat får avståndet minskas med upp till 25%, förutsatt att

- avståndet till den nya mikrofonpositionen överskrider $1.5(H+D/2)$, där H är navhöjden och D rotordiametern hos det aktuella aggregatet,

- vinkeln gentemot aggregatets rotor är densamma som i den ursprungliga mikrofonpositionen inom $\pm 5^\circ$ (för mätningar nerströms aggregatet tillåts en avvikelse på $\pm 10^\circ$),
- mikrofonen är på samma höjd över marken som i den ursprungliga positionen (mätt på respektive plats),
- terrängtypen är densamma vid den nya positionen som vid den ursprungliga och markimpedansen är likartad,
- den nya placeringen är likvärdig med den ursprungliga med avseende på eventuell skärmning av aggregatbuller.

I fallet med en grupp av aggregat tillåts också en minskning av avståndet med upp till 25% (med avseende på det aggregat som ger dominerande bidrag till den totala ljudnivån vid den ursprungliga mätpositionen) förutsatt att

- aggregaten inte har någon påtaglig direktivitet,
- alla aggregat är av samma typ och har samma nominella ljudeffektnivå vid mätningen,
- avståndet till mikrofonen från närmaste aggregat överskrider $1.5(H+D/2)$, där H är navhöjden och D rotordiametern hos aggregaten,
- vinkeln gentemot aggregatets rotor är densamma som i den ursprungliga mikrofonpositionen inom $\pm 5^\circ$ (för mätningar nerströms aggregatet tillåts en avvikelse på $\pm 10^\circ$),
- mikrofonen är på samma höjd över marken som i den ursprungliga positionen (mätt på respektive plats),
- terrängtypen är densamma vid den nya positionen som vid den ursprungliga så att markimpedansen kan bedömas vara likartad,
- den nya placeringen är likvärdig med den ursprungliga med avseende på eventuell skärmning av aggregatbuller.

Värden som erhålls vid reducerat avstånd skall korrigeras enligt avsnitt 7.7.

Denna teknik skall i första hand endast användas tillsammans med metod C.

6. Mätteknik för smalbandsspektra

Smalbandsspektra behöver ej bestämmas i normalfallet utan endast där så uttryckligen krävs. Det skall observeras att det i många fall kan vara svårt att bestämma smalbandsspektra eftersom resultaten kan variera mellan mätningar gjorda under likartade förhållanden. Därför rekommenderas följande två metoder. Den enklare metoden använder RMS-spektra och kallas här 'Metod I'. Den andra metoden använder individuella korttidsspektra i tillägg till RMS-spektrat och kallas här 'Metod II'. Det skall observeras att de båda metoderna ger samma resultat endast för stationära toner.

En metod för att utvärdera aktuella spektra beskrivs i avsnitt 7.7.

6.1 Mätpositioner

Smalbandsspektra kan betraktas som ett komplement till den *A*-vägda nivån. Samma mikrofonpositioner, anemometerpositioner etc, skall därför användas som för det bredbandiga bullret. Det skall dock observeras att mätresultat som erhålls med vertikala mätskivor ger en viss osäkerhet i tonnivå och vid bedömningen av brusets maskeringen av en ton. En sekundär vindskärm kan därför vara mer fördelaktig för att minska inverkan av vindinducerat brus i mikrofonen.

Det skall också påpekas att en förflyttning av mikrofonen närmare ett vindkraftverk eller mätning vid lägre vindhastighet kan påverka det bredbandiga bullrets maskering av en ton.

6.2 Metod I

Mätningarna utförs med linjär frekvensvägning eller *C*-vägning och måste vara ostörda av ovidkommande ljud. För aggregat med konstant varvtal bestäms RMS-spektra under 1 - 2 minuter. Om en FFT-analysator utnyttjas skall ett Hanning-fönster användas.

Den frekvensupplösning som skall användas bestäms av tonfrekvensen:

<u>Tonfrekvens, Hz</u>	<u>Upplösning, Hz</u>
< 2000	2,0 - 5,0
> 2000	2,0 - 12,5

Minst fem RMS-spektra skall bestämmas inom vid en vindhastighet av 8 ± 1 m/s. Kompletterande spektra skall bestämmas vid de vindhastigheter där tonerna bedöms vara viktigast.

För aggregat med variabelt varvtal skall minst 30 spektra bestämmas (vart och ett med en integrationstid av 10 s) vid en vindhastighet av 8 ± 1 m/s.

6.3 Metod II

I tillägg till de mätningar som beskrivs i avsnitt 6.2, skall korttidsspektra bestämmas inom varje 1 - 2 minutersperiod. Därvid används samma parametrar som beskrivs ovan. Tidsvägningen skall så nära som möjligt approximera den standardiserade vägningen ' F ' och medelvärdesbildningstiden skall vara mellan 0,2 och 0,5 sekunder. Minst 50 spektra skall bestämmas inom varje 1 - 2 minutersperiod. Alla spektra som erhålls skall utvärderas.

Analys av tidsvarierande toner är omfattande och tidskrävande; det kan därför vara lämpligt att spela in den signal som skall analyseras.

6.4 Mätning av bakgrundsbuller

Bakgrundsbullret skall mätas med aggregatet(-en) avstängt omdelbart före eller efter mätningen av aggregatbullret. Det är i allmänhet tillräckligt att här använda Metod I.

7. Härledda resultat

7.1 Korrektion av värden erhållna med mätskiva

Mätresultat erhållna med mätskiva skall korrigeras på följande sätt

$$L_{free} = L_{board} - 6dB, \quad (5)$$

där L_{free} är den korrigerade $L_{Aeq,T}$,
 L_{board} är den mätta $L_{Aeq,T}$.

Denna korrektion skall göras för såväl den totala ljudnivån som för bakgrunds-nivån.

7.2 Korrektion av ekvivalenta nivåer för bakgrundsbuller

Efter det att värdena korrigerats för eventuell inverkan av mätskiva, plottas den totala ljudnivån erhållen enligt metod C som funktion av vindhastigheten vid immissionspunkten. En linjär skala skall användas för vindhastigheten.

Efter det att bakgrunds-nivån med aggregaten ur drift korrigerats med avseende på eventuell mätskiva, plottas också denna korrigerade nivå i samma diagram. Ett andra ordningens polynom,

$$L_n = a + bv + cv^2, \quad (6)$$

anpassas till de punkter som beskriver bakgrunds-nivån med regressionsteknik, se Figur 7.1. I ekvation (6) är

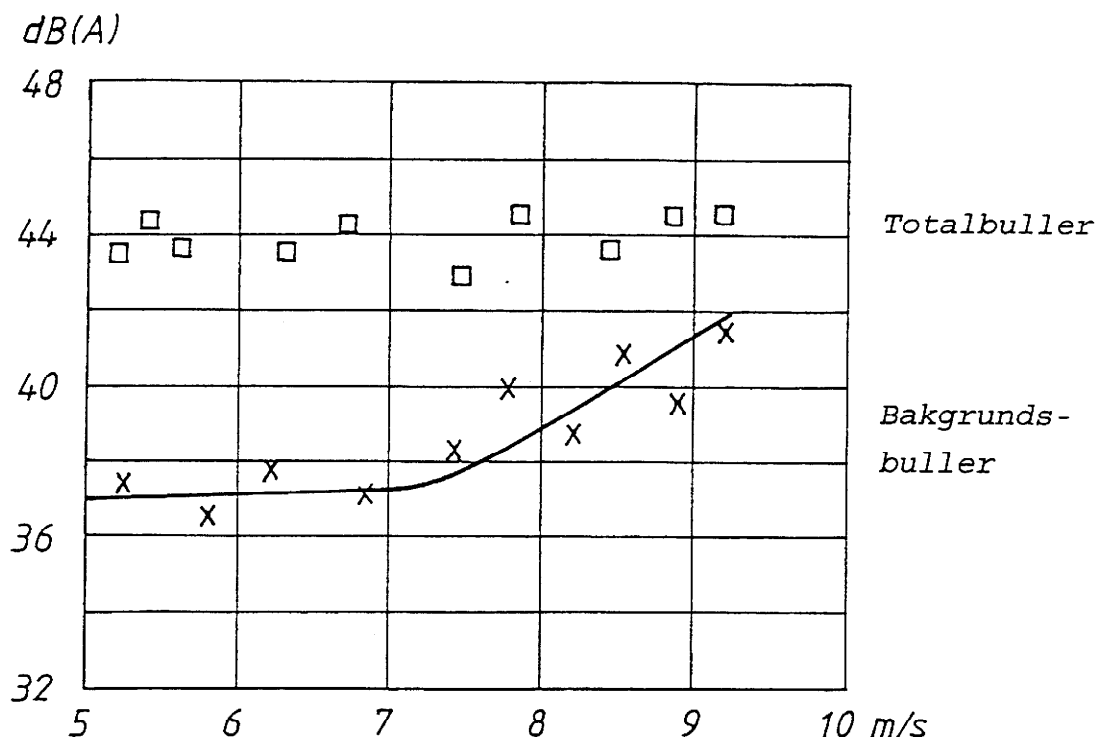
L_n den sökta approximationen av bakgrunds-nivån,
 v vindhastigheten i immissionspunkten,
 a , b och c konstanter som bestäms vid regressionen.

De mätta totalnivåerna, $L_{Aeq,free}$, korrigeras med hänsyn till bakgrundsbullret. Denna korrektion görs för den vindhastighet som totalbullret mätts vid medan bakgrundsbullret bestäms från regressionskurvan,

$$L_{Aeq,corr} = 10\lg(10^{L_{Aeq,free}/10} - 10^{L_n/10}), \quad (7)$$

där $L_{Aeq,corr}$ är ljudnivån från enbart aggregat (korrigerat värde),
 $L_{Aeq,free}$ är totalnivån från aggregat och alla bakgrundskällor (mätt värde),
 L_n är bakgrunds-nivån erhållen från regressionskurvan vid samma vindhastighet som totalnivån.

När $L_{Aeq,free} - L_n$ är mellan 3 och 6 dB skall det korrigerade värdet markeras med en asterisk. Om $L_{Aeq,free} - L_n$ är 3 dB eller mindre skall detta anges och $L_{Aeq,free} - 3$ dB rapporteras som en övre gräns för aggregatbullret.



Figur 7.1 Exempel på plottning av totalnivå och bakgrunds-nivå som funktion av vindhastigheten vid immissionspunkten.

7.3 Konvertering av vindhastighet mätt vid aggregat

Beroende på omständigheterna mäts vindhastigheten vid olika höjder. För att få jämförbara resultat skall den mätta vindhastigheten konverteras till ett värde som gäller för en höjd av 10 m. För konverteringen förutsätts en logaritmisk vindhastighetsprofil och den ytråhet som gäller för platsen.

Sålunda konverteras en vindhastighet mätt vid navhöjd till 10 m höjd på följande sätt

$$v_{10} = v_h \frac{\ln(10 / z_0)}{\ln(h / z_0)}, \quad (8)$$

där v_{10} är konverterad vindhastighet,
 v_h är mätt vindhastighet,

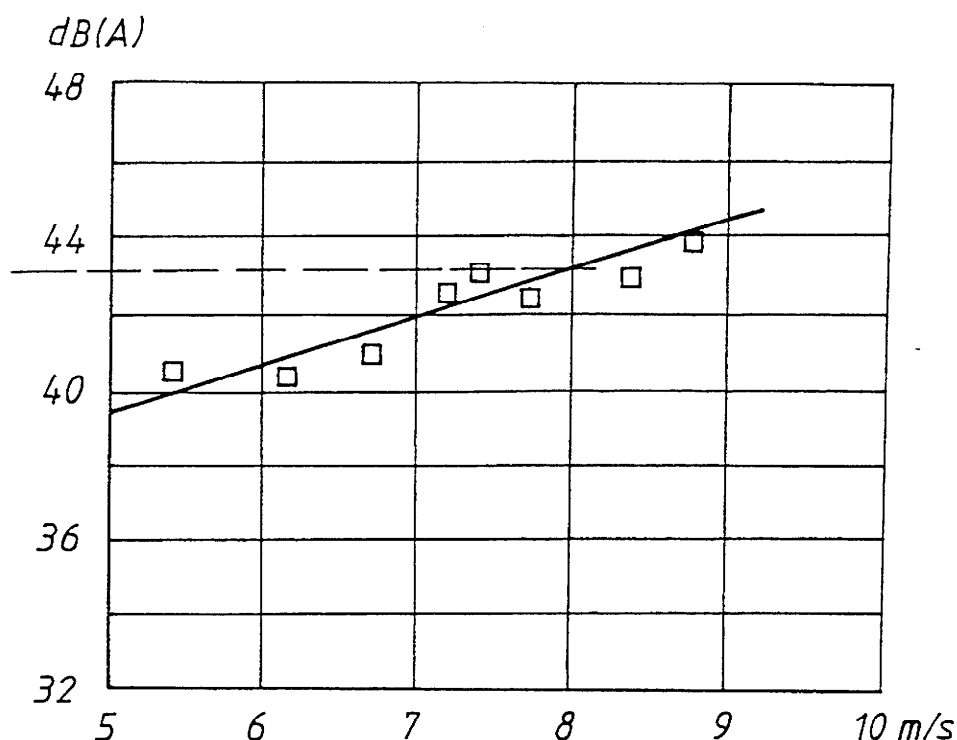
h är höjden i m från marken till anemometern,
 $\ln$ är naturliga logaritmen,
 z_0 är markråhetslängden vid aggregatet(-en), uttryckt i m.

Markråhetslängden på platsen, z_0 , kan uppskattas från terrängens utseende uppströms aggregatet(-en), se referens [13], och följande tabell:

Typ av terräng	Markråhetslängd, z_0 , i m
Förortsbebyggelse, landsortsstäder	0,3
Skog, skogsbälten	
Många träd och/eller större buskar	
Jordbruksområden med få byggander, träd, etc	0,05
Flygplatser med träd och byggnader	
Landningsbana på en flygplats	0,01
Klippt gräs	
Bar mark	
Slät yta av snö	0,001
Slät yta av sand	
Vattenytor (sjöar, fjärdar, öppet hav)	

7.4 Bestämning av korrigerad ekvivalentnivå vid 8 m/s

Efter korrigerering för bakgrundsbuller plottas den ekvivalenta kontinuerliga A -vägda ljudtrycksnivån från aggregatet(-en) som funktion av vindhastigheten vid aggregatet eller aggregaten. När så är aktuellt skall dock först vindhastigheten konverteras till 10 m höjd enligt avsnitt 7.3. En linjär skala skall användas för vindhastigheten. Med hjälp av linjär regression approximeras ljudnivåerna med en rät linje, se Figur 7.2, och värdet hos $L_{Aeq,corr}$ vid 8 m/s bestäms utifrån denna regressionslinje.



Figur 7.2 Exempel på bestämning av $L_{Aeq,corr}$ vid 8 m/s. Vindhastigheten är här hastigheten mätt vid aggregatet(-en).

7.5 Korrektion av värden erhållna vid reducerad vindhastighet

Först skall värdena korrigeras med avseende på bakgrundsbuller så som beskrivs i avsnitt 7.2. Därefter skall vindhastigheten mätt vid aggregatet(-en) konverteras till 10 m höjd enligt avsnitt 7.3 när så är aktuellt. En reduced referenshastighet väljs som medelvärdet av den konverterade vindhastigheten under mätningarna. Ljudnivån vid den reducerade referenshastigheten skall därefter korrigeras på följande sätt

$$L'_{Aeq,corr} = L_{Aeq,low} + \Delta L_A \text{ dB}, \quad (9)$$

där $L'_{Aeq,corr}$ är den immissionsnivå som skall rapporteras,
 $L_{Aeq,low}$ är den för bakgrundsbuller korrigerade ljudnivån vid den reducerade referenshastigheten.

Termen ΔL_A beräknas från mätdata enligt den procedur som beskrivs i avsnitt 6.3 i referens [2]. Den definieras som

$$\Delta L_A = L_{target\ ws} - L_{meas\ ws}, \quad (10)$$

där $L_{target\ ws}$ är den bakgrundskorrigerade ljudnivån i referenspunkten vid 8 m/s under referensförhållanden, dvs $L_{Aeq,ref}$ enligt avsnitt 6.3 i referens [2], $L_{meas\ ws}$ är $L_{Aeq,ref}$ enligt referens [2] vid den reducerade referenshastigheten.

Värdet på ΔL_A för ett annat aggregat av samma typ kan också användas förutsatt att de båda aggregaten har samma inställningar och komponenter.

7.6 Korrektion av värden erhållna vid reducerat avstånd

I fallet av ett enstaka aggregat, skall den ljudnivå som erhålls på reducerat avstånd korrigeras på följande sätt

$$L''_{Aeq,corr} = L_{Aeq,red} - 20 \lg\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \text{ dB}, \quad (11)$$

där $L''_{Aeq,corr}$ är den immissionsbullernivå som skall rapporteras,
 $L_{Aeq,red}$ är den mätta ljudnivån från den modifierade mikrofonpositionen, korrigerad för inverkan av mätskiva och bakgrundsbuller,
 R_1 är avståndet från aggregatets nav till den ursprungliga mikrofonpositionen,
 R_2 är avståndet från aggregatets nav till den modifierade mikrofonpositionen.

För en grupp av aggregat med samma källstyrka erhålls den korrigerade nivå som

$$L''_{Aeq,corr} = L_{Aeq,red} - 10 \lg\left(\frac{\sum_i \frac{1}{R_{2i}^2}}{\sum_i \frac{1}{R_{1i}^2}}\right) \text{ dB}, \quad (12)$$

där $L''_{Aeq,corr}$ är den immissionsbullernivå som skall rapporteras,
 $L_{Aeq,red}$ är den mätta bullernivån vid den modifierade mikrofonpositionen, korrigerad för inverkan av mätskiva och bakgrundsbuller,
 R_{1i} är avståndet från navet hos aggregat i till den ursprungliga mikrofonpositionen,
 R_{2i} är avståndet från navet hos aggregat i till den modifierade mikrofonpositionen.

7.7 Bestämning av tonnivåer

Tonaliteten beskrivs av differensen mellan tonens ljudtrycksnivå och nivån hos det bredbandiga brus i ett frekvensband omkring tonen som kan maskera hörbarheten hos tonen. Frekvensområdet för det maskerande bruset kallas kritiskt bandbredd och definieras som följer:

Tonens centerfrekvens f_c , Hz	20 - 500	över 500
Kritisk bandbredd	100 Hz	20% av f_c

Om det är fråga om en enda ton, skall det kritiska bandet centreras kring tonen. För toner mellan 20 och 70 Hz skall dock det kritiska bandet väljas till 20 - 120 Hz. Om spektret innehåller flera toner skall det kritiska bandet placeras så att tonaliten, enligt definitionen i avsnitt 7.7.4, maximeras.

Analysen av tonalitet sker i fyra steg:

- Identifiering av linjer i spektret som toner, maskerande brus eller ingetdera.
- Beräkning av nivån hos det maskerande bruset.
- Beräkning av tonnivå.
- Beräkning av tonalitet.

7.7.1 Klassificering av linjer i spektret

För att kunna placera det kritiska bandet korrekt och för att kunna beräkna brus och tonnivåer, måste varje linje i 1 - 2 minutsspektret klassificeras enligt följande kriterier. Om det är tydligt att en integrationstid på 1 - 2 minuter är för lång för aggregat med variabelt varvtal, skall en kortare integrationstid väljas, exempelvis 10 s. För den skall får dock ej den totala analys tiden minskas. Klassificeringen sker på följande sätt:

- en topp i spektret identifieras som en ton om dess nivå är mer än 6 dB över $L_{pn,avg}$,
- om en topp identifieras som en ton, tillhör också intilliggande linjer tonen om deras nivå ligger högst 10 dB under toppen men mer än 6 dB över $L_{pn,avg}$,
- om en spektrallinje är mer än 6 dB över $L_{pn,avg}$ och mer än 10 dB under toppens nivå tillhör linjen varken tonen eller det maskerande bruset,
- alla linjer under $L_{pn,avg} + 6$ dB klassificeras som maskerande.

$L_{pn,avg}$ bestäms på följande sätt:

- de 70% av linjerna inom det kritiska bandet som har de lägsta nivåerna identifieras. Energimedelvärdet av dessa nivåer beräknas och betecknas $L^{70\%}$,
- $L_{pn,avg}$ beräknas som energimedelvärdet av alla linjer under $(L^{70\%} + 6 \text{ dB})$.

Alternativt kan toner och maskerande brus identifieras iterativt enligt ovanstående kriterier, se referens [14].

När nivån hos det maskerande bruset varierar kraftigt över det kritiska bandet kan det vara bättre att bestämma det maskerande bruset som funktion av frekvensen, $L_{pn}(f)$, från en linjär regression genom alla de linjer som är definierade som maskerande, se referens [15]. Alla linjer med en nivå som är minst 6 dB över $L_{pn}(f)$ klassificeras då som toner. Intilliggande linjer klassificeras också som toner om deras nivåer är inom 10 dB från den

högsta nivån och minst 6 dB över $L_{pn}(f)$ vid samma frekvens. Om en spektrallinje är mer än 6 dB över $L_{pn}(f)$ och mer än 10 dB under toppnivån klassificeras den som varken ton eller maskerande brus.

Denna process repeteras för varje kritiskt band som centreras kring tonerna i spektret. Till slut är varje spektrallinje inom varje kritiskt band klassificerat som ton, maskerande brus eller ingetdera.

7.7.2 Beräkning av nivå hos maskerande brus

Nivån hos det maskerande bruset inom det kritiska bandet, L_{pm} , beräknas med utgångspunkt från de linjer som klassificerats som maskerande. En korrektion görs för de linjer som ingår i tonerna och för inverkan av Hanning-fönstret,

$$L_{pm} = 10\lg(\sum 10^{L_m/10}) + 10\lg \frac{\text{kritisk bandbredd}}{N_m \times \Delta f} + 10\lg \frac{1}{1,5}, \quad (13)$$

där L_m är ljudtrycksnivån hos varje linje klassificerad som maskerande brus, N_m är antalet linjer som klassificeras som maskerande brus inom det kritiska bandet, Δf är den nominella frekvensupplösningen.

7.7.3 Beräkning av tonnivå

Metod I

För varje ton inom det kritiska bandet bestäms nivån, L_{pt} , hos de linjer som klassificerats som tonala. En korrektion görs för inverkan av Hanning-fönstret om tonen upptar två eller fler linjer,

$$L_{pt} = 10\lg(\sum 10^{L_t/10}) + 10\lg \frac{1}{1,5}, \quad (14)$$

där L_t är ljudtrycksnivån hos varje linje som klassificerats som tonal.

Om det finns flera toner inom ett och samma kritiska band, beräknas totalnivån hos tonerna, L_{ptI} enligt formeln

$$L_{ptI} = 10\lg(\sum_i 10^{L_{pti}/10}), \quad (15)$$

Metod II

För varje korttidsspektrum på 0,2 till 0,5 s beräknas den totala ljudtrycksnivån, L'_{pti} , för varje ton i utifrån de linjer som klassificerats som tonala. En korrektion görs för inverkan av Hanning-fönstret om tonen upptar två eller fler linjer,

$$L'_{pti} = 10\lg(\sum_i 10^{L_{pi}/10}) + 10\lg \frac{1}{1,5}, \quad (16)$$

där L_t är ljudtrycksnivån hos varje linje som klassificerats som tonal.

För det fall att det finns flera toner inom samma kritiska band beräknas den totala tonnivån, L'_{pt} , som

$$L'_{pt} = 10\lg(\sum_i 10^{L'_{pti}/10}). \quad (17)$$

Den tonnivå som används för beräkningen av tonaliteten, L_{ptII} , är det aritmetiska medelvärde av de 10% högsta tonnivåerna L'_{pt} , beräknade från aktuella korttidsspektra.

7.7.4 Beräkning av tonalitet

Hur tydligt en ton hörs beror på tonaliteten och mittfrekvensen hos det kritiska bandet. För varje 1 - 2 minutersperiod, beräknas tonaliteten, ΔL_{tmI} respektive ΔL_{tmII} , som

$$\Delta L_{tmI} = L_{ptI} - L_{pm}, \quad (18)$$

$$\Delta L_{tmII} = L_{ptII} - L_{pm}, \quad (19)$$

För varje period skall tonaliteten hos den viktigaste tonen eller tonerna rapporteras.

8. Osäkerhet

Osäkerheten i mätta ljudtrycksnivåer uttrycks i en standardavvikelse s . Den totala standardavvikelsen bestäms genom addition av olika bidrag:

$$s = \sqrt{\sum s_i^2}. \quad (20)$$

För osäkerheter där en uniform fördelning inom ett område $\pm a$ kan förutsättas, kan standardavvikelsen uppskattas till $s = a/\sqrt{3}$. Denna typ av fördelning är tillämplig för exempelvis kalibreringen.

En viktig osäkerhetskälla är inverkan av bakgrundsbullret, i synnerhet för de fall där bakgrundsbullrets nivå är nära totalnivån. Generellt sett kan standardavvikelsen s_c hos den korrigerade aggregatnivån, L_{corr} , beräknas som

$$s_c = \frac{\sqrt{s_{tot}^2 \cdot 10^{2L_{tot}/10} + s_{back}^2 \cdot 10^{2L_{back}/10}}}{10^{L_{corr}/10}}, \quad (21)$$

där s_{tot} och L_{tot} är standardavvikelse och ljudnivå hos det totala bullret från aggregat och alla bakgrundskällor,
 s_{back} och L_{back} är standardavvikelse och ljudnivå hos enbart bakgrundsbullret,
 L_{corr} är nivån hos enbart aggregat efter korrigering för inverkan av bakgrundsbuller.

När en regressionsanalys (på N mätresultat) används för att bestämma nivån hos bakgrundsbullret, kan standardavvikelsen beräknas utifrån variansen:

$$s_{back} = \sqrt{\frac{\sum (L_{back,meas} - L_{back,est})^2}{N - 2}}, \quad (22)$$

där summeringen utsträcks över de N mätresultaten.

9. Information att dokumentera och rapportera

9.1 Beskrivning av mätpunkter

Läget hos vindkraftverket och mätpunkterna skall beskrivas fullständigt enligt följande förteckning.

Att dokumentera och rapportera:

- lokalisering av vindkraftverk och immissionspunkt. Fotografier, topografiska kartor och om möjligt koordinater i det svenska koordinatsystemet inkluderas,
- typ av topografi (kullar, platt terräng, klippor, berg, inom närmaste 2-3 km),
- typ av mark (gräs, sand etc),
- närliggande reflekterande vertikala ytor såsom byggnader,
- ljudkällor av typen träd, buskar, vattenytor, ovidkommande vindkraftverk, vägar, industribyggnader, flygplatser, kustlinje, vilka kan påverka bakgrundsbullernivån.

9.2 Beskrivning av vindkraftaggregatet(-en)

Det aktuella vindkraftaggregatet eller gruppen av aggregat skall beskrivas så fullständigt som möjligt tillsammans med driftsförhållandena.

Att dokumentera och rapportera:

- tillverkare och om möjligt typ och serienummer,
- nominell effekt,
- navhöjd,
- torn typ.

9.3 Instrument

Att dokumentera och rapportera:

- den utrustning som använts för mätningarna beskrivs med tillverkare, typ, serienummer och datum för senaste kalibrering,
- bandbredd (eller antal spektrallinjer) hos eventuell smalbandsanalysator,
- position och storlek hos eventuell mätskiva,
- mikrofonmontering,
- höjden hos mikrofonpositionen relativt marken vid aggregatets torn.

9.4 Akustiska data

Alla mätdata skall rapporteras. Dessutom skall följande härledda resultat dokumenteras och rapporteras:

Att dokumentera och rapportera:

Resultat erhållna enligt Metod B:

- frifältsnivån hos det totala bullret, $L_{Aeq,free}$.

Resultat erhållna enligt Metod C:

- korrigerade ljudnivån $L_{Aeq,corr}$ eller, när så är aktuellt, $L'_{Aeq,corr}$ respektive $L''_{Aeq,corr}$,
- $L_{Aeq,corr}$ (eller $L'_{Aeq,corr}$ respektive $L''_{Aeq,corr}$) som funktion av vindhastigheten på 10 m höjd,
- bakgrundsbullernivån, korrigerad för inverkan av eventuell mätskiva, som funktion av vindhastigheten vid immissionspunkten.

I båda fallen dokumenteras och rapporteras dessutom

- eventuell användning av de approximativa metoderna enligt avsnitt 5.8.5,
- bedömd osäkerhet hos den korrigerade frifältsnivån,
- tonaliteten ΔL_{tmI} eller ΔL_{tmII} , i de fall denna erfordras.

9.5 Icke-akustiska data

Att dokumentera och rapportera:

- datum och klockslag för mätningarna,
- temperatur och barometertryck,
- turbulensnivå alternativt storleken hos molntäcke och solhöjd,
- placering av anemometrar och vindriktningsgivare.

10. Referenser

- [1] S. Ljunggren (editor): "Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: 10. Acoustics. Measurement of Noise Immission from Wind Turbines at Noise Receptor Locations". International Energy Agency, First Edition 1997.
- [2] S. Ljunggren (editor): "Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: 4. Acoustics. Measurement of Noise Emission from Wind Turbines". International Energy Agency, Third Edition 1994.
- [3] Metod för immissionsmätning av externt industribuller. Naturvårdsverkets meddelanden 6/1984.
- [4] Etablering av vindkraft till lands. Allmänna råd 1995:1, Boverket.
- [5] IEC Publication 651. Sound level meters.
- [6] IEC Publication 804. Integrating-averaging sound level meters.
- [7] IEC Publication 942. Sound calibrators.
- [8] J. Jakobsen and B. Andersen: "WIND NOISE. Measurements of Wind-Generated Noise from Vegetation and Microphone System". Danish Acoustical Institute, Report No. 108, 1983.
- [9] J. Jakobsen: "Investigation of Wind Screens. Insertion Loss and Attenuation of Wind Noise". DELTA Acoustics & Vibration, Technical Note 1, AV 50/97, 1997.
- [10] ISVR Consultancy Services: "Noise Measurements in Windy Conditions". ETSU W/13/00386/REP, 1996.
- [11] S. Frandsen, B. Maribo Pedersen (editors): "Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: 1. Power Performance Testing". Submitted to the Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research and Development on Wind Energy Conversion Systems. 2nd Edition 1990.
- [12] C. Larsson: "Weather Effects on Sound Propagation Near the Ground". Second International Congress on Recent Developments in Air- and Structure-borne Sound and Vibration, Auburn 1992. Proceedings, p 1269-1276.
- [13] I. Troen and E. Lundtang Petersen: "European Wind Atlas". Risø National Laboratory, 1989.
- [14] "The Assessment and Rating of Noise from Wind Farms". ETSU-R-97, 1996.

- [15] T.H. Pedersen and J. Jakobsen: "Definition of Tone and Noise Levels in the Joint Nordic Method for Detection and Assessment of Audible Tones". DELTA Acoustics & Vibration, Report AV 628/96, 1996.

Appendix 1. Val av frifältspositioner

Vid utomhusmätningar observeras ofta att ljud utbreder sig från källa till mottagare längs olika vägar. Figur A.1 visar ett typiskt exempel där ljud från ett vindkraftverk transmitteras till en mikrofon dels längs en rät linje TM (direktljud inklusive markreflex) och dels längs en linje TFM som inkluderar en reflex från en husfasad (reflekterat ljud). Detta medför att den ljudnivå som mäts i sådana situationer inte enbart beror på källstyrkan och avståndet till aggregatet utan också på en svårbedömd faktor, nämligen reflektionsförhållandena i den reflekterande ytan.

Av denna anledning gäller de svenska riktvärdena för bullerimmission för det fall att inverkan av reflekterat ljud är försumbar. Ljudtrycksnivån benämns i sådana fall ofta frifältsnivå. Frifältsnivå definieras som en ljudnivå i en punkt där nivån hos det reflekterade ljudet är 6 dB eller mer under direktljudet (i båda fallen inklusive inverkan av markreflex).

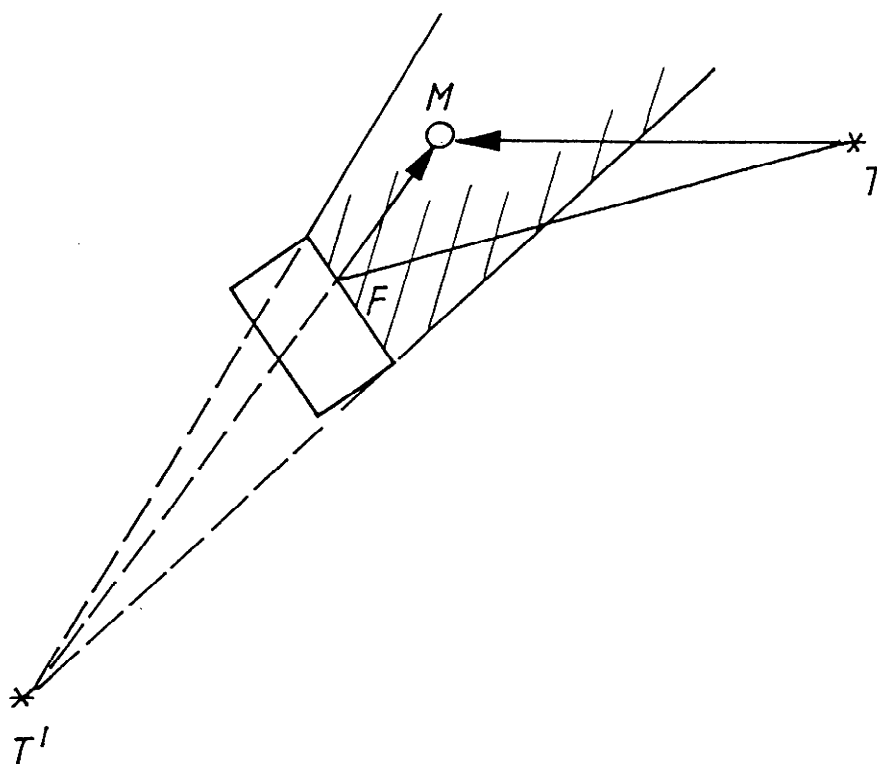
I detta appendix ges några riktlinjer för hur man väljer mikrofonposition för att ett frifältsvärde skall erhållas. Det finns för närvarande inte tillräcklig kunskap för att täcka alla tänkbara fall varför diskussionen här begränsas till tre typfall. I dessa förutsätts ljudet vara alstrat av en enda ljudkälla. De rekommendationer som ges kan dock i många fall utvidgas till en grupp av vindkraftaggregat.

I typfall *A*, där mikrofonen är placerad inom det skuggade området i Figur A.1, kan en tydlig reflex förväntas enligt den geometriska akustikens lagar. Kriteriet att nivån hos det reflekterade ljudet skall vara minst 6 dB under direktljudet medför

$$TFM \geq 2 \cdot TM. \quad (23)$$

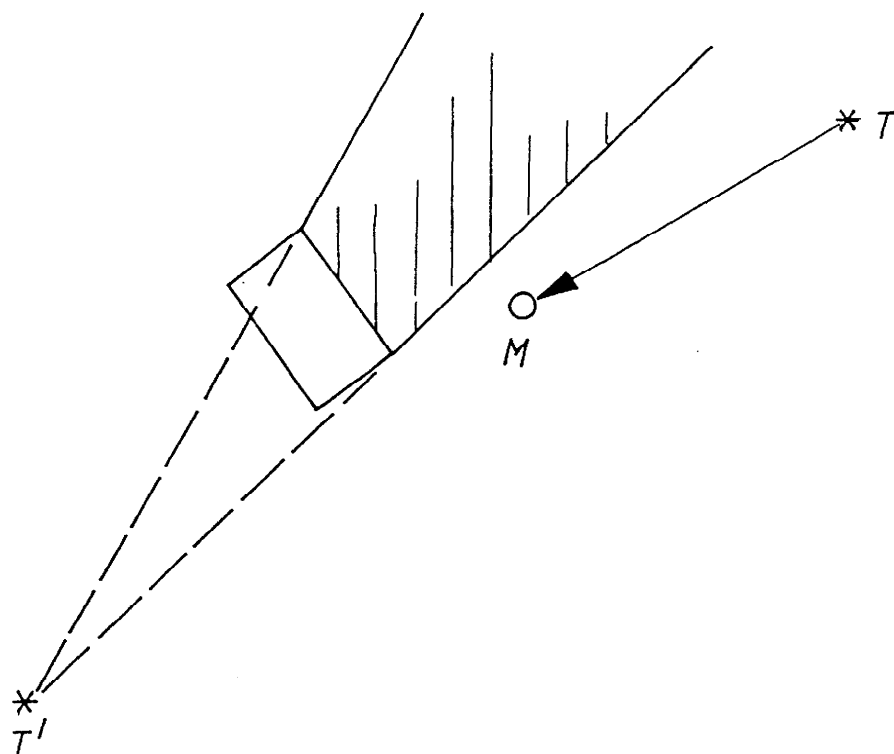
Denna regel kan direkt utvidgas till det fall att ljudet reflekteras i flera vertikala ytor.

Det har påpekats, se referens [3], att inverkan av reflexer i fall *A* kan försummas om avståndet mellan reflekterande yta och mikrofon är stort i förhållande till dimensionerna hos den reflekterande ytan. Som ett exempel anges det att inverkan av en reflex från en yta med dimensionerna 4 m x 8 m kan försummas på avstånd större än 50 m.



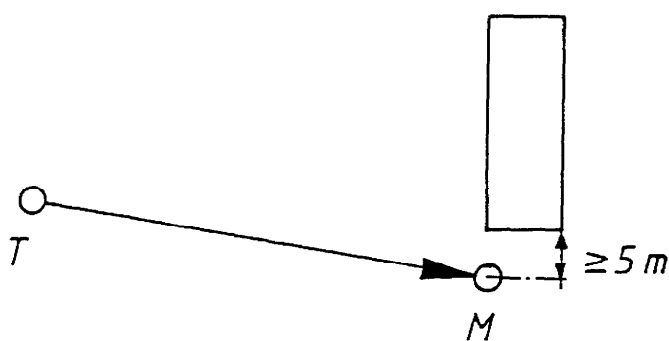
Figur A.1 Illustration av begreppen direkt och reflekterat ljud i typfall A. T indikerar vinkraftverkets läge och T' läget hos spegelljudkällan.

I fall B, som illustreras i Figur A.2, är mikrofonen placerad just utanför det område där en tydlig reflex kan förväntas enligt den geometriska akustikens lagar. Detta fall är svårare att behandla än fall A. Om ytan är helt plan kan den geometriska akustikens lagar tillämpas. Nivån hos det reflekterade ljudet är då förhållandevis låg. Empiriska erfarenheter visar dock att detta inte alltid är fallet och att ytojämnheter ofta leder till starka reflexer i oväntade riktningar. I brist på annan information rekommenderas att samma kriterium tillämpas för detta fall som det föregående på så sätt att ekvation (25) förutsätts gälla också här (punkt F väljs därvid som den närmaste punkten på fasaden).



Figur A.2 Illustration av typfall B.

Fall C illustreras i Figur A.3. Mätpositionen ligger här vid sidan om en byggnad. Praktiska erfarenheter indikerar att ett frifältsvärde erhålls om avståndet mellan mikrofon och byggnad är minst 5 m.



Figur A.3 Illustration av typfall C.

Det skall observeras att i praktiken kan många problem som hänger samman med placering av mikrofon undvikas genom att man utnyttjar tekniken med en mätskiva så som beskrivs i avsnitt 5.2.2 and 5.2.3.

ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS - ELFORSK - AB

Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31

Telefon: 08-677 25 30. Telefax: 08-677 25 35

Internet <http://www.kvf.se/elforsk>