

Henrik Møller og Christian Sejer Pedersen

Lavfrekvent støj fra store vindmøller



Lavfrekvent støj fra store vindmøller

Af Henrik Møller og Christian Sejer Pedersen

Sektion for Akustik
Aalborg Universitet 2010

Lavfrekvent støj fra store vindmøller

ISBN 978-87-92328-30-4

© Copyright 2010 Henrik Møller og Christian Sejer Pedersen

Udgivet af:

Sektion for Akustik

Institut for Elektroniske Systemer

Aalborg Universitet

Fredrik Bajers Vej 7, B5

DK-9220 Aalborg Ø, Danmark

Telefon (+45) 9940 8710, telefax (+45) 9815 2144

E-mail acoustics@acoustics.aau.dk

INDHOLD

	FORORD	5
	RESUMÉ.....	7
1	INTRODUKTION	9
1.1	Lavfrekvent lyd og infralyd	9
1.2	Tidligere undersøgelser.....	9
1.2.1	Opsummering af resultater fra tidligere undersøgelser	13
1.3	Oversigt over undersøgelsen	14
2	METODER.....	15
2.1	Vindmøller.....	15
2.2	Udsendt lydeffekt	15
2.3	Udendørs lydtrykniveau ved naboer	16
2.4	Lydisolation	16
2.5	Indendørs lydtrykniveau ved naboer.....	17
2.6	Statistiske metoder	17
3	RESULTATER OG DISKUSSIONER.....	19
3.1	Udsendt lydeffekt	19
3.1.1	LWA og LWALF	19
3.1.2	Lydeffektniveau i 1/3-oktavbånd	20
3.1.3	Toneindhold.....	23
3.1.4	Direktivitet.....	24
3.1.5	Betydning af vindhastigheden	26
3.2	Udendørs lydtrykniveau ved naboer	26
3.3	Lydisolation	28
3.3.1	Mangler ved lydisolutionsmålemetoden.....	29
3.4	Indendørs lydtrykniveau ved naboer.....	29
3.4.1	Den danske indendørsgrænse.....	31
4	GENERELLE DISKUSSIONER	33
4.1	Støj som funktion af møllestørrelse	33
4.2	Variation mellem møller.....	34
4.3	Data fra projekt WINDFARMperception	35
4.4	Tonekomponenter.....	36
4.5	Jordrefleksion.....	38
4.6	Vinduer.....	38
4.7	Estimerede lydeffekter for endnu større møller.....	39
4.8	Atmosfæriske forhold	42
5	KONKLUSIONER.....	45
	Referencer.....	47

FORORD

Vindmøller bliver større og større, og der er opstået frygt for, at støjen fra møllerne derfor flytter sig nedad i frekvens, og at indholdet af lavfrekvent støj og infralyd vil stige og nå et niveau, hvor det kan genere naboerne. Dagspressen fortæller jævnligt om rumlende og generende støj fra store vindmøller, og det hævdes ofte, at støjen udbreder sig ret langt. Den videnskabelige litteratur om infralyd og lavfrekvent støj fra store vindmøller er derimod mere begrænset.

Dette var baggrunden for et dansk projekt, hvor Delta, et konsulentfirma og officielt akustiklaboratorium for Miljøstyrelsen, skulle måle og optage støj fra store vindmøller, og Aalborg Universitet skulle lave lytteforsøg i laboratoriet for at vurdere generne fra møllerne og sammenligne med generne fra andre, mere kendte støjklender, f. eks. trafikstøj. Undersøgelsen skulle dække hele frekvensspektret af støjen men lægge særlig vægt på lavfrekvent støj og infralyd. Undersøgelsen skulle gøre brug af et særligt laboratorium for lavfrekvent lyd på Aalborg Universitet [1,2] og i øvrigt udnytte universitetets engagement gennem årtier indenfor forskning i lavfrekvent lyd og infralyd.

Desværre måtte Aalborg Universitet forlade projektet, inden lytteforsøgene blev gennemført, fordi Delta ikke var i stand til, eller villige til, at afklare en række spørgsmål af betydning for udvælgelse og dokumentation af lydoptagelser til lytteforsøgene. Det var heller ikke muligt for Aalborg Universitet at få adgang til alle optagelserne, noget som forfatterne af denne rapport mener, er essentielt for en begrundet udvælgelse af optagelser til sådanne forsøg. Lytteforsøgene er således ikke blevet gennemført, og denne rapport begrænser sig derfor til analyser og diskussioner af de fysiske målinger.

Der er modtaget økonomisk støtte fra Energiforskningsprogrammet under Energistyrelsen og fra Aalborg Universitet.

Aalborg, 11. juni 2010

Henrik Møller og Christian Sejer Pedersen

RESUMÉ

I undersøgelsen analyseres data fra 48 små og store vindmøller. Resultaterne viser, at store vindmøller (2,3-3,6 MW) udsender relativt mere lavfrekvent støj¹ end små vindmøller (op til 2 MW). Efterhånden som støjen bevæger sig væk fra møllen, bliver det lavfrekvente indhold endnu mere udtalt, fordi luftens absorption reducerer de høje frekvenser mere end de lave.

Ser man på det A-vægtede lydtryk udendørs i relevante naboafstande, udgør de lave frekvenser en væsentlig del af støjen. Der er derfor ingen tvivl om, at den lavfrekvente del af støjspektret har betydning for naboernes oplevelse af støjgener fra store vindmøller.

Den lavfrekvente støj kan også genere indendørs, naturligvis afhængigt af lydisoleringen. Hvis det udendørs lydtryk for den totale støj ligger i nærheden af det maksimalt tilladelige i Danmark², er der risiko for, at en betragtelig del af naboerne vil være generede af lavfrekvent støj, selv indendørs.

Forskellen i lavfrekvent støj fra små til store møller kan udtrykkes som en forskydning nedad i frekvens af det relative frekvensspektrum på omkring 1/3 oktav. Et yderligere skift af lignende størrelse må forventes for vindmøller i 10 MW størrelsen med dertil svarende forøgede gener fra lavfrekvent støj.

Vindmøllerne udsender også infralyd³, men når man tager menneskets følsomhed overfor disse frekvenser i betragtning, er der tale om meget lave niveauer. Selv tæt på møllerne er lydtrykket langt under den normale høretærskel. Infralyd betragtes derfor ikke som et problem for møller af konstruktion og størrelse som de undersøgte møller.

Den udsendte A-vægtede lydeffekt stiger proportionalt med møllernes elektriske effekt eller sandsynligvis endnu mere. Derfor forurener store vindmøller det samme – eller et større – areal med støj, sammenlignet med små møller med den samme samlede elektriske effekt.

Der er forskelle på flere decibel på støjen fra forskellige møller af samme størrelse, selv for møller af samme fabrikat og model. I planlægningsfasen må man derfor indregne en sikkerhedsmargin for at sikre, at de rejste vindmøller vil overholde støjgrænserne. Der findes en international teknisk specifikation for dette, men den anvendes ofte ikke.

Under visse atmosfæriske betingelser kan støjen fra vindmøller være mere generende og – især den lavfrekvente del – udbrede sig meget længere end normalt antaget. Det er nødvendigt med mere viden om sådanne fænomener og deres forekomst.

¹ Støj i frekvensområdet 20-200 Hz

² Et A-vægtet lydtrykniveau på 44 dB

³ Lyd med frekvenser under 20 Hz

1 INTRODUKTION

1.1 Lavfrekvent lyd og infralyd

Det vil være hensigtsmæssigt med et par indledende bemærkninger om lavfrekvent lyd og infralyd. For en mere omfattende gennemgang af den menneskelige hørelse ved lave frekvenser og infralyd, se f.eks. Møller og Pedersen [3].

Det er normalt underforstået, at den nedre grænse for den menneskelige hørelse er omkring 20 hertz (forkortet Hz, lig svingninger per sekund), og for frekvenser herunder benyttes udtrykkene *infralyd* og *infrasonisk*. Frekvensområdet 20-200 Hz betegnes som det *lavfrekvente* område (undertiden med en lidt anden øvre grænse).

Men som en overraskelse for mange mennesker, stopper hørelsen ikke ved 20 Hz. Hvis lydtrykket er tilstrækkelig højt, kan mennesker høre infralyd i det mindste ned til én eller to hertz. Lyden opfattes gennem ørerne, men den subjektive kvalitet er anderledes end for lyd med højere frekvenser. Under 20 Hz forsvinder den tonale opfattelse, lyden får en diskontinuert karakter, og der opstår en trykkende fornemmelse ved trommehinderne. Ved nogle få hertz ændrer opfattelsen sig til diskontinuerte separate trykstød, og det er muligt at følge og tælle de enkelte svingninger af en tone.

Ved lave frekvenser og især infralyd, stiger hørestyrken (den subjektive lydstyrke) stejlere over høretærsklen end ved højere frekvenser (Whittle et al. [4], Møller og Andresen [5], Bellmann et al. [6], ISO 226 [7]), og en lyd, som kun er moderat over tærsklen, kan opfattes ikke bare som kraftig, men også generende (Andresen og Møller [8], Møller [9], Inukai et al. [10], Subedi et al. [11]). Da der er en naturlig spredning i høretærskler, kan en lyd, der er uhørlig eller svag for nogle mennesker, være kraftig og generende for andre. Lavfrekvent støj over høretærsklen kan også påvirke arbejdssevnen (Waye et al. [12]) og give søvnforstyrrelser (Waye et al. [13]). Der er ingen troværdig dokumentation for fysiologiske eller psykologiske virkninger af infralyd eller lavfrekvent støj under høretærsklen (se f.eks. Berglund og Lindvall [14]).

Infralyd måles med G-vægtningskurven [15], som dækker frekvensområdet 1-20 Hz. Ved den normale høretærskel for rene toner (Whittle et al. [4], Yeowart og Evans [16], Yamada et al. [17], Landström et al. [18], Watanabe og Møller [19] og Inukai et al. [10]), er det G-vægtede lydtrykniveau i størrelsesordenen 95-100 dB. Man regner normalt ikke med, at mennesker kan opfatte G-vægtede lydtrykniveauer under 90 dB [15] eller 85 dB [20].

1.2 Tidligere undersøgelser

Der findes mange undersøgelser, som beskæftiger sig teoretisk med de mekanismer, der skaber lavfrekvent støj og infralyd fra vindmøller, mens det er langt mere begrænset, hvad der findes af originale studier vedrørende støjen fra komplette vindmøller. I det følgende betragtes kun vindmøller med vandret akse.

Hubbard og Shepherd [21] og Shepherd og Hubbard [22] gennemgik litteraturen om vindmøllestøj især med fokus på undersøgelser udført ved NASA i mere end to årtier og omfattende vindmøller på op til 4,2 MW. Det blev konstateret og forklaret ved numeriske modeller, at harmoniske af vingepassage-frekvensen skyldes forskelle i vindhastighed henover rotorarealet og, for vindmøller med rotoren på læsiden af mølletårnet ("bagløbere"), impulser skabt ved vingens passage gennem tårnets slipstrøm. Især den sidste mekanisme er ansvarlig for et højt niveau af diskrete frekvenser i infralyd- og lavfrekvensområdet for vindmøller med rotoren i læ. Der skabes også 'bredbånds-' (stokastisk, kontinuert-spectrum) støj ved lave og infrasoniske frekvenser på grund af turbulens i den tilstrømmende luft. Turbulens i tilstrømningen er hovedårsagen til bredbåndsstøj under nogle hundrede hertz. Udbredelsen af lyd fra vindmøller blev også undersøgt, og det blev observeret og forklaret med atmosfærisk refraktion, at udbredelsen i læretningen af lave frekvenser (vist som eksempel ved 8-16 Hz) var cylindrisk fra en vis afstand og ikke sfærisk, som normalt antaget ved beregninger af støj. Det betyder, at niveauet falder med 3 dB per fordobling af afstanden og ikke 6 dB. At møllestøj nogle gange opfattes lettere indendørs end udendørs, blev forklaret med rumresonanser og lav lydisolering ved lave frekvenser. Infralyddelen af spektret lå under den normale høretærskel i alle de undersøgte tilfælde af klager, men det blev hævdet, at infralyden var årsag til mærkbare vibrationer og klirren af vinduer og vægmonterede genstande, hvilket bidrog til negative reaktioner over vindmøllestøj. Med nogle af de samme møller som eksempler, viste Guidati et al. [23], at interaktionen mellem vinger og tårn skaber impulsiv infrasonisk og lavfrekvent støj også ved møller med rotoren i vindretningen ("frontløbere"), dog væsentligt mindre end for møller med rotoren i læretningen.

Legerton et al. [24] målte støj fra to 450 kW vindmøller i en afstand af 100 m. De rapporterede niveauer for 1/3-oktavniveauerne op til 20 Hz er langt under den normale høretærskel for rene toner, mens niveauerne i 31,5 Hz båndet er lige under tærsklen.

Betke et al. [25] og Betke og Remmers [26] præsenterede en teknik til at reducere vindstøj i målinger af lavfrekvent støj fra vindmøller. De brugte to mikrofoner monteret i jorden med en afstand på 10 m og en krydskorrelationsteknik. I en afstand af 200 m fra en 500 kW mølle synes frekvensspektret at være kontinuert, når der analyseres med en meget fin frekvensopløsning, dog med toppe ved vingepassage-frekvensen og dens harmoniske. G-vægtede lydtrykniveauer på denne afstand var 63,9 dB.

Jakobsen [27] gennemgik data fra de undersøgelser, der er nævnt i de tre foregående paragraffer og søgte yderligere oplysninger i de originale målerapporter og ved kontakt til forfatterne. Han estimerede G-vægtede niveauer for 10 vindmøller på 50 kW til 4,2 MW og fandt, at niveauet fra vindmøllerne med rotoren i vindretningen er omkring 70 dB eller lavere i en afstand af 100 m, mens niveauet fra vindmøllerne med rotoren i læ er 10-30 dB højere. Det blev konkluderet, at selv tæt på møller med rotoren i vindretningen vil det G-vægtede niveau såvel udendørs som indendørs være under grænsen på 85 dB i de danske retningslinjer for lavfrekvent støj og infralyd [20]. For vindmøller med rotoren i læ af tårnet kan denne grænse

overskrides på afstande op til flere hundrede meter. Selv for møller med rotoren i læ var niveauet af infralyd dog for lavt til at kunne forklare klager rapporteret i de oprindelige undersøgelser på afstande op til 2 km. I et forsøg på at finde en alternativ forklaring estimerede Jakobsen det indendørs A-vægtede niveau for 10-160 Hz frekvensområdet, et mål der anvendes af de danske retningslinjer for lave frekvenser. Den anbefalede aften/natgrænse på 20 dB for boliger var overskredet i alle tilfælde på nær ét. På den anden side var de normale udendørs A-vægtede niveauer i disse tilfælde også høje nok til at forklare klagerne (47-61 dB), så det er ikke muligt sige, om klagerne skyldtes den normale eller den lavfrekvente støj. (Jakobsen henviste fejlagtigt til den danske aften/natgrænse som 25 dB).

Van den Berg [28] gjorde opmærksom på, at vingernes passage foran mølletårnet giver anledning til støj i infralydområdet, men endnu vigtigere til modulation af støjen ved højere frekvenser, så der opstår en 'swish-swish' lyd. I en stabil atmosfære, som ofte findes om natten, er forskellen i vindhastighed mellem top og bund af rotoren meget højere end på andre tidspunkter, og dette øger modulationen og ændrer swish-lyden til en "klapren, banken eller dunken". For en vindmøllepark med 17 vindmøller på hver 2 MW, kunne dette høres tydeligt mindst én kilometer væk. Der blev lavet målinger om natten, 100 m fra hver af to af møllerne samt 750 m fra den nærmeste række af 10 møller. Selv for de nærmeste målinger var niveauerne langt under den normale høretærskel for 1/3-oktavbåndene op til 20 Hz. Niveauerne var over den normale høretærskel (ISO 389-7 [29]) for 1/3-oktavbåndene fra 31,5 eller 40 Hz og op, selv ved 750 m.

Pedersen og Møller [30] analyserede indendørs lavfrekvent støj og infralyd fra fire huse i nærheden af en eller flere vindmøller (0,6-2,75 MW) med en afstand til nærmeste mølle på 90-525 m. Der var ingen hørbare harmoniske af vinge-passage-frekvensen, men der var hørbare komponenter i lavfrekvensområdet, i flere tilfælde med en vis tonal karakter. G-vægtede niveauer var 65 dB eller lavere, hvilket vil sige langt under den normale høretærskel, og det blev konkluderet, at infralyden ikke vil give anledning til gener. A-vægtede niveauer for 10-160 Hz frekvensområdet var omkring eller under den danske aften/natgrænse for boliger på 20 dB [20]. De højeste niveauer var målt ved en lav vindhastighed (6,6 m/s), men tættere på en vindmølle end folk normalt vil bo (90 m), eller længere væk (325 m) i den eneste måling, som blev lavet ved en højere vindhastighed (9,4 m/s). Målingerne blev lavet efter målemetoden i de danske retningslinjer, dog uden at der var en klager til at udpege målepositioner, hvor støjen var højest, hvilket er vigtigt i metoden [20]. Målingerne blev ikke generelt korrigeret for baggrundstøj, men der blev gjort en betydelig indsats for kun at analysere perioder uden forstyrrelser. Ekstra målinger i to af husene tyder på, at folk kan blive udsat for højere niveauer andre steder i rummet, end der blev målt med den officielle metode. Resultaterne var ikke entydige vedrørende den lavfrekvente støj, og undersøgelsen var en del af motiveringen for det aktuelle projekt.

Konsulentfirmaet Hayes Mckenzie Partnership Ltd. [31] målte infralyd i en afstand af 360 m i læretningen af en vindmøllepark med tolv 1,65 MW møller. Ved vindhastigheder på op til 20 m/s, var de G-vægtede niveauer op til 80 dB. I en anden del af undersøgelsen blev der målt lavfrekvent støj i tre huse, hvor beboerne

havde klaget over lavfrekvent støj fra vindmølleparker med 3-16 møller. Møllestørrelse og afstand til mølleparken blev kun angivet for et af tilfældene (tre 1,3 MW møller, afstand 1030 m). Det blev konkluderet, at for 10-160 Hz området var niveauerne lavere end grænser foreslået af Moorhouse et al. [32, 33] for det britiske ministerium for miljø, fødevarer og landdistriktspørgsmål (DEFRA), og den danske 20 dB grænse [20]. Ikke desto mindre viser data, at begge grænser faktisk blev overskredet i to af de tre huse. I det ene hus skete det jævnlige, indtil mikrofonen blev flyttet til en anden placering i rummet. Det blev fremført, at mikrofonen i den første position optog lyd fra et nærliggende vandløb snarere end fra vindmøllerne. Forfatterne af denne rapport er skeptiske over for idéen om, at flytning af mikrofonen inden for det samme rum skulle reducere lavfrekvent lyd og infralyd fra vandløbet, men ikke fra vindmøllerne. Både de britiske og de danske retningslinjer specificerer, at støjen skal måles, hvor lyden er kraftigst, og det er ikke muligt at se af data, om lyden i det første målepunkt (eller begge) var domineret af lyd fra vandløbet. I det andet hus blev der kun rapporteret gener to gange i måleperioden, og både de britiske og de danske grænser var overskredet den ene gang. Et vindue stod åbent begge gange, og det hævdedes, at både de britiske og de danske retningslinjer kræver, at vinduerne er lukket under målingerne. Dette er dog ikke korrekt. De britiske dokumenter har ikke instruktioner om vinduesindstillinger under målingerne, men kræver en omfattende udspørgen af den generede person om forholdene under generne, og det er logisk at antage, at målingerne skal foretages under samme betingelser. De danske retningslinjer angiver specifikt, at der skal foretages målinger med åbne vinduer, hvis klageren finder, at støjen er kraftigere i denne tilstand.

Jakobsen [34] brugte den udsendte lydeffekt (primært ved 8 m/s) fra 10 forskellige vindmøller i størrelsen 850 kW til 3 MW til at beregne lydtrykniveauet i en afstand af 200-800 m. Udendørs A-vægtede niveauer og indendørs A-vægtede niveauer for 10-160 Hz frekvensområdet blev beregnet, de indendørs niveauer ved hjælp af lydisolationsdata, som anvendes i den danske regulering af lavfrekvent støj fra hurtigfærger [35]. Det blev konkluderet, at indendørs A-vægtede niveauer for 10-160 Hz ikke vil overstige den danske 20 dB aften/nat grænse [20], medmindre det udendørs A-vægtede niveau for hele frekvensområdet overstiger 45 dB. Data viser imidlertid noget andet. Med et udendørs niveau lige under 45 dB ligger det indendørs niveau over 20 dB i omkring halvdelen af de beregnede tilfælde. Det blev fremført, at lydisolationsmålinger af byhuse [upubliceret] havde vist bedre lydisolationsniveau end bygningerne i baggrundsmaterialet for regulering af støj fra hurtigfærger [36].

Lee et al. [37] og Jung et al. [38] målte støj fra to vindmøller med rotor i vindretningen på henholdsvis 660 kW og 1,5 MW nominel elektrisk effekt. Den A-vægtede støj steg med vindhastigheden for 1,5 MW møllen, mens den var nogenlunde konstant over det meste af driftsområdet for 660 kW møllen. De to møller var henholdsvis stall- og pitch-regulerede, og den manglende stigning i den A-vægtede støj ved højere vindhastigheder hævdedes at være typisk for pitch-regulerede møller og til at være en af årsagerne til, at denne form for regulering foretrakkes for store vindmøller. Infralydområdet var domineret af vingepassage-frekvensen og dens harmoniske, og niveauet steg med stigende vindhastighed for

begge møller. Der blev udtrykt bekymring for, at infralyd og lavfrekvent støj vil blive et problem med moderne vindmøller, hvor pitch-reguleringen begrænser den A-vægtede støj, men ikke den lavfrekvente støj og infralyd. Det blev konkluderet, at den lavfrekvente del af støjen fra begge vindmøller er hørbar for en gennemsnitlig person og sandsynligvis vil føre til klager, og at infralyddelen kan medføre klager på grund af klirren, f. eks. fra vinduerne. Afstanden til møllerne for denne konklusion blev ikke rapporteret, men det kan udledes af andre data i artiklen, at det må have været ganske tæt på, i størrelsesordenen 70-100 m.

Gastmeier og Howe [39] målte indendørs støj i en afstand af 325 m fra den nærmeste af flere 1,8 MW møller. Vindhastigheden var 5 m/s. Niveaulet hævdedes at være mindst 30 dB under den normale høretærskel (fra Watanabe og Møller [19]) ved alle frekvenser under 20 Hz. Artiklens figur sammenlignede fejlagtigt smalbandsniveauer med høretærskler for rene toner, men forfatterne af denne rapport anslår, at der ikke desto mindre er en rimelig margin op til tærsklen.

Ramakrishnan [40] målte støj tæt på en enkelt 660 kW mølle og tæt på en enkelt mølle i en vindmøllepark med mere end 50 møller på hver 1,5 MW. G-vægtede niveauer var omkring 70 dB i begge tilfælde.

Harrison [41] gjorde opmærksom på, at da turbulens i den tilstrømmende luft er afgørende for udsendelse af lavfrekvent støj, bør der være mere fokus på kontrol af turbulens under målinger og ved støjberegninger. Et særligt problem er, at turbulensen øges i slipstrømmen fra vindmøller, og det tages ikke i betragtning under målinger af lydudsendelsen, som laves med enkeltstående vindmøller. Barthelmie et al. [42] viste, at turbulensen er markant forøget ved afstande op til mindst fire gange rotordiameteren. Slipstrøms-turbulens kan således være vigtig for udsendelse af lavfrekvent støj fra vindmølleparker.

1.2.1 Opsummering af resultater fra tidligere undersøgelser

Ovenstående undersøgelser har anvendt en række forskellige metoder, og de fleste data kan ikke sammenlignes direkte. Ingen af undersøgelserne har systematisk undersøgt udviklingen af lavfrekvent støj og infralyd med møllestørrelse. Nogle af undersøgelserne mangler grundlæggende oplysninger, såsom information om mølle(r), måleafstand, -retning og -højde, vindhastighed, analysebåndbredde, baggrundsstøj, lydisolations ved indendørs målinger, osv. osv. Ikke desto mindre synes det at være muligt at drage nogle konklusioner.

Passagen af vingerne gennem områder med varierende vindhastighed og densitet modulerer lyden ved højere frekvenser med vingepassage-frekvensen, men skaber også infrasoniske og lavfrekvente komponenter. Forskellene i vindhastighed og densitet skyldes den varierende højde over jorden, atmosfærisk turbulens og tilstedeværelsen af mølletårnet. Støj fra møllens mekaniske dele kan også spille en rolle. Modulation af lyd ved højere frekvenser kan på grund af den lave modulationsfrekvens fejlagtigt tolkes som værende infralyd.

For vindmøller med rotoren i vindretningen i forhold til tårnet ('forløbere') er niveauet for infralyd langt under den normale høretærskel, selv tæt på møllen. På møller med rotoren i læ af tårnet ('bagløbere') skaber vingernes passage gennem

slipstrømmen fra tårnet infralyd, som kan overskride den normale høretærskel tæt på vindmøllen og muligvis forårsage klirren af f. eks. vinduer selv i relevante naboafstande. De fleste moderne vindmøller, men ikke alle, har rotoren i vindretningen.

For lavfrekvensområdet er resultaterne mindre sikre. Indikationerne afviger mellem undersøgelserne, og det er ikke muligt fra ovenstående at konkludere, i hvilket omfang lavfrekvent støj fra vindmøller er skyld i eventuelle gener. Svaret vil formentlig afhænge af mølle, afstand, atmosfæriske forhold, om man er indendørs eller udendørs osv.

På dette sted bør det nævnes, at der ud over originale undersøgelser findes en anelig mængde af resuméer, reviews, hvidbøger, informationsfoldere, websider osv. om lavfrekvent støj og infralyd fra vindmøller. Mange af disse er lavet af organisationer, som arbejder ivrigt for eller imod vindmøller, og der er desværre mange fremstillinger af tvivlsom kvalitet. En række effekter og symptomer hævdes nogle steder at skyldes infralyd eller lavfrekvent lyd, uden at der er noget bevis på en årsagssammenhæng. Der skelnes ofte ikke ordentligt mellem infralyd og lavfrekvent lyd, og som en konsekvens heraf afvises lavfrekvent støj ofte som årsag til gener, blot fordi man kan se bort fra infralyd (som regel med rette, som det ses i ovenstående). Det påstås (stadig) ofte, at infralyd ikke kan høres og nogle gange endda, at lavfrekvent støj heller ikke kan, eller det fortælles, at begge dele kun kan høres af særligt følsomme personer – hvilket alt sammen er forkert. Vægtningskurver misforstås eller (mis)bruges til at give indtryk af dramatisk høje eller ubetydeligt lave niveauer. Nogle gange forklædes politiske markeringer (fra begge sider) som videnskabelige bidrag.

1.3 Oversigt over undersøgelsen

I projektet blev støjen fra fire store vindmøller målt, støjdata for 44 andre små og store møller blev indsamlet, og den lavfrekvente lydisoleringen blev målt for ti rum i normale beboelseshuse. I denne rapport benyttes data fra projektet til at undersøge forbindelsen mellem udsendt lydeffekt og møllestørrelse. Kildespektrene analyseres og diskuteres, og især den hypotese, at spektret bevæger sig mod lavere frekvenser for stigende møllestørrelse, undersøges. Udendørs og indendørs spektre i relevante naboafstande analyseres og diskuteres. Målingerne og dataindsamlingen blev foretaget af Delta, og flere detaljer kan findes i de originale rapporter [43, 44, 45, 46].

2 METODER

2.1 Vindmøller

Der indgik i alt 48 vindmøller i projektet. Fire prototype-møller med nominal elektrisk effekt på over 2 MW blev målt af Delta som en del af projektet (Mølle 1-4), mens data for syv andre møller over 2 MW blev hentet fra målinger foretaget af Delta uden for projektet (Mølle 5-11) [43, 44]. Data for 37 vindmøller med en nominal effekt på eller under 2 MW blev hentet fra tidligere målinger foretaget af Delta [45]. Blandt de små møller optræder nogle få fysiske møller mere end én gang, og de repræsenterer således møllen målt ved forskellige lejligheder. Alle møller var tre-bladede med rotoren placeret på vindsiden af tårnet ('forløbere').

2.2 Udsendt lydeffekt

Den lydeffekt, som udsendes fra vindmøllerne, blev målt i overensstemmelse med IEC 61400-11 [47]. Princippet i denne standard er at måle lyden på en reflekterende plade anbragt på jorden nedenfor vindmøllen i en vandret afstand svarende til cirka møllens totale højde. Det målte lydtrykniveau konverteres til lydeffektniveau for en imaginær punktkilde i rotorens centrum, som ville udsende den samme lyd i den retning, hvor målingen er foretaget. Resultatet betegnes det *apparente lydeffektniveau*, hvor 'apparente' understreger, at det ikke er den sande lydeffekt, men den effekt som 'ses' i den målte retning. [**Apparent**, (af lat. *apparens*, *apparentis*, af *apparere* 'komme til syne'), tilsyneladende; som kan iagttages. (Den Store Danske, Gyldendals åbne encyklopædi)].

Det apparente lydeffektniveau blev bestemt for 1/3-oktavniveau og som et samlet A-vægtet niveau, L_{WA} . Desuden blev et særligt lavfrekvensmål, L_{WALF} , det apparente A-vægtede lydeffektniveau for 1/3-oktavniveauene 10-160 Hz beregnet. Det A-vægtede lydtrykniveau for dette frekvensområde, L_{pALF} , benyttes af de danske retningslinjer for lavfrekvent støj [20].

Ordet apparent er meget lidt mundret og sjældent brugt på dansk, men der findes desværre ikke et andet dækkende udtryk til brug for en oversættelse af det engelske 'apparent sound power level'. Det eneste lydeffektniveau i denne rapport, som ikke er apparent lydeffektniveau, optræder i det følgende afsnit 2.3, og ordet apparent udelades derfor i den efterfølgende del af rapporten, inklusive resultatafsnit og diskussioner.

Data blev fremskaffet for alle møller i læretningen, benævnt *referenceretningen*, ved en vindhastighed på 8 m/s (10 m over jorden). Denne vindhastighed bruges ofte ved støjregulering, og de fleste analyser i denne rapport er lavet for denne hastighed. Møllerne 1-4 blev også målt ved forskellige andre vindhastigheder. For vurdering af indholdet af rene toner blev tonal hørbarhed (tonal audibility), ΔL_{ta} , bestemt for Mølle 1-4, og for at give et indblik i en mulig retningsafhængighed af lydudsendelsen, blev Mølle 1-3 også målt ved $\pm 60^\circ$ til siderne i forhold til referenceretningen samt i vindretningen, stadig på jorden. Alle møller blev målt i det frekvensområde, standarden kræver, 50 Hz til 10 kHz, og de fleste møller blev målt ned til 31,5 eller 25 Hz. Mølle 1-4 blev målt ned til 4 Hz.

2.3 Udendørs lydtrykniveau ved naboer

Fritfelt-lydtrykniveau, L_p , hos naboer i læretningen blev beregnet efter metoden i ISO 9613-2 [48], bortset fra at der blev anvendt 1/3-oktavbånd i stedet for oktavbånd.

Retningen til naboer er mere vandret end den retning, hvor det apparente lydeffektniveau blev målt, men i mangel af mere præcise data, blev lydeffektniveauet plus retningsfaktoren, $L_W + D_C$, erstattet af det apparente lydeffektniveau, L_{WA} , for referenceretningen. Dæmpningen som følge af atmosfærisk absorption, A_{atm} , blev beregnet ved hjælp af data fra ISO 9613-1 [49] for 10° C og en relativ luftfugtighed på 80 %. 'Dæmpningen' på grund af jordens indvirkning, L_{gr} , blev sat til -1,5 dB, hvilket betyder, at der lægges 1,5 dB til den direkte lyd fra møllen. De to resterende led i ISO 9613-2 (dæmpninger på grund af en eventuel barriere A_{bar} og diverse A_{misc}) blev sat til nul.

Hvis den skrå afstand fra rotorcenter til observationspunktet betegnes d , og dæmpningskonstanten er α , bliver

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{1 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1.5 \text{ dB} \quad (1)$$

Denne beregning svarer til den, der anvendes i den danske regulering af støj fra vindmøller [50].

2.4 Lydisolation

For at gøre det muligt at beregne den lavfrekvente støj indendørs, blev lydisolationen ved lave frekvenser målt for ti rum, to rum i hvert af fem normale beboelseshuse [46].

Huset blev eksponeret med lyd fra en højttaler placeret på jorden og rettet mod facaden af huset med en vandret indfaldsvinkel omkring 45° midt på facaden. Den vinkelrette afstand fra højttaleren til væggen var mindst 5 m. Højttaleren blev forsynet med bredbåndsstøj, lavpasfilteret ved 250 Hz og equaliseret for at kompensere for højttalerkarakteristikken. Det udendørs lydtrykniveau blev målt på facaden cirka 1,5 m over gulvniveau for modtagerrummet. *Fritfelt-lydtrykniveauet* blev bestemt ved at trække 6 dB fra de målte niveauer. Den udendørs opstilling og målingerne deler elementer med flere af metoderne i ISO 140-5 [51], men ingen enkelt metode er samlet set overholdt.

Ved lave frekvenser kan indendørsniveauet variere meget inden for det samme rum, og det er en generel opfattelse, at til vurdering af støjpåvirkning bør det målte niveau afspejle områder med højt niveau frem for gennemsnittet for rummet (se f. eks. Jakobsen [52], Simmons [53] og Pedersen et al. [54]). For at opfylde dette, blev som *indendørs lydtrykniveau* benyttet energimiddelværdien af målinger lavet i fire vilkårlige tredimensionelle hjørner, dvs. hvor gulvet eller loftet møder to vægge. Hjørner tæt på mulige koncentrerede transmissionsveje (eksempelvis ventilationskanaler, vinduer eller døre) blev dog undgået, og de valgte hjørner repræsenterede tilsammen alle overflader. Pedersen et al. [54] har vist, at denne metode giver et godt estimat på det

niveau, som er overskredet i 10 % af rummet, dvs. tæt på maksimum for rummet, men uden at give niveauer, der kun eksisterer i en meget lille del af rummet.

At 3D-hjørnemetoden er velegnet til at estimere det maksimale niveau, som folk normalt vil blive udsat for i et rum, bekræftes af data fra Brunskog og Jacobsen [55], som simulerede 100 forskellige frekvens/rum-kombinationer, hver med to forskellige efterklangstider. De fandt, at 3-D-hjørne metoden rammer ret centralt et mål defineret som det maksimale niveau i rummet, eksklusive positioner tættere på væggene end 1 m (gennemsnitlig fejl under 1 dB, standardafvigelse af fejlen 3-4 dB afhængig af efterklangstid).

Lydisolationen blev målt for 1/3-oktavniveauerne i frekvensområdet 8-200 Hz, og den blev beregnet som forskellen mellem udendørs fritfelt-lydtrykniveau og indendørs lydtrykniveau.

Der blev lavet ekstra indendørs målinger i et forsøg på at benytte en målemetode givet i de danske retningslinjer for lavfrekvent støj [20]. Metoden kræver to målinger i områder af rummet, hvor personer vil blive udsat for lyd under normal brug af rummet (med visse geometriske begrænsninger), og én måling i nærheden af et hjørne af rummet (0,5-1,0 m fra vægge, 1,0-1,5 m over gulvet). Målinger blev lavet i positioner, som stemmer overens hermed. Imidlertid er metoden beregnet til brug i tilfælde af støjklager, og det er meningen, at de to ikke-hjørne positioner skal være positioner, hvor klageren opfatter støjen som værende kraftigst. Uden en klager og uden den generende støj var det ikke muligt at opfylde dette. Selvom de geometriske betingelser i målemetoden var opfyldt, var målingerne således ikke i overensstemmelse med metoden som helhed, og resultaterne er ikke rapporteret. Det må konkluderes, at metoden er uegnet til måling af lydisolation, medmindre proceduren tilføjes en form for søgning efter maksimalniveauer.

2.5 Indendørs lydtrykniveau ved naboer

Indendørs lydtrykniveauer blev fundet ved at trække lydisolationen fra det udendørs fritfelt-lydtrykniveau, begge givet i 1/3-oktavniveauer.

2.6 Statistiske metoder

Forskelle er testet med Student's t-tests, og den højeste p-værdi, der regnes som signifikant og rapporteres, er 0,05. I to-sample tests, er der ikke forudsat samme varians for de to samples, og der anvendes derfor Welch's tilpasning af t-testen og Welch-Satterthwaite frihedsgrader (degrees of freedom, d.f.). Ensidede tests anvendes, når hypotesen omfatter en bestemt retning af den mulige forskel, mens to-sidede tests bruges de øvrige steder. Eksempelvis indebærer hypotesen om, at frekvensspektret bevæger sig nedad i frekvens for øget møllestørrelse, at de relative niveauer for store møller vil være højere ved lave frekvenser og lavere ved høje frekvenser. Der anvendes derfor ensidede tests ved lave og høje frekvenser, mens der anvendes to-sidede tests i det mellemliggende frekvensområde, valgt som 315-1600 Hz.

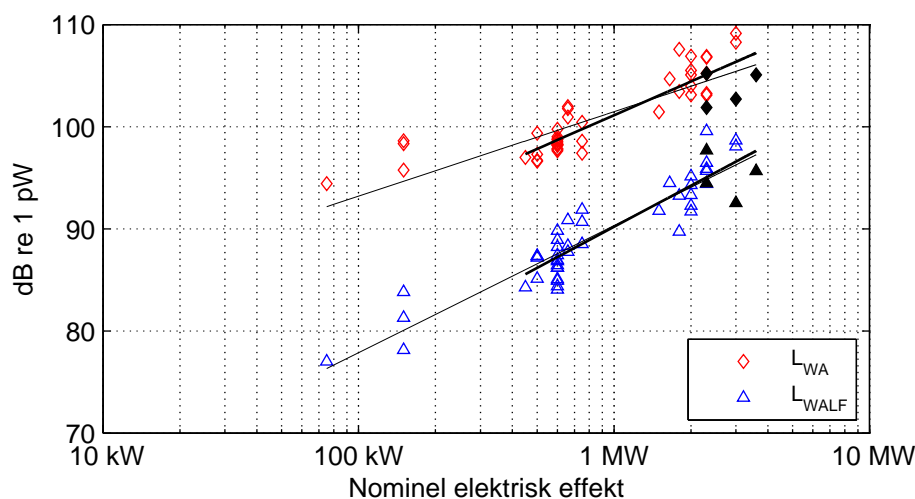
3 RESULTATER OG DISKUSSIONER

Tre vindmøller, en på 1650 kW og to på 2,3 MW, blev føjet til materialet på et sent tidspunkt, og der er ikke data for 1/3-oktavniveauer tilgængelige for disse, så kun resultater for L_{WA} og L_{WALF} rapporteres. Der var uheldigvis benyttet 20 Hz højpasfiltre under nogle af målingerne (retningerne reference, venstre og højre for Mølle 1, referenceretning for Mølle 3), så inden databehandlingen blev virkningen af disse filtre kompenseret ved at trække filterkarakteristikken fra de målte niveauer i det berørte frekvensområde. Højfrekvent elektrisk støj fra frekvensomformererne påvirkede nogle af målingerne ved frekvenser over 5 kHz, og data for Møllerne 1-4 er således ikke rapporteret ved disse frekvenser. Der er enkelte uoverensstemmelser mellem de data, som Delta har angivet i de forskellige rapporter, tabeller og figurer. Resultaterne i denne rapport er baseret på de mindst behandlede data, hvilket med få undtagelser vil sige de absolutte lydeffektniveauer i 1/3-oktavniveauer.

3.1 Udsendt lydeffekt

3.1.1 L_{WA} og L_{WALF}

Figur 1 viser L_{WA} og L_{WALF} for alle møllerne som funktion af møllestørrelse. Den vandrette akse er logaritmisk for at passe til den lodrette decibel-akse, som i sig selv er logaritmisk. Simple potenssammenhænge mellem udsendt akustisk effekt og nominal elektrisk effekt vil således svare til rette linjer, og regressionslinjer er inkluderet i figuren.



Figur 1. Lydeffektniveauer (L_{WA} og L_{WALF}) som funktion af møllestørrelse for 48 møller. Referenceretning, vindhastighed 8 m/s. Regressionslinjer: Alle møller medregnet (tynde linjer), fire møller under 450 kW ikke medregnet (tykke linjer). Sorte symboler gælder Mølle 1-4.

Det ses – ikke overraskende – at både L_{WA} og L_{WALF} stiger med stigende møllestørrelse. Det bemærkes også, at L_{WALF} stiger kraftigere end L_{WA} , hvilket betyder, at den relative andel af lavfrekvent støj stiger med stigende møllestørrelse. Forskellen på regressionslinjernes hældning for alle data (tynde linjer) er statistisk

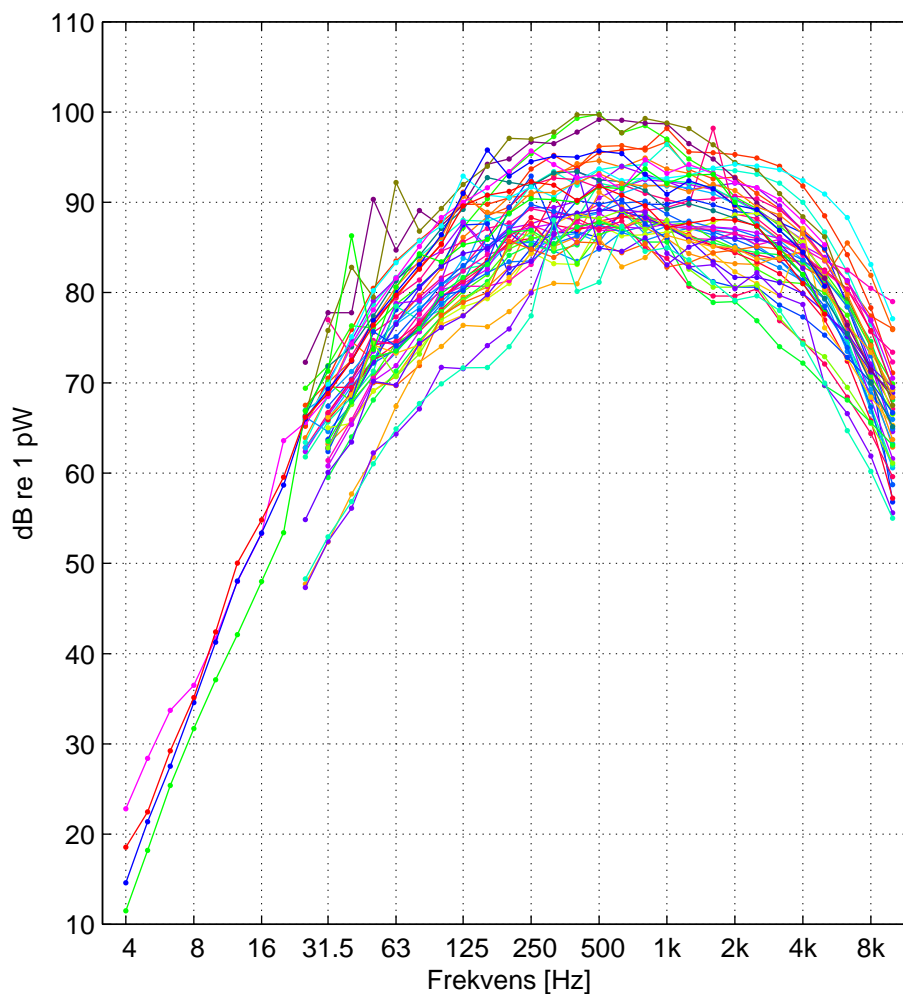
signifikant ($t=3,94$; d.f.=90,0; ensidet $p<0,001$). Da det kan hævdes, at de fire mindste møller måske ikke er repræsentative for moderne vindmøller, er der også beregnet regressionslinjer uden disse møller (tykke linjer). Hældningerne er lidt højere end med alle møller inkluderet, og forskellen er mindre, men stadig statistisk signifikant ($t=1,82$; d.f.=79,8; ensidet $p=0,036$).

Den relative andel af lavfrekvent støj kan udtrykkes som $L_{WALF} - L_{WA}$, og en lineær regression af denne størrelse har en signifikant positiv hældning med alle møller inkluderet ($t=5,42$; d.f.=46; ensidet $p<0,001$), såvel som med de fire mindste møller fjernet ($t=2,54$; d.f.=42; ensidet $p=0,007$).

Det ses også af Figur 1, at der er nogen variation mellem møller af samme størrelse. Som nævnt i afsnit 2.1 kan møller af samme størrelse være af samme eller forskellige modeller eller, for nogle få møller under 2 MW, den samme fysiske mølle målt ved flere lejligheder.

3.1.2 Lydeffektniveau i 1/3-oktavnåbånd

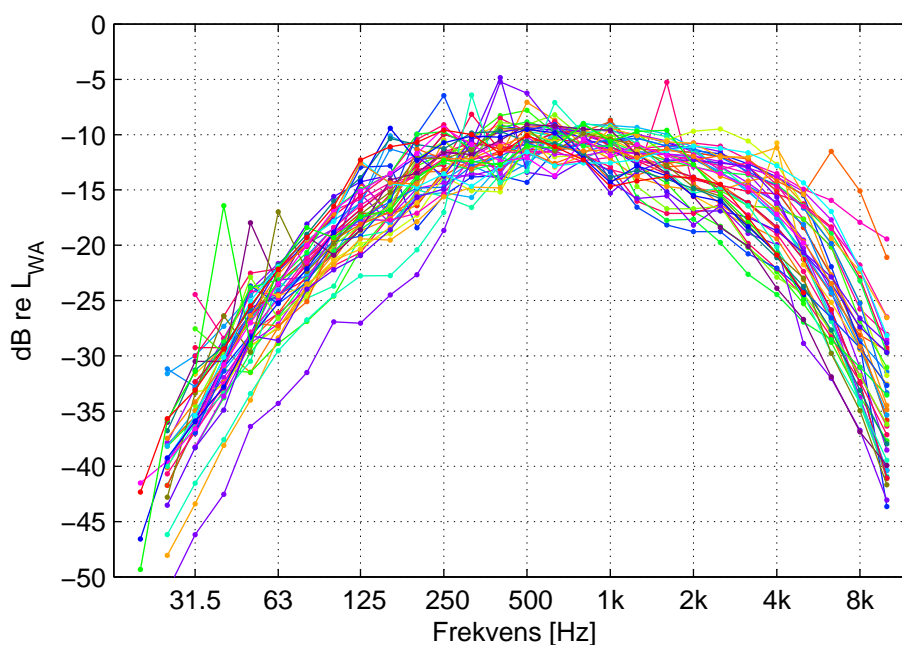
Lydeffektniveauer i 1/3-oktavnåbånd er vist i Figur 2.



Figur 2. A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavnåbånd. 45 møller med nominal elektrisk effekt mellem 75 kW og 3,6 MW.

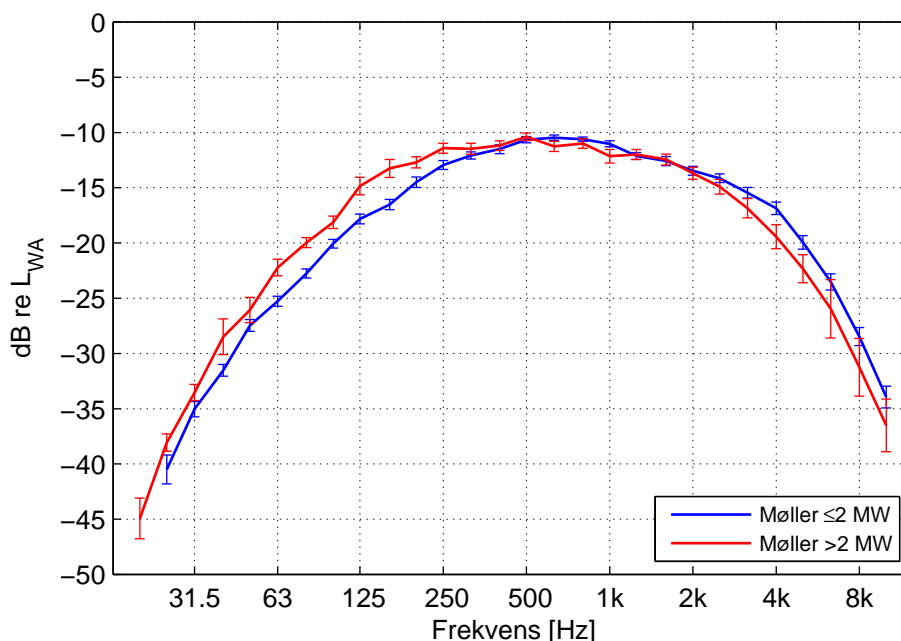
Vedrørende infralyddelen af spektret, er det G-vægtede [15] lydeffektniveau, beregnet ud fra niveauerne i 1/3-oktavbåndene op til 20 Hz, 122-128 dB for de fire møller, hvor der er data for disse frekvenser. Selv tæt på møllen, f.eks. i en afstand af 150 m fra rotorens centrum, vil dette kun give G-vægtede lydtrykniveauer på 69-75 dB, hvilket er langt under den normale høretærskel [3]). Denne beregning tager ikke højde for eventuelle nærfeltsfænomener, f.eks. fra en vinge, der passerer tæt på.

Ved de frekvenser, hvor der er data for alle møller, varierer niveauet mellem møllerne med 20 dB eller mere. Dette er forventeligt, da møllerne omfatter et stort område af nominal elektrisk effekt. For tydeligere at vise mulige spektrale forskelle mellem møllerne er niveauerne i 1/3-oktavbånd normeret til den enkelte mølles samlede A-vægtede lydeffektniveau L_{WA} . Resultatet er vist i Figur 3.



Figur 3. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd. 45 møller med nominal elektrisk effekt mellem 75 kW og 3,6 MW. (Normeret svarer til, at L_{WA} for den individuelle mølle er trukket fra alle niveauerne i 1/3-oktavbånd).

En eventuel forskel i spektret mellem små og store møller er undersøgt ved at opdele møllerne i to grupper: Møller op til og med 2 MW, og møller over 2 MW. Figur 4 viser middelværdi og standardafvigelse af middelværdi (standard error of mean, s.e.m.) for hver af de to grupper.

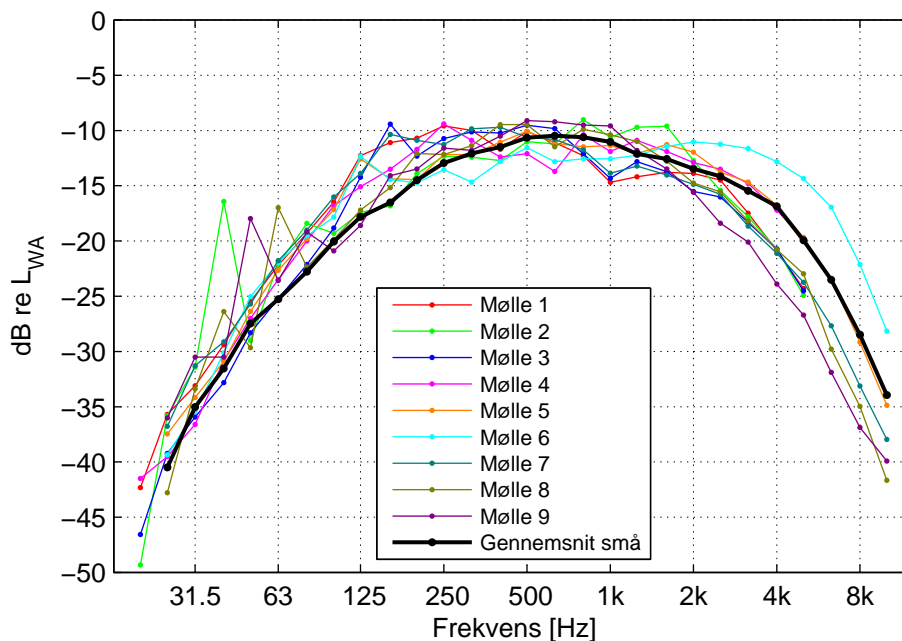


Figur 4. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavnå. Middelværdier for to grupper af møller: ≤ 2 MW og > 2 MW. Lodrette streger angiver ± 1 standard error of mean (s.e.m.).

Spektret ligger tydeligt lavere i frekvens for de store møller end for de mindre møller. Forskellen i niveau er signifikant for alle 1/3-oktavnå i frekvensområdet 63-250 Hz og ved 4 kHz ($t=[3,49; 4,52; 2,81; 3,27; 3,49; 2,63; 2,52; -2,10]$, d.f.=[14,3; 23,1; 17,0; 13,5; 13,6; 23,8; 22,6; 12,5], ensidet $p=[0,002; <0,001; 0,006; 0,003; 0,002; 0,007; 0,010; 0,028]$). (Hvis de fire mindste møller ikke medregnes, er forskellen signifikant ved de samme frekvenser plus 5 kHz ($t=[2,94; 4,09; 2,22; 2,76; 2,97; 1,93; 1,83; -2,07; -1,93]$, d.f.=[11,7; 18,0; 14,5; 11,1; 11,6; 18,7; 20,1; 12,9; 11,7], ensidet $p=[0,006; <0,001; 0,022; 0,009; 0,006; 0,035; 0,041; 0,030; 0,039]$).

De signifikante forskelle mellem små og store møller er moderate, 1,5-3,2 dB, men som nævnt i introduktionen (afsnit 1.1), kan selv små forskelle påvirke menneskers opfattelse af lyd ved lave frekvenser. Hertil kommer, at hvis lave frekvenser er afgørende for kravene til afstand til naboer, kan små forskelle have stor indflydelse på den nødvendige afstand.

Figur 5 viser middelværdien af de små møller op til og med 2 MW og de enkelte møller på over 2 MW.



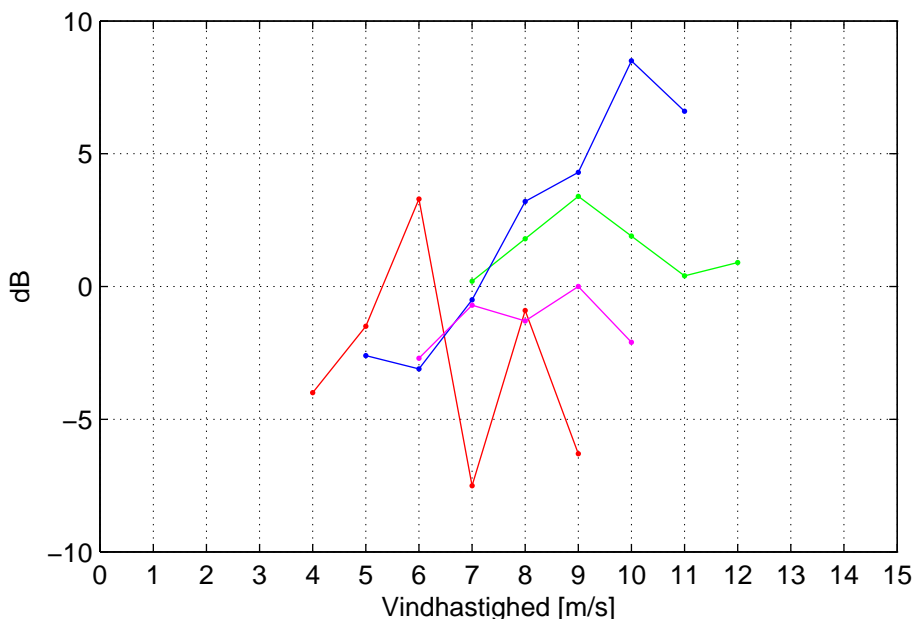
Figur 5. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3-oktavbånd. Middelværdi af 36 møller ≤ 2 MW (tyk sort linje) og 9 individuelle møller > 2 MW.

De store møller ligger over middelværdien af de små møller i næsten hvert eneste 1/3-oktavbånd under 315 Hz. Nogle af møllerne har en top i et eller flere 1/3-oktavbånd, hvilket kan skyldes tonale komponenter. Toner kan stamme fra møllens mekaniske dele, f.eks. gearkassen eller hjælpeudstyr såsom generatorens kølesystem (se f.eks. Wagner et al. [56]).

Ved høje frekvenser forstyrres billedet af et atypisk mønster over 2 kHz for Mølle 6. Der er ikke andre data fra denne mølle, for eksempel for en anden vindhastighed eller en anden retning, som kan bruges til at kontrollere, om dette virkelig er støj fra møllen og ikke elektrisk støj som ved nogle af de andre møller (se indledende bemærkninger til Afsnit 3). Hvis Mølle 6 udelades ved disse frekvenser, ligger de store møller på eller under middelværdien af de små møller i næsten hvert 1/3-oktavbånd over 2 kHz. Forskellen mellem middelværdien af de to grupper er i dette tilfælde signifikant for alle 1/3-oktavbåndene i frekvensområdet 2,5-10 kHz ($t=[-1,83; -2,49; -3,47; -3,18; -2,42; -2,76; -2,64]$, d.f.=[15,2; 15,6; 14,5; 14,8; 4,1; 4,6; 6,3], ensidet $p=[0,044; 0,012; 0,002; 0,003; 0,036; 0,022; 0,018]$).

3.1.3 Toneindhold

Toneanalyserne viser, at tonerne generelt varierer i niveau og frekvens med vindhastigheden. Figur 6 viser tonal hørbarhed for de mest fremtrædende toner for Mølle 1-4.



Figur 6. Tonal hørbarhed, ΔL_{ta} , som funktion af vindhastighed for Mølle 1-4, referenceretning. Farvekode for møller som i Figur 5.

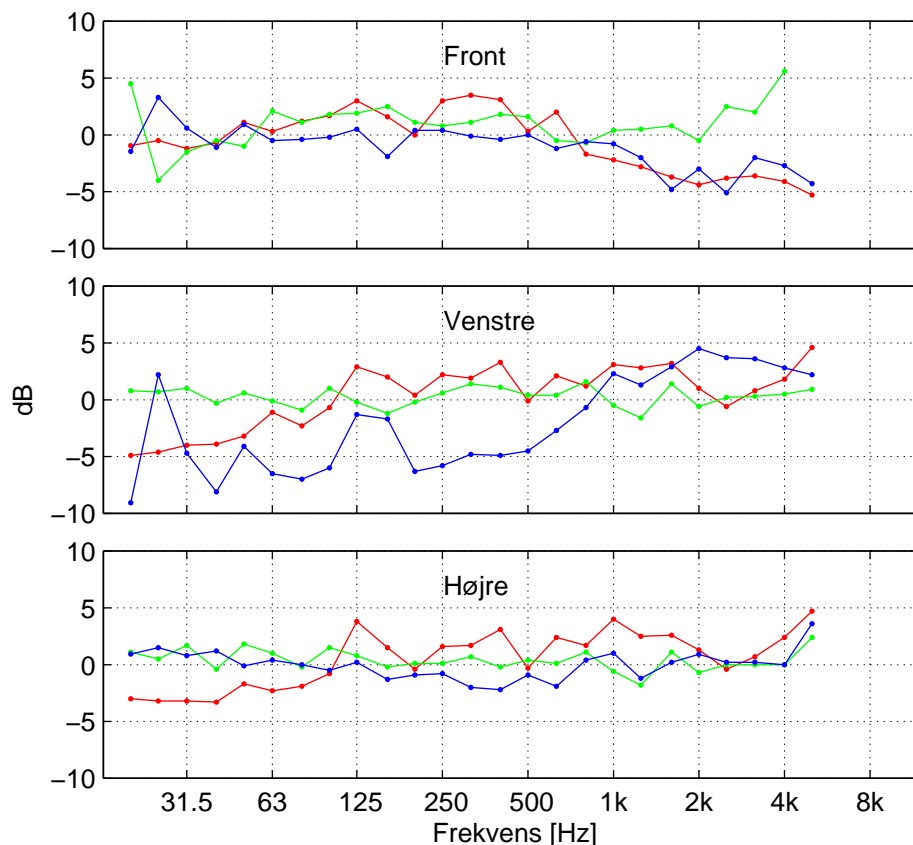
Værdierne er under 3-4 dB med undtagelse af Mølle 3 ved høje vindhastigheder. For Mølle 1 og 3 gælder værdierne en tone, som varierer med vindhastigheden i området 110-145 Hz, omtrent samme frekvensområde for begge møller. For Mølle 2 gælder værdierne en tone med næsten konstant frekvens omkring 40 Hz. Mølle 4 har flere toner ved højere frekvenser, og forskellige frekvenser i området 800-1400 Hz dominerer på skift afhængigt af vindhastigheden. Der kan identificeres toppe i de tilsvarende 1/3-oktavnåbånd i Figur 5 for de to møller med tonalitet over 0 dB ved 8 m/s (Mølle 2, 40 Hz; Mølle 3, 160 Hz).

ISO 1996-2 [57] specificerer et tonetillæg, som skal benyttes, når den tonale hørbarhed overstiger 4 dB. Nationale grænser for tonetillæg kan variere, f.eks. kræver de danske regler, at den tonale hørbarhed overstiger 6,5 dB, før der gives tillæg [58].

Kun én af møllerne overstiger 4 dB grænsen og kun ved høje vindhastigheder, hvor der ofte ikke findes regler for vindmøllestøj. Det er ganske overraskende, at selv ikke den tydeligste tone i spektrene for 1/3-oktavnåbånd, 40 Hz tonen for Mølle 2, giver et tonetillæg. Det er sandsynligvis et resultat af, at de kritiske bånd, som benyttes ved tonevurderingen, er meget brede ved lave frekvenser. Det er uden for rammerne af denne rapport at vurdere, om tonerne vil blive opfattet som tydeligt tonale, på trods af det manglende tonetillæg.

3.1.4 Direktivitet

Figur 7 viser direktiviteten for de tre møller, den er målt for.



Figur 7. Direktivitet for Mølle 1-3. Vindhastighed 8 m/s undtagen for Mølle 2, frontretning, som blev målt ved 10 m/s (og sammenlignet med referenceretningen ved 10 m/s). På grund af elektrisk støj i målingen mangler data for Mølle 2, frontretningen ved 5 kHz. Farvekode for møller som i Figur 5.

Data varierer noget mellem møllerne, og det er svært at finde et generelt mønster. Der ses både højere og lavere niveauer i andre retninger end referenceretningen. Ved de laveste frekvenser ville man forvente en lav direktivitet, men dette ses ikke. En målt retningsvirkning kan afspejle en sand retningsvirkning, men hvis den vigtigste støjkilde er til den ene side i rotorplanet, f.eks. på en nedadgående vinge som vist af Oerlemans og Schepers [59] og Oerlemans et al. [60], er målingerne i denne side tættere på kilden, hvilket kan give en falsk indikation af en retningsvirkning.

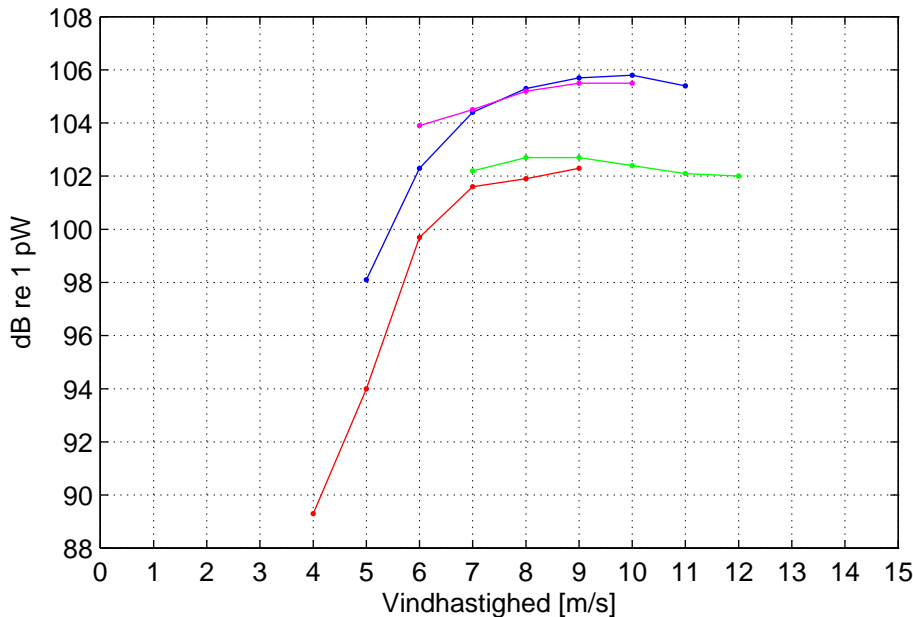
En mulig fejlkilde for direktiviten er, at målingerne for de forskellige retninger ikke i alle tilfælde er lavet i den samme periode. Hver af de andre retninger blev ganske vist målt samtidigt med referenceretningen, men de blev ikke alle sammen målt samtidigt. Der findes kun ét sæt data for referenceretningen, og dette kan således ikke gælde for alle retninger. Ved lave frekvenser kan dårligt signal/støj-forhold være årsag til stor usikkerhed.

Retningen fra møllen til naboer er typisk mere vandret end retningen til målepositionerne. Især hvis der udsendes lyd ved synkron vibrationer i vinger og/eller tårn, er det sandsynligt, at udstrålingen vil være kraftigere vinkelret på

rotorplanet og/eller tårnet, dvs. tæt på det vandrette plan. Der er brug for mere viden om dette.

3.1.5 Betydning af vindhastigheden

Figur 8 viser L_{WA} som funktion af vindhastigheden for de fire møller, der er data for.



Figur 8. A-vægtet lydeffektniveau, L_{WA} , som funktion af vindhastigheden for Mølle 1-4. Farvekode for møller som i Figur 5.

Støjen stiger med vindhastigheden, men kurven flader dog ud over 7-8 m/s. De fire møller er alle pitch-regulerede, og udfladningen stemmer overens med observationerne fra f.eks. Lee et al. [37] og Jung et al. [38] vedrørende pitch-regulerede møller.

3.2 Udendørs lydtrykniveau ved naboer

For hver af de store møller er beregnet den afstand, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er faldet til 35 dB. Pedersen og Waye [61] har vist, at andelen af stærkt generede personer når op over 5 % omkring ved dette lydtrykniveau, og andelen af generede når over 10 % (Pedersen et al. [62]). Pedersen og Nielsen [63] har anbefalet en minimumsafstand fra vindmøller til naboer, så møllestøjen er under 33-38 dB. En grænse på 35 dB bruges ved vindmøller, f.eks. i Sverige for stille områder [64]. Det er også den grænse, der gælder i Danmark i områder med åben og lav boligbebyggelse (nat) og i rekreative områder (aften, nat og weekend) for støj fra virksomheder [65] (men ikke for vindmøllestøj [50]). 35 dB synes derfor at være en ganske fornuftig grænse for vindmøllestøj.

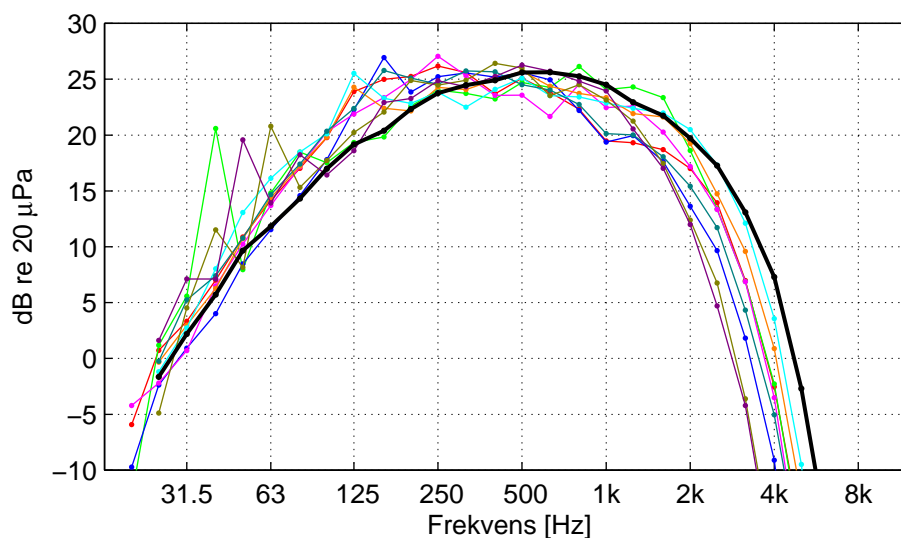
Tabel 1 viser afstanden til de enkelte møller samt forskellige nøgletal ved 35 dB grænsen.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	629	647	879	822	679	758	713	1227	1144	453
L_{DA} [dB]	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
L_{DALF} [dB]	28,8	26,7	28,9	27,6	28,0	29,1	28,8	27,0	27,0	24,8
$L_{DALF}-L_{DA}$ [dB]	-6,2	-8,3	-6,1	-7,4	-7,0	-5,9	-6,2	-8,0	-8,0	-10,2
L_{DG} [dB]	59,1	54,5	55,0	58,0						

Tabel 1. Nøgletal ved den afstand fra en enkelt mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB. Afstanden er anført som skrå afstand til rotorcentrum, hvilket for de aktuelle møllehøjder er tæt på den vandrette afstand.

Den mindste afstand, hvor en 35 dB grænse er overholdt, varierer betydeligt mellem de store møller, selvom møllerne er forholdsvis ens i størrelse (2,3-3,6 MW). Afstanden varierer fra lidt over 600 m til mere end 1200 m.

Spektrene for 1/3-oktavnåbånd ved disse afstande er vist i Figur 9.



Figur 9. A-vægtet lydtrykniveau i 1/3-oktavnåbånd ved den afstand fra en enkelt mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB (se Tabel 1). Farvekode for møller som i Figur 5.

På disse afstande, begynder luftens absorption at få betydning. Den påvirker især de høje frekvenser, og resultatet er, at flytningen af spektret i retning mod lavere frekvenser bliver mere udtalt end for lydeffektniveauet (sammenlign med Figur 5).

Det er vigtigt at bemærke, at for flere af møllerne findes det højeste niveau for 1/3-oktavnåbånd ved 250 Hz eller lavere, selv når der ses på de A-vægtede niveauer (Figur 9). Det er således hævet over enhver tvivl, at den lavfrekvente del af spektret spiller en vigtig rolle for støjen ved naboerne, og at lavfrekvent lyd skal tages alvorligt i vurderingen af støj fra store vindmøller.

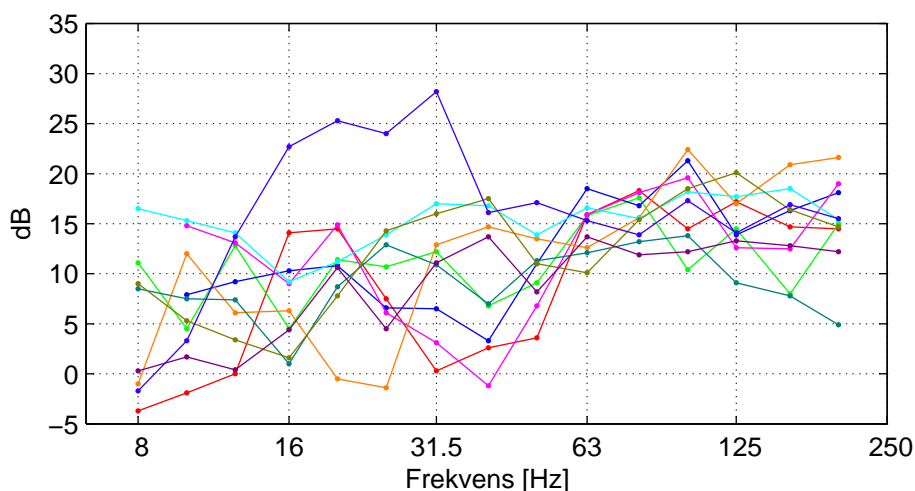
I mange tilfælde tillades højere udendørs A-vægtede niveauer end 35 dB. Som et eksempel tillader de danske regler 44 dB for huse uden for boligområder eller rekreative områder [50]. Af visuelle hensyn tillader de danske regler ikke boliger tættere på møller end fire gange den samlede møllehøjde, og på denne afstand er lydtrykniveauet ofte under 44 dB, hvis der er tale om en enkelt mølle. Der kan dog sagtens forekomme niveauer på 44 dB længere væk end fire gange møllehøjden, når der er flere møller sammen i vindmølleparker. Tabel 2 viser afstanden til små vindmølleparker, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er 44 dB, såvel som forskellige nøgletal for denne afstand.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	530	546	831	759	585	679	631	1241	1142	393
L_{pA} [dB]	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0	44,0
L_{pALF} [dB]	37,9	35,9	38,1	36,8	37,2	38,3	38,0	36,3	36,3	33,9
$L_{pALF}-L_{pA}$ [dB]	-6,1	-8,1	-5,9	-7,2	-6,8	-5,7	-6,0	-7,7	-7,7	-10,1
L_{pG} [dB]	68,4	63,9	64,6	67,4						

Tabel 2. Nøgletal ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 44 dB. Mølleparker med to rækker på hver 6 identiske møller, 300 m afstand mellem møller i begge retninger (200 m for små møller). Observationspunkt centreret ud for den lange side. Afstand angivet som skrå afstand til nærmeste mølle.

3.3 Lydisolation

Under målingerne var der alvorlige problemer med baggrundsstøj ved de tre laveste frekvenser. 18 målinger med et signal/støj-forhold på under 1,3 dB blev kasseret. Syv rum/frekvens-kombinationer måtte derfor beregnes ud fra målinger i kun to eller tre 3D-hjørner. To rum/frekvens-kombinationer, hvor der kun var målinger fra et enkelt 3D-hjørne blev ikke beregnet. Figur 10 viser lydisolationen for de ti rum.



Figur 10. Lydisolation målt for 10 rum.

Ved frekvenserne 63-200 Hz, har rummene med få undtagelser en lydisolations på 10-20 dB. Mod lavere frekvenser falder isolationen, og forskellen mellem rummene bliver større. Nogle rum viser en meget lille eller endog negativ isolation ved visse frekvenser. Et enkelt rum har usædvanlig høj isolation i området 16-31,5 Hz. Dette var et lille værelse, der anvendes til opbevaring af møbler og andet. Rummet kan således ikke betragtes som et typisk opholdsrum, og dets data benyttes ikke i de videre beregninger.

Vær opmærksom på, at for hvert 1/3-oktavbånd refererer det indendørs niveau til det maksimale niveau, som man normalt vil blive udsat for i rummet (afsnit 2.4). Isolationsstallene er derfor, især for den øverste del af frekvensområdet, lavere end traditionelle isolationstal beregnet til tekniske formål, hvor man typisk anvender det gennemsnitlige niveau i rummet.

3.3.1 Mangler ved lydisolationsmålemetoden

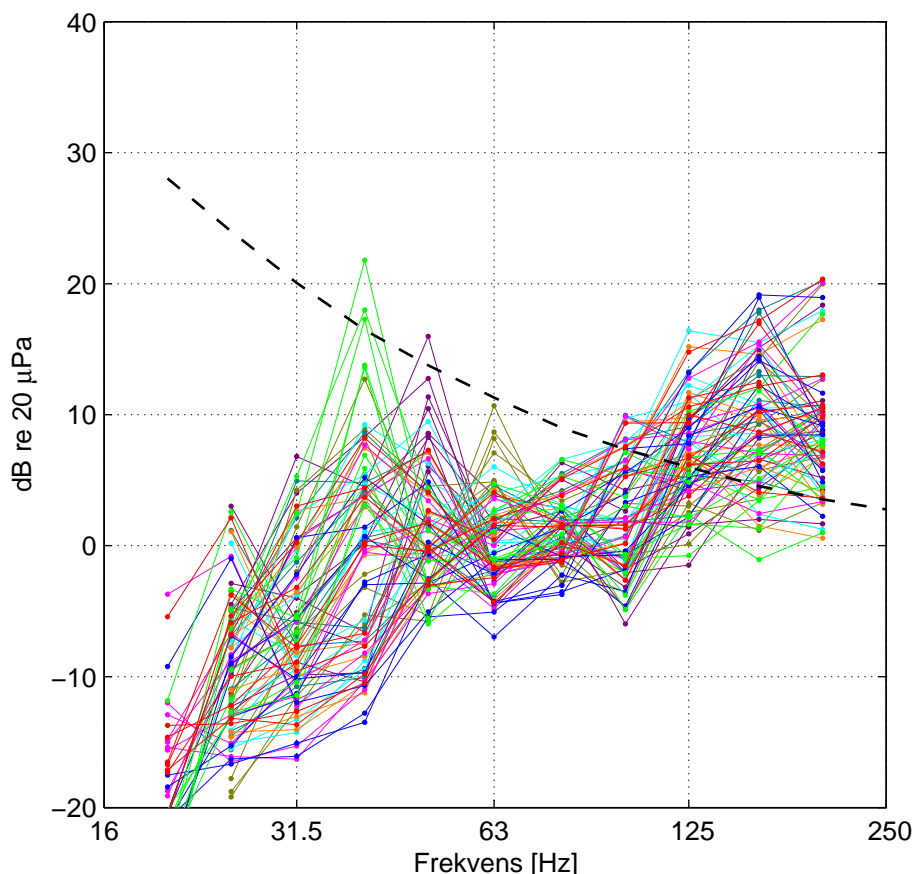
En mangel ved den anvendte metode er, at eksponeringen er fokuseret på facaden af huset. I en situation, hvor huset udsættes for støj fra vindmøller, bliver hele huset inklusive tag, og ved lave frekvenser også bagsiden af huset, udsat for næsten den samme lyd. I målesituationen var der mindre lyd på disse flader på grund af højttalerens retningsvirkning, højere afstand til højttaleren, skyggevirksomhed osv.

Et yderligere problem er, at det udendørs fritfelt-lydtrykniveau beregnes ved blot at trække 6 dB fra det målte niveau på facaden. Dette forudsætter, at facaden er stor nok til at være totalt reflekterende overfor alle frekvenser, en antagelse, som næppe holder ved de laveste frekvenser. En bedre løsning kunne have været at måle fritfelt-lydtrykniveauet fra højttaleren på et sted uden reflekterende flader (bortset fra jorden), og bruge denne værdi i beregningen.

Problemerne med baggrundsstøj kunne formentlig have været løst ved hjælp af moderne teknik, der udnytter sammenhængen mellem de udendørs og indendørs signaler, f.eks. maximum-length-sequence (MLS) teknik. Alternativt kunne det have været muligt at hæve signalniveauet ved at måle ét 1/3-oktavbånd ad gangen, fremfor hele frekvensområdet samtidigt.

3.4 Indendørs lydtrykniveau ved naboer

Figur 11 viser indendørs lydtrykniveauer for 1/3-oktavbånd for alle 81 kombinationer af 9 møller og 9 rum i afstanden med et samlet A-vægtet udendørs lydtrykniveau på 35 dB. Vær opmærksom på, at de indendørs niveauer estimerer det maksimale niveau, som man normalt vil blive udsat for i rummet og ikke det gennemsnitlige niveau i rummet (se afsnit 2.4).

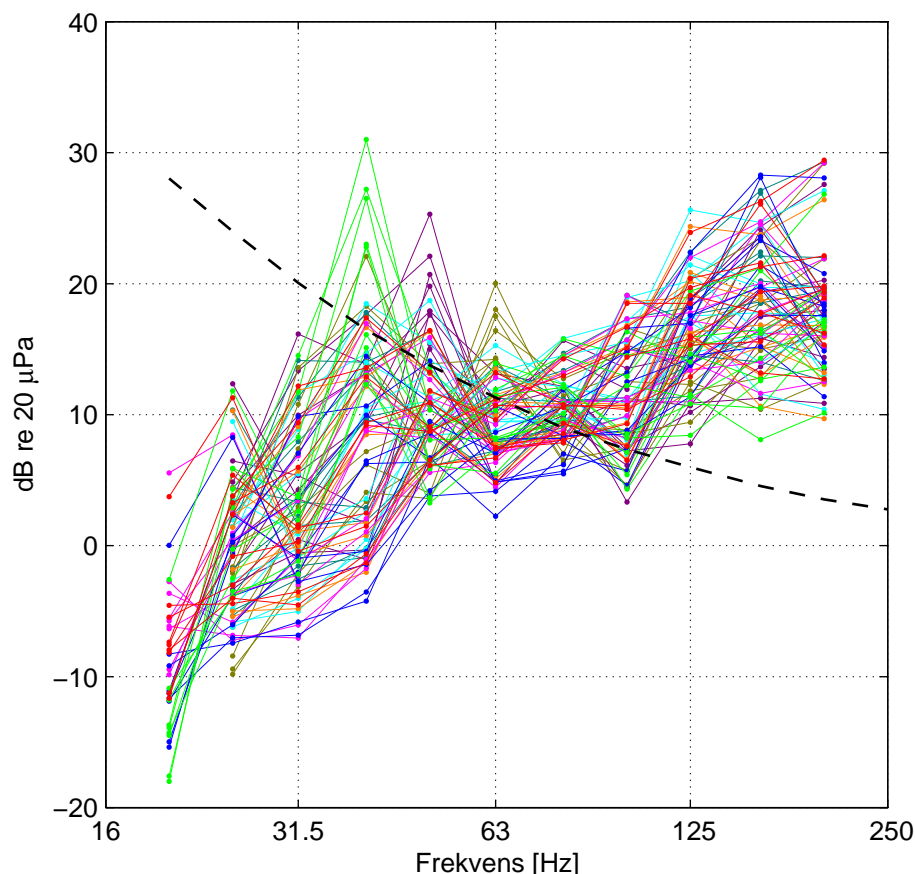


Figur 11. Indendørs A-vægtede lydtrykniveauer for 1/3-oktavbånd i den afstand fra en mølle, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau udendørs er 35 dB (se Tabel 1). 81 mølle/rum kombinationer. Den stiplede linje er høretærsklen i henhold til ISO 389-7 [29]. Farverne angiver møllen, farvekode som i Figur 5.

Der ses store forskelle mellem mølle/rum kombinationerne. Det meste af variationen skyldes forskelle i rummenes lydisolations, undtagen ved 63 og 80 Hz, hvor både rum og mølle bidrager nogenlunde lige meget til variationen. Værdier ved 40 Hz i den øvre ende af intervallet skyldes det høje lydeffektniveau for en enkelt mølle, mens høje værdier ved 200 Hz skyldes lav lydisolations af et enkelt rum.

Det ses af den indsatte høretærskel (stiplet linje), at den lavfrekvente lyd kan høres i mange mølle/rum-kombinationer, især ved de højeste af de lave frekvenser. Lyden vil ikke være ret kraftig, men som nævnt i indledningen, kan lavfrekvent lyd være generende, selvom den ikke er ret langt over høretærsklen (afsnit 1.1), og nogle personer kan være generet af lydene i Figur 11.

Figur 12 viser indendørsniveauer for situationen fra Tabel 2, hvor det udendørs A-vægtede lydtrykniveau fra en møllepark er 44 dB.



Figur 12. Indendørs A-vægtede lydtrykniveauer for 1/3-oktavnåbånd i den afstand fra en møllepark, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau udendørs er 44 dB (se Tabel 2). 81 mølle/rum kombinationer. Stiplet linje er høretærsklen i henhold til ISO 389-7 [29]. Farverne angiver møllen, farvekode som i Figur 5.

Her vil der være hrbar lyd nogle steder i alle rum og for alle møller. I mere end halvdelen af tilfældene (48 ud af 81), overskrides den normale høretærskel med mere end 15 dB i et eller flere 1/3-oktavnåbånd, og der er risiko for, at en betydelig del af beboerne vil være generet af lyden.

Med henblik på at undgå søvnforstyrrelser anbefaler WHO for kontinuert støj en indendørs grænse på 30 dB for det A-vægtede lydtrykniveau [66], men bemærker også, at hvis støjen indeholder en stor andel af lavfrekvent støj, ”anbefales en endnu lavere grænse, fordi lavfrekvent støj kan forstyrre hvile og søvn selv ved lave lydtryk”. Hvor meget lavere er ikke angivet, men medmindre niveauet over 200 Hz er usædvanlig lavt, vil det samlede A-vægtede lydtrykniveau tydeligvis overstige f.eks. 25 dB i mange af tilfældene i Figur 12.

3.4.1 Den danske indendrsgrnse

Den danske indendørs aften/nat grænse for L_{pALF} i boliger på 20 dB [20] gælder ikke for målinger i enkelte positioner, men for niveauet målt med den metode, som er nævnt i afsnit 2.4. Metoden benytter energimiddelværdien af målinger i tre positioner: n position i nærheden af et hjørne af rummet og to positioner, hvor klageren opfatter støjen som værende kraftigst. Antages det, at klageren udpeger

sådanne positioner korrekt, vil resultatet af hele metoden – energimiddelværdien med en hjørnemåling – stadig være et niveau tæt på det maksimale.

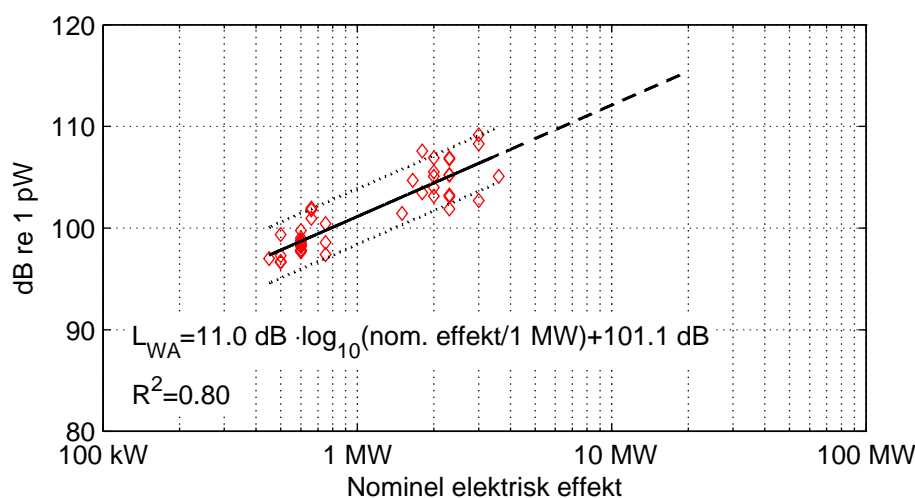
Det er ikke muligt umiddelbart at finde den maksimale værdi af L_{pALF} blot ved at lægge niveauerne for 1/3-oktavbånd sammen fra Figur 11 eller Figur 12, da de forskellige 1/3-oktavbånd kan have deres maksimum i forskellige områder af rummet. Men 40 af de 81 mølle/rum kombinationer i Figur 12 overstiger et A-vægtet niveau på 20 dB for mindst ét 1/3-oktavbånd i 10-160 Hz området, og det er rimeligt at regne med, at det samlede lydtrykniveau for dette frekvensområde, L_{pALF} , vil overstige 20 dB for endnu flere mølle/rum kombinationer.

Det bør nævnes, at vindmøller har været undtaget fra de generelle danske retningslinjer for lavfrekvent støj [20] siden 2006, da bekendtgørelsen om støj fra vindmøller blev opdateret [50]. Argumentet var, at det indendørs L_{pALF} ikke vil overstige 20 dB, hvis de normale udendørs grænseværdier overholdes [67]. Det gælder muligvis for mindre møller, men som det ses, kommer det indendørs niveau ofte over 20 dB for store møller over 2 MW.

4 GENERELLE DISKUSSIONER

4.1 Støj som funktion af møllestørrelse

Datamaterialet giver et nyttigt overblik over, hvilken lydeffekt der udsendes fra vindmøller af forskellig størrelse, og med forsigtighed kan resultaterne benyttes til at anslå lydeffektniveauet for fremtidens større møller. Figur 13 gentager data for L_{WA} fra Figur 1, nu med en ekstrapolering mod højere nominel elektrisk effekt samt data for den indsatte regressionslinje.



Figur 13. Lydeffektniveau (L_{WA}) som funktion af møllestørrelse. Vindhastighed 8 m/s, fire møller under 450 kW ikke medtaget. Lineær regressionslinje, standard error of estimates (s.e.e.)=1,64 dB. Ekstrapolation (stiplet linje), 90 % konfidensintervaller baseret på s.e.e. (prikket linje).

Regressionslinjen i Figur 13 svarer til følgende sammenhæng mellem lydeffekten P_A og den nominelle elektriske effekt, P_E :

$$P_A = \text{konstant}_1 \cdot \left(\frac{P_E}{1 \text{ MW}} \right)^{\text{hældning}} 10 \text{ dB} \quad (2)$$

hvor *hældning* er hældningen af regressionslinjen, og *konstant*₁ kan beregnes fra det sidste led i ligningen for regressionslinjen. Da hældningen er 11,0 dB, er eksponenten 1,10, hvilket betyder, at lydeffekten stiger mere end proportionalt med den nominelle elektriske effekt. I den udstrækning, møllerne følger udviklingen fra regressionslinjen, udsender en vindmølle af dobbelt størrelse altså mere end den dobbelte lydeffekt.

Arealet A af en cirkel, inden for hvilken en given støjgrænse er overskredet, er særlig interessant. Radius af cirklen kan findes ved at løse ligning (1) med hensyn til d , og hvis den atmosfæriske absorption, som hovedsageligt har betydning ved høje

frekvenser og på lang afstand, udelades, finder man, at arealet er proportionalt med lydeffekten. Efter indsættelse af ligning (2) følger, at

$$A = \textit{konstant}_2 \cdot P_A = \textit{konstant}_2 \cdot \textit{konstant}_1 \cdot \left(\frac{P_E}{1 \text{ MW}} \right)^{\frac{\textit{hældning}}{10 \text{ dB}}} \quad (3)$$

hvor $\textit{konstant}_2$ afhænger af støjgrænsen.

Med regressionslinjens hældning stiger det støjramte areal altså mere end proportionalt med den nominelle elektriske effekt. Dette er et bemærkelsesværdigt resultat, når man tænker på den aktuelle udvikling med konstant stigende møllestørrelser og endda, i hvert fald i Danmark, strategien med at erstatte mange små møller med få større. Fra et støjforurenings-synspunkt forekommer dette som et skridt tilbage. Hvis den installerede nominelle elektriske effekt er den samme, vil store vindmøller ramme et større areal med støj, end små møller vil.

Det skal tilføjes, at hældningen af regressionslinjen ikke er signifikant højere end 10 dB (90 % konfidensinterval [9,53 dB; 12,40 dB], $p(\textit{hældning} \leq 0 \text{ dB})=0,133$). Med en hældning på 10 dB er det støjbelastede areal det samme for store og små møller for den samme installerede nominelle elektriske effekt.

4.2 Variation mellem møller

Hvert datapunkt i Figur 13 er baseret på målinger på en enkelt mølle. For at tage højde for variationer mellem forskellige eksemplarer af samme møllemodel, bør der anvendes et højere lydeffektniveau ved projektplanlægning. Ifølge IEC TS 61400-14 [68], skal fabrikanterne specificere værdier, som er 1,645 gange standardafvigelsen mellem møller højere end middelværdien af møller af den givne model. Denne værdi svarer til den øvre grænse på et 90 % konfidensinterval, hvilket betyder, at sandsynligheden er 5 %, for at en tilfældig mølle af den aktuelle model udsender mere støj end den specificerede værdi.

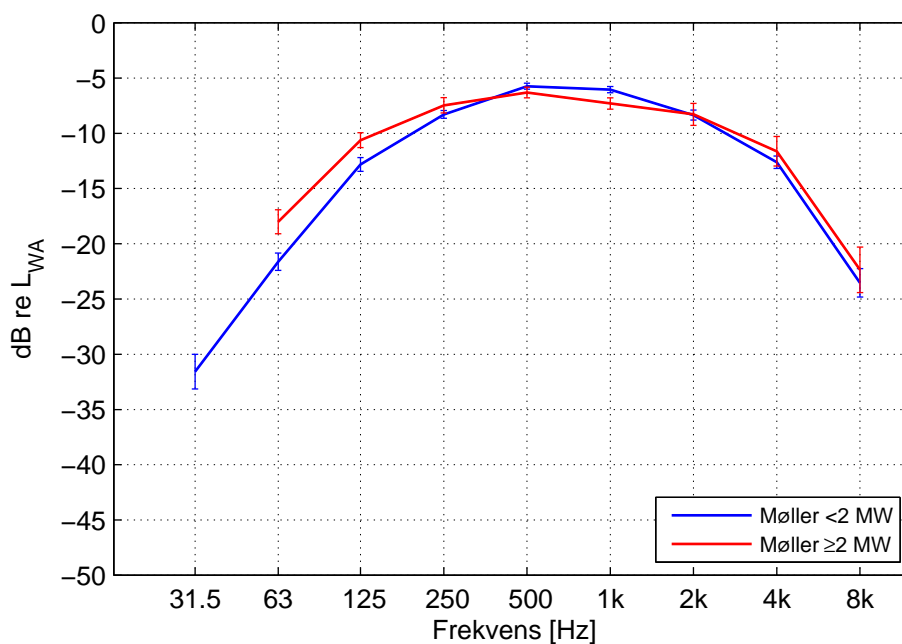
Størrelsen af denne sikkerhedsmargin afhænger således af variationen mellem møller af den aktuelle model. I Figur 13 er standardafvigelserne for møller af samme størrelse og fabrikat i området 1,6-3,5 dB, når der ses bort møllestørrelser, der omfatter gentagne målinger på en eller flere fysiske vindmøller. Da standardafvigelsen skal ganges med 1,645, bliver det typisk til en margin på adskillige decibel.

Broneske [69] påpegede, at mølleproducenterne ofte specificerer værdier, som ikke har den sikkerhedsmargin, der er angivet i IEC TS 61400-14. Forfatterne af denne rapport har også det indtryk, at minimumsafstande til boliger ofte beregnes ud fra støjdata, der mangler en passende sikkerhedsmargin. Brug af data uden sikkerhedsmargin som for eksempel middelværdier for en given møllemodel, målinger fra en enkelt mølle, eller 'bedste gæt' for fremtidens vindmøller giver i princippet en sandsynlighed på 50 %, for at den/de faktisk opførte vindmølle(r) vil udsende mere støj end antaget, og at støjgrænserne vil blive overskredet, hvis projektet er planlagt lige til grænsen.

Det skal bemærkes, at selv små ændringer i lydeffektniveau kan resultere i betydelige ændringer i afstandskravene. Som et eksempel vil 3 dB højere lydeffektniveau resultere i et 41 % højere afstandskrav, når der er tale om en enkelt mølle.

4.3 Data fra projekt WINDFARMperception

Van den Berg et al. [70] har gennemført en undersøgelse af visuelle og akustiske effekter af vindmøller for naboerne. Som en del af undersøgelsen (kendt som projekt WINDFARMperception) blev indsamlet målte spektre af støj fra vindmøller. Lydeffektniveauer målt ved 8 m/s for 28 møller på 80 kW til 3 MW og givet i oktavbånd blev udvalgt til beregning af lydtrykniveauer hos naboer. Kun fire møller er over 2 MW, men hvis tre 2 MW møller regnes med i gruppen af store møller, er det muligt at foretage en relevant sammenligning af store og små møller. Figur 14 viser middelværdierne for møller < 2 MW og \geq 2 MW.



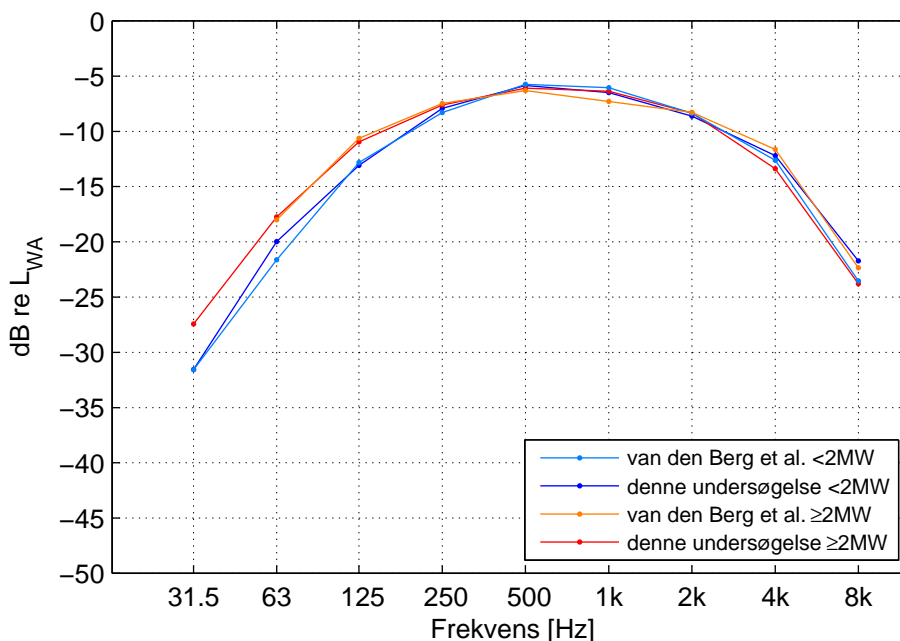
Figur 14. Normeret A-vægtet lydeffektniveau i oktavbånd, middelværdi for to grupper af møller: < 2 MW og \geq 2 MW. Data fra van den Berg et al. [70, Appendix D]. Lodrette streger viser ± 1 standard error of mean. (Ingen af de store møller er målt i 31,5-Hz oktavbåndet).

Også med disse data ligger den lavfrekvente del klart højere for store møller end for små. Niveauforskellene ved 63 og 125 Hz er statistisk signifikante ($t=[2,70; 2,39]$, d.f.=[12,8; 16,9], ensidet $p=[0,009; 0,015]$).

Forskellene (3,6 og 2,2 dB) er i samme størrelsesorden som forskellene i denne undersøgelse (sammenlign med Figur 4).

En sammenligning med data fra denne undersøgelse regnet om til oktavbånd viser desuden næsten ens værdier i de to undersøgelser, se Figur 15. Data fra de to

undersøgelser for den samme møllegruppe er ikke signifikant forskellige ved nogen frekvens. (Der er ingen overlap i de originale data).



Figur 15. Normeret A-vægtet lydeffektniveau i oktavnåb, middelværdi af to grupper af møller: < 2 MW og \geq 2 MW og fra to undersøgelser: van den Berg et al. [70, Appendix D] og denne undersøgelse.

4.4 Tonekomponenter

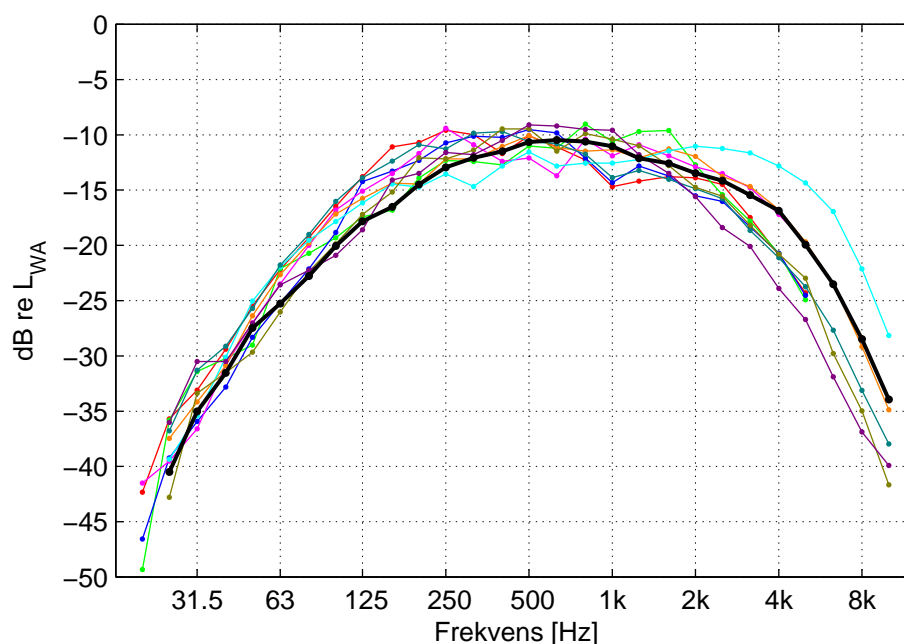
Søndergaard og Madsen [71] konkluderer 1) at ”frekvensspektrene af den aerodynamiske støj fra vindmøllevingerne afviger for de store vindmøller ikke væsentligt fra frekvensspektrene for de mindre vindmøller. Det betyder, at den lavfrekvente aerodynamiske støj ikke er mere fremtrædende for store møller end for mindre møller”, 2) at en konstaterer ”svag stigning i den relative mængde af lavfrekvent støj skyldes hovedsageligt gear toner ved frekvenser under 200 Hz”, og 3) at dette ”er ikke usædvanligt for prototyper, og almindeligvis er de færdigudviklede vindmøller forbedret med hensyn til støjmission og specielt med hensyn til hørbare toner i støjen”.

Disse konklusioner er imidlertid ikke underbygget af passende statistik eller andre analyser af data. Den anførte adskillelse af den aerodynamiske støj og gearstøjen er ikke forklaret, og der er ikke angivet nogen data. Med hensyn til udviklingen af støj fra prototyper til kommercielle vindmøller, er der ikke angivet data eller referencer. Hvis der ses på møllerne i dette projekt, er det uklart, hvorvidt Mølle 5-11 er prototyper eller ej, da møllerne er anonyme, og oplysningerne afviger mellem rapporterne. Den oprindelige rapport [44] angiver kun Mølle 1-4 som prototyper, men en sammenfattende rapport [71] henviser til alle møllerne over 2 MW som prototyper. Hvis Mølle 5-11 faktisk er prototyper, betyder det, at konklusion nummer 3) er lavet uden data for færdigudviklede store møller. Hvis Mølle 5-11 til gengæld er færdigudviklede møller, er det værd at bemærke, at også flere af disse har

tydelige toppe i 1/3-oktavbånd (Figur 5), og at deres støjdsendelse (L_{WA} og L_{WALF}) ikke er lavere end for Mølle 1-4, måske tværtimod (Figur 1).

Med hensyn til reduktion af tonestøj, refererer Søndergaard og Madsen flere gange til tonetillægget som et middel til at sikre, at tonerne faktisk bliver reduceret, inden møllerne kommer på markedet, og de bruger udtryk som ”den nødvendige reduktion af tonerne” [71] og ”...reduced to a level where there is no penalty, according to the Danish rules...” [44, 71] (”...reduceret til et niveau, hvor der ikke er noget tillæg efter de danske regler...””, forfatterens oversættelse). Søndergaard og Madsen har åbenbart set bort fra det faktum, at resultaterne af deres toneanalyser ikke udløser tonetillæg til nogen af møllerne (afsnit 3.1.3).

Et nærmere kig på data viser, at selvom nogle af toppene i 1/3-oktavbånd ved lave frekvenser er meget tydelige, er toppene ikke generelt ansvarlige for forskellen mellem små og store møller. Figur 16 viser en tænkt situation, hvor alle toppe under 200 Hz er fjernet fra de store møller ved at erstatte niveauet ved toppene med niveauer fremkommet ved lineær interpolation mellem niveauerne i de to tilstødende 1/3-oktavbånd. 1-3 toppe er fjernet for de enkelte møller, bortset fra Mølle 4, som ikke har toppe i dette frekvensområde. Det er kun fjernelsen af 40 Hz-toppen for Mølle 2, der påvirker middelværdien for de store møller med mere end 1,0 dB.



Figur 16. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer givet i 1/3-oktavbånd. Middelværdi af 36 møller ≤ 2 MW (tyk sort linje) og individuelle møller > 2 MW. Toppe i 1/3-oktavbånd under 200 Hz fjernet fra de store møller ved at erstatte niveauet ved toppen med niveauer opnået ved lineær interpolation mellem niveauerne for de to omkringliggende 1/3-oktavbånd. Farvekode for møller som i Figur 5.

Generelt ligger de store møller stadig over middelværdien af de små møller i lavfrekvensområdet. Forskellen mellem middelværdien af de store (> 2 MW) og små møller (≤ 2 MW) er fortsat signifikant i de samme 1/3-oktavnåb, som den var med toppene (63-160 Hz (uændret over 160 Hz): $t=[3,03; 3,59; 2,81; 2,83; 3,18]$, d.f.=[22,4; 23,6; 17,0; 19,2; 18,9], ensidet $p=[0,003; <0,001; 0,006; 0,005; 0,003]$).

Den påfaldende lighed med spektrene fra van den Berg et al. [71] (Figur 15) støtter, at spektrene for de store møller fra det foreliggende projekt er repræsentative for møller i denne størrelse.

4.5 Jordrefleksion

I beregningerne af lydtrykniveau ved naboerne, tages der hensyn til jordrefleksionen ved at lægge 1,5 dB til den direkte lyd. Som nævnt i afsnit 2.3, benyttes værdien 1,5 dB i de danske regler for vindmøller [50]. De svenske retningslinjer siger, at der skal lægges 3 dB til den direkte lyd (for afstande op til 1000 m) [72], en værdi, som også følger af ISO 9613-2 [48] for det lavest angivne oktavnåb, 63 Hz, uafhængigt af jordoverfladen. Under målingerne af lydeffektniveau fra møllerne [47] antages det, at jordens refleksion tilføjer så meget som 6 dB til den direkte lyd. Der anvendes ganske vist en reflekterende plade under mikrofonen, men pladen har kun ringe effekt ved lave frekvenser, hvor den antagne 6 dB refleksion hovedsageligt skyldes selve jordfladen.

En mulig destruktiv interferens mellem den direkte lyd og jordrefleksionen, hvis modtageren er hævet over jorden, vil have ringe virkning ved lave frekvenser. Ved eksempelvis en kildehøjde på 75 m, en vandret afstand på 800 m og en modtagerhøjde på 1,5 m vil forsinkelsen mellem direkte lyd og jordrefleksionen kun være 0,8 ms, hvilket svarer til et første dyk i lydtransmissionen ved 625 Hz (retlinjet lydudbredelse).

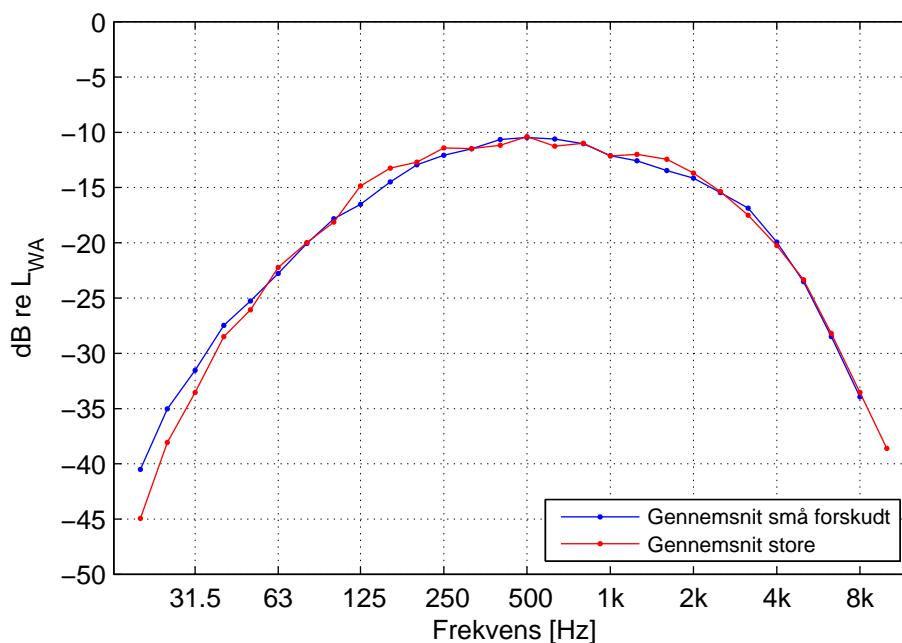
På denne baggrund er det rimeligt at formode, at et tillæg på 1,5 dB for jordrefleksionen er for lavt ved lave frekvenser, og at højere værdier op til et teoretisk maksimum på 6 dB vil være mere passende. Således vil den procedure, der er anvendt til at beregne det udendørs lydtrykniveau ved naboerne, sandsynligvis undervurdere den lavfrekvente lyd.

4.6 Vinduer

Målingerne af lydisolations blev lavet med lukkede vinduer. Men i store dele af verden, foretrækker mange mennesker at sove med vinduerne i det mindste lidt åbne, og WHO anbefaler, at støjgrænserne skal muliggøre dette [66, 73]. I Danmark laves indendørs målinger af lavfrekvent støj som regel med lukkede vinduer, men hvis klageren mener, at støjen er kraftigere med åbne vinduer, skal der også laves målinger for denne situation [20]. Det havde derfor været relevant også at have målt lydisolationsen med lidt åbne vinduer og vurderet de deraf følgende indendørs lydtrykniveauer.

4.7 Estimerede lydeffekter for endnu større møller

I afsnit 3.1.2 sås den spektrale forskel mellem små og store møller i form af forskelle i de normerede lydeffektniveauer for bestemte 1/3-oktavbånd. Som en alternativ måde at betragte dette på viser Figur 17 normerede spektre for store og små møller, men med data for de små møller flyttet en 1/3 oktav nedad i frekvens.



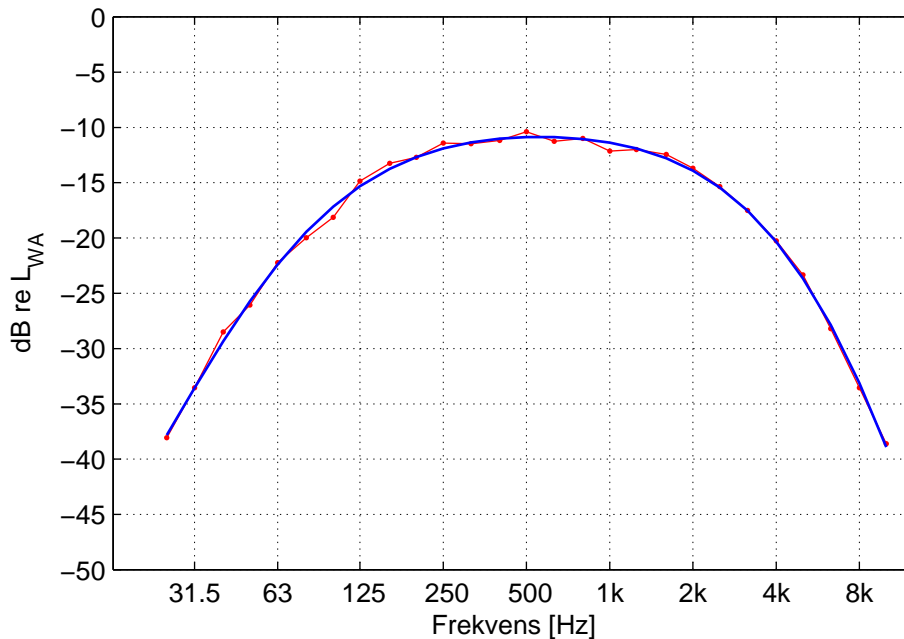
Figur 17. Normerede A-vægtede lydeffektniveauer for 1/3-oktavbånd. Middelværdier for to grupper af møller; ≤ 2 MW og > 2 MW, gruppen af små møller forskudt 1/3 oktav nedad i frekvens. (Mølle 6 ikke medregnet over 2 kHz, se Afsnit 3.1.2).

De to kurver ligger meget tæt på hinanden i det meste af frekvensområdet, hvilket betyder, at spektret har fastholdt sin form, men er forskudt cirka 1/3 oktav nedad i frekvens fra små til store møller (sammenlign med Figur 4). Forskelle ved de laveste frekvenser kan være reelle eller være resultatet af måleusikkerhed ved disse frekvenser på grund af baggrundsstøj, et spørgsmål der ikke er gjort fuldstændigt rede for i datamaterialet.

For den læser der måtte mene, at en forskydning på en enkelt 1/3 oktav er beskednen, er det værd at bemærke, at det svarer til det musikalske interval en stor tert, næsten forskellen mellem to strenge ved siden af hinanden på en guitar.

De logaritmiske middelværdier af de nominelle elektriske effekter for små og store møller er omkring henholdsvis 650 kW og 2,6 MW, og det spektrale skift nedad på cirka 1/3 oktav svarer derfor til et skift opad i den nominelle elektriske effekt med en faktor i størrelsesordenen 4. Det vil derfor være relevant at foreslå, at støjspektret forskyder sig yderligere cirka 1/3 oktav nedad for fremtidige vindmøller i 10 MW klassen.

Som et supplement til den lineære regression og ekstrapolation for L_{WA} i Figur 13, er konstrueret et bud på typiske spektre for vindmøller omkring 2,5, 5 og 10 MW til mulig (forsigtig) brug i fremtidige projekter. Figur 18 viser en sjette-ordens-polynomie regression af middelværdien af det relative spektrum for møllerne over 2 MW.



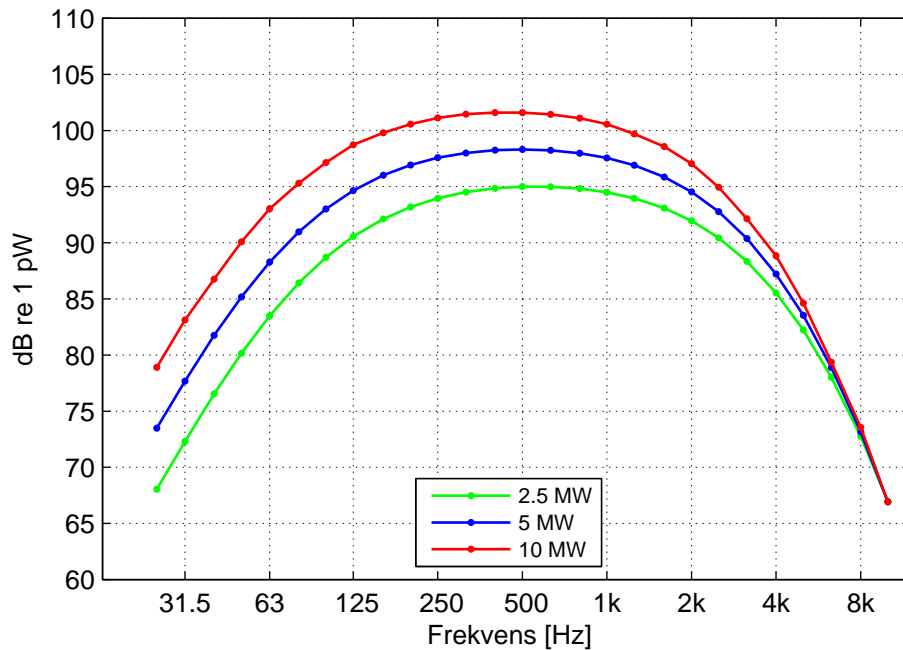
Figur 18. Sjette-ordens-polynomie regression (blå linje) af middelværdi af normerede A-vægtede lydeffektniveauer (rød linje med runde markeringer) for møller med nominel elektrisk effekt > 2 MW. (Mølle 6 ikke medregnet over 2 kHz, se Afsnit 3.1.2).

Tabel 3 giver relative lydeffektniveauer i 1/3- og 1/1-oktavbånd for 2.5 MW møller fra regressionen i Figur 18 og, for 5 og 10 MW møller, data forskudt henholdsvis 1/6 og 1/3 oktav nedad i frekvens. Desuden giver tabellen absolutte niveauer baseret på den lineære regression af L_{WA} i Figur 13. Bemærk, at estimaterne er baseret på middelværdier af møller, og at de ikke indeholder en sikkerhedsmargin som nævnt i afsnit 4.2.

Tabellens værdier for det absolutte niveau i 1/3-oktaver er desuden vist i Figur 19.

Frek. [Hz]	Relativt niveau i forhold til L_{WA}						Absolut niveau					
	1/3-oktaver			Oktaver			1/3-oktaver			Oktaver		
	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW	2.5MW	5 MW	10 MW
25	-37,4	-35,3	-33,2				68,1	73,5	78,9			
31.5	-33,2	-31,1	-29,0	-27,2	-25,2	-23,3	72,3	77,7	83,1	78,3	83,6	88,8
40	-29,0	-27,0	-25,3				76,5	81,8	86,8			
50	-25,3	-23,6	-22,0				80,2	85,2	90,1			
63	-22,0	-20,5	-19,1	-16,7	-15,3	-14,0	83,5	88,3	93,0	88,8	93,5	98,1
80	-19,1	-17,8	-16,8				86,4	91,0	95,3			
100	-16,8	-15,8	-15,0				88,7	93,0	97,1			
125	-15,0	-14,2	-13,4	-10,0	-9,3	-8,6	90,5	94,6	98,7	95,5	99,5	103,5
160	-13,4	-12,8	-12,3				92,1	96,0	99,8			
200	-12,3	-11,9	-11,5				93,2	96,9	100,6			
250	-11,5	-11,2	-11,0	-6,8	-6,5	-6,3	94,0	97,6	101,1	98,7	102,3	105,8
315	-11,0	-10,8	-10,6				94,5	98,0	101,5			
400	-10,6	-10,6	-10,5				94,9	98,2	101,6			
500	-10,5	-10,5	-10,5	-5,8	-5,8	-5,8	95,0	98,3	101,6	99,7	103,0	106,3
630	-10,5	-10,6	-10,7				95,0	98,2	101,4			
800	-10,7	-10,8	-11,0				94,8	98,0	101,1			
1000	-11,0	-11,3	-11,5	-6,3	-6,5	-6,8	94,5	97,5	100,6	99,2	102,3	105,3
1250	-11,5	-11,9	-12,4				94,0	96,9	99,7			
1600	-12,4	-12,9	-13,5				93,1	95,9	98,6			
2000	-13,5	-14,3	-15,1	-8,8	-9,5	-10,2	92,0	94,5	97,0	96,7	99,3	101,9
2500	-15,1	-16,0	-17,2				90,4	92,8	94,9			
3150	-17,2	-18,4	-20,0				88,3	90,4	92,1			
4000	-20,0	-21,6	-23,3	-14,7	-16,1	-17,8	85,5	87,2	88,8	90,8	92,7	94,3
5000	-23,3	-25,3	-27,5				82,2	83,5	84,6			
6300	-27,5	-29,9	-32,8				78,0	78,9	79,3			
8000	-32,8	-35,6	-38,5	-26,1	-28,7	-31,5	72,7	73,2	73,6	79,4	80,1	80,6
10000	-38,5	-41,9	-45,2				67,0	66,9	66,9			
L_{WA}							105,5	108,8	112,1	105,5	108,8	112,1

Tabel 3. Estimerede relative og absolutte A-vægtede lydeffektniveauer for møller omkring 2,5, 5 og 10 MW baseret på sjette-ordens-polynomie approksimationen af middel relativt niveau for møller > 2 MW fra Figur 18 og L_{WA} fra den lineære regression i Figur 13. Relative niveauer forskudt 1/6 og 1/3 oktavn nedad i frekvens for henholdsvis 5 og 10 MW. Approksimationen justeret med +0,38 dB for at opnå et totalt relativt niveau på 0 dB, hvilket middelværdien af relative data (og dens approksimation) ikke nødvendigvis har. Bemærk, at estimerne er baseret på middelværdier af møller, og at de ikke indeholder en sikkerhedsmargin som nævnt i afsnit 4.2.



Figur 19. Estimerede A-vægtede lydeffektniveauer i 1/3 oktavnåbånd for møller omkring 2,5, 5 og 10 MW. Værdier og forudsætninger fra Tabel 3.

4.8 Atmosfæriske forhold

Alle de foregående beregninger antager sfærisk lydudbredelse, dvs. en 6 dB reduktion af lydtrykniveauet per fordobling af afstanden. Under visse atmosfæriske betingelser, f.eks. med temperaturinversion eller 'low-level jets', kan der være et lydreflekterende lag i en vis højde, og dermed ligner lydudbredelsen ud over en vis afstand mere cylindrisk udbredelse, som kun giver 3 dB reduktion per fordobling af afstanden. Dette blev observeret for lave frekvenser f.eks. af Hubbard og Shepherd [21] og forklaret f.eks. af Zorumski og Willshire [74] og Johansson [75]. Over vand regner de svenske retningslinjer generelt med cylindrisk udbredelse ud over en afstand på 200 m [72], en afstand som stemmer fint med data fra Bolin et al. [76], som viste refleksion i en højde i størrelsesordenen 100-200 m.

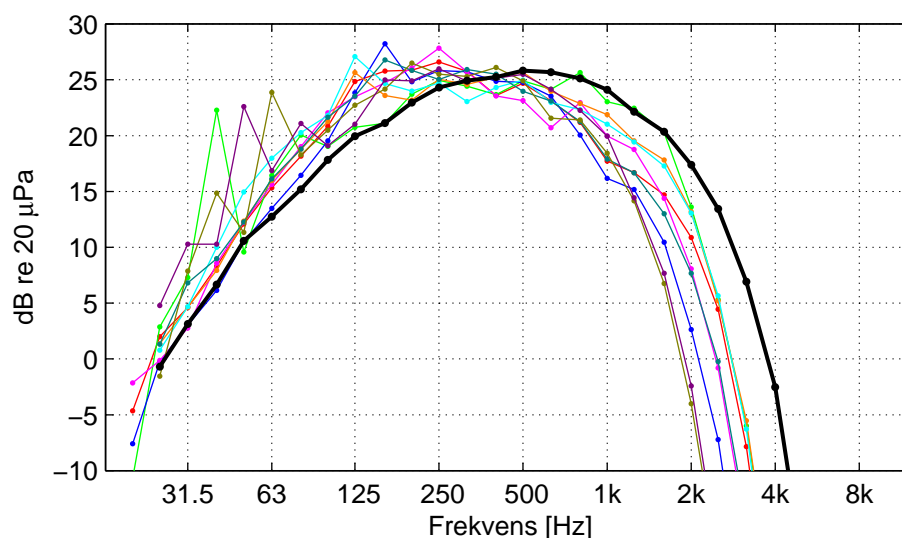
Med cylindrisk udbredelse fra 200 m gælder følgende ligning (for afstande over 200 m):

$$L_p = L_{WA} - 20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{200 \text{ m}}{1 \text{ m}} \right) - 10 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{200 \text{ m}} \right) - 11 \text{ dB} - \alpha \cdot d + 1,5 \text{ dB} \quad (4)$$

Tabel 4 og Figur 20 viser henholdsvis nøgletal og lydtrykniveauer i 1/3-oktavnåbånd i den afstand, hvor det A-vægtede lydtrykniveau er faldet til 35 dB under forudsætning af cylindrisk udbredelse fra 200 m.

	Mølle									Middel små
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Afstand [m]	1476	1414	2373	2100	1562	1829	1776	3482	3152	827
L_{pA} [dB]	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
L_{pALF} [dB]	29,7	28,2	30,3	29,2	29,4	30,7	30,0	29,7	29,6	25,6
$L_{pALF}-L_{pA}$ [dB]	-5,3	-6,8	-4,7	-5,8	-5,6	-4,3	-5,0	-5,3	-5,4	-9,4
L_{pG} [dB]	60,4	56,2	57,1	60,0						

Tabel 4. Nøgletal ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB. Cylindrisk udbredelse er antaget fra 200 m. Afstanden er angivet som skrå afstand til rotorcenter, hvilket for de aktuelle møllehøjder er tæt på den vandrette afstand.



Figur 20. A-vægtet lydtrykniveau i 1/3-oktavnband ved den afstand, hvor det totale A-vægtede lydtrykniveau er 35 dB (se Tabel 4). Cylindrisk lydudbredelse er antaget fra 200 m. Farvekode for møller som i Figur 5.

Det er nødvendigt med meget større afstande (1414-3482 m) for at nå ned på 35 dB end med ren sfærisk udbredelse, og den lavfrekvente karakter af spektret er blevet endnu mere udtalt (sammenlign med Tabel 1 og Figur 9). Cylindrisk udbredelse kan forklare tilfælde, hvor rumlen af vindmøller hævdes at være hørbar kilometre væk. Et worst-case scenarie, der kombinerer temperaturinversion med en vindmøllepark, der opfører sig som en linjekilde i et vist afstandsområde, kan teoretisk set reducere den geometriske dæmpning i dette område til nul. Det er imidlertid nødvendigt med mere viden om de atmosfæriske forhold og forekomsten af forskellige fænomener.

Der er også andre fænomener med relation til de atmosfæriske forhold, som fortjener en vis opmærksomhed. Det antages normalt, at vindhastigheden stiger logaritmisk med stigende højde over jorden, startende med en hastighed på nul i en højde svarende til den såkaldte ruhedslængde af jordoverfladen. Når man kender ruhedslængden, kan vindhastigheden i alle højder således bestemmes ud fra målinger i en enkelt højde. Vindhastigheden i en højde af 10 m anvendes som reference for målinger af vindmøllestøj [47].

Imidlertid har flere undersøgelser vist, at de virkelige vindhastighedsprofiler varierer meget og ofte afviger væsentligt fra den antagede logaritmiske profil (van den Berg [77], Botha [78], Palmer [79], Bowdler [80]). I en stabil atmosfære, som ofte findes om natten, kan variationerne med højden være meget større end antaget, f.eks. med høj vindhastighed i møllens højde og kun lidt vind ved jorden. En stor variation af vindhastigheden på tværs af rotorarealet øger modulationen af vindmøllestøjen, og den normale 'swish-swish'-lyd ændrer sig til en mere generende, 'dunkende', impulsiv lyd som beskrevet af f.eks. van den Berg [28, 81, 82] og Palmer [83]. Effekten er mere fremtrædende med store vindmøller, hvor forskellen i vindhastigheden mellem rotortop og -bund kan være betydelige. Effekten afspejles som regel ikke i støjmålinger, da disse hovedsageligt udføres i dagtimerne, hvor den logaritmiske profil er mere sædvanlig.

En anden konsekvens af stor variation af vindhastigheden med højden er, at møllen kan udsende støj, som svarer til en høj vindhastighed – og langt højere end antaget ud fra vindhastigheden målt i 10 meters højde – mens det er helt stille ved jorden. Der er således mere møllestøj end forventet, men mindre vind, og møllestøjen vil derfor ikke være maskeret med naturlig vindskabt lyd, sådan som den måske ville have været med den logaritmiske vindprofil.

Flere forfattere har fremført, at den logaritmiske vindhastighedsprofil og en referencehøjde på 10 m ikke er hensigtsmæssige for moderne, høje vindmøller (f.eks. van den Berg [81], Botha [78], Palmer [79], Almgren et al. [84]), og en revideret IEC 61400-11 vil benytte den reelle vindhastighed i navhøjde som reference [85]. Vindprofiler og -statistik for det faktiske opstillingsområde kan derefter anvendes i støjberegning og regulering.

5 KONKLUSIONER

Resultaterne bekræfter den hypotese, at spektret af vindmøllestøj flytter sig nedad i frekvens med stigende møllestørrelse. Den lavfrekvente relative andel af den udsendte støj er højere for store vindmøller (2,3-3,6 MW) end for små vindmøller (≤ 2 MW). Forskellen er statistisk signifikant for 1/3-oktavbåndene i frekvensområdet 63-250 Hz. Forskellen kan også udtrykkes som en forskydning af spektret på omkring 1/3 oktav. Et yderligere skift af lignende størrelse må forventes for vindmøller i 10 MW størrelsen.

Når man ser på lydtrykniveauet udendørs i relevante naboafstande, bliver det lavfrekvente indhold endnu mere udtalt. Det skyldes, at luftens absorption reducerer de høje frekvenser meget mere end de lave. Selv når der ses på A-vægtede niveauer, udgør lave frekvenser en væsentlig del af støjen, og for mange af de undersøgte store vindmøller ligger det 1/3-oktavbånd, som har det højeste lydtrykniveau, på eller under 250 Hz. Det er således hævet over enhver tvivl, at den lavfrekvente del af spektret spiller en vigtig rolle i støjen ved naboerne.

Den indendørs lavfrekvente støj i naboafstand varierer med vindmølle, lydisolations af rummet og position i rummet. Hvis støjen fra de undersøgte store vindmøller har et udendørs A-vægtet lydtrykniveau på 44 dB, det maksimale i den danske regulering af støj fra vindmøller, er der risiko for, at en betragtelig del af beboerne vil være generet af lavfrekvent støj, selv indendørs. Den danske aften/nat-grænse på 20 dB for A-vægtet støj i frekvensområdet 10-160 Hz, som gælder for støj fra virksomheder (men ikke for vindmøllestøj), vil blive overskredet i opholdsrummene hos mange af de naboer, der ligger tæt ved grænsen på de 44 dB. Problemerne reduceres betydeligt med en udendørs grænse på 35 dB.

Vindmøllerne udsender ganske vist infralyd (lyd under 20 Hz), men niveauerne er lave, når man tager menneskets følsomhed overfor disse frekvenser i betragtning. Selv tæt på møllerne er lydtrykniveauet langt under den normale høretærskel, og infralyd betragtes således ikke som et problem for møller af samme konstruktion og størrelse som de undersøgte møller.

Den lavfrekvente støj fra flere af de undersøgte store møller indeholder toner, formodentlig fra gearkassen, som resulterer i toppe i de tilsvarende 1/3-oktavbånd. Tonetillægget hjælper ikke til at sikre, at tonerne bliver fjernet eller reduceret, da tonerne ikke er tilstrækkeligt udtalte, til at de overhovedet udløser et tonetillæg. Den spektrale forskel mellem store og små vindmøller er i øvrigt fortsat statistisk signifikant, selvom toppene i 1/3-oktavbåndene fjernes.

Ovenstående konklusioner er baseret på data for møller i området 2,3-3,6 MW nominel elektrisk effekt. Problemerne med lavfrekvent støj må forventes at blive større med endnu større møller.

Den udsendte A-vægtede lydeffekt stiger proportionalt med den nominelle elektriske effekt eller sandsynligvis endnu mere. Derfor forurener store vindmøller

det samme – eller et større – areal med støj, sammenlignet med små møller med den samme samlede elektriske effekt.

Der er forskelle på flere decibel mellem støjen fra forskellige møller af samme størrelse, selv for møller af samme fabrikat og model. Det er derfor ikke relevant at foretage beregninger ned til brøkdele af en decibel og tro på, at dette holder for de aktuelle møller, som bliver stillet op. Der må indregnes en vis sikkerhedsmargin i planlægningsfasen for at sikre, at de faktisk rejste vindmøller vil overholde støjgrænserne. Der findes en international teknisk specifikation til dette, men den anvendes ofte ikke.

Under visse atmosfæriske betingelser, f.eks. temperaturinversion, kan støjen være mere generende og – og især den lavfrekvente del – udbrede sig meget længere end normalt antaget. Det er nødvendigt med mere viden om sådanne fænomener og deres forekomst.

Referencer

- [1] A. O. Santillan, C. S. Pedersen, M. Lydolf, "Experimental implementation of a low-frequency global sound equalization method based on free field propagation", *Applied Acoustics*, **68**, 1063-1085, 2007.
- [2] C. S. Pedersen, "Human hearing at low frequencies with focus on noise complaints", Ph.D. thesis, Aalborg University, Denmark (2008).
- [3] H. Møller, C. S. Pedersen, "Human hearing at low frequencies", *Noise & Health*, **6** (23), 37-57, 2004.
- [4] L. D. Whittle, S. J. Collins, D. W. Robinson, "The audibility of low frequency sounds", *J. Sound and Vibration*, **21** (4), 431-448, 1972.
- [5] H. Møller, J. Andresen, "Loudness of pure tones at low and infrasonic frequencies", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **3** (2), 78-87, 1984.
- [6] M. A. Bellmann, V. Mellert, C. Reckhardt, H. Remmers, "Perception of sound and vibration at low frequencies", collected papers from the Joint Meeting "Berlin 99" of ASA, EAA and DAGA, Berlin, Germany, 1999, ISBN 3-9804568-5-4. Abstract in *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**, 1297.
- [7] ISO 226 "Acoustics – Normal equal-loudness-level contours", International Organization for Standardization, Geneva, 2003.
- [8] J. Andresen, H. Møller, "Equal annoyance contours for infrasonic frequencies", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **3** (3), 1-9, 1984.
- [9] H. Møller, "Annoyance of audible infrasound", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **6** (1), 1-17, 1987.
- [10] Y. Inukai, N. Nakamura, H. Taya, "Unpleasantness and acceptable limits of low frequency sound", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **19** (3), pp.135-140, 2000.
- [11] J. K. Subedi, H. Yamaguchi, Y. Matsumoto, M. Ishiharati, "Annoyance of low frequency tones and objective evaluation methods", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **24** (2), 81 – 96, 2005.
- [12] K. P. Waye, J. Bengtsson, A. Kjellberg, S. Benton, "Low frequency noise "pollution" interferes with performance", *Noise & Health*, **4** (13), 33-49, 2001.
- [13] K. P. Waye, A. Clow, S. Edwards, F. Hucklebridge, R. Rylander, "Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality", *Life Sciences*, **72**, 863-875, 2003.
- [14] B. Berglund, T. Lindvall (Editors), "Community noise", *Archives of the Center for Sensory Research*, **2** (1), Stockholm University and Karolinska Institute, 1995, prepared for the World Health Organization.
- [15] ISO 7196, "Acoustics - Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements", International Organization for Standardization, Geneva, 1996.
- [16] N. S. Yeowart, M. J. Evans, "Thresholds of audibility for very low-frequency pure tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, **55** (4), 814-818, 1974.
- [17] S. Yamada, T. Kosaka, K. Bunya, T. Amemiya, "Hearing of low frequency sound and influence on human body", *Proc. Conference on Low Frequency Noise and Hearing*, 7-9 May 1980 in Aalborg Denmark, 95-102, 1980.
- [18] U. Landström, R. Lundström, M. Byström, "Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **2** (1), 1-11, 1983.

- [19] T. Watanabe, H. Møller, "Low frequency hearing thresholds in pressure field and in free field", *J. Low Frequency Noise and Vibration*, **9** (3), 106-115, 1990.
- [20] "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø", *Orientering fra Miljøstyrelsen*, nr. 9, 1997.
- [21] H. H. Hubbard, K. P. Shepherd, "Aeroacoustics of large wind turbines", *J. Acoust. Soc. Am.*, **89** (6), 2495-2508, 1991.
- [22] K. P. Shepherd, H. H. Hubbard, "Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines", *Noise Control Engineering Journal*, **36** (1), 5-15, 1991.
- [23] G. Guidati, R. Bareiß, S. Wagner, "An investigation of blade-tower-interaction noise (BTI) for horizontal axis wind turbines in upwind and downwind configuration. First steps towards modeling of aeroelastic effects", *Proc. 8th IEA Symposium*, November 1994, pp. 249-255.
- [24] M. L. Legerton, D. M. J. P. Manley, J. W. Sargent, D. J. Snow, P. Styles, "Low frequency noise & vibration levels at a modern wind farm", *Proc. 25th International Congress on Noise Control Engineering*, Inter-Noise 96, Liverpool, pp. 459-462.
- [25] K. Betke, M. Schultz-von Glahn, O. Goos, H. Remmers, "Messung der Infrashallabstrahlung von Windkraftanlagen" (Measurement of infrasound emission from wind turbines), *Proc. DEWEK 1996*, pp. 207-210.
- [26] K. Betke, H. Remmers, "Messung und Bewertung von Tieffrequentem Schall" (Measurement and assessment of low-frequency sound), *Fortschritte der Akustik, DAGA 1998*, pp. 472-473.
- [27] J. Jakobsen, "Infrasound emission from wind turbines", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **24** (3), pp. 145-155, 2005.
- [28] G. P. van den Berg, "Do wind turbines produce significant low frequency sound levels", *11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control*, Maastricht, 2004.
- [29] ISO 389-7 "Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse field listening conditions", *International Organization for Standardization*, Geneva, 2005.
- [30] C. S. Pedersen, H. Møller: "Vurdering af lavfrekvent støj og infralyd fra decentrale el-producerende anlæg", *Afdeling for Akustik, Aalborg Universitet*, ISBN 87-90834-74-7, Maj 2005.
- [31] "The measurement of low frequency noise at three UK wind farms", *Hayes McKenzie Partnership Ltd. for Department of Trade and Industri (DTI)*, Contract No. W/45/00656/00/00, URN No. 06/1412, UK, 2006.
- [32] A. Moorhouse, D. Waddington, M. Adams, "Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance", *Project report DEFRA NANR45*, University of Salford, 2005.
- [33] A. Moorhouse, D. Waddington, M. Adams, "Procedure for the assessment of low frequency noise complaints", *Project report DEFRA NANR45*, University of Salford, 2005.
- [34] J. Jakobsen, "Lavfrekvent støj fra vindmøller", *Notat, Miljøstyrelsen*, 31. maj 2006.
- [35] "Bekendtgørelse om miljøgodkendelse af hurtigfærgeruter", *Bekendtgørelse nr. 821*, Miljøministeriet, København, 1997.
- [36] "Vurdering af lavfrekvent støj fra færger, part 2: Revideret metode til beregning af lydtrykniveauet indendørs", *Delta Akustik & Vibration*, Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 10, 1997.
- [37] S. Lee, S.-H. Shin, C. Cheong, S.-S. Jung, W. Cheung, "Low-frequency noise emission characterisation of upwind-type large wind turbines", *Proc. International Congress on Noise Control Engineering*, Inter-Noise 2007, Istanbul, Turkey.

- [38] S. S. Jung, W.-S. Cheung, C. Cheong, S.-H. Shin, "Experimental identification of acoustic emission characteristics of large wind turbines with emphasis on infrasound and low-frequency noise", *J. Korean Physical Society*, **53** (4), 1897-1905, October 2008.
- [39] W. J. Gastmeier, B. Howe, "Recent studies of infrasound from industrial sources", *Canadian Acoustics*, **36** (3), 58-59, 2008.
- [40] R. Ramakrishnan, "Characteristics of wind turbine noise", *Canadian Acoustics*, **3**, 122-123, 2009.
- [41] J. P. Harrison, "Inadequacy of wind turbine noise regulations and their application", *Canadian Acoustics*, **37** (3), 156-157, 2009.
- [42] R. J. Barthelmie, L. Folkerts, F. T. Ormel, P. Sanderhoff, P. J. Eecen, O. Stobbe, N. M. Nielsen, *J. Atmospheric and Oceanic Techn.*, **20**, 466-477, 2003.
- [43] B. Søndergaard, C. Ryom, "Low frequency noise from large wind turbines – Sound power measurement method", Report AV 135/08, Delta, April 2008.
- [44] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from sound power measurements", Report AV 136/08, Delta, revised version December 2008.
- [45] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Results from previous sound power measurements", Report AV 137/08, Delta, May 2008.
- [46] D. Hoffmeyer, B. Søndergaard, "Low frequency noise from large wind turbines – Measurements of sound insulation of facades", Report AV 1097/08, Delta, April 2008.
- [47] IEC 61400-11, "Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques", Second edition 2002 plus Amendment 1 2006, International Technical Commission, Geneva.
- [48] ISO 9613-2, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation", International Organization for Standardization, Geneva, 1996.
- [49] ISO 9613-1, "Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
- [50] "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Bekendtgørelse nr. 1518 af 14. december 2006, Miljøministeriet, København.
- [51] ISO 140-5, "Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades", International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [52] J. Jakobsen, "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer; Rumakustiske forhold ved lave frekvenser", Rapport AV67/96, Delta Akustik & Vibration, 1996.
- [53] C. Simmons, "Measurement of sound pressure levels at low frequencies in rooms. Comparison of available methods and standards with respect to microphone positions", *Acta Acustica*, **85** (1), 88-100, 1999.
- [54] S. Pedersen, H. Møller, K. P. Waye, "Indoor measurements of noise at low frequencies - Problems and solutions", *J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, **26** (4), 249-270, 2007.
- [55] J. Brunskog, F. Jacobsen, "Measurements of low-frequency noise in rooms", Notat, Miljøstyrelsen, 2008.
- [56] S. Wagner, R. Bareiß, G. Guidati, "Wind turbine noise", Springer Berlin, ISBN 3-540-60592-4, 1996.

- [57] ISO 1996-2, "Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels", Second Edition, International Organization for Standardization, Geneva, 2007.
- [58] "Måling af ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 6, Miljøstyrelsen, 1984.
- [59] S. Oerlemans, G. Schepers, "Prediction of wind turbine noise and comparison to experiment", Proc. Second International Meeting on Wind Turbine Noise, Lyon, 2007.
- [60] S. Oerlemans, M. Fisher, T. Maeder, K. Kögler, "Reduction of wind turbine noise using optimized airfoils and trailing-edge serrations", *AIAA Journal*, **47** (6), 1470-1481, 2009.
- [61] E. Pedersen, K. P. Waye, "Perception and annoyance due to wind turbine noise – a dose-response relationship", *J. Acoust. Soc. Am.*, **116** (6), 3460-3470, 2004.
- [62] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, J. Bouma, "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands", *J. Acoust. Soc. Am.*, **126** (2), 634-643, 2009.
- [63] T. H. Pedersen, K. S. Nielsen, "Genevirkning af støj fra vindmøller", Rapport 150, Delta Akustik & Vibration, 1996.
- [64] "Buller från vindkraft – Riktvärden för ljud från vindkraft" (Noise from wind turbines – Recommended limits for sound from wind turbines), Naturvårdsverket, Stockholm, 2009.
- [65] "Ekstern støj fra virksomheder", Vejledning nr. 5, Miljøstyrelsen, 1984.
- [66] "Guidelines for community noise", B. Berglund, T. Lindvall, D. H. Schwela (editors), World Health Organization, Geneva, 1999.
- [67] "Høring af udkast til bekendtgørelse om støj fra vindmøller", Miljøstyrelsen, 30. oktober 2006.
- [68] IEC TS 61400-14, "Wind turbines – Part 14: Declaration of apparent sound power level and tonality values", International Technical Commission, Geneva, 2005.
- [69] S. Broneske, "Comparison of Wind Turbine Manufacturers' Noise Data for Use in Wind Farm Assessments", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [70] Fritz van den Berg, Eja Pedersen, Jelte Bouma, Roel Bakker, "WINDFARMperception – Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents", Final report 3. June 2008, University of Groningen, University of Gothenburg.
- [71] B. Søndergaard, K. D. Madsen, "Low frequency noise from large wind turbines – Summary and conclusions on measurements and methods", Report AV 140/08, Delta, revised version December 2008.
- [72] "Ljud från vindkraftverk" (Sound from wind turbines), Rapport 6241, Naturvårdsverket, Stockholm, 2001.
- [73] "Night noise guidelines for Europe", World Health Organization, Copenhagen, 2009.
- [74] W. E. Zorumski, W. L. Willshire Jr., "Downwind sound propagation in an atmospheric boundary layer", *AIAA Journal*, **5** (5), 515-523, 1989.
- [75] L. Johansson, "Sound propagation around off-shore wind turbines", Proc. 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, 2003, 1481-1487.
- [76] K. Bolin, M. Boué, I. Karasalo, "Long range sound propagation over a sea surface", *J. Acoust. Soc. Am.* **126** (5), 2191-2197, November 2009.
- [77] G. P. van den Berg, "Wind gradient statistics up to 200 m altitude over flat ground", Proc. First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, 2005.
- [78] P. Botha, "The use of 10 m wind speed measurements in the assessment of wind farm developments", Proc. First International Meeting on Wind Turbine Noise, Berlin, 2005.

- [79] W. K. G. Palmer, "Uncloaking the nature of wind turbines – using the science of meteorology", Proc. Second International Meeting on Wind Turbine Noise, Lyon, 2007.
- [80] D. Bowdler, "Wind Shear and its Effect on Noise Assessment", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [81] G. P. van den Berg, "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound", J. Sound and Vibration, **277**, 955-970, 2004.
- [82] G. P. van den Berg, "The beat is getting stronger: The effect of atmospheric stability on low frequency modulated sound of wind turbines", J. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **24** (1), 1-24, 2005.
- [83] W. K. G. Palmer, "A new explanation for wind turbine whoosh – wind shear", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.
- [84] M. Almgren, S. Schönfeld and J. Grönlund, "Sound Emission and Sound Propagation for Wind Turbines in Forest Terrains", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009,
- [85] B. Søndergaard, "The next version of the IEC 61400-11 measurement method", Proc. Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, 2009.