

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

STØJ FRA VINDMØLLER

Orientering nr. 22

Jørgen Jakobsen/THP/bm

1994-02-10

Sammenhæng mellem vindhastighed og støj

Typiske kildestyrker af danske vindmøller

Toneanalyse af støj fra vindmøller

Uddybning af Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 304/1991 om støj fra vindmøller

Støj fra vindmøller er et emne, som hyppigt dukker op i den offentlige debat, hvor ønsket om stilhed i det åbne land og rekreative områder fremstilles som modsætning til udbygning af alternativ, vedvarende energi. Det forekommer ofte, at debatten føres uden at der foreligger tilstrækkelige oplysninger om støjbelastningen hos de naboer, som klager over støjen fra vindmøller.

Formålet med dette nummer af "Orientering fra Referencelaboratoriet" er at belyse nogle emner, som har vist sig ikke at være dækket tilstrækkelig tydeligt af Miljøministeriets bekendtgørelse om støj fra vindmøller, nr. 304/1991. Desuden bringes der en oversigt over typiske kildestyrker fra de fleste typer af danske vindmøller.

Måling af støj fra vindmøller

I den første tid blev støjen fra vindmøller målt - så godt det lod sig gøre - i nærheden af de boliger, der var mest udsat for støjen. Der var problemer med at holde styr på møllernes driftstilstand under målingen, og der var store problemer med baggrundsstøjen fra vindens susen i vegetationen. Bedre var det ikke, at de miljøregler, som på daværende tidspunkt var gældende for vindmøller, tillod en støjbelastning på "45 dB eller baggrundsstøjniveauet, såfremt dette er højere", så sammenligningsgrundlaget med det opnåede måleresultat var meget usikkert i sig selv.

Efter at Miljøstyrelsen i april 1988 udsendte sit "Amtsbrev" til amter og kommuner m.fl., kom der mere styr på forholdene. Amtsbrevet indeholder en operationel metode til at måle møllens kildestyrke og en enkel beregningsmetode til at bestemme støjbelastningen i omgivelserne. Med amtshbrevet blev der også indført faste vejledende støjgrænser på 45 dB ved boliger i det åbne land og 40 dB i boligområder, begge dele ved en vindhastighed på 8 m/s i 10 m højde. Amtshbrevet blev i 1991 afløst af Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 304 af 14. maj 1991, som på nogle punkter tydeliggør den fremgangsmåde, der er beskrevet i amtshbrevet.

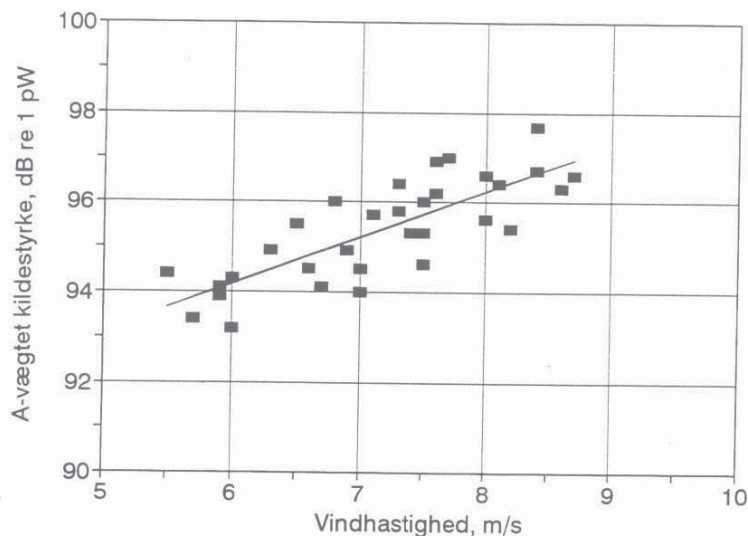
Amtshbrevet - og senere bekendtgørelsen - har medført, at støjmålinger af vindmøller er blevet væsentligt mere éntydige, og at de i de fleste tilfælde udgør et tilstrækkeligt grundlag for miljømyndighedernes behandling af støjsager. Imidlertid giver enkelte detaljer i målemetoden stadig anledning til tvivl og til noget forskellig praksis hos laboratorierne.

De væsentligste af disse punkter belyses i denne Orientering. Herunder inddrages såvel Referencelaboratoriets erfaring med vindmøllemaalinger gennem de sidste 10 år som ny viden, der er fremkommet ved arbejdet med at udforme forslag til nye internationale standarder for støjmåling af vindmøller, [1-2].

Måling af vindhastighed

Målemetodens princip er at måle sammenhørende værdier af vindhastigheden og lydtrykniveauet i nærheden af vindmøllen. Metoden er oprindeligt foreslået i 1983, [3]. Ved statistisk analyse (lineær regression) af resultaterne findes lydtrykniveauet, som svarer til referencevindhastigheden 8 m/s, og på grundlag af det beregnes kildestyrken L_{WA} . Det er i denne forbindelse vigtigt, at den målte vindhastighed svarer til den vind, som møllen oplever, og at måleperioderne for vindhastighed og støj er "samtidige". Hvis ikke disse forudsætninger er opfyldt, kan der opstå både egentlige fejl og unødvendig stor usikkerhed på resultaterne.

Den ideelle placering af vindmåleren er i frit, plant og åbent terræn, direkte i modvindsretningen set fra vindmøllen, og i en afstand på 1-2 gange navhøjden. Herved opnås den bedste sammenhæng mellem støj og vindhastighed, som bl.a. viser sig ved, at punkterne for de enkelte målinger ligger tæt på en skrå linie, jf. Figur 1.

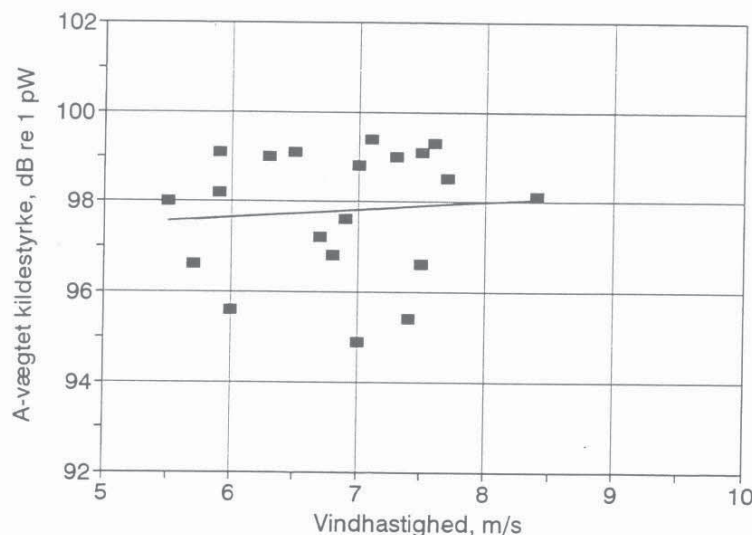


Figur 1

Plot af sammenhørende værdier af vindhastigheden i 10 m højde og den A-vægtede kildestyrke. Kildestyrken (hvert punkt i plottet) er bestemt ud fra lydtrykniveauet på en plade på jorden, 37 m fra vindmøllen, som er 27 m høj. Lydtrykniveauerne er L_{Aeq} [dB re 20 μ Pa] over 1 minut, og vindhastigheden [m/s] er ligeledes midlet over 1 minut.

Hvis vindmåleren er tættere på vindmøllen end 1 gange navhøjden, bliver den målte vindhastighed for lav på grund af møllens bremsende virkning. Tilsvarende vil der måles en for lav vindhastighed, hvis vindmøllen står på toppen af et højdedrag og vindmåleren ved foden af det. I begge tilfælde vil møllens kildestyrke blive for høj; fejlen kan blive adskillige dB afhængigt af lokale forhold.

Anbringes vindmåleren et sted, hvor vinden er påvirket af træer, andre vindmøller, bygninger o.l. bliver den registrerede vindhastighed ligeledes for lav, og desuden ødelægges den tætte sammenhæng mellem den målte vindhastighed og den vind, der påvirker vindmøllen. Som følge heraf bliver også korrelationen mellem vindhastighed og støj dårlig. Det kan overslagsmæssigt antages, at vinden er påvirket i et bredt område bag "læ-elementer" med en udstrækning på 10-20 gange deres højde. Ved at anbringe vindmåleren til siden af vindmøllen eller langt foran den kan det også være vanskeligt at opnå en overbevisende sammenhæng mellem vind og støj. I sådanne tilfælde kan det forekomme, at punkterne fra de enkelte målinger ligger i en sky snarere end på en linie, jf. Figur 2. Vindmåleren må **aldrig** stilles bagved vindmøllen!



Figur 2

Plot af sammenhørende værdier af vindhastigheden 10 m over terræn og den A-vægtede kildestyrke fra en vindmølle. Kildestyrken er energimiddelværdier over 1 minuts perioder og vindhastigheden middelværdier over 1 minut. Der er ikke tydelig sammenhæng mellem de to størrelser.

I tilfælde hvor vindmåleren står langt foran møllen, kan sammenhængen ofte forbedres ved at forskyde midlingsperioderne for vindhastighed, så de svarer til vindhastigheden på møllens plads. Det kan opnås ved at lægge perioderne τ sekunder **tidligere** end perioderne for støjmåling, hvor τ er afstanden fra vindmåler til vindmølle divideret med middelvindhastigheden.

Er der ikke ved målingen er tilstrækkelig god korrelation mellem vindhastighed og støj (som i eksemplet Figur 2), vil den fundne værdi af støjen ved referencevindhastigheden være fejlagtig. Desuden vil plottet af sammenhørende vind/støj-data i alle sådanne tilfælde være misvisende. Hvis vindhastigheden under målingerne i middel har været tæt ved 8 m/s, kan det dog forventes at støjniveauet ved referencevindhastigheden vil være nogenlunde korrekt.

For de fleste typer af danske vindmøller er sammenhængen mellem vind (omkring 8 m/s) og støj, at støjen øges med omkring 1 dB (mellem ca. 0,3 og 1,5 dB) ved en forøgelse af vindhastigheden i 10 m højde på 1 m/s. Ved højere og lavere vindhastigheder kan sammenhængen være en anden, og for møller med omkobling mellem to generatorer forekommer der et markant knæk ved den vindhastighed, hvor omkoblingen sker.

Note: I praksis er der opnået god sammenhæng mellem støj og vindhastighed i 10 m højde for mange sædvanlige typer af vindmøller med navhøjde op til omkring 40 m. For meget store vindmøller er vindhastigheden i 10 m højde ikke så nært sammenknyttet med støjen som vindhastigheden i navhøjde eller den øjeblikkeligt producerede elektriske effekt. Effekten kan omregnes til vindhastighed i navhøjde ved brug af møllens effektkurve. Hvis vindhastigheden måles (eller på anden vis bestemmes) i navhøjde skal den omregnes til den "ækvivalente" vindhastighed i 10 m højde ved brug af den logaritmiske vindlov:

$$v_{10} = v_{nav} [\ln (10/z_0) / \ln (H/z_0)], \text{ hvor}$$

$\ln$ betegner den naturlige logarimefunktion

v_{10} er den beregnede vindhastighed i 10 m højde

v_{nav} er vindhastigheden i navhøjde

H er navhøjden (i meter), og

z_0 er ruhedslængden, som for de fleste praktisk forekommende situationer er 0,05 m.

Krav til vindmåleren

I modsætning til, hvad der gælder for vindmåling ved almindelige målinger af ekstern støj, er vindmålingen, som indgår i måling af vindmøllestøj, en primær parameter. Fejl på vindhastigheden er direkte årsag til en tilsvarende fejl på støjniveauet ved referencevindhastigheden. Selv om de mest betydende fejl og usikkerheder kommer fra uhensigtsmæssig placering af vindmåleren, er det vigtigt at det benyttede instrument har en tilstrækkelig kvalitet, behandles varsomt, og at det kontrolleres jævnligt. Anemometre er sart mekanik, som ikke er beregnet til at blive transporteret rundt og blive monteret og demonteret med korte mellemrum.

Vindmåleren skal have en nøjagtighed, som er bedre end 0,5 m/s i intervallet 3-20 m/s. Den skal kunne synkroniseres med støjmålingerne, og den skal kontrolleres sporbart med højst 24 måneders intervaller. Efter uheld eller ved mistanke om beskadigelse skal vindmåleren også kontrolleres.

Antal af målinger

Det foreskrives i Miljøministeriets bekendtgørelse, at der skal måles mindst 10 sammenhørende resultater af L_{Aeq} og vindhastighed, begge dele midlet over mindst ét minut. Praksis har vist, at kun i få tilfælde opnås der herved en tilstrækkeligt tydelig sammenhæng mellem vind og støj, som omtalt i foregående afsnit. Ofte vil der i løbet af 10 ét-minutters perioder kun observeres en beskeden variation af vindhastigheden, som i sammenhæng med den sædvanlige, tilfældige spredning på støjdataene giver en usikker sammenhæng mellem de to størrelser.

Der lægges vægt på, at der skal måles i et vindhastighedsinterval på mindst 2 m/s, som indeholder referencevindhastigheden 8 m/s. I almindelighed må det tilrådes, at der måles omkring 30 sammenhørende resultater af L_{Aeq} og vindhastigheden.

Baggrundsstøjen måles med vindmøllen standset i et tilsvarende antal 1-minuts-perioder og så vidt muligt i det samme vindhastighedsinterval. I mange tilfælde vil det ses, at der ikke er særlig god sammenhæng mellem baggrundsstøjen og vindhastigheden.

Både ved måling af vindmøllestøj og baggrundsstøj overspringes perioder, hvor der er intermitterende, forstyrrende støj fra fx fugle, fly, køretøjer eller markredskaber.

Det kan i konkrete tilfælde forekomme, at vindhastigheden under en måling har "lagt sig fast" på en lav værdi. Hvis ikke vinden tiltager indenfor en overskuelig tid, hvorunder man fx kan stoppe vindmøllen og måle baggrundsstøj, må man afbryde målingen og genoptage den en anden dag, hvor det blæser mere. Det er **ikke** muligt at angive en tilstrækkeligt pålidelig værdi af L_{Aeq} ved referencevindhastigheden ud fra målinger indenfor et begrænset interval af lave vindhastigheder.

Målepunkt ved støjmåling

Støjen fra vindmøllen skal måles med mikrofonen anbragt direkte på en stor plade (ca. $1\frac{1}{2}$ m $\times$ 2 m), udlagt på jorden i medvindsretningen i en afstand svarende til 1-2 gange møllens navhøjde. Der kan **ikke** frit vælges en tilfældig måleretning i medvindssiden af vindmøllen, selv om bekendtgørelsens ordlyd godt kan udlægges på den måde. Det er imidlertid et generelt træk, at støjen fra vindmøller udsendes nogenlunde lige kraftigt i alle retninger, så i praksis har mindre afvigelser (op til $\pm 20^\circ$) fra vindretningen ikke betydende indflydelse på resultaterne. I mange tilfælde udviser støjen et tydeligt **minimum** i et snævert vinkelområde omkring rotorplanet, så det skal under alle omstændigheder undgås at måle her.

I de foreliggende udkast til internationale standarder [1,2] er kravet til måleafstand nøje specificeret til navhøjde + rotorradius, hvilket i praksis er tæt ved $1\frac{1}{2}$ gange navhøjden, med en tolerance på $\pm 20\%$. I forslagene indgår, at der udover i medvindsretningen ("referencepunktet") også skal måles i punkter 60° til hver side af medvindsretningen og desuden i modvindsretningen. Det forventes dog ikke, at der i forbindelse med miljøkontrol o.l. skal måles i mere end den sædvanlige ene retning, medvindsretningen.

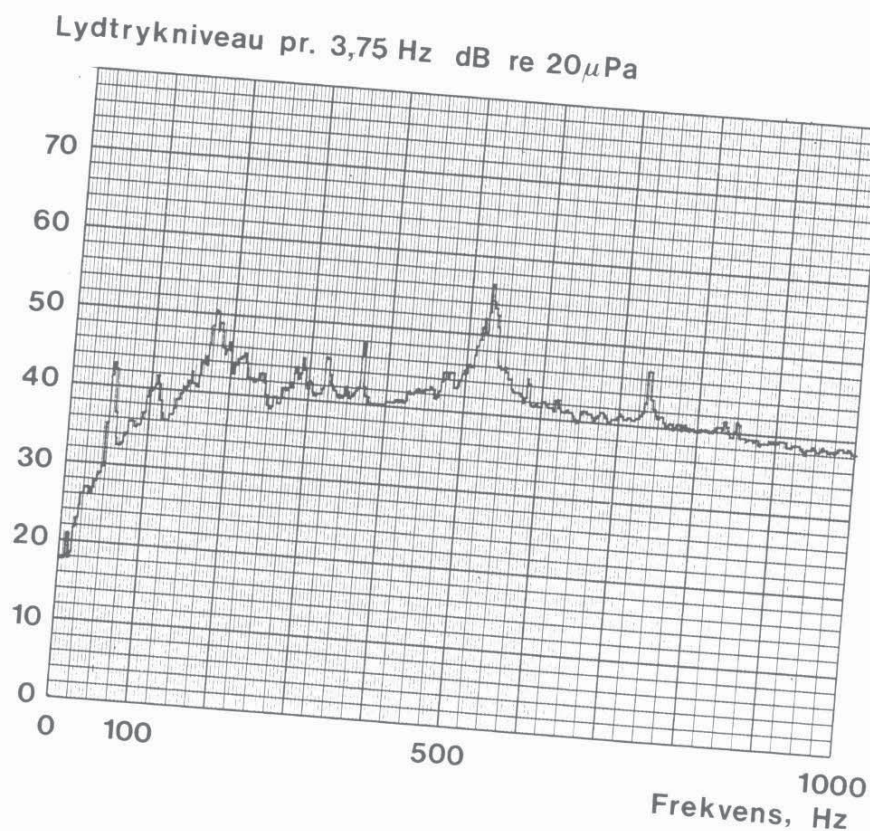
Toneanalyse

I mange tilfælde indeholder støjen fra vindmøller toner, som kan være tydeligt hørbare i nærheden af møllen og måske også i omgivelserne hos de nærmest boende. Tonerne stammer fra møllernes maskinkomponenter, hyppigst gearet, og udstråles fra maskinhuset og muligvis også fra rotorblade og tårn i form af strukturlyd. Det er i praksis ofte vanskeligt ved moderne møller at dæmpe tonerne afgørende, fordi der allerede ved konstruktionen er udført væsentlige støjdæmpende tiltag. I nogle tilfælde har det således været nødvendigt at udskifte vindmøllers gear til et andet individ eller en anden type med lavere støj, hvilket er meget omkostningskrævende.

Der kan ikke siges noget generelt om, hvorvidt tonernes styrke stiger eller aftager som funktion af vindhastigheden; begge dele kan forekomme. Det afhænger af detaljer i konstruktion af vindmøllen og af komponenterne, herunder især af til hvilken belastning, gearets tandformer er optimeret. Ved optimering af gearet til fuld belastning forekommer det således, at tonernes styrke aftager med øgende vindhastighed.

I de fleste tilfælde vil tonestøjen imidlertid virke mest generende hos de omkringboende ved svag vind, når den naturlige baggrundsstøj er lav.

Det er desuden karakteristisk for vindmøller, at styrken af tonerne ikke er konstant, men at den varierer lidt. Som oftest sker variationen i takt med bladpassagen (i reglen 3 gange rotoromdrejningstallet). I Figur 3 vises et smalbandspektrum af støjen tæt ved en vindmølle, midlet over lang tid, som bl.a. viser at støjen indeholder en tone på 530 Hz. Figur 4 er et eksempel på den samme støj, målt med tilnærmet tidsvægtning F på et tidspunkt, hvor tonen var særligt fremtrædende. Figur 5 er en niveauregistrering med tidsvægtning F af støjen i et 3% bredt frekvensbånd omkring den kraftigste tone på 530 Hz. I det viste eksempel er tonens maksimalniveau (målt som middelværdi af de 5 højeste maksimalniveauer) 3,3 dB højere end det niveau, som bestemmes ved analysen over lang tid, jf. Figur 3. For andre vindmøller er der fundet tilsvarende forskelle på mellem 2 og 5 dB.



Figur 3

Smalbåndsanalyse af det A-vægtede støjsignal fra en vindmølle, målt i 40 m afstand og midlet over 400 spektre.

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

STØJ FRA VINDMØLLER

Orientering nr. 22

Jørgen Jakobsen/THP/bm

1994-02-10

Sammenhæng mellem vindhastighed og støj

Typiske kildestyrker af danske vindmøller

Toneanalyse af støj fra vindmøller

Uddybning af Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 304/1991 om støj fra vindmøller

Støj fra vindmøller er et emne, som hyppigt dukker op i den offentlige debat, hvor ønsket om stilhed i det åbne land og rekreative områder fremstilles som modsætning til udbygning af alternativ, vedvarende energi. Det forekommer ofte, at debatten føres uden at der foreligger tilstrækkelige oplysninger om støjbelastningen hos de naboer, som klager over støjen fra vindmøller.

Formålet med dette nummer af "Orientering fra Referencelaboratoriet" er at belyse nogle emner, som har vist sig ikke at være dækket tilstrækkelig tydeligt af Miljøministeriets bekendtgørelse om støj fra vindmøller, nr. 304/1991. Desuden bringes der en oversigt over typiske kildestyrker fra de fleste typer af danske vindmøller.

Måling af støj fra vindmøller

I den første tid blev støjen fra vindmøller målt - så godt det lod sig gøre - i nærheden af de boliger, der var mest udsat for støjen. Der var problemer med at holde styr på møllernes driftstilstand under målingen, og der var store problemer med baggrundsstøjen fra vindens susen i vegetationen. Bedre var det ikke, at de miljøregler, som på daværende tidspunkt var gældende for vindmøller, tillod en støjbelastning på "45 dB eller baggrundsstøjniveauet, såfremt dette er højere", så sammenligningsgrundlaget med det opnåede måleresultat var meget usikkert i sig selv.

Efter at Miljøstyrelsen i april 1988 udsendte sit "Amtsbrev" til amter og kommuner m.fl., kom der mere styr på forholdene. Amtsbrevet indeholder en operationel metode til at måle møllens kildestyrke og en enkel beregningsmetode til at bestemme støjbelastningen i omgivelserne. Med amtsbrevet blev der også indført faste vejledende støjgrænser på 45 dB ved boliger i det åbne land og 40 dB i boligområder, begge dele ved en vindhastighed på 8 m/s i 10 m højde. Amtsbrevet blev i 1991 afløst af Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 304 af 14. maj 1991, som på nogle punkter tydeliggør den fremgangsmåde, der er beskrevet i amtsbrevet.

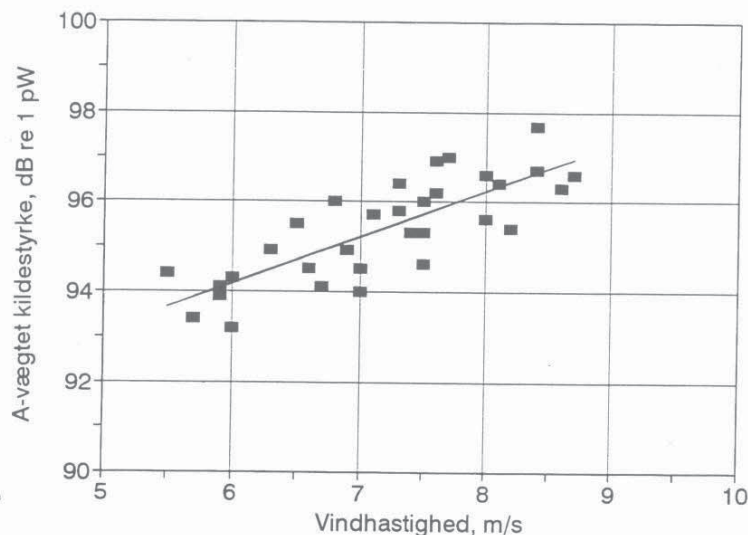
Amtsbrevet - og senere bekendtgørelsen - har medført, at støjmålinger af vindmøller er blevet væsentligt mere éntydige, og at de i de fleste tilfælde udgør et tilstrækkeligt grundlag for miljømyndighedernes behandling af støjsager. Imidlertid giver enkelte detaljer i målemetoden stadig anledning til tvivl og til noget forskellig praksis hos laboratorierne.

De væsentligste af disse punkter belyses i denne Orientering. Herunder inddrages såvel Referencelaboratoriets erfaring med vindmøllemålinger gennem de sidste 10 år som ny viden, der er fremkommet ved arbejdet med at udforme forslag til nye internationale standarder for støjmåling af vindmøller, [1-2].

Måling af vindhastighed

Målemetodens princip er at måle sammenhørende værdier af vindhastigheden og lydtrykniveauet i nærheden af vindmøllen. Metoden er oprindeligt foreslået i 1983, [3]. Ved statistisk analyse (lineær regression) af resultaterne findes lydtrykniveauet, som svarer til referencevindhastigheden 8 m/s, og på grundlag af det beregnes kildestyrken L_{WA} . Det er i denne forbindelse vigtigt, at den målte vindhastighed svarer til den vind, som møllen oplever, og at måleperioderne for vindhastighed og støj er "samtidige". Hvis ikke disse forudsætninger er opfyldt, kan der opstå både egentlige fejl og unødvendig stor usikkerhed på resultaterne.

Den ideelle placering af vindmåleren er i frit, plant og åbent terræn, direkte i modvindsretningen set fra vindmøllen, og i en afstand på 1-2 gange navhøjden. Herved opnås den bedste sammenhæng mellem støj og vindhastighed, som bl.a. viser sig ved, at punkterne for de enkelte målinger ligger tæt på en skrå linie, jf. Figur 1.

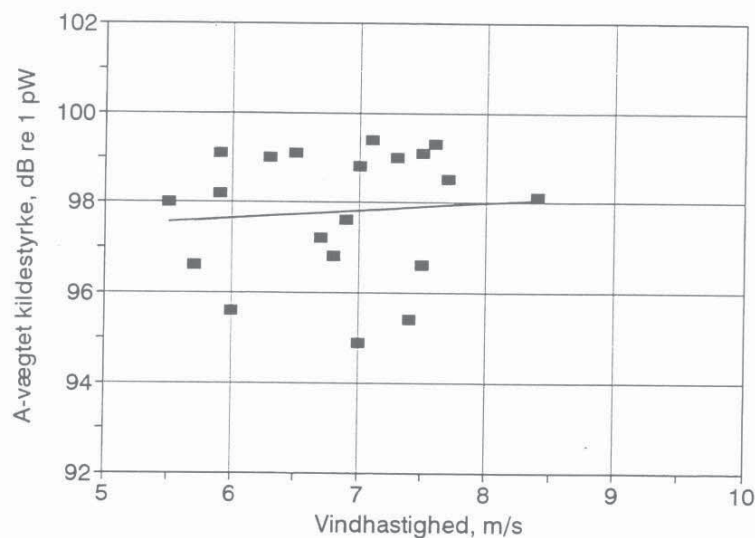


Figur 1

Plot af sammenhørende værdier af vindhastigheden i 10 m højde og den A-vægtede kildestyrke. Kildestyrken (hvert punkt i plottet) er bestemt ud fra lydtrykniveauet på en plade på jorden, 37 m fra vindmøllen, som er 27 m høj. Lydtrykniveauerne er L_{Aeq} [dB re 20 μ Pa] over 1 minut, og vindhastigheden [m/s] er ligeledes midlet over 1 minut.

Hvis vindmåleren er tættere på vindmøllen end 1 gange navhøjden, bliver den målte vindhastighed for lav på grund af møllens bremsende virkning. Tilsvarende vil der måles en for lav vindhastighed, hvis vindmøllen står på toppen af et højdedrag og vindmåleren ved foden af det. I begge tilfælde vil møllens kildestyrke blive for høj; fejlen kan blive adskillige dB afhængigt af lokale forhold.

Anbringes vindmåleren et sted, hvor vinden er påvirket af træer, andre vindmøller, bygninger o.l. bliver den registrerede vindhastighed ligeledes for lav, og desuden ødelægges den tætte sammenhæng mellem den målte vindhastighed og den vind, der påvirker vindmøllen. Som følge heraf bliver også korrelationen mellem vindhastighed og støj dårlig. Det kan overslagsmæssigt antages, at vinden er påvirket i et bredt område bag "læ-elementer" med en udstrækning på 10-20 gange deres højde. Ved at anbringe vindmåleren til siden af vindmøllen eller langt foran den kan det også være vanskeligt at opnå en overbevisende sammenhæng mellem vind og støj. I sådanne tilfælde kan det forekomme, at punkterne fra de enkelte målinger ligger i en sky snarere end på en linie, jf. Figur 2. Vindmåleren må **aldrig** stilles bagved vindmøllen!



Figur 2

Plot af sammenhørende værdier af vindhastigheden 10 m over terræn og den A-vægtede kildestyrke fra en vindmølle. Kildestyrken er energimiddelværdier over 1 minuts perioder og vindhastigheden middelværdier over 1 minut. Der er ikke tydelig sammenhæng mellem de to størrelser.

I tilfælde hvor vindmåleren står langt foran møllen, kan sammenhængen ofte forbedres ved at forskyde midlingsperioderne for vindhastighed, så de svarer til vindhastigheden på møllens plads. Det kan opnås ved at lægge perioderne τ sekunder **tidligere** end perioderne for støjmåling, hvor τ er afstanden fra vindmåler til vindmølle divideret med middelvindhastigheden.

Er der ikke ved målingen er tilstrækkelig god korrelation mellem vindhastighed og støj (som i eksemplet Figur 2), vil den fundne værdi af støjen ved referencevindhastigheden være fejlagtig. Desuden vil plottet af sammenhørende vind/støj-data i alle sådanne tilfælde være misvisende. Hvis vindhastigheden under målingerne i middel har været tæt ved 8 m/s, kan det dog forventes at støjniveauet ved referencevindhastigheden vil være nogenlunde korrekt.

For de fleste typer af danske vindmøller er sammenhængen mellem vind (omkring 8 m/s) og støj, at støjen øges med omkring 1 dB (mellem ca. 0,3 og 1,5 dB) ved en forøgelse af vindhastigheden i 10 m højde på 1 m/s. Ved højere og lavere vindhastigheder kan sammenhængen være en anden, og for møller med omkobling mellem to generatorer forekommer der et markant knæk ved den vindhastighed, hvor omkoblingen sker.

Note: I praksis er der opnået god sammenhæng mellem støj og vindhastighed i 10 m højde for mange sædvanlige typer af vindmøller med navhøjde op til omkring 40 m. For meget store vindmøller er vindhastigheden i 10 m højde ikke så nært sammenknyttet med støjen som vindhastigheden i navhøjde eller den øjeblikkeligt producerede elektriske effekt. Effekten kan omregnes til vindhastighed i navhøjde ved brug af møllens effektkurve. Hvis vindhastigheden måles (eller på anden vis bestemmes) i navhøjde skal den omregnes til den "ækvivalente" vindhastighed i 10 m højde ved brug af den logaritmiske vindlov:

$$v_{10} = v_{\text{nav}} [\ln(10/z_0) / \ln(H/z_0)], \text{ hvor}$$

$\ln$ betegner den naturlige logarimefunktion

v_{10} er den beregnede vindhastighed i 10 m højde

v_{nav} er vindhastigheden i navhøjde

H er navhøjden (i meter), og

z_0 er ruhedslængden, som for de fleste praktisk forekommende situationer er 0,05 m.

Krav til vindmåleren

I modsætning til, hvad der gælder for vindmåling ved almindelige målinger af ekstern støj, er vindmålingen, som indgår i måling af vindmøllestøj, en primær parameter. Fejl på vindhastigheden er direkte årsag til en tilsvarende fejl på støjniveauet ved referencevindhastigheden. Selv om de mest betydende fejl og usikkerheder kommer fra uhensigtsmæssig placering af vindmåleren, er det vigtigt at det benyttede instrument har en tilstrækkelig kvalitet, behandles varsomt, og at det kontrolleres jævnligt. Anemometre er sart mekanik, som ikke er beregnet til at blive transporteret rundt og blive monteret og demonteret med korte mellemrum.

Vindmåleren skal have en nøjagtighed, som er bedre end 0,5 m/s i intervallet 3-20 m/s. Den skal kunne synkroniseres med støjmålingerne, og den skal kontrolleres sporbart med højst 24 måneders intervaller. Efter uheld eller ved mistanke om beskadigelse skal vindmåleren også kontrolleres.

Antal af målinger

Det foreskrives i Miljøministeriets bekendtgørelse, at der skal måles mindst 10 sammenhørende resultater af L_{Aeq} og vindhastighed, begge dele midlet over mindst ét minut. Praksis har vist, at kun i få tilfælde opnås der herved en tilstrækkeligt tydelig sammenhæng mellem vind og støj, som omtalt i foregående afsnit. Ofte vil der i løbet af 10 ét-minutters perioder kun observeres en beskeden variation af vindhastigheden, som i sammenhæng med den sædvanlige, tilfældige spredning på støjdataene giver en usikker sammenhæng mellem de to størrelser.

Der lægges vægt på, at der skal måles i et vindhastighedsinterval på mindst 2 m/s, som indeholder referencevindhastigheden 8 m/s. I almindelighed må det tilrådes, at der måles omkring 30 sammenhørende resultater af L_{Aeq} og vindhastigheden.

Baggrundsstøjen måles med vindmøllen standset i et tilsvarende antal 1-minuts-perioder og så vidt muligt i det samme vindhastighedsinterval. I mange tilfælde vil det ses, at der ikke er særlig god sammenhæng mellem baggrundsstøjen og vindhastigheden.

Både ved måling af vindmøllestøj og baggrundsstøj overspringes perioder, hvor der er intermitterende, forstyrrende støj fra fx fugle, fly, køretøjer eller markredskaber.

Det kan i konkrete tilfælde forekomme, at vindhastigheden under en måling har "lagt sig fast" på en lav værdi. Hvis ikke vinden tiltager indenfor en overskuelig tid, hvorunder man fx kan stoppe vindmøllen og måle baggrundsstøj, må man afbryde målingen og genoptage den en anden dag, hvor det blæser mere. Det er **ikke** muligt at angive en tilstrækkeligt pålidelig værdi af L_{Aeq} ved referencevindhastigheden ud fra målinger indenfor et begrænset interval af lave vindhastigheder.

Målepunkt ved støjmåling

Støjen fra vindmøllen skal måles med mikrofonen anbragt direkte på en stor plade (ca. $1\frac{1}{2}$ m $\times$ 2 m), udlagt på jorden i medvindsretningen i en afstand svarende til 1-2 gange møllens navhøjde. Der kan **ikke** frit vælges en tilfældig måleretning i medvindssiden af vindmøllen, selv om bekendtgørelsens ordlyd godt kan udlægges på den måde. Det er imidlertid et generelt træk, at støjen fra vindmøller udsendes nogenlunde lige kraftigt i alle retninger, så i praksis har mindre afvigelser (op til $\pm 20^\circ$) fra vindretningen ikke betydende indflydelse på resultaterne. I mange tilfælde udviser støjen et tydeligt **minimum** i et snævert vinkelområde omkring rotorplanet, så det skal under alle omstændigheder undgås at måle her.

I de foreliggende udkast til internationale standarder [1,2] er kravet til måleafstand nøje specificeret til navhøjde + rotorradius, hvilket i praksis er tæt ved $1\frac{1}{2}$ gange navhøjden, med en tolerance på $\pm 20\%$. I forslagene indgår, at der udover i medvindsretningen ("referencepunktet") også skal måles i punkter 60° til hver side af medvindsretningen og desuden i modvindsretningen. Det forventes dog ikke, at der i forbindelse med miljøkontrol o.l. skal måles i mere end den sædvanlige ene retning, medvindsretningen.

Toneanalyse

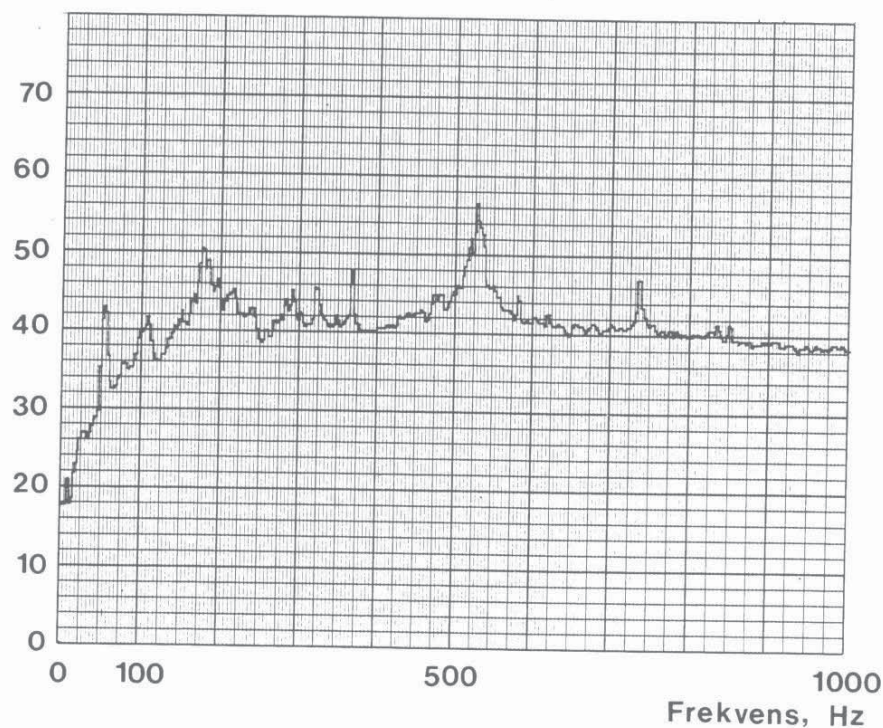
I mange tilfælde indeholder støjen fra vindmøller toner, som kan være tydeligt hørbare i nærheden af møllen og måske også i omgivelserne hos de nærmest boende. Tonerne stammer fra møllernes maskinkomponenter, hyppigst gearet, og udstråles fra maskinhuset og muligvis også fra rotorblade og tårn i form af strukturlyd. Det er i praksis ofte vanskeligt ved moderne møller at dæmpe tonerne afgørende, fordi der allerede ved konstruktionen er udført væsentlige støjdæmpende tiltag. I nogle tilfælde har det således været nødvendigt at udskifte vindmøllers gear til et andet individ eller en anden type med lavere støj, hvilket er meget omkostningskrævende.

Der kan ikke siges noget generelt om, hvorvidt tonernes styrke stiger eller aftager som funktion af vindhastigheden; begge dele kan forekomme. Det afhænger af detaljer i konstruktion af vindmøllen og af komponenterne, herunder især af til hvilken belastning, gearets tandformer er optimeret. Ved optimering af gearet til fuld belastning forekommer det således, at tonernes styrke aftager med øgende vindhastighed.

I de fleste tilfælde vil tonestøjen imidlertid virke mest generende hos de omkringboende ved svag vind, når den naturlige baggrundsstøj er lav.

Det er desuden karakteristisk for vindmøller, at styrken af tonerne ikke er konstant, men at den varierer lidt. Som oftest sker variationen i takt med bladpassagen (i reglen 3 gange rotoromdrejningstallet). I Figur 3 vises et smalbåndsspektrum af støjen tæt ved en vindmølle, midlet over lang tid, som bl.a. viser at støjen indeholder en tone på 530 Hz. Figur 4 er et eksempel på den samme støj, målt med tilnærmet tidsvægtning F på et tidspunkt, hvor tonen var særligt fremtrædende. Figur 5 er en niveauregistrering med tidsvægtning F af støjen i et 3% bredt frekvensbånd omkring den kraftigste tone på 530 Hz. I det viste eksempel er tonens maksimalniveau (målt som middelværdi af de 5 højeste maksimalniveauer) 3,3 dB højere end det niveau, som bestemmes ved analysen over lang tid, jf. Figur 3. For andre vindmøller er der fundet tilsvarende forskelle på mellem 2 og 5 dB.

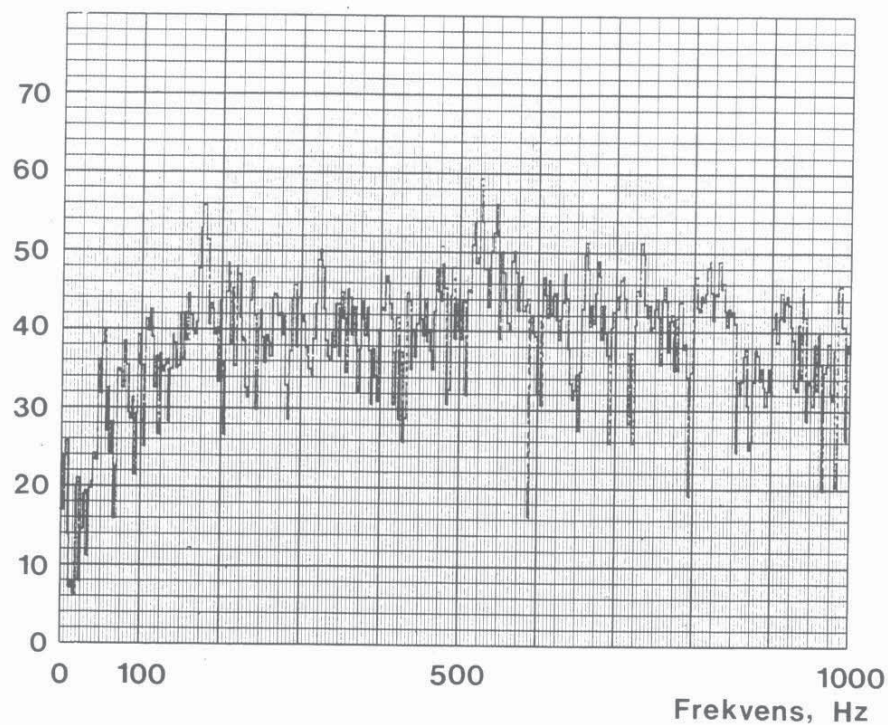
Lydtrykniveau pr. 3,75 Hz dB re $20\mu\text{Pa}$



Figur 3

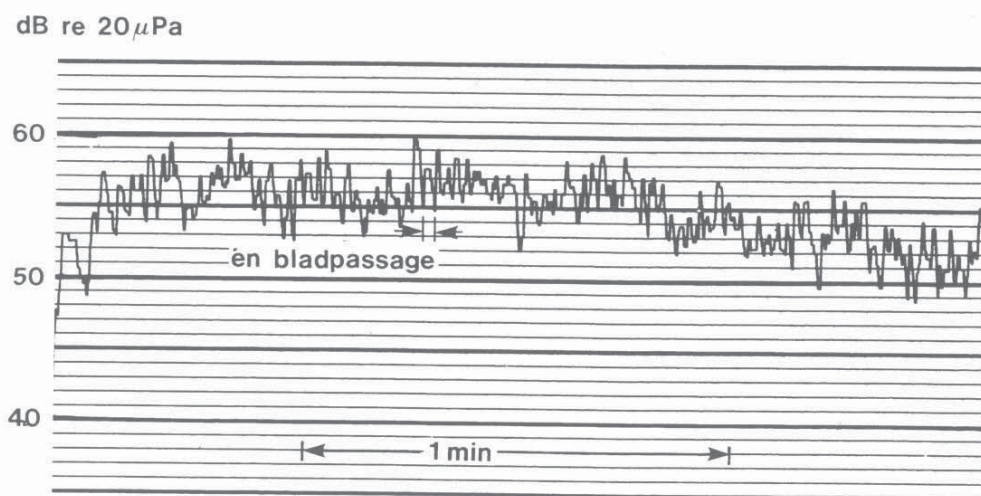
Smalbåndsanalyse af det A-vægtede støjsignal fra en vindmølle, målt i 40 m afstand og midlet over 400 spektre.

Lydtrykniveau pr. 3,75 Hz dB re $20\mu\text{Pa}$



Figur 4

Smalbåndsanalyse af det A-vægtede støjsignal fra den samme vindmølle som i Figur 3, målt i 40 m afstand med tilnærmet tidsvægtning F.



Figur 5

Registrering af lydtrykniveauet i et 3% frekvensområde omkring den kraftigste tone på 530 Hz fra støjen fra en vindmølle, jf. Figur 3 og 4, tidsvægtning F.

Normalt skal toneanalyse af støj fra vindmøller derfor udføres ved bestemmelse af tonens/tonernes maksimalværdier.

Hvis det ved analyse af støjen tæt ved møllen findes, at der ikke forekommer tydeligt hørbare toner, vil det med stor sandsynlighed også gælde i større afstand, hvor den naturlige baggrundsstøj bidrager til at forøge støjniveauet i det kritiske bånd, som maskerer tonerne. Hvis det derimod konstateres, at tonerne er tydeligt hørbare tæt ved møllen, kan det ikke udelukkes, at det også vil være tilfældet i større afstand, fx ved den nærmeste bolig. Det bør derfor undersøges ved at foretage en tilsvarende toneanalyse af støjen i et repræsentativt punkt, 1,5 m over terræn, hvor baggrundsstøjen er svag og det skønnes at tonerne fra vindmøllen er kraftigst. Under målingen skal der være medvind $\pm 45^\circ$ fra vindmøllen imod målepunktet, men da målingen skal udføres i kraftigere vind end sædvanlige ekstern-støjmålinger, er der ingen krav til temperaturgradient eller skydække i denne forbindelse.

Vindhastigheden skal være sådan, at tonen er tydeligst. I de fleste tilfælde betyder det, at vinden skal være forholdsvis svag (6-8 m/s i 10 m højde), men det kan være relevant for møller, hvor tonens niveau er tydeligt kraftigere ved stærkere vind, at analysere støjen ved højere vindhastigheder. Der bør desuden udføres en smalbandsanalyse af baggrundsstøjen, mens møllen er standset, for at belyse hvor stor del af den maskerende støj, der hidrører fra møllens støj og hvor meget, der er baggrundsstøj.

Typiske kildestyrker for danske vindmøller

Referencelaboratoriet skrev i juni 1993 til alle godkendte og akkrediterede støjlaboratorier samt til amternes miljøkontorer for at høre, hvad de kunne oplyse om støjmålinger på vindmøller i konkrete sager. Et mindre antal private godkendte laboratorier og flere offentlige godkendte laboratorier og amter har svaret positivt på henvendelsen. Desuden har Prøvestationen for vindmøller på Risø opgivet støjdata for de vindmøller, som på daværende tidspunkt var systemgodkendt.

Ialt blev der indsamlet over 300 måleresultater af nogenlunde troværdig karakter som har været brugt (eller har kunnet bruges) ved myndighedernes miljøkontrol; flere af resultaterne viste sig dog at være citeret fra den samme måling. I nedenstående tabel er dataene vist på sammentrængt form. For hver (hoved-)type af vindmøller er middelværdien af den A-vægtede kildestyrke anført, og hvor der har foreligget 3 eller flere måleresultater er desuden det højeste og det laveste af resultaterne anført. Det har ikke været muligt på systematisk måde at skelne mellem forskellige modeller af samme hovedtype (fx Mark I-II), i hovedsagen er møller af samme fabrikat opdelt efter nominel effekt.

I de fleste tilfælde hidrører det højeste resultat fra en (særligt) støjende vindmølle inden støjdæmpning, og de lave resultater er fra dæmpede eller særligt støjsvage møller. Det er karakteristisk, at nogle typer af især nyere møller har et ret snævert område for støjdata; det drejer sig

antagelig om møller, der er "født" dæmpede og hvor der er små produktionstolerancer m.h.t. støjudsendelse.

Endelig er det anført, om der var tydelige toner i støjen tæt ved møllen (ca. 1 navhøjdes afstand). De kvalitative bemærkninger i søjlen skal antyde, i hvor mange af tilfældene der var tydelige toner. Imidlertid er toneanalyse et område, som er behandlet yderst forskelligt i de indsamlede data, og i flere tilfælde er det blot nævnt, at der ikke er tydelige toner i møllens omgivelser.

Fabrikat	Type	Effekt [kW]	Højde [m]	Middel L_{WA} (område) [dB re 1 pW]		Toner	Antal
Bonus	11/55	55	20	97,4	92,8 - 100,0	ja	3
Bonus	20/95	95	25	97,6	96,0 - 98,8	sjældent	6
Bonus	30/150	150	25	94,5	91,3 - 98,4	sjældent	7
Bonus	30/150	150	25	93,9	-	nej	(Risø)
Bonus	300	300	30	98,4	95,8 - 99,9	sjældent	8
Bonus	300	300	30	99,9	-	?	(Risø)
Bonus	450	450	35	98,7	-	?	2
Danwin	23	180	30	99,4	97,1 - 102,0	ja	3
Danwin	24	200	31	100,0	-	ja	1
Danwin	27	225	31	98,5	-	ja	2
DWP	90	90	25	96,3	-	nej	2
DWP	D 150 S	150	31	98,4	94,0 - 102,6	sjældent	12
DWT	Windane 31	300	32	104,2	-	ja	1
DWT	Windane 34	400	32	102,8	98,0 - 106,5	ofte	20
Dencon	200	200	31,5	99,0	-	nej	1
Micon	M 95	95	23	96,9	-	ja	1
Micon	M 570/200	200		97,0	-	nej	(Risø)
Micon	M 530/250	250	30	97,6	95,9 - 100,0	nej	3
Micon	M 450/250	250	30	97,3	96,2 - 99,0	nej	4
Micon	M 750	400	35	99,7	-	nej	1
Nordtank		45-55	20	94,7	93,4 - 96,1	sjældent	4
Nordtank		99	26	100,5	99,1 - 103,0	ja	5
Nordtank	NTK 130 F	130	26	101,9	96,4 - 104,2	ja	8
Nordtank	XLR 150	150	31	97,3	94,4 - 99,7	sjældent	11
Nordtank	300 F	300	31	99,4	98,4 - 101,3	nej	3
Nordtank	300 F	300	31	101,3	-	nej	(Risø)
Nordtank	500/37	500	35	99,7	-	nej	(Risø)
Nordex		150	30	99,0	-	nej	1
Nordex		225	31	102,0	-	ja	1
Nordex		250	36	100,6	-	?	1

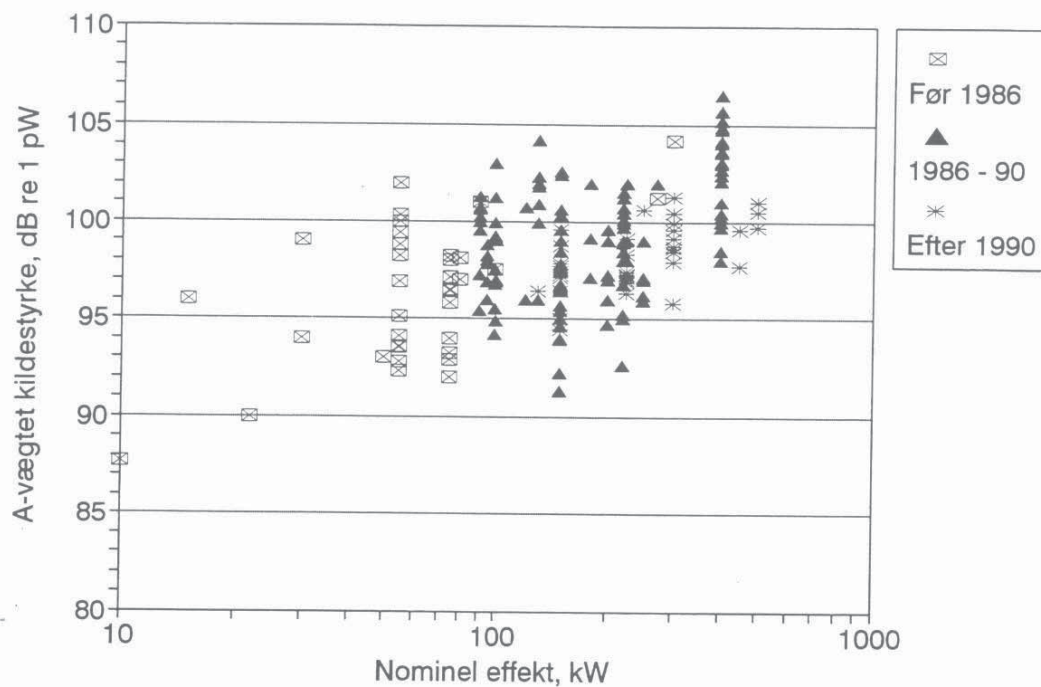
Tabel 1 (forsættes)

Fabrikat	Type	Effekt [kW]	Højde [m]	Middel L_{WA} (område) [dB re 1 pW]		Toner	Antal
Vestas	V-10/30	30	18	94,0	-	ja	1
Vestas	V-15/55	55	23	96,1	92,3 - 100,2	ofte	6
Vestas	V-17/75	75	23	97,0	95,8 - 98,2	ca. ½	9
Vestas	V-19/90	90	23	100,4	99,5 - 101,3	ofte	6
Vestas	V-20/100	100	24	98,0	-	nej	2
Vestas	V-27/225	225	31,5	97,3	96,3 - 99,4	nej	10
Vestas	V-27/225	225	31,5	97,3	-	nej	(Risø)
Vestas	V-39	500	40,5	100,8	-	nej	(Risø)
Wind World	2100	120	24	98,4	-	ja	2
Wind World	2320	150	30	97,0	95,7 - 97,8	ca. ½	5
Wind World	2800	150	30	95,4	-	nej	(Risø)
Wind World	2500	220	31	98,7	92,6 - 101,5	ofte	16
Wind World	3700	500	35	99,7	-	nej	1
Wincon	W 99 XT	100	27	96,7	95,5 - 97,5	ca. ½	5
Wincon	W 200/26	200	30	97,8	94,7 - 99,6	sjældent	4
Wincon	W 200/26	200	30	99,6	-	nej	(Risø)
Wind Matic		55	20	102,0	-	ja	1
Wind Matic	17 S	75	25	93,7	92,0 - 95,8	sjældent	5
Wind Matic	19 S	100	30	94,6	-	ca. ½	2
Wind Matic	20 S	130	-	96,0	-	?	1
Vindsyssel		150	31	96,8	-	nej	1
Vindsyssel		250	-	102,0	-	?	1
Smedemester		22	12	90,0	-	?	1
Smedemester		80-99	24	98,4	97,0 - 101,0	ofte	4
K.M.Mølle		10	17	87,7	-	nej	1
Wind Master	(1981)	30	18	99,0	-	?	1
Selvbygger		50	18	93,0	-	ja	1
Kuriant	(1982)	15	18	96,0	-	ja	1
Hansholm		75	25	97,0	-	?	1
Reymo		55	24	97,0	-	nej	1

Tabel 1 (forsat)

Data for støjen fra danske vindmøller. Oplysningerne er baseret på ca. 300 måleresultater, indsamlet og behandlet af Referencelaboratoriet i juni 1993. (Risø) angiver den måling, som indgår i vindmøllens systemgodkendelse.

Figur 6 viser kildestyrken af samtlige vindmøller som funktion af deres nominelle effekt. I figuren er data delt op i tre grupper: ældre end 1986; 1986-1990 og nyere end 1990. Det er laboratoriets indtryk, at der er sket en systematisk reduktion af støjen fra vindmøller gennem perioden, og at den er på op imod 10 dB for møller med sammenlignelig størrelse. Figuren illustrerer i nogen grad dette forhold, men tendensen drukner i den meget store spredning, der er mellem støjen fra forskellige møller af samme størrelse (og type, jf. Tabel 1).



Figur 6

Illustration af kildestyrken af danske vindmøller [dB re 1 pW], vist som funktion af den nominelle elektriske effekt [kW]. Data er indsamlet af Referencelaboratoriet i juni 1993.

Referencer

- [1] IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing. 4 - Acoustics. Measurement of Noise from Wind Turbines. Third edition, 6. draft October 1993. Tidligere udgave: 2. Edition 1988.
- [2] Draft IEC Standard. Acoustic Noise Measurement Techniques for Wind Turbine Generator Systems. Committee draft August 1993; TC 88(Secretariat)30. Forslaget er under fortsat ændring.
- [3] Andersen, B.; Jakobsen, J.: "Noise Emission from Wind Turbine Generators. A measurement Method". Rapport nr. 109 fra Lydteknisk Institut, Lyngby, december 1983.