



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Støj fra vindmøller om natten

Miljøprojekt nr. 1415, 2012

Titel:

Støj fra vindmøller om natten

Redaktion:

Kaj Dam & Birger Plovsing
DELTA

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:**Illustration:****År:**

2012

Kort:**ISBN nr.**

978-87-92779-91-5

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

FORORD	4
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	5
SUMMARY AND CONCLUSIONS	7
1 INDLEDNING	9
2 PRINCIPPER FOR METEOROLOGISKE FORHOLDS INDFLYDELSE PÅ STØJ FRA VINDMØLLER	10
2.1 GENERELT	10
2.2 ATMOSFÆRENS STABILITET	11
2.3 BETYDNINGEN AF ATMOSFÆRENS STABILITET	12
2.4 BEREGNING AF VIND- OG TEMPERATURPROFIL	13
3 ANALYSE AF METEOROLOGISKE FORHOLDS BASERET PÅ METEOROLOGISKE MÅLEDATA	15
3.1 BAGGRUND	15
3.2 ANALYSE AF DATA FRA SYNOPTISKE VEJRSTATIONER	15
3.3 ANALYSE AF MÅLTE VINDHASTIGHEDER PÅ HØVSØRE	23
3.4 ANALYSE AF VIRKNINGEN PÅ LYDUDBREDELSEN	27
3.5 SAMMENFATTENDE BEMÆRKNINGER	28
4 MÅLINGER	30
4.1 RESULTATER FRA KILDESTYRKEMÅLINGER	30
4.2 VURDERING AF STØJENS KARAKTER	34
4.2.1 <i>Metoder til vurdering af støjens pulserende karakter</i>	35
4.2.2 <i>Støjens pulserende karakter for en enkelt vindmølle</i>	36
4.2.3 <i>Støjens pulserende karakter med flere vindmøller i drift samtidig</i>	42
4.3 AFPRØVNING AF VINDMØLLEBEKENDTGØRELSENS BEREGNINGSMETODE	43
4.4 SAMMENFATTENDE BEMÆRKNINGER TIL STØJMÅLINGER	44
5 KONKLUSION	46
6 REFERENCER	48

Forord

Miljøstyrelsen bad i 2010 DELTA om at gennemføre en undersøgelse af indflydelsen af de meteorologiske forhold på vindmøllestøj om natten. Både i Danmark og i udlandet har naboer til vindmøller påpeget, at støj fra vindmøller opleves kraftigere om natten end om dagen. Nogle undersøgelser i Nederlandene peger på, at vejsituationer med øget atmosfærisk stabilitet om natten kan medføre, at der forekommer større vindhastigheder i vindmøllers navhøjde end det, der forventes i forhold til vindhastigheden nær terrænets overflade. Effekten heraf er, at der måles større støjemission om natten end om dagen fra høje vindmøller, når der ved støjemissionsmålingen tages udgangspunkt i den målte vindhastighed i 10 m højde. Desuden peges der på, om den ændrede vindhastighedsprofil kan betyde, at møllens støjudsendelse ved samme producerede effekt er højere om natten, og at støjen kan have en anden karakter, fx tydeligere pulserende karakter end om dagen.

DELTA's undersøgelse er baseret på behandling af eksisterende meteorologiske data, hvor det belyses i hvilket omfang der optræder betydelige ændringer i vindhastighedsprofilen om natten. Desuden er der gennemført målinger af vindmøllers kildestyrke både i dag- og natperioden, hvor der samtidig er registreret relevante meteorologiske parametre. Ud over kildestyrken pr. 1/3 oktav ved de relevante vindhastigheder, er forekomsten af støj med særlig karakter (fx pulsationer) undersøgt.

DTU Risø har stillet meteorologiske data fra målestationer i testcentret i Høvsøre til rådighed for undersøgelsen. Under arbejdet med undersøgelsen har DELTA inddraget resultater fra yderligere måleserier i analyserne.

Sammenfatning og konklusioner

I forbindelse med beregning af lydudbredelse fra forskellige støjkluder som f.eks. vindmøller, er det velkendt, at den atmosfæriske stabilitet påvirker både vindhastighedens og lufttemperaturens variation med højden over terræn.

Formålet med denne undersøgelse er at undersøge, om der forekommer meteorologiske forhold om natten, der bevirker, at ændringer i vindhastighedsgradienten mellem vindmøllens navhøjde og 10 m over terræn giver anledning til højere støjmission, end de kildestyrkedata der lægges til grund for anmeldelse af en vindmølle i overensstemmelse med vindmøllebekendtgørelsen. Det undersøges ligeledes, om der forekommer meteorologiske forhold om natten, der bevirker, at en vindmøllens støjudsendelse er anderledes end om dagen, og om disse forhold bevirker, at støjen fra vindmøller udbreder sig med mindre dæmpning end forudsat i vindmøllebekendtgørelsen. Undersøgelsen er baseret på målinger af støj fra vindmøller og målinger af meteorologiske parametre.

Det kan konkluderes, at der, som også beskrevet i litteraturen, er større forskel mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde om natten, end der er om dagen. Baggrunden for denne forskel er, at vindhastigheden i 10 m højde generelt er lavere om natten end om dagen, mens vindhastigheden i navhøjden viser meget små forskelle fra dag til nat. På baggrund af sidstnævnte kan det også konkluderes, at den faktiske støjmission fra vindmøller ikke kan forventes at være større om natten end om dagen. Når vindmøllens kildestyrke måles i sammenhæng med den producerede effekt eller vindhastigheden målt i navhøjde, som er Miljøstyrelsens anbefalede metode, måles den faktiske støjmission korrekt både om dagen og om natten. Men hvis målingen baseres på den målte vindhastighed i 10 m højde, kan støjmissionen blive overvurderet ved måling om natten, fordi vindhastigheden i 10 m højde er forholdsvis lavere end om dagen mens den udsendte støj er uændret.

De fundne forskelle kan forklares af ændringer i atmosfærens stabilitet fra dag til nat. Denne variation mellem dag og nat er årstidsafhængig, men påvirker kun de fundne forskelle i 10 m højde, mens den har en meget beskeden indflydelse på vindhastighederne i navhøjden. Ligeledes er der ikke fundet indikation af betydende forskelle på kystnære og ikke-kystnære områder ud over de forskelle, som kan forklares af en øget gennemsnitsvind.

Den lavere vindhastighed i 10 m højde under stabile natlige forhold forventes også at give en relativ lavere baggrundsstøj hos naboerne til vindmøller, hvorved støjen kan opfattes tydeligere. Sandsynlighederne for, at der i de 5 betragtede kystnære og ikke-kystnære målepositioner forekommer både stabile vejrforhold med den relativt lavere baggrundsstøj og vindhastigheder i navhøjde, hvor vindmøllen udsender støj svarende til en kildestyrke gældende for 8 m/s ligger mellem 2 og 6 %.

Det konkluderes, at variationen af de meteorologiske forskelle fra dag til nat er uden reel betydning for lydudbredelsen ($\pm 0,3$ dB) under medvindsforhold i afstande fra minimumsafstanden for opstilling af vindmøller og ud til mindst 2000 m. Målemetoden, der er beskrevet i vindmøllebekendtgørelsen til bestemmelse af kildestyrke, er ikke påvirket af de meteorologiske variationer. Anvisningen til beregning af støj i nabopositioner er ligeledes afprøvet under stabile vejrforhold med god overensstemmelse med foretagne målinger.

Ud fra målinger foretaget om natten i større afstande fra vindmøller er der fundet eksempler på den karakteristiske pulserende variation af støjen på op til 5-7 dB af det øjeblikkelige støjniveau. Denne pulserende karakter er også konstateret ved målinger under neutrale vejrforhold om dagen med samme variationsstørrelse

omend ikke i så lange perioder. Der er ikke konstateret en øget pulsation som følge af samtidig drift af to eller flere vindmøller.

Summary and conclusions

For noise propagation from different noise sources like wind turbines it is well known that the atmospheric stability influences both wind speed and air temperature variation with height above terrain.

The purpose of this work is to investigate if meteorological conditions at night causing a change in the wind speed gradient between wind turbine hub height and 10 m above terrain cause higher noise emission from the wind turbine than the data used for notification of the wind turbine as required in the Danish noise regulations. It is also investigated if meteorological conditions occurring at night give rise to a different character of the emitted noise from wind turbines and if these conditions cause sound propagation to be attenuated less than during daytime. The investigation is based on noise measurements on wind turbines as well as measurements of meteorological parameters.

It is concluded that the difference between wind speed at hub height and at 10 m height is larger during night time than during the day. This conclusion is in agreement with the existing literature. The reason is that wind speed at 10 m height in general is lower at night than during the day while the wind speed at hub height shows very little diurnal variation. Based on the latter it can be concluded that the actual noise emission from wind turbines is not expected to be higher at night than during the day. When the noise emission from a wind turbine is measured in connection with the produced power or the hub height wind speed, which is the recommended method, the actual noise emission is correctly measured both at day and at night. But if the measurement is made in connection with the measured wind speed at 10 m height, the noise emission at night can be overestimated because the wind speed at 10 m is relatively lower at night while the actual noise emission is unchanged.

The observed differences in wind speed profiles can be explained by changes in atmospheric stability from day to night. This variation is depending on the time of year, but seasonal variation is seen only to influence the conditions at 10 m height whereas little difference is seen at hub height. No indication of influential differences is seen between locations near the coast compared to inland locations apart from differences caused by a higher mean wind speed at the coast.

The reduced wind speed at 10 m height during stable night conditions is expected to cause a lower background noise level at the residents close to wind turbines so the noise is better audible. The probability of stable meteorological conditions at night causing a relative lower background noise level at the same time as the wind at hub height causes the wind turbine to emit noise corresponding to the 8 m/s condition mentioned in the Danish regulations is between 2 % and 6 %, based on data from 5 meteorological stations.

The variation of meteorological differences from day to night has no significant influence on the sound propagation (± 0.3 dB) during downwind conditions at distances from the minimum distances for erection of wind turbines out to at least 2000 m. The measurement method described in the Danish regulation for determination of the sound power levels is not influenced by the meteorological variations. The specified method for calculation of the noise propagation from wind turbines to residences close to the turbines is validated by measurements also for stable weather conditions at night.

Measurements carried out at night at larger distances from wind turbines show examples of the characteristically pulsating noise with variations of the instantaneous noise level of up to 5-7 dB. The pulsating character is also seen for comparable measurements at neutral weather conditions during daytime with the same amount of variation although not for as long periods as during the night. No

examples were found where the operation of several wind turbines at the same time increased the pulsation.

1 Indledning

Denne rapport indeholder resultatet af en undersøgelse af de meteorologiske forholds betydning for vindmøllestøj. Undersøgelsen skal belyse, i hvilket omfang de meteorologiske forhold har betydning for vindmøllestøj i omgivelserne med særlig vægt på forskelle mellem dag og nat.

Konkret har Miljøstyrelsen ønsket følgende punkter belyst:

- A. Forekommer der meteorologiske forhold om natten, der bevirker, at vindhastighedsgradienten mellem vindmøllens navhøjde og 10 m over terræn giver anledning til højere støjemission, end det forudsættes fx i vindmøllebekendtgørelsen?
- B. Forekommer der meteorologiske forhold om natten, der bevirker, at en vindmølles støjudsendelse er anderledes, end den måles om dagen?
- C. Forekommer der meteorologiske forhold om natten, der bevirker, at støjen fra vindmøller udbreder sig med mindre dæmpning end forudsat i vindmøllebekendtgørelsen?

Med henblik på at belyse disse punkter indeholder rapporten i Afsnit 2 en gennemgang af de principielle, teoretiske forhold i forbindelse med de meteorologiske forholds indflydelse på forskelle i støj fra dag til nat. Belysningen er baseret på eksisterende litteratur. Afsnit 3 indeholder en analyse baseret på tilgængelige meteorologiske data med henblik på at kvantificere betydningen af forskellene i de meteorologiske forhold, og Afsnit 4 indeholder resultatet af målinger udført på vindmøller.

2 Principper for meteorologiske forholds indflydelse på støj fra vindmøller

2.1 Generelt

Det er almindeligt kendt, at lydudbredelsen fra en støjkilde, f.eks. en vindmølle, påvirkes af de meteorologiske forhold. Virkningen forsøges ofte udtrykt ved simple meteorologiske parametre, der kan fås fra meteorologiske klimastationer, som vindhastighed og vindretning målt 10 m over terræn, ligesom det ofte antages, at lufttemperaturens ændring med højden over terræn har begrænset indflydelse på lydudbredelsen. Dette er en rimelig antagelse i tilfælde med en neutral atmosfære og specielt ved de forholdsvis små afstande fra vindmøllen, der anvendes i forbindelse med kildestyrkemålinger. Det er dog også kendt, at både vindhastighedens og temperaturens ændring med højden over terræn ikke er den samme for stabile og ustabile atmosfærer, som i praksis forekommer oftere end neutrale atmosfærer.

For vindmøller vil de meteorologiske forhold ud over at have betydning for lydudbredelsen også have betydning for selve støjemissionen, idet vindens hastighed omkring møllens vinger er med til at bestemme den udsendte støj. I vindmøllebekendtgørelsen fra 2006 [1], som er baseret på standardmetoden IEC 61400-11 fra 2002 [2], relateres kildestyrken til vindhastigheden i møllens navhøjde bestemt ud fra møllens effektkurve, men denne hastighed omregnes til en hastighed i 10 m højde, under antagelse af vindprofilen er logaritmisk med en ruhedslængde på 0,05 m. Sammenhængen mellem vinden i navhøjden og i 10 m højde kan udtrykkes, som vist i Formel (1), hvor u_{10} er vinden i 10 m højde, z_0 er ruhedslængden (=0,05 m) og $u(z)$ er vindhastigheden i højden z .

$$u(z) = u_{10} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (1)$$

Hvis den faktiske vindprofil under målingerne ikke er logaritmisk, blandt andet fordi atmosfæren ikke er neutral, eller hvis z_0 ikke er 0,05 m, vil den beregnede vindhastighed i 10 m højde ikke svare til den faktiske vindhastighed i 10 m højde, men den vindhastighed, der ville have været, hvis standardbetingelserne var til stede. I forbindelse med anvendelse af lydeffektdata i støjregninger er dette et mindre problem, da sammenhængen mellem den faktiske vindhastighed i navhøjden og den estimerede i 10 m højde er veldefineret. Man kan således ud fra de angivne værdier i 10 m højde under standardbetingelser altid regne ud, hvad vindens hastighed har været i navhøjden under målingerne og derfor anvende de lydeffektdata, der svarer til den "rigtige" hastighed i navhøjden.

Et større problem er det, hvis metoden for møller uden kendt effektkurve anvendes, som beskrevet i bekendtgørelsen, især hvis metoden benyttes for høje vindmøller. Ved denne type målinger måles vindhastigheden i en højde, som skal være mindst 10 m, og som i praksis ofte vil være 10 m. Metoden giver mulighed for at korrigere

for en ruhedslængde, der afviger fra 0,05 m. Hvis vindprofilen derimod afviger fra en logaritmisk profil, er den faktisk forekommende hastighed i navhøjden ikke veldefineret, hvilket er uheldigt, da det er denne hastighed, der bestemmer støjemissionen.

Rudolphi [3] har undersøgt sammenhængen mellem støjen fra en 58 m høj mølle og vindhastigheden målt med et anemometer dels i 10 m højde, dels i navhøjden. Når vindhastigheden blev målt i 10 m højde, viste undersøgelsen en dårlig korrelation mellem vindhastigheden og støjniveauet, og der blev observeret et 5 dB højere støjniveau om natten ved 8 m/s i forhold til om dagen. Når vindhastigheden i stedet blev målt i navhøjden, viste undersøgelsen en god korrelation mellem vindhastigheden og støjniveauet og ingen systematisk forskel i støjniveau fra dag til nat ved 8 m/s.

G. P. van den Berg [4] beskriver de principielle forhold omkring de meteorologiske forholds indflydelse på støjemissionen med særlig vægt på den atmosfæriske stabilitets indflydelse og på dennes variation fra dag til nat. For en 98 m høj mølle viser han, at forholdet mellem vindhastigheden i 10 m højde og i navhøjden kan være 2,5 gange i meget stabil atmosfære om natten og 1,2 gange i en ustabil atmosfære om dagen. Til sammenligning vil det samme tal for en neutral atmosfære med en logaritmisk profil være 1,4. Hans målinger viser, at forskellen i støjniveau fra dag til nat kan være så stor som 15 dB ved samme målte referencevindhastighed i 10 m højde.

Før konsekvensen af de ovennævnte forskelle i støjniveau ved samme vindhastighed målt i 10 m højde om dagen og om natten kan vurderes, bør det nærmere undersøges, om der også er systematiske forskelle i denne vindhastighed fra dag til nat.

De følgende afsnit indeholder en beskrivelse af de principielle forhold om atmosfærens stabilitet og dens betydning for støjniveauet.

2.2 Atmosfærens stabilitet

Atmosfærens stabilitet afhænger af, om der transporteres varmeenergi nedad eller opad i atmosfæren, hvilket sker, når lufttemperaturen henholdsvis stiger og falder med højden over jorden. Årsagen til transporten af varmeenergi er jordens optagelse af solens varme om dagen og afgivelse af varme om natten. Denne proces påvirkes af vindens styrke og af skydækket. Atmosfærens stabilitet opdeles grundlæggende i en neutral, stabil og ustabil atmosfære, men for de sidstnævnte vil man derudover normalt skelne mellem moderate eller meget stabile/ustabile atmosfærer.

Neutral atmosfære: En neutral atmosfære forekommer, når der ikke er nogen lodret varmetransport i atmosfæren. En neutral atmosfære kan forekomme kortvarigt omkring solopgang og solnedgang. For en neutral atmosfære falder temperaturen - 0,01 °C pr. meters forøgelse af højden over terræn. En næsten neutral atmosfære kan forekomme i forbindelse med overskyet vejr, hvor skydækket reducerer solindstrålingen om dagen og varmeudstrålingen om natten, og specielt med stigende vindstyrke.

Stabil atmosfære: En stabil atmosfære forekommer, når luftens temperatur stiger eller aftager meget langsomt med højden ($> -0,01$ °C/m). Dette forekommer typisk om natten. I en stabil atmosfære vil luftens lodrette bevægelser hæmmes, hvilket reducerer den atmosfæriske turbulens.

Ustabil atmosfære: En ustabil atmosfære forekommer, når luftens temperatur falder hurtigt med højden ($< -0,01$ °C/m). Dette forekommer typisk om dagen og særligt i skyfrit vejr med stærk solindstråling. I en ustabil atmosfære vil luftens lodrette bevægelser foregå let, hvilket øger den atmosfæriske turbulens. Der udvikles let termik og byger.

Der er mulighed for at kvantificere stabiliteten ved anvendelse af den såkaldte Monin-Obukhov-længde L . Hvis L er meget stor (∞), er atmosfæren neutral. Hvis L er positiv, er atmosfæren stabil, og stabiliteten stiger med faldende værdi af L . Hvis L er negativ, er atmosfæren ustabil, og graden af ustabilitet stiger, jo nærmere L kommer til nul. I stedet for at anvende L kan det være praktisk at anvende den inverse Monin-Obukhov-længde L^{-1} , når stabiliteten skal kvantificeres. En meget negativ værdi af L^{-1} indikerer en meget ustabil atmosfære, som bliver mindre og mindre ustabil, når L^{-1} øges, indtil $L^{-1} = 0$ angiver en neutral atmosfære. Når L^{-1} stiger derudover (positiv værdi), bliver atmosfæren stabil, og stabiliteten stiger med værdien af L^{-1} . Herved bliver atmosfærens stabilitet en monoton funktion af L^{-1} fra en meget ustabil atmosfære til en meget stabil atmosfære.

2.3 Betydningen af atmosfærens stabilitet

I en stabil atmosfære, som typisk forekommer om natten specielt i klart vejr, kan vindens hastighed i en vindmøllens navhøjde være højere end observeret i neutral atmosfære ved samme vindhastighed i 10 m højde. I en ustabil atmosfære, som typisk forekommer om dagen specielt i klart vejr, kan vindens hastighed i vindmøllens navhøjde tilsvarende være lavere end observeret i neutral atmosfære med samme vindhastighed i 10 m højde. Da vindmøllens støjudsendelse afhænger af vindhastigheden omkring møllens vinger, vil man derfor opleve, at den udsendte støj (kildestyrken) ved en konstant vindhastighed i 10 m højde vil variere med atmosfærens stabilitet. Den største forskel mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde forekommer om natten.

Vindhastighedens og lufttemperaturens variation med højden vil desuden påvirke lydudbredelsen, idet denne bestemmes af summen af vindhastighedskomponenten i lydudbredelsesretningen og lydhastigheden. Vindhastighedskomponenten bestemmes af vindhastigheden og vindens retning i forhold til lydudbredelsesretningen, mens lydhastigheden bestemmes af lufttemperaturen. Den atmosfæriske stabilitet vil derfor også påvirke lydudbredelsen, og en stabil atmosfære (om natten) giver normalt anledning til de højeste støjniveauer ved naboer til en støjkilde (når kildestyrken er konstant).

DELTA har arbejdet med indflydelsen af atmosfærens stabilitet på lydudbredelsen i forbindelse med det europæiske projekt Harmonoise (2001-2004). DELTA har senere i en nordisk arbejdsgruppe, nedsat med henblik på at revidere Nord2000-metoden, så den var egnet til beregning af støj fra vejtrafik, gjort brug af de inden for Harmonoise udarbejdede metoder til beregning af årsmiddelværdi af støjen. I 2009 gennemførte DELTA et projekt [5], som skulle vise, at Nord2000 er anvendelig til beregning af støj fra vindmøller. I dette projekt blev betydningen af atmosfærens stabilitet på lydudbredelsen medtaget (der forekom dog ikke målinger om natten). De atmosfæriske forholds betydning for støjniveauet er grundigt berørt i litteraturen (f.eks. [4]), og der eksisterer i dag tilstrækkelig viden til at belyse betydningen af atmosfærens stabilitet på støjudbredelse fra vindmøller på teoretisk grundlag. I Afsnit 2.4 gennemgås de teoretiske metoder, der vil blive anvendt inden for dette arbejde. De teoretiske resultater bør dog valideres med målinger af vind- og temperaturprofiler i hele det højdeområde, som er af betydning for både støjgenereringen og lydudbredelsen (mindst op til 100 m). Resultatet af målinger vil blive omtalt i Afsnit 3.

2.4 Beregning af vind- og temperaturprofil

For på et teoretisk grundlag at kunne undersøge betydningen af atmosfærens stabilitet på vindmøllens kildestyrke og på lydets udbredelse må vindhastighedens og temperaturens variation med højden for en given atmosfærisk stabilitet kunne beregnes. Kildestyrken vil afhænge af vindhastigheden omkring navhøjden, mens lydudbredelsen vil afhænge af den effektive lydhastigheds variation med højden over terrænet. For at bestemme den effektive lydhastighed $c(z)$ som funktion af højden over terræn z må vindhastigheden $u(z)$ og temperaturen $t(z)$ først bestemmes.

Dette gøres ved at fastlægge atmosfærens stabilitet udtrykt ved Monin-Obukhov-længden L . Monin-Obukhov-længden kan enten måles eller bestemmes indirekte, f.eks. med Klug-Manier metoden beskrevet i [6], hvor L bestemmes ud fra simple meteorologiske data som vinden i 10 m højde og skydækket i ottendedele. Når L kendes, kan vind- og temperaturprofilen bestemmes ved hjælp af de såkaldt Businger-Dyer-profiler, som vist i det følgende.

Vindhastigheden $u(z)$ som funktion af højden bestemmes af Formel (2) for en neutral eller stabil atmosfære ($L > 0$),

$$u(z) = \frac{u_*}{0,4} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + 4,7 \frac{z}{L} \right) \quad (2)$$

og af Formel (3) for en ustabil atmosfære ($L < 0$). Som det ses af Formel (2)-(5), er det logaritmiske led i Businger-Dyer-profilerne ændret fra $\ln(z/z_0)$ til $\ln(z/z_0 + 1)$ af beregningstekniske grunde i de akustiske beregninger for at undgå diskontinuiteten i differentialkvotient ved $z = z_0$.

$$\begin{aligned} u(z) &= \frac{u_*}{0,4} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + \psi_1 \right) \\ \psi_1 &= 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} \\ x &= \left(1 - 15 \frac{z}{L} \right)^{0,25} \end{aligned} \quad (3)$$

Den potentielle temperatur $\theta(z)$ som funktion af højden bestemmes af Formel (4) for en neutral eller stabil atmosfære ($L > 0$),

$$\theta(z) = \theta_0 + 0,74 \frac{\theta_*}{0,4} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + 4,7 \frac{z}{L} \right) \quad (4)$$

og af Formel (5) for en ustabil atmosfære ($L < 0$).

$$\begin{aligned} \theta(z) &= \theta_0 + 0,74 \frac{\theta_*}{0,4} \left(\ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + \psi_2 \right) \\ \psi_2 &= \ln \left(\frac{1+y}{2} \right) \\ y &= \left(1 - 9 \frac{z}{L} \right)^{0,5} \end{aligned} \quad (5)$$

Den potentielle temperatur θ er en trykkorrigeret temperatur, der beregnes som vist i Formel (6), hvor $t(z)$ er lufttemperaturen i højden z , g er tyngdeaccelerationen $9,81 \text{ ms}^{-2}$, og c_p er den specifikke varmekapacitet ved konstant tryk $1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Ved anvendelse af den potentielle temperatur vil temperaturgradienten dt/dz , som er ca. -0,01 K/m for en neutral atmosfære, svare til en gradient $d\theta/dz = 0$.

$$\theta(z) = t(z) + g/c_p \quad z = t(z) + 0,009761z \quad (6)$$

Når L og z_0 er valgt, kan u_* bestemmes ud fra vindhastighed u i en given højde og θ_* og θ_0 ud fra temperaturen i to højder. Kendes temperaturen kun i en højde, kan θ_* som et groft estimat bestemmes ud fra Formel (7).

$$\theta_* = 5 / L \quad (7)$$

Nu kan den effektive lydhastighed $c(z)$ så bestemmes ud fra Formel (8), hvor $u(z)$ og $\theta(z)$ beregnes som vist ovenfor, og ν er vinklen mellem vindens retning og lydudbredelsesretningen ($\nu = 0$ betyder direkte medvind og $\nu = \pi$ betyder direkte modvind).

$$c(z) = u(z) \cos(\nu) + 20.05 \sqrt{\theta(z) - 0.01z + 273.15} \quad (8)$$

Ved anvendelse af Nord2000 skal den vertikale effektive lydhastighedsprofil udtrykt ved Formel (8) tilnærmes ved en log-lin profil, som vist i Formel (9), hvor A , B og C er konstanter, og z_0 er ruhedslængden. Konstanterne A , B og C bestemmes ved mindste kvadraters fit til lydhastighedsprofilet i højdeintervallet mellem kilde- og modtagerhøjde.

$$c(z) = A \ln \left(\frac{z}{z_0} + 1 \right) + Bz + C \quad (9)$$

3 Analyse af meteorologiske forholds indflydelse baseret på meteorologiske måledata

3.1 Baggrund

Med henblik på at kvantificere de meteorologiske forholds indflydelse på støj fra vindmøller er der udført analyser baseret dels på eksisterende data fra udvalgte DMI vejrstationer, dels på måledata fra Risø's målestation ved Høvsøre. Formålet med analysen er bl.a. at besvare følgende spørgsmål:

- Forekommer der meteorologiske forhold, som kan afstedkomme forskelle i forhold til forudsætningerne i vindmøllebekendtgørelsen og i givet fald i hvilket omfang?
- Er der variationer af disse meteorologiske forhold i forholdet nat/dag samt forskellige årstider?
- Kan der konstateres forskelle mellem kystnære og ikke kystnære områder?

Det bedste udgangspunkt for en analyse er vind- og temperaturprofiler målt i hele det højdeområde, som er af betydning for både støjgenereringen og for lydudbredelsen. Sådanne data har dog kun været til rådighed på Risø DTU's målestation ved Høvsøre.

For at kunne belyse variationer i støjniveau mellem forskellige lokationer, herunder betydningen af kystnære contra ikke-kystnære områder, er analysen supplerende blevet baseret på data fra fire udvalgte synoptiske vejrstationer. I forbindelse med udarbejdelse af en metode til beregning af årsmiddelværdi under revisionen af Nord2000 i 2006 blev den udarbejdede metode testet på baggrund af data fra et antal udvalgte synoptiske stationer. Disse var udvalgt til at dække et bredt spektrum af lokationsbestemte meteorologiske forhold i Danmark. Dataene indeholder ikke oplysninger om atmosfærens stabilitet, men er tilstrækkelige til at bestemme stabiliteten på basis af en metode som TA-Luft [6]. Disse data vil kunne anvendes til en belysning af lokationens betydning for de observerede forskelle mellem støjniveauer om dagen og natten.

3.2 Analyse af data fra synoptiske vejrstationer

Dette afsnit indeholder en analyse af måledata fra fire udvalgte synoptiske vejrstationer:

- 06060 FSN Karup
- 06110 FSN Skrydstrup
- 06052 Thyborøn
- 06180 Københavns Lufthavn

Karup og Skrydstrup har en ikke-kystnær placering, og begge har en middelvindhastighed på 5,1 m/s. Thyborøn og Københavns Lufthavn har en

kystnær placering ved en henholdsvis vest- og østvendt kyst. Middelvindhastigheden er henholdsvis 7,4 og 5,1 m/s, og Thyborøn er en af de synoptiske vejrstationer, der har den højeste middelvindhastighed.

Datamaterialet fra vejrstationerne indeholder følgende måleværdier hver 3. time i en 10 års periode (1995-2004), som er relevante for analysen:

- Vindhastighed i højden 10 m (m/s)
- Vindretning i højden 10 m (° geografisk)
- Lufttemperatur (°C)
- Skydække (ottendedele)
- Relativ luftfugtighed (%)

I analysen er måleværdien for kl. 12 UTC (kl. 13 normaltid) anvendt til at repræsentere dagen, mens måleværdien for kl. 0 UTC (kl. 1 normaltid) er anvendt til at repræsentere natten.

På basis af vindhastigheden, skydækket og tidspunktet på døgnet (dag/nat) er det muligt med metoden beskrevet i TA-Luft (Bilag B 2) [6] at estimere atmosfærens stabilitet i følgende seks klasser (Klug-Manier):

I: Meget stabil

II: Moderat stabil

III/1: Neutral

III/1: Neutral, lettere ustabil

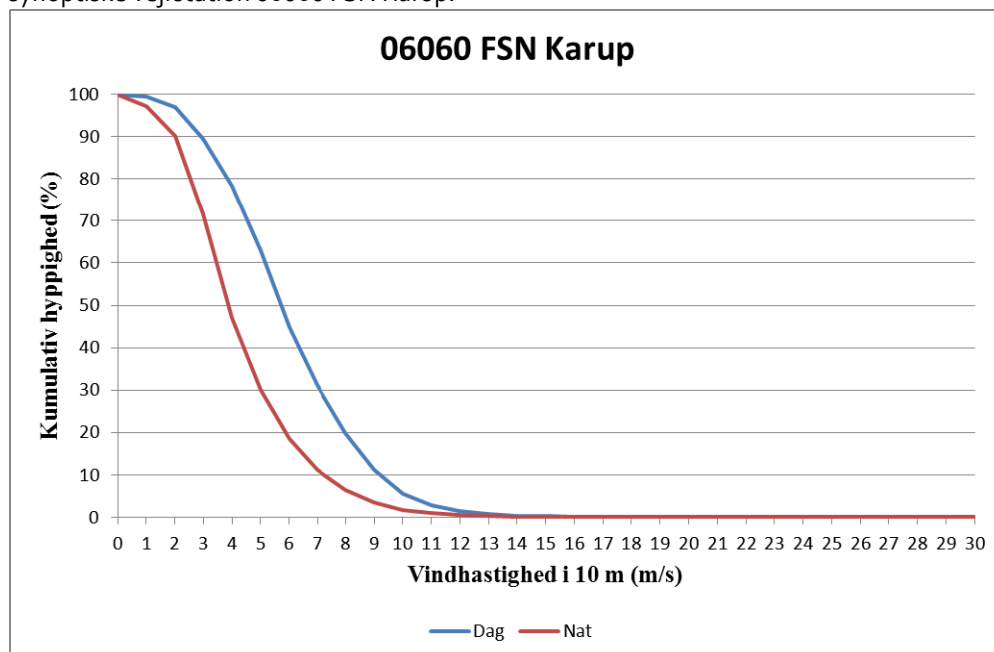
IV: Moderat ustabil

V: Meget ustabil

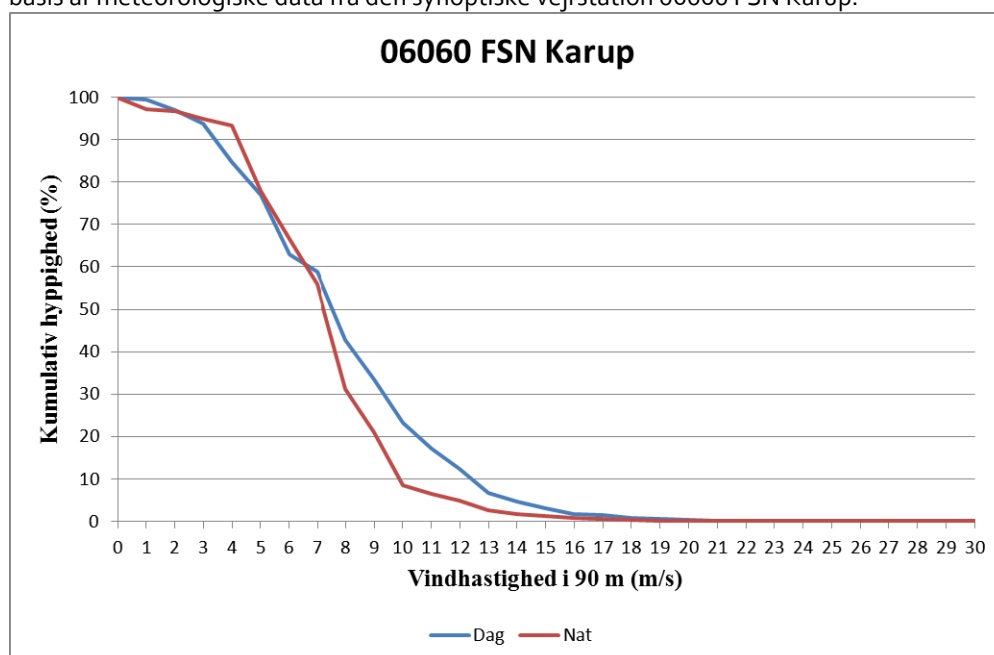
Efter estimering af stabiliteten indeholder metoden en tabel til bestemmelse af Monin-Obukhov-længden L for en given ruhedslængde z_0 . I analysen anvendes $z_0 = 0,05$ m. Efter bestemmelse af L anvendes formlerne i Afsnit 2.4 til at bestemme vindhastigheden i vindmøllens navhøjde ud fra den målte vindhastighed i 10 m højde. I analysen er valgt en navhøjde på 90 m, som er typisk for eksisterende høje vindmøller. Vinden i navhøjden vil være af betydning for støjemissionen, og vindprofilen mellem terrænoverflade og navhøjde vil have indflydelse på lydudbredelsen.

Resultaterne er vist i Figur 1 til Figur 8. Figurerne 1, 3, 5 og 7 viser den (omvendte) kumulative fordeling for vindhastigheden målt i 10 m højde for hver af de fire vejrstationer. De viste målinger repræsenterer 10 minutters middelværdier. I den omvendte kumulative fordeling viser kurven procentdelen af vindhastigheder, der er større end den på x-aksen viste værdi. Figurerne 2, 4, 6 og 8 viser den kumulative fordeling for vindhastigheden estimeret i 90 m højde, som tidligere beskrevet for hver af de fire vejrstationer. Figurerne viser vindhastighedsfordelingen for både dag og nat.

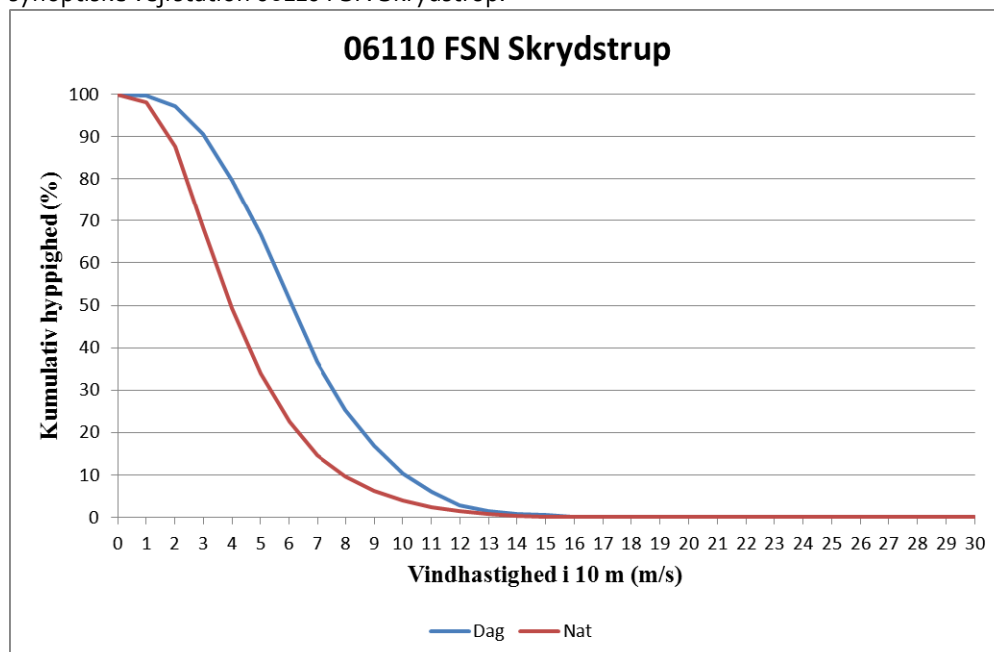
Figur 1: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 10 m højde ved den synoptiske vejrstation 06060 FSN Karup.



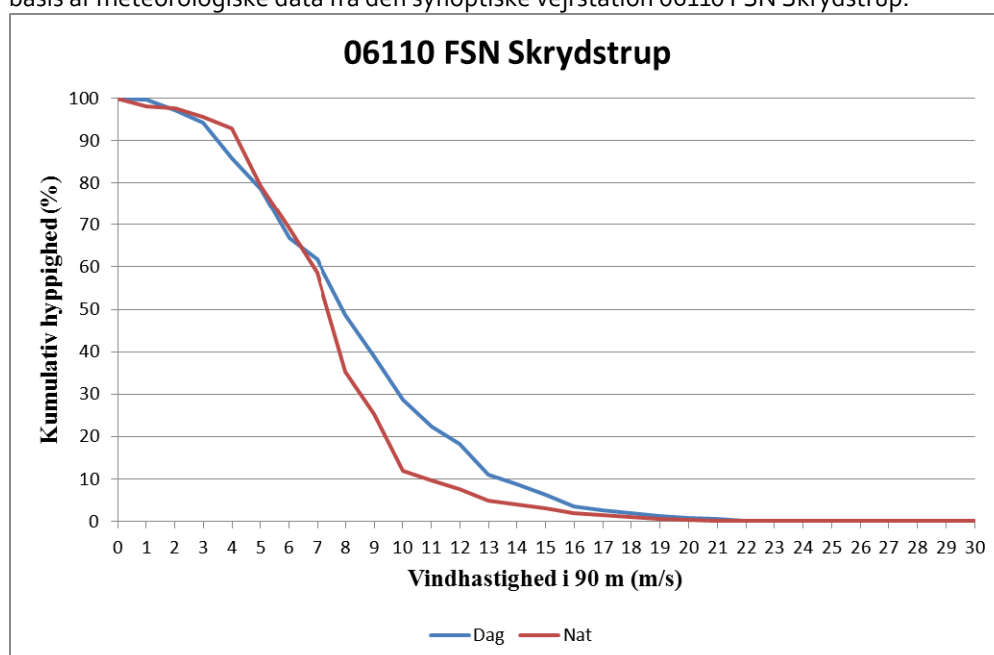
Figur 2: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder i 90 m højde estimeret på basis af meteorologiske data fra den synoptiske vejrstation 06060 FSN Karup.



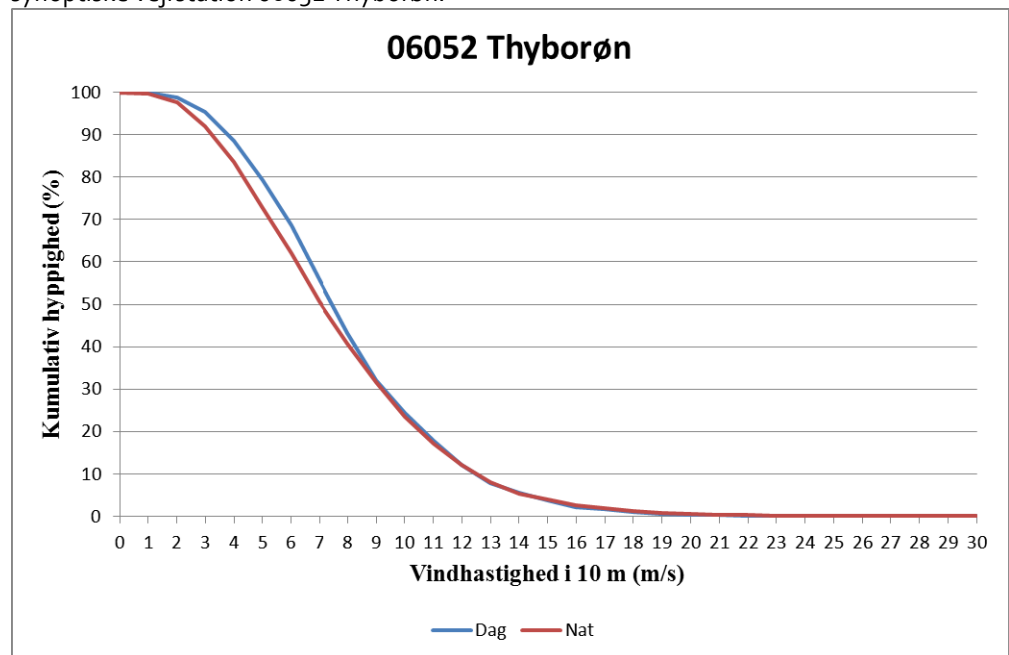
Figur 3: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 10 m højde ved den synoptiske vejrstation 06110 FSN Skrydstrup.



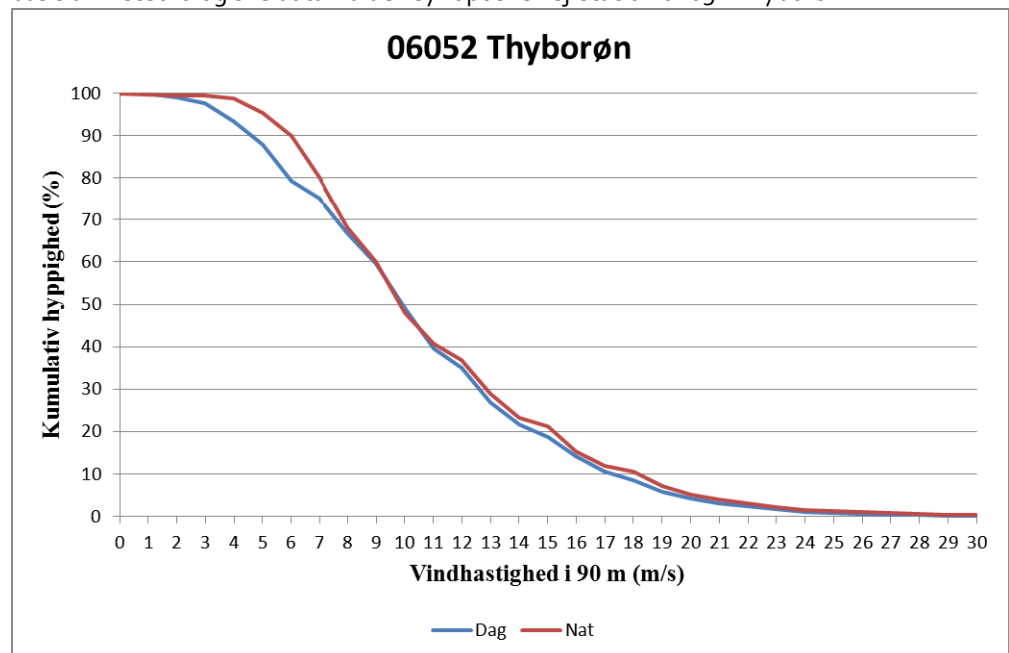
Figur 4: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder i 90 m højde estimeret på basis af meteorologiske data fra den synoptiske vejrstation 06110 FSN Skrydstrup.



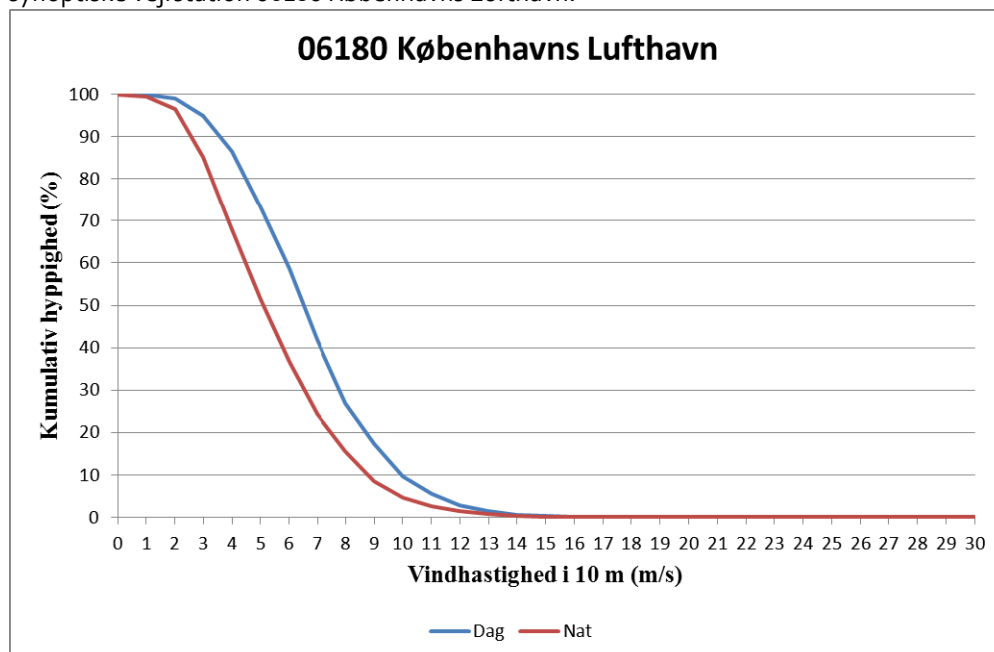
Figur 5: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 10 m højde ved den synoptiske vejrstation 06052 Thyborøn.



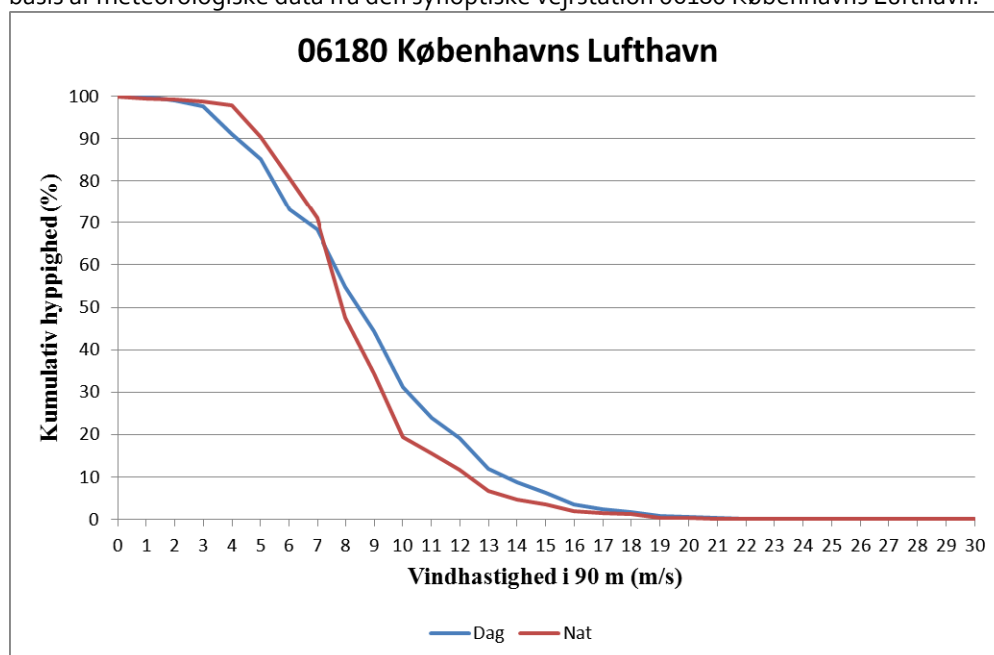
Figur 6: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder i 90 m højde estimeret på basis af meteorologiske data fra den synoptiske vejrstation 06052 Thyborøn.



Figur 7: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 10 m højde ved den synoptiske vejrstation 06180 Københavns Lufthavn.



Figur 8: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder i 90 m højde estimeret på basis af meteorologiske data fra den synoptiske vejrstation 06180 Københavns Lufthavn.



Resultaterne fra de synoptiske vejrstationer for vindhastigheden i 10 m højde viser, at vindhastighederne om natten i almindelighed er mindre end om dagen. For de to ikke-kystnære vejrstationer er forskellen i middel omkring 2 m/s. For Københavns Lufthavn er denne forskel lidt mindre, mens der næsten ingen forskel er for Thyborøn.

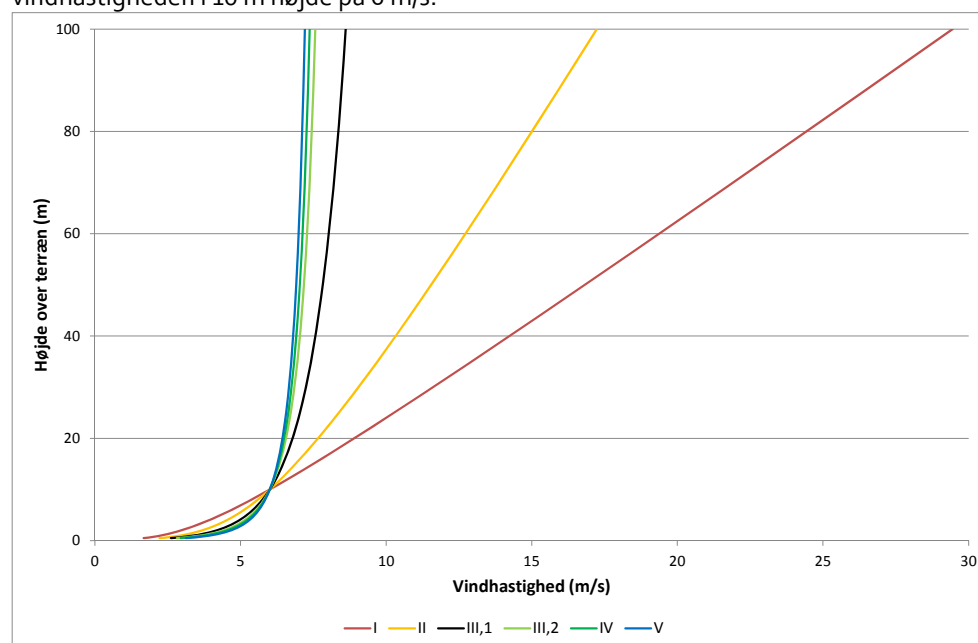
Resultaterne for vindhastigheden i 90 m viser derimod en meget beskeden forskel på dag og nat for alle vejrstationer. Årsagen til, at de kumulative fordelinger for 90 m ses at være mere uregelmæssige end de observerede fordelinger for 10 m, er, at omregningen til 90 m sker i seks diskrete stabilitetsklasser. Forholdet mellem

vindhastigheden i de to højder er vist i Tabel 1 for de enkelte stabilitetsklasser. I metoden kan forholdet variere mellem 1,19 og 4,49. Værdien 1,41 for klasse III,1 svarer til den logaritmiske vindprofil. Sættes vindhastigheden til 6 m/s i 10 m højde, vil vindhastigheden ændre sig med højden op til 100 m, som vist i Figur 9 for hver af de 6 stabilitetsklasser. Det skal bemærkes, at jo større stabiliteten er, desto mindre vil vindhastigheden være i 10 m højde. For klasse I vil der således stort set aldrig forekomme 6 m/s i 10 m højde.

Tabel 1: Forhold mellem vindhastigheden u_{90} i 90 m og u_{10} i 10 m for hver af de 6 stabilitetsklasser.

Stabilitetsklasse	u_{90}/u_{10}
I	4,49
II	2,69
III,1	1,41
III,2	1,25
IV	1,22
V	1,19

Figur 9: Vindhastighedens ændring med højden for hver af de 6 stabilitetsklasser ved en vindhastigheden i 10 m højde på 6 m/s.



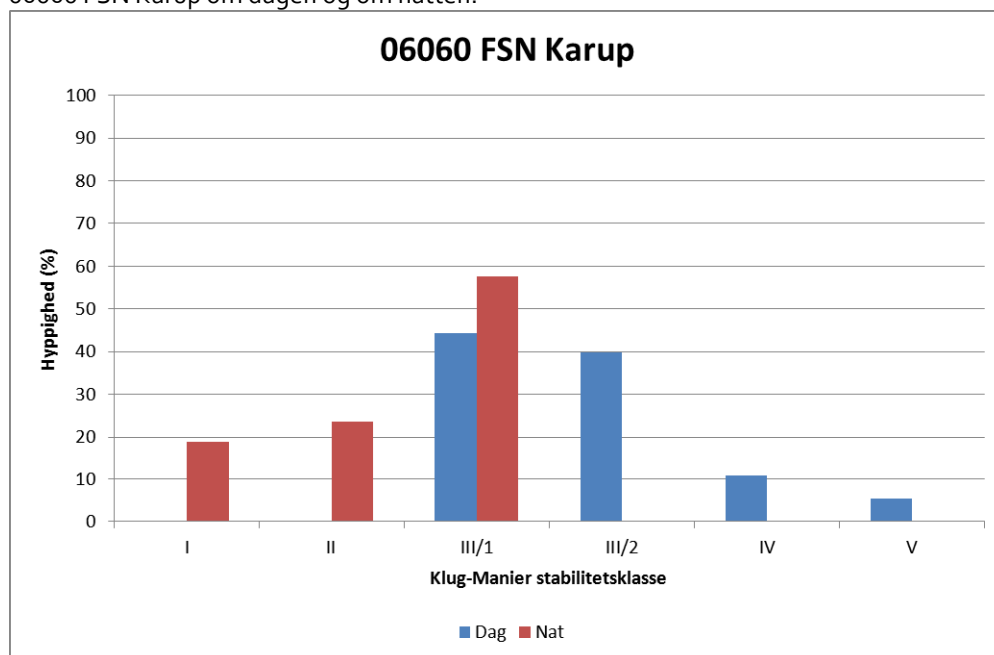
I forbindelse med analysen af vindhastighedsfordelingerne blev fordelingen på stabilitetsklasser om dagen og om natten også bestemt for de fire vejrstationer.

Figur 10 viser for vejrstation Karup, at om dagen (kl. 13 normalt) er atmosfæren neutral (III,1) i 44 % af tiden, mens den i resten af tiden er ustabil i varierende grad (III,2-V). Om natten er atmosfæren neutral i ca. 58 % af tiden, mens den i resten af tiden er stabil i varierende grad (I-II).

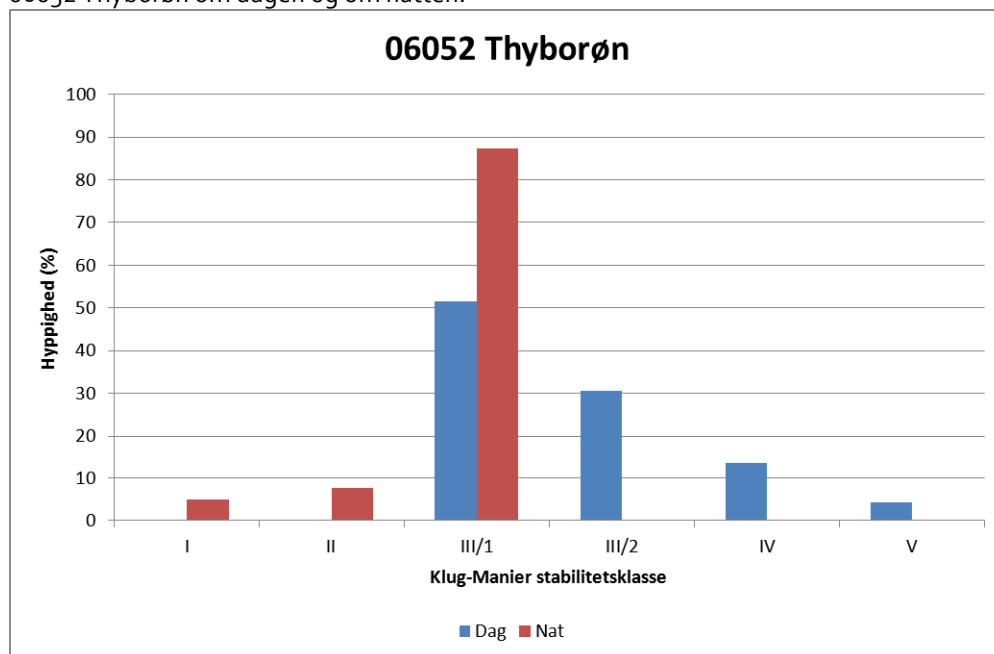
Figur 11 viser for vejrstation Thyborøn, at billedet principielt er det samme, men hyppigheden af neutral atmosfære er steget betydeligt (52 % om dagen og 87 % om natten). Dette skyldes de væsentligt højere vindhastigheder i forhold til Karup. Det forklarer også, at vindhastighedsfordelingerne ikke udviser samme forskel mellem dag og nat, som set for Karup. For Skrydstrup er fordelingen på stabilitetsklasser

omtrent den samme som for Karup, mens Københavns Lufthavn ligger mellem Karup og Thyborøn. Dette stemmer med de observerede forskelle i vindhastighedsfordelingerne.

Figur 10: Hyppighed af Klug-Manier stabilitetsklasserne ved den synoptiske vejrstation 06060 FSN Karup om dagen og om natten.



Figur 11: Hyppighed af Klug-Manier stabilitetsklasserne ved den synoptiske vejrstation 06052 Thyborøn om dagen og om natten.



Da forskellene i vindhastighedsfordelingerne om dagen og natten er påvirket af forskelle i stabilitetsklasser, må der være en årsvariation i forskellene, idet variationer i atmosfærens stabilitet er mindre om vinteren end om sommeren. I analysen blev vindhastighedsfordelingerne supplerende bestemt for vinterperioden, her defineret som perioden med normaltid (november – marts). Analysen viste, at de observerede forskelle for vindhastigheden i 10 m reduceres (halveres omtrent) i forhold til resultaterne for hele året, men at den observerede mangel på forskel i 90

m også ses om vinteren. Det kan derfor konkluderes, at årsvariationen har en betydning for dag/nat-fordelingerne i 10 m, men ikke i 90 m.

3.3 Analyse af målte vindhastigheder på Høvsøre

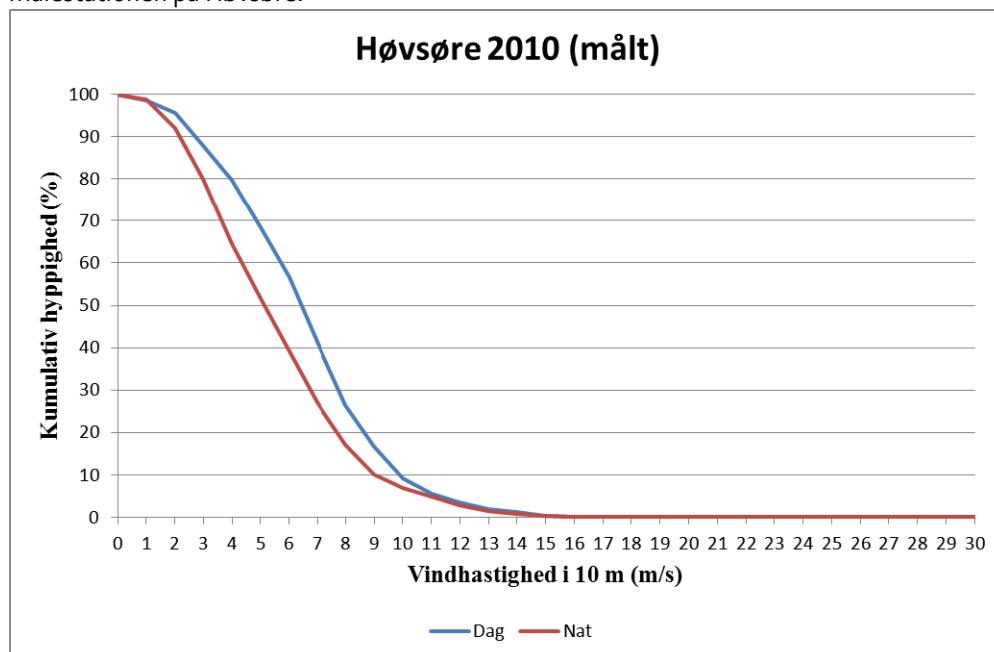
For vejrstationen på vindmølletestcenteret Høvsøre har DELTA modtaget meteorologiske måledata fra Risø DTU blandt andet for året 2010. Data omfatter en række meteorologiske variable for hver 10 minutters periode i løbet af året, hvoraf følgende er blevet udvalgt til brug i analysen af vindhastighedsfordelingerne:

- Vindhastighed i højden 10 m (m/s)
- Vindhastighed i højden 80 m (m/s)
- Vindhastighed i højden 100 m (m/s)

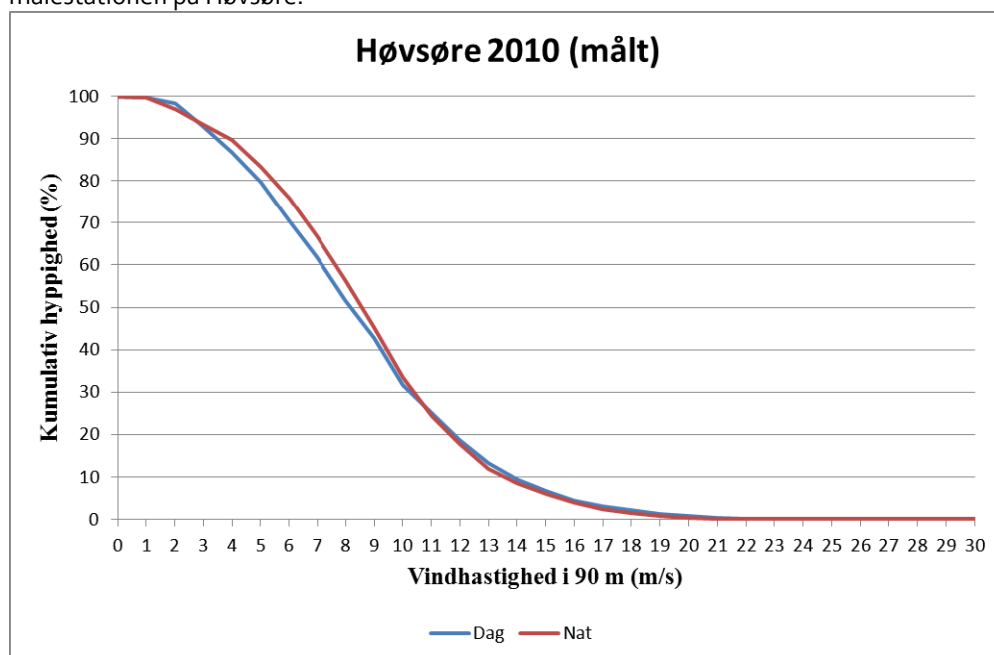
Middelværdien af vindhastigheden i 80 og 100 m højde er anvendt til at bestemme vinden i 90 m, så resultaterne er sammenlignelige med resultaterne fra de synoptiske vejrstationer.

I analysen er de seks 10 minutters middelværdier fra kl. 12:00-12:50 UTC (kl. 13:00-13:50 normaltid) anvendt til at repræsentere dagen, mens værdierne fra kl. 00:00-00:50 UTC (kl. 01:00-01:50 normaltid) er anvendt til at repræsentere natten.

Figur 12: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 10 m højde ved målestationen på Høvsøre.



Figur 13: Kumulativ hyppighed dag og nat af vindhastigheder målt i 90 m højde ved målestationen på Høvsøre.



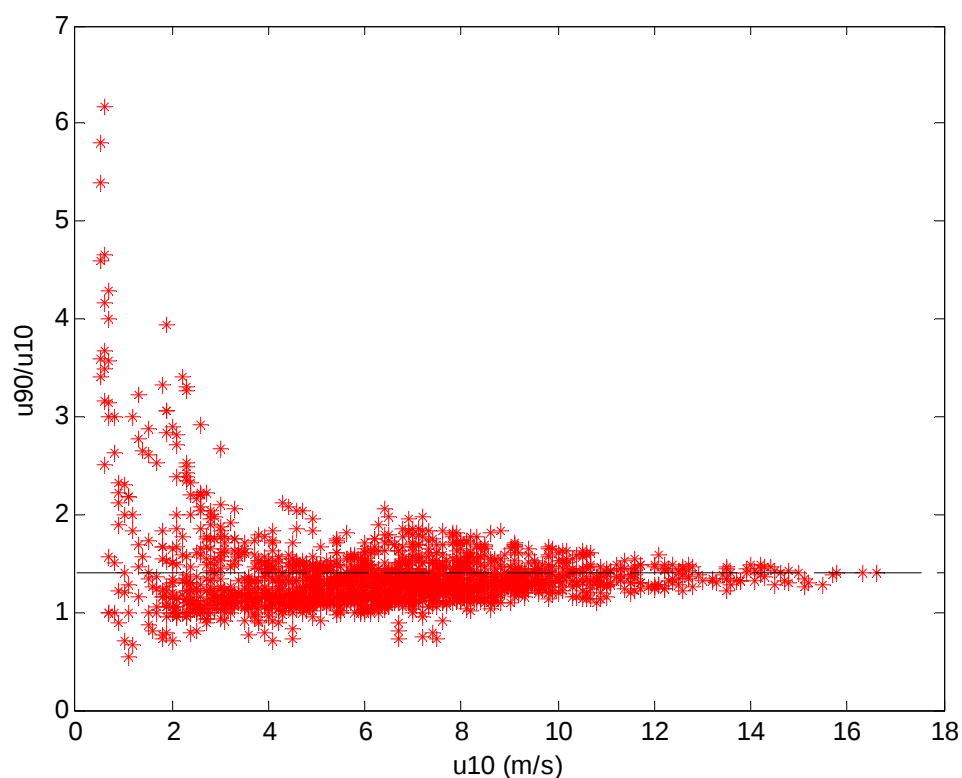
Vindfordelingerne for Høvsøre viser det samme billede, som set i Afsnit 3.2 for de fire synoptiske vejrstationer, og resultatet for Høvsøre minder meget om resultatet for Københavns Lufthavn, som har omtrent samme gennemsnitsvindhastighed (se Tabel 2).

I analysen er også lavet en undersøgelse af forholdet mellem vindhastigheden i 90 m og 10 m kaldet u_{90}/u_{10} i denne rapport. Forholdet som funktion af vindhastigheden i 10 m er vist i Figur 14 og Figur 15 for henholdsvis dag og nat. Begge figurer omfatter ca. 2100 observationer (røde punkter). Den stiplede linje ($u_{90}/u_{10} = 1,41$) viser den forventede sammenhæng for en neutral atmosfære (med logaritmisk vindprofil).

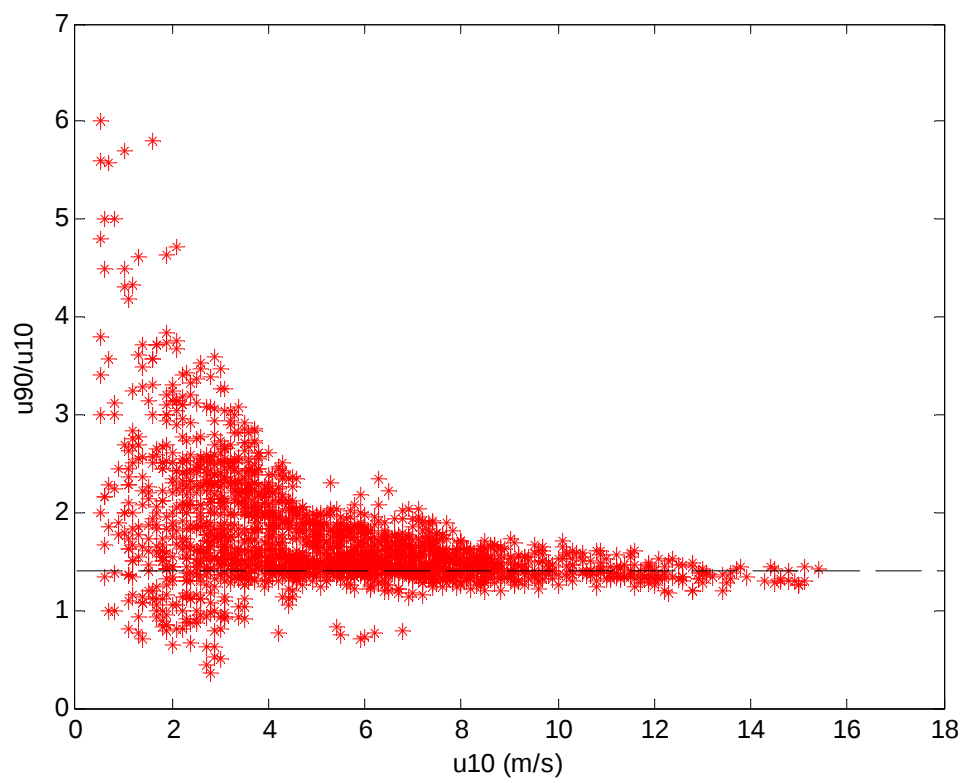
Figur 14 for dagen viser, at u_{90}/u_{10} omtrent svarer til en neutral atmosfære ved høje vindhastigheder, og at forholdet i almindelighed reduceres med faldende vindhastighed svarende til de angivne værdier i Tabel 1 for ustabile atmosfærer. Et mindre antal observationer ved lave vindhastigheder i 10 m højde falder dog uden for dette mønster med større værdier af u_{90}/u_{10} . Dette skyldes uregelmæssigheder i forhold til de ”teoretiske” sammenhænge beskrevet i Afsnit 2.

Figur 15 for natten viser også, at u_{90}/u_{10} omtrent svarer til en neutral atmosfære ved høje vindhastigheder, men at forholdet i almindelighed øges med faldende vindhastighed svarende til de angivne værdier i Tabel 1 for stabile atmosfærer. Et mindre antal observationer falder igen uden for dette mønster med større eller mindre værdier af u_{90}/u_{10} , hvilket tolkes som uregelmæssigheder i forhold til de ”teoretiske” sammenhænge.

Figur 14: Forhold u_{90}/u_{10} mellem vindhastigheden målt i 90 m og 10 m højde ved målestationen på Høvsøre som funktion af vindhastigheden u_{10} i 10 m i en time om dagen (13:00-13:50 lokal tid).



Figur 15: Forhold u_{90}/u_{10} mellem vindhastigheden målt i 90 m og 10 m højde ved målestationen på Høvsøre som funktion af vindhastigheden u_{10} i 10 m i en time om natten (1:00-1:50 lokal tid).

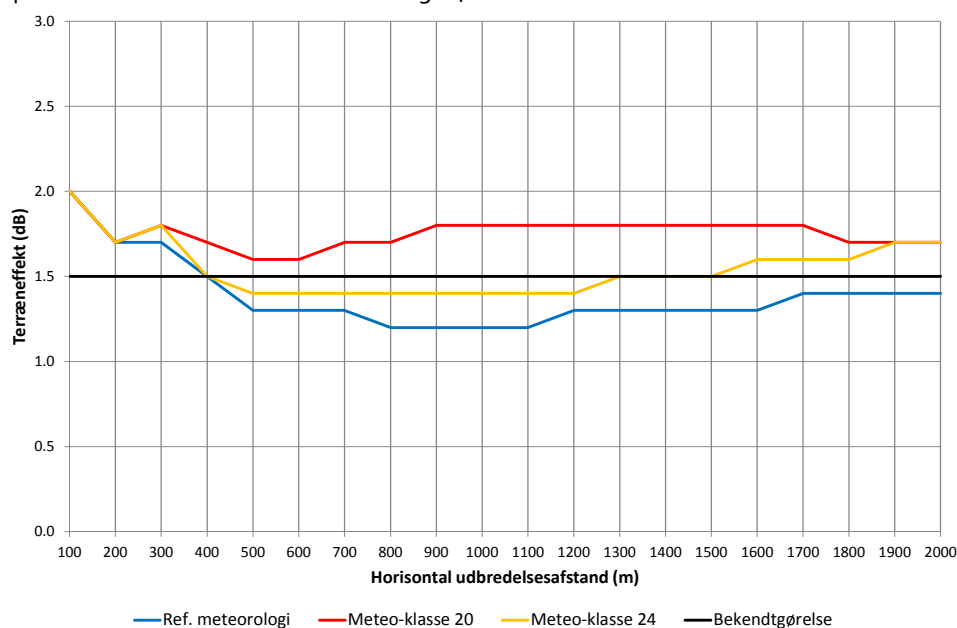


3.4 Analyse af virkningen på lydudbredelsen

De meteorologiske data for de synoptiske vejrstationer anvendt i Afsnit 3.2 er tidligere blevet anvendt til at definere en række meteorologiske klasser, som kan anvendes til at forenkle meteorologiske data ved beregning af støjens årsmiddelværdi. I Danmark anvendes metoden til beregning af støj fra veje og jernbaner [7]. Metoden omfatter i princippet 25 meteorologiske klasser, men det har vist sig, at kun de 9 klasser forekommer i praksis (klasse 3, 7, 8, 13, 18, 19, 20, 23 og 24). Klasse 13 svarer til neutrale lydudbredelsesforhold (ingen vind- eller temperaturgradienter). Lavere klasser giver lavere støjniveauer (større dæmpning), mens højere klasser giver højere støjniveauer (mindre dæmpning). Analysen af lydudbredelsesforholdene om natten er baseret på klasser med en større værdi end 13. Af disse klasser vil klasse 20 give mindre dæmpning end klasse 18 og 19, mens klasse 24 vil give mindre dæmpning end klasse 23. Det er derfor kun nødvendigt at udføre beregninger for klasse 20 og 24 for at undersøge, om de stabile atmosfærer, der forekommer om natten, kan give anledning til en mindre dæmpning af støjen, end den man får for en neutral atmosfære (logaritmisk vindprofil) med 8 m/s vind i 10 m højde, som er udgangspunktet for vindmøllebekendtgørelsens beregningsmetode.

Beregning af terræneffekten (det A-vægtede lydtrykniveau i forhold til frit felt) er udført med Nord2000. I beregningerne er anvendt en temperatur og relativ luftfugtighed, som angivet i bekendtgørelsen (10° C, 80 %), og et typisk kildespektrum for en 3,6 MW vindmølle.

Figur 16: Terræneffekt i dB som funktion af afstand fra 100 m til 2000 m i spring af 100 m for udbredelsesforhold, som forudsat i vindmøllebekendtgørelsen og for natlige forhold repræsenteret med meteo-klasser 20 og 24.



Figur 16 viser, at meteo-klasse 20 i udbredelsesafstande over minimumsafstanden (400-2000 m) vil give den højeste terræneffekt (mindste dæmpning), og at denne i gennemsnit vil være 0,4 dB større end terræneffekten beregnet med de meteorologiske forhold, som er reference for bekendtgørelsen (kaldes "Ref. meteorologi" i figuren). Terræneffekten for meteo-klasse 24 ligger mellem disse to. I bekendtgørelsen er den A-vægtede terræneffekt tilnærmet med en afstandsuaafhængig værdi på 1,5 dB. Terræneffekten for meteo-klasse 20 vil i gennemsnit være 0,2 dB højere end denne værdi. Det kan derfor konkluderes, at

den udbredelsesmæssige effekt af de meteorologiske forhold om natten i forhold til den meteorologiske situation, der er baggrund for bekendtgørelsen, er meget beskeden.

I udbredelsessituationer med modvind kan forskellen på dag og nat være mere omfattende, idet effekten af de akustiske skyggezoner, der kan forekomme om dagen, kan reduceres om natten. I skyggezoner vil terræneffekten dog under alle omstændigheder være lavere (større dæmpning) end de terræneffekter, som beregnes i henhold til bekendtgørelsen.

3.5 Sammenfattende bemærkninger

Resultaterne med vindhastighedsfordelinger for de fire synoptiske vejrstationer i Afsnit 3.2 og for Høvsøre i Afsnit 3.3 er opsummeret i Tabel 2, som viser fordelingernes 50 % fraktil.

Tabel 2: 50 % fraktiler for vindfordelingerne vist i Figur 1 til Figur 8 samt Figur 12 og Figur 13 samt forholdet mellem 50 % fraktilen for højden 90 m og 10 m for hver af de fem vejrstationer.

Vejrstation	Vindhastighed i 10 m (m/s)		Vindhastighed i 90 m (m/s)		Forhold mellem 90 m og 10 m	
	Dag	Nat	Dag	Nat	Dag	Nat
Karup	5,7	3,9	7,6	7,2	1,33	1,85
Skrydstrup	6,1	4,0	7,9	7,4	1,30	1,85
Thyborøn	7,5	7,1	9,9	9,8	1,32	1,38
Københavns Lufthavn	6,5	5,1	8,5	7,9	1,31	1,55
Høvsøre (målt)	6,4	5,1	8,2	8,6	1,28	1,69

Tabel 2 viser, at forholdet mellem vindhastighederne i 90 m og 10 m højde udtrykt ved 50 % fraktilen om dagen er omkring 1,3, mens det samme forhold om natten stiger fra omkring 1,4 ved de højeste gennemsnitlige vindhastigheder til omkring 1,9 ved de laveste. Det kan således konkluderes, at den større forskel mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m om natten i forhold til om dagen beskrevet i litteraturen kan bekræftes. Tabellen viser også, at grunden til denne forskel er, at vindhastigheden i 10 m højde generelt er lavere om natten end om dagen, mens vindhastigheden i navhøjden viser meget små forskelle fra dag til nat.

På denne baggrund må det konkluderes, at støjemissionen ikke kan forventes at være større om natten end om dagen, når vindmøllens kildestyrke ved referencehastigheden bestemmes på grundlag af møllens producerede effekt eller vindhastigheden målt i navhøjde. Men hvis kildestyrken af en høj vindmølle bestemmes på grundlag af vindhastigheden målt i 10 m højde, vil kildestyrkemålinger foretaget om natten under stabile meteorologiske forhold overvurdere vindmøllens støjudsendelse i forhold til bekendtgørelsens referencebetingelser. Den lavere vindhastighed i 10 m højde vil dog give en relativ lavere baggrundsstøj, og det er muligt, at den mindre maskering fra baggrundstøjen kan give anledning til en højere gene.

Vindhastigheden på 8 m/s svarende til den øverste støjgrænse i støjbekendtgørelsen vil med den i bekendtgørelsen forudsatte logaritmiske vindprofil svare til 11,3 m/s i 90 m højde. Det ses af Tabel 2, at 50 % fraktilen for alle fem vejrstationer er

mindre end 11,3 m/s, og i de viste vindhastighedsfordelinger kan man se, at sandsynligheden for natlige vindhastigheder større end 11,3 m/s i 90 m højde vil variere fra ca. 5 % ved den laveste gennemsnitlige vindhastighed (Karup) til ca. 40 % ved den højeste gennemsnitlige vindhastighed (Thyborøn). Sandsynligheden for, at der disse steder vil være en natlig vindhastighed større end 11,3 m/s i 90 m højde og stabile forhold med en relativ lavere baggrundsstøj vil være mindre end de angivne 5 hhv. 40 %. Ved at sammenligne de kumulative fordelingskurver for hhv. 90 m og 10 m højde fås for de betragtede meteorologistationer, at den højeste sandsynlighed for at dette forekommer, ses i Høvsøre med ca. 6 %, mens alle andre ligger på ca. 4 % og derunder.

Det er vist i analysen, at de fundne forskelle kan forklares af ændringer i atmosfærens stabilitet fra dag til nat. Af denne grund er det forventeligt, at der vil være en årstidsmæssig variation, idet atmosfærens stabilitet varierer mindre om vinteren. Analysen har vist, at denne variation påvirker de fundne forskelle i 10 m højde, men at den har en meget beskeden indflydelse på vindhastighederne i navhøjden. Ligeledes er der ikke fundet indikation af betydende forskelle på kystnære og ikke-kystnære områder ud over de forskelle, som kan forklares af en øget gennemsnitsvind.

Ud over virkningen på støjemissionen af de meteorologiske forskelle fra dag til nat er det også undersøgt, om disse forskelle kan have en virkning på lydudbredelsen. Til dette formål er der udført beregninger af terræneffekten på det A-vægtede lydtrykniveau for de meteorologiske situationer, der kan forekomme om natten. Beregningerne viser, at virkningen er uden reel betydning ($\pm 0,3$ dB) under medvindsforhold i afstande fra minimumsafstanden til mindst 2000 m.

4 Målinger

For at underbygge de tidligere betragtninger vedr. meteorologiens betydning for måling af støj iht. vindmøllebekendtgørelsen samt vurdere, om støjens karakter er anderledes under stabile meteorologiske forhold i forhold til neutrale/ustabile forhold, er der gennemført en række støjmålinger på vindmøller i perioder, hvor der kan forventes forskellige meteorologiske stabilitetsforhold.

Ved målingerne er der foretaget bestemmelse af kildestyrke for de pågældende vindmøller iht. til vindmøllebekendtgørelsens anvisninger [1], og der er ligeledes i nogle tilfælde suppleret med måling af støj i afstande svarende til nærmeste naboer til vindmøllerne. Sidstnævnte målinger er foretaget med en mikrofon placeret 1,5 m over terræn og er bl.a. brugt til vurdering af støjens karakter.

I undersøgelsen præsenteres resultater fra enkeltmøller, fra parvis placerede vindmøller samt fra en parkmåling på 6 vindmøller. Vindmøllerne er med nominel effekt fra 2,3 til 3 MW og alle med navhøjde 80 m og med en rotordiameter på 90-93 m. Der skal gøres opmærksom på, at der her er tale om resultater fra en begrænset målekampagne, og resultaterne skal derfor behandles som sådan med hensyn til konklusioner og generaliseringer.

4.1 Resultater fra kildestyrkemålinger

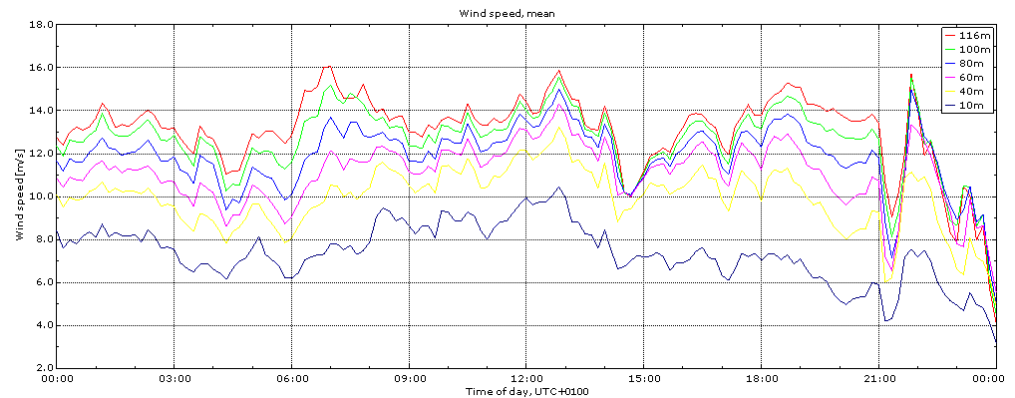
Som nævnt i Afsnit 2 relateres kildestyrken i [1] til vindhastigheden i 10 m højde. Først bestemmes vindhastigheden i navhøjde ud fra en måling af vindmøllens producerede effekt og vindmøllens effektkurve. Denne vindhastighed i navhøjde omregnes derefter til en vindhastighed i 10 m højde ud fra en antagelse om, at vindhastighedsprofilen er logaritmisk og med anvendelse af en ruhedslængde på 0,05 m. Da der således tages udgangspunkt i vindforholdene omkring navhøjde, forventes en entydig bestemmelse af kildestyrken uafhængig af det aktuelle vindhastighedsprofil under målingerne.

For at eftervise, om der kan registreres en forskellig kildestyrke fra den samme vindmølle afhængig af de meteorologiske stabilitetsforhold, er der gennemført måling af kildestyrker for vindmøller under varierende stabilitetsforhold. De mest repræsentative resultater er gennemgået i det følgende.

Der er foretaget støjmålinger fra samme vindmølle over 2 dage og aftener. Resultaterne fra den ene måledag, hvor der var klart vejr og dermed god variation af stabilitetsforhold hen over dagen og aftenen, er udvalgt til en detaljeret analyse.

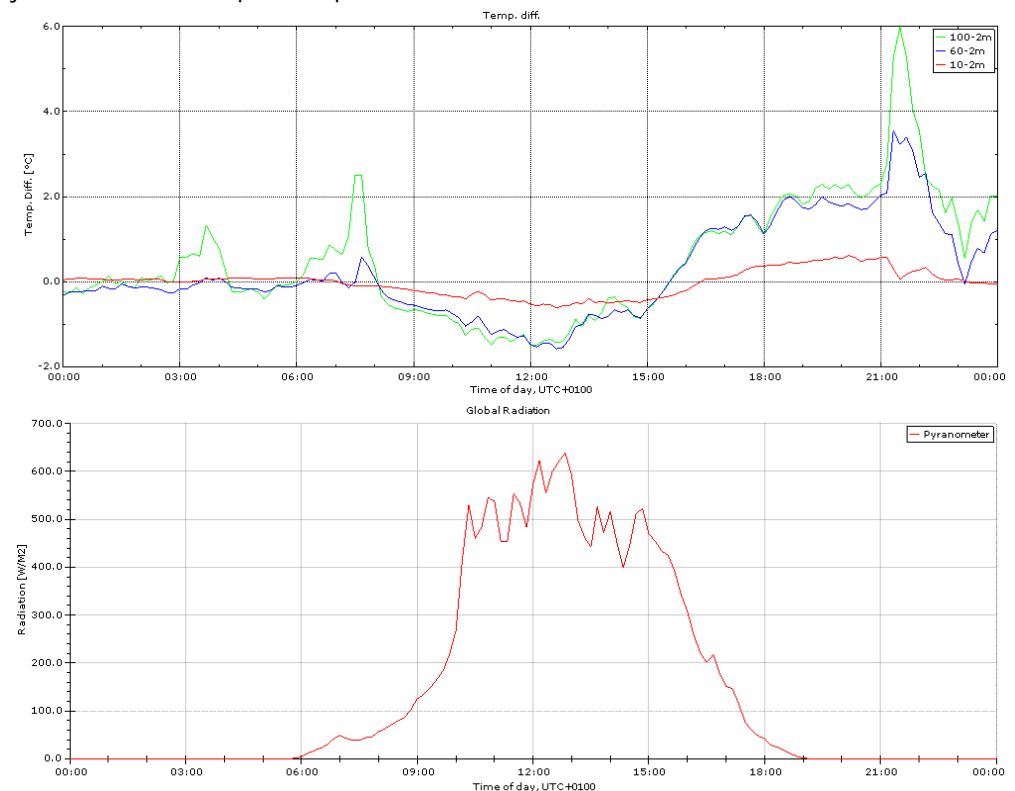
Vindmøllen er placeret tæt på Risø DTU testcenteret i Høvsøre, og derfor har det været muligt at supplere vindmålinger tæt på vindmøllen med mere omfattende meteorologiske målinger fra testcenteret beliggende ca. 7 km fra vindmøllen. I Figur 17 er vindmålinger fra Høvsøre vist for det pågældende døgn, hvor måleperioden strakte sig fra kl. 08:00 til 21:00. Det ses, at der i døgnets yderperioder ses større forskel mellem vindhastigheden registreret i 10 m højde og i større højder.

Figur 17: Vindmålinger i forskellige højder foretaget på Risø DTU testcenteret i Høvsøre den 2. april 2011. Data fra Risø DTU.



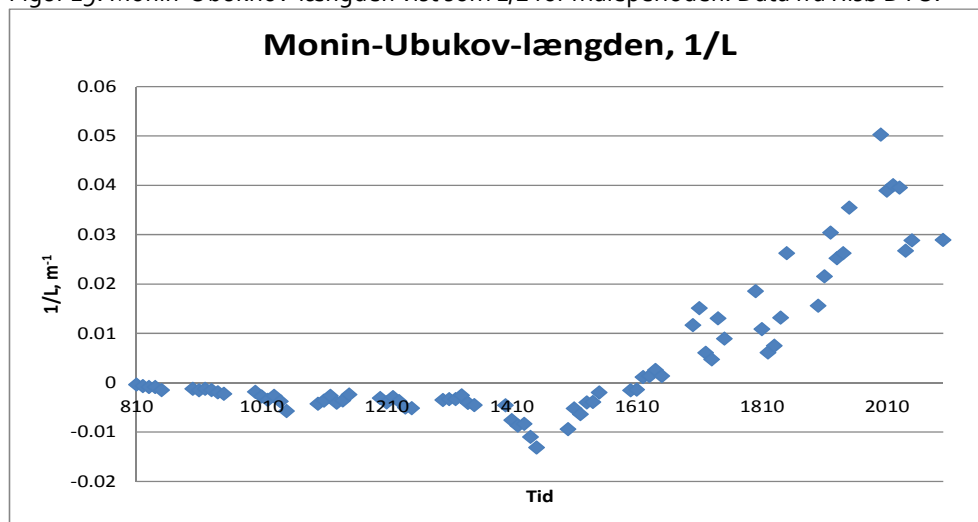
I Figur 18 er temperaturdifferens mellem forskellige højder samt jordens udstråling fra jorden vist for samme tidsperiode (ligeledes målt i Høvsøre). Begge parametre understøtter fastsættelsen af overgangen fra neutrale til stabile forhold.

Figur 18: Temperaturdifferens mellem forskellige højder samt jordens udstråling fra jorden. Målt den 2. april 2011 på DTU Risø testcenter. Data fra Risø DTU.



I Figur 19 er den i Afsnit 2.2 omtalte Monin-Obukhov-længde, L vist som $1/L$ for måleperioden som 10 minutters middelværdier. Det ses, at ca. kl. 16 krydser værdien for $1/L$ 0, hvilket indikerer, at der her er en neutral atmosfære.

Figur 19: Monin-Obukhov-længden vist som $1/L$ for måleperioden. Data fra Risø DTU.

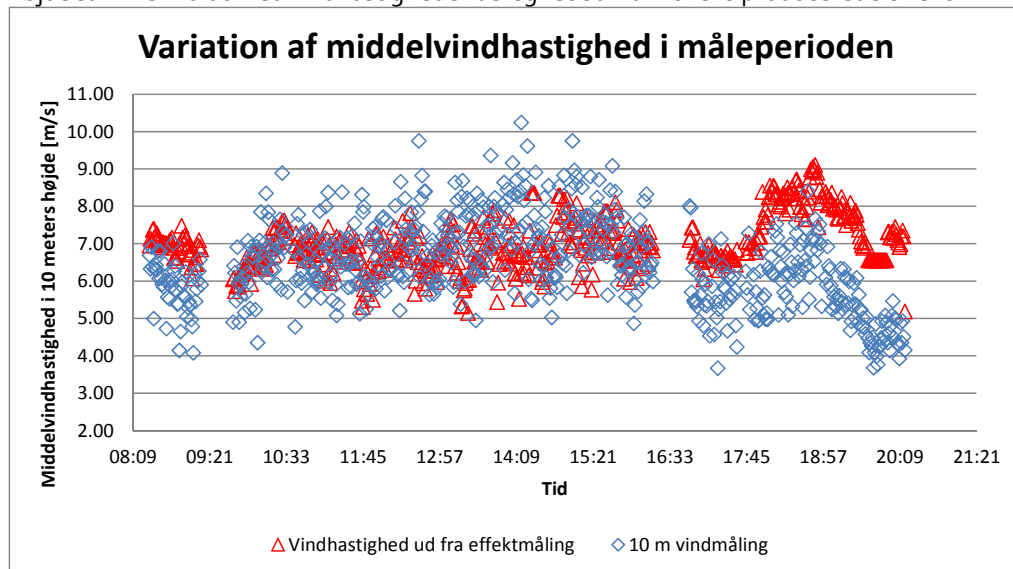


Af alle registreringerne fra Høvsøre ses, at der hen over måleperioden er et skift fra omtrent neutralt om morgenen, til ustabilt hen over eftermiddagen og til stabile forhold først på aftenen.

Under målingerne ved vindmøllen blev der foretaget samtidige registreringer af støjniveauet på målepladen, vindmøllens effektsignal, vindmøllens vindhastighed målt med nacelleanemometret samt vindhastigheden målt i 10 m højde i fri vind ved siden af vindmøllen.

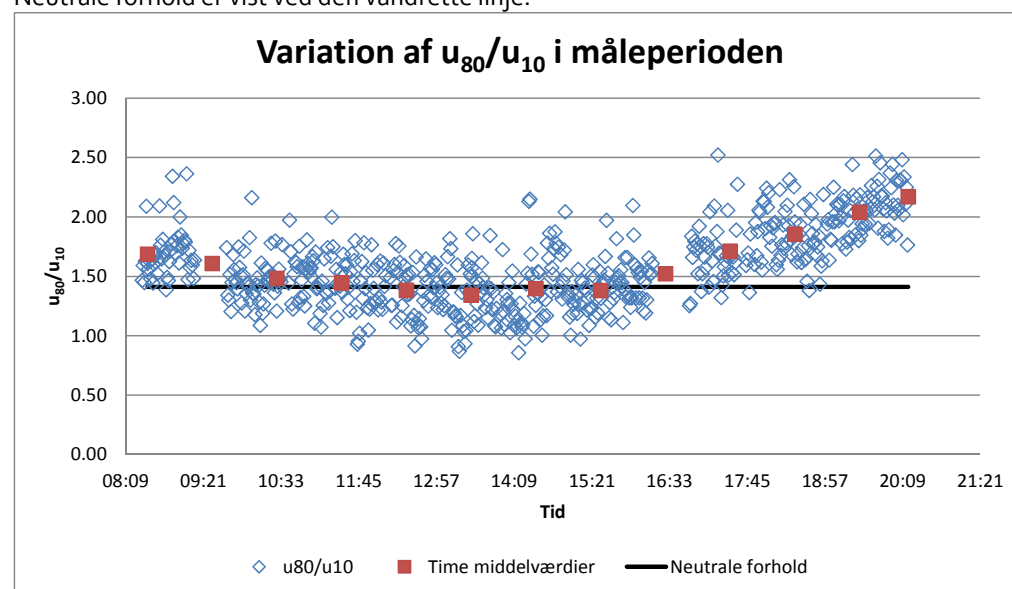
I Figur 20 er 1 minuts middelværdier for vindmålinger foretaget i 10 m højde vist sammen med vindhastigheder beregnet ud fra effektmålinger på vindmøllen. Det ses, at målingerne i 10 m højde varierer noget mere end værdierne bestemt ud fra effektmålingerne. Men alligevel ses tydeligt, at der i yderkanterne af måleperioden og mest markant om aftenen måles lavere vindhastigheder i 10 m højde, end der beregnes ud fra effektmålingen på vindmøllen under antagelse om neutrale forhold, som antaget i vindmøllebekendtgørelsen.

Figur 20: 1 minuts middelværdier for vindhastigheden målt med anemometer i 10 m højde sammenholdt med vindhastigheder beregnet ud fra møllens producerede effekt.



I Figur 21 er variationen af forholdet mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde, u_{80}/u_{10} (se Afsnit 2), vist over måleperioden for de midlede 1 minuts værdier. Den vandrette linje ved 1,39 svarer til neutrale forhold for denne vindmølle med navhøjde 80 m. Ud over 1 minuts værdierne er der ligeledes foretaget en midling i hele timer. Det ses, at forholdet mellem vindhastighed i 10 m højde og navhøjde for 1 times middelværdier varierer mellem 1,3 og 2,2 svarende til en variation mellem Neutral, Lettere ustabil (klasse III/I) til Moderat stabil (klasse II). Dette stemmer godt overens med den observerede variation i meteorologisk stabilitet, der kan ses ud fra registreringerne i Høvsøre, hvor de meteorologiske parametre er logget i hele højdeområdet op til 116 m.

Figur 21: Forholdet mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde, u_{80}/u_{10} vist over måleperioden med blåt for 1 minuts middelværdier og rødt for 1 times middelværdier. Neutrale forhold er vist ved den vandrette linje.

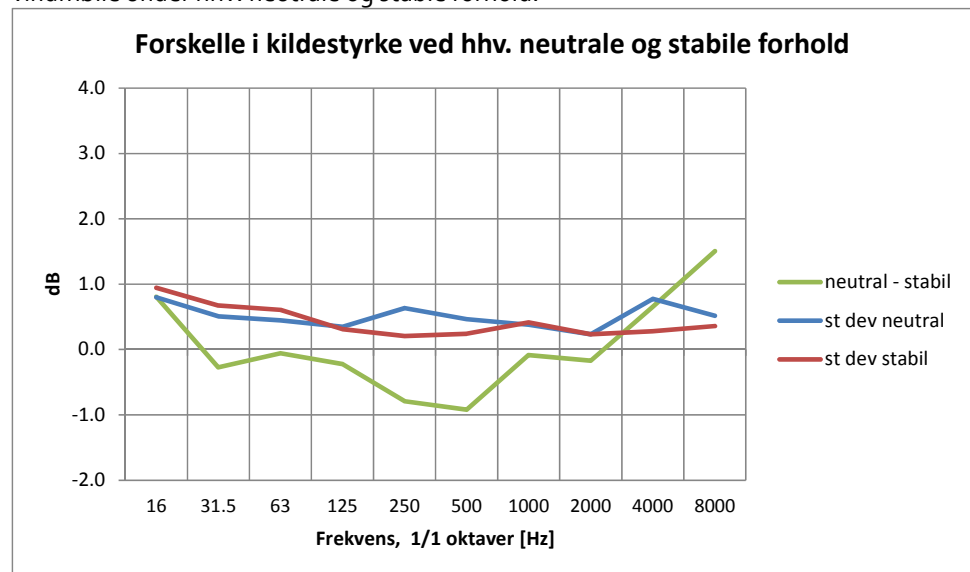


Ud fra målingerne, hvor der såvel under neutrale som stabile forhold forekom vindhastigheder omkring 8 m/s, er der foretaget en særskilt bestemmelse af vindmøllens kildestyrke (lydeffektniveau) ved 8 m/s for begge situationer. I Tabel 3 er statistiske data for analyserne vist, og i Figur 22 og Figur 23 er de konstaterede forskelle vist som funktion af frekvens i 1/1- og 1/3-oktaver.

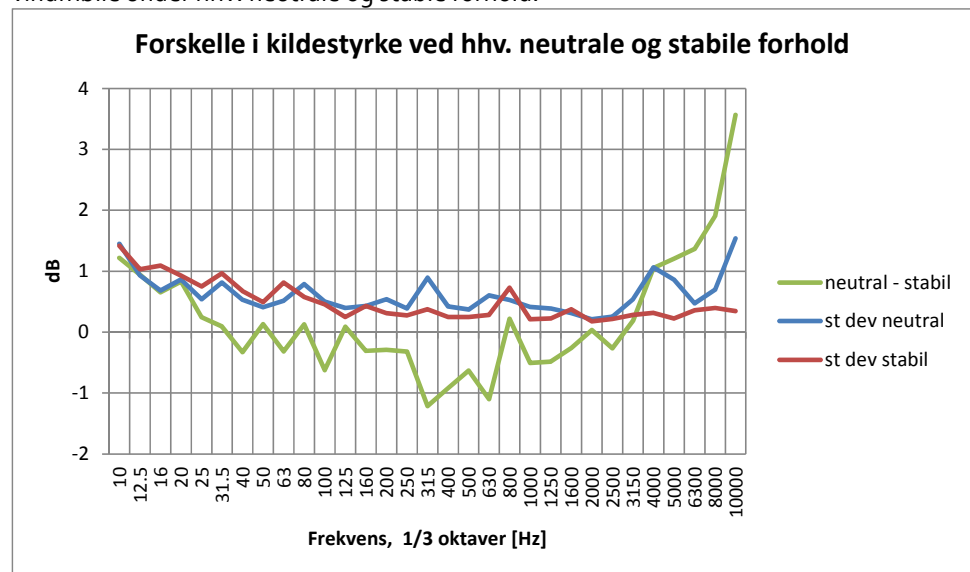
Tabel 3: Statistiske data for de to analyser foretaget på data fra hhv. en periode med neutrale meteorologiske forhold og stabile meteorologiske forhold.

Meteorologi	Neutrale forhold	Stabile forhold
Antal 1-minuts målinger	32	29
Middel vindhastighed, m/s	7,84	7,95
Standardafvigelse på vindhastighed, m/s	0,28	0,24
Kildestyrke, dB(A)	102,45	102,66
Standardafvigelse på enkeltmålinger, dB(A)	0,29	0,20

Figur 22: Forskelle i 1/1-oktavværdier for kildestyrken bestemt ved 8 m/s for samme vindmølle under hhv. neutrale og stabile forhold.



Figur 23: Forskelle i 1/3-oktavværdier for kildestyrken bestemt ved 8 m/s for samme vindmølle under hhv. neutrale og stabile forhold.



Under stabile forhold repræsenterer målingerne en middelvindhastighed, der er 0,1 m/s højere end for de neutrale forhold. Afvigelserne for de højeste og laveste frekvenser i Figur 22 og Figur 23 forekommer i frekvensområder, hvor der ikke er betydende støj fra vindmøllen og skyldes varierende baggrundsstøj i de to måleperioder. I den totale kildestyrke ses en forskel for de to analyser på 0,2 dB, hvilket er inden for den almindelige variationsusikkerhed.

4.2 Vurdering af støjens karakter

I denne undersøgelse er det også ønsket belyst, om der kan konstateres en forskel i karakteren af den udsendte støj fra vindmøllen hhv. under ustabile/neutrale forhold og under stabile forhold (om aftenen/natten).

I afsnit 4.1 blev det belyst, at der ikke umiddelbart sås nogen væsentlig forskel i støjudsendelse fra en vindmølle hhv. under ustabile/neutrale forhold og under stabile forhold set ud fra frekvenssammensætningen af støjen.

I forskellige kilder som [4] er det bl.a. fremført, at støjen målt i mere end 500 m afstand under stabile meteorologiske forhold kan have en mere pulserende karakter.

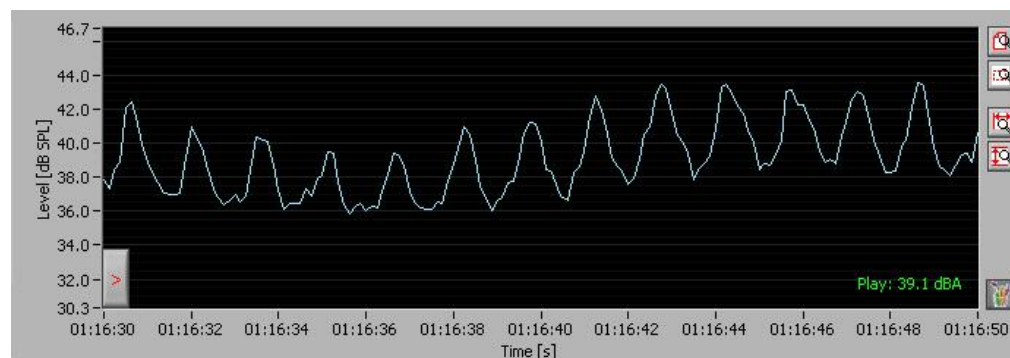
Ud fra såvel subjektiv som objektiv analyse af optagelser fra vindmøller under varierende afstande og meteorologiske forhold er specielt dette forhold undersøgt nærmere.

4.2.1 Metoder til vurdering af støjens pulserende karakter

Støj fra en vindmølle er generelt pulserende, idet støjen registreret i et givet punkt som følge af en retningsafhængig lydudsendelse fra vingerne vil moduleres af vingernes rotation, således at der kan høres en støj, der varierer med 3 gange rotorens omdrejningsfrekvens; dvs. typisk under 0,3 pulsationer pr. sekund. Hvor meget variation, der er i et givet observationspunkt, vil afhænge af afstand til vindmøllen og positionen i forhold til vindretningen [9] og [10].

I Figur 24 er vist et typisk eksempel på en sådan tidsmæssig variation af støjen fra en vindmølle målt med tidsvægtning "FAST". Klippet viser en periode på 20 sek. målt i ca. 500 m afstand inden for en vinkel på 20 grader i forhold til medvindsretningen fra en vindmølle. Afstanden mellem to toppe svarer til tidsintervallet mellem hver vingepassage af tårnet, hvilket vil sige, at klippet svarer til ca. 4,5 omdrejninger af rotoren.

Figur 24: Eksempel på vindmøllestøjens variation over 20 sek. målt med tidsvægtning "FAST" i 500 m afstand.



Denne variation eller pulseren er i det følgende undersøgt med følgende metoder:

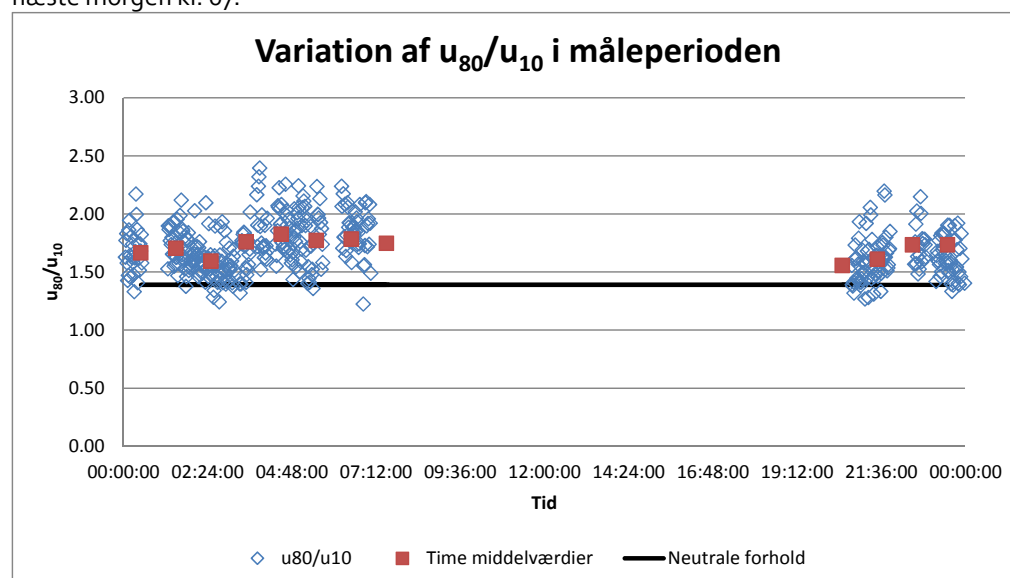
- Analyse af variationen af det A-vægtede lydniveau optaget med tidsvægtning FAST
- Frekvensanalyse af passager med tydelige pulsationer
- Anvendelse af NT ACOU 112 [8] i modificeret udgave. Metoden er udviklet til bestemmelse af impulsindhold samt til brug for evt. et tillæg til et A-vægtet støjniveau
- Subjektiv vurdering ud fra aflytning af lydoptagelser

I analyserne er der fokuseret på målinger foretaget i afstande svarende til typiske afstande til nærmeste naboer.

4.2.2 Støjens pulserende karakter for en enkelt vindmølle

I en målekampagne på Tåsinge i en park med 2 vindmøller blev der over to aftener og nætter foretaget såvel kildestyrkemålinger som målinger af støj i afstande svarende til nærmeste naboafstand fra de to vindmøller. I Figur 25 er variationen af forholdet mellem vindhastigheden i navhøjden 80 m og vindhastigheden i 10 m højde, u_{80}/u_{10} , vist for den måling der her vil blive analyseret mht. til pulsering af lyden. Måleperioden strakte sig fra ca. kl. 20 om aftenen til næste morgen kl. 07, og det ses, at der i hele perioden var varierende stabile forhold med et forhold mellem vindhastighed i navhøjde og i 10 m højde på mellem 1,6 og 1,9 set ud fra time middelværdierne.

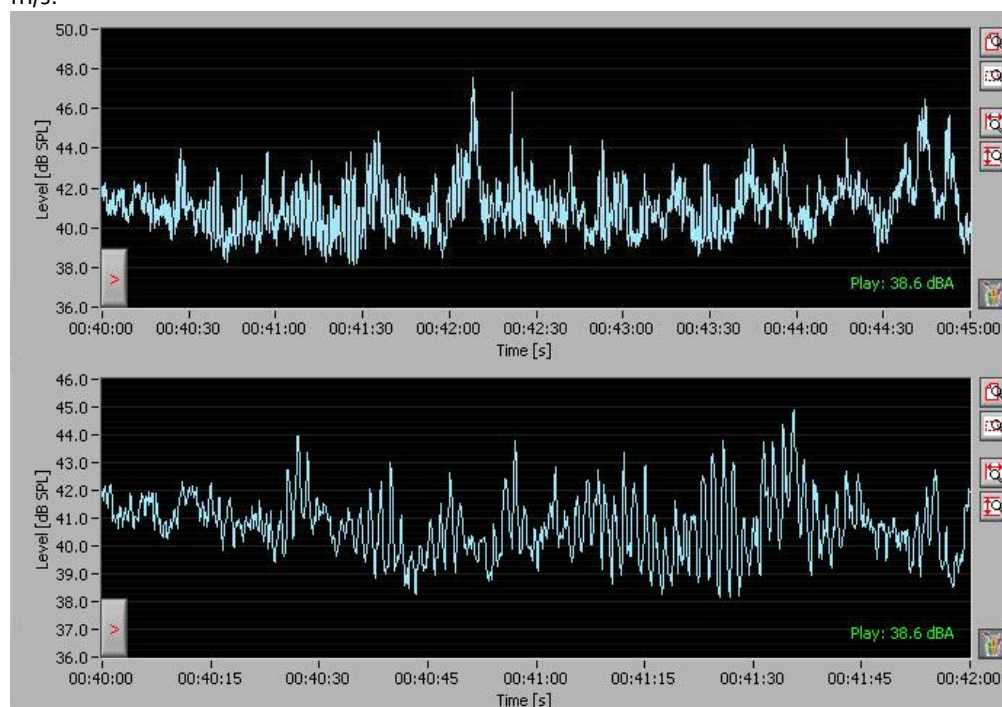
Figur 25: Forholdet mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde, u_{80}/u_{10} , vist over måleperioden med blå for 1 minuts middelværdier og rødt for 1 times middelværdier. Neutrale forhold er vist ved den vandrette linje. Måleperioden starter kl. 20 og slutter næste morgen kl. 07.



Ved at inspicere og lytte optagelserne igennem er de mest tydelige sekvenser med pulserende karakter valgt ud. Afstanden til de to vindmøller var for de pågældende optagelser hhv. 537 m og 844 m og blev foretaget i medvindsretningen med en vinkel i forhold til medvindsretningen inden for 20 grader.

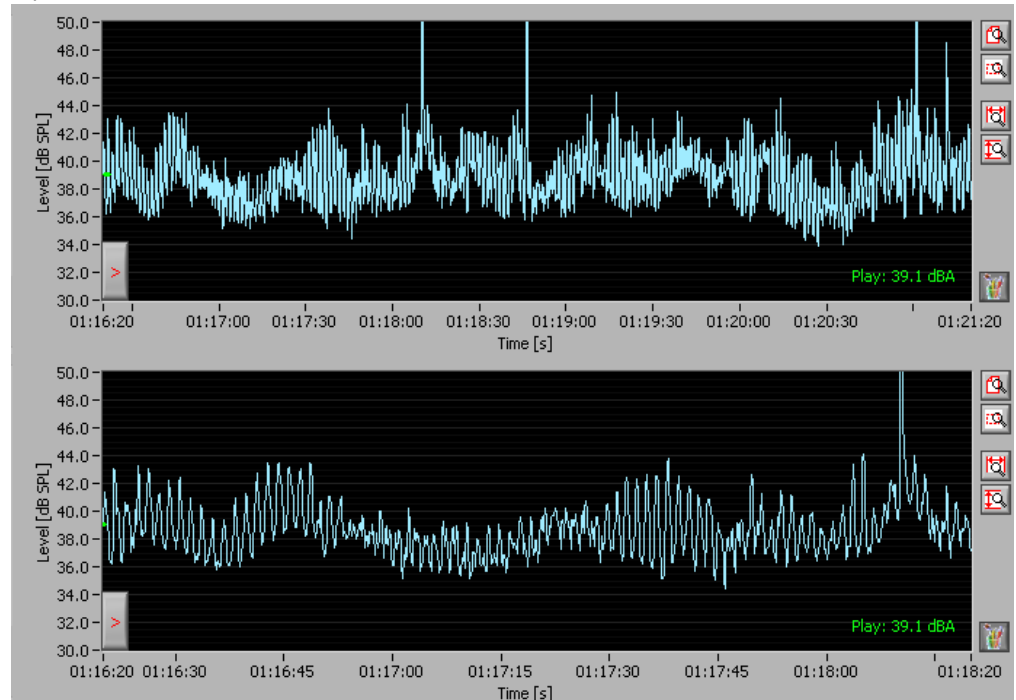
I Figur 26 er vist udsnit fra målinger i afstanden 537 m fra en enkelt vindmølle hhv. som et 5-minutters og et 2-minutters udsnit, hvor starttidspunktet er det samme for begge udsnit. Det ses, at der i denne periode sidst på aftenen, hvor middelvindhastigheden bestemt ud fra effektmåling på vindmøllen ligger på ca. 8 m/s, forekommer variationer på 4-6 dB mellem top og bund i det varierende støjniveau registreret med tidsvægtningen FAST. De markante højeste spidser i det øverste tidsspor er baggrundsstøj forårsaget af hændelser i omgivelserne.

Figur 26: Udsnit af lydoptagelse foretaget 537 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på aftenen. Lydniveauet er angivet som dB(A) med tidsvægtning FAST. Middelvindhastighed bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er for perioden ca. 8 m/s.



I Figur 27 er vist udsnit fra målinger i 537 m afstand fra en enkelt vindmølle hhv. som et 5- og et 2-minutters udsnit, hvor starttidspunktet er det samme for begge udsnit. Det ses, at der i denne periode sidst på natten, hvor middelvindhastigheden bestemt ud effektmåling på vindmøllen ligger på ca. 7 m/s, forekommer variationer på 5-7 dB mellem top og bund i det varierende støjniveau. De markante højeste spidser i det øverste tidsspor er baggrundsstøj forårsaget af hændelser i omgivelserne.

Figur 27: Udsnit af lydoptagelse foretaget 537 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på natten. Lydniveauet er angivet som dB(A) med tidsvægtning FAST. Middelvindhastigheden bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er for perioden ca. 7 m/s.

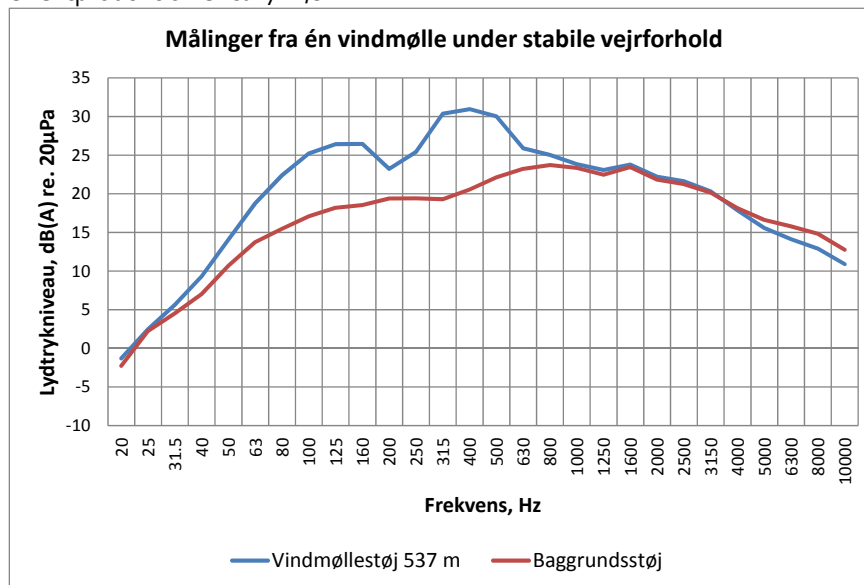


I Figur 28 er der vist en frekvensanalyse af lydklippet fra Figur 27 sammen med en frekvensanalyse af baggrundsstøjen med vindmøllen stoppet. Den væsentligste del af støjen ligger mellem 80 og 800 Hz. Dykket ved 200 Hz fremkommer som følge af terræneffekten, der for netop denne kombination af kildehøjde, afstand og modtagerhøjde dæmper disse frekvenser ud. En nærmere forklaring vedr. dette kan findes i [5].

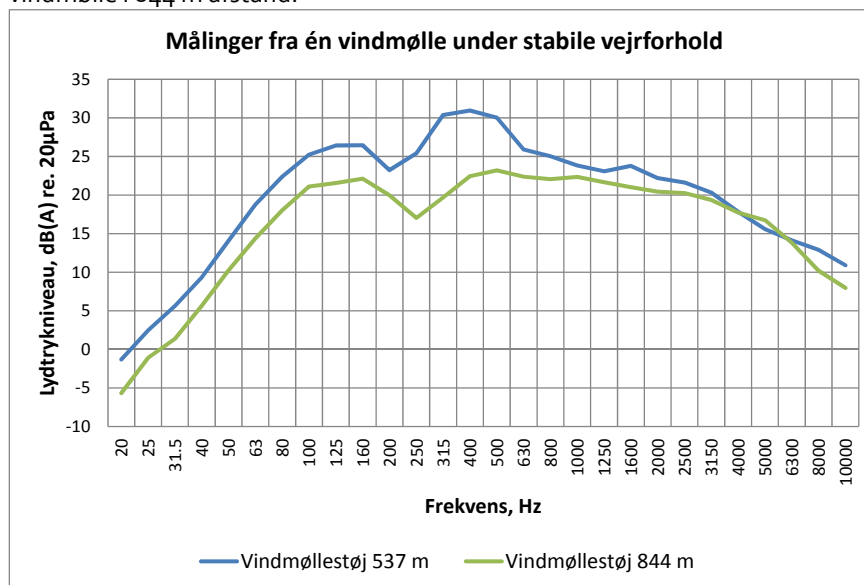
Til sammenligning er der i Figur 29 vist en frekvensanalyse for særskilt drift af hhv. den ene vindmølle i parken i en afstand af 537 m og særskilt drift af den anden vindmølle i parken i en afstand af 844 m. Det ses, at det omtalte terrændyk rykker til en lidt højere frekvens for vindmøllen i 844 m afstand.

Målingen for sidstnævnte er ved en middel vindhastighed på ca. 6 m/s, og det ses af det viste tidssignal for støjen i Figur 30, at pulsationen i støjen fra denne vindmølle i afstanden 844 m ligger på ca. 3-4 dB, hvilket er lavere end for vindmøllen i 537 m afstand. Den markante højeste spids i tidssporet skyldes baggrundsstøj fra hændelser i omgivelserne.

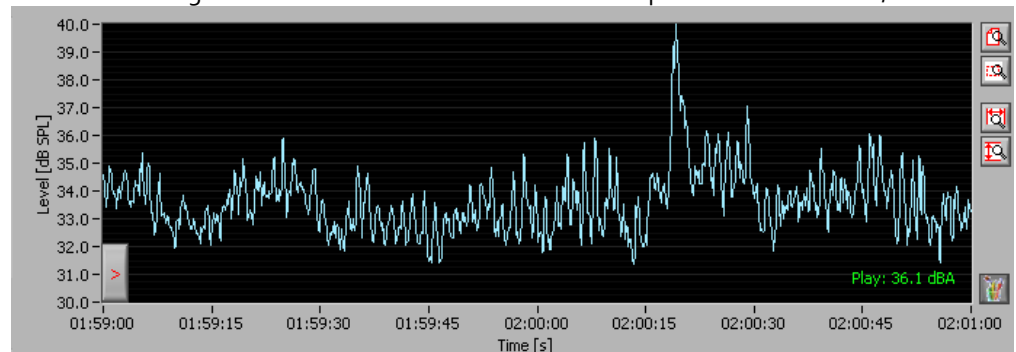
Figur 28: Frekvensanalyse af lydoptagelse foretaget 537 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på natten. Middelvindhastigheden bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er ca. 7 m/s.



Figur 29: Frekvensanalyse af lydoptagelse foretaget 537 m og 844 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på natten. Middelvindhastighed bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er ca. 7 m/s for vindmøllen i 537 m afstand og ca. 6 m/s for den anden vindmølle i 844 m afstand.



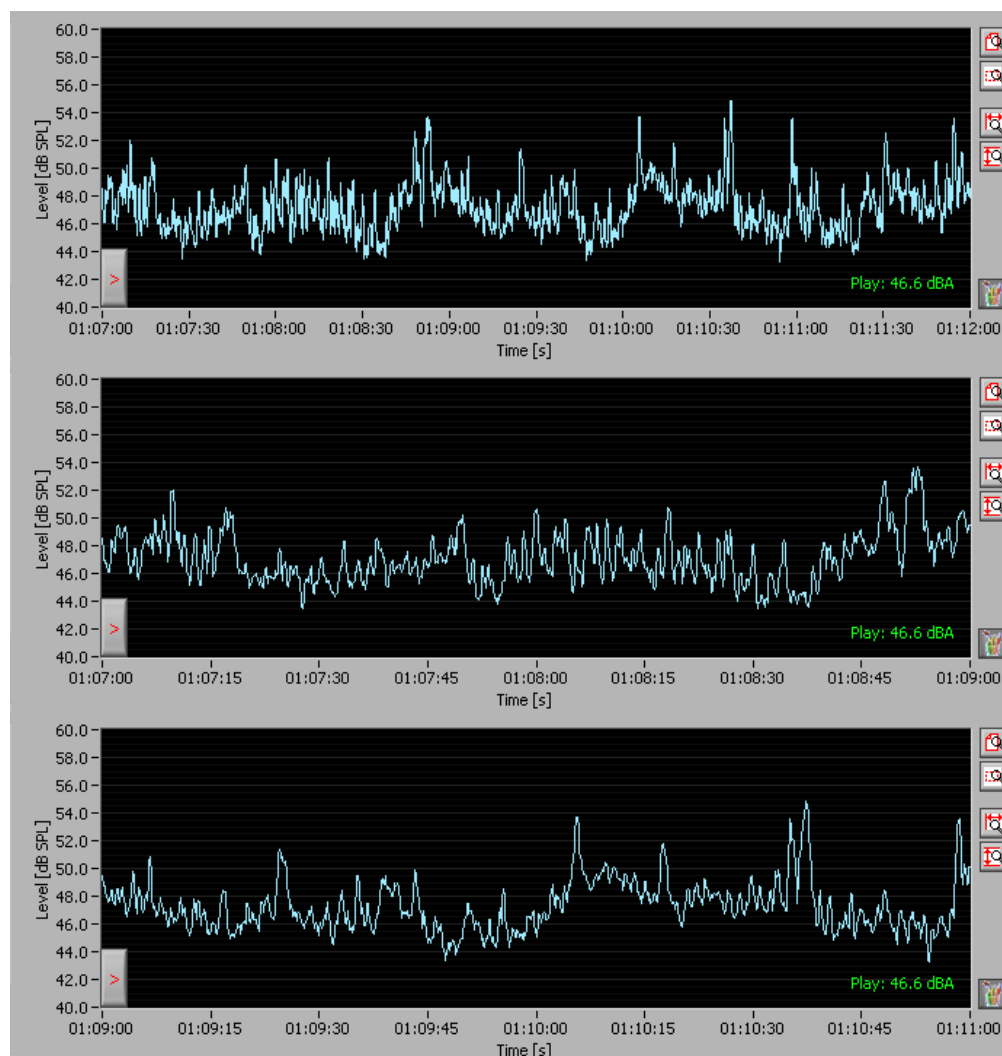
Figur 30: Udsnit af lydoptagelse foretaget 844 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på natten. Lydniveauet er angivet som dB(A) med tidsvægtning FAST. Middelvindhastigheden bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er ca. 6 m/s.



Til sammenligning af målingerne foretaget under stabile meteorologiske forhold med tilsvarende foretaget under neutrale forhold er inddraget målinger foretaget en eftermiddag under neutrale forhold på en tilsvarende vindmølle i en afstand på ca. 500 m.

I Figur 31 er hhv. et 5- og to 2-minutters udsnit vist for disse målinger foretaget under neutrale meteorologiske forhold ved vindhastigheder på 7-8 m/s. Tidskoden er den samme for alle udsnit. Det ses, at der i denne periode typisk forekommer variationer på 4-5 dB og i enkelte kortere perioder variationer på op til 6-7 dB mellem top og bund i det varierende støjniveau. De mest markante af spidserne i optagelsen stammer fra fugle og anden baggrundsstøj. Pulsationernes ses i kortere tidsrum om dagen end om natten. Dette kan bl.a. skyldes, at baggrundsstøjniveauet er 6-8 dB højere for målingerne foretaget om dagen.

Figur 31: Udsnit af lydoptagelse foretaget ca. 500 m fra en vindmølle under neutrale meteorologiske forhold sidst på eftermiddagen. Lydniveauet er angivet som dB(A) med tidsvægtning FAST. Vindhastigheden for perioden er 7-8 m/s.



Med henblik på at få finde en metode til at foretage en kvantificering af den pulserende støj fra vindmøller er der foretaget forsøg med anvendelse af den metode til analyse for impulser som er beskrevet i NT ACOU 112 [8].

Analyser i henhold til NT ACOU 112 giver et mål for, hvor tydeligt impulsen høres gennem den kontinuerte støj. Impulsstøj er karakteriseret ved en pludselig optræden, hvilket gør den tydeligere og mere fremtrædende end kontinuerte støjtyper, og gør det endvidere nemmere at identificere støjen. I metoden indgår en bestemmelse af impulsens tydelighed, P, baseret på bestemmelse af niveaudifferensen og stigningstakten for impulsagtige ændringer i det A-vægtede lydtrykniveau med tidsvægtning FAST. Nærmere detaljer kan findes i [8].

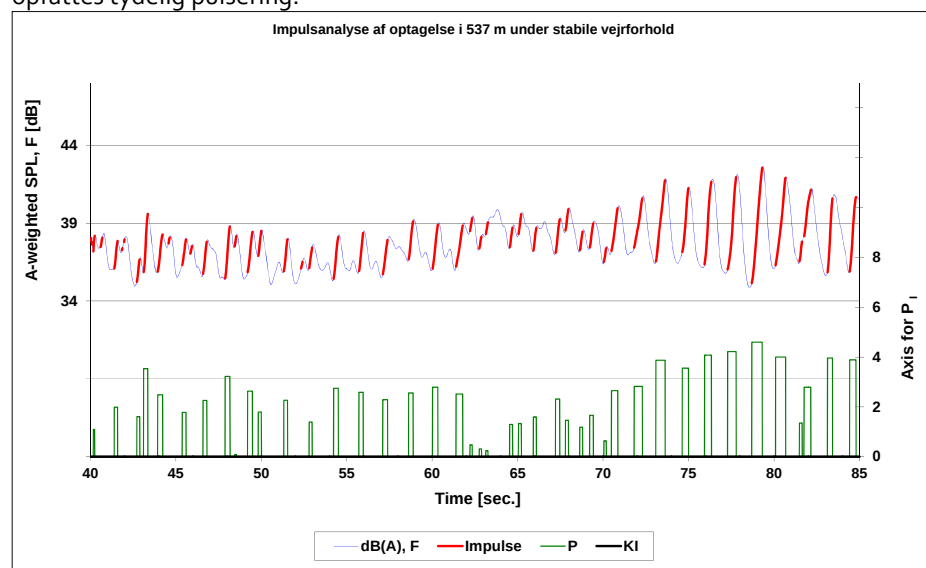
Metoden er her anvendt i en lettere modificeret udgave med tilpasning af bl.a. den måde hhv. impulsens stigningstakt og niveaudifferens vægtes ved beregning af P for at få sammenhæng til det lytteindtryk, man får for den analyserede lydsekvens.

I Figur 32 er vist et eksempel på anvendelse af denne metode. Sekvensen på 45 sek. er taget fra tidssignalet vist nederst i Figur 27 ("Tid 1:17:00 til 1:17:45"). De dele af tidssignalet, der er detekteret som en impuls, er i figuren markeret med rødt, og i den nederste del er der med grønt angivet en "Prominence" P for de enkelte

detekterede impulser samt med sort evt. angivet et tillæg KI ud fra NT ACOU 112's kriterier.

Det ses, at den lettere modificerede metode detekterer alle vingepassagerne som impulser, uden at der dog udløses et tillæg. Ved aflytning af lydklippet opfattes der i de første 30 sek. af sekvensen kun en svag underlæggende pulsering, mens der i de sidste 15 sek. opfattes en klar hørbar pulsering, hvilket med impulsmetoden ses ved en P-værdi større end 3 på den viste skala til højre i Figur 32. Ved en yderligere tilpasning af metodens analyseparametre, f.eks. ved at sammenholde analyser med lytteforsøg på udvalgte lydeksempler, vurderes det, at metoden kan anvendes til at analysere denne form for pulserende lyd. Det skal understreges, at de her præsenterede resultater opnået med den modificerede udgave af metoden fra NT ACOU 112 ikke kan sammenholdes med Miljøstyrelsens praksis for behandling af impulsstøj.

Figur 32: Impulsanalyse foretaget iht. modificeret udgave af NT ACOU 112 på sekvens, hvor der i de første 30 sek. subjektivt kun opfattes svag pulsering, og i den sidste periode opfattes tydelig pulsering.



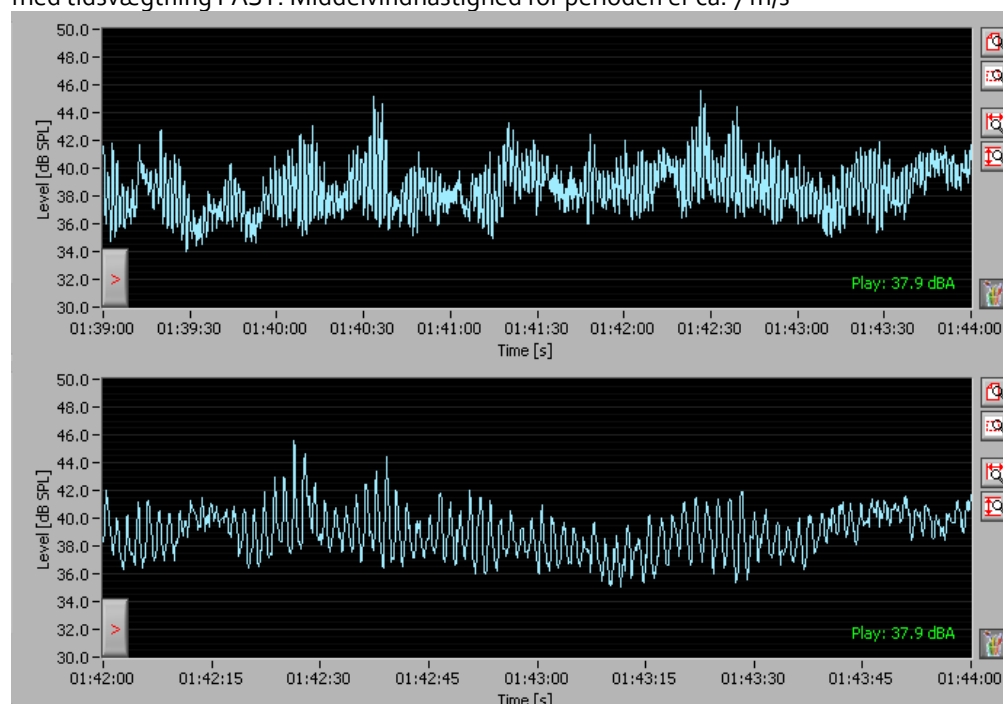
4.2.3 Støjens pulserende karakter med flere vindmøller i drift samtidig

I [4] omtales, at der er konstateret en øget pulsation i perioder, hvor flere vindmøller giver støjbidrag samtidig og i perioder ”roterer i takt” i forhold til observationspunktet.

I nærværende undersøgelse er det med baggrund i foreliggende måledata fra hhv. de to vindmøller på Tåsinge og en anden vindmøllepark med i alt 6 vindmøller undersøgt, om en sådan adderet pulsation har kunnet konstateres.

I Figur 33 er vist udsnit fra målinger fra Tåsinge med samtidig drift af to vindmøller. Den ene i afstanden 537 m fra mikrofonen og den anden i afstanden 844 m. Optagelsen er lavet umiddelbart efter udsnittet vist i Figur 27, og der er vist hhv. et 5- og et 2-minutters udsnit for en periode med en middelvindhastighed på ca. 7 m/s. Tidskoden er den samme på begge udsnit. Det ses, at der i denne periode sidst på natten forekommer variationer på 5-7 dB mellem top og bund i det varierende støjniveau. Der er her ikke observeret nogen øgning af pulsationen som følge af, at der er to vindmøller samtidig i drift.

Figur 33: Udsnit af lydoptagelse foretaget med samtidig drift af to vindmøller. Afstand fra vindmøllerne til mikrofonen var hhv. 537 og 844 m. Lydniveauet er angivet som dB(A) med tidsvægtning FAST. Middelvindhastighed for perioden er ca. 7 m/s



I en anden målekampagne foretaget i eftermiddagstimerne under neutrale forhold ved en vindmøllepark med samtidig drift af 6 vindmøller har der ikke ud fra tidssporene kunnet identificeres tydelige passager med synlig pulsationer i en måleafstand på ca. 600 m fra den nærmeste vindmølle. Ved en gennemlytning af optagelserne kan der i meget korte perioder høres pulsationer i støjen svarende til vingernes rotationsfrekvens, men i højere grad lyder det som om, at pulsationerne i dette tilfælde i højere grad udjævner hinanden end forstærker hinanden.

4.3 Afprøvning af vindmøllebekendtgørelsens beregningsmetode

I vindmøllebekendtgørelsen beregner man som nævnt tidligere et støjniveau i en given afstand ud fra kildestyrken bestemt for den pågældende vindmølle og med neutrale reference meteorologiske tilstande.

For at efterprøve denne beregningsmetode med måleresultater på en vindmølle opnået under stabile meteorologiske forhold er målingerne beskrevet i afsnit 4.2.2 analyseret for en periode sidst på natten med en middelvindhastighed på 6 m/s i 10 m højde. Vindhastigheden er bestemt ud fra effektmåling på vindmøllen.

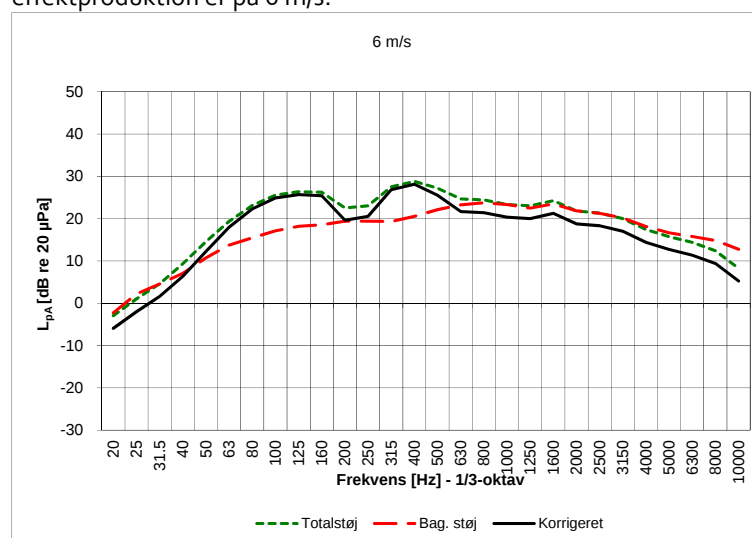
I Figur 34 er frekvensspektre for denne måling i afstanden 537 m fra vindmøllen vist for hhv. en periode med drift af møllen, (totalstøj) og for en periode, hvor møllen var stoppet. Ligeledes er vist de korrigerede værdier, idet der er anvendt begrænset korrektion ved de frekvenser, hvor baggrundsstøjen er mindre end 3 dB lavere end totalstøjen, jf. vindmøllebekendtgørelsens anvisninger. Under 50 Hz og over 500 Hz, hvor baggrundsstøjen var dominerende er der således kun korrigeret med 3 dB for baggrundsstøj. Det totale støjniveau er på den måde bestemt til 35,9 dB(A), hvor den sande værdi ville have ligget lavere, hvis der havde været mindre baggrundsstøj.

Ved brug af den kildestyrke for 6 m/s, der samtidig blev bestemt ud fra målinger over aften- og natperioden og beregning ud til 537 m med

vindmøllebekendtgørelsens beregningsmetode [1], fås et forventet støjniveau i denne position på 34,8 dB(A). I betragtning af, at det ikke er muligt at korrigere det målte støjniveau i afstanden 537 m korrekt for indflydelse fra baggrundsstøj, må overensstemmelsen mellem det beregnede og det målte støjniveau siges at være god. Det skal bemærkes, at den analyserede periode indeholder perioder med pulserende støj, som er omtalt i afsnit 4.2.

I bekendtgørelsens beregningsmetode er der anvendt en simplificeret korrektion for terræn og en referencetilstand for meteorologien. Jf. resultaterne præsenteret i Figur 16 forventes støjniveauer beregnet for stabile meteorologiske forhold i den betragtede afstand på 537 m afstand kun at afvige med 0,1-0,2 dB i forhold til vindmøllebekendtgørelsens referenceforhold.

Figur 34: Frekvensanalyse af lydoptagelse foretaget 537 m fra en vindmølle under stabile forhold sidst på natten. Middelvindhastigheden bestemt ud fra vindmøllens effektproduktion er på 6 m/s.



4.4 Sammenfattende bemærkninger til støjmålinger

Målemetoden, der er beskrevet i vindmøllebekendtgørelsen, er afprøvet under både neutrale og stabile meteorologiske forhold. Det kan ud fra målingerne konstateres, at kildestyrken for en vindmølle bestemt under neutrale meteorologiske forhold ikke afviger fra kildestyrken målt på samme vindmølle under stabile meteorologiske forhold.

Ud fra målinger foretaget om natten i en afstand på 537 m fra en vindmølle er der fundet eksempler på den pulserende variation af støjen fra vindmøllen, hvor der er registreret en variation på op til 5-7 dB af det øjeblikkelige støjniveau. Denne pulserende karakter er også konstateret ved målinger under neutrale vejrforhold om dagen med samme variationsstørrelse, omend ikke i så lange perioder. Hvorvidt det er de meteorologiske forhold eller et lavere baggrundsstøjniveau om natten, der får pulsationerne til at kunne høres tydeligere i længere perioder om natten end om dagen, er ikke klarlagt. Der er ikke konstateret en øget pulsation som følge af samtidig drift af 2 eller flere vindmøller. I et tilfælde med 6 vindmøller i drift synes pulsationerne nærmere at udviske billedet end at forstærke billedet.

Den kildestyrke, der bestemmes ud fra målinger på vindmøller, anvendes til beregning af et støjniveau, som kan forventes hos de nærmeste naboer til vindmøllen. For en naboposition 537 m fra en vindmølle er et støjniveau målt

under natlige stabile vejrforhold sammenlignet med et støjniveau beregnet ud fra vindmøllebekendtgørelsens anvisninger og kildestyrken målt på den pågældende vindmølle med en overensstemmelse inden for 1 dB. Dette var for en situation, hvor der forekom tydelige pulsationer i støjen, som beskrevet ovenfor, hvilket indikerer, at det midlede støjniveau ikke øges i forhold til de beregnede værdier som følge af pulsationerne.

5 Konklusion

Til belysning af de meteorologiske forholds betydning for den måde man jf. vindmøllebekendtgørelsen fastlægger kildestøj fra vindmøller på samt beregner lydets udbredelse fra vindmøller til naboer, er der foretaget en gennemgang af tilgængelig viden og teori på området kombineret med en række analyser af indsamlede meteorologiske data og resultater fra gennemførte støjmålinger på vindmøller under varierende meteorologiske forhold.

Det kan konkluderes, at der, som også beskrevet i litteraturen, er større forskel mellem vindhastigheden i navhøjde og i 10 m højde om natten, end der er om dagen. Resultater fra undersøgelser fra forskellige målestationer i Danmark viser, at forholdet mellem vindhastighederne i 90 m og 10 m højde udtrykt ved 50 % fraktilen om dagen er omkring 1,3, mens det samme forhold om natten stiger fra omkring 1,4 ved de højeste gennemsnitlige vindhastigheder til omkring 1,9 ved de laveste. Baggrunden for denne forskel er, at vindhastigheden i 10 m højde generelt er lavere om natten end om dagen, mens vindhastigheden i navhøjden viser meget små forskelle fra dag til nat. På baggrund af sidstnævnte kan det også konkluderes, at støjemissionen fra vindmøller ikke kan forventes at være større om natten end om dagen. Men hvis kildestyrken af en høj vindmølle bestemmes ud fra den målte vindhastighed i 10 m højde, vil resultater fra kildestyrkemålinger foretaget om natten overestimere vindmøllens støjudsendelse betydeligt i forhold til bekendtgørelsens referencebetingelser.

Det er vist i analysen, at de fundne forskelle kan forklares af ændringer i atmosfærens stabilitet fra dag til nat. Af denne grund er det forventeligt, at der vil være en årstidsmæssig variation, idet atmosfærens stabilitet varierer mindre om vinteren, så forskellen vil være større i sommerhalvåret. Analysen har vist, at denne variation påvirker de fundne forskelle i 10 m højde, men at den har en meget beskeden indflydelse på vindhastighederne i navhøjden. Ligeledes er der ikke fundet indikation af betydende forskelle på kystnære og ikke-kystnære områder ud over de forskelle, som kan forklares af en øget gennemsnitsvind.

Den lavere vindhastighed i 10 m højde forventes at give en relativ lavere baggrundsstøj hos naboerne til vindmøllen, og det er muligt, at den mindre maskering fra baggrundsstøjen kan give anledning til en højere gene under sådanne forhold.

Vindhastigheden på 8 m/s i 10 m højde svarende til den øverste støjgrænse i vindmøllebekendtgørelsen vil med den i bekendtgørelsen forudsatte logaritmiske vindprofil svare til 11,3 m/s i en navhøjde på 90 m højde. Det ses af resultaterne, at 50 % fraktilen for alle fem undersøgte vejrstationer er mindre end 11,3 m/s, og i de viste vindhastighedsfordelinger kan man se, at sandsynligheden for, at natlige vindhastigheder er større end 11,3 m/s i 90 m højde, vil variere fra ca. 5 % ved den laveste gennemsnitlige vindhastighed (Karup) til ca. 40 % ved den højeste gennemsnitlige vindhastighed (Thyborøn). Sandsynligheden for, at der disse steder både vil være en natlig vindhastighed større end 11,3 m/s i 90 m højde og stabile forhold med et relativt lavere baggrundsstøjniveau vil være mindre end de angivne 5 hhv. 40 %. Ved at sammenligne de kumulative fordelingskurver for hhv. 90 m og 10 m højde fås for de betragtede meteorologistationer, at den højeste sandsynlighed

for, at dette forekommer, ses i Høvsøre med ca. 6 %, mens alle andre ligger på ca. 4 % og derunder.

Ud over virkningen på støjemissionen af de meteorologiske forskelle fra dag til nat er det også undersøgt, om disse forskelle kan have en virkning på lydudbredelsen. Til dette formål er der udført beregninger af terræneffekten på det A-vægtede lydtrykniveau for de meteorologiske situationer, der kan forekomme om natten. Beregningerne viser, at virkningen er uden reel betydning ($\pm 0,3$ dB) under medvindsforhold i afstande fra minimumsafstanden for opstilling af vindmøller til mindst 2000 m.

Målemetoden, der er beskrevet i vindmøllebekendtgørelsen, er afprøvet under både neutrale og stabile meteorologiske forhold. Der er ikke noget, der teoretisk skulle bevirke, at den bestemte kildestyrke vil afhænge af de meteorologiske forhold, når der som udgangspunkt for målingerne bestemmes vindhastighed ud fra vindmøllens producerede effekt. Det kan også ud fra målingerne konstateres, at kildestyrken for en vindmølle bestemt under neutrale meteorologiske forhold ikke afviger fra kildestyrken målt på samme vindmølle under stabile meteorologiske forhold.

Ud fra målinger foretaget om natten i større afstande fra vindmøller svarende til typiske afstande til nærmeste naboboliger, er der fundet eksempler på, at der kan høres en pulserende variation af støjen fra vindmøllen. Det er karakteristisk for vindmøllestøj, og der er registreret en variation på op til 5-7 dB af det øjeblikkelige støjniveau. Denne pulserende karakter er også konstateret ved målinger under neutrale vejrforhold om dagen med samme variationsstørrelse omend ikke i så lange perioder. Hvorvidt det er de meteorologiske forhold eller et lavere baggrundsstøjniveau om natten, der får pulsationerne til at kunne høres i længere perioder om natten end om dagen er ikke klarlagt. Der er ikke konstateret en øget pulsation som følge af samtidig drift af 2 eller flere vindmøller. I et tilfælde med 6 vindmøller i drift synes pulsationerne nærmere at udviske billedet end at forstærke billedet.

Den kildestyrke, der bestemmes ud fra målinger på vindmøller, anvendes til beregning af et støjniveau, som kan forventes hos de nærmeste naboer til vindmøllen. For en naboposition 537 m fra en vindmølle er et støjniveau målt under natlige stabile vejrforhold sammenlignet med et støjniveau beregnet ud fra vindmøllebekendtgørelsens anvisninger og kildestyrken målt på den pågældende vindmølle med en overensstemmelse inden for 1 dB. Dette var for en situation, hvor der forekom tydelige pulsationer i støjen, som beskrevet ovenfor, hvilket indikerer, at det midlede støjniveau ikke øges i forhold til de beregnede værdier som følge af pulsationerne.

6 Referencer

- [1] Miljøstyrelsen, Bekendtgørelse om støj fra vindmøller, nr. 1518 af 14. december 2006.
- [2] IEC 61400-11:2002 edition 2.1, Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic measurement techniques, 2002.
- [3] E. Rudolphi, Wind turbine noise emission. Wind speed measurements below hub height give poor accuracy, NAM 98 Proceedings, 127-131, 1998.
- [4] G. P. van den Berg, Effects of wind profile at night on wind turbine sound, J. Sound Vib. 277(4-5), 955-970, 2004.
- [5] B. Søndergaard and B. Plovsing, PSO-07 project. Noise and energy optimization of wind farms. Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise, DELTA Report AV 1236/09, 2009.
- [6] TA-Luft, Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, 1986.
- [7] Bekendtgørelse om kortlægning af ekstern støj og udarbejdelse af støjhandlingsplaner, nr. 717 af 13. juni 2006.
- [8] NT ACOU 112:2002-05. Nordtest Method: Prominence of Impulsive Sounds and for adjustment of L_{Aeq} .
- [9] S. Oerlemans and G. Schepers, Prediction of wind turbine noise and comparison to experiment, second international meeting on wind turbine noise, Lyon, France, 2007.
- [10] D. Bowdler, Amplitude modulation of wind turbine noise, Institute of Acoustics Bulletin vol. 33 no 4.

Resume

Rapporten dokumenterer en undersøgelse af, om de meteorologiske forhold om natten giver anledning til højere støjemission, end forudsat i vindmøllebekendtgørelsen, samt om en vindmølles støjudsendelse er anderledes end om dagen, og vejrforholdene bevirker, at støjen fra vindmøller udbreder sig med mindre dæmpning end forudsat i vindmøllebekendtgørelsen.

Det konkluderes, at en vindmølles støjudsendelse ikke forventes at være større om natten end om dagen, fordi vinden i møllens navhøjde ikke ændres. Det konkluderes også, at lydudbredelsesforholdene om natten kun ændres ubetydeligt. Det er konstateret, at der forekommer perioder med pulserende støj fra vindmøller både om natten og om dagen.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk