



Miljø- og Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Støj fra store, nyere danske vindmøller som funktion af vindhastigheden

Miljøprojekt nr. 1852, 2016

Titel:

Støj fra store nyere danske vindmøller som funktion af vindhastigheden

Redaktion:

Lars Sommer Søndergaard og Claus Backalarz, DELTA

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Lars Sommer Søndergaard, DELTA

Illustration:

Lars Sommer Søndergaard, DELTA

År:

2016

ISBN nr.

978-87-93435-66-7

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.....	5
Summary.....	6
1. Formål	7
2. Metode	8
3. Datagrundlag	11
4. Resultater	12
4.1 Det almindelige frekvensområde	12
4.1.1 Normeret kildestyrke relativ til 6, 7 eller 8 m/s	14
4.1.2 Sammenligning af støjreducerede vindmøller med vindmøller i standardstøjindstilling	18
4.2 Det lavfrekvente frekvensområde	23
4.2.1 Normeret kildestyrke relativ til enten 6, 7 eller 8 m/s	26
4.2.2 Sammenligning af støjreducerede vindmøller med vindmøller i standardstøjindstilling for det lavfrekvente frekvensområde	30
4.3 Sammenligning mellem kildestyrker i det almindelige frekvensområde og i det lavfrekvente område	35
5. Betydning af baggrundsstøj	37
6. Konklusion.....	39
Referencer	40
Bilag A Uddybende læsevejledning til normerede figurer	41

Forord

I april 2014 udarbejdede DELTA for Miljøstyrelsen et teknisk notat [1], hvor støjen/kildestyrken fra moderne pitch-regulerede vindmøller blev undersøgt. Fokus var at lokalisere minima i kildestyrken og sammenligne støjreducerede vindmøller med ikke støjreducerede vindmøller. 51 forskellige vindmøller blev undersøgt med målinger foretaget over 74 måledage.

Sammenlignet med stall-regulerede vindmøller har de moderne pitch-regulerede vindmøller mulighed for at optimere vindmøllens ydelse til en given situation og lokalitet og dermed udnytte vinden bedre. De forbedrede indstillingsmuligheder har hos nogle naboer til møllerne skabt bekymring for, at vindmølleproducenter og -ejere udnytter denne mulighed til at indstille vindmøllerne, så de støjer relativt mere ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s, hvor støjkravene er gældende i Danmark.

DELTA udfører en stor mængde kontrolmålinger af støjen fra forskellige vindmøller i Danmark, og Miljøstyrelsen har bedt DELTA undersøge støjen fra nyere vindmøller i Danmark ved andre vindhastigheder end de normalt rapporterede 6 og 8 m/s. Dette er sket ved at genanalysere og beregne kildestyrken ved vindhastigheder udenfor vindhastighedsområderne 5,5-6,5 m/s og 7,5-8,5 m/s for allerede rapporterede støjmålinger på vindmøller.

Siden undersøgelsen i 2014 [1] er en del flere vindmøller blevet målt. Målingerne er efterfølgende blevet gennemgået og medtaget i analysen med fokus på målinger, der spænder over et stort vindhastighedsområde. I den opdaterede analyse er desuden også inkluderet data for det lavfrekvente frekvensområde, og generelt er der blevet udført flere analyser af resultaterne. De opdaterede resultater bygger på målinger på i alt 102 forskellige vindmøller målt over 143 måledage.

Sammenfatning

Målinger af støj fra vindmøller i Danmark er blevet gennemgået for at identificere datasæt indeholdende data ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s. Fokus har været på nyere pitch-regulerede vindmøller, som i dag typisk opstilles i Danmark. Det samlede datagrundlag er genanalyseret og resultaterne sammenlignet. Både støjen i "det almindelige frekvensområde" og den lavfrekvente støj er blevet analyseret.

Overordnet set – med fokus på alle data – viser undersøgelsen, at kildestyrken stiger med vindhastigheden op til omkring 7 m/s, hvorefter kurven knækker, og kildestyrken er tilnærmelsesvis konstant ved højere vindhastigheder.

Samme tendens observeres for vindmøller i standardstøjindstilling.

Der er stor spredning i støjen fra støjreducerede vindmøller, hvilket formentlig skyldes, at de målte vindmøller er af to fabrikater hver med flere modeller, der igen hver især opererer i flere forskellige støjindstillinger. Generelt ser det ud til, at kildestyrken stiger op til en vis vindhastighed, hvorefter kurven flader ud. Der er dog stor variation i, hvor kraftig stigningen er i kildestyrke pr. ændring i vindhastighed, og ved hvilken vindhastighed knækket sker.

Når støjen fra vindmøller i standardindstilling sammenlignes med støjreducerede vindmøller, er der en gennemsnitlig forskel på ca. 2 dB i kildestyrken ved vindhastigheder i intervallet 4-10 m/s. For højere vindhastigheder omkring 11 og 12 m/s er der en svag tendens til, at støjen er sammenlignelig, altså ingen større forskel i kildestyrken. Datagrundlaget i dette vindhastighedsområde er dog spinkelt, se Figur 4.

Der er ingen tendenser til minima i støjen ved 6 og 8 m/s.

Den lavfrekvente støj følger overordnet set støjen i det almindelige frekvensområde. Der er dog noget større spredning i data for den lavfrekvente støj.

Summary

Measurements of noise from wind turbines in Denmark have been reviewed to identify data set with data at other wind speeds than 6 and 8 m/s. In Denmark noise from wind turbines is regulated at 6 and 8 m/s relative to 10 m height. Focus has been on newer pitch regulated wind turbines which typical are erected in Denmark. The whole data set has been re-analyzed and the results compared. Both the noise in the regular frequency area and the low frequency noise have been analyzed.

In general, overall data shows that the noise from the wind turbines rises with wind speed up to approx. 7 m/s. The noise at higher wind speeds is approx. constant.

The same tendency is observed for wind turbines running in a standard noise setting.

There is a large scatter in the noise from noise reduced wind turbines. This is presumably due to the wind turbines are from two manufacturers with several turbine models each, operating in numerous noise settings. In general it seems that the sound power level rises with wind speed until a certain wind speed, after which the noise at higher wind speeds is approximately constant. However, there is a large variation in how substantial the increase in sound power level per change in wind speed is, and at which wind speed the increase in sound power level changes.

When the noise from wind turbines in standard noise setting is compared to noise reduced wind turbines, there is a tendency that the average difference between the two groups of wind turbines is 2 dB for wind speeds in the range of 4-10 m/s. For higher wind speeds, there is a weak tendency that the noise is comparable for the two groups. However, the data basis is frail due to very few data, see Figure 4.

There are no tendencies to minima in the noise at 6 and 8 m/s.

The low frequency noise (10-160 Hz) in general follows the noise in the regular frequency area (10-10.000 Hz). However, there is a wide variation in the low frequency data.

1. Formål

Det har i debatten vedr. støj fra vindmøller været fremført, at vindmøller er relativt mere støjende ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s, fordi støjgrænserne for vindmøller kun gælder for 6 og 8 m/s.

Det er formålet med undersøgelsen beskrevet i denne rapport at undersøge, om dette er tilfældet.

2. Metode

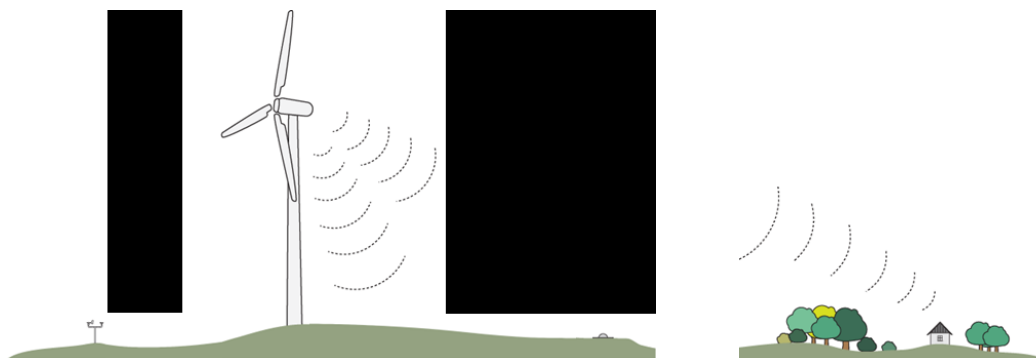
I Danmark er støj fra vindmøller siden år 2006 reguleret ved bekendtgørelserne BEK nr. 1518 [2] og BEK nr. 1284 [3]. Fælles for de to bekendtgørelser er, at de fokuserer på vindhastighederne 6 og 8 m/s i 10 m højde. En del kommuner i Danmark kræver, at der udføres kontrolmåling af støjen, når der opsættes nye vindmøller. Under kontrolmålingen måles der af hensyn til bekendtgørelserne hovedsageligt støjemission ved 6 og 8 m/s, men vejruddisigten passer sjældent eksakt, og desuden er vinden til tider meget svingende og turbulent. DELTA har derfor også indsamlet data ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s. Naturligvis er vindhastighederne tættest på 6 og 8 m/s bedst repræsenteret, hvorfor der vil være et begrænset datagrundlag under 4 m/s og over 10 m/s.



FIGUR 1

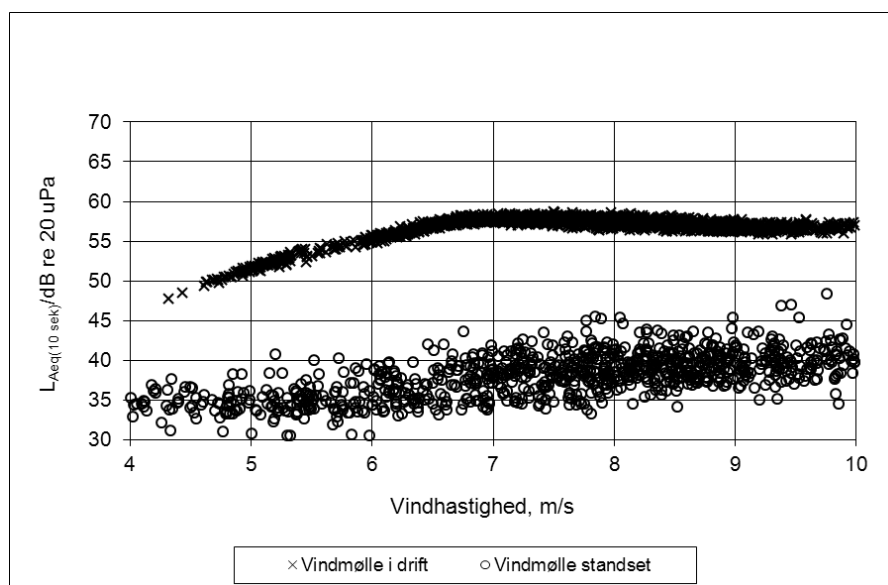
FOTO AF EN MÅLING AF STØJEN FRA EN VINDMØLLE, HVOR VINDMØLLEN, PLADEN OG MIKROFONEN (UNDER DEN EKSTRA VINDSKÆRM) KAN SES.

De omtalte kontrolmålinger udføres iht. bekendtgørelserne ved en måling af lydtrykket på en cirkulær plade (+6 dB måling) placeret direkte på jorden i en afstand svarende til totalhøjden på vindmøllen, se Figur 1. På baggrund af det målte lydtryk kan kildestyrken beregnes. Denne anvendes så til udregning af støjbelastningen i naboafstand, se Figur 2.



FIGUR 2
PRINCIPSKITSE, HVOR VINDMØLLE, MIKROFON OG NABO ER VIST.

Bestemmelsen af kildestyrke foregår ved, at støjniveauet måles over en periode på enten 10 eller 60 s. 60 s anvendes ved BEK nr. 1518, mens begge periodetider kan anvendes ved BEK nr. 1284. Samtidig med målingen af støjniveau registreres forskellige parametre fra vindmøllen, blandt andet produceret effekt og vindhastighed målt med vindmøllens anemometer. Disse data suppleres med vindhastigheden målt med en medbragt meteorologimast på minimum 10 m højde. På baggrund af de forskellige udlæste parametre fra vindmøllen og vindmasten bestemmes vindhastigheden i 10 m højde. Der måles totalstøj, som hovedsageligt er støjen fra vindmøllen, samt baggrundsstøj, når møllen er standset. Begge målinger udføres med eventuelle betydende nabovindmøller standset, så støjen fra disse ikke forstyrrer målingen. I Figur 3 er vist en måling efter BEK nr. 1284, hvor støjen ved forskellige vindhastigheder er gengivet både med vindmøllen i drift og standset. For den aktuelle måling ses, at støjen fra vindmøllen stiger med stigende vindhastighed til ca. 7 m/s, hvorefter støjen ved højere vindhastigheder end 7 m/s aftager en smule. Det ses desuden, at baggrundsstøjen (i dette tilfælde vegetationsstøj) er jævnt stigende med stigende vindhastighed i hele måleintervallet.



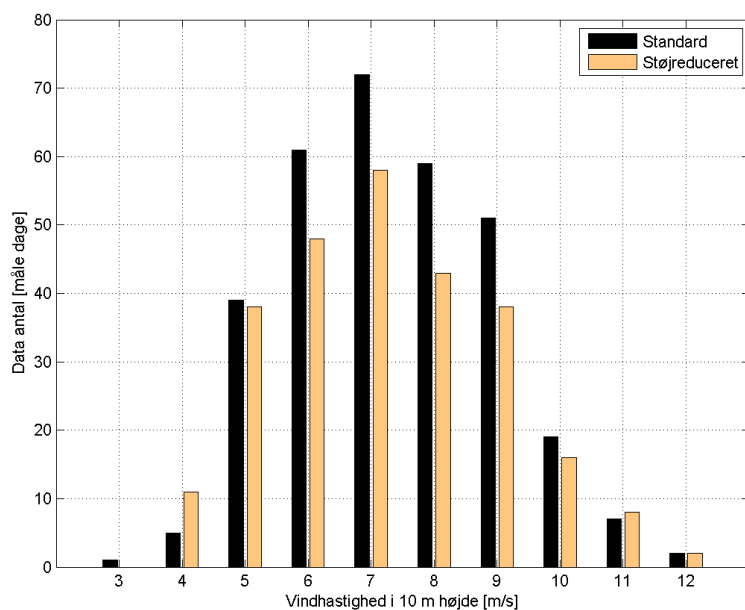
FIGUR 3
MÅLING AF VINDMØLLESTØJ OG BAGGRUNDSSTØJ SOM OPFYLDER BÅDE BEK NR. 1284 [3] (OMFATTER VINDHASTIGHEDER PÅ 6 OG 8 M/S) OG IEC 61400-11 [4] (OMFATTER VINDHASTIGHEDER FRA 6 TIL 10 M/S).

I henhold til BEK 1518 og BEK 1284 beregnes en gennemsnitsværdi af støjen målt på pladen i vindhastighedsintervallerne $5,5 \text{ m/s} \leq v_{\text{ref}} < 6,5 \text{ m/s}$ og $7,5 \text{ m/s} \leq v_{\text{ref}} < 8,5 \text{ m/s}$, der hver repræsenterer støjemissionen ved vindhastigheden 6 og 8 m/s.

3. Datagrundlag

Datagrundlaget for denne analyse er indsamlet ved måling på 102 forskellige vindmøller gennemført af DELTA i perioden primo 2010 til medio 2015. 96 % af målingerne er udført på endelige driftsindstillinger, og 4 % af målingerne er udført på midlertidige driftsindstillinger. Forstået på den måde, at midlertidige driftsindstillinger er indstillinger, der kunne have været anvendt på de aktuelle møller, og som er driftsindstillinger, der anvendes i Danmark. Nogle af møllerne er målt over flere måledage for at få målinger både ved 6 m/s og 8 m/s. I alt er her medtaget 143 målinger. Figur 4 viser fordelingen af målingerne på støjreducerede og ikke-støjreducerede vindmøller som funktion af vindhastigheden. Det ses af figuren, at de to fordelinger ligner hinanden meget, hvorfor sammenligningen af de to mølletyper ved forskellige vindhastigheder kan ske på et ensartet grundlag. De 143 målinger repræsenterer et udsnit af de målinger, DELTA har udført siden 2010 og er udvalgt efter, hvor stort et vindhastighedsområde der er data for.

De anvendte data er fra målinger foretaget på mølletyperne Vestas V80, Vestas V90, Vestas V112/V117, Siemens SWT 2,3 MW, Siemens SWT 3,0 MW og Siemens SWT 3,6 MW, hvilket repræsenterer de vindmølletyper, der hyppigst er blevet opsat i Danmark gennem de seneste år. Ovennævnte vindmøller findes desuden ofte med forskellig rotordiameter, forskellig nominel effekt, forskellige støjindstillinger og nogle både med og uden gear. For hver måling er data lokaliseret ud over 6 og 8 m/s, hvorefter disse er analyseret, og en kildestyrke er beregnet iht. retningslinjerne i enten BEK 1518 eller BEK 1284 ved disse vindhastigheder. Enkelte af de viste data ved de laveste eller højeste vindhastigheder opfylder ikke alle retningslinjer i BEK 1518 eller BEK 1284 til antal af målinger ved den givne vindhastighed. Hvis det er vurderet, at data er repræsentative, er disse alligevel inkluderet i undersøgelsen for at sikre resultater i et stort vindhastighedsområde.



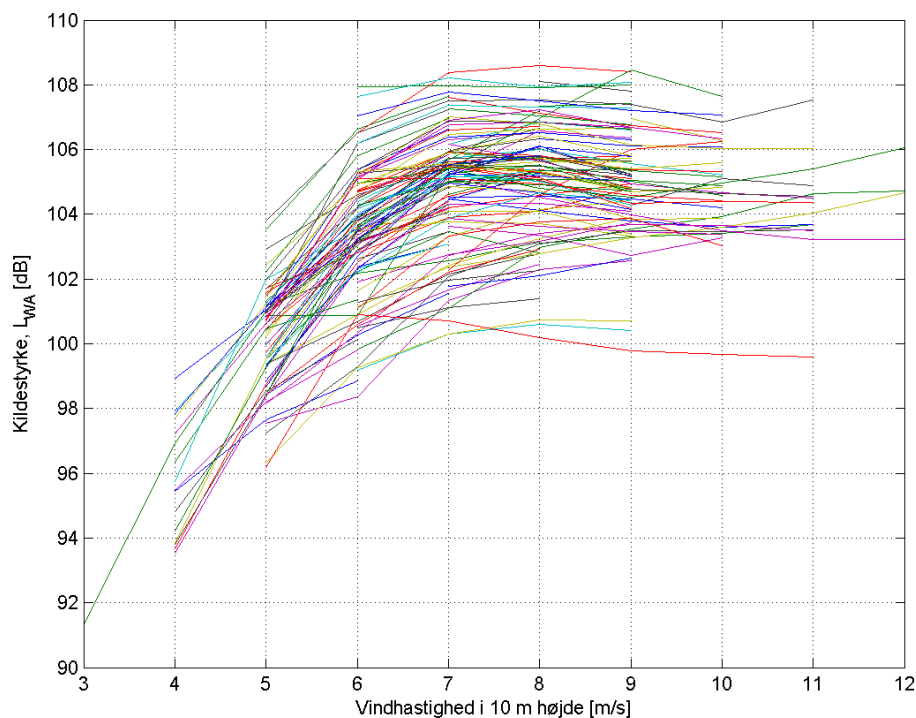
FIGUR 4
OVERBLIK OVER ANTAL MÅLINGER FOR HVER VINDHASTIGHED.

4. Resultater

Resultaterne er analyseret både i det almindelige frekvensområde og i det lavfrekvente frekvensområde. Det almindelige frekvensområde er defineret til at være frekvenser i intervallet 10 Hz til 10 kHz, mens det lavfrekvente frekvensområde er defineret til at være frekvenser i intervallet 10 Hz til 160 Hz.

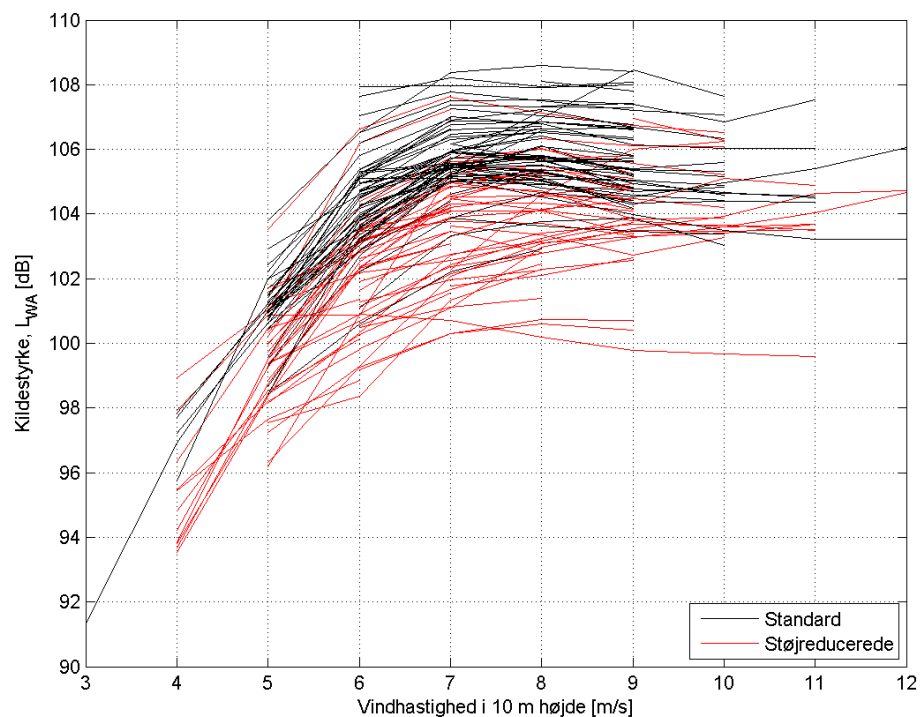
4.1 Det almindelige frekvensområde

Resultaterne fra gennemgangen af data i det almindelige frekvensområde er vist på de følgende sider. Figur 5 viser det samlede overblik over de fundne data. Det ses, at resultaterne – som forventet – primært dækker området fra 5-9 m/s, men enkelte resultater ned til 3 m/s og op til 12 m/s er også indeholdt. Det ses endvidere, at der er en spredning på ca. 8 dB i kildestyrkerne i området omkring 6-8 m/s.



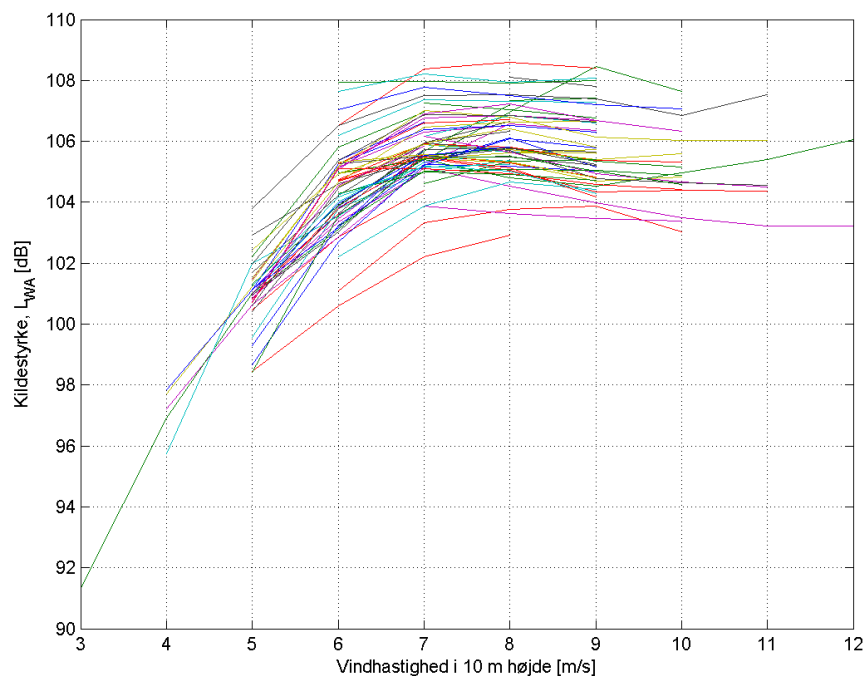
FIGUR 5
SAMLET OVERBLIK OVER ALLE DE FUNDNE DATA. HER VISES KILDESTYRKEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN. HVER KURVE REPRÆSENTERER ÉN MÅLING PÅ ÉN VINDMØLLE, DER INDGÅR I UNDERSØGELSEN.

For at skabe et bedre overblik er kurverne fra Figur 5 gentegnet i Figur 6, men opdelt i to grupper: sort og rød. Den sorte farve repræsenterer vindmøller, der ikke er støjreduceret, herefter benævnt "standard". Den røde farve repræsenterer støjreducerede vindmøller, herefter benævnt "støjreduceret". Den generelle tendens i denne figur viser som ventet, at de ikke støjreducerede vindmøller generelt støjrer mest.



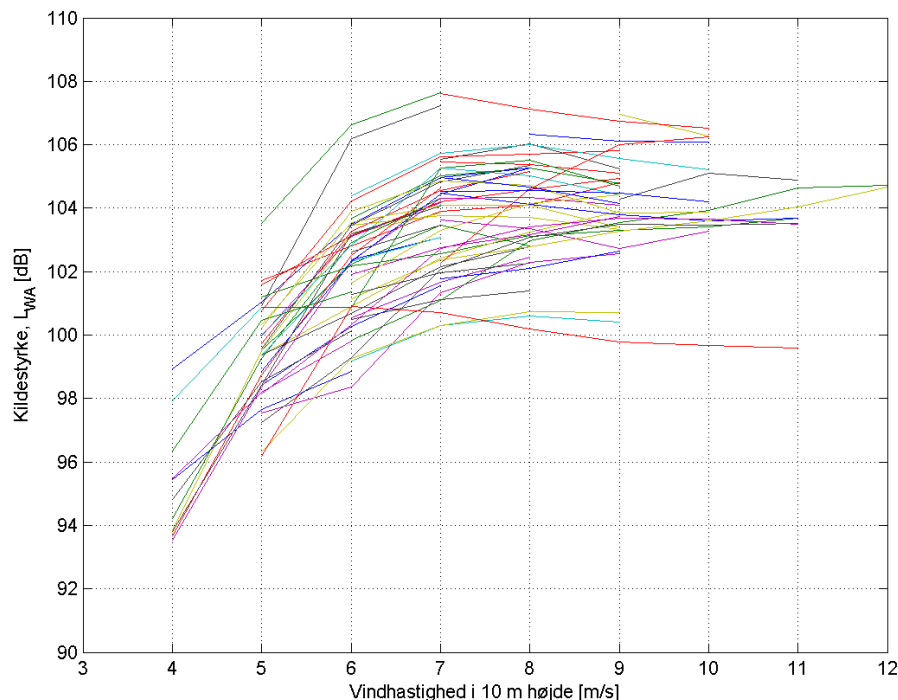
FIGUR 6
KILDESTYRKE FOR BÅDE VINDMØLLER I STANDARDINDSTILLING (SORT) OG I EN STØJREDUCERET INDSTILLING (RØD).

Kurverne splittes herefter op i to figurer: Figur 7 indeholder vindmøllerne i standardindstilling, mens Figur 8 indeholder de støjreducerede vindmøller.



FIGUR 7
VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR ALLE VINDMØLLER DER OPERERER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

For vindmøller i standardindstilling ser vindmøllestøjen som funktion af vindhastighed ud til at følge omtrent det samme mønster: Støjen stiger med vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter støjniveauet ved stigende vindhastighed enten er det samme eller lavere.



FIGUR 8
VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR ALLE VINDMØLLER DER OPERERER I EN STØJREDUCERET INDSTILLING.

Vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden for støjreducerede vindmøller (Figur 8) ser ikke ud til at følge et bestemt mønster, hvilket heller ikke var forventeligt, da hver mølle kan indstilles til forskellige niveauer af støjreduktion. Generelt ser der ud til at være to tendenser:

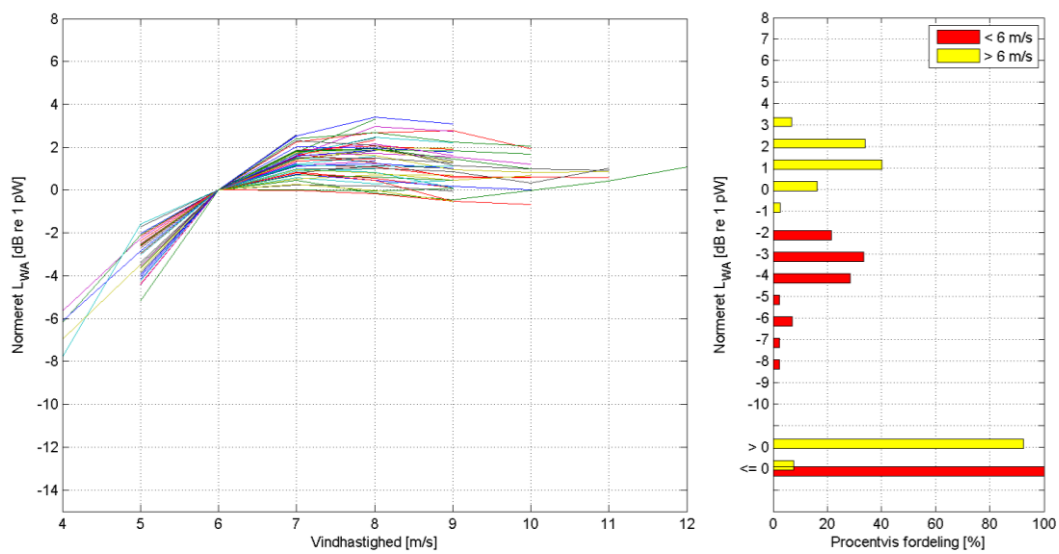
- Støjen stiger med stigende vindhastighed op til ca. 7 m/s, hvorefter støjen enten er konstant eller faldende for højere vindhastigheder.
- Støjen stiger med stigende vindhastighed op til grænsen for, hvor der er data.

4.1.1 Normeret kildestyrke relativ til 6, 7 eller 8 m/s

De danske regler om vindmøllestøj er baseret på målinger ved vindhastighederne 6 og 8 m/s. I dette afsnit vil støjen ved de forskellige vindhastigheder blive sat i forhold til støjen ved en referencevindhastighed på enten 6, 7 eller 8 m/s for bedre at kunne se en eventuel tendens. Til brug for dette er hver måling af kildestyrke normeret, så kildestyrken ved enten 6, 7 eller 8 m/s er sat til 0 dB – og de øvrige vindhastigheder justeret tilsvarende. Resultatet kan ses på de følgende figurer (Figur 9 til Figur 14).

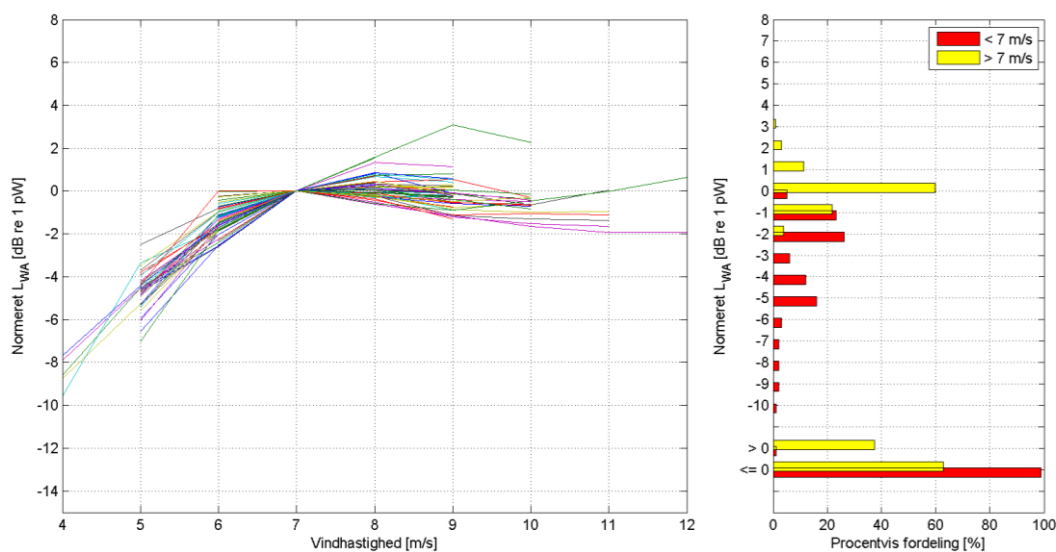
Supplerende på hver figur er et plot i højre side, der viser fordelingen af vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden, hvor lavere vindhastigheder end referencevindhastigheden er vist med rød, og højere vindhastigheder end referencevindhastigheden er vist med gul. I Bilag A er figuren forklaret uddybende.

Figur 9 viser, at kildestyrken for vindmøller i standardstøjindstilling ved højere vindhastigheder end 6 m/s, som ventet næsten alle er højere end kildestyrken ved 6 m/s. Generelt ligger forskellen et sted mellem 1-2 dB. Ved lavere vindhastigheder end 6 m/s er som ventet alle kildestyrker lavere end ved 6 m/s. Generelt er forskellen på -2 til -4 dB.



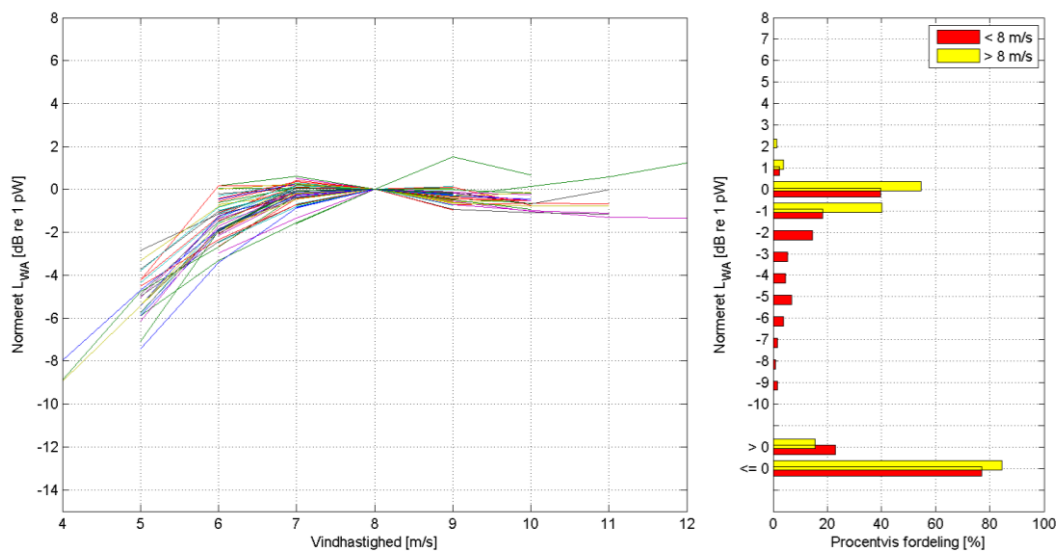
FIGUR 9
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 6 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

Relativt til 7 m/s er kildestyrken ved højere vindhastigheder end 7 m/s i ca. 60 % af tilfældene lavere end kildestyrken ved 7 m/s, se Figur 10. Forskellen er dog primært omkring ± 1 dB, og det er kun enkelte tilfælde, der har en større forskel. Ved lavere vindhastigheder end 7 m/s er næsten alle kildestyrker lavere end ved 7 m/s med en generel forskel på -1 til -5 dB.



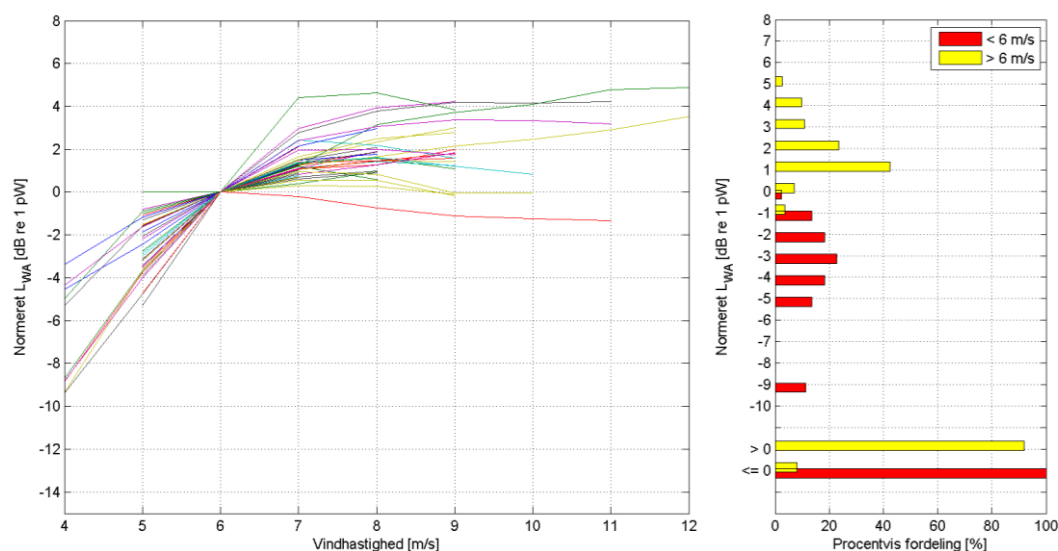
FIGUR 10
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 7 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING

I Figur 11 er kildestyrken ved højere vindhastigheder end 8 m/s i mere end 80 % af tilfældene lavere end kildestyrken ved 8 m/s. Forskellen er dog minimal og i området -1 til 0 dB. Ved lavere vindhastigheder end 8 m/s er de fleste kildestyrker lavere og med en generel forskel på 0 til -5 dB.



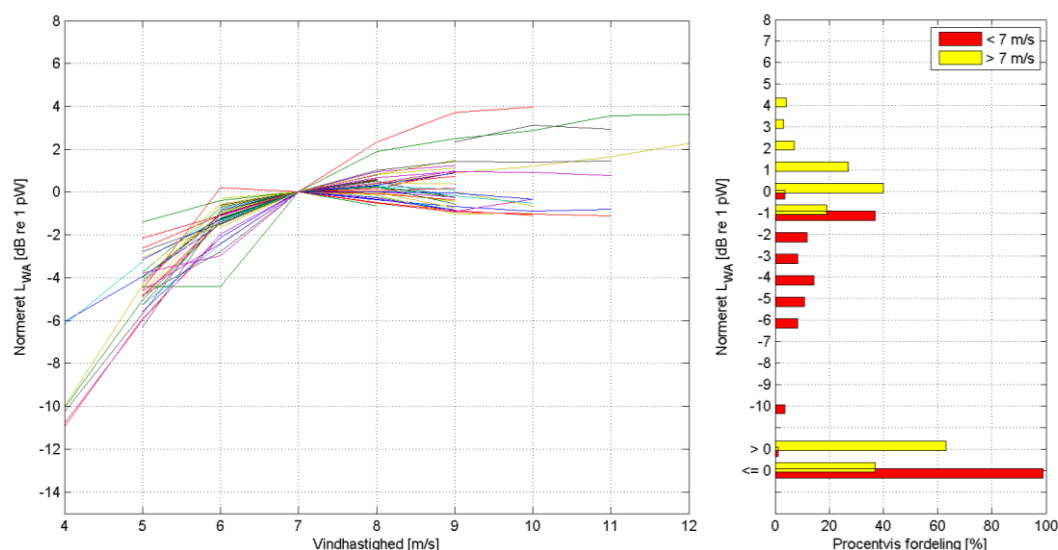
FIGUR 11
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 8 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

Figur 12 viser vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden for vindmøller i støjreduceret indstilling relativt til kildestyrken ved 6 m/s. Som ventet er hovedparten af kildestyrkerne (>90 %) ved højere vindhastigheder end 6 m/s højere end kildestyrken ved 6 m/s. Forskellen i kildestyrke er primært i området 1-2 dB, men også med forskelle op til 5 dB. Ved lavere vindhastigheder end 6 m/s er alle kildestyrker lavere, hvor forskellen primært er i området -1 til -5 dB.



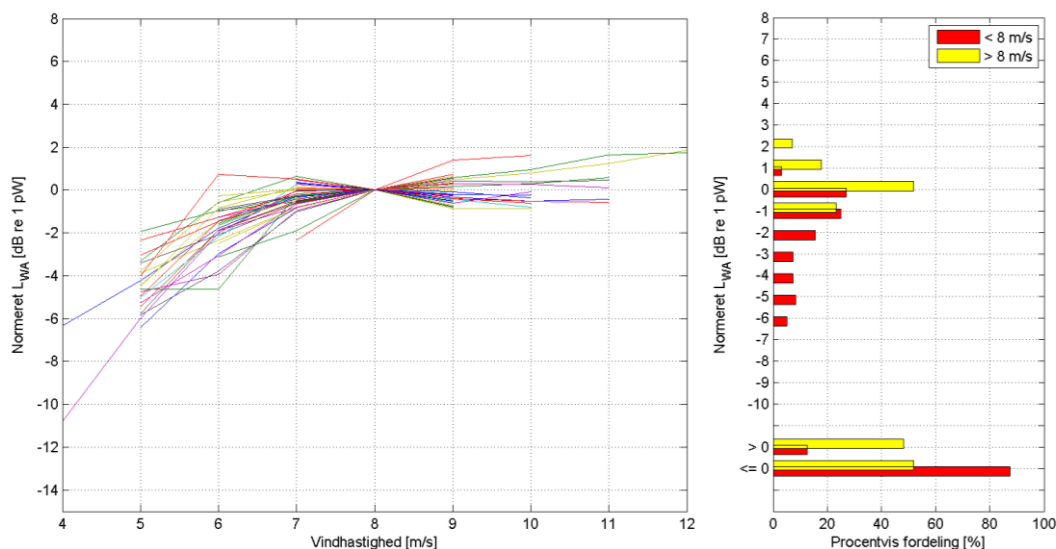
FIGUR 12
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 6 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

I Figur 13 ses, at selv relativt til 7 m/s for støjreducerede vindmøller er over 60 % af kildestyrkerne højere end kildestyrken ved 7 m/s. Majoriteten af disse er dog i intervallet 0-1 dB. Generelt er den relative forskel ved højere vindhastigheder tæt på 0. Ved lavere vindhastigheder end 7 m/s er næsten alle kildestyrker lavere end kildestyrken ved 7 m/s med negative forskelle ned til -6 dB.



FIGUR 13
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 7 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

Også relativt til 8 m/s (Figur 14) har næsten halvdelen af kildestyrkerne ved højere vindhastigheder end 8 m/s en højere kildestyrke end ved 8 m/s. Forskellen i kildestyrke er dog primært begrænset til intervallet ± 1 dB og fokuseret omkring 0 dB. Enkelte forskelle dog op til 2 dB. Ved lavere vindhastigheder end 8 m/s er langt de fleste kildestyrker lavere end kildestyrken ved 8 m/s, hvor den relative forskel ligger i området -6 til 1 dB.



FIGUR 14
DEN NORMEREDE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 8 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

Opsummerende for Figur 9 til Figur 14, dvs. for både støjreducerede vindmøller og vindmøller i standardstøjindstilling, gælder:

- Kildestyrken ved højere vindhastigheder end 6 m/s er generelt højere end kildestyrken ved 6 m/s (over 90 % af data ved højere vindhastigheder har en højere kildestyrke end kildestyrken ved 6 m/s), mens kildestyrken ved lavere vindhastigheder end 6 m/s er generelt lavere end kildestyrken ved 6 m/s.
- Relativt til 7 m/s er det ca. halvdelen af kildestyrkerne ved højere vindhastigheder, der har en højere kildestyrke end kildestyrken ved 7 m/s. Forskellen i kildestyrke er for langt de fleste tilfælde under eller op til 2 dB.
- For vindmøller i standardstøjindstilling er langt de fleste kildestyrker ved højere vindhastigheder end 8 m/s sammenlignelige med kildestyrken ved 8 m/s (forskellen ligger i området -1 til 0 dB).
- For støjreducerede vindmøller er kildestyrkerne ved højere vindhastigheder end 8 m/s nogenlunde ligeligt fordelt i intervallet -1 til 1 dB, med forskelle op til 2 dB.

4.1.2 Sammenligning af støjreducerede vindmøller med vindmøller i standardstøjindstilling

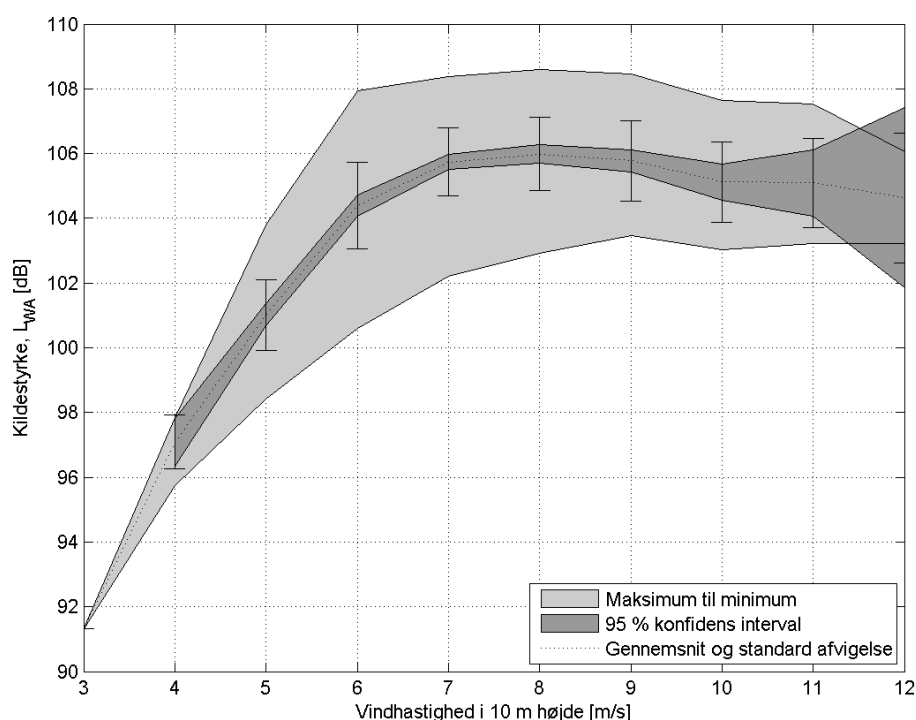
De data, resultaterne i denne rapport bygger på, er samlet fra tilgængelige målinger uden skelen til, hvor godt vindhastighederne er repræsenteret. Derfor er det tilfældigt fra måling til måling, hvor stort et vindhastighedsområde der er dækket, og hvordan målingerne er fordelt inden for dette område. Hver af vindmølle typerne indeholdt i datasættet findes i mange versioner. Der foretages derfor kun vurderinger af hele datasættet – ikke af enkelte datasæt.

I et forsøg på at sammenligne de støjreducerede vindmøller med standardvindmøllerne er den aritmetiske middelværdi for hver vindhastighed beregnet og vises på Figur 15 og Figur 16 for hhv. vindmøller i standardstøjindstilling og støjreducerede vindmøller.

Supplerende er den maksimale værdi, den minimale værdi, konfidensintervallet og standardafvigelsen beregnet for hver vindhastighed.

Det kan diskuteres, hvilken af de beregnede værdier der bedst giver en fair repræsentation af de tilgængelige data, da datamængden er meget forskellig for de forskellige vindhastigheder (se Figur 4), og specielt ved vindhastigheder under 5 m/s og over 9 m/s er der forholdsvis få data. Derfor er alle de nævnte statistiske parametre vist.

Den store variation i typer, modeller og opsætning afspejles af det store spænd mellem minimumkildestyrke og maksimumkildestyrke vist i Figur 15 – op til ca. 7 dB. Det bemærkes også, at spændet mellem minimum og maksimum er størst i vindhastighedsområdet 6-8 m/s. Den store spredning afspejles også i standardafvigelsen, mens konfidensintervallet generelt er lille, hvilket afspejler den forholdsvis store mængde data, der findes i det midterste vindhastighedsområde. Ved ydervindhastighederne (4 m/s samt 10-12 m/s) stiger konfidensintervallet, hvilket afspejler den lille mængde data, der er ved disse vindhastigheder. Figuren afspejler og gentager også den tidligere iagttagne tendens, at kildestyrken stiger med stigende vindhastighed op til en vindhastighed på ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder er tilnærmelsesvis jævn eller svagt faldende.



FIGUR 15

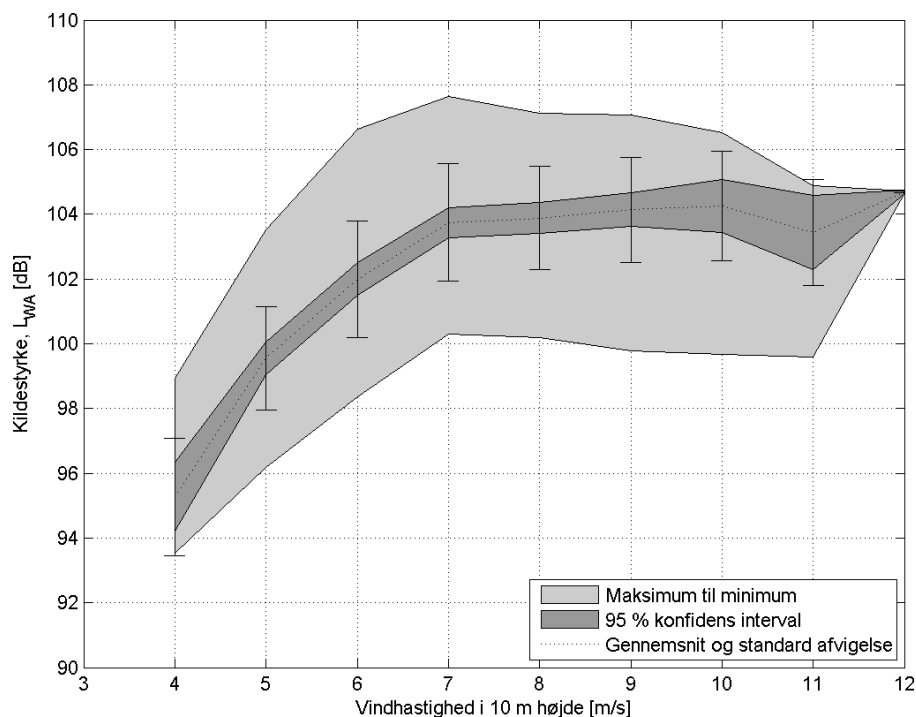
VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING. FIGUREN VISER MIDDELVÆRDI, STANDARDAFVIGELSE, MAKSIMALVÆRDI, MINIMALVÆRDI SAMT KONFIDENSINTERVAL FOR HVER VINDHASTIGHED.

Når den tilsvarende figur for de støjreducerede vindmøller undersøges (Figur 16), kan en del af de samme tendenser iagttages. Afstanden mellem maksimumværdier og minimumværdier for kildestyrkerne er tilnærmelsesvis ens, mens både standardafvigelsen og konfidensintervallet er større end for vindmøllerne i standardstøjindstilling. Ud af dette kan afledes, at kildestyrkerne for de støjreducerede vindmøller afviger mere fra middelværdien end kildestyrkerne for vindmøller i standardstøjindstilling – dog uden en større afstand mellem middelværdi og hhv. maksimum- og minimumkildestyrke. Ved ydervindhastighederne (4 m/s og 11-12 m/s) er her igen forholdsvis få data.

Ved 12 m/s kan iagttages et pudsigt statistisk fænomen, at selvom der kun er 2 datapunkter, er både konfidensinterval og standardafvigelse meget lille, hvilket skyldes, at kildestyrken for de to

datapunkter er næsten identisk. Selvom konfidensinterval og standardafvigelse er lille, er middelværdien ved 12 m/s formentlig usikkert bestemt.

For de statistisk godt repræsenterede vindhastigheder er der en tendens til, at kildestyrken stiger med stigende vindhastighed op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder er konstant eller svagt stigende.



FIGUR 16

VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR STØJREDUCEREDE VINDMØLLER. FIGUREN VISER MIDDELVÆRDI, STANDARDAFVIGELSE, MAKSIMALVÆRDI, MINIMALVÆRDI SAMT KONFIDENSINTERVAL FOR HVER VINDHASTIGHED

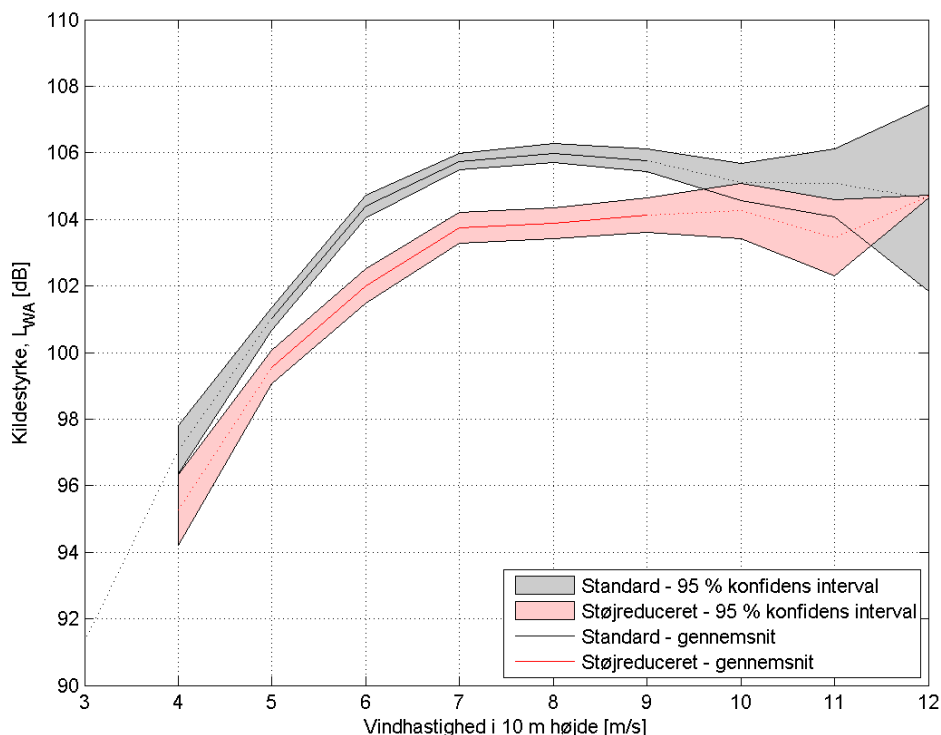
Sammenlignende er den aritmetiske middelværdi og konfidensintervallet optegnet for begge grupper af vindmøller i Figur 17.

Som en tommelfingerregel kan antages, at overlappende konfidensintervaller tyder på, at middelværdierne ikke er signifikant forskellige. Figur 17 viser derfor, at kildestyrken ved kraftig vind (10-12 m/s) ikke er væsentligt forskellig, uanset om vindmøllerne er støjreducerede eller ej, hvor der er en generel forskel på ca. 2 dB for vindhastighederne 4-9 m/s. Datagrundlaget er dog spinkelt ved de højeste vindhastigheder.

Det bemærkes også, at begge kurver har et glat forløb uden tendenser til minima i støjen ved 6 og 8 m/s.

Det er vigtigt at holde sig for at øje, at den viste middelværdi er en gennemsnitsværdi af de data, der eksisterer ved den aktuelle vindhastighed, og at en middelværdi ikke tager højde for antal af data ved hver vindhastighed. For de data, der ligger til grund for den aktuelle undersøgelse, er det tilfældigt, hvor stort et vindhastighedsområde der er dækket – og specielt målinger i de ydre vindhastighedsområder (under 5 m/s og over 9 m/s) er desuden baseret på færre målinger end målinger i det midterste vindhastighedsområde.

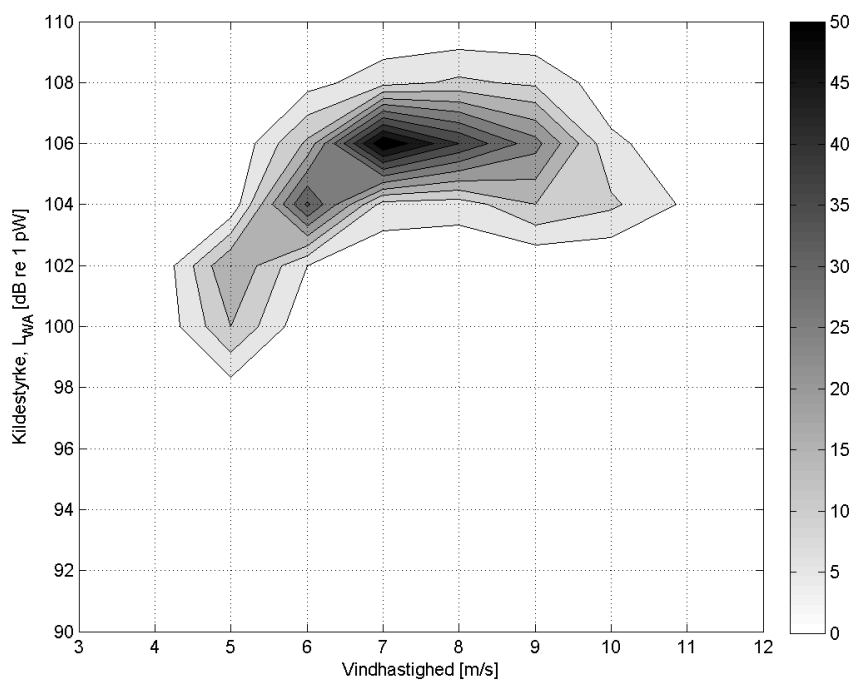
Det kan derfor diskuteres, om værdierne ved vindhastighederne 3, 4, 11 og 12 m/s bør tages med – og muligvis også ved 10 m/s – da der er forholdsvis få data ved disse vindhastigheder. Disse er derfor kun optegnet med en stiplede linje i Figur 17.



FIGUR 17
DEN GENERELLE FORSKEL MELLEM VINDMØLLER I STANDARDINDSTILLING OG VINDMØLLER DER ER STØJREDUCERET I EN ELLER ANDEN FORM. KURVERNE VISER MIDDELVÆRDIERNE, OG DE FARVEDE AREALER VISER 95 % KONFIDENSINTERVALET.

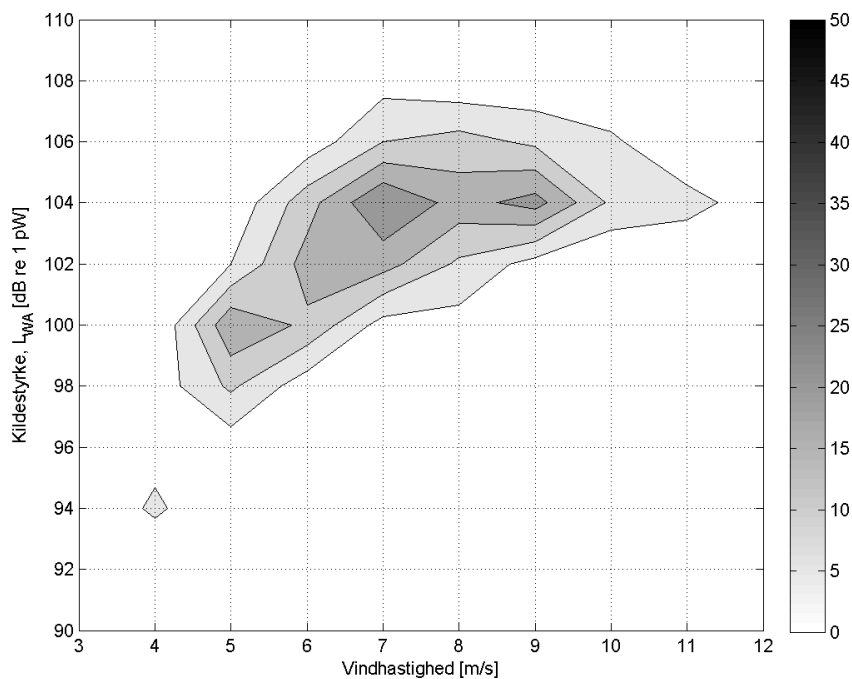
Der er supplerende optegnet konturplot, der viser hyppigheden af de forskellige kildestyrker som funktion af vindhastighederne. Figur 18 og Figur 19 viser vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden som konturplot for hhv. vindmøller i standardstøjindstilling og støjreducerede vindmøller. For sammenligningens skyld er begge plot justeret til samme farveskala. Dvs. at jo mørkere en farve, jo flere data er der ved det aktuelle støjniveau ved den aktuelle vindhastighed. På Figur 18 kan man ved en kildestyrke på 106 dB(A) og en vindhastighed på 7 m/s aflæse en næsten sort farve, der på "termometret" i højre side kan aflæses til, at der er omkring 50 målinger ved 7 m/s med en kildestyrke på 106 dB(A). Ligeledes kan et gråt felt ved en kildestyrke på 104 dB(A) ved en vindhastighed på 10 m/s aflæses til, at der er 10 målinger ved 10 m/s med en kildestyrke på 104 dB(A).

Figur 18 supplerer fint de tidligere iagttagelser fra Figur 7. For majoriteten af dataene (de "mørkeste" områder) stiger kildestyrken med vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken er tilnærmelsesvis konstant til og med 9 m/s (måske en anelse højere for 8 m/s). Data ved 10 og 11 m/s viser dog en faldende kildestyrke ved disse vindhastigheder.



FIGUR 18
KONTURPLOT PÅ BAGGRUND AF HISTOGRAM FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

Figur 19 sammenlignet med Figur 18 viser en noget mere spredt kildestyrke for støjreducerede vindmøller, hvilket fint supplerer iagttagelserne fra Figur 8. Det ses, at kildestyrken for hovedparten af vindmøllerne (de "mørkeste" områder) er stigende op til ca. 7 m/s, hvorefter vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden ved højere vindhastigheder er nogenlunde konstant.

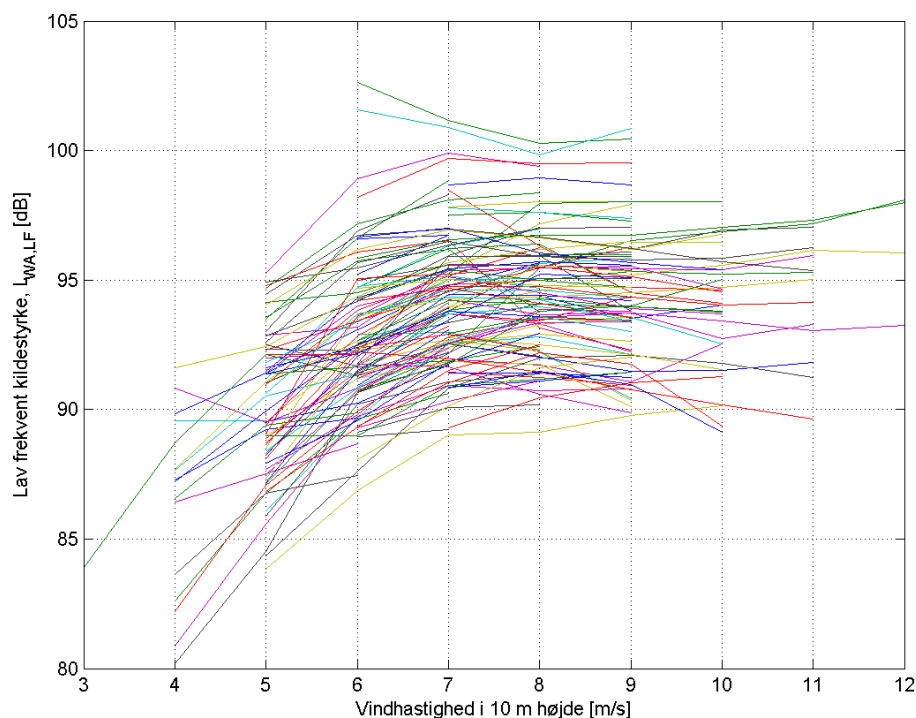


FIGUR 19
KONTURPLOT PÅ BAGGRUND AF HISTOGRAM FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

4.2 Det lavfrekvente frekvensområde

Svarende den beregnede kildestyrke i det almindelige frekvensområde (10 Hz til 10 kHz) er den lavfrekvente kildestyrke beregnet i frekvensområdet 10 Hz til 160 Hz, og tilsvarende figurer er optegnet.

Figur 20 viser den lavfrekvente kildestyrke for alle målingerne. Der ses, at spredningen i data er noget større end den tilsvarende figur for kildestyrken i det almindelige frekvensområde (Figur 5), og data ser ikke på samme måde ud til at følge et bestemt mønster.

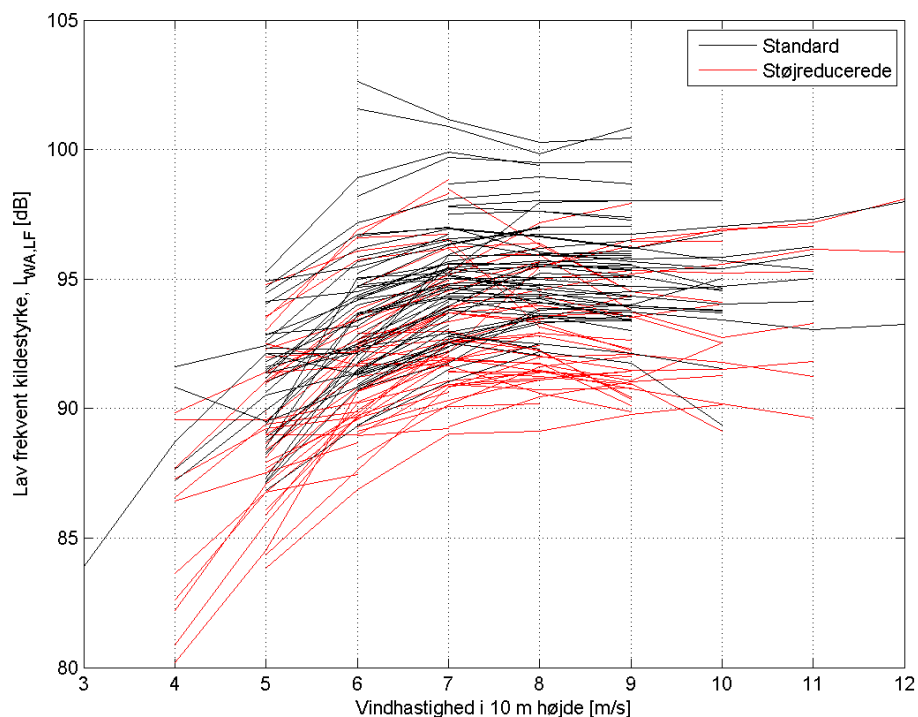


FIGUR 20

SAMLET OVERBLIK OVER ALLE DE FUNDNE DATA I DET LAVFREKVENTE FREKVENSSOMRÅDE. HER VISES DEN LAVFREKVENTE KILDESTYRKE SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN.

Figur 21 viser data fra Figur 20 delt op i støjreducerede vindmøller (røde linjer) og vindmøller i standardstøjindstilling (sorte linjer). Som i Figur 6 ses, at de støjreducerede vindmøller generelt har den laveste kildestyrke, men at der er meget overlap mellem de to datasæt. Det bemærkes også her, at datasættene repræsenterer en del forskellige vindmøller – herunder forskellige fabrikanten, modeller, vingestørrelse, navhøjde, generatorstørrelse osv. De enkelte linjer bør derfor ikke sammenlignes, i stedet bør fokuseres på helheden.

Figur 21 splittes derefter op i Figur 22 og Figur 23 for hhv. vindmøller i standardstøjindstilling og støjreducerede vindmøller.



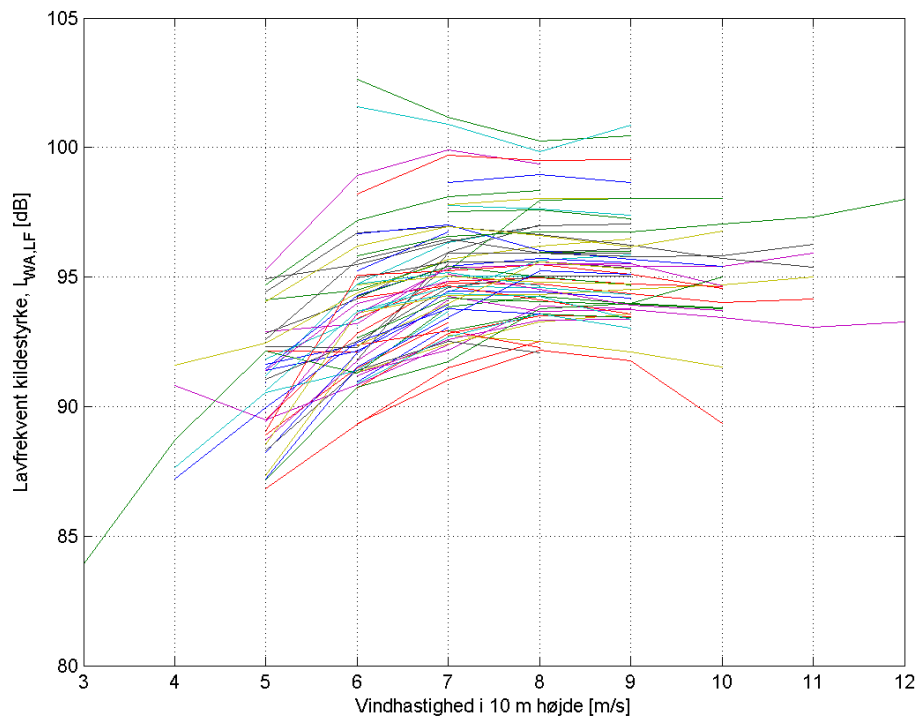
FIGUR 21
LAVFREKVENT KILDESTYRKE FOR BÅDE VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING (SORT) OG I EN STØJREDUCERET INDSTILLING (RØD).

Af Figur 22 ses der at være to tendenser:

1. Hovedparten af data ser ud til at følge samme tendens som for Figur 7: En stigende (lavfrekvent) kildestyrke, som funktion af vindhastigheden for højere vindhastigheder op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken som funktion af vindhastigheden for højere vindhastigheder er tilnærmelsesvis konstant.
2. Den anden tendens kunne man beskrive som om at der ikke er nogen tendens. Disse data virker forholdsvis tilfældige.

I Figur 23 kan der igen deles op i to tendenser:

1. Hovedparten af data ser ud til at følge samme tendens som for Figur 8: Enten en stigende vindmøllestøj som funktion af vindhastigheden for højere vindhastigheder op til ca. 7 m/s, hvorefter vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden for højere vindhastigheder er tilnærmelsesvis konstant eller en støt stigende vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden jo højere vindhastighed.
2. Igen virker en del af data forholdsvis tilfældige.

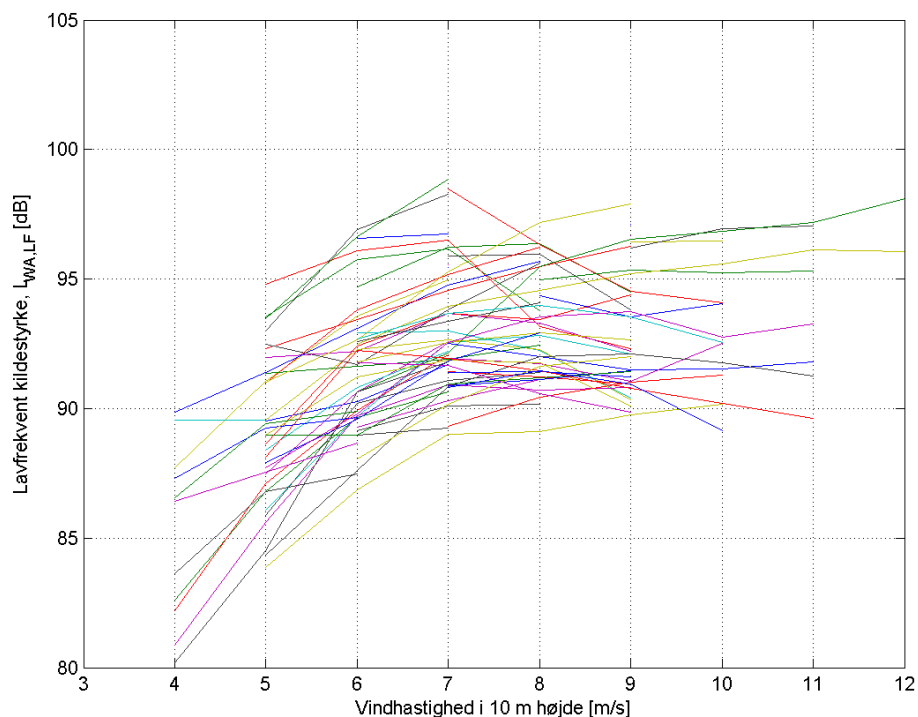


FIGUR 22

DEN LAVFREKVENTE KILDESTYRKE SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR ALLE VINDMØLLER DER KØRER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

Den forholdsvis store spredning i data kan skyldes forskellige faktorer, hvoraf nedenstående er de mest sandsynlige:

- Vindstøj: Ved måling af vindmøllestøj anvendes både en lille vindhætte og en større sekundær vindskærm for at skærme mikrofonen mod vindstøj. Alt efter layout på området, hvor målingen foretages, kan mikrofonen være mere eller mindre eksponeret for vindstøj – hvilket primært influerer det lavfrekvente frekvensområde.
- Toner: De mekaniske dele i nacellen udsender af og til toner – nogle vindmøller også i det lavfrekvente område. Da den lavfrekvente kildestyrke består af forholdsvis få frekvensbånd, kan en forholdsvis tydelig tone have en stor påvirkning på den lavfrekvente kildestyrke.



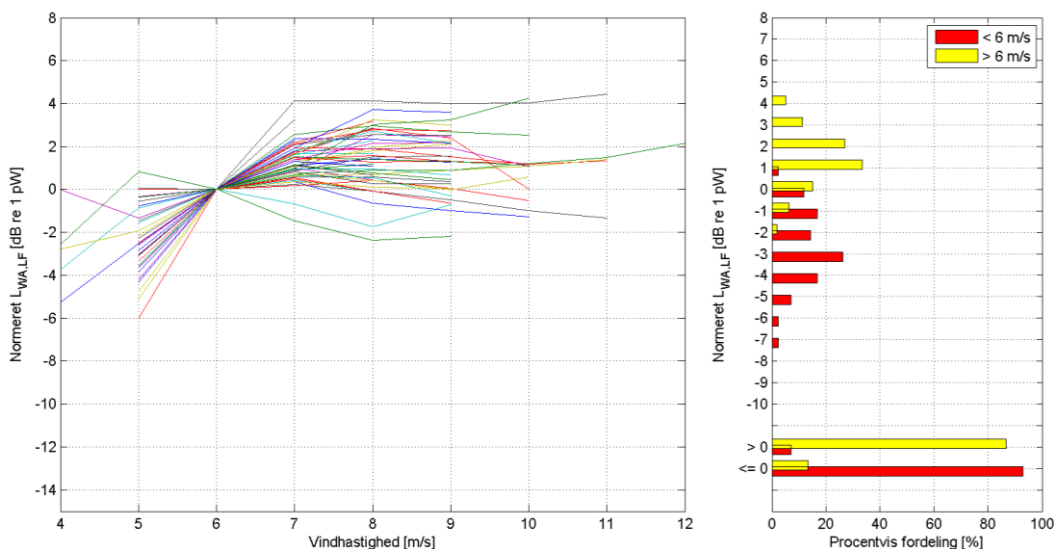
FIGUR 23

DEN LAVFREKVENTE KILDESTYRKE SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR ALLE VINDMØLLER DER KØRER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

4.2.1 Normeret kildestyrke relativ til enten 6, 7 eller 8 m/s

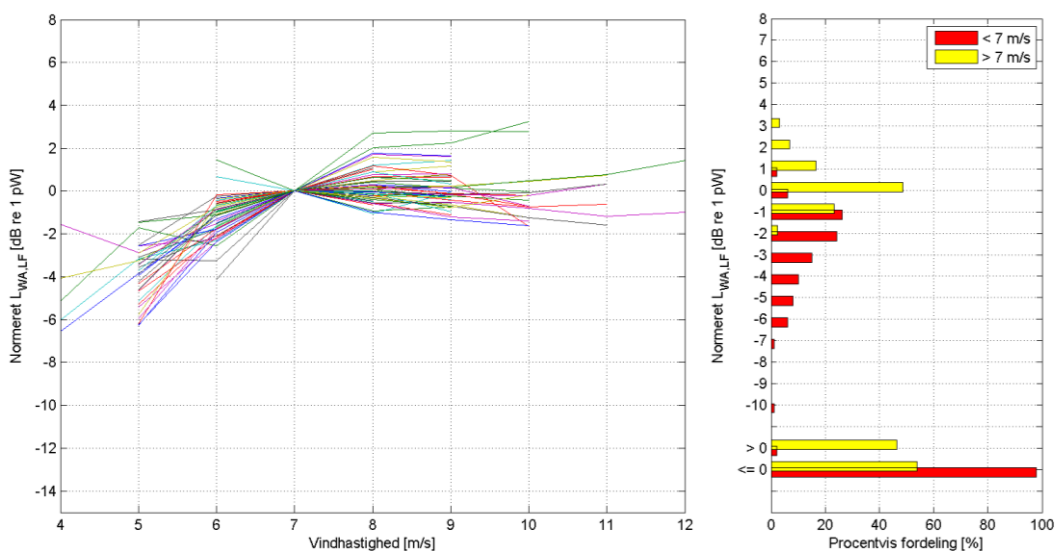
Som beskrevet i afsnit 4.1.1 er de danske regler om vindmøllestøj baseret på 6 og 8 m/s. Tilsvarende afsnit 4.1.1 vil dette afsnit undersøge de lavfrekvente kildestyrker relativt til de lavfrekvente kildestyrker ved enten 6, 7 eller 8 m/s. De følgende grafer er forklaret og eksemplificeret i Bilag A.

Figur 24 viser den normerede lavfrekvente vindmøllestøj som funktion af vindhastigheden relativt til kildestyrken ved 6 m/s. For vindhastighederne over 6 m/s er den lavfrekvente kildestyrke tæt på 90 % af tilfældene højere end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s. Forskellen for de højere vindhastigheder ligger primært i intervallet -1 til 4 dB. Tilsvarende er den lavfrekvente kildestyrke for lavere vindhastigheder end 6 m/s for det meste lavere end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s, hvor forskellen varierer mellem -7 og +1 dB.



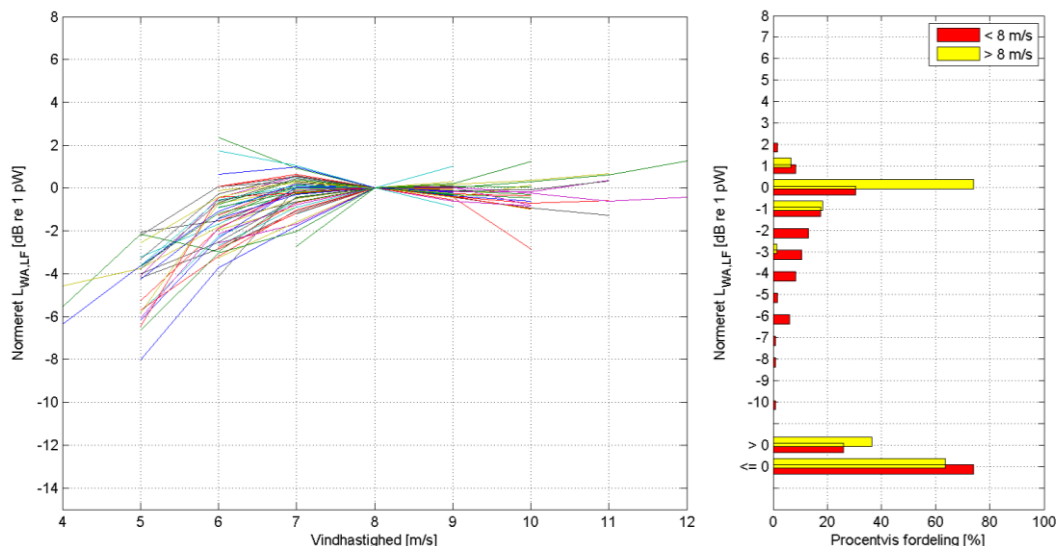
FIGUR 24
DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 6 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

Figur 25 viser den lavfrekvente vindmøllestøj som funktion af vindhastigheden relativt til den lavfrekvente kildestyrke ved 7 m/s. For højere vindhastigheder end 7 m/s er det ca. halvdelen af tilfældene, hvor den lavfrekvente kildestyrke er højere end den lavfrekvente kildestyrke ved 7 m/s. Dog er forskellen i lavfrekvent kildestyrke fokuseret i intervallet ± 1 dB. Tilsvarende er den lavfrekvente kildestyrke ved lavere vindhastigheder end 7 m/s næsten altid lavere end den lavfrekvente kildestyrke ved 7 m/s, med forskellen typisk i intervallet -6 til 0 dB.



FIGUR 25
DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 7 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

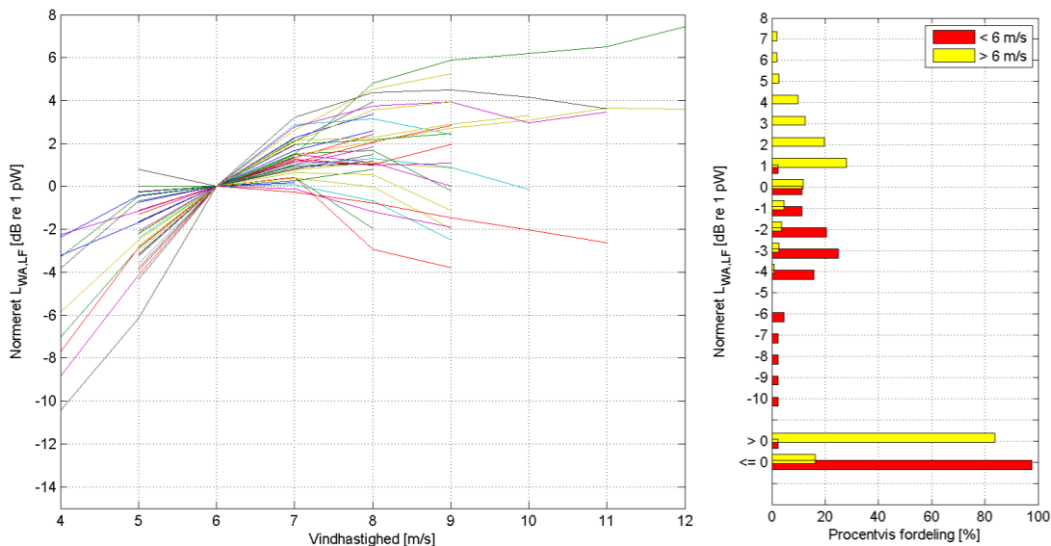
Figur 26 viser den lavfrekvente kildestyrke for vindmøller i standardstøjindstilling som funktion af vindhastigheden relativt til den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s. For højere vindhastigheder end 8 m/s er forskellen for næsten alle data i intervallet ± 1 dB, med over 60 % af data med en forskel på $\pm 0,5$ dB. Tilsvarende for lavere vindhastigheder end 8 m/s er over 70 % af de lavfrekvente kildestyrker lavere end den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s, hvor over 30 % af de lavfrekvente kildestyrker i intervallet $\pm 0,5$ dB.



FIGUR 26

DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 8 M/S FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

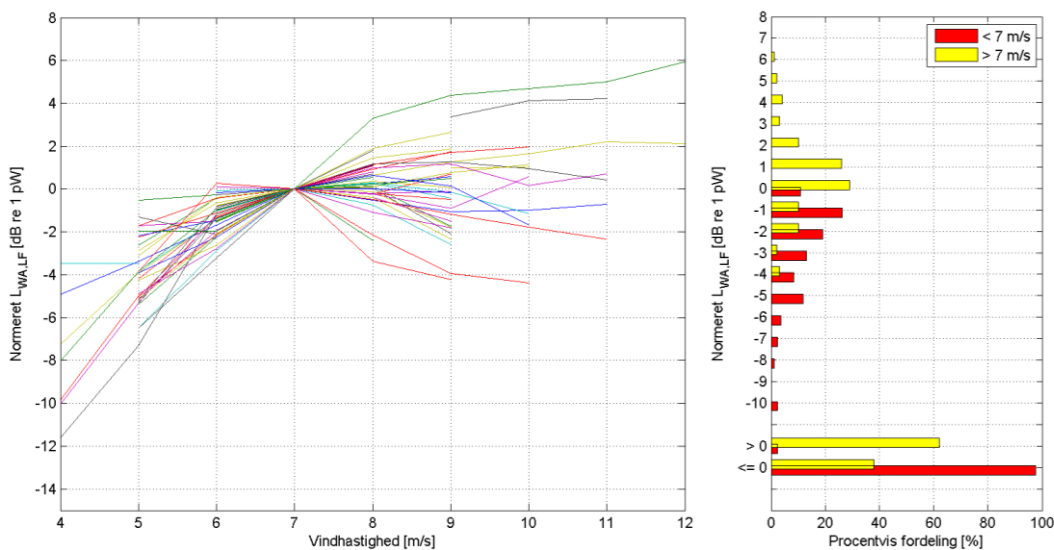
Figur 27 viser den lavfrekvente kildestyrke for støjreducerede vindmøller relativt til den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s. For højere vindhastigheder end 6 m/s er omkring 80 % af data med en højere kildestyrke end kildestyrken ved 6 m/s, hvor forskellen er op til 7 dB for en enkelt vindmølle. De fleste data for højere vindhastigheder har dog en forskel i intervallet 0 til 4 dB. Tilsvarende er der også et stort udsving for lavere vindhastigheder, hvor den negative forskel er op til 10 dB. Næsten alle lavfrekvente kildestyrker ved lavere vindhastigheder er lavere end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s, hvor forskellen generelt er i størrelsesordenen -4 til 0 dB.



FIGUR 27

DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 6 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

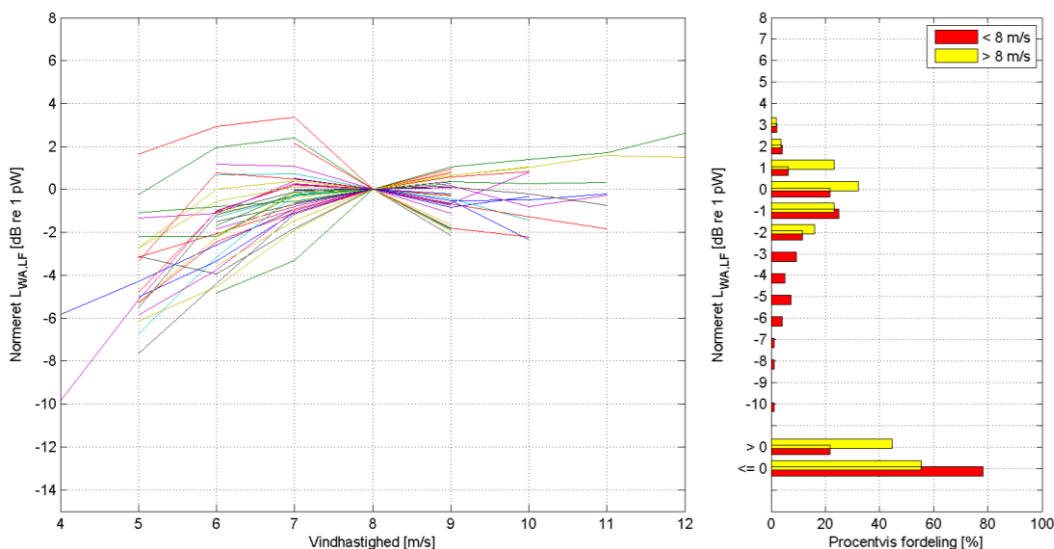
Figur 28 viser den lavfrekvente kildestyrke for støjreducerede vindmøller relativt til den lavfrekvente kildestyrke ved 7 m/s. For højere vindhastigheder end 7 m/s er omkring 60 % af data med en højere kildestyrke end kildestyrken ved 6 m/s, hvor forskellen primært ligger i intervallet -2 til 2 dB. For lavere vindhastigheder end 7 m/s er næsten 100 % af data med en lavere lavfrekvent kildestyrke end kildestyrken ved 7 m/s, hvor forskellen primært ligger i intervallet -5 til 0 dB.



FIGUR 28

DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJ SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 7 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

Figur 29 viser den lavfrekvente kildestyrke for støjreducerede vindmøller relativt til den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s. For højere vindhastigheder end 8 m/s er mere end 40 % af data med en højere lavfrekvent kildestyrke end den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s, men hvor forskellen hovedsageligt ligger i intervallet 0-1 dB. For lavere vindhastigheder end 8 m/s er næsten 80 % af data med en lavere lavfrekvent kildestyrke end den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s, hvor forskellen er spredt mellem -10 til 3 dB, med de fleste data omkring -2 til 0 dB.



FIGUR 29
DEN NORMEREDE LAVFREKVENTE VINDMØLLESTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN RELATIVT TIL KILDESTYRKEN VED 8 M/S FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

Opsummerende for både de støjreducerede vindmøller og vindmøller i standardstøjindstilling (Figur 24 – Figur 29):

- Den lavfrekvente kildestyrke ved højere vindhastigheder end 6 m/s er generelt højere end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s (over 80 % af data ved højere vindhastigheder har en højere lavfrekvent kildestyrke end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s), mens den lavfrekvente kildestyrke ved lavere vindhastigheder end 6 m/s er generelt lavere end den lavfrekvente kildestyrke ved 6 m/s.
- Relativt til 7 m/s er det ca. halvdelen af de lavfrekvente kildestyrker ved højere vindhastigheder der har en højere lavfrekvent kildestyrke end den lavfrekvente kildestyrke ved 7 m/s. Forskellen i lavfrekvent kildestyrke er for langt de fleste tilfælde under eller op til 2 dB.
- For vindmøller i standardstøjindstilling er langt de fleste lavfrekvente kildestyrker ved højere vindhastigheder end 8 m/s sammenlignelige med den lavfrekvente kildestyrke ved 8 m/s (forskellen ligger primært i området -1-0 dB).
- For støjreducerede vindmøller er de lavfrekvente kildestyrker ved højere vindhastigheder end 8 m/s nogenlunde ligeligt fordelt i intervallet -2 til 1 dB, men også enkelte forskelle op til 3 dB.

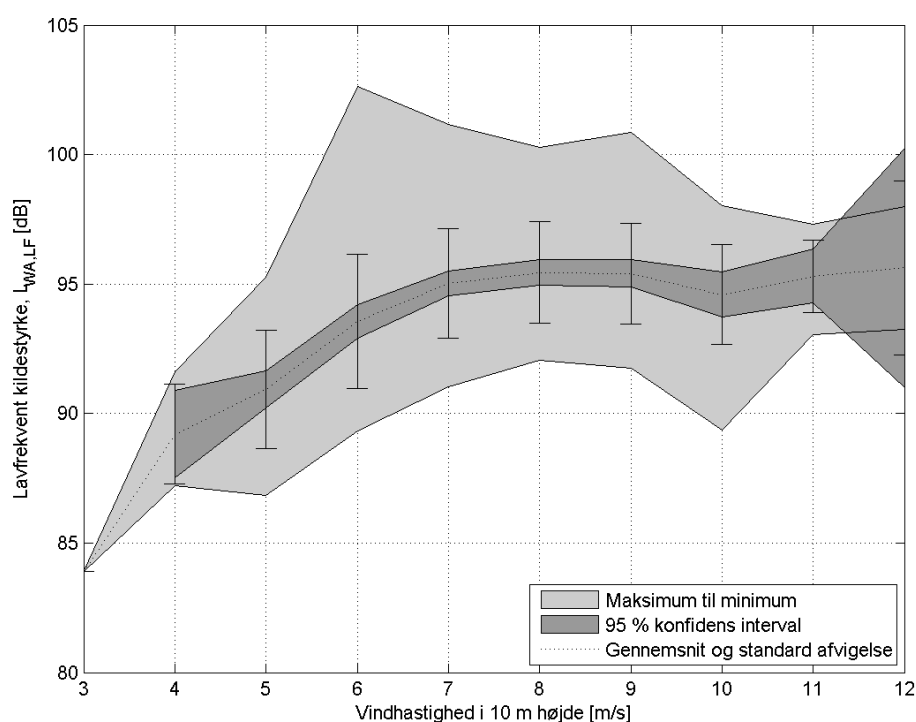
4.2.2 Sammenligning af støjreducerede vindmøller med vindmøller i standardstøjindstilling for det lavfrekvente frekvensområde

For at sammenligne de støjreducerede vindmøller med standardvindmøllerne er den aritmetiske middelværdi af de lavfrekvente kildestyrker for hver vindhastighed beregnet og vises på Figur 30 og Figur 31 for hhv. vindmøller i standardstøjindstilling og støjreducerede vindmøller. Supplerende er den maksimale værdi, den minimale værdi, konfidensintervallet og standardusikkerheden beregnet for hver vindhastighed.

Sammenlignes for vindmøller i standardstøjindstilling Figur 30 med den tilsvarende figur for det almindelige frekvensområde (Figur 15) kan man se, at variationen i lavfrekvent kildestyrke er markant større end variationen i kildestyrken for det almindelige frekvensområde.

Den store variation i typer, modeller og opsætning samt formentlig toner og vindstøj afspejles af det store spænd mellem minimum og maksimal kildestyrke på Figur 30 – op til ca. 13 dB.

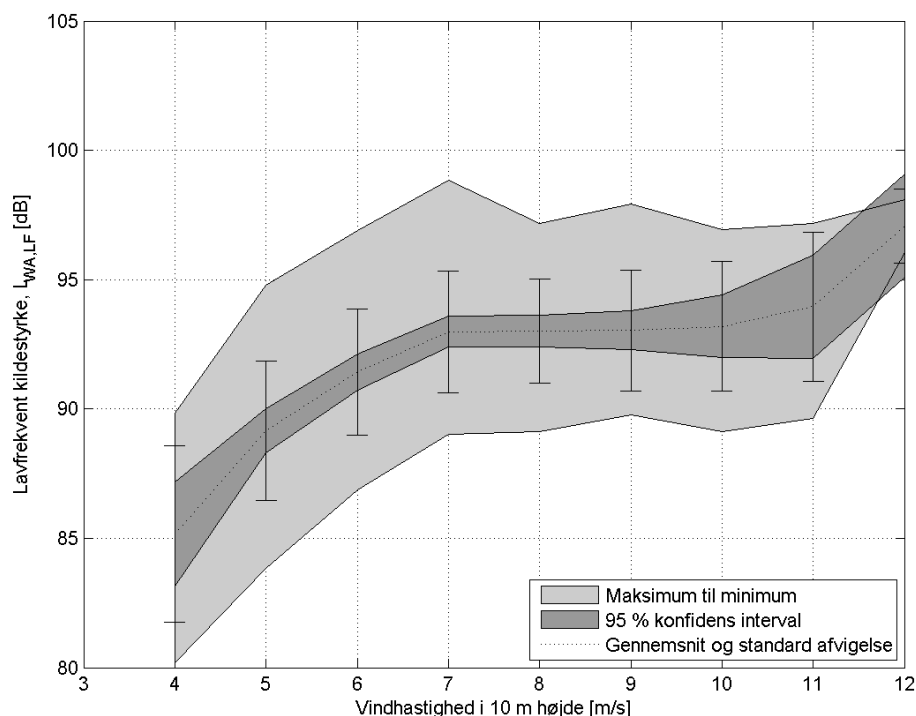
Det bemærkes også, at spændet mellem minimum og maksimum er markant størst ved 6 m/s og er generelt størst i vindhastighedsområdet 6- 10 m/s. Det kan desuden ses, at forskellen mellem den maksimale værdi og middelværdien er noget større end forskellen mellem middelværdien og den minimale værdi. Sidstnævnte tyder på, at der er betydeligt større spredning i data over middelværdien, og at de høje værdier generelt er enkeltstående tilfælde. Den store spredning afspejles også i standardafvigelsen, mens konfidensintervallet er forholdsvis lille. Dette afspejler den forholdsvis store mængde af data, der findes i det midterste vindhastighedsområde. Ved ydervindhastighederne (4 m/s samt 10-12 m/s) stiger konfidensintervallet, hvilket afspejler den lille mængde data, der er ved disse vindhastigheder. Figuren viser og gentager den tidligere iagttagne tendens: At kildestyrken stiger med stigende vindhastighed op til en vindhastighed på ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder er tilnærmelsesvis jævn eller svagt faldende.



FIGUR 30
DEN LAVFREKVENTE KILDESTYRKE SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR VINDMØLLER I STANDARDINDSTILLING. FIGUREN VISER MIDDELVÆRDI, STANDARDAFVIGELSE, MAKSIMALVÆRDI, MINIMALVÆRDI OG KONFIDENSINTERVAL FOR HVER VINDHASTIGHED.

Når den tilsvarende figur for de støjreducerede vindmøller undersøges (Figur 31), kan det ses, at forskellen mellem maksimalværdierne og minimalværdierne er mindre. Afstanden mellem maksimumværdier og middelværdien er sammenlignelig med afstanden mellem middelværdien og minimumværdierne. Ved ydervindhastighederne (4 m/s og 11-12 m/s) er her igen forholdsvis få data. Ved 12 m/s kan det iagttages, at de få data (2 målinger) ved 12 m/s begge har en høj lavfrekvent kildestyrke, og hvis middelværdien iagttages alene, kunne det se ud som om, at den lavfrekvente støj stiger ved høje vindhastigheder. Hvis man dog sammenligner med grunddata i Figur 23, vil man se, at de to målinger ved 12 m/s har næsten ens lavfrekvent kildestyrke også ved 11 m/s, hvorimod de øvrige resultater ved 11 m/s næsten alle har en lavere lavfrekvent kildestyrke. Når en middelværdi anvendes alene, vil det dermed se ud som om, at den lavfrekvente støj stiger, hvilket der ikke er basis for at konkludere.

For de statistisk sikre repræsenterede vindhastigheder (5-9 m/s samt måske også 10 m/s) er der en tendens til, at kildestyrken stiger med stigende vindhastighed op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder er konstant eller svagt stigende.



FIGUR 31
DEN LAVFREKVENTE KILDESTYRKE SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR STØJREDUCEREDE VINDMØLLER. FIGUREN VISER MIDDELVÆRDI, STANDARDAFVIGELSE, MAKSIMALVÆRDI, MINIMALVÆRDI OG KONFIDENSINTERVAL FOR HVER VINDHASTIGHED.

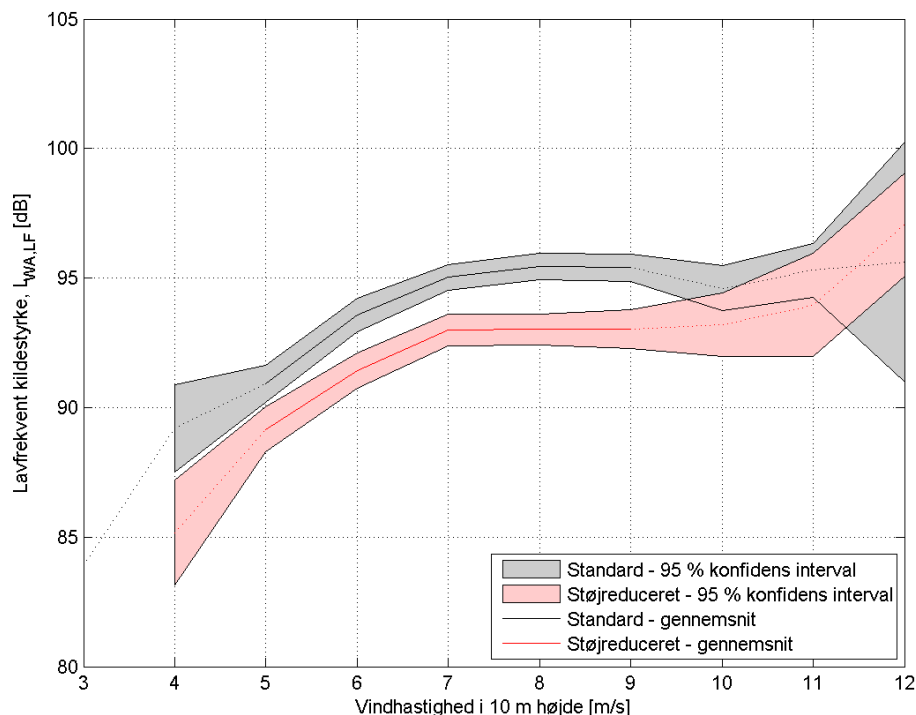
Sammenlignende er den aritmetiske middelværdi og konfidensintervallet optegnet for begge grupper af vindmøller i Figur 32.

Som en tommelfingerregel kan man antage, at overlappende konfidensintervaller tyder på, at middelværdierne ikke er signifikant forskellige. Figur 32 viser derfor, at den lavfrekvente kildestyrke ved kraftig vind (10-12 m/s) ikke er væsentligt forskellig, uanset om vindmøllerne er støjreducerede eller ej, hvor der er en generel forskel på ca. 2 dB for vindhastighederne 4-9 m/s. Ved vindhastighederne 10 og 12 m/s er kurverne ikke signifikant forskellige, og datagrundlaget er spinkelt – specielt ved de højeste vindhastigheder.

Det bemærkes også, at begge kurver har et glat forløb uden tendenser til minima i støjen ved 6 og 8 m/s.

Det er også for den lavfrekvente støj vigtigt at holde sig for at øje, at den viste middelværdi er en gennemsnitsværdi af de data, der eksisterer ved den aktuelle vindhastighed, og at en middelværdi ikke tager højde for antal af data ved hver vindhastighed. For de data, der ligger til grund for den aktuelle undersøgelse, er det tilfældigt, hvor stort et vindhastighedsområde der er dækket for hver måling – og specielt målinger i de ydre vindhastighedsområder (under 5 m/s og over 9 m/s) er data desuden baseret på noget færre 10- eller 60-sekunders middelværdier (samples) end målinger i det midterste vindhastighedsområde.

Det kan derfor diskuteres, om værdierne ved vindhastighederne 3, 4, 11 og 12 m/s bør tages med – og måske også 10 m/s – da der er forholdsvis få data ved disse vindhastigheder. Disse er derfor kun optegnet med en stiplede linje i Figur 32.

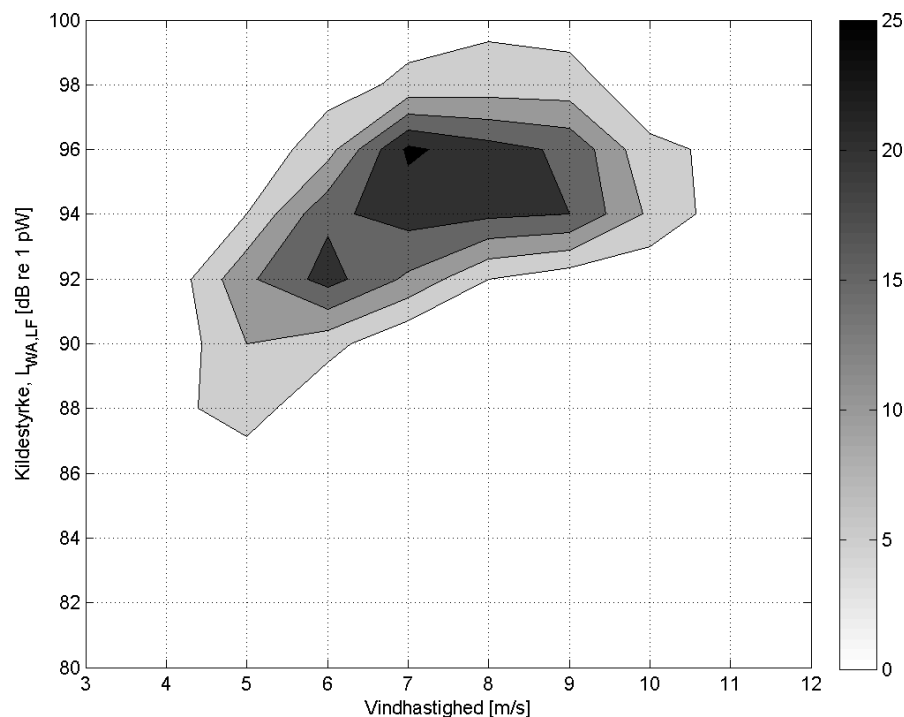


FIGUR 32

DEN GENERELLE FORSKEL MELLEM VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING OG VINDMØLLER DER ER STØJREDUCERET I EN ELLER ANDEN FORM. KURVERNE VISER MIDDELVÆRDIERNE, OG DE FARVEDE AREALER VISER 95 % KONFIDENSINTERVALLET.

Der er derfor supplerende optegnet konturplot på baggrund af hyppigheden af de forskellige lavfrekvente kildestyrker som funktion af vindhastighederne. Figur 33 og Figur 34 viser vindmøllestøjen som funktion af vindhastigheden som konturplot for hhv. vindmøller i standardstøjindstilling og støjreducerede vindmøller i det lavfrekvente frekvensområde. For sammenligningens skyld er begge plot justeret til samme farveskala. Formålet med disse figurer er at fokusere på tendenserne i majoriteten af data, hvor betydningen af outliers minimeres.

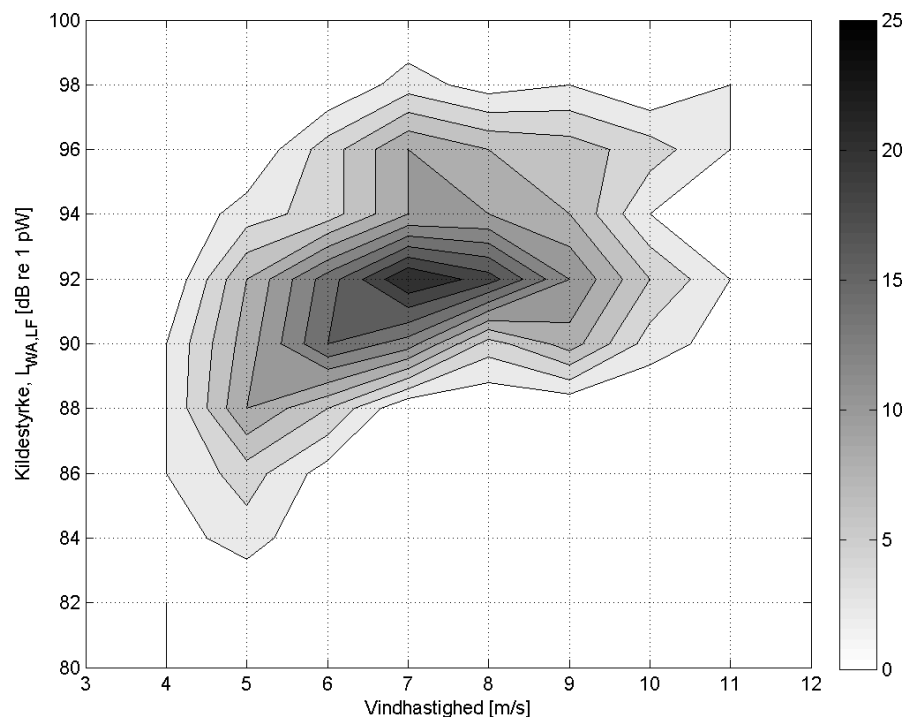
For vindmøller i standardstøjindstilling støtter Figur 33 fint de tidligere iagttagelser fra Figur 22. For majoriteten af dataene stiger kildestyrken med vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken er tilnærmelsesvis konstant for højere vindhastigheder. De højeste værdier findes ved 8 m/s. Den store spredning i lavfrekvent kildestyrke, der fremgik af maksimalkurven i Figur 30, ses ikke her, hvilket igen tyder på, at de høje maksimale værdier skyldes enkelttilfælde. Derimod er her de kraftigste farver forholdsvis centreret indenfor få dB, hvilket fortæller, at langt de fleste målinger ligger i dette område.



FIGUR 33
KONTURPLOT PÅ BAGGRUND AF HYPPIGHEDEN AF DE FORSKELLIGE LAVFREKVENTE KILDESTYRKER FOR VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING.

For støjreducerede vindmøller er konturplottet vist i Figur 34. Sammenlignet med Figur 33 kan der her ses noget større spredning i lavfrekvent kildestyrke. To tendenser kan iagttages:

1. Majoriteten af data: Stigende lavfrekvent kildestyrke med stigende vindhastighed op til en vindhastighed på ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder er tilnærmelsesvis konstant i området omkring $L_{WA,LF} = 92$ dB(A).
2. For nogle data: En nogenlunde konstant lavfrekvent kildestyrke på omkring $L_{WA,LF} = 96$ dB(A) for vindhastighederne 7-11 m/s.

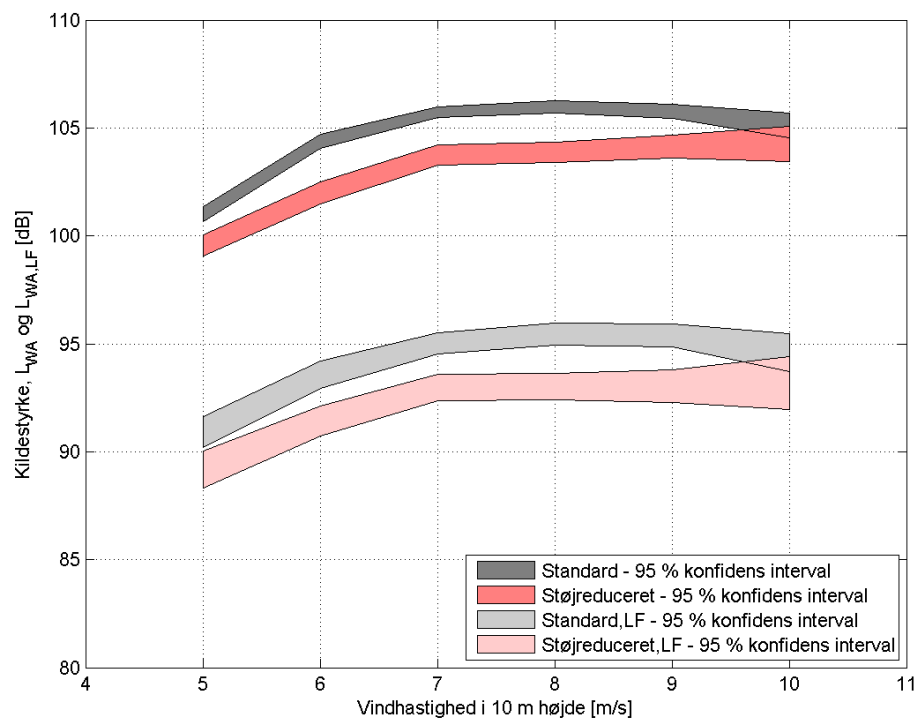


FIGUR 34
KONTURPLOT PÅ BAGGRUND AF HYPPIGHEDEN AF DE FORSKELLIGE LAVFREKVENTE KILDESTYRKER FOR VINDMØLLER I STØJREDUCERET INDSTILLING.

4.3 Sammenligning mellem kildestyrker i det almindelige frekvensområde og i det lavfrekvente område

Til slut sammenlignes konfidensintervallerne for begge grupper af vindmøller i både det almindelige frekvensområde og det lavfrekvente frekvensområde, hvilket vises i Figur 35. Det er valgt her kun at vise de vindhastigheder, hvor datagrundlaget er solidt samt 10 m/s.

Det ses, at kurverne følges fint ad. Den primære forskel mellem de to frekvensområder er spredningen af data, hvor det kan ses, at konfidensintervallet er betydeligt større for de lave frekvenser, end når hele frekvensområdet er iagttaget. Generelt er der ca. 2 dB mellem støjreducerede vindmøller og vindmøller i standardstøjindstilling.

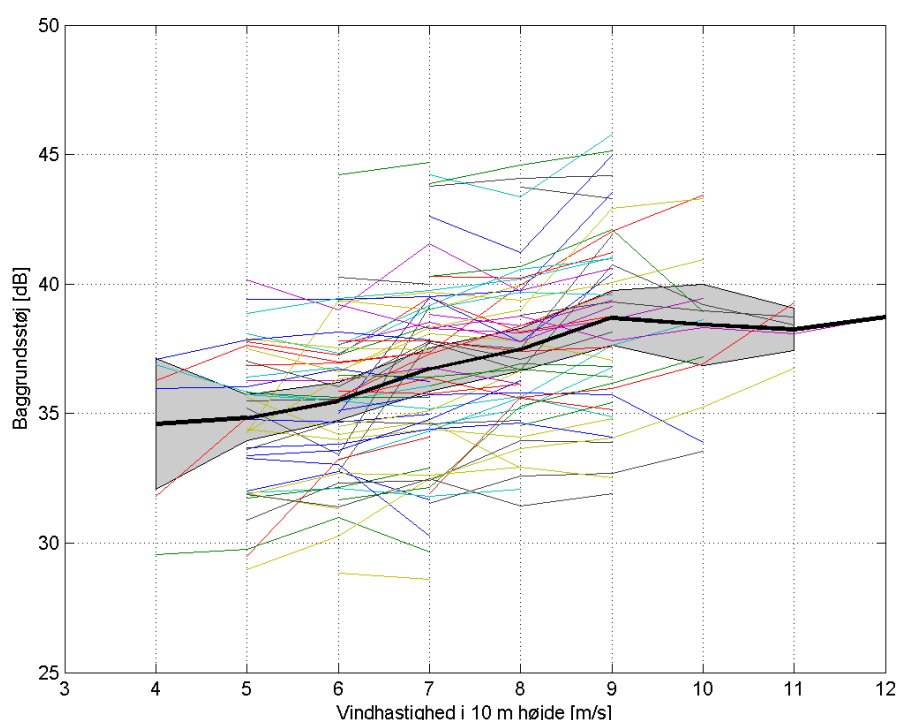


FIGUR 35

DEN GENERELLE FORSKEL MELLEM VINDMØLLER I STANDARDSTØJINDSTILLING OG VINDMØLLER DER ER STØJREDUCERET FOR BÅDE DET ALMINDELIGE FREKVENSSOMRÅDE (ØVERSTE TO AREALER) OG DET LAVFREKVENTE FREKVENSSOMRÅDE (NEDERSTE TO AREALER). DE FARVEDE AREALER VISER 95 % KONFIDENSINTERVALLET.

5. Betydning af baggrundsstøj

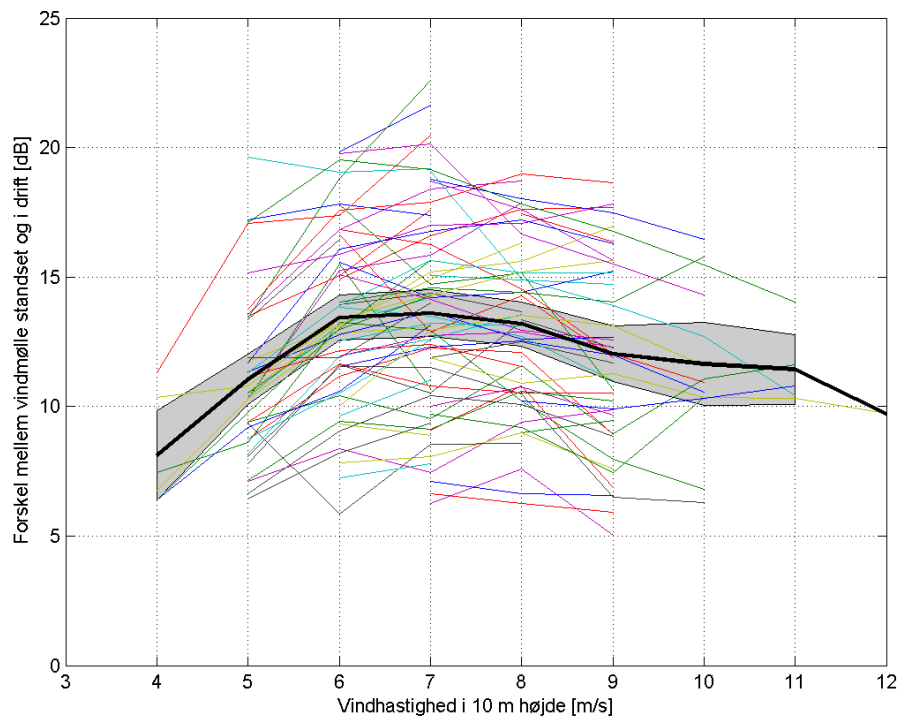
Sluttelig er den målte baggrundsstøj (korrigeret til frit felt) for alle målingerne fra den oprindelige undersøgelse fra 2014 [1] illustreret i Figur 36, hvor også den aritmetiske gennemsnitsværdi samt 95 % konfidensinterval er vist. Den generelle tendens viser, at baggrundsstøjen stiger, jo højere vindhastigheden er. Dog er middelværdien for 10 og 11 m/s ikke nødvendigvis repræsentativ, da disse bygger på et splinklere datagrundlag end ved fx 9 m/s.



FIGUR 36

UDVIKLINGEN AF BAGGRUNDSSTØJEN SOM FUNKTION AF VINDHASTIGHEDEN FOR SAMTLIGE 74 MÅLINGER SAMT MIDDELVÆRDI OG 95 % KONFIDENSINTERVAL (HHV. FED SORT OG GRÅT AREAL).

Hvis den målte baggrundsstøj sammenlignes med den målte støj fra vindmøllen (totalstøjen) ved at se på differensen, se Figur 37, er der en tendens til, at den største forskel mellem totalstøjen og støjen i omgivelserne findes i området 6-9 m/s med en gennemsnitlig forskel på ca. 12 dB. Denne forskel falder med øget afstand til vindmøllen. Under antagelse af, at baggrundsstøjen fra vegetation hos naboerne til vindmøllen varierer på samme måde (som funktion af vindhastigheden) som tæt på vindmøllen, betyder det, at vindmøllen i gennemsnit vil være mest hørbar i området 6-9 m/s.



FIGUR 37
 FORSKELLEN MELLEM TOTALSTØJ OG BAGGRUNDSSTØJEN VED FORSKELLIGE VINDHASTIGHEDER.

6. Konklusion

Et stort antal målinger af støj fra vindmøller er gennemgået, og relevante datasæt (hovedsageligt for nyere vindmøller) er udvalgt for de møller, hvor der foreligger målinger ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s. Måledata er genanalyseret, og kildestyrker er beregnet ved de vindhastigheder, hvor der findes data. Der er mange målinger i vindhastighedsintervallet 5-9 m/s, færre målinger ved vindhastighederne 4, 10 og 11 m/s og kun få målinger ved vindhastigheder lavere end 4 m/s og højere end 11 m/s, se Figur 4.

Generelt viser data, at kildestyrken for vindmøllerne stiger med vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter kildestyrken ved højere vindhastigheder oftest er tilnærmelsesvis konstant. Dette gælder både for det almindelige frekvensområde (10-10.000 Hz) og det lavfrekvente frekvensområde (10-160 Hz). Denne observation gælder for både vindmøller i standardindstilling og for støjreducerede vindmøller.

Der er stor spredning i kildestyrken fra støjreducerede vindmøller, hvilket formentlig skyldes, at de målte vindmøller hver især opererer i flere forskellige støjindstillinger. Generelt ser det ud til, at kildestyrken stiger op til en vis vindhastighed, hvorefter kurven flader ud. Der er dog stor variation i, hvor kraftig stigningen er i kildestyrke pr. ændring i vindhastighed, og ved hvilken vindhastighed knækket sker.

Når kildestyrken for vindmøller i standardindstilling sammenlignes med kildestyrken for støjreducerede vindmøller, er der en tendens til, at der for vindhastigheder i intervallet omkring 4-10 m/s er en gennemsnitlig forskel på ca. 2 dB mellem støjreducerede vindmøller og ikke støjreducerede vindmøller. For højere vindhastigheder omkring 11 og 12 m/s er der en svag tendens til, at kildestyrken er nogenlunde lige kraftig for støjreducerede vindmøller og vindmøller i standardstøjindstilling. Datagrundlaget over 9 m/s er dog noget mindre end for vindhastigheder mellem 5-9 m/s.

Generelt er der noget større spredning i de lavfrekvente kildestyrker end for kildestyrker i det almindelige frekvensområde. Overordnet ses de samme tendenser i begge frekvensområder, og overordnet følger kildestyrkerne i de to frekvensområder hinanden.

Der er ikke fundet kildestyrker med betydende minima i kildestyrkerne omkring de to vindhastigheder 6 og 8 m/s.

Det er supplerende undersøgt, hvor mange af målingerne der har en kildestyrke (både i det almindelige frekvensområde og i det lavfrekvente frekvensområde) højere end kildestyrken ved 8 m/s (samt ved 6 og 7 m/s), og i givet fald, hvor stor disse forskelle er. Generelt er der ved lavere vindhastigheder en lavere kildestyrke, uanset om der normeres i forhold til 6, 7 eller 8 m/s. Relativt til 8 m/s findes der højere vindhastigheder med højere kildestyrker. Forskellen er dog sædvanligvis lille og næsten altid mindre end eller lig med 2 dB, uanset hvilket frekvensområde der iagttages.

Ud af de 143 undersøgte målinger er der kun én måling, hvor kildestyrken ved en højere vindhastighed end 8 m/s er mere end 2.0 dB højere end kildestyrken ved 8 m/s – og det er kun i det lavfrekvente frekvensområde, at forskellen er over 2.0 dB. Op til 11 m/s er forskellen dog mindre end 2.0 dB.

Referencer

- [1] DELTA Teknisk notat TC-100531, 3. april 2014:
"Støj fra vindmøller ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s".
- [2] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1518, 14. december 2006:
"Bekendtgørelse om støj fra vindmøller".
- [3] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284, 15. december 2011:
"Bekendtgørelse om støj fra vindmøller".
- [4] IEC 61400-11:2002 edition 2.1:
"Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques".

Bilag A. Uddybende læsevejledning til normerede figurer

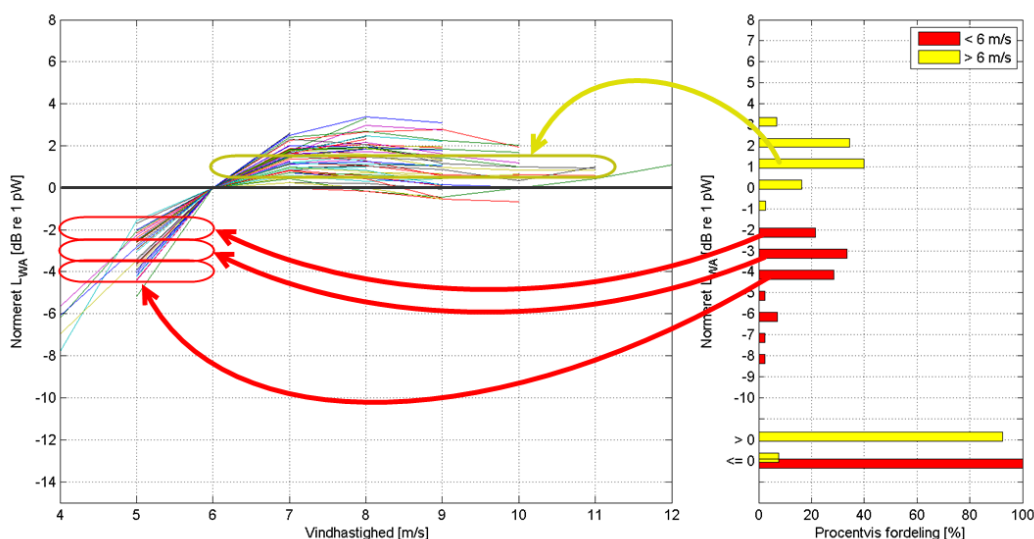
Dette bilag indeholder en uddybende læsevejledning til Figur 9 – Figur 14 samt Figur 24 – Figur 29.

De danske regler om vindmøllestøj er baseret på målinger ved vindhastighederne 6 og 8 m/s. I ovennævnte figurer sættes kildestyrken (enten i det almindelige frekvensområde eller i det lavfrekvente frekvensområde) ved de forskellige vindhastigheder i forhold til støjen ved en referencevindhastighed på enten 6, 7 eller 8 m/s for bedre at kunne se en eventuel tendens. Til brug for dette er hver måling af kildestyrke normeret, så kildestyrken ved enten 6, 7 eller 8 m/s er sat til 0 dB – og de øvrige vindhastigheder justeret tilsvarende.

Supplerende på hver figur er et plot i højre side, der viser fordelingen af vindmøllestøjen relativt til referencevindhastigheden. En gul farve markerer kildestyrker ved en højere vindhastighed end referencevindhastigheden, og en rød farve markerer kildestyrker ved en lavere vindhastighed end referencevindhastigheden.

I dette bilag anvendes Figur 9 som eksempel. En modificeret udgave af Figur 9 er vist i Figur 38 og Figur 39 hver med forklarende pile påtegnet.

I Figur 9/Figur 38 markerer en gul farve kildestyrker ved en vindhastighed over 6 m/s, dvs. kildestyrker ved vindhastighederne 7-12 m/s, mens en rød farve markerer kildestyrker med en vindhastighed under 6 m/s, dvs. kildestyrker ved vindhastighederne 4 og 5 m/s.



FIGUR 38

SVARENDE TIL FIGUR 9, HVOR SAMMENHÆNGEN MELLEM BJÆLKERNE I ØVRE SIDE AF DET HØJRE PLOT KOBLES MED KURVERNE I DET VENSTRE PLOT.

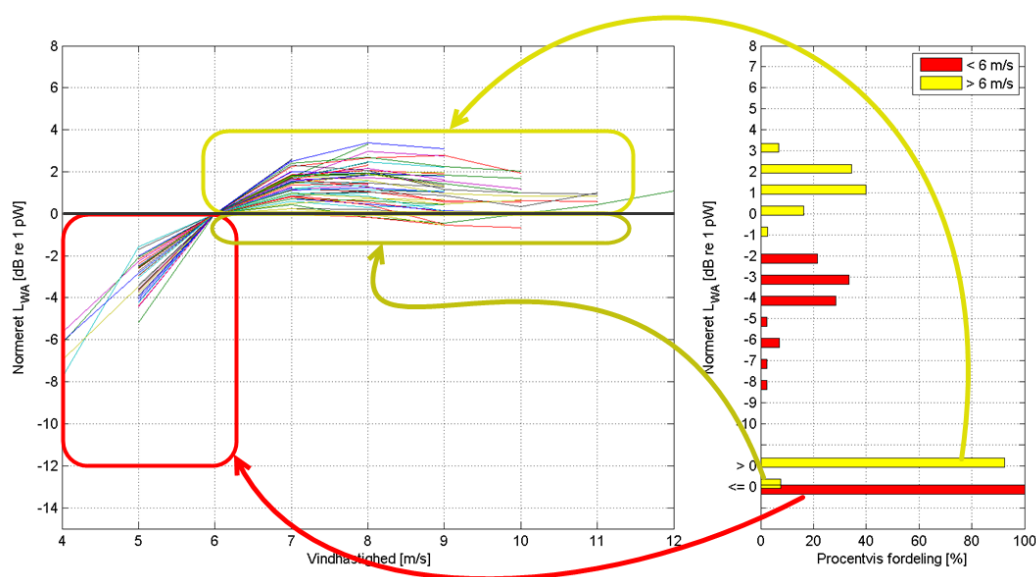
For hver af figurene (Figur 9 – Figur 14 samt Figur 24 – Figur 29) er figuren delt op i 2 plot. Det venstre plot viser de normerede kurver, hvor det højre plot viser de procentvise fordelinger.

I øverste del af plottet i højre side viser de gule og røde bjælker den procentvise fordeling af forskelle til kildestyrken ved referencevindhastigheden. Hver bjælke har et spænd på 1 dB og strækker sig 0,5 dB til hver side – dvs. at intervallet ved 1 dB på figurene er 0,5-1,5 dB.

I Figur 38 (der er Figur 9 med uddybende pile) vil eksempelvis 40 % af de målte kildestyrker over 6 m/s være mellem 0,5 dB og 1,5 dB højere end kildestyrken ved 6 m/s, idet der ud for 1 på y-aksen er en gul bjælke, der har "længden 40 %".

Ligeledes ses det af Figur 38, at ca. 33 % af de viste vindmøller ved lavere vindhastigheder end 6 m/s har en kildestyrke, der er 2,5 til 3,5 dB mindre end kildestyrken ved 6 m/s (rød bjælke ud for -3 på y-aksen).

I nederste del af plottet i højre side (for hver af Figur 9 – Figur 14 samt Figur 24 – Figur 29) kan ses, hvor mange procent af kildestyrkerne der ligger hhv. over og under kildestyrken ved enten 6, 7 eller 8 m/s. Dette er vist i Figur 39 (bygger også på Figur 9), hvor man kan se en rød bjælke ud for " ≤ 0 " med "længden 100 %", hvilket betyder, at alle kildestyrker ved en lavere vindhastighed end 6 m/s er lig med eller mindre end kildestyrken ved 6 m/s. Ligeledes kan man se to gule bjælker med længderne hhv. 92 % og 8 %, hvilket svarer til, at 92 % af kildestyrkerne ved vindhastigheder over 6 m/s er højere end kildestyrken ved 6 m/s, og at 8 % af kildestyrkerne ved vindhastigheder over 6 m/s er lavere eller lig med kildestyrken ved 6 m/s.



FIGUR 39

SVARENDE TIL FIGUR 9, HVOR SAMMENHÆNGEN MELLEM BJÆLKERNE I NEDRE SIDE AF DET HØJRE PLOT KOBLES MED KURVERNE I DET VENSTRE PLOT.

Støj fra store nyere danske vindmøller som funktion af vindhastigheden

DELTA har gennemført en undersøgelse af kildestyrken som funktion af vindhastigheden med henblik på at afdække betydningen af støjen udenfor 6 og 8 m/s relativt til 10 m højde, der er de vindhastigheder, hvor støj fra vindmøller typisk reguleres i Danmark.

Både støjen i det almindelige frekvensområde og i det lavfrekvente frekvensområde er undersøgt. Generelt viser data, at støjen stiger som en funktion af vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter støjen er tilnærmelsesvis konstant ved højere vindhastigheder.

For de undersøgte vindhastigheder under 10 m/s er der i gennemsnit ca. 2 dB mellem støjreducerede vindmøller og vindmøller, der opererer i en standardstøjindstilling. Ved højere vindhastigheder end 10 m/s er der en tendens til, at støjen fra de to grupper af vindmøller nærmer sig hinanden. Der er ingen minima i støjen ved 6 og 8 m/s.

