



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Støjmålinger hos naboer til vindmøller i Nollund

Støjmålinger ved vindmøller og naboer i Nollund
sammenholdt med beregninger og retningslinjer for
regulering af støjen

Miljøprojekt nr. 1966

September 2017

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Lars Sommer Søndergaard

Rune Egedal

Morten Bording Hansen

Torben Holm Pedersen

Claus Backalarz

DELTA – a part of FORCE Technology

Fotos:

DELTA – a part of FORCE Technology

ISBN: 978-87-93614-35-2

Indhold

1.	Forord	5
2.	Sammenfatning og konklusioner	6
3.	Summary and conclusions	7
4.	Baggrund	8
5.	Formål og afgrænsning	9
5.1	Problemstillinger som er forsøgt belyst	9
5.1.1	Er det ikke bedre med målinger?	9
5.1.2	Er de beregnede indendørs niveauer rigtige?	9
5.1.3	Er det nok at måle ved 6 og 8 m/s?	9
5.2	Afgrænsning	9
5.3	Specifikke spørgsmål der vil blive adresseret	10
5.4	Generelt om forsøgsdesign	10
5.5	Kortidsmålinger	10
5.6	Langtidsmålinger	11
6.	Målested	12
6.1	Primære vindmøller	12
6.2	Udvalgte naboer	13
6.2.1	Nabopunkt nord (WT2 P3)	14
6.2.2	Nabopunkt sydøst (WT1 P3)	14
6.2.3	Nabopunkt sydvest (WT3 P3)	14
6.3	Sekundære vindmøller	15
7.	Udførte kontrolmålinger	17
7.1	Måling af støjniveau	17
7.2	Lydeffektniveau	17
7.3	Beregnet støjbidrag ved naboer	18
7.4	Toneanalyse	18
7.5	Opsummering	18
8.	Målesetup	19
8.1	Endagsmålekampagne	19
8.2	Flerdages målekampagne	19
8.2.1	Mikrofon ved vindmøllerne	19
8.2.2	Mikrofon udendørs ved naboerne	20
8.2.3	Mikrofoner indendørs ved naboerne	20
8.2.4	Mikrofonen i mellempositionen	20
8.2.5	Produktionsdata for vindmøllerne	20
8.2.6	Vindmålermast	20
8.2.7	Produktionsdata data fra SydEnergi	21
9.	Vejr- og produktionsforhold under målingerne	23

9.1	Vejrforhold	23
9.2	Produktionsforhold	24
10.	Langtidsanalyse	26
10.1	Endagsmålekampagne	26
10.2	Flerdagesmålekampagne	28
10.3	Opsummering langtidsmålinger	39
11.	Korttidsanalyse	40
11.1	Endagsmålekampagne	40
11.2	Flerdagesmålekampagne	42
11.3	Opsummering af korttidsmålinger	52
12.	Lydudbredelse	53
12.1	Lydudbredelse i henhold til BEK 1736	53
12.2	Lydudbredelse iht. Nord2000	54
12.3	Opsummering lydudbredelse	57
13.	Toner	58
13.1	Flerdagesmålekampagne	59
13.1.1	Toneområde 1	59
13.1.2	Toneområde 2	64
13.1.3	Toneområde 3	68
13.2	Endagsmålekampagne	71
13.3	Opsummering af toneanalyse	77
14.	Amplitudemodulation	79
14.1	Amplitudemodulation IOA-metode	79
14.2	Amplitudemodulation WT1 P3	79
14.3	Eksempler på AM	81
14.4	Opsummering amplitudemodulation	83
15.	Konklusion	84
Bilag 1.Referencer		87
Bilag 2.Måleudstyr		88
Bilag 3.Fotos af målesetup		90
Bilag 3.1	Endagsmålekampagne	90
Bilag 3.2	Flerdagesmålekampagne	96
Bilag 3.3	Luftfotos af nabopositionerne	107
Bilag 4.Effektkurve for de primære vindmøller		110
Bilag 5.Om de udførte toneanalyser		111
Bilag 5.1	Referencelitteratur	111
Bilag 5.2	Toneanalyse	112
Bilag 5.3	Afgrænsning af frekvensområde	113
Bilag 5.4	Mønstergenkendelse	117
Bilag 6.Ordforklaringer		125

Rapporten indeholder fagudtryk om vindmøller og støj. En del af disse er forklaret i Bilag 6.

1. Forord

Miljøstyrelsen har ønsket at få foretaget målinger hos et bredt udvalg af naboer til vindmølleparker for at undersøge kritikken fra visse naboer og institutioner af, at man beregner – og ikke måler – støjen fra vindmøller.

På det grundlag blev der i foråret 2016 af Miljøstyrelsen og Referencelaboratoriet for Støjmålinger udarbejdet et måleprogram, der bl.a. omfatter målingerne beskrevet i denne rapport.

2. Sammenfatning og konklusioner

Formålet med opgaven er at undersøge, om de nuværende retningslinjer for måling af støjemission og beregning af støj fra vindmøller beskrevet i Vindmøllebekendtgørelsen giver et retvisende billede af støjbidraget hos naboerne samt at foretage målinger under andre betingelser, end bekendtgørelsen foreskriver.

Dokumentation af støj fra vindmøller i Danmark foretages efter Miljøstyrelsens Bekendtgørelse 1736 [1] (eller tidligere versioner) og foretages grundlæggende som en kildestyrkemåling, hvorefter støjen ved nærmeste naboer beregnes. Kildestyrkemålingen foretages i medvindsretning i en afstand svarende til vindmøllens totalhøjde og i en vindhastighed af 6 og 8 m/s.

Til brug for undersøgelsen er der foretaget målinger udendørs og indendørs ved naboer til en vindmøllepark ved Nollund i Jylland under meteorologiske forhold, der omfatter flere forskellige betingelser, end der forudsættes i Vindmøllebekendtgørelsen. Vindmølleparken består af 3 stk. 3 MW pitchregulerede vindmøller.

Udover målingerne ved naboerne er der desuden foretaget målinger tæt ved vindmøllerne samt i en position mellem vindmøllerne og naboerne. Samlet er der foretaget samtidige målinger i op til 15 mikrofoner. Målingerne er foretaget i et bredere interval af vindhastigheder end omkring 6 og 8 m/s, og der er målt i andre retninger end medvindsretningen fra vindmøller til naboer.

Undersøgelsens hovedresultater er:

Det er vanskeligt at sammenligne resultater af støjmålinger hos naboerne med de gældende støjgrænser på grund af betydelig baggrundsstøj fra vegetation. Oftest er støjbidraget fra vegetationen kraftigere eller på niveau med støjbidraget fra vindmøllerne.

Der er god overensstemmelse mellem de beregnede støjbidrag efter retningslinjerne i Vindmøllebekendtgørelsen og de målte støjbidrag fra vindmøllerne, når sidstnævnte "renses" for baggrundsstøjens påvirkning ved hjælp af statistisk analyse.

Der er ligeledes god overensstemmelse mellem beregnede lavfrekvente støjbidrag indendørs efter retningslinjerne i Vindmøllebekendtgørelsen og målte indendørs niveauer af lavfrekvent støj. Der er ved indendørs målingerne af den lavfrekvente støj ikke konstateret resultater for $L_{pA,LF}$, der overskrider støjgrænserne i vindmøllebekendtgørelsen.

Der er ved én af de tre naboer til vindmølleparken i Nollund konstateret forekomst af tydelig amplitudemodulation (hurtige niveaumæssige variationer i støjbidraget fra vindmøllerne).

Eventuelle toner i støjen fra vindmøllerne er ikke nødvendigvis mest tydelige i medvindsretningen fra vindmølle til nabo. Ligeledes er tonerne ikke nødvendigvis mest tydelige ved vindhastighederne 6 m/s og/eller 8 m/s. Ofte er tonerne tydeligst ved vindhastigheder under 6 m/s.

3. Summary and conclusions

The purpose is to investigate whether the current guidelines for measurement of noise emission and noise propagation calculation from wind turbines described in the Danish Statutory Order give an accurate noise contribution at residents and to make measurements under conditions other than the Danish Statutory Order prescribes.

Documentation of noise from wind turbines in Denmark is made by following the Danish Environmental Protection Agency Statutory Order 1736 (or earlier versions), and are basically carried out as a sound power level measurement, whereafter the noise at residents are calculated. The sound power level measurements are performed in downwind in a distance equal to the total height of the wind turbine for wind speeds of 6 and 8 m/s.

Measurements have been performed both outdoor and indoor at residents near a wind farm at Nollund in Jutland during meteorological conditions which are both covered and not covered in the Statutory Order. The wind farm consists of 3 pitch-regulated 3 MW wind turbines.

In addition to the measurements at the neighbours, measurements have been made close to the wind turbines, as well as in a position between the wind turbines and the neighbours. The measurements are conducted in a wider range of wind speeds than only 6 and 8 m/s, and for wind directions not only in downwind.

The main results of the investigation:

It is difficult to compare measurements at residents with noise limits due to significant background noise from vegetation. Most often the noise contribution from vegetation is larger or at the level of the noise contribution from the wind turbines.

There is a good consistency between calculated noise levels according to the Statutory guidelines and measured noise levels from the turbines, when the latter are “cleaned” for the influence from the background noise by means of statistical analysis.

There is also good agreement between calculated low-frequency noise contributions indoors according to the guidelines in the Statutory Order and measured indoor levels of low frequency noise. In the indoors measurements of the low-frequency noise, no $L_{pA,LF}$ -results have been found that exceed the noise limits in the Statutory Order.

At one of the three neighbour residents of the wind farm at Nollund, the presence of prominent amplitude modulation (fast level variation in the noise contribution from the wind turbines) is found.

Tones in the noise from the turbines are not necessarily most prominent in downwind from wind turbine to residents. Likewise, the tones are not necessarily most prominent at wind speeds of 6 and 8 m/s. Often the tones are most prominent for wind speeds lower than 6 m/s.

4. Baggrund

Fra forskellige sider har der været kritik af de nuværende retningslinjer for måling og beregning af støj fra vindmøller. Der har også været klager fra naboer til vindmøller, som med lånt udstyr har målt mere støj, end der er beregnet i henhold til gældende vindmøllebekendtgørelse fx Bekendtgørelse 1284 [2] eller Bekendtgørelse 1736 [1], alt efter hvad der er gældende for de aktuelle vindmøller.

Miljøstyrelsen har derfor ønsket at få gennemført støjmålinger hos en række naboer til store, moderne vindmøller for at få den nuværende reguleringsmetode sammenlignet med målinger. Hensigten er at styrke tilliden til metoden – alternativt at bruge målingerne som udgangspunkt for at se nærmere på forhold, som måtte vise sig utilstrækkelige.

5. Formål og afgrænsning

Formålet med opgaven er at undersøge, om de nuværende retningslinjer for måling af støjemission og beregning af støj fra vindmøller beskrevet i Vindmøllebekendtgørelsen giver et retvisende billede af støjbidraget hos naboerne samt at foretage målinger under andre betingelser end bekendtgørelsen foreskriver.

I undersøgelsen er der foretaget målinger udendørs og indendørs ved naboer til en vindmøllepark ved Grindsted i Jylland. Det er tilstræbt, at målingerne omfatter andre vindforhold end forudsat i Vindmøllebekendtgørelsen. Derfor er målingerne foretaget i et bredere interval af vindhastigheder end omkring 6 og 8 m/s i 10 m højde, og der er målt i andre retninger end medvindsretningen fra vindmøller til naboer.

Det er tilstræbt, at måleresultaterne i muligt omfang bl.a. kan belyse følgende spørgsmål:

- Er der systematiske forskelle mellem måleresultater og beregningsresultater?
- Giver andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s anden støj, tydeligere toner og/eller mere lavfrekvent (LF) støj end forventet?
- Giver andre vindretninger end medvind fra mølle til nabo mere støj, tydeligere toner og/eller mere lavfrekvent støj?

5.1 Problemstillinger som er forsøgt belyst

5.1.1 Er det ikke bedre med målinger?

Der er sået tvivl om, hvorvidt beregninger efter Bekendtgørelsen giver samme resultater som målinger. Synkrone målinger ved mølle og nabo vil være ønskelige under forskellige vindforhold.

Resultaterne af målingerne sammenlignes med de beregnede værdier under hensyntagen til usikkerheden ved de udførte målinger og usikkerheden ved beregningerne. Konklusionen skal tage hensyn til den statistiske usikkerhed.

5.1.2 Er de beregnede indendørs niveauer rigtige?

For andre vindmølleparker har borgere med lånt udstyr lavet "egen-målinger" af lavfrekvent støj med høje niveauer til følge.

Kan højere måleresultater end forventet af indendørs lavfrekvent støj konstateres for den aktuelle vindmøllepark?

5.1.3 Er det nok at måle ved 6 og 8 m/s?

I henhold til den danske bekendtgørelse [1][2] bliver der normalt kun målt vindmøllestøj ved to vindhastigheder i medvind. Kan flere vindhastigheder og -retninger belyses?

Er der evt. toneproblematikker ved andre vindhastigheder og -retninger, evt. ved lavere vindhastigheder og modvind?

5.2 Afgrænsning

Baggrunden for opgaven er, at der fra forskellige sider været en kritik af de nuværende retningslinjer for måling og beregning af støj fra vindmøller. Der har også været klager fra naboer til andre danske vindmøller, som med lånt udstyr har målt mere lavfrekvent støj, end der er beregnet i henhold til Vindmøllebekendtgørelsen.

Det ønskes derfor at få den nuværende reguleringsmetode sammenlignet med målinger hos naboer til vindmøller for at styrke tilliden til metoden – alternativt at bruge målingerne som udgangspunkt for at se nærmere på forhold, som måtte vise sig utilstrækkelige.

Målingerne udføres ved tre naboer til vindmølleparken populært kaldet Nollund ved Billund/Grindsted. Vindmølleparken består af tre vindmøller af typen Vestas V112 3,0 MW. Miljøstyrelsen står for alle aftaler med vindmølleejere, vindmølle-

producenter og naboer. Der er DELTA bekendt ikke udført andre målinger af vindmøllestøj fra parken, end de kontrolmålinger DELTA har udført i 2013 [7].

Inden målekampagnen igangsættes, vil DELTA besøge de tre udvalgte naboer og vindmølleparken med følgende primære formål:

- Introducere måleprogrammet for naboerne og forklare formålet med undersøgelsen samt planlægge de praktiske ting i forbindelse med målingerne.
- Udpege (i samråd med naboerne) relevante målepunkter indendørs (3 positioner efter metoden i Orientering 9/1997 [9] med rettelser) i det mest støjbelastede rum og udenfor ved ejendommen.
- Sikre at datainterfacet til vindmøllerne fungerer.
- Identificere relevante målepunkter ved møllerne og midtvejspositioner mellem møller og naboer.

Når målekampagnen igangsættes dokumenteres støjen i måleperioderne i form af lydoptagelser, der som minimum dækker frekvensområdet 10-10.000 Hz. Der måles længe nok til, at målingerne er repræsentative for forskellige forhold. Det tilstræbes, at målingerne omfatter andre vindforhold end de forudsætninger, der er fastlagt i bekendtgørelsen om støj fra vindmøller, således at målingerne samlet set omfatter et bredere interval af vindhastigheder, end det der svarer til vindhastigheder omkring 6 og 8 m/s i 10 m højde, og at der måles både i medvindsretningen fra mølle til nabo og i andre vindretninger. Ved valg af naboejendomme tilstræbes bl.a., at beboelsesbygningerne er repræsentative for danske forhold.

5.3 Specifikke spørgsmål der vil blive adresseret

- Er der systematiske forskelle mellem målinger og beregninger? (både ved medvind 6-8 m/s og i andre situationer, ude og inde)
- Giver andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s anden støj, tydeligere toner og/eller mere lavfrekvent støj end forventet?
- Giver andre vindretninger end medvind fra mølle til nabo mere støj, tydeligere toner og/eller mere lavfrekvent støj?

5.4 Generelt om forsøgsdesign

Beregninger og målinger sammenlignes (ude/inde/toner/LF):

- Under et antal forskellige meteorologiske forhold
- Ud fra en kildestyrkemåling af hver mølle under de aktuelle forhold med alle møller i drift.
- I et punkt ca. midtvejs mellem nabo og nærmeste møller foretages en måling til sammenligning af beregnede og målte værdier.
- Ved tre forskellige naboer placeret i forskellige retninger i forhold til vindmølleparken

Beregninger sammenlignes som hovedregel ikke med enkelte måleresultater pga. måleusikkerheden – i stedet anvendes gennemsnit og konfidensintervaller. Den "sande" vindhastighed baseres på målinger fra nærmeste mølle. Vindhastighed og -retning registreres ved naboerne – som minimum ved én nabo.

Der redegøres for, hvilke data der er fjernet fra målingerne og hvorfor (forventeligt typisk pga. forstyrrende baggrundsstøj).

Fordele og ulemper ved beregning kontra måling gennemgås ud fra de opnåede resultater.

5.5 Korttidsmålinger

Der udføres samtidige/synkrone målinger i følgende målepositioner på 2-3 forskellige dage:

- Under de aktuelle vejrforhold foretages en kildestyrkemåling af hver mølle med alle møller i drift. Målepladen lægges på linjen mellem hver mølle og den udvalgte nabo, der er tættest på møllen. Mindst én af målingerne skal foregå under medvind fra mølle til naboen (hos hvilken der foregår samtidige målinger). Om nødven-

digtmuligt korrigeres for indflydelsen af de 2 andre møller. Målingerne foretages efter den seneste vindmøllebekendtgørelse, dog ses der bort fra kravet om medvind og specifikke vindhastigheder.

Vindmølleproducenten leverer lavedata og/eller fastlog-data af produceret effekt, generatoromdrejningshastighed, nacellvindhastighed samt vindmøllens krøjeretning (vindretning).

- I et punkt ca. midtvejs mellem hver nabo og nærmeste mølle (maks. 500 m fra møllen) foretages en måling til sammenligning af beregnede og målte værdier med henvisning til de australske støjregler [13].
- Der måles udendørs 1,5 m over terræn hos naboen, fx på den facade der vender mod møllen og/eller i et punkt i haven, maks. 15 m fra huset.
- Der måles indendørs (3 positioner efter metoden i Orientering 9/1997 med rettelser) i det mest støjbelastede rum ved hver af naboerne. Støjende aktiviteter/genstande i huset stoppes, og der slukkes for strømmen (hvis muligt).
- Der måles baggrundsstøj med alle møller standset.

Målingerne analyseres mht. L_{Amax} , L_{Aeq} , toners tydelighed, L_{pA} , $L_{pA,LF}$ (maks. og middel) pr. vindretning og vindhastighed. Evt. amplitudemodulation kvantificeres.

Der udføres beregninger af støjbidraget i henhold til bekendtgørelsen og for de aktuelle forhold under målingerne (med Nord2000) ude og inde.

Målinger og beregninger sammenlignes under hensyntagen til måleusikkerhed. De gennemsnitlige afvigelser mellem målinger og beregninger bestemmes, og det undersøges, om der er en statistisk signifikant forskel på resultaterne. Samlet set omfatter korttidsmålingerne ideelt følgende målepunkter:

- Tre målepunkter i kort afstand som specificeret i BEK 1736 [1] (tilsvarende IEC 61400-11[16]), én for hver mølle.
- Tre målepunkter ca. midtvejs mellem hver nabo og nærmeste mølle, maks. 500 m fra møllen.
- Tre målepunkter udendørs, én ved hver nabo, enten på facaden eller maks. 15 m fra huset.
- Ni indendørs målepunkter, tre ved hver nabo, i positionerne angivet i Orientering 9/1997 [9], hvis muligt.
- Samlet set op til 18 målepunkter.
- Desuden opsættes tre vindmålermaster i 10 m højde. Én ved vindmøllerne og de sidste to ved to af naboerne.

5.6 Langtidsmålinger

Der suppleres med langtidsmålinger over ca. én uge ideelt set i samme målepositioner som beskrevet ovenfor. Målingerne tilses dagligt og overvåges ca. 2-3 timer. Alle møller stoppes jævnlige (hjemmefra eller på lokationen via telefonbesked til fabrikant/ejer), så der fås målinger af baggrundsstøjen ved nogenlunde alle forekommende vindhastigheder og -retninger. Ved perioder med indendørs målinger bør beboerne optimalt set forlade huset (og genhuses), og elektricitet m.m. skal slås fra (hvis muligt). Vindmøllefabrikanten leverer fastlog-data, så vindforholdene kan følges løbende. Vindretning og -hastighed måles ved naboen i 10 m højde.

Analyser af langtidsmålinger foretages efter samme principper, som bruges i lande, der benytter sig af denne målemetode [13]. Der vil blive givet kurver, der for ét døgn ad gangen (eller i dag-, aften- og natperioden) viser $L_{Aeq,1minut}$ og/eller $L_{Aeq,10minutter}$ samt $L_{A90,10minutter}$ for alle positioner (dog evt. de 3 indendørs midlet sammen). I perioder med uventede høje/lave værdier af $L_{Aeq,1minut}$ lyttes til optagelsen og forklaringer søges. Der foretages en sammenligning af evt. toneimmission i de målte afstande fra møllerne.

Samlet set omfatter langtidsmålingerne ideelt følgende målepunkter:

- Tre målepunkter i IEC afstand, én for hver mølle.
- Tre målepunkter ca. midtvejs mellem nabo og nærmeste mølle, maks. 500 m fra møllen.
- Tre målepunkter udendørs ved hver nabo, enten på facaden eller maks. 15 m fra huset.
- Tre indendørs målepunkter hos én nabo, i positionerne angivet i Orientering 9/1997, hvis muligt.
- Samlet set minimum 9 målepunkter.

6. Målested

Det aktuelle målested er udvalgt af Miljøstyrelsen, der har stået for den indledende kontakt til vindmølleejere og naboer. Efterfølgende besøgte DELTA vindmøllerne og de udvalgte naboer med følgende primære formål, se afsnit 5.2:

- Introducere måleprogrammet for naboerne, forklare formålet med undersøgelsen og planlægge de praktiske ting i forbindelse med målingerne.
- Udpegning (i samråd med naboerne) af relevante målepunkter indenfor og udenfor ved ejendommen.
- Sikring af at datainterfacet til vindmøllerne fungerer.
- Identifikation af relevante målepunkter ved møllerne samt midtvejspositioner.

6.1 Primære vindmøller

De tre primære vindmøller er af typen Vestas V112 3,0 MW med en navhøjde på 84 m og en rotordiameter på 112 m. Vindmøllerne er placeret i fladt terræn og omgivet af dyrket landbrugsjord. Vindmøllerne er betegnet WT1, WT2 og WT3. Vindmøllernes effektkurve er vist i Bilag 4. Vindmøllerne blev opstillet i perioden august-oktober 2012. De tre vindmøller omtales sædvanligvis som Nollund Vindmøllepark.

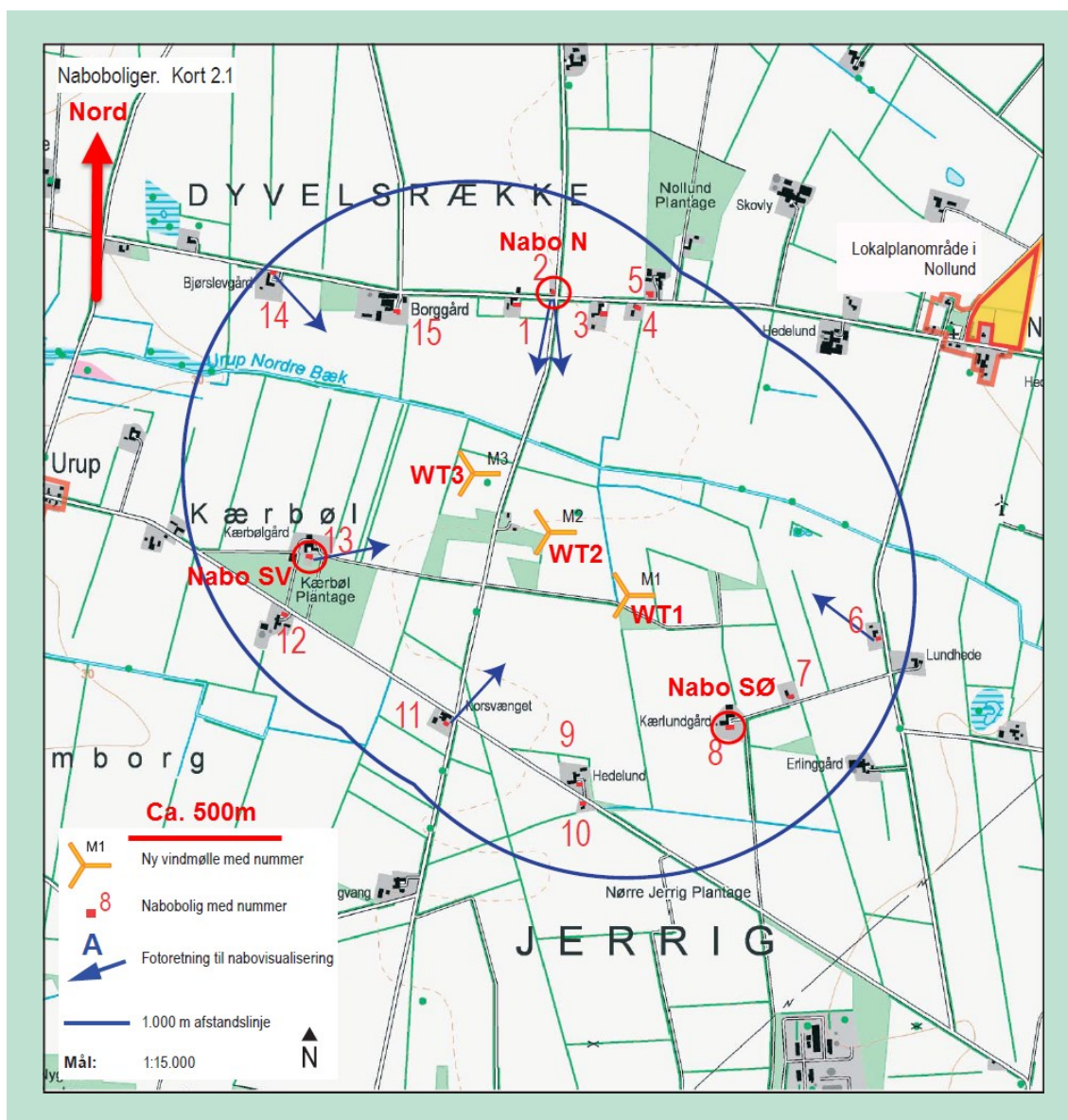


FIGUR 1. Foto af vindmølle WT3 fra kontrolmålingerne udført i 2013, se afsnit 7.

6.2 Udvalgte naboer

Omkring de tre primære vindmøller ligger en række naboer, se FIGUR 2. Miljøstyrelsen har stået for kontakt til naboerne og har udvalgt tre naboer, der er placeret i hver sin retning i forhold til de tre vindmøller (Nabo 2, 8 og 13 på kortet vist i FIGUR 2).

I det følgende er målepunkterne navngivet ved en notation, hvor hver af de tre vindmøller (WT1, WT2 og WT3) "knytter" sig til en nabo: WT1 knytter sig til nabo SØ, WT2 til nabo N og WT3 til nabo SV, se fx FIGUR 8. Desuden angives, hvilken af de tre mulige målepunkter relateret til denne vindmølle, der er tale om. De relaterede målepunkter er P1 (tættest på møllen, cirka en totalhøjde (140 m) fra møllen i retning mod naboen), P2 (midtvejspunktet ca. 500 m fra møllen i retning mod naboen) og P3 (på naboens grund). Således betegner fx målepunkt WT3 P2 midtvejspunktet mellem vindmølle WT3 og nabo SV.



FIGUR 2. Kort over området fra VVM-redegørelsen fra 2011 [3]. De aktuelle vindmøller her er vist med gult, hvor de er betegnet med M1, M2 og M3, der svarer til de i nærværende rapport hhv. WT1, WT2 og WT3. De udvalgte naboer er på kortet markeret med tallene 2, 8 og 13 og med en rød cirkel.

6.2.1 Nabopunkt nord (WT2 P3)

Den udvalgte nabo nord for vindmøllerne er placeret lige ud til krydset mellem to små veje, hvor der dog under målingerne ofte passerende køretøjer. Ejendommen består af et toetages hus samt en garage. Den primære del af haven ligger nord for huset. Ejendommen er relativt uskærmet for vind, dog med enkelte læhegn, se FIGUR 3, samt yderligere fotos i Bilag 3. Den omkringliggende vegetation var generelt uden blade under målingerne. Beboerne oplyser, at de tydeligst kan høre vindmøllestøjen i deres stue, der er placeret i den sydvestlige ende af huset i stueplan, hvor den sydlige del af væggen primært består af et vinduesparti, se FIGUR 96. Der er udført indendørs målinger.



FIGUR 3. Foto fra nord af mikrofonen i haven til nabopunkt nord.

6.2.2 Nabopunkt sydøst (WT1 P3)

Den udvalgte nabo mod sydøst er en gård, der ligger ca. 500 m fra Ølgodvej. Ejendommen består af et toetagers stuehus, der er sammenbygget med de øvrige bygninger beliggende nordnordvest for stuehuset. Ejendommen har en ret stor have primært placeret syd for bygningerne. Beboerne oplyser, at de sjældent hører vindmøllerne indendørs, men at de (når møllerne er hørbare) tydeligt kan høre vindmøllerne i det meste af haven, primært de steder hvor vindmøllerne er synlige. Generelt gælder, at hvis beboerne er i haven, og vindmøllerne er synlige for stuehuset, så kan beboerne også høre vindmøllerne. Haven og huset er omkranset af en del vegetation, der er en blanding af nåletræer og løvtræer, og giver nogen skærmning for vinden. Der blev efter aftale med beboerne ikke udført indendørs målinger.

6.2.3 Nabopunkt sydvest (WT3 P3)

Den udvalgte nabo mod sydvest er en gård, der ligger i udkanten af en lille skov. Der er ca. 200 m til Ølgodvej. Ejendommen består af et enetages stuehus samt et par fritliggende bygninger, der ligger enten vest eller nordøst for stuehuset. Haven til ejendommen var på måletidspunktet under omlægning. Beboerne oplyser, at de sjældent hører vindmøllerne. Ejendommen er omkranset af en del vegetation, specielt mod syd, sydvest og vest. Vegetationen er en blanding af nåle- og løvtræer og giver god skærmning for vinden. Der blev udført indendørs målinger.

6.3 Sekundære vindmøller

Udover de tre Vestas V112 vindmøller er der også andre vindmøller i området, se kortet i FIGUR 6.



FIGUR 4. Foto fra syd af mikrofon og vindmålermast i haven til naboen sydøst for vindmøllerne.



FIGUR 5. Foto fra sydøst af mikrofon og bygninger ved naboen sydvest for vindmøllerne.



FIGUR 6. Kort over området fra VVM-redegørelsen fra 2011 [3]. De aktuelle vindmøller her er vist med gult, hvor de med rødt markerede vindmøller viser øvrige vindmøller. Siden kortet fra 2011 er desuden opstillet 6 nye vindmøller (markeret med en blå cirkel på kortet) af samme type som vindmøllerne i Nollund, men med en navhøjde på 94 m. De udvalgte naboer i forbindelse med målingerne i 2016 og 2017 er på kortet markeret med en rød cirkel.

7. Udførte kontrolmålinger

I 2013 blev de tre vindmøller kontrolmålt iht. Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284 af 15. december 2011: "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller" og rapporteret af DELTA [7].

Overordnet kan en kontrolmåling deles op i følgende delopgaver:

- Måling af støjniveau i en afstand fra vindmøllen svarende til totalhøjden ved vindhastighederne 6 og 8 m/s for hver enkelt af vindmøllerne.
- Analyse af data og beregning af lydeffektniveau for hver vindmølle.
- Analyse for tonalitet.

Hver delopgave er beskrevet nøjere i de følgende afsnit.

7.1 Måling af støjniveau

Støjen fra vindmøllerne blev målt i læsiden i en vandret afstand på 140 m til rotorcentrum for mølle WT1 og WT3 og i en vandret afstand på 152 m til rotorcentrum for mølle WT2. Hver vindmølle blev målt for sig. Måleafstanden svarer til navhøjden plus en halv rotordiameter indenfor den tilladte 20 % -tolerance. Målemikrofonen var monteret på en rund reflekterende krydsfinerplade med en diameter på 1,0 m. Pladen var placeret direkte på jorden. Mikrofonen var monteret med en halv vindskærm samt en større vindskærm for at minimere vindstøj i målesystemet. Målingerne blev korrigeret for indsætningsdæmpningen i den store vindskærm. Den mindre vindskærm monteret på selve mikrofonen har ingen betydende indflydelse på resultaterne i det relevante frekvensområde.

Støjen, vindhastigheden, den producerede effekt, generatoromdrejninger, pitch for vingerne og vindretningen blev registreret. Ved måling af baggrundsstøj blev vindmøllen standset. Den nærmeste nabovindmølle var slukket under måling af vindmølle- og baggrundsstøj.

Samtidige værdier af ækvivalent støjniveau og vindhastighed midlet over ti-sekunders perioder blev bestemt for hele måleperioden. Vindhastigheden blev under målingen af vindmøllens støjemission beregnet på baggrund af den producerede effekt (den anvendte effektkurve er vist i Bilag 4). For de perioder, hvor vindmøllens producerede effekt oversteg 95 % af dens nominelle effekt, blev vindhastigheden bestemt ud fra vindmøllens nacelleanemometer. Under målingen af baggrundsstøjen blev vindhastigheden bestemt med et anemometer på en 10 m mast placeret i nærheden af vindmøllen, hvor vindmålingen ikke blev påvirket af vindmøllen eller andre genstande i terrænet.

På baggrund af målingerne er de ækvivalente støjniveauer, $L_{A,ref,k}$, ved reference vindhastighederne 6 m/s og 8 m/s bestemt. Resultaterne er baseret på middelværdier af målte 1/3-oktavspektre.

7.2 Lydeffektniveau

Beregningen af vindmøllernes lydeffektniveau, $L_{WA,ref}$, i 1/3- og 1/1-oktavgbånd ved referencevindhastighederne 6 m/s og 8 m/s blev foretaget ud fra den antagelse, at støjen udstråles fra en punktkilde placeret i navhøjde.

$$L_{WA,ref} = L_{A,ref,k} + 10 \cdot \log(4\pi(R^2 + h^2)) - 6 \text{ dB}$$

hvor R = den aktuelle måleafstand mellem mikrofonen og vindmøllens fod
 h = vindmøllens navhøjde

Der blev korrigeret med -6 dB, da mikrofonen var placeret på en reflekterende flade. Vindmøllernes lydeffektniveauer ved referencevindhastighederne 6 m/s og 8 m/s, $L_{WA,ref}$, fremgår af TABEL 1 for hver af de tre vindmøller WT1, WT2 og WT3.

TABEL 1. Lydeffektniveauerne for de tre vindmøller under kontrolmålingerne

Vindhastighed	6 m/s	8 m/s
$L_{WA,ref}$ [dB re. 1 pW]; WT1	103,2	105,8
$L_{WA,ref}$ [dB re. 1 pW]; WT2	104,8	105,8
$L_{WA,ref}$ [dB re. 1 pW]; WT3	103,6	105,6

7.3 Beregnet støjbidrag ved naboer

Der blev foretaget beregninger af støjbidraget ifølge Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284 i 18 immissionspunkter rundt om vindmøllerne. Koordinater for vindmøller og immissionspunkter var i overensstemmelse med tidligere beregninger udført i forbindelse med projektering af vindmøllerne. Som i de tidligere beregninger udført i forbindelse med projektering af vindmøllerne indgik relevante nabovindmøller ligeledes i beregningerne. Resultatet af beregningerne for de tre udvalgte naboer er vist i TABEL 2.

TABEL 2. Beregnet støjbidrag ved de tre naboer

Vindhastighed	6 m/s		8 m/s	
L_r [dB re. 20 μ Pa]	Beregnet	Grænseværdi	Beregnet	Grænseværdi
Nabo mod sydøst	38,9	42	41,1	44
Nabo mod nord	38,9	42	40,9	44
Nabo mod sydvest	39,1	42	41,0	44

Ligeledes er det lavfrekvente støjbidrag ved de tre udvalgte naboer beregnet. Resultatet kan ses i TABEL 3.

TABEL 3. Beregnet lavfrekvent støjbidrag ved de tre naboer

Vindhastighed	6 m/s		8 m/s	
$L_{pALF,tot}$ [dB re. 20 μ Pa]	Beregnet	Grænseværdi	Beregnet	Grænseværdi
Nabo mod sydøst	12,4	20	14,7	20
Nabo mod nord	13,2	20	15,7	20
Nabo mod sydvest	12,6	20	15,1	20

7.4 Toneanalyse

Der blev foretaget analyse af tydeligt hørbare toner i støjen for målinger i referenceafstanden på 140 m for vindmøller WT1 og WT3 og i referenceafstanden på 152 m for vindmølle WT2. Målingerne foretages som en del af kildestyrkemålingerne, dvs. på en plade på jorden og såvidt muligt så langt fra vegetation som muligt. Afstanden mellem baggrundsstøjen og totalstøjen for 1/3 oktav niveauer var mindst 10 dB i det relevante frekvensområde. Analyserne blev foretaget i henhold til Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284. Den 1-minutperiode under målingerne, hvor tonaliteten var kraftigst, blev identificeret og analyseret for tonalitet. Analysen blev foretaget på A-vægtede spektre.

Analyserne viste, at der i de anvendte referenceafstande ikke blev fundet toner, som overskrider grænsen for tildeling af tillæg for tydeligt hørbare toner i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 6/1984. De kraftigste toner blev fundet ved følgende centerfrekvenser: 153 Hz (Vindmølle WT1, 2,9 dB under grænsen), 62 Hz (Vindmølle WT2, 4,9 dB under grænsen) og 187 Hz (Vindmølle WT3, 4,2 dB under grænsen). Sammenfattende viste analyserne, at målt i referenceafstanden indeholdte ingen af vindmøllerne toner, som overskred grænsen for tildeling af tillæg for tydeligt hørbare toner i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 6/1984[8], og det var derfor ikke nødvendigt at undersøge tydeligheden af hørbare toner ved naboerne.

7.5 Opsummering

Samlet viste kontrolmålingerne udført i henhold til gældende retningslinjer [2], at grænseværdierne ikke var overskredet.

8. Målesetup

De planlagte målinger krævede en stor mængde udstyr og brugbart målevej og desuden ønsket udført omkring årsskiftet 2016-2017. Målingerne blev derfor af praktiske årsager delt op i to måleperioder for at opnå så mange forskellige vejr-situationer som muligt:

- Endagsmålekampagne med samtidige målinger i op til 5 mikrofoner.
- Flerdagesmålekampagne med samtidige målinger i op til 15 mikrofoner i forbindelse med indendørs målinger, dog kun samtidige målinger i 9 mikrofoner for det meste af målekampagnen.

Antallet af målepositioner på de enkelte måledage og i de enkelte måleserier afspejler, hvad der i praksis lod sig gøre. Det havde fx været ønskeligt med flere samtidige målinger inde og ude, men mulighederne for adgang til husene har været begrænset.

8.1 Endagsmålekampagne

Endagsmålekampagnen blev udført den 8. december 2016.

Det meste af måleperioden blev anvendt 5 mikrofoner:

- Én udendørsmikrofon ved den nordlige nabo (WT2 P3)
- Én mikrofon ved vindmølle WT2 (WT2 P1)
- Én mikrofon i en mellemposition mellem vindmølle WT2 og den nordlige nabo (WT2 P2)
- To udendørsmikrofoner ved naboen mod sydøst (en del af perioden):
 - o Én i haven (dvs. længst væk fra vindmøllerne) (WT1 P3)
 - o Én ved laden (dvs. tættest på vindmøllerne) (WT1 P3B)
- To indendørsmikrofoner ved naboen mod nord (kun noget af perioden):
 - o Én i en hjørneposition til venstre for vinduespartiet, der vender mod vindmøllerne (WT2 P3)
 - o Én foran vinduespartiet, der vender mod vindmøllerne (WT2 P3)

To af mikrofonerne blev flyttet mellem de indendørs målinger ved naboen mod nord og udendørs målinger ved naboen mod sydøst. I FIGUR 7 er de omtrentlige positioner for det anvendte målesetup vist.

8.2 Flerdages målekampagne

Flerdages målekampagnen blev udført i perioden 3. – 6. januar 2017.

For det meste af måleperioden blev der anvendt 9 mikrofoner:

- Én udendørs mikrofon ved hver af de tre naboer (P3)
- Én mikrofon ved hver af de tre vindmøller (P1)
- Én mikrofon i en mellemposition mellem vindmølle og nabo (P2)

Over en periode på 2 – 3 timer den 4. januar 2017 blev der desuden også foretaget indendørs målinger ved to af naboerne, dvs. samtidige målinger i 15 mikrofoner.

I FIGUR 8 er de omtrentlige positioner for det anvendte målesetup vist.

8.2.1 Mikrofon ved vindmøllerne

Mikrofonen ved vindmøllerne blev generelt opsat iht. anvisningerne i Bekendtgørelse 1284, reference [2] (på dette punkt identisk med Bekendtgørelse 1736, reference [1]), dog ikke opfyldende reglen om medvind. Det vil sige, at mikrofonen blev placeret i en afstand af ca. 140 m fra vindmøllen i retning mod naboen. Mikrofonen blev som i Bekendtgørelse 1284 placeret på en plade på jorden, hvilket er en fordel i forhold til vindstøj, da vinden ved jordoverfladen sædvanligvis er lav.

Mikrofonen blev desuden påsat både en primær og sekundær vindskærm for at skærme mod vindstøj. Fotos af mikrofonplaceringerne er vist i Bilag 3.

8.2.2 Mikrofon udendørs ved naboerne

Mikrofonen ved naboerne (position P3) blev opsat i højden ca. 1,5 m over jorden og så vidt muligt også ifølge anvisningerne i Bekendtgørelse 1284. Dog blev mikrofonen i nogle tilfælde opsat længere fra huset end 15 m (for at undgå skærmning fra huse, som beregningerne i Bekendtgørelse 1284 ikke medtager). Mikrofonen blev opsat på en trefod og påsat både en primær og sekundær vindskærm for at skærme mod vindstøj. Fotos af mikrofonplaceringerne er vist i Bilag 3.

8.2.3 Mikrofoner indendørs ved naboerne

Mikrofonerne indendørs blev opsat iht. Orientering nr. 9/1997 fra Miljøstyrelsen "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø" [9], dvs. tre mikrofoner hvoraf én er placeret i et hjørne 0,5 m fra væggene i højden 1,5 m over gulvet. En anden mikrofon er placeret 0,5 m foran et vindue, der vender mod vindmøllerne i 1,5 m højde, og den sidste er placeret i 1,5 m højde i en position udvalgt af de to naboer mod henholdsvis nord og sydvest (WT2 P3 og WT3 P3), hvor disse hver i sær oplevede støjen som kraftigst. Da det var indendørsmålinger, blev der ikke anvendt en vindskærm. På grund af en misforståelse i forbindelse med planlægningen af målingerne er målepositionerne indendørs ikke placeret efter retningslinjerne i rettelsen til Orientering nr. 9/1997's afsnit 3.4.1 udsendt af Miljøstyrelsen, men målepositionerne er i stedet placeret efter de oprindelige anvisninger i [9]. Der er derfor foretaget en undersøgelse af forskellene mellem de forventede resultater målt efter de oprindelige anvisninger og de ændrede anvisninger i rettelsen til afsnit 3.4.1 i [9]. Rettelsen til orienteringen foreskriver, at målingerne skal foretages i forskellig højde over gulvet for at undgå at måle i en 'node' af en stående bølge. Der er foretaget en beregning, der viser, at de stående bølger, som måtte opstå mellem gulv og loft (loftshøjden er 2,5 m) i frekvensområdet 10-160 Hz ikke har en 'node' i 1,5 m højde. Det vurderes derfor, at målingerne ikke er påvirket af et ekstraordinært lavt lydtryk forårsaget af stående bølger mellem gulv og loft. Fotos af mikrofonplaceringerne er vist i Bilag 3.

8.2.4 Mikrofonen i mellempositionen

I en afstand ca. midt mellem vindmølle og nabo (generelt så langt fra forstyrrende vegetation som muligt) blev endnu en mikrofon opsat (position P2) inspireret af de australske regler for dokumentation af vindmøllestøj [13]. Mikrofonen blev placeret på en plade på jorden (som ved mikrofonpositionerne P1 tæt på vindmøllerne) for at reducere vindstøjen mest muligt. Mikrofonen blev desuden påsat både en primær og sekundær vindskærm for at skærme mod vindstøj. Fotos af mikrofonplaceringerne er vist i Bilag 3.

8.2.5 Produktionsdata for vindmøllerne

Produktionsdata fra møllerne blev logget og tilsendt af Vestas, hvilket primært var følgende parametre:

- Produceret effekt
- Vindhastighed i nacellehøjde
- Krøjeretning (hvilken retning er rotoren vendt mod, hvilket svarer til vindretningen)

8.2.6 Vindmålermast

For endagsmåleperioden blev opsat én vindmålermast, og for flerdagesmåleperioden blev der opsat tre vindmålermaster. Disse havde en højde på 10 m.

Vindmålermasten blev for endagsmåleperioden opsat i følgende position (se FIGUR 7):

- Ved den mellemste vindmølle (WT2) i en afstand på 136 m til vindmøllen (vindhastighed)

Vindmålermasterne blev for flerdagesmåleperioden opsat i følgende positioner (se FIGUR 8):

- Ved nabo nord for parken (vindhastighed og -retning)
- Ved nabo sydøst for parken (vindhastighed)
- Ved den nordvestlige vindmølle (WT3) i en afstand på 148 m til vindmøllen (vindhastighed)

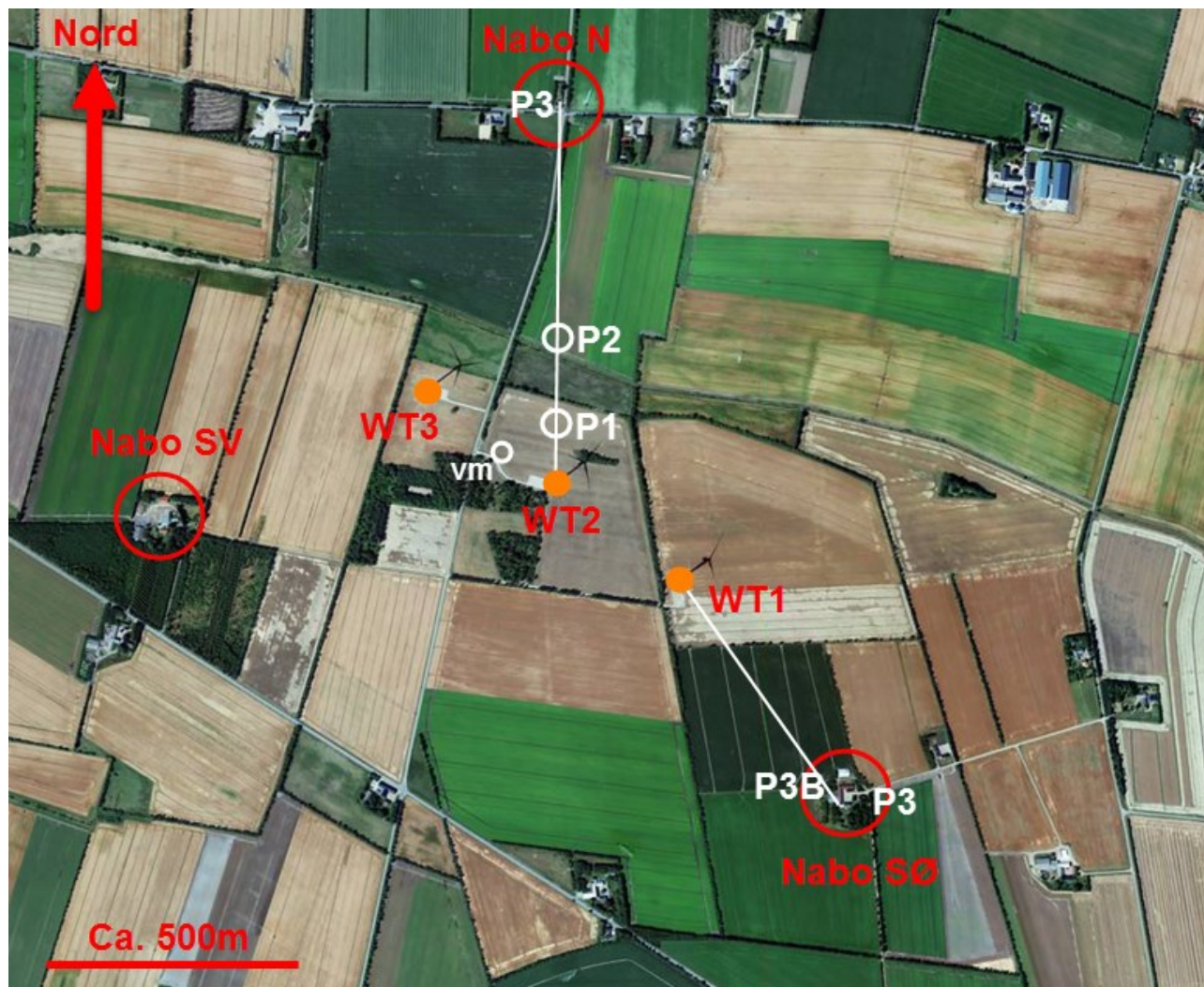
De to af vindmålermasterne havde mulighed for at logge både vindhastighed og -retning. Den sidste havde kun mulighed for at logge vindhastighed. Sidstnævnte blev placeret ved vindmøllerne, da vindretningen i forvejen kendes fra data der modtages fra vindmøllen.

Formålet med vindmålermasten placeret ved vindmøllerne er til brug for både baggrundsstøjsmålingerne og Nord2000-beregningerne, se afsnit 12.2.

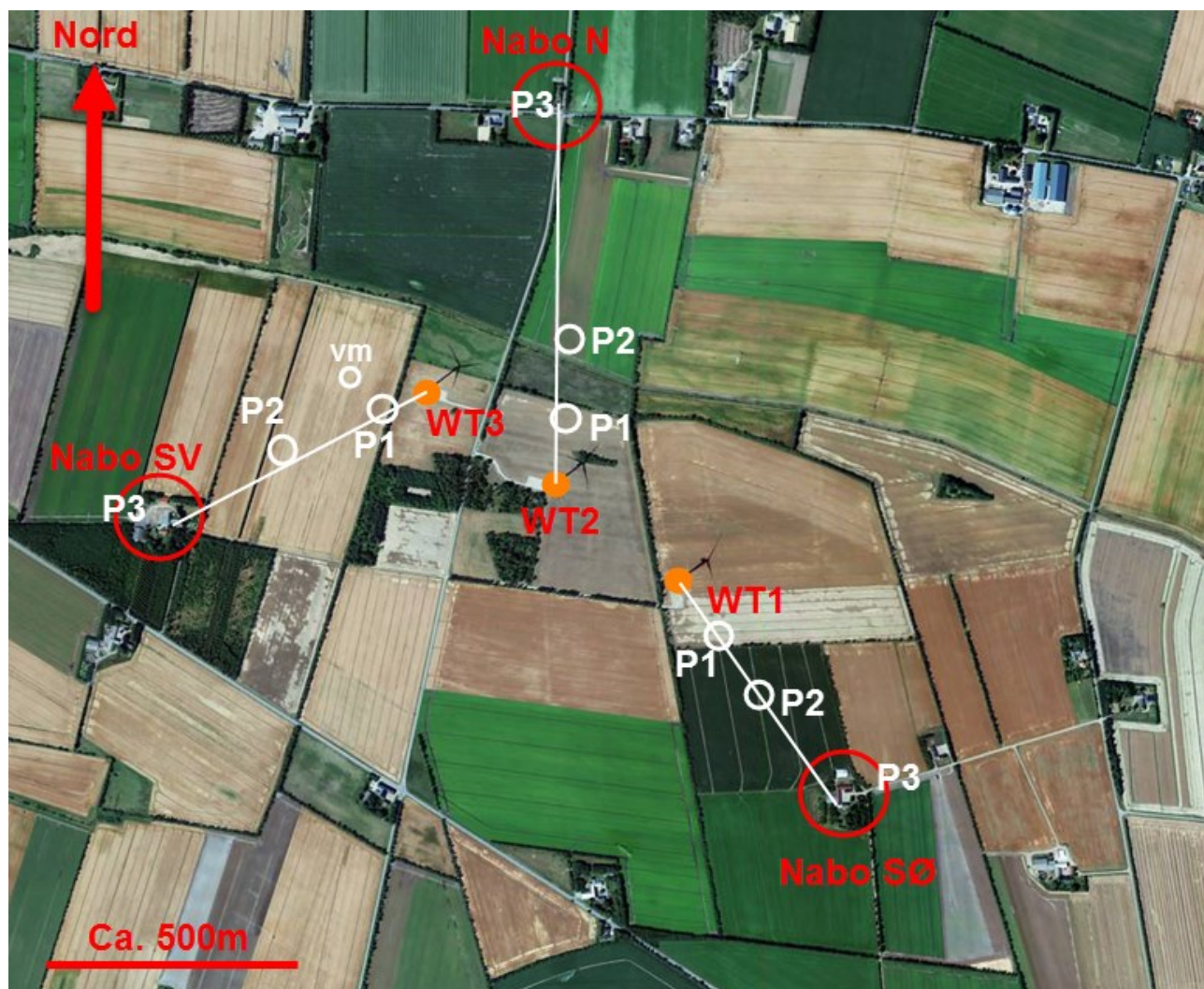
Formålet med de to vindmålermaster placeret ved naboerne er at registrere den aktuelle vindhastighed i 10 m højde ved nabopositionerne.

8.2.7 Produktionsdata data fra SydEnergi

SydEnergi (SE) supplerede med registrering af strøm, der blev sendt ud på elnettet fra parken, se afsnit 9.2.



FIGUR 7. Overblik over målesetup for endagsmålekampagnen, vm er vindmålermast. Se desuden Figur 104, 105 og 106 i Bilag 3.3.



FIGUR 8. Overblik over målesetup for målekampagnen over flere dage, vm er vindmålermast. Se desuden Figur 104, 105 og 106 i Bilag 3.3.

9. Vejr- og produktionsforhold under målingerne

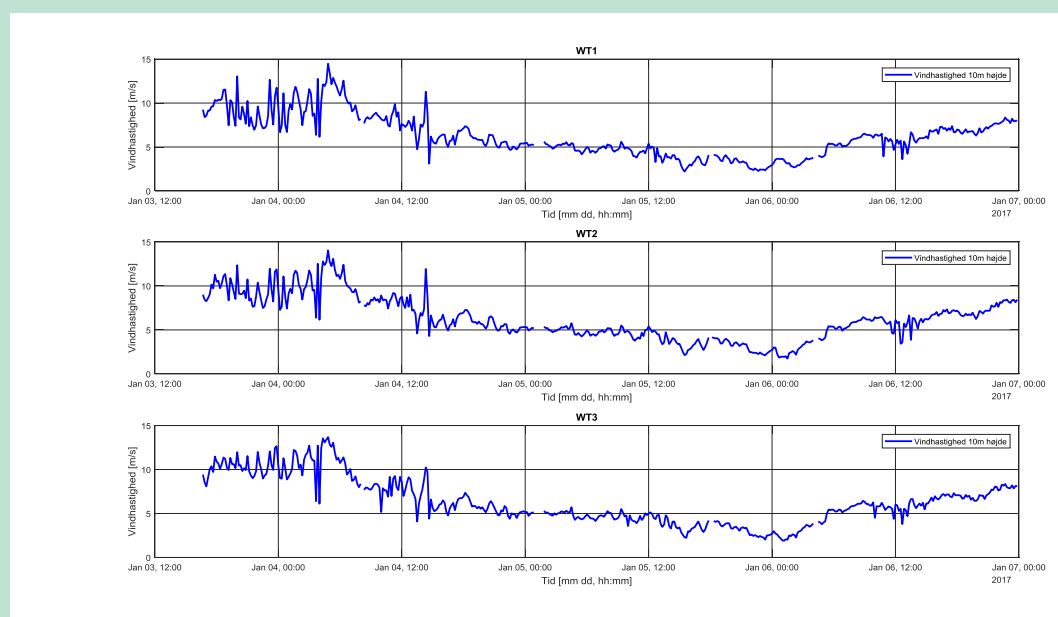
9.1 Vejrforhold

Under målingerne, der blev udført den 8. december 2016 og fra d. 3. januar 2017 om aftenen til og med sen eftermiddag den 6. januar 2017, er de aktuelle vejrforhold registreret. Det er forsøgt at ramme så bredt som muligt under målingerne, så flest scenarier er med. I TABEL 4 er de aktuelle vejrforhold vist for de dage, hvor målingerne blev udført.

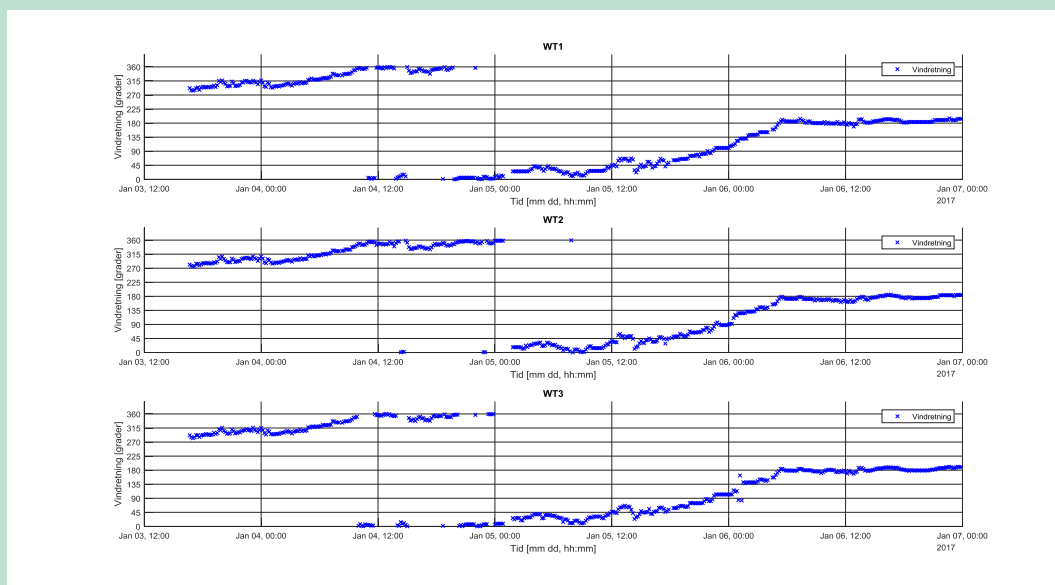
TABEL 4. Vejrforhold over måledagene, foruden vindhastighed og vindretning.

Dato	Temperatur	Fugtighed	Skydække	Lufttryk
8. december 2016	8 til 11 °C	85 til 99 %	2/8 til 8/8	1016 til 1017 hPa
3. januar 2017	3 til 7 °C	70 til 80 %	4/8 til 8/8	990 til 1000 hPa
4. januar 2017	-3 til 5 °C	50 til 85 %	0/8 til 7/8	990 til 1020 hPa
5. januar 2017	-10 til -3 °C	57 til 92 %	0/8 til 6/8	1020 til 1040 hPa
6. januar 2017	-12 til -5 °C	80 til 90 %	0/8 til 8/8	1030 til 1040 hPa

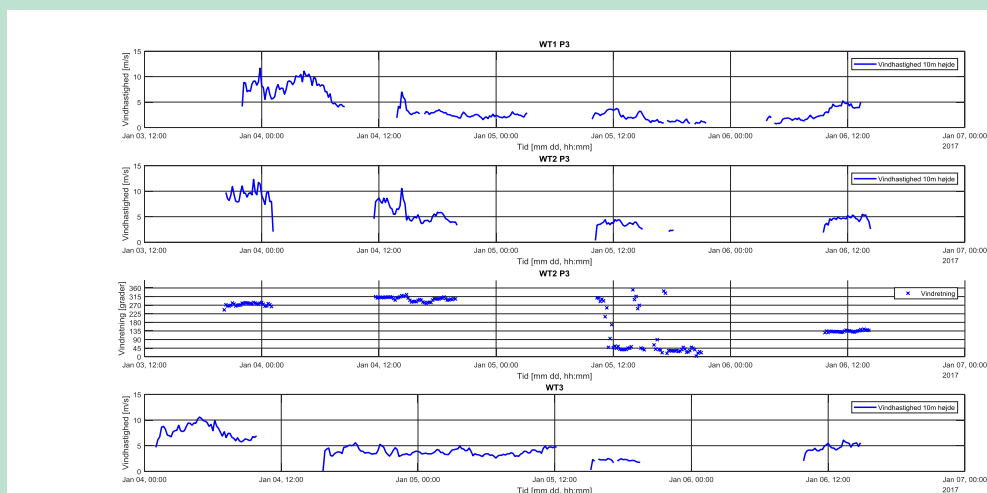
Vindhastighed og -retning blev logget fra alle tre møller samt vindhastighed og -retning fra tre 10 m vindmålermaster ved Nabo WT2 P3 og vindhastighed fra en 10 m vindmålermast ved Nabo WT1 P3 og en tæt på WT3, sidstnævnte dog kun med måling af vindhastighed.



FIGUR 9. Vindhastighed beregnet ud fra produceret effekt fra vindmøllerne. I perioder med baggrundsstøj målinger er vindhastigheden beregnet ud fra nacelleanemometret. Vindhastigheden er omregnet til 10 m højde.



FIGUR 10. Vindretning beregnet ud fra Yaw-retning på vindmøllerne. Ved 0 grader blæser det fra nord, ved 90 grader blæser det fra øst, ved 180 grader blæser det fra syd, og ved 270 grader blæser det fra vest.



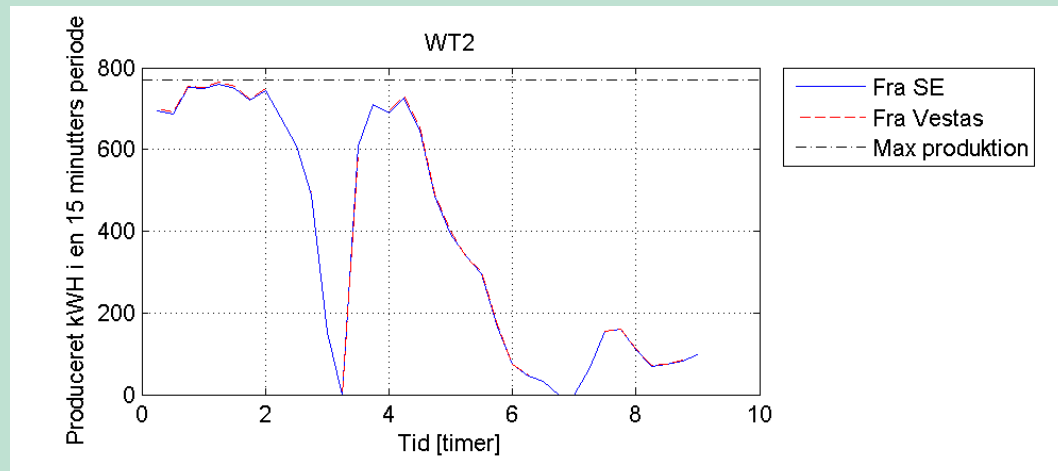
FIGUR 11. Vindhastighed og -retning registreret fra 10 m masterne ved Nabo WT1 P3, Nabo WT2 P3 og vindmølle WT3. Der er større udfald i perioderne, da det ikke har været muligt at opretholde logning under hele målekampagnen pga. batterikapacitet.

Som det ses af FIGUR 9, FIGUR 10 og FIGUR 11 har der været vindhastigheder mellem 3-14 m/s, og det har blæst fra nordvest over nord, øst, syd og sydvest.

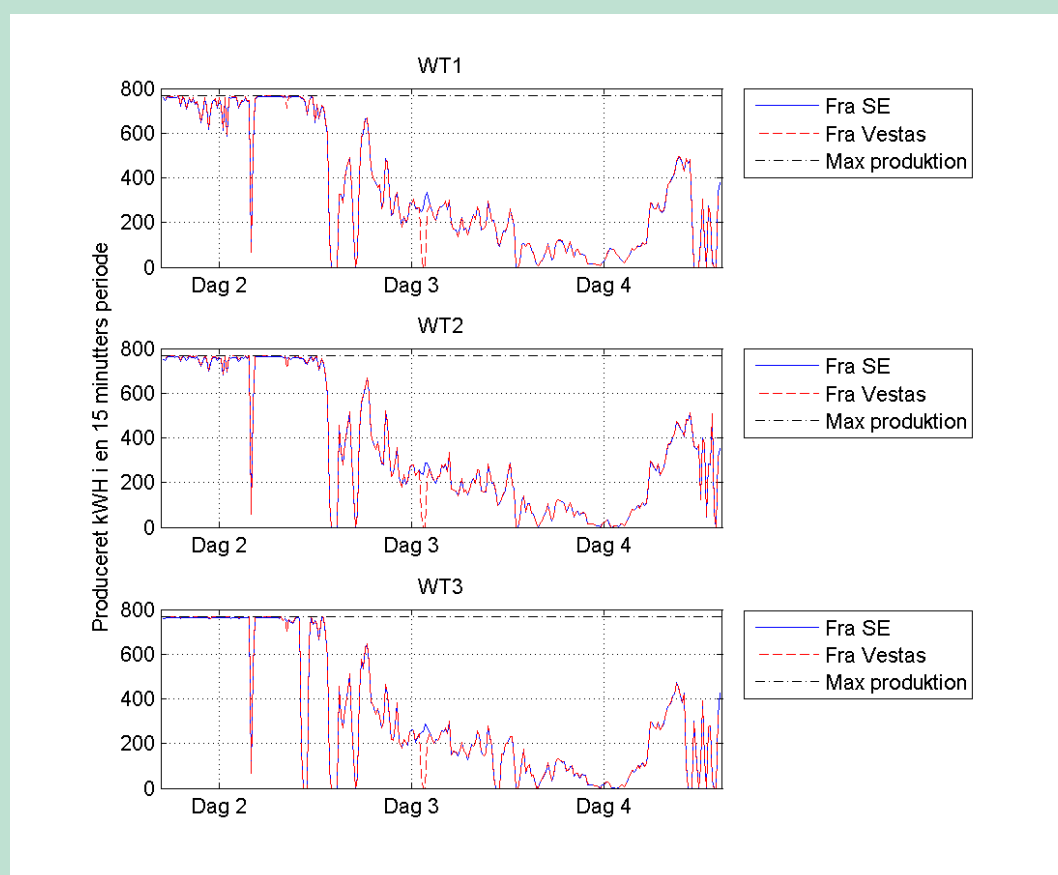
9.2 Produktionsforhold

Under besigtigelsesbesøget blev fra naboernes side udtrykt en bekymring for, at vindmøllerne ville køre ulastet under målingerne. Det aktuelle elselskab for området er Syden Energi, SE, som blev kontakten for at tilsende lastprofil for de tre vindmøller for måleperioden til sammenligning med loggede data. I FIGUR 12 og FIGUR 13 er produceret kWh logget fra både Vestas og Syden Energi vist sammen over tid.

Generelt er kurverne identiske og bekræfter, at vindmøllerne har kørt med last under målingerne. Supplerende blev lastprofilerne også tilsendt for måleperioden for kontrolmålingerne i 2013, der viste, at også da havde vindmøllerne kørt med last.



FIGUR 12. Sammenligning af produceret kWh logget af hhv. Sydenergi og Vestas for endagsmålekampagnen. Registreringen er begyndt den 8. december 2016 kl. 10.



FIGUR 13. Sammenligning af produceret kWh logget af hhv. Sydenergi og Vestas for flerdagesmålekampagnen. X-aksens Dag 2, Dag 3 og Dag 4 svarer til kl. 00 (midnat).

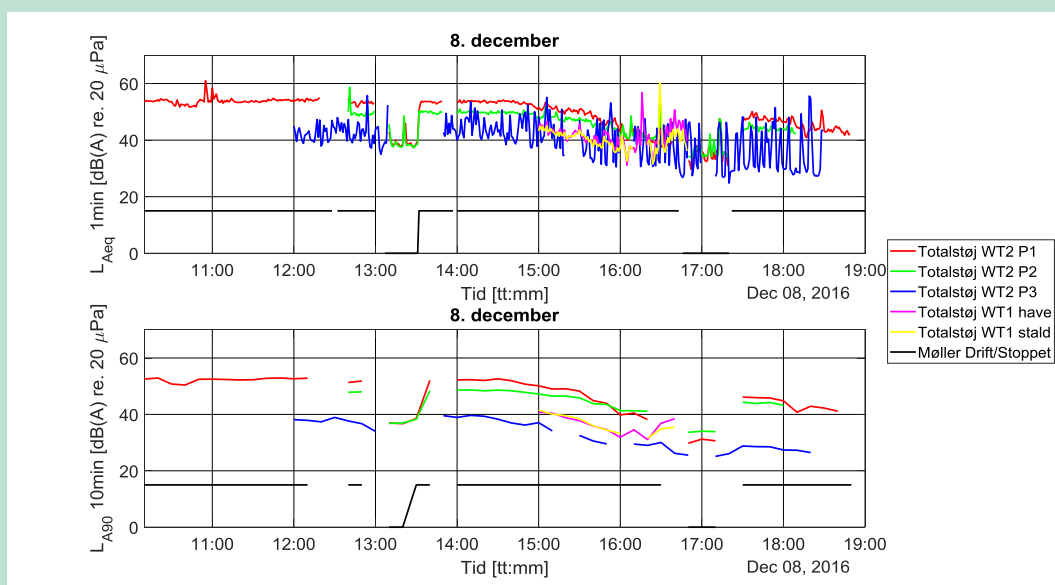
10. Langtidsanalyse

Der er foretaget målinger over sammenlagt 4 dage. Dog er målinger foretaget over 2 gange, således at der er foretaget måling den 8. december 2016 og igen fra den 4.-6. januar 2017. Langtidsanalyserne er ligeledes opdelt i de 2 separate målinger. For hver af perioderne er der udarbejdet kurver, der viser støjen fordelt over døgnet med forskellige midlingstider samt med statistiske værdier. Der er for hvert enkelt målepunkt udarbejdet scatterplots, der viser sammenhængen mellem støjniveau og vindhastigheden. Ydermere er der udarbejdet polareplots, hvor der foruden støjniveau og vindhastighed også er undersøgt vindretningens betydning for støjniveauet.

10.1 Endagsmålekampagne

Endagsmålekampagnen er foretaget den 8. december 2016 fra ca. kl. 10 til ca. kl. 19. Målepunkter er opstillet fra WT2 og ud mod naboen mod nord. Foruden de 3 punkter er der to supplerende punkter ved naboen mod sydøst. Begge punkter ved naboen mod sydøst er placeret på matriklen.

I FIGUR 14 ses hhv. $L_{Aeq1min}$ samt $L_{A9010min}$ i forhold til tid. For målingerne foretaget i P1 og P2 gælder, at det er +6dB-målinger, idet de er foretaget på en plade jf. BEK 1736. Der er i plottet ikke korrigeret for dette. For punkterne ved naboen i WT1 P3 (henholdsvis i have og ved stald) og WT2 P3 er målingerne udført i 1,5 m højde, og de viste resultater indeholder ikke en refleksion. For begge plots gælder, at det er totalstøjen, der er vist. Manglende data i plottet skyldes, at data ikke har været tilgængelig for den enkelte position.

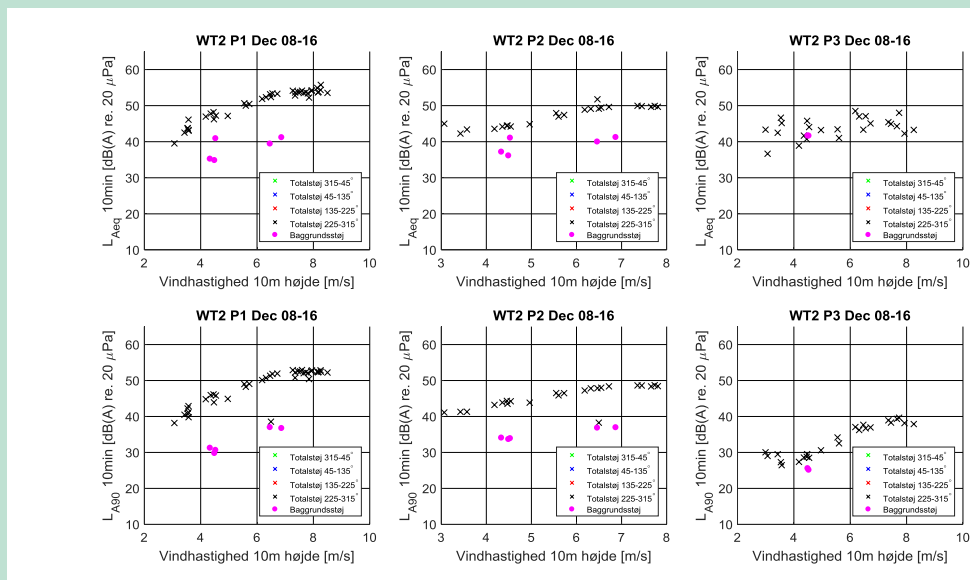


FIGUR 14. Støjniveauer over tid for målingerne udført den 8. december 2016.

I det øverste plot i FIGUR 14 ses $L_{Aeq1min}$. Det ses, at støjen målt tæt ved møllen i P1 og mellem positionen P2 er relativt stabil i størstedelen af perioden. Det skyldes, at der i den periode er relativ høj vindhastighed. Det ses også, at efterhånden som vinden aftager, bliver støjen i disse punkter mere fluktuerende, fordi støjniveauet i højere grad påvirkes af baggrundsstøjen på grund af det faldende støjbidrag fra vindmøllerne. Specielt for nabopositionen WT2 P3 ses, at støjen er meget fluktuerende, hvilket skyldes placeringen relativt tæt på en befærdet vej. Det ses ligeledes, at støjen i WT2 P3 i perioder overstiger støjniveauet i punkterne tættere på møllen.

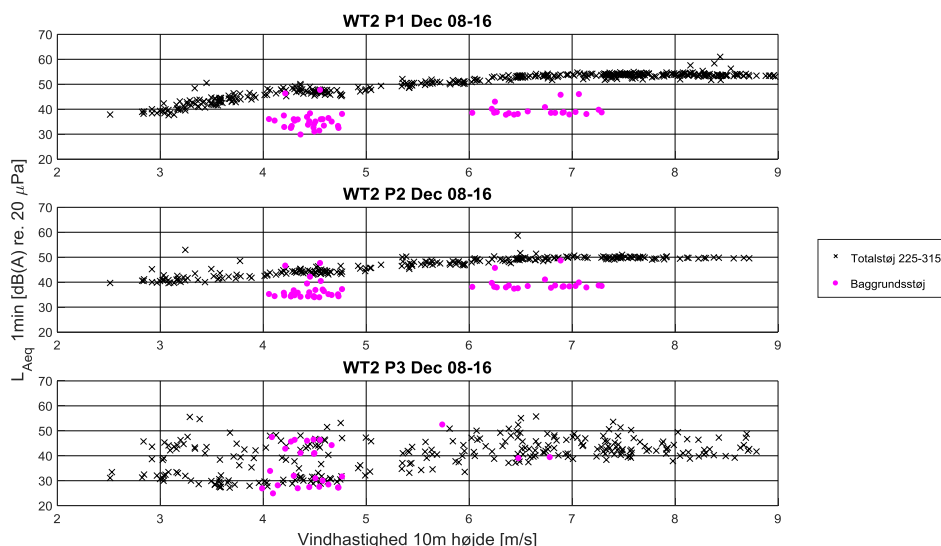
For at kunne vurdere støjen bedre er der i det nederste plot på FIGUR 14 vist $L_{A9010min}$. Det gøres for at kunne sortere evt. korte, forstyrrende elementer ud af støjen. L_{A90} er det A-vægtede støjniveau, som støjen har ligget over i 90 % af

tiden, og er således et udtryk for den "konstante" støj uden påvirkning af korte, støjende hændelser som fx bilpassager og hurtigt varierende støj fra vegetation. Det ses, at de mange bilpassager i WT2 P3 i L_{A90} -plottet ikke optræder, hvorved man får et udtryk for det laveste, gentagne støjniveau i punktet. Det ses, at niveauerne tæt på møllen er højere end i naboafstand (P3). Det ses dog også, at når støjen fra vindmøllerne aftager grundet lavere vindhastighed, så falder det laveste, gentagne støjniveau i naboafstand også. Det bemærkes også, at støjen i naboafstand generelt ligger under 40 dB(A) for den givne periode.



FIGUR 15. Scatterplots for målepositionerne fra WT2 mod naboen mod nord.

I FIGUR 15 ses øverst de samme data som i FIGUR 14 som $L_{Aeq10min}$, dog afbilledet i forhold til vindhastighed i stedet for tid. For målingerne i WT2 P1 ses det karakteristiske mønster for en pitch-reguleret mølle. Støjen ses at være stigende fra møllen starter og indtil omkring 7 m/s, herefter stabiliseres støjen niveaumæssigt. For målingerne i WT2 P2 ses samme tendens dog med et lavere niveau grundet den større afstand til møllen. For målingerne i WT2 P3 ses det, at $L_{Aeq10min}$ ligger i stort set samme niveau uanset vindhastighed. For $L_{A9010min}$ (nederst i figuren) ses dog, at den samme tendens fra P1 og P2 kan ses i P3. Det skyldes til dels den øgede støj fra møllen, dels også den øgede støj fra vegetationen i nabo-punktet. Af plottene ses også, at vinden i hele perioden er sidevind i forhold til målepunktet. Der er en enkelt outlier i totalstøjen ved ca. 6,5 m/s (nederste kurver). Denne skyldes, at målingen dækker en 10-minutters periode, hvori møllen både har kørt og stået stille.



FIGUR 16. Scatterplot for målepositionerne fra WT2 mod naboen mod nord.

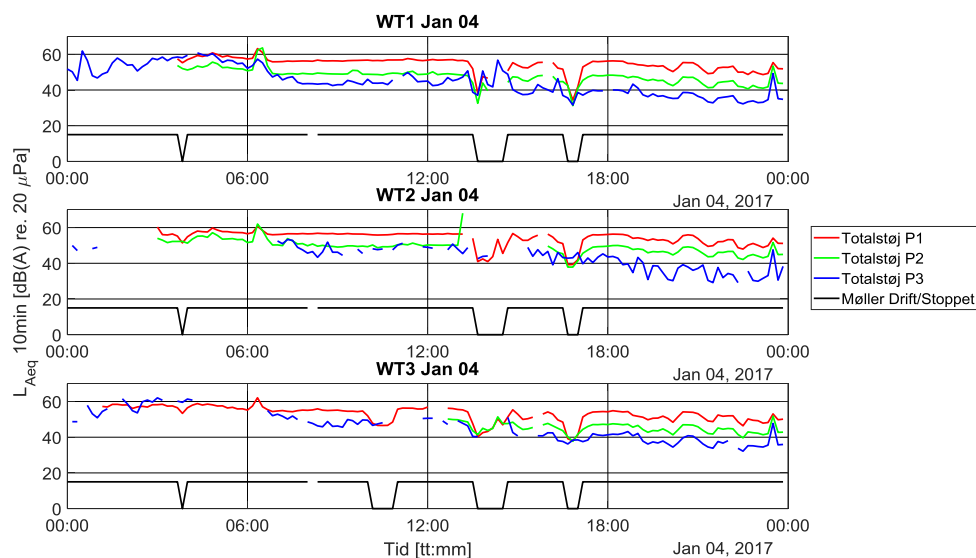
I FIGUR 16 ses $L_{Aeq1min}$ i forhold til vindhastigheden for de 3 punkter i retning mod naboen i nord. Det ses, at tæt på møllen, i P1, er der et klart mønster for en pitchreguleret mølle [17], hvilket aftager ud mod P2; Tendensen ses dog stadig. Det ses også, at baggrundsstøjniveauet generelt er lavere end møllestøjen i P1 og P2. For målingerne foretaget i naboafstand ses, at støjen fra møllen ikke som for de 2 øverste kurver danner et tydeligt mønster. Størstedelen af de "høje" støjniveauer målt under 5 m/s skyldes bilpassager og anden forstyrrende støj. Endvidere ses, at baggrundsstøjniveauet i P3, når møllerne er standset, ligger nogenlunde på niveau med totalstøjen (når møllerne er i drift). For højere vindhastigheder ses, at variationen af støjniveauet mindskes, hvilket skyldes at møllestøjen stabiliseres, samtidig med at vegetationsstøjen stiger.

10.2 Flerdagesmålekampagne

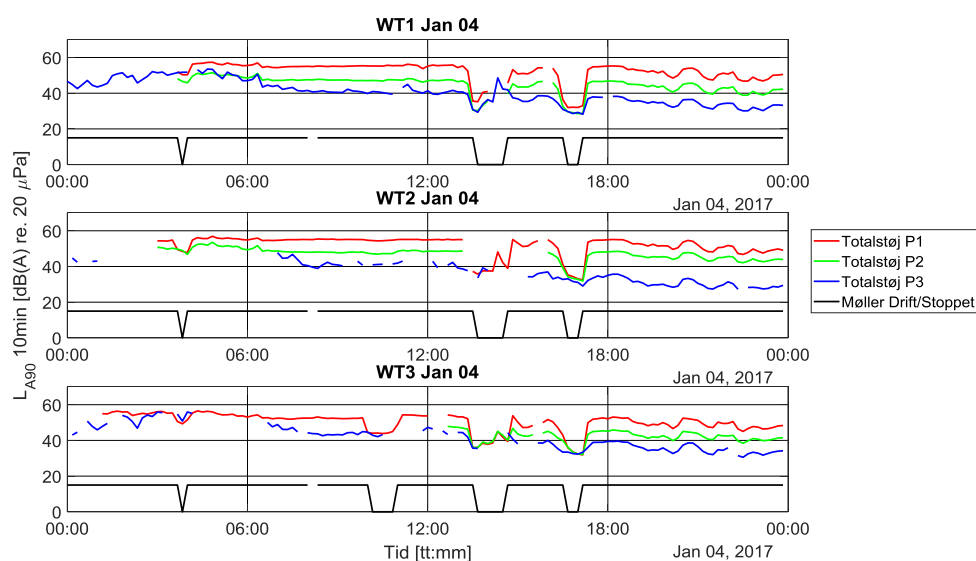
Flerdagesmålekampagnen er foretaget i perioden fra den 3.-6. januar 2017. Der er målt i alt 9 udendørspunkter, tre på en linje fra hver mølle og ud mod den tilhørende nabo, se FIGUR 8. De 9 punkter har været uændrede over hele perioden. Kampagnen har ikke været overvåget i hele perioden, men i størstedelen af måleperioden har mindst en måleteknik været tilstede i området.

I FIGUR 17 og FIGUR 18 ses hhv. $L_{Aeq10min}$ samt $L_{A9010min}$ for de 3 møller med tilhørende målepunkter fra det første hele måledøgn den 4. januar 2017. Det gælder, at for målepunkterne P1 og P2 er det +6dB målinger på plader på terræn foretaget jvf. BEK 1736. Målingerne i P3 er udført i 1,5 meters højde over terræn. Der er i plottene ikke korrigeret for refleksion fra pladen og heller ikke korrigeret for baggrundsstøj. For målingerne foretaget den 4. januar har der i den første periode af målingen været en høj vindhastighed. Det ses derfor, at støjen i størstedelen af perioden ligger meget stabilt i P1 og P2 for alle 3 møller. Sidst på døgnet er vinden aftagende, hvilket betyder, at støjniveauet fra møllen falder, hvilket også ses. For perioder med møllestop ses, at hvis niveauerne målt i P1 og P2 korrigeres til frit felt (ved at fratrække 6 dB), så falder niveauer i P1 og P2 til niveauer, der ligger under niveauerne i P3. Det ses dog specielt i FIGUR 18 ved møllestoppet lige inden kl. 18, at støjen målt i naboafstand (P3) følger målingerne i P1 og P2, hvilket viser, at møllen påvirker det generelle støjniveau i naboafstand.

Der er perioder i begge plots, hvor støjen i nabopunktet P3 ikke er vist. Det skyldes den høje vindhastighed, hvilket har induceret støj i mikrofonen, således at den er overstyret. Det har specielt været et problem for WT2 P3 og WT3 P3, hvor der er målt i 1,5 m højde og ikke på en plade på terræn (hvor vindhastigheden i princippet er 0) som for P1 og P2. For WT1 P3 ses, at det især er under kraftig vind i starten af døgnet, at støjniveauet er højt. Det skyldes den høje vegetation, der er rundt om haven. Vegetationen omkring WT1 P3 har givet læ for målemikrofonen, og der er således kun få perioder, hvor der har været overstyring af mikrofonen. Det ses, at niveauet målt i WT1 P3 i starten af døgnet til tider overstiger niveauerne målt tæt på møllen (P1 og P2) på grund af vegetationen.



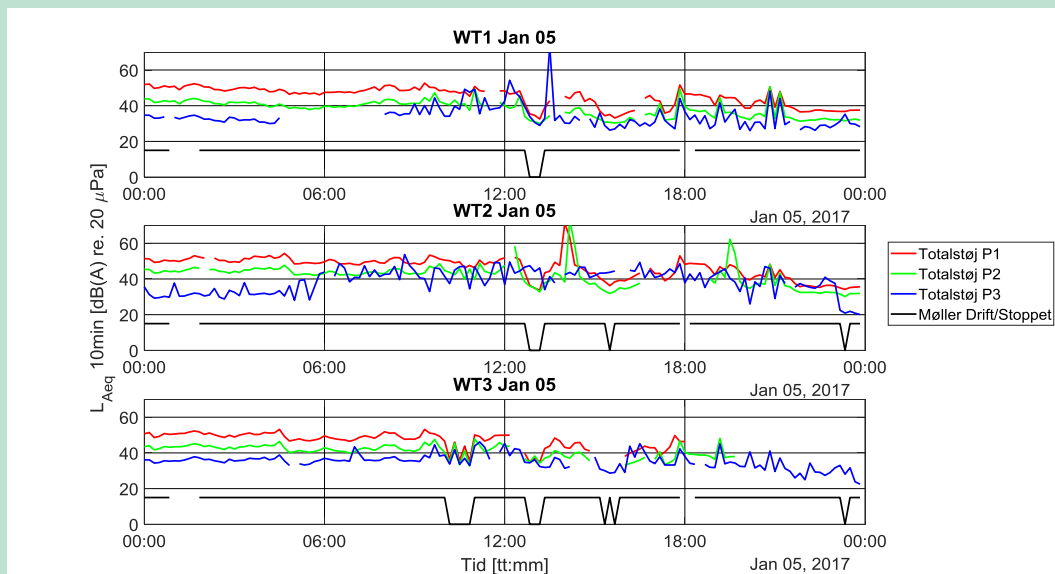
FIGUR 17. $L_{Aeq10min}$ for målingerne udført den 4. januar 2017 viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.



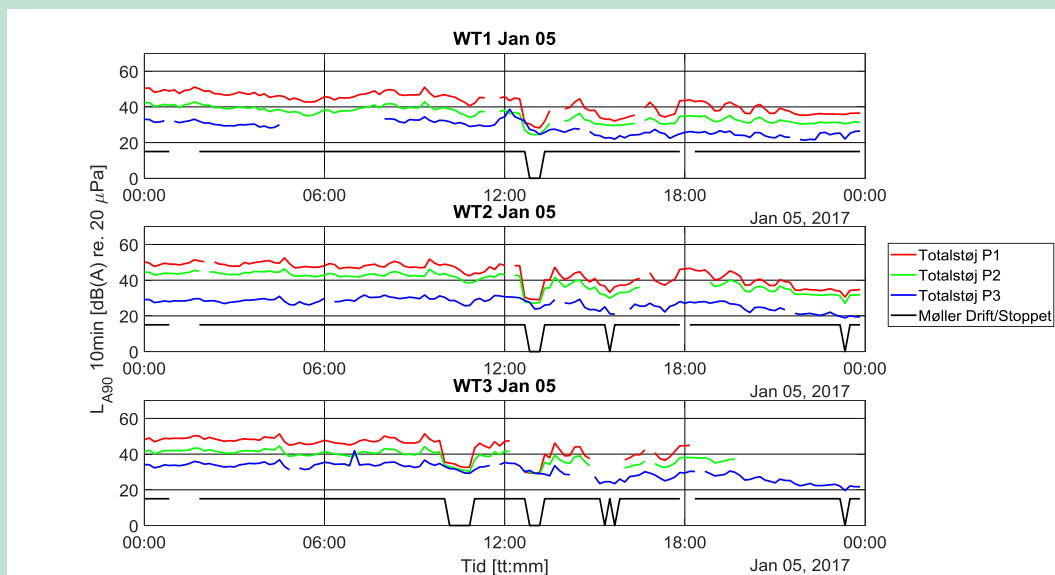
FIGUR 18. $L_{A9010min}$ for målingerne udført den 4. januar 2017 viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 19 og FIGUR 20 ses tilsvarende plots for målingerne foretaget over døgnet den 5. januar 2017. Vindhastigheden i løbet af den 5. januar er generelt under eller omkring 5 m/s i 10 m højde. Det resulterer i et lavere støjniveau fra møllen og et lavere støjniveau fra vegetationen. Det ses af plottene, at det generelle niveau målt tæt på møllerne (P1 og P2) er lavere end de samme værdier målt den 4. januar. For målingerne i FIGUR 19 ses høje, kortvarige niveauer. Disse skyldes, at der under målingen har været foretaget kontrol af kalibreringen.

Fra midnat til midnat ses en faldende tendens i støjniveauet, hvilket skyldes, at vindhastigheden er generelt aftagende over døgnet. Igen ses at støjen målt i naboafstand følger støjen målt i P1 og P2 under møllestop, om end det ses i mindre grad grundet det generelt lavere støjniveau fordi vindhastigheden er lavere.



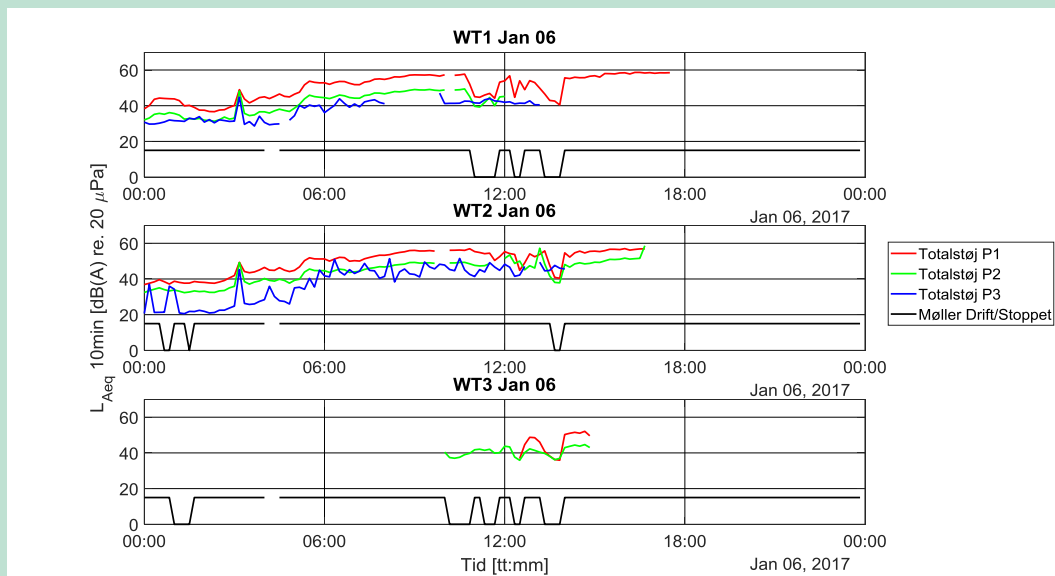
FIGUR 19. $L_{Aeq10min}$ for målingerne udført den 5. januar 2017 viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.



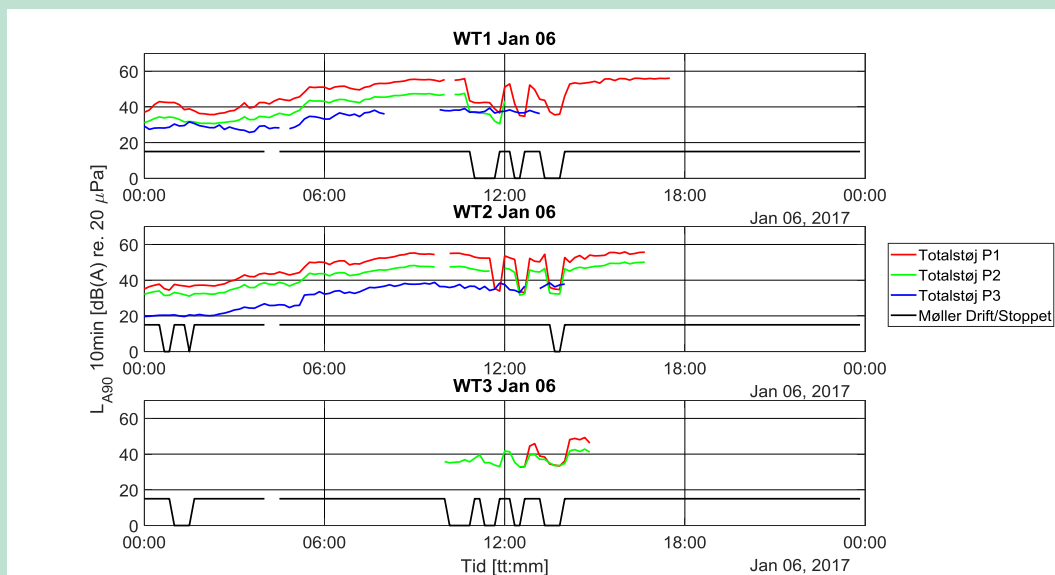
FIGUR 20. $L_{A9010min}$ for målingerne udført den 5. januar 2017, viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 21 og FIGUR 22 ses støjdata for den sidste måledag den 6. januar 2017. Vindhastigheden er stigende gennem hele dagen, hvilket også ses på støjniveauerne. For WT3 har der været et større udfald, der gør, at data ikke er tilgængeligt for hele perioden.

Tendenserne fra de foregående dage ses gentaget, nemlig at støjen målt i naboafstand (P3) følger niveauet målt i P1 og P2. Det bør igen bemærkes, at med den stigende vindhastighed stiger støjniveauet i P3 og overgår i perioder støjniveauet målt i P2.



FIGUR 21. $L_{Aeq10min}$ for målingerne udført den 6. januar 2017 viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

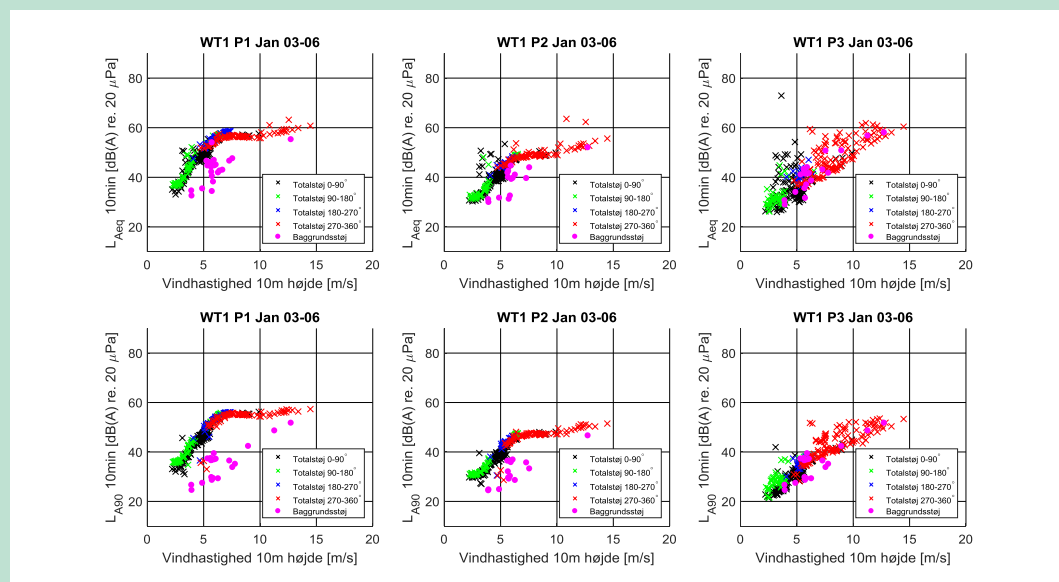


FIGUR 22. $L_{A9010min}$ for målingerne udført den 6. januar 2017, viser totalstøjen uden korrektion for baggrundsstøj for de enkelte målepunkter for hver mølle. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

For hver enkelt mølle og position er støjniveauet i punktet i forhold til vindhastigheden undersøgt. Støjniveauet er undersøgt i tre forskellige midlinger hhv. $L_{Aeq10min}$, $L_{A9010min}$ og $L_{Aeq1min}$. I FIGUR 23 ses $L_{Aeq10min}$ og $L_{A9010min}$ for WT1 i alle tre tilhørende målepunkter. Som i det foregående gælder, at målingerne i P1 og P2 er +6dB-målinger jf. BEK 1736, hvorimod målingerne i P3 er foretaget i 1,5 m højde og skal således ikke korrigeres. I plottene er der ikke korrigeret for pladens refleksion i P1 og P2.

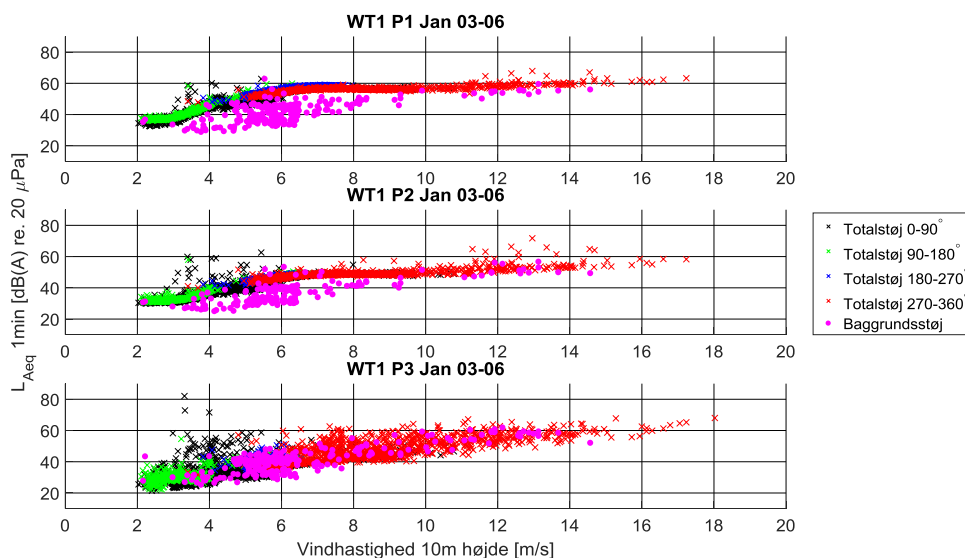
I P1 ses et klart mønster svarende til en pitch-reguleret mølle [15], hvor baggrundsstøjniveauet generelt er mere end 5-10 dB under niveauet af totalstøjen. I P2 ses stadig et tydeligt mønster, omend baggrundsstøjniveauet ligger tættere på niveauet af totalstøjen.

Støjen er delt op i 4 "retninger". Rød indikerer, at vinden blæser fra vindmøllen mod naboen (medvind). Grøn indikerer, at vinden blæser fra naboen mod vindmøllen. Sort og blå indikerer sidevind i forhold til en linje mellem nabo og vindmølle. Der ses ikke umiddelbart nogen signifikant forskel på resultaterne som funktion af vindretningen. I perioden, hvor målingerne har været foretaget, har der dog heller ikke været en ligelig fordeling af vindretningerne under de målte vindhastigheder (ca. 3-15 m/s), hvilket gør det vanskeligt direkte at undersøge støjbidraget som funktion af vindretningen. For støjen målt i P3 ses ikke det sædvanlige mønster fra en pitch-reguleret mølle, som hvis der måles i en totalhøjdes afstand (svarende til P1). Der forekommer nærmere en lineær tendens, hvor støjen stiger med vindhastigheden. Det ses også, at baggrundsstøjen i P3 ligger på niveau med totalstøjen, hvilket indikerer, at den målte støj i høj grad er influeret af blandt andet vegetationen omkring målepunktet.



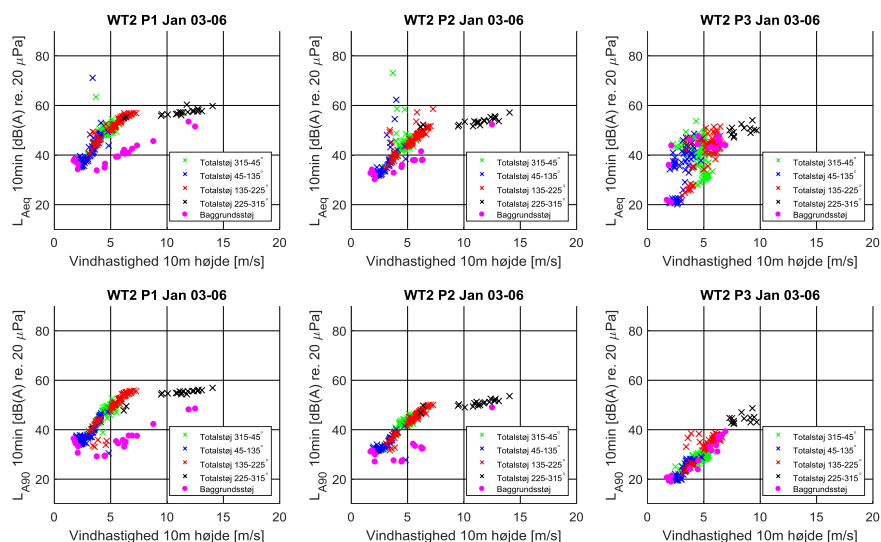
FIGUR 23. $L_{Aeq10min}$ og $L_{A9010min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar på WT1 viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 24 ses $L_{Aeq1min}$ i de 3 punkter tilhørende WT1. Det ses som i FIGUR 23, at der i punkterne tæt på møllen P1 og P2 er et tydeligt mønster fra en pitch-reguleret mølle. Det ses også, at ved høje vindhastigheder er der en stigende tendens i niveauet af totalstøjen. Dette kan forklares med, at baggrundsstøjen ligeledes er stigende med øget vindhastighed, og derfor selv i P1 (der ligger på en plade på terræn) niveaumæssigt ligger tæt på den målte totalstøj. For målingerne foretaget i naboafstand P3 ses det igen, at niveauerne for både totalstøjen og baggrundsstøjen ikke er klart adskilte, og at en lineær tendens er fremtrædende. Støjen er præget af vegetationsstøj, og det ses, at niveauet i P3 overstiger niveauet i P1 og P2 ved høje vindhastigheder.



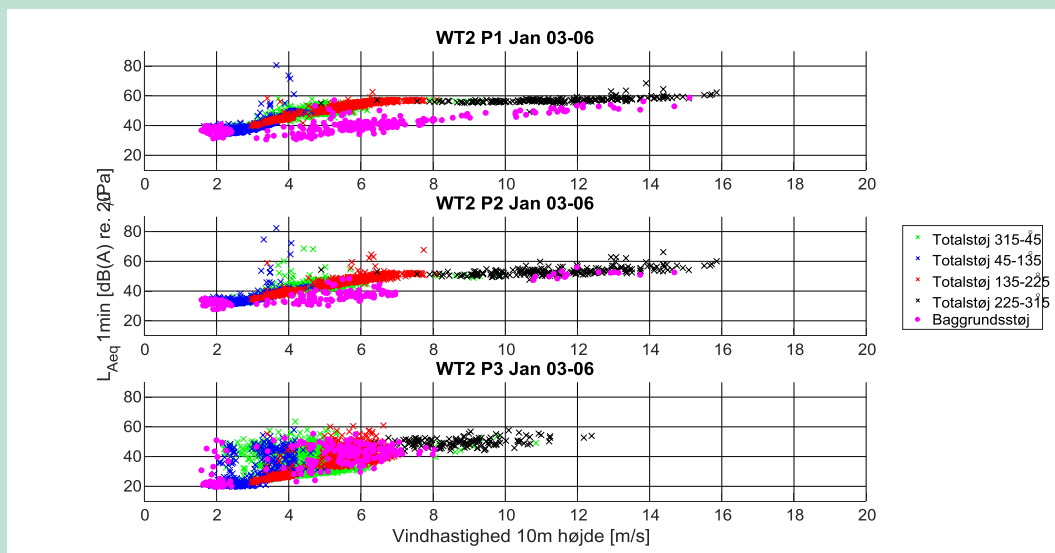
FIGUR 24. $L_{Aeq1min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar 2017 på WT1 viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Baggrundsstøj er indikeret ved lilla. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 25 ses tilsvarende plots for de tre punkter omkring WT2. Som i det foregående ses der ved punkterne tæt ved møllen (P1 og P2) mønstret fra en pitch-reguleret mølle. For målingerne i P3 ses det, at specielt for $L_{Aeq10min}$ er der stor variation i støjen, hvilket skyldes en del bilpassager. Når målingerne analyseres som $L_{A9010min}$ ses der igen en lineær tendens i støjen. Ligeledes ses det, at baggrundsstøjniveauet i P3 hos naboen ligger på niveau med totalstøjen.



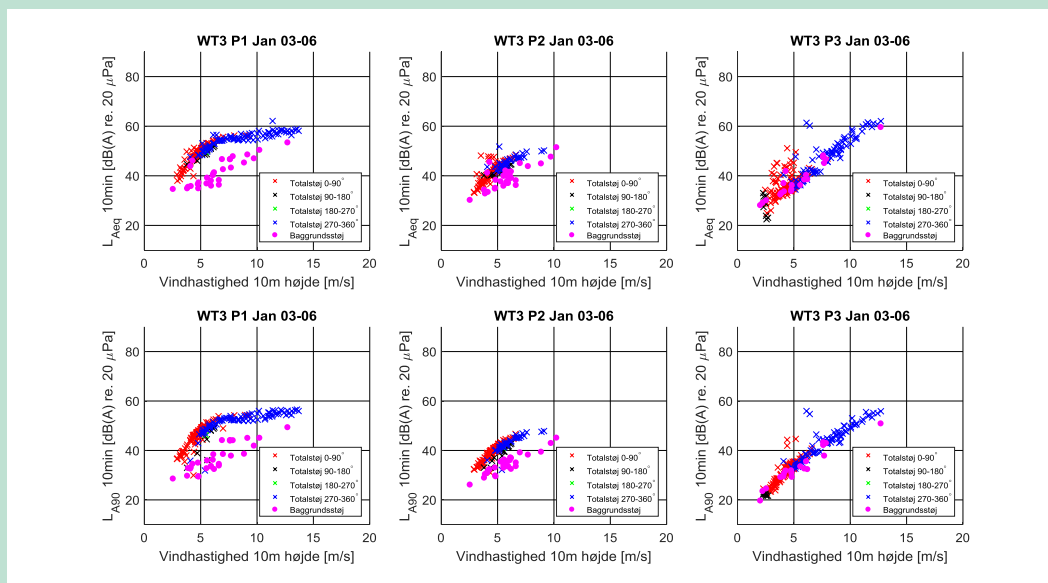
FIGUR 25. $L_{Aeq10min}$ og $L_{A9010min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar 2017 på WT2 viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Baggrundsstøj er indikeret ved lilla. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 26 ses $L_{Aeq1min}$ for de tre punkter ved WT2. Der ses samme tendens som ved WT1 dog præget af, at der er flere bilpassager i nærheden af punkterne. Det ses igen, at totalstøjen er stigende ved højere vindhastigheder og ligeså er baggrundsstøjen, hvilket medfører, at totalstøjen bliver højere. Målingerne i P3 er præget af bilpassager, hvilket gør målingerne svære at tolke. Det ses dog, at der er et svagt stigende niveau, hvorom støjen ved høje vindhastigheder stabiliseres.



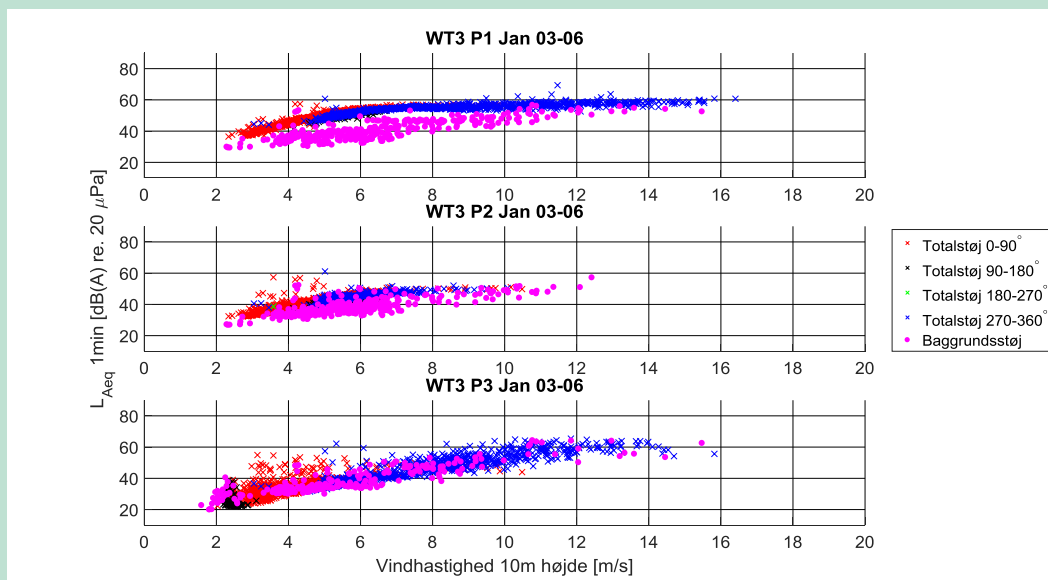
FIGUR 26. $L_{Aeq1min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar 2017 på WT2, viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Baggrundsstøj er indikeret ved lilla. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrigeret med -6 dB.

I FIGUR 27 ses scatterplottet for punkterne tilhørende WT3. Igen ses mønstret fra en pitch-reguleret mølle tydeligt i punkterne P1 og P2, mens der ses en lineær tendens for P3. Specielt for høje vindhastigheder er støjen målt i P3 høj. Det skyldes, at der ved målepunktet var mange høje træer, hvilket gav et højt niveau af vegetationsstøj.



FIGUR 27. $L_{Aeq10min}$ og $L_{A9010min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar 2017 på WT2 viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Baggrundsstøj er indikeret ved lilla. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korregeret med -6 dB.

I FIGUR 28 ses $L_{Aeq1min}$ for punkterne ved WT3. Her gælder samme tendens som ved de 2 andre møller. Jo længere væk fra møllen desto større indflydelse/påvirkning har vegetationen, specielt her med de meget høje træer. Det ses også i P3, at baggrundsstøjen til tider ligger over totalstøjen.

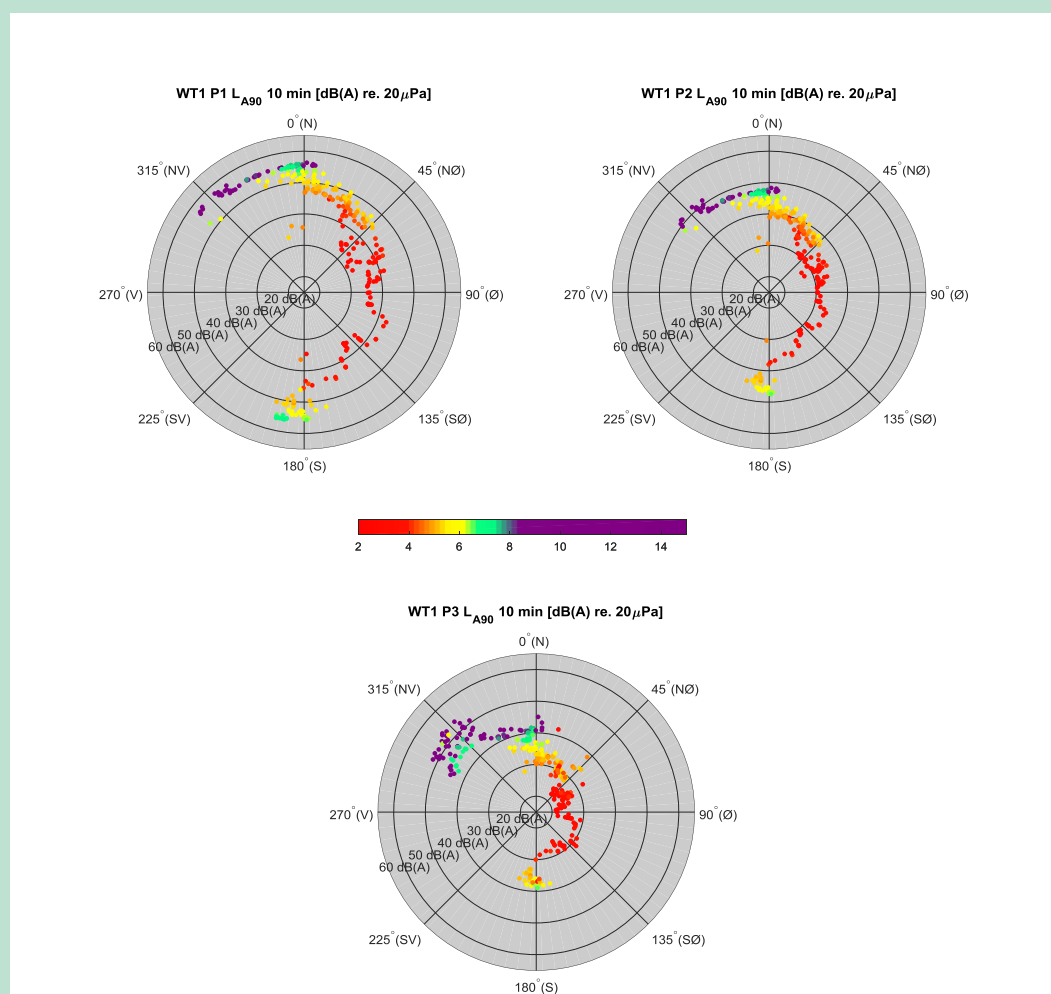


FIGUR 28. $L_{Aeq1min}$ scatterplots for målingerne udført den 3.-6. januar 2017 på WT3 viser totalstøjen opdelt i 45° interval uden korrektion for baggrundsstøj. Rød indikerer medvind mod naboen, grøn indikerer modvind og hhv. sort og blå sidevind. Baggrundsstøj er indikeret ved lilla. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korregeret med -6 dB.

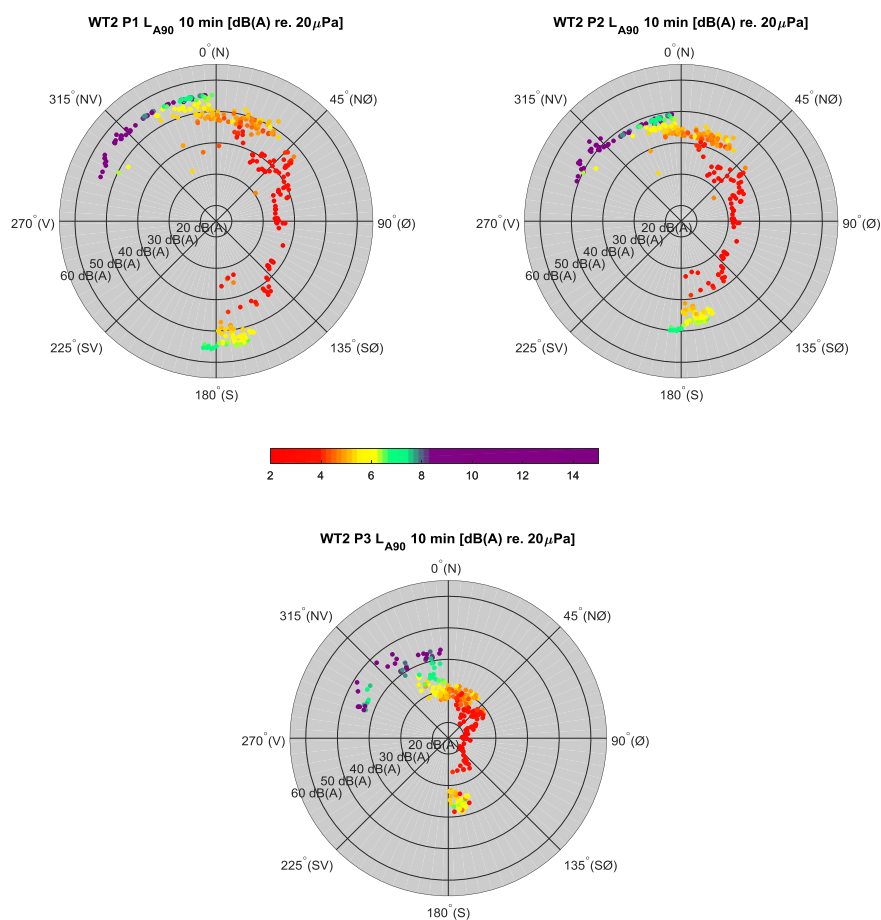
I FIGUR 29, FIGUR 30 og FIGUR 31 er støjniveauet målt i P1, P2 og P3 angivet som $L_{A9010min}$ vist i forhold til vindretning og vindhastighed. Under målingerne var alle 3 møller i drift. Vindretningen er angivet i grader og henviser til, hvor det har blæst fra, f.eks. betyder 315° , at det har blæst fra nordvest. Retningen er afstemt efter, at nord er kompasnord (0°) og er ikke normaliseret i forhold til den enkelte nabo. Medvind mod de enkelte naboer fra den tilhørende vindmølle er henholdsvis: nabo mod sydøst, medvind fra WT1 er 324° ; nabo mod nord, medvind fra WT2 er 180° ; nabo mod sydvest, medvind fra WT3 er 62° . Vindhastigheden angivet i figurene er for 10 m højde.

Under målingen har der for mange af målepunkterne ikke været sammenlignelige målinger i diametralt modsatte retninger. Dette gør det svært at vurdere, hvor stor indflydelse vindretningen har på støjniveauet, der kan måles hos naboerne. Dog ses det i FIGUR 30, at der er en forskel i støjen i alle tre punkter afhængigt af, om der har været direkte modvind eller medvind mod målepunktet. Forskellen ses tydeligst for P3, hvor støjen i medvind (180°) ved 4-6 m/s er sammenlignelig med støjen i modvind (0°) ved 7-8 m/s.

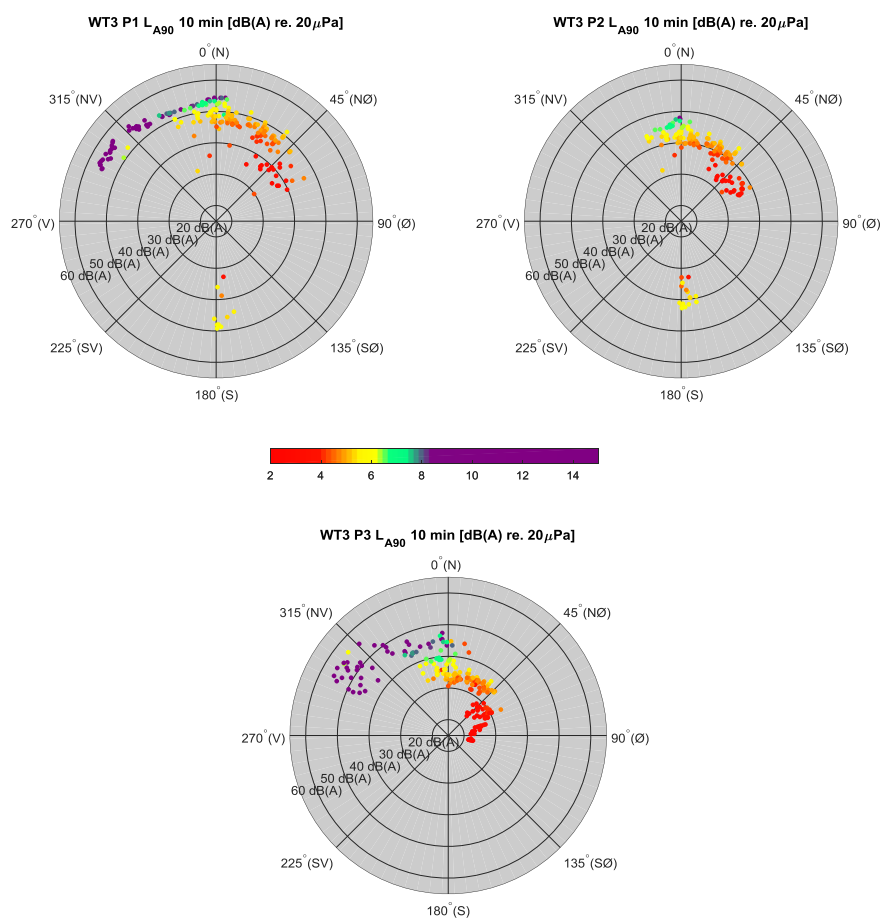
Tendensen at støjniveauet i P3 er kraftigere end i P2 ved højere vindhastigheder ses også bekræftet i FIGUR 29 til FIGUR 31. Der skal igen her tages hensyn til, at målingerne foretaget i P1 og P2 er +6 dB-målinger, hvilket der ikke er korigeret for. Målingerne foretaget i P3 er udført i 1,5 m højde.



FIGUR 29. Polarplot af $L_{A9010min}$ i forhold til vindretning og vindhastighed for WT1. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korigeret med -6 dB. Medvind fra WT1 mod P1, P2 og P3 er 324° .



FIGUR 30. Polarplot af $L_{A90,10\text{min}}$ i forhold til vindretning og vindhastighed for WT2. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korregeret med -6 dB. Medvind fra WT2 mod P1, P2 og P3 er 180°.



FIGUR 31. Polarplot af $L_{A90 10 \text{ min}}$ i forhold til vindretning og vindhastighed for WT3. Målingerne i P1 og P2, der er placeret på en plade på terræn, er ikke korrejeret med -6 dB. Medvind fra WT1 mod P1, P2 og P3 er 62°.

10.3 Opsummering langtidsmålinger

For langtidsmålingerne er der udført analyser, der viser hhv. $L_{Aeq10\text{ minutter}}$, $L_{Aeq1\text{ minut}}$ samt $L_{A90\ 10\text{ minutter}}$ for hvert enkelt døgn. Der er ligeledes fremstillet scatterplots, der viser støjen i forhold til vindhastighed. Der er desuden anført polare plots til at vise støjniveauet i forhold til vindretning og -hastighed. Alle analyserne er udført for hver vindmølle (WT1, WT2 og WT3) i hvert enkelt målepunkt P1 (ca. 140 m fra vindmøllen), P2 (ca. 500 m fra vindmøllen) og P3 (ved naboen). Det generelle billede er, at der for målingerne tæt på møllen (P1- og til en vis grad P2-punkterne) ses en klar sammenhæng mellem målt støjniveau og vindhastighed. Og der ses et tydeligt mønster af en pitch-reguleret mølle, dvs. en lineær stigning i det A-vægtede totale støjniveau til ca. 7-8 m/s, derefter et nogenlunde konstant A-vægtet støjbidrag fra vindmøllen, se fx FIGUR 23. For målingerne foretaget i naboafstand (P3-punkterne) er der for alle målingerne en lineær tendens, hvilket indikerer, at det A-vægtede totale støjniveau i naboafstand mere er bestemt af støjen genereret af vinden i den nærliggende vegetation end af støjen fra vindmøllerne. Desuden ses det, at støjniveauet i P3 ved nogle vindhastigheder er kraftigere end støjen målt tættere på møllen fx i P2-punkterne. I P3-punkterne ses desuden, at baggrundsstøjniveauet med møllerne stoppet er sammenligneligt med totalstøjen (med møllerne kørende), hvilket ligeledes indikerer, at støjen målt i P3 er influeret af den vegetationsstøj, der er ved målepunktet. Denne tendens bekræftes også af de polare plots. Ud fra målingerne er der ikke noget der indikerer, at andre vindretninger end medvind fra vindmølle til nabo skulle resultere i højere støjbidrag end det støjbidrag, der kan måles under medvind mod naboen. Det skal dog bemærkes, at et bredt vindhastighedsinterval (eksempelvis 3-15 m/s) ikke er repræsenteret ved alle vindretninger (ideelt hele kompasset rundt i 20°-spring).

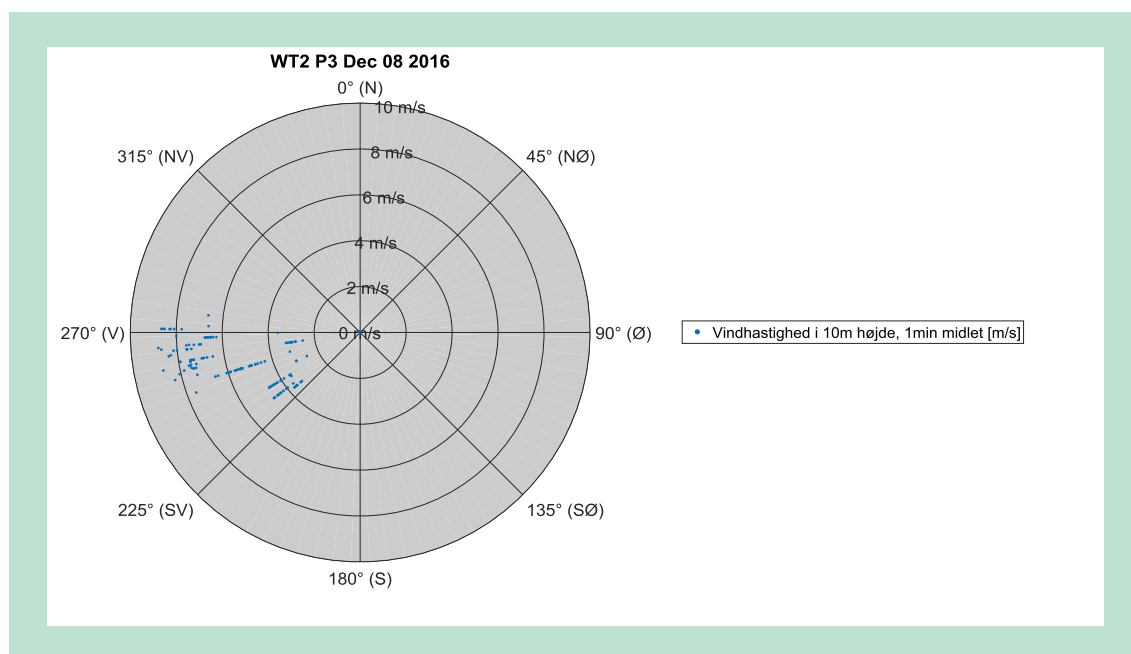
Alle målingerne indikerer, at der er en generel tendens til, at støjemissionen fra vindmøllen stiger med vindhastigheden indtil ca. 7-8 m/s, hvorefter denne stabiliserer sig nogenlunde. Dette er i overensstemmelse med tidligere undersøgelser, se fx reference [15]. Der er altså ikke nogen vindhastigheder, hvor støjen fra møllerne pludseligt afviger fra dette generelle forløb.

11. Korttidsanalyse

Dele af målekampagnen er foretaget under øget observation, og i efterbehandlingen af målingerne er eksterne forstyrrelser fx bilpassager, flypassager, traktorer og ekstraordinær støj fra vegetation eller vindstøj i mikrofonen sorteret fra. Sorteringen er foregået ved analyse af 1/3-oktavspektre, hvor outliers, der skiller sig tydeligt ud fra vindmøllestøjen, er sorteret fra. Formålet er at sammenligne målinger af både den almindelige støj (50-10.000 Hz) og lavfrekvent støj med beregninger i henhold til Nord2000 [6] eller den danske bekendtgørelse BEK1736 [1]. Alle beregninger af vindmøllernes støjbidrag er foretaget med udgangspunkt i de kildestyrker, der blev beregnet i forbindelse med kontrolmålingerne i 2013 [7].

11.1 Endagsmålekampagne

Vindretningen under endagsmålekampagnen var fra V-SV. Der var altså ingen af naboerne under endagsmålekampagnen, som lå indenfor medvindsretningen $\pm 45^\circ$. Vindhastigheden under endagsmålingen dækkede et stort spænd fra under 3 m/s, hvor vindmøllerne stod helt stille, til 9 m/s, hvor vindmøllerne producerede med fuld effekt. På FIGUR 32 er vist et polarplot, hvoraf vindretning og vindhastighed under målingen den 8. december 2016 kan aflæses.



FIGUR 32. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under endagsmålingen den 8. december 2016.

Under endagsmålingen blev der i en periode foretaget simultane udendørs- og indendørsmålinger hos naboen WT2 P3. Selvom vindretningen ikke er indenfor $\pm 45^\circ$ mod nabo WT2 P3, er målingerne sammenlignet med beregninger efter BEK 1736.

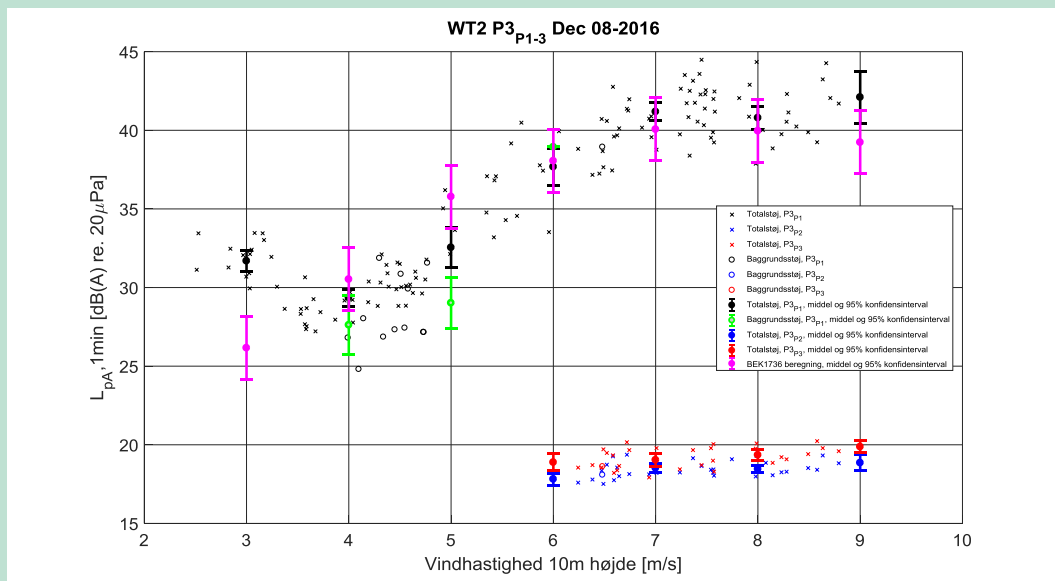
Resultatet for den almindelige støj (50 til 10.000 Hz) ses på FIGUR 33. Målingen for udendørspositionen ved WT2 P3 er plottet for perioden 12:02:00 til 18:26:00, hvorimod den simultane måling indendørs blot varede fra 12:02:00 til 13:08:00.

Positionerne er benævnt:

Udendørs position: P3_{P1}

Indendørs position i hjørne til venstre for vinduet: P3_{P2}

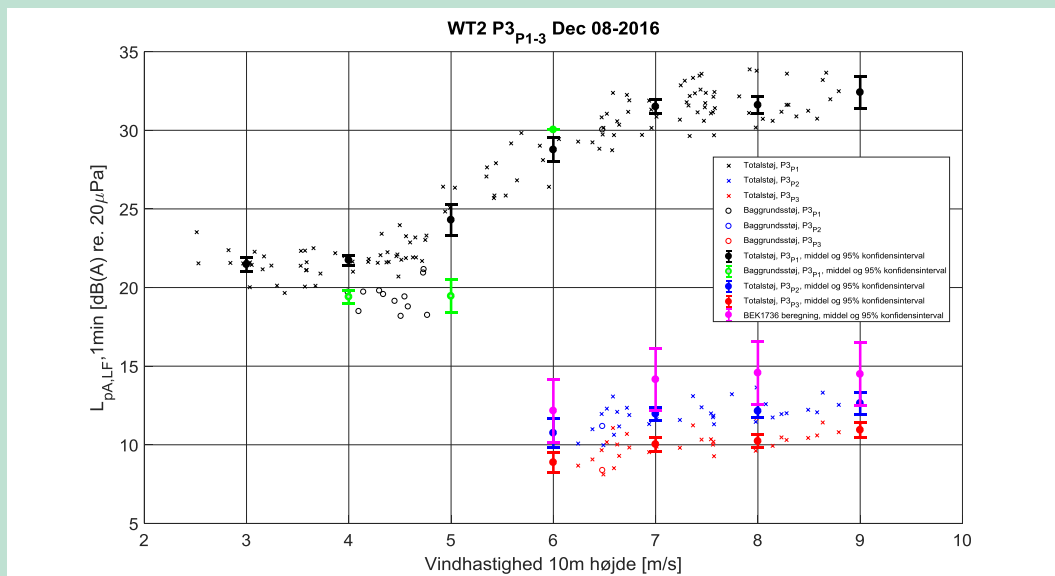
Indendørs position foran vindue der vender mod møllerne: P3_{P3}.



FIGUR 33. Scatterplot der viser lydtrykniveauet $L_{pA,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med midelværdi og 95 % konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. BEK 1736.

Det kan ses af scatterplottet, at støjen udendørs ($P3_{P1}$) stiger med vindhastigheden op til ca. 7 m/s, hvorefter den flader ud ved 8 m/s. Den stiger lidt igen ved 9 m/s, men usikkerheden på dette resultat er større pga. få målinger ved denne hastighed. Tendensen følger altså, hvad der er vist i rapporten om vindmøllestøj ved forskellige vindhastigheder [15]. Middelværdien af målingerne ligger desuden under 44 dB ved 8 m/s og under 42 dB ved 6 m/s, som er grænsen ifølge BEK 1736. Generelt ser det ud til, at der er god overensstemmelse mellem beregningerne udført i henhold til BEK 1736 med en ubestemthed på ± 2 dB og målingerne. På trods af at det er en forholdsvis kort periode, der er målt baggrundsstøj under, og vindhastigheden har været forholdsvis lav, så viser tendensen (i støjniveauet som funktion af vindhastigheden), at målingen ikke har været så påvirket af baggrundsstøj, som det ses i andre tilfælde. Dette kan skyldes, at under målingen den 8. december 2016 var alle blade faldet af træer og buske i den omkringliggende vegetation.

På FIGUR 34 ses et scatterplot af det lavfrekvente (10-160 Hz) indendørs og udendørs lydtrykniveau målt hos WT2 P3 under endagsmålingen.



FIGUR 34. Scatterplot der viser lydtrykniveauet $L_{pALF,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95 % konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. BEK 1736.

Tendensen er den samme som der ses for den almindelige støj (50-10.000 Hz) på FIGUR 33: Støjen stiger med vindhastigheden op til 7 m/s, hvorefter den flader ud. Ydermere ses, at det lavfrekvente støjniveau målt indendørs ($P3_{P2}$ og $P3_{P3}$) i henholdsvis en hjørneposition og foran vinduespartiet ligger ca. 7 dB under kravet på 20 dB jf. BEK 1736. Sammenlignet med lavfrekventberegningen efter BEK 1736 ligger beregningerne ca. 2-3 dB over det målte lavfrekvente lydtrykniveau. Det skal bemærkes, at der ikke har været medvindsretning fra vindmøllerne mod WT2 P3, og man må formode, at måleværdierne ville have været højere, hvis det havde været tilfældet.

11.2 Flerdagesmålekampagne

For flerdagesmålekampagnen er der udvalgt 2 perioder til korttidsanalyse. Den ene periode var den 4. januar 2017 og den anden periode den 6. januar 2017. I perioden den 4. januar er der hos to af naboerne (naboen mod henholdsvis nord WT2 P3 og sydvest WT3 P3) udført simultane indendørs- og udendørsmålinger.

Positionerne for disse plots er benævnt (gældende for begge naboer):

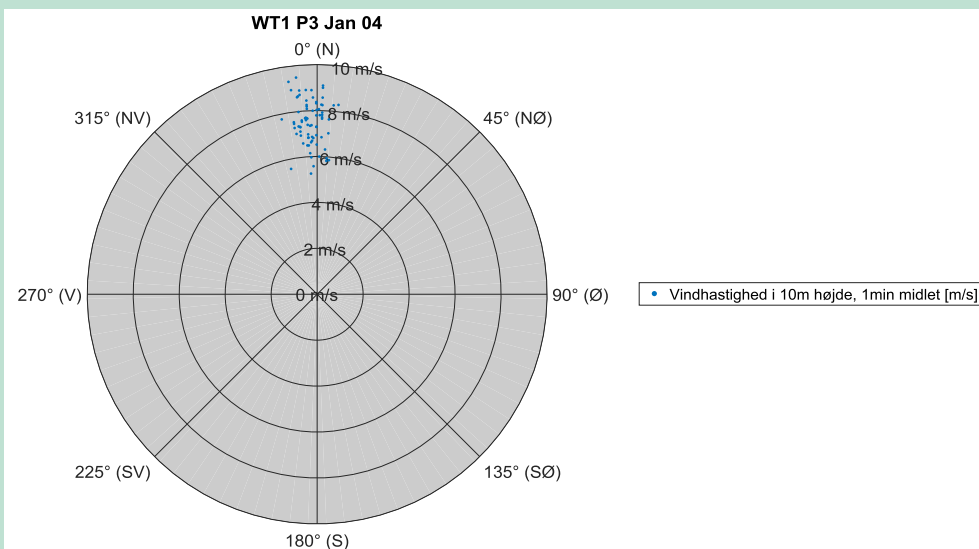
Udendørsposition: $P3_{P1}$

Indendørsposition i hjørne vinduet: $P3_{P2}$

Indendørsposition foran vindue der vender mod møllerne: $P3_{P3}$

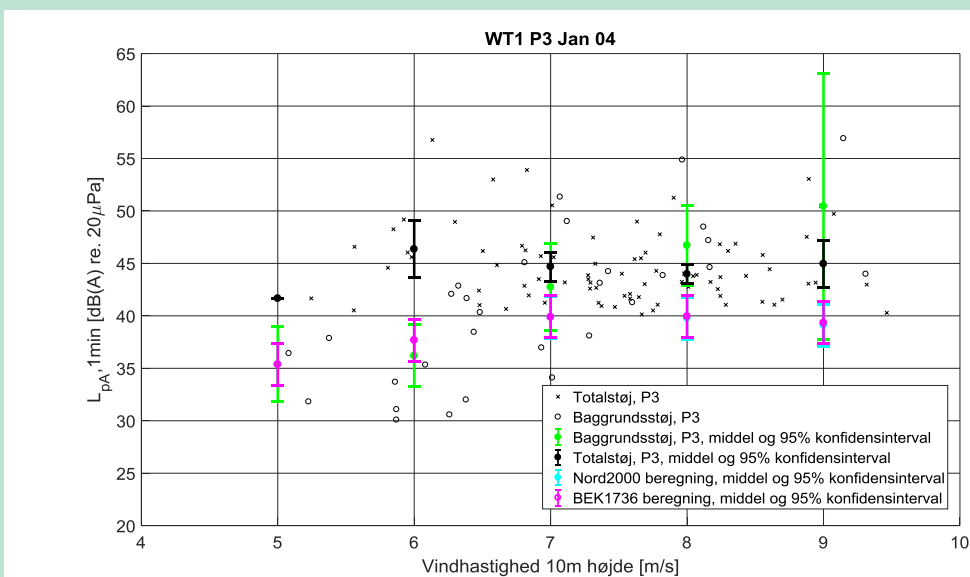
Indendørsposition udvalgt af naboen: $P3_{P4}$.

Vindretningen under flerdagesmålekampagnen var den 4. januar 2017 fra NV-N. Vindretningen er dermed inden for medvindsretning $\pm 45^\circ$ mod nabo WT1 P3, hvormed resultaterne kan sammenlignes med beregninger efter BEK 1736. Vindhastigheden varierede fra 5 m/s til 9 m/s. På FIGUR 35 er vist et polarplot, hvoraf vindretning og vindhastighed under målingen den 4. januar 2017 kan aflæses.



FIGUR 35. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under målingen den 4. januar 2017.

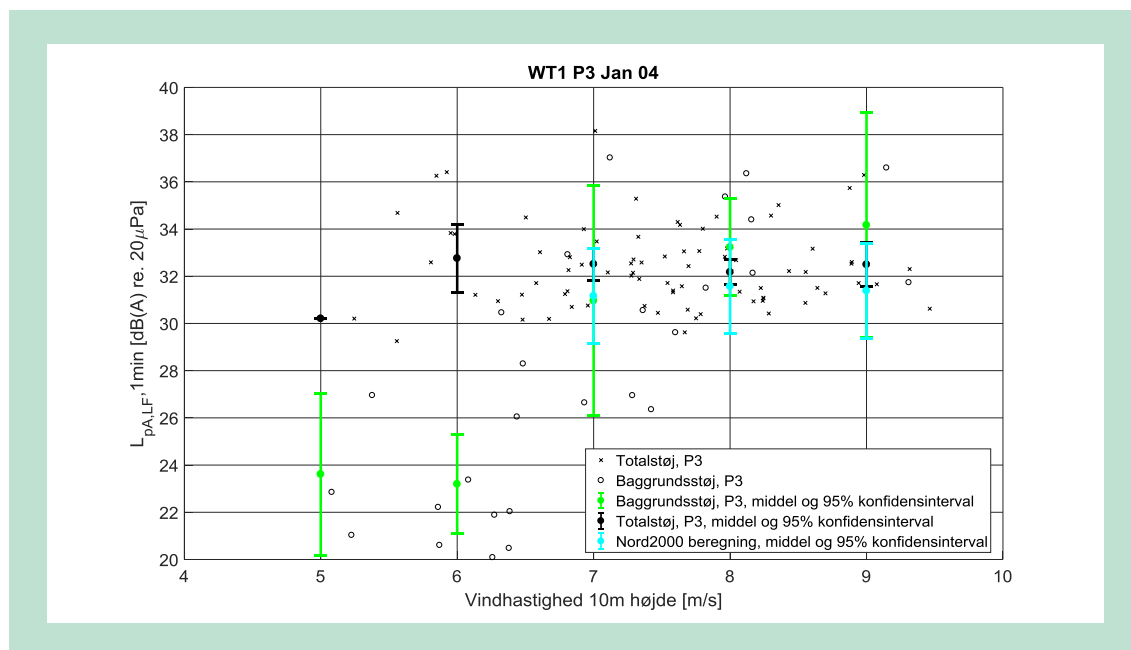
Resultatet for den almindelige støj (50-10.000 Hz) målt den 4. januar hos nabo WT1 P3 ses på FIGUR 36. Målingen er foretaget i tidsrummet kl. 11:50-14:09. Der er ikke foretaget indendørs målinger hos denne nabo i tidsrummet.



FIGUR 36. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95 % konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. BEK 1736 og Nord2000.

Det kan ses af scatterplottet, at den almindelige støj (50-10.000 Hz) målt udendørs (WT1 P3) ikke afviger væsentligt fra baggrundsstøjen. Støjen ved 6 m/s afviger fra normalen ved at være højere end støjen ved 7-9 m/s. Det kan dog ses af målinger tættere på møllen, at støjemissionen fra møllen ikke er kraftigere ved 6 m/s end ved 7-9 m/s. Det øgede støjniveau formodes derfor at være på grund af vegetationsstøj i området. Vegetationsstøj er bredspektret, og et øget støjniveau forårsaget af vegetationsstøj kan derfor gøre det svært at skelne fra den almindelige støj i sorteringen af korttidsanalysen. Dette er verificeret ved gennemlytning af målingerne.

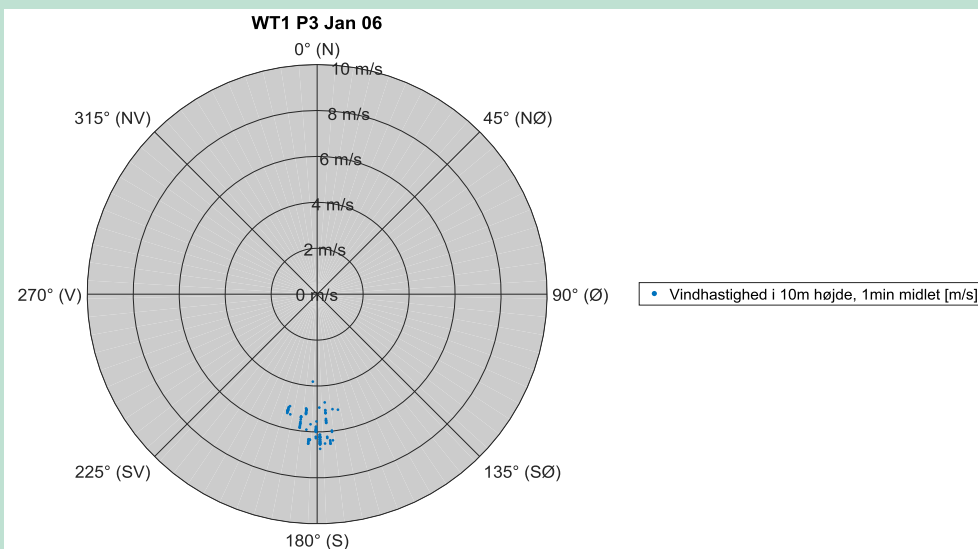
De målte værdier ligger for vindhastighederne 7-9 m/s ca. 3 dB over de beregnede (hhv. BEK 1736 og Nord2000), hvilket er forventeligt, når den almindelige støj (50-10.000 Hz) og baggrundsstøj ligger på samme niveau. Støjniveauet ligger over grænserne på 42 dB og 44 dB ved hhv. 6 m/s og 8 m/s, men som nævnt skyldes det baggrundsstøjen i området.



FIGUR 37. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pALF,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. Nord2000.

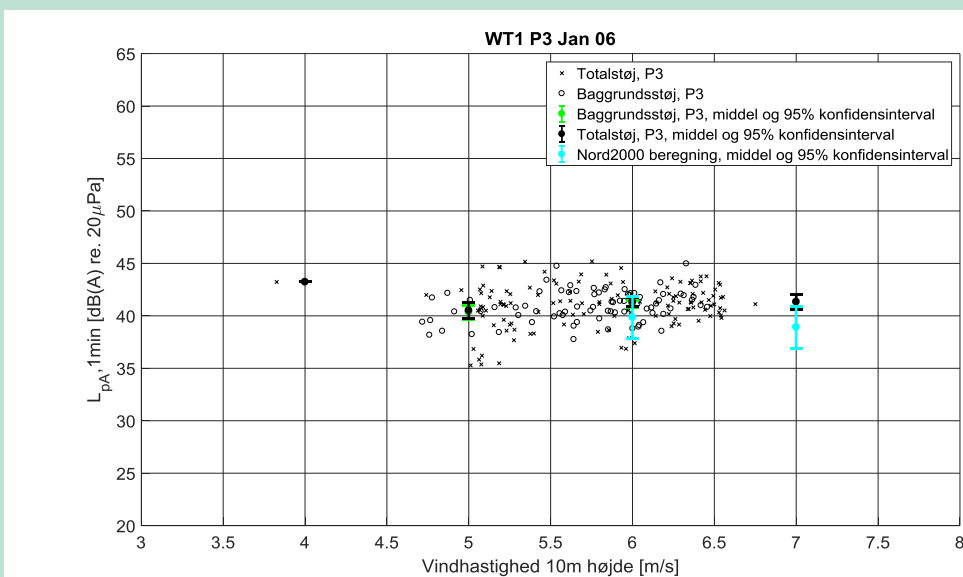
Tendensen set i målingen af den almindelige støj gentager sig for den lavfrekvente støj. På scatterplottet af den lavfrekvente støj på FIGUR 37 ses, at der er bedre overensstemmelse mellem målingerne og beregninger udført efter Nord2000. Der er ikke udført indendørs målinger i punkt WT1 P3 den 4. januar 2017.

Målingen den 6. januar 2017 er udført i modvindsretning i forhold til nabo WT1 P3. På FIGUR 38 kan det ses, at vinden har blæst fra syd med vindhastigheder mellem 5-7 m/s. Derfor er målingerne sammenlignet med Nord2000-beregninger.



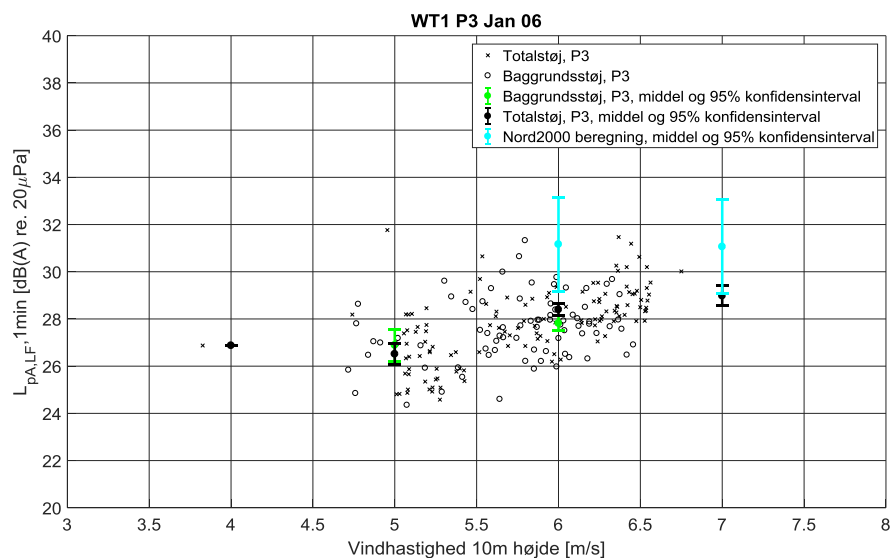
FIGUR 38. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under målingen den 6. januar 2017.

Resultatet for den almindelige støj målt den 6. januar hos nabo WT1 P3 ses på FIGUR 39. Målingen er foretaget i tidsrummet kl. 07:01-12:46. Der er ikke foretaget indendørsmålinger hos denne nabo i tidsrummet.



FIGUR 39. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95 % konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. Nord2000.

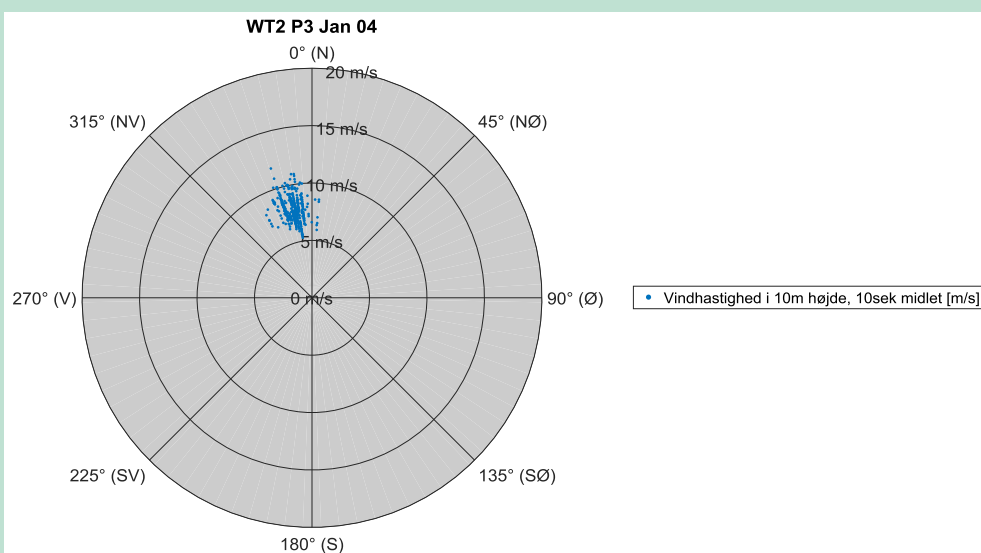
Det kan ses af scatterplottet på FIGUR 39, at den almindelige støj målt udendørs har nogenlunde samme niveauer som baggrundsstøjen. Støjniveauet er omtrent det samme som målt den 4. januar 2017, da målingen er påvirket af baggrundsstøjen fra vegetationen i området. Støjniveauet ved 6 m/s ligger på 42 dB, men er igen i høj grad påvirket af baggrundsstøjen i området.



FIGUR 40. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pALF,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. Nord2000.

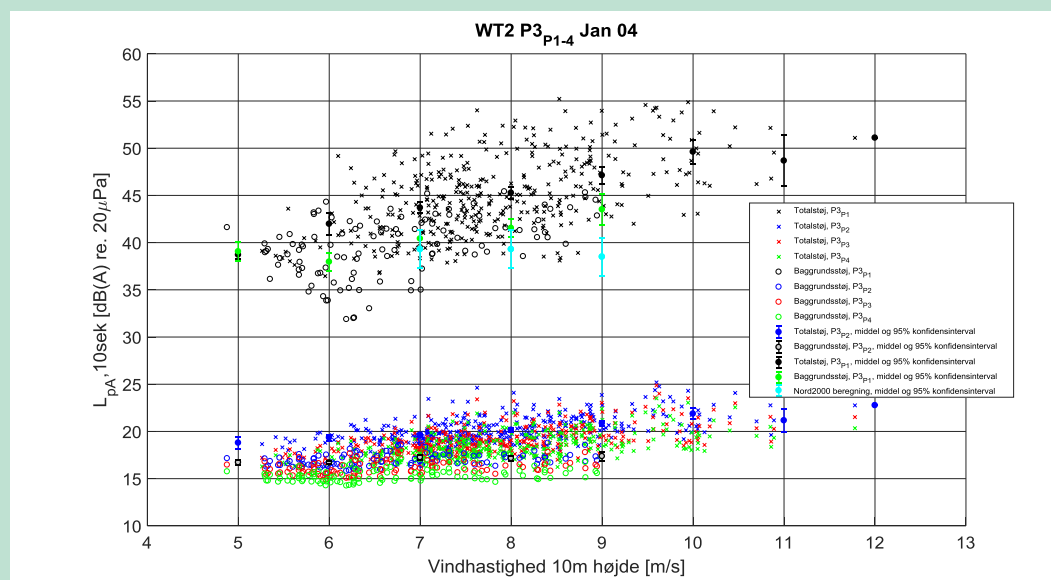
Tendensen i målingen af den almindelige støj gentager sig i det lavfrekvente område. På scatterplottet af den lavfrekvente støj på FIGUR 40 ses Nord2000-beregningen af den lavfrekvente støj overestimerer støjniveauet i forhold til det målte. Der er ikke udført indendørsmålinger i punkt WT1P3 den 6. januar 2017.

Målingen den 4. januar 2017 hos nabo WT2 P3 er analyseret som 10-sekunders middelværdier i tidsperioden kl. 11:50-14:09. Målingen er udført udendørs og indendørs simultant. Vindretning var fra NV-N med vindhastigheder mellem 5 m/s -11 m/s. På FIGUR 41 ses et polarplot over vindretning og vindhastighed i 10-sekunders middelværdier.



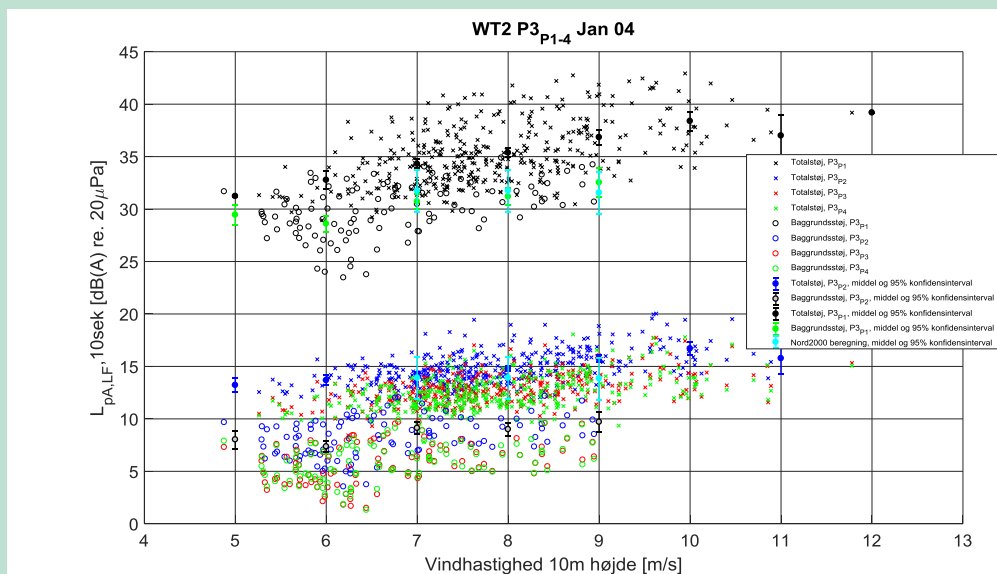
FIGUR 41. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under målingen den 4. januar 2017.

Det kan ses af scatterplottet for den almindelige støj på FIGUR 42, at det udendørs støjniveau P_{3P1} stiger med vindhastigheden. Det kan dog samtidig ses, at for de vindhastigheder, hvor der er målt baggrundsstøj, ligger baggrundsstøjniveauet ca. 3 dB under totalstøjen. Støjen stiger derfor lineært med vindhastigheden, som det forventes, når målingen er influeret af baggrundsstøj fra omkringliggende vegetation [14]. Støjniveauet beregnet efter Nord2000 er underestimeret i forhold til det målte. Dette er forventeligt, når målingen er influeret af baggrundsstøj i den grad, som den er. Støjniveauet ved 6 m/s er på 42 dB og ved 8 m/s på 45 dB, men som nævnt skyldes dette baggrundsstøjen i området og ikke alene støjen fra vindmøllerne. For indendørsmålingerne P_{3P2-P4} ses det, at støjniveauet målt i hjørnet ved vinduespartiet som vender mod møllerne, forventeligt giver det højeste støjniveau.



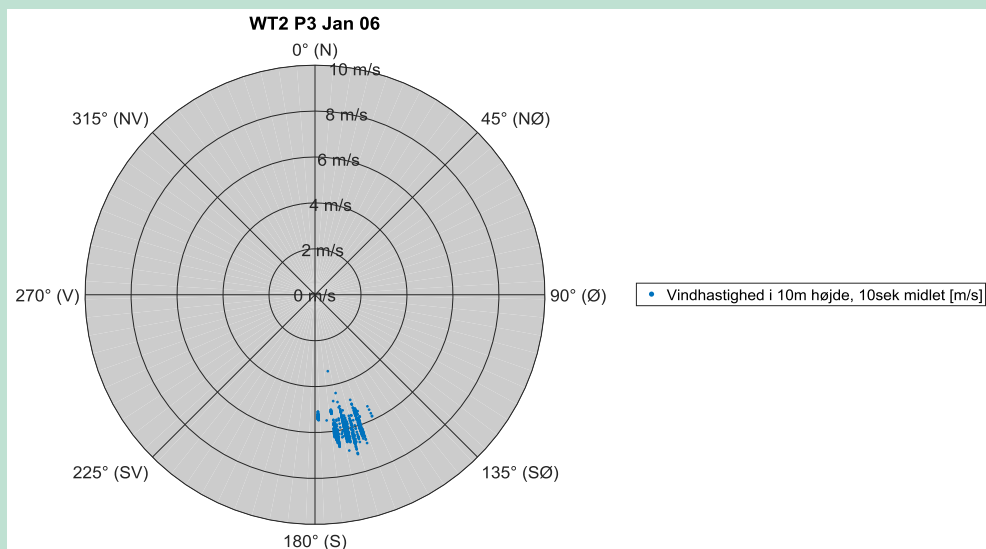
FIGUR 42. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,10sek}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95 % konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. Nord2000.

På FIGUR 43 ses et scatterplot af den lavfrekvente støj målt hhv. udendørs og indendørs. For udendørsmålingen ses, at den lavfrekvente støj stiger med vindhastigheden indtil 9 m/s, hvorefter den flader ud. Forskellen mellem totalstøj og baggrundsstøjen er ca. 3-4 dB, hvilket også kan være med til at forklare, hvorfor Nord2000-beregningerne underestimerer støjen. Indendørsmålingerne viser, at det højeste niveau er målt i hjørneposition P_{3P2} . Dog overskrider hverken middelniveau eller $L_{pA,LF 10sek}$ den gældende støjgrænse på 20 dB. Forskellen på totalstøj og baggrundsstøj er ca. 6 dB, og der ses derfor også en bedre overensstemmelse mellem indendørsmålinger og Nord2000-beregningen. Til Nord2000-beregningen er de lavfrekvente lydisolationsværdier fra BEK 1736 benyttet i beregningen af det indendørs lavfrekvente støjniveau.



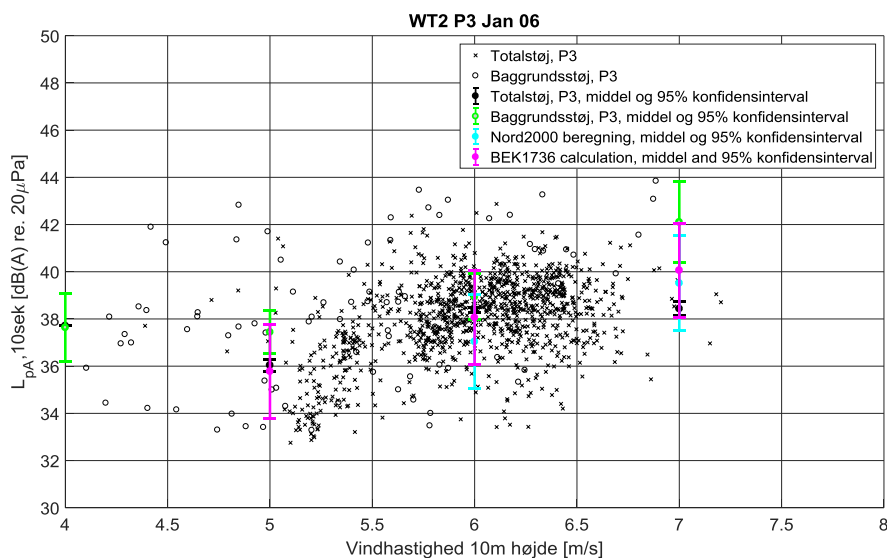
FIGUR 43. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pALF,10sek}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s, ..., 8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. Nord2000.

Målingen den 6. januar 2017 hos nabo WT2 P3 er ligeledes analyseret i 10-sekunders midler i tidsperioden kl. 07:01-12:48. Målingen er udført udendørs. Vindretning var fra SØ-S med vindhastigheder mellem 4 m/s - 7 m/s. Vindretningen er dermed inden for medvindretning $\pm 45^\circ$ mod nabo WT2 P3. På FIGUR 44 ses et polarplot over vindretning og vindhastighed i 10-sekunders midler.



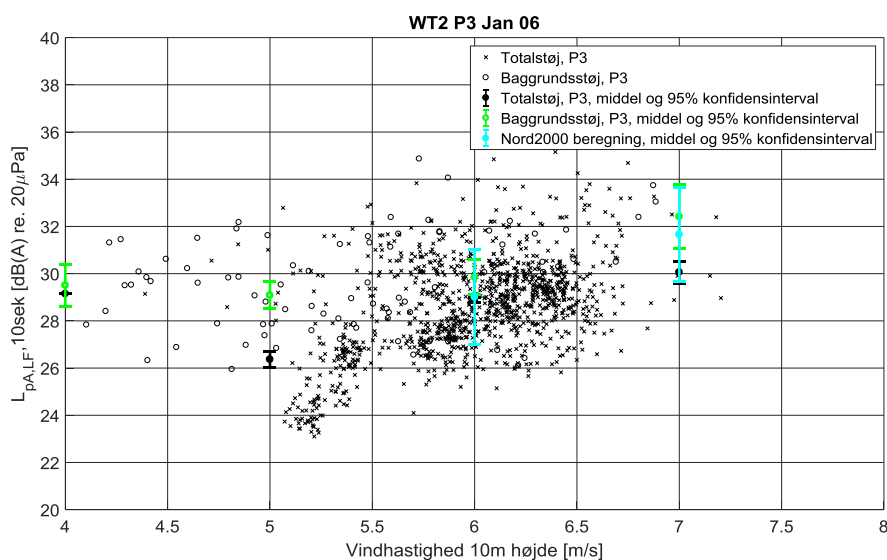
FIGUR 44. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under målingen den 6. januar 2017.

På FIGUR 45 ses et scatterplot af målingen den 6. januar 2017. Middelniveauet af baggrundsstøjen ligger i flere tilfælde over totalstøjen. Dog ses en bedre sammenhæng mellem målinger og beregninger både i henhold til BEK 1736 og Nord2000. Niveaueet ved 6 m/s ligger ca. 3,5 dB under grænseværdien på 42 dB.



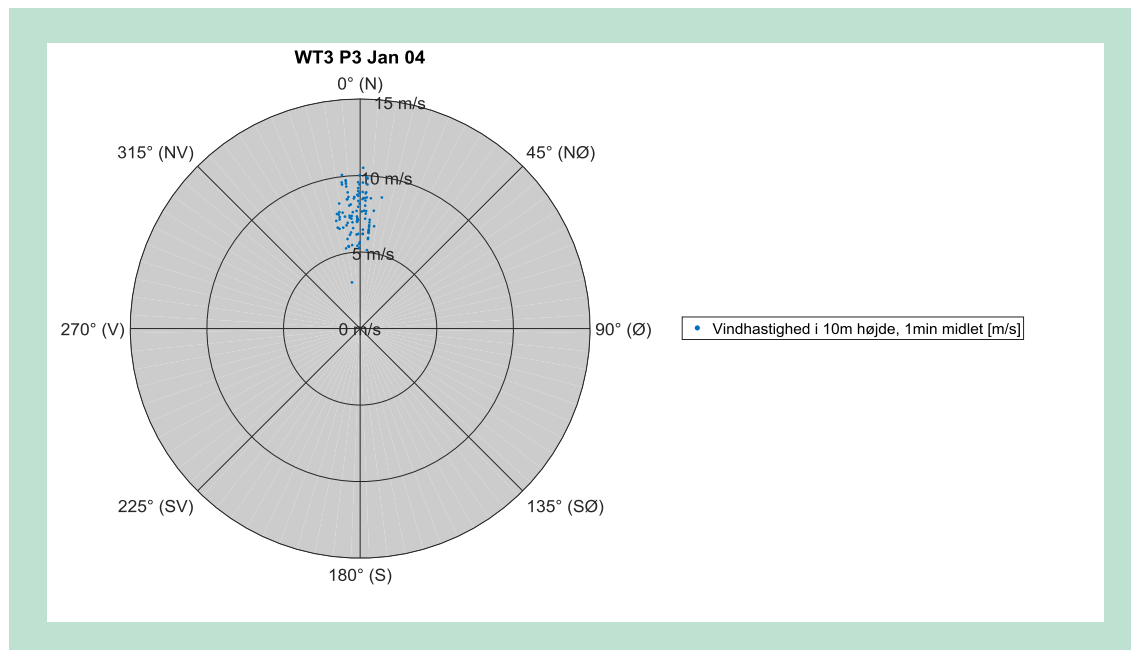
FIGUR 45. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. BEK1736 og Nord2000.

På FIGUR 46 ses et scatterplot af den lavfrekvente støj målt den 6. januar 2017. Tendensen for denne er den samme som for den almindelige støj. Baggrundsstøjen ligger generelt over totalstøjen. Dog kan det tydes i totalstøjen, at kurven for denne følger kurven for støjen fra en pitchreguleret vindmølle.



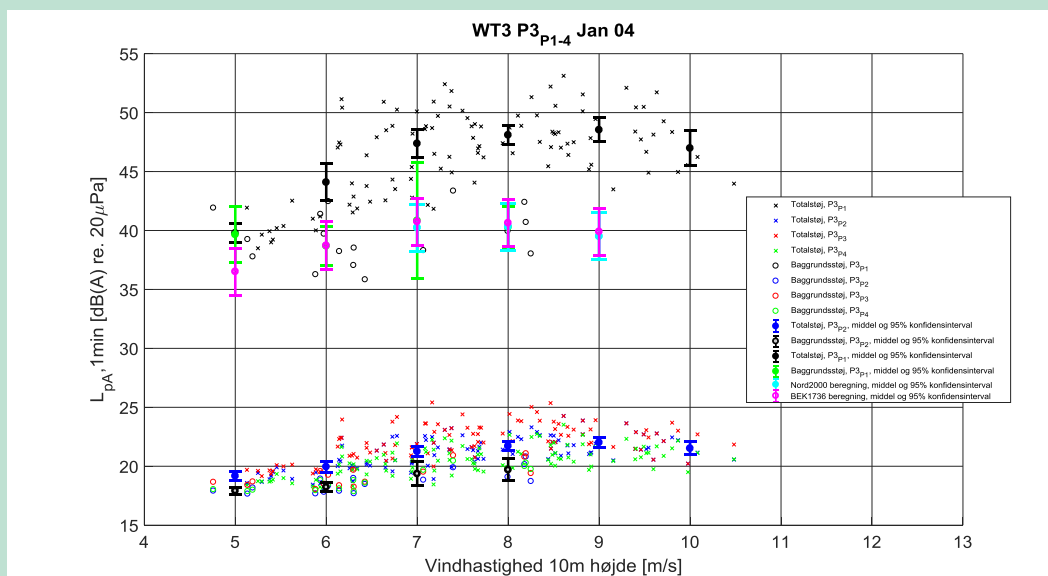
FIGUR 46. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pALF,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. Nord2000.

Målingen den 4. januar 2017 hos nabo WT3 P3 er analyseret i 1-minutmidler i tidsperioden kl. 11:30-15:08. Målingen er udført udendørs og indendørs simultant. Vindretning var fra N med vindhastigheder mellem 5 m/s -10 m/s. Vindretningen er dermed i enkelte periode inden for medvindsretning $\pm 45^\circ$ mod nabo WT3 P3. På FIGUR 47 ses et polarplot over vindretning og vindhastighed i 1-minutmidler.



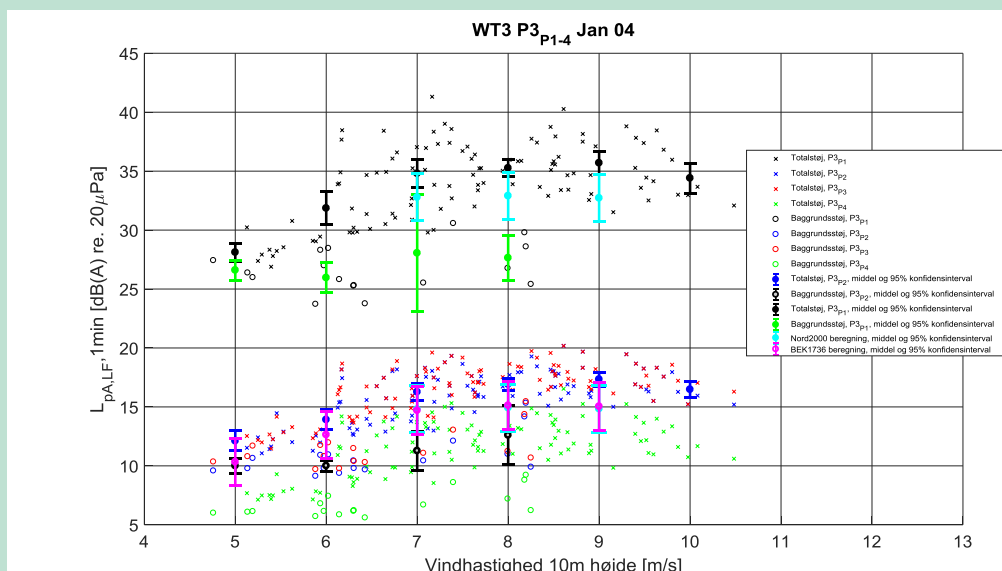
FIGUR 47. Polarplot der viser vindretningen og vindhastigheden under målingen den 4. januar 2017.

På FIGUR 48 ses et scatterplot af målingen den 4. januar 2017. Totalstøjen stiger med vindhastigheden op til 7 m/s, hvorefter den flader ud. Totalstøjen ved 6 m/s er 2 dB over grænseværdien på 42 dB, og ved 8 m/s er den 4 dB over grænseværdien på 44 dB. Tendensen følger den man vil forvente for støjen fra en pitchreguleret vindmølle og generelt ligger baggrundsstøjen 6-8 dB under totalstøjen. Ved gennemlytning af optagelserne er det i flere tilfælde støjen fra den omkringliggende vegetation, man kan høre, og ikke vindmøllestøjen. Der er derfor ikke så god overensstemmelse mellem målinger og beregninger i henhold til BEK 1736 og Nord2000. På indendørsoptagelsen er det højeste støjniveau i dette tilfælde målt foran vinduet (P3_{P3}) og ikke i hjørnepositionen (P3_{P2}).



FIGUR 48. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede støjniveau jf. BEK1736 og Nord2000.

På FIGUR 49 ses et scatterplot af den lavfrekvente støj målt den 4. januar 2017. Tendensen for denne er den samme som for den almindelige støj. Baggrundsstøjen ligger generelt under totalstøjen. Dog kan det tydes i totalstøjen, at kurven for denne følger kurven for støjen fra en pitchreguleret vindmølle. Hverken middelniveau eller $L_{pA,LF,1min}$ af den lavfrekvente støj målt indendørs overskrider den gældende støjgrænse på 20 dB. I forhold til den almindelige støj ses en bedre sammenhæng mellem målinger og beregninger i henhold til Nord2000 udendørs og BEK1736 og Nord2000 indendørs. Til Nord2000-beregningen er de lavfrekvente lydisolationsværdier fra BEK 1736 benyttet i beregningen af det indendørs lavfrekvente støjniveau.



FIGUR 49. Scatterplot der viser lydtrykket $L_{pA,LF,1min}$ som funktion af vindhastigheden. Resultaterne er vist med middelværdi og 95% konfidensinterval for hvert vindinterval (2,5-3,5 m/s,...,8,5-9,5 m/s) samt tilhørende beregnede lavfrekvente støjniveau jf. BEK1736 og Nord2000.

11.3 Opsummering af korttidsmålinger

For korttidsmålingerne hos naboerne er der udført analyse af hhv. den almindelige støj (50-10.000 Hz) og den lavfrekvente støj (10-160 Hz). Målingerne er hos 2 af naboerne udført simultant udendørs og indendørs, mens der hos den 3. nabo kun er udført udendørsmålinger. Resultaterne er vist som scatterplots, der viser støjniveauet i forhold til vindhastighed. På samme scatterplots er de tilhørende beregninger af støjniveauet i henhold til BEK 1736 og Nord2000 præsenteret.

Det generelle billede er, at udendørsmålingerne ved naboerne, på trods af frasortering af målinger med kraftig baggrundsstøj på grundlag af 1/3-oktavspektre, er påvirket af et højt baggrundsstøjniveau. Dette skyldes primært vegetationsstøj i området, hvor der også ses, at støjniveauet stiger lineært som funktion af vindhastigheden og ikke følger kurven for en pitch-reguleret vindmølle, som man ser i målinger tæt på vindmøllerne. Dette medfører, at støjniveauet i flere tilfælde ligger over grænserne på 42 dB og 44 dB, og det er tydeligt ved gennemlytning af optagelserne, at målingerne er påvirket af vegetationsstøj i området, og at overskridelsen ikke skyldes vindmøllestøjen. De lavfrekvente indendørsmålinger ligger alle under grænsen på 20 dB angivet som middelniveauer L_{pALF} .

I tilfælde, hvor målingerne ikke er influeret af baggrundsstøj, ses en god overensstemmelse mellem beregninger i henhold til BEK 1736 og Nord2000, specielt for indendørsmålingerne. Ved udendørsmålingerne, der som nævnt er influeret af vegetationsstøj, ligger de målte støjniveauer som forventet over de beregnede støjniveauer, som kun medtager støjbidraget fra vindmøllerne.

12. Lydudbredelse

Der er foretaget beregninger af støjen i henhold til to forskellige metoder. Den ene metode er beskrevet i bekendtgørelse BEK 1736 (som er en forenklet Nord2000-metode, der bl.a. forudsætter medvind fra hver vindmølle mod hvert nabopunkt). Den anden metode er en fuld udgave af Nord2000, der bl.a. kan beregne støjbidraget i andre vindretninger end medvind. Resultater beregnet med disse to metoder sammenlignes med målte resultater i perioden fra den 4.-6. januar 2017. De enkelte metoder beregner kun på støjen udsendt af vindmøllerne og inkluderer derfor ikke andre kilder end de tre vindmøller. For målingerne gælder, at anden støj kan påvirke det målte resultat især i naboafstand, da niveauet fra baggrundsstøjen stort set er det samme som støjbidraget fra vindmøllerne, som det ses af langtidsmålingerne. For begge metoder er der brugt kildestyrker for de tre møller målt i 2013 [7] i forbindelse med godkendelsen af disse. Data fra 2013 er gennemgået, og kildestyrken er i forbindelse med denne undersøgelse beregnet for andre vindhastigheder end de normale 6 og 8 m/s. Hvis en vindmølle har "manglet" en kildestyrke ved en ønsket vindhastighed, er denne beregnet på baggrund af energimiddelværdierne fra de to andre. Således er kildestyrkerne vist i TABEL 5 benyttet ved beregningerne af støjniveauet. Alle benyttede kildestyrker foreligger i 1/3-oktaver i frekvensområdet 10 til 10.000 Hz.

TABEL 5. Totale A-vægtede kildestyrker i dB re 1 pW anvendt til beregning af støjniveau.

Vindhastighed	Kildestyrke WT1	Kildestyrke WT2	Kildestyrke WT3
3 m/s	91,3 dB(A)	91,3 dB(A)	91,3 dB(A)
4 m/s	96,9 dB(A)	96,4 dB(A)	95,8 dB(A)
5 m/s	101,1 dB(A)	101,6 dB(A)	102,0 dB(A)
6 m/s	103,1 dB(A)	104,8 dB(A)	103,6 dB(A)
7 m/s	105,6 dB(A)	105,9 dB(A)	105,8 dB(A)
8 m/s	105,8 dB(A)	105,8 dB(A)	105,6 dB(A)
9 m/s	105,4 dB(A)	105,4 dB(A)	104,9 dB(A)
10 m/s	105,1 dB(A)	105,3 dB(A)	104,7 dB(A)
11 m/s	104,5 dB(A)	104,5 dB(A)	104,5 dB(A)

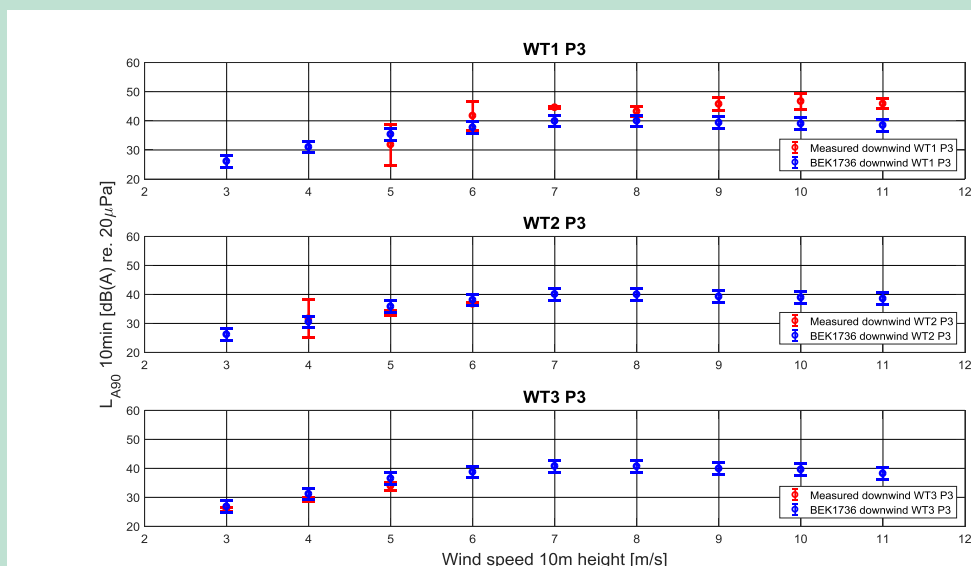
12.1 Lydudbredelse i henhold til BEK 1736

Beregning af støjen i henhold til BEK 1736 er foretaget ud til de tre nabopunkter. Beregningen er udført for alle tre møller i drift og med brug af kildestyrkerne i TABEL 5. I beregningen er det forudsat, at de eneste støjkloder er vindmøllerne, og beregningen er således et udtryk for alene vindmøllernes støjbidrag i det enkelte punkt. Beregningsmetoden antager medvind fra hver vindmølle til beregningspunktet, og beregningen må derfor som udgangspunkt forventes at være en smule overestimerede, da medvind fra alle vindmøller til et nabopunkt i praksis ikke lader sig gøre.

Ved sammenligningen af beregningerne med målingerne er der dog taget udgangspunkt i denne antagelse, der med den aktuelle beliggenhed af vindmøller og nabopunkter kun giver anledning til mindre afvigelser. Ved sammenligningerne er der kun medtaget målte værdier i et nabopunkt, når vinden har været indenfor $\pm 22,5^\circ$ af retningen mod beregningspunktet fra den vindmølle, der er "tilknyttet" målepunktet (se afsnit 6.2). Det bevirker, at der for nogle vindhastigheder ikke har foreligget målinger, og det har således ikke været muligt at lave en sammenligning. For de målte resultater gælder, at der som minimum skal være to målinger af $L_{A9010min}$ til rådighed ved den aktuelle vindhastighed, for at der er udført en beregning af middelværdien for målingen. Der er taget udgangspunkt i langtidsmålingerne med $L_{A9010min}$ målinger i P3 for hver af møllerne.

I FIGUR 50 er resultaterne af beregning og måling vist sammen. For beregningen er der anført et 95 % konfidensinterval på ± 2 dB jf. usikkerheden angivet i BEK 1736. For målingerne er konfidensintervallet beregnet på baggrund af de målte værdier anvendt ved hver enkelt vindhastighed. For WT1 er der måleresultater i WT1 P3 for vindhastigheder fra 5-11 m/s, for WT2 er der måleresultater i WT2 P3 for 4-6 m/s, og for WT3 er der måleresultater i WT3 P3 for 3-5 m/s.

Der ses en generel god overensstemmelse mellem måling og beregning for de lavere vindhastigheder ved alle 3 punkter. Der er kun nabomålinger ved høj vind ved WT1 P3, og her ses det, at støjniveauet ved målingerne generelt er større end det beregnede støjniveau, når vindhastigheden kommer over 6-7 m/s. Der er foretaget undersøgelser af måleresultaterne fra nabopunktet vist som scatterplots for langtidsmålingerne og foretaget aflytning af optagelserne. På dette grundlag konkluderes det, at afvigelserne skyldes, at der i perioder med kraftig vind generelt er et større bidrag fra vegetationen omkring målepunktet. Støjbidrag fra vegetation indgår ikke som en del af beregningerne.



FIGUR 50. Sammenligning af beregnede støjbidrag i henhold til BEK1736 og målte støjniveauer i nabopunkterne.

12.2 Lydudbredelse iht. Nord2000

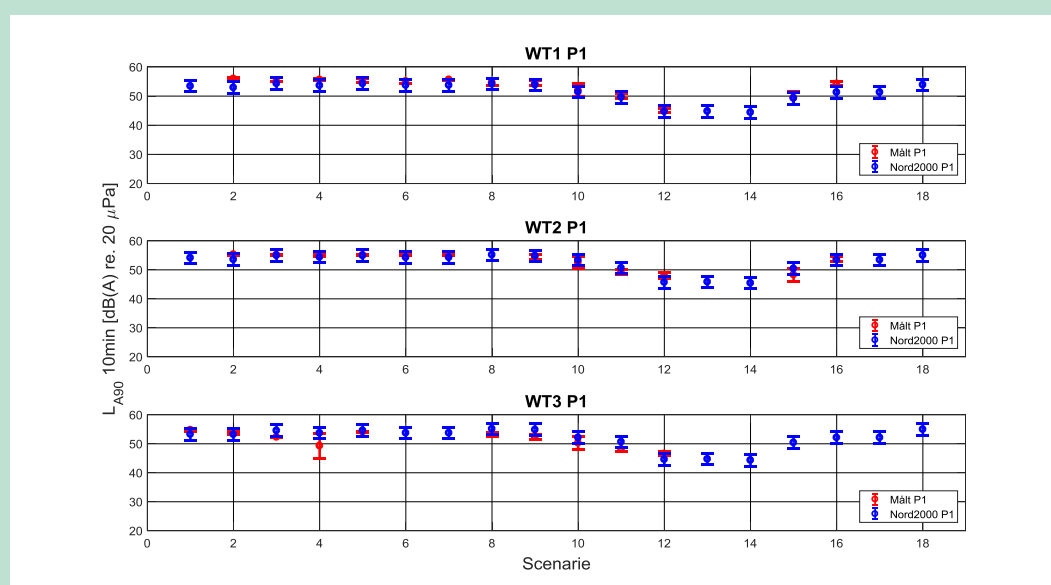
Nord2000 er en mere avanceret støjmodel, som bl.a. giver mulighed for at lade de meteorologiske parametre indgå i beregningen, herunder skydække, temperatur og vindretning. I TABEL 6 er der anført 18 forskellige scenarier med hver deres tilhørende meteorologi. Disse 18 meteorologiske scenarier dækker i det store hele de vejrforhold, der var til stede i måleperioden den 4.-6. januar 2017. I tabellen angiver "Vindretning" kompasretningen for, hvor vinden kommer fra, fx angiver 311°, at det blæser fra nordvest.

TABEL 6. Udvalgte scenarier til Nord 2000-beregninger.

Scenarie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Skydække [1/8]	6	1	1	3	4	7	6	6	0
Vindhastighed 10m højde [m/s]	9,6	10,8	8,4	8,6	8,4	8,8	8,7	7,2	7,0
Vindretning [grader]	294	311	329	222	355	349	345	348	346
Temperatur [grader celsius]	5	5	4	4	4	4	4	4	-1
Fugtighed [%]	70	74	70	68	69	69	69	73	55
Scenarie	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Skydække [1/8]	0	1	5	5	0	0	0	0	8
Vindhastighed 10m højde [m/s]	6,4	5,3	4,3	3,9	4,0	5,4	6,1	6,3	6,6
Vindretning [grader]	355	358	20	14	48	179	171	170	175
Temperatur [grader celsius]	-2	-3	-5	-5	-6	-8	-7	-4	-3
Fugtighed [%]	63	93	73	85	56	87	80	68	70

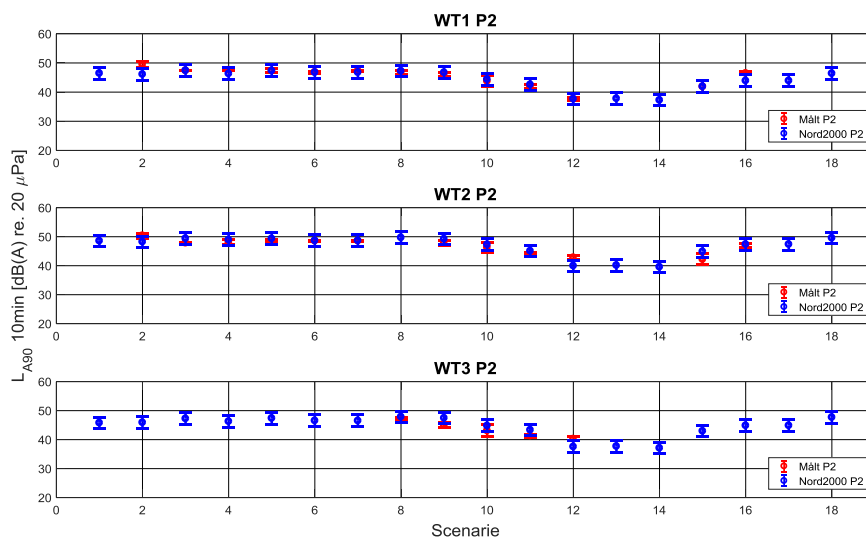
For Nord2000-beregningerne er der antaget en ubestemthed på 2 dB for de beregnede resultater. For de målte resultater er der brugt et gennemsnit af 5 værdier ($L_{A9010min}$) omkring det tidspunkt, hvor vejrscenariet har været tilstede. Der er udført beregninger af støjbidraget fra hver af de 3 vindmøller i de 9 punkter WT1P1, WT1P2, WT1P3, WT2P1, WT2P2, WT2P3, WT3P1, WT3P2 og WT3P3, og for hver af disse 9 punkter er støjbidraget fra de 3 vindmøller summeret på energiniveau. For beregningerne er kildestyrkerne angivet i TABEL 5 anvendt for møllerne, og det er forudsat i beregningerne, at alle tre vindmøller har været i drift.

I FIGUR 51 ses sammenligningen mellem målte og beregnede resultater for punkt P1 for alle tre vindmøller. Der er taget udgangspunkt i, at der skal være tilstrækkelig mange data (5 stk. $L_{A9010min}$ -værdier målt i nabopunktet), for at der er udført en sammenligning mellem målte og beregnede værdier. Hvis dette er tilfældet, er de 5 stk. $L_{A9010min}$ -værdier midlet aritmetisk, og denne middelværdi er benyttet til sammenligningen med den beregnede værdi. Målingerne i P1 er alle +6 dB målinger, hvilket også er forudsat i Nord2000-beregningen. For scenarierne i P1 ses der en generel god overensstemmelse mellem de beregnede og målte resultater. Punkterne tæt på møllen ligger relativt frit og uden forstyrrende elementer så som høj vegetation.



FIGUR 51. Beregnede samlede støjbidrag fra alle 3 vindmøller med Nord2000 sammenlignet med målinger i P1.

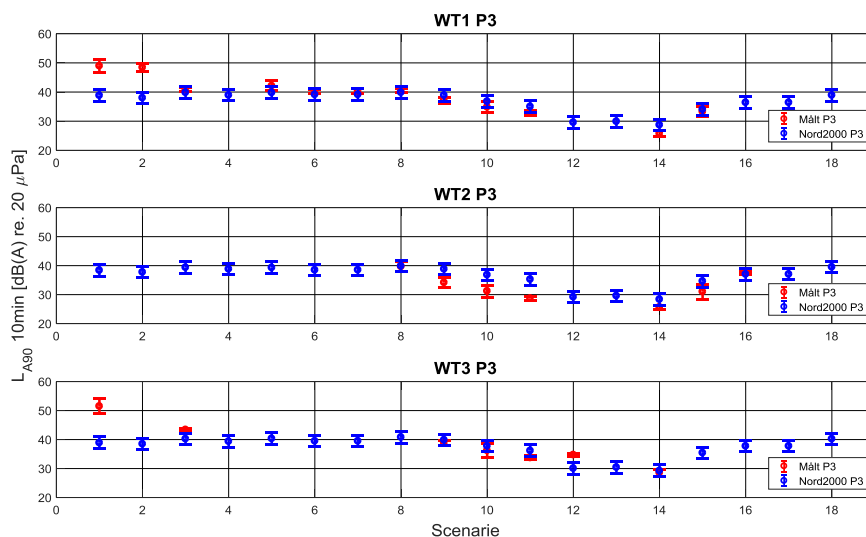
I FIGUR 52 ses sammenligningen for punkt P2 og igen gælder, at målingen kun er repræsenteret, hvis der er mindst 5 $L_{A9010min}$ -værdier til rådighed. For scenarierne i P2 ses igen for alle møller en fin overensstemmelse mellem de beregnede og målte værdier.



FIGUR 52. Beregnede samlede støjbidrag fra alle 3 vindmøller med Nord2000 sammenlignet med målinger i P2.

I FIGUR 53 ses sammenligningen for P3-punkterne (punkterne ved naboerne). Det ses her, at variationen mellem beregninger og målinger er større end i P1 og P2. Det ses specielt for WT1P3 og WT3P3 i de første vejrscenarier, at der er afvigelser. Det højere målte niveau skyldes, at der er mere vegetation omkring disse to punkter. Beregningen medtager som bekendt kun støjbidrag fra vindmøllerne i den givne situation.

For WT2P3 ses, at der i scenarierne 9, 10 og 11 er målt et lavere niveau end beregnet. Det har ikke inden for rammerne af dette projekt været muligt at undersøge dette forhold nærmere. Derudover er der for de øvrige punkter og vejrscenarier god overensstemmelse mellem beregninger og målinger.



FIGUR 53. Beregnede samlede støjbidrag fra alle 3 vindmøller med Nord2000 sammenlignet med målinger i P3.

12.3 Opsummering lydudbredelse

Der er foretaget sammenligning af beregninger og målinger efter to metoder henholdsvis BEK 1736 og Nord2000. For begge metoder er der generelt god overensstemmelse mellem de målte og beregnede værdier. Der er ikke forhold i de sammenligninger, det har været muligt at gennemføre, der indikerer systematiske forskelle mellem målinger og beregninger, hvad enten den ene eller anden metode anvendes.

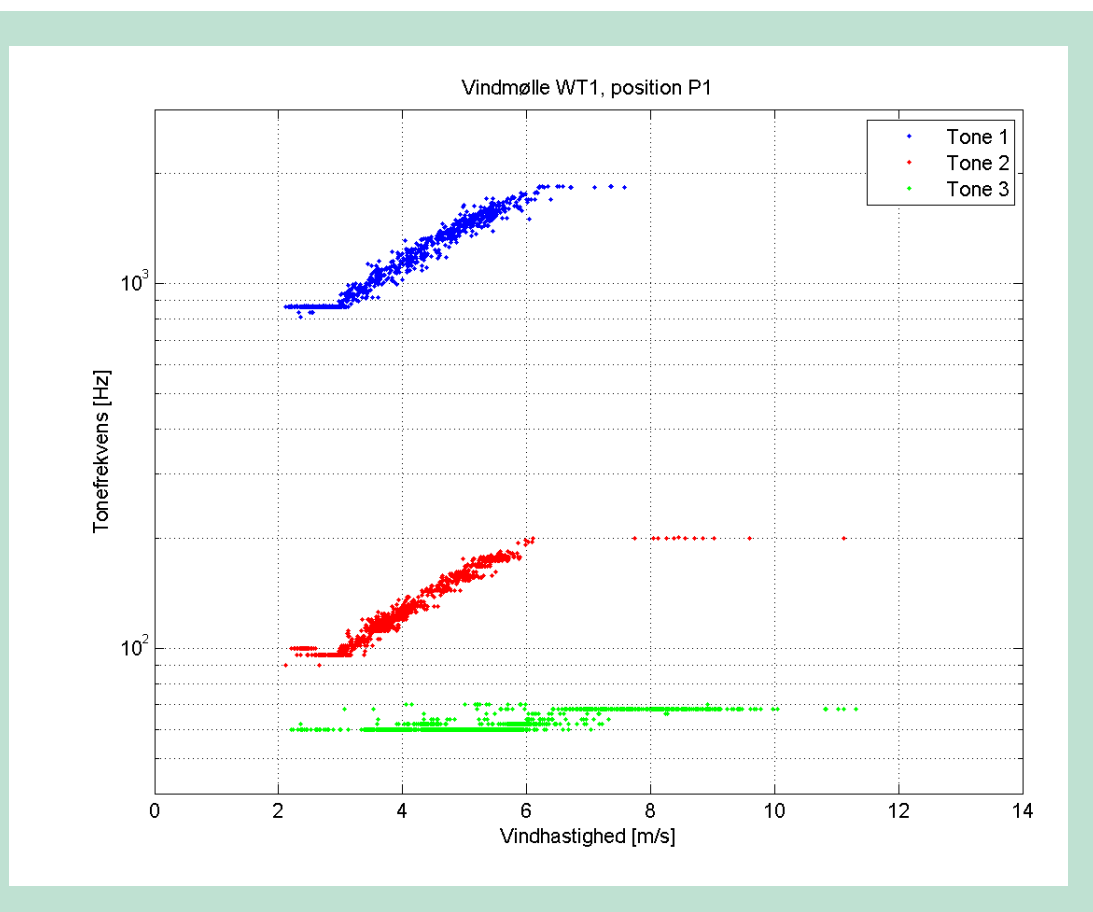
Ved specielt BEK 1736-sammenligningen var mængden af brugbare måledata hos naboerne sparsom, dog mest for WT2P3 og WT3P3, da der ikke har været så mange perioder med medvind fra vindmøllerne mod disse punkter. Der har dog været medvind over en del vindhastigheder for WT1P3, og i sammenligningen er der generel god overensstemmelse for de lavere vindhastigheder. For de højere hastigheder forstyrrer vegetationen, hvilket resulterer i høje målte værdier sammenlignet med de beregnede støjbidrag fra vindmøllerne.

13. Toner

Støjen fra møllerne er analyseret for tydeligt hørbare toner, som, hvis de forekommer, gør støjen mere generende. Formålet var bl.a. at se, om andre målebetingelser end beskrevet i BEK 1736[1], dvs. andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s eller andre vindretninger end medvind fra mølle til nabo, kan give tydeligere toner.

Ved hjælp af analyseprogrammet noiseLAB Batch processor 4.1 er der foretaget automatiseret toneanalyse for hver 60 s-periode for alle udendørs målepositioner. I hver af de analyserede 60 s-perioder kan der enten ikke detekteres toner, detekteres én tone eller detekteres flere toner (i forskellige kritiske bånd). Analyseprocessen er beskrevet i Bilag 5, og kun de endelige resultater vises i dette kapitel.

For at kunne undersøge betydningen af andre vindretninger end medvind og andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s, er det nødvendigt at undersøge toner, der både er tydelige, og som opstår ved mange vindhastigheder og vindretninger. Som beskrevet i Bilag 5 vælges det derfor at fokusere på tre principielle toneområder, her beskrevet som toneområde 1 (på figurer forkortet til "tone 1"), toneområde 2 (på figurer forkortet til "tone 2") og toneområde 3 (på figurer forkortet til "tone 3"), se eksempel i FIGUR 54. Tone 1-området indeholder toner med centerfrekvenser fra ca. 800 Hz til ca. 1900 Hz. Tone 2-området indeholder toner med centerfrekvenser fra ca. 90 Hz til ca. 200 Hz. Tone 3-området indeholder toner med centerfrekvenser fra ca. 50 Hz til ca. 70 Hz.



FIGUR 54. Vindmølle WT1, mikrofonposition P1. Oversigt over de tre udvalgte toneområder for nærmere analyse, vist som tonernes centerfrekvens som funktion af vindhastigheden.

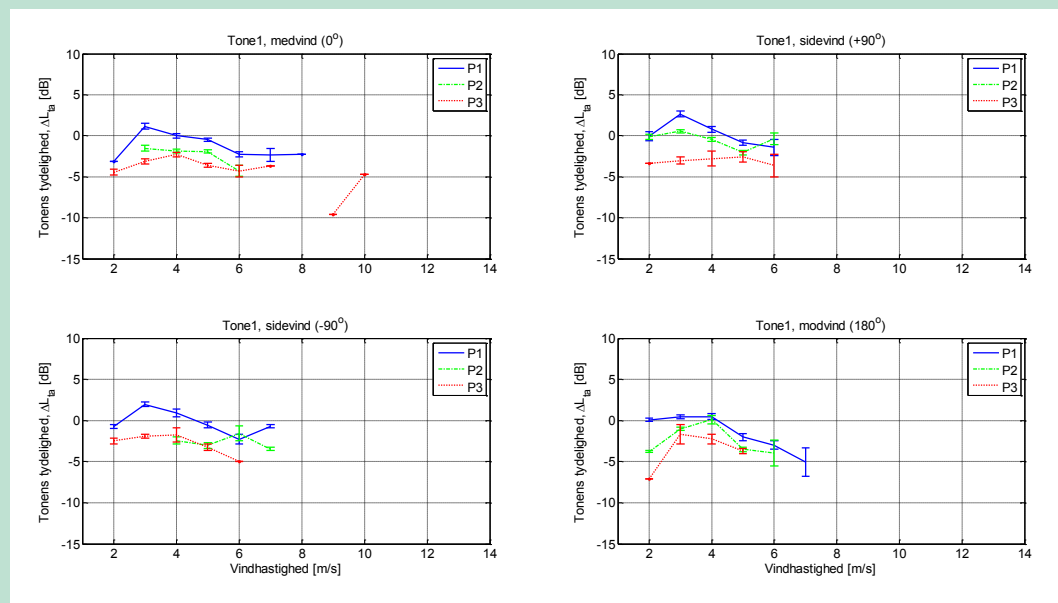
De to målekampagner (éndags og flerdages) har forskellig opsætning og varighed og bør analyseres separat. Da både datamængden for flerdagesmålekampagnen er klart større end datamængden for endagsmålekampagnen, samt variationen for både vindhastighed og vindretning er størst for flerdagesmålekampagnen, analyseres flerdagesmålekampagnen først. Analysen af flerdagesmålekampagnen er rapporteret i afsnit 13.1, og analysen af éndagsmålekampagnen er rapporteret i afsnit 13.2.

13.1 Flerdagesmålekampagne

Kriterieværdien til afgørelse af om en tone er tydelig nok til at give et 5 dB-tillæg afhænger af tonens tydelighed, DL_{ta} eller DL_{ts} , dvs. forholdet mellem tonens niveau og niveauet af den maskerende støj i samme kritiske bånd og til en vis grad af tonens frekvens. For at forstå variationen i resultaterne, er det derfor vigtigt at iagttage alle tre parametre, DL_{ta} , tonens tydelighed, L_{pt} , tonens niveau og L_{pn} , niveauet af den maskerende støj, for varierende vindretning og vindhastighed. Disse parametre er nærmere forklaret i Bilag 5.2.

13.1.1 Toneområde 1

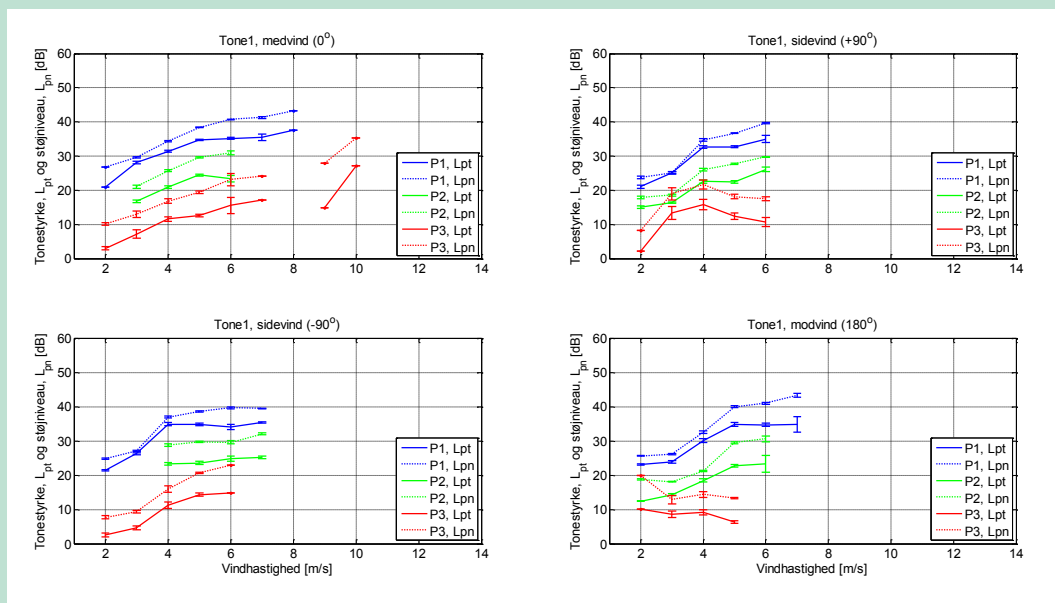
For toneområde 1 (800-1900 Hz) illustrerer FIGUR 55 til FIGUR 58 på forskellig vis betydning af vindretning og vindhastighed for parametrene ΔL_{ta} (tonens tydelighed), L_{pt} (tonens styrke) og L_{pn} (styrken af den maskerende støj). På den første figur, FIGUR 55, er tonens tydelighed vist sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen (P1 til P3), fordelt på de fire vindretninger over fire delplot. For figurene i nærværende afsnit med den flerdagesmålekampagne betyder 0° vindretning, at det blæser fra vindmøllen mod mikrofonen og altså IKKE vind fra kompas-nord.



FIGUR 55. Toneområde 1. Tonens tydelighed, ΔL_{ta} , som funktion af vindhastigheden fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.

Det kan af FIGUR 55 ses, at tonerne er tydeligst tættest på vindmøllerne. Det ser desuden ud til, at tonerne er tydeligere for lavere vindhastigheder end 6 m/s. For det aktuelle toneområde detekteres der desuden næsten ikke toner for højere vindhastigheder end 8 m/s. Overordnet ligner de fire delplot hinanden, dvs. overordnet ses der ikke den store betydning af vindretning.

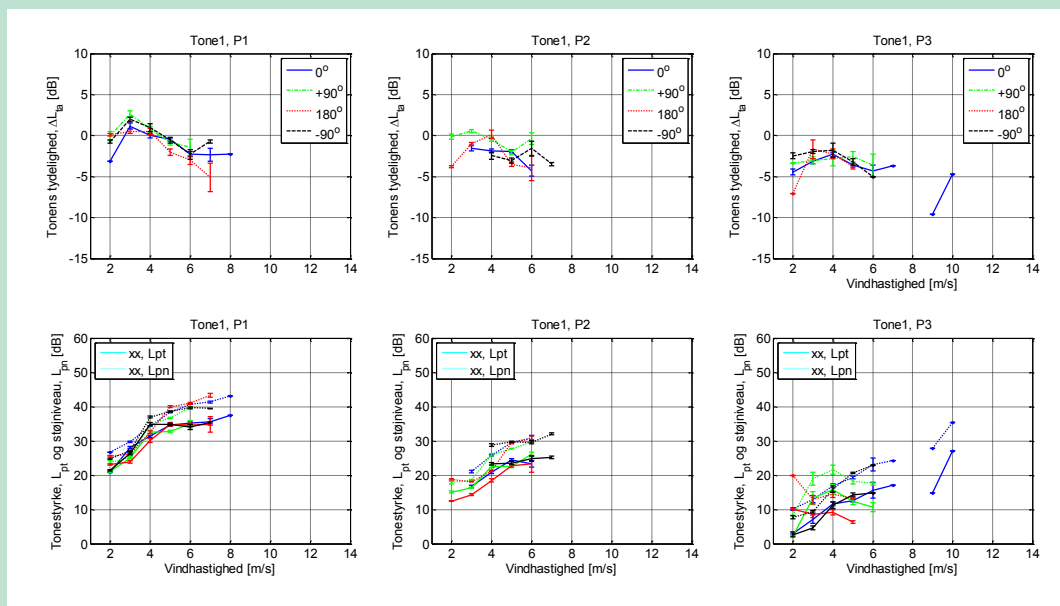
På FIGUR 56 er styrke af både tone og maskerende støj vist sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen, ligeledes fordelt på de fire vindretninger over fire delplot.



FIGUR 56. Toneområde 1. Toneniveau, L_{pt} og støjniveau i kritisk bånd L_{pn} som funktion af vindhastighed, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.

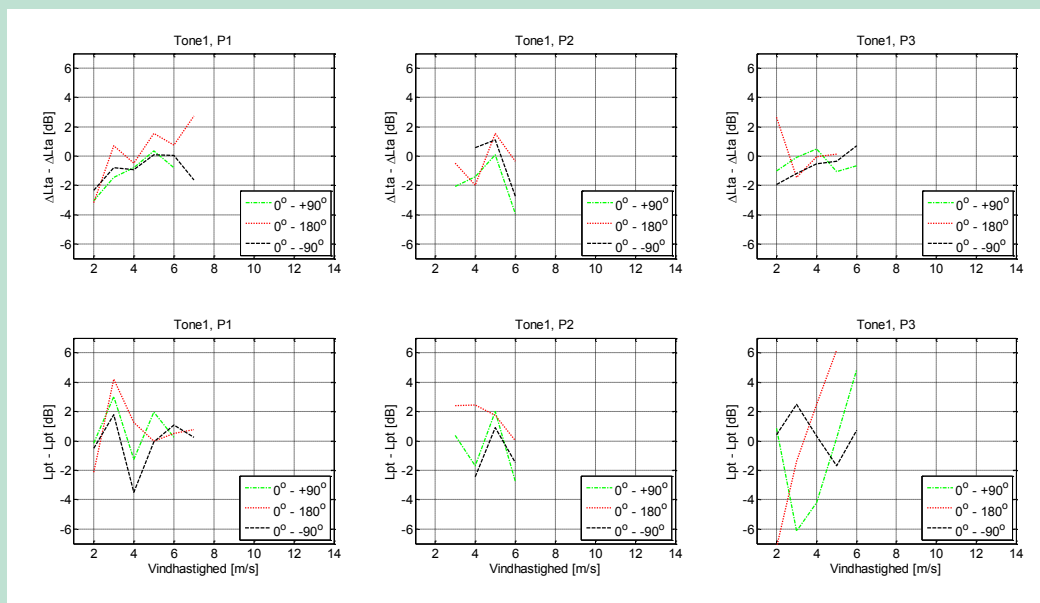
Det kan af figuren ses, at styrken af både toner og maskerende støj er generelt kraftigst tættest på vindmøllen og svagest længst fra vindmøllen. Det skal her bemærkes, at den maskerende støj består af både den aerodynamiske støj fra vindmøllen (vingernes rotation igennem luften) samt vegetationsstøj og øvrig baggrundsstøj. Den aerodynamiske støj er kraftigst tættest på vindmøllen og falder med afstanden. Modsat er vegetationsstøjen formentlig kraftigere længst fra vindmøllen, da der er mere vegetation i naboafstand end tæt ved vindmøllen (i de valgte positioner). Det kan af figuren også ses, at niveauet af både tonerne og den maskerende støj stiger med stigende vindhastighed.

På FIGUR 57 er alle parametrene vist på samme figur fordelt på delplots for bedre at kunne sammenligne betydning af vindretning. For de øverste tre delplots er vist tonens tydelighed som en funktion af vindhastighed sammenlignet for de fire vindretninger, fordelt på afstand til vindmøllen over de tre delplot. For de nederste tre delplots er vist styrken af hhv. toner og maskerende støj, fordelt på samme måde som tonens tydelighed. Det ser ikke ud til, at der er meget forskel på resultaterne for de forskellige vindretninger.



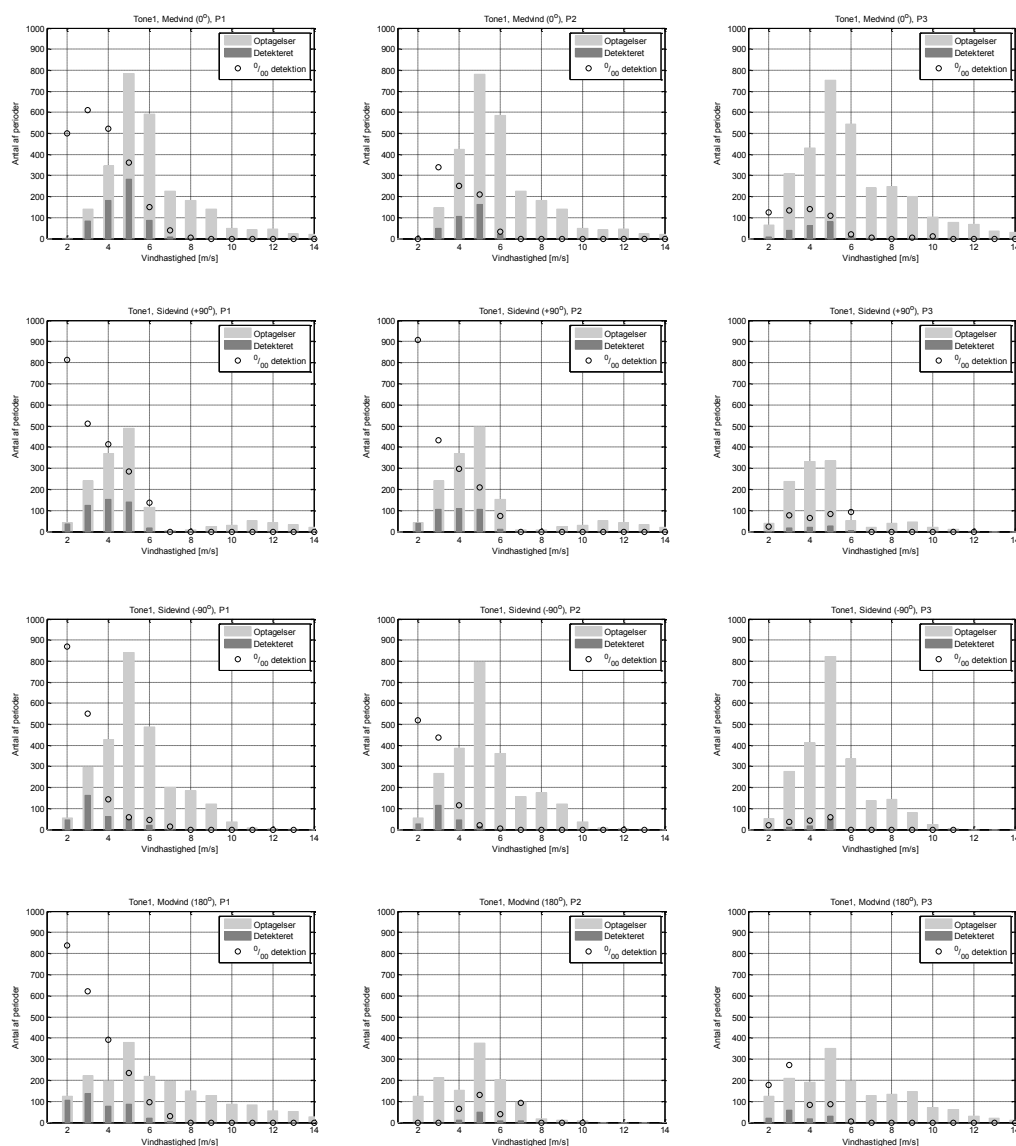
FIGUR 57. Toneområde 1. Tonalitet (ΔL_{ta} , L_{pt} og L_{pn}) samlet for hver vindmølle, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.

For bedre at kunne se eventuelle forskelle er differensen mellem resultaterne for medvindsretning i forhold til resultaterne for de øvrige vindretninger udregnet og vist i FIGUR 58. En negativ værdi betyder her, at den aktuelle vindretning har en højere tydelighed eller styrke end medvindsretningen. For tonetydeligheden, ΔL_{ta} , er værdierne relativt til sidevind generelt lavere end 0, mens at værdierne relativt til modvind generelt er over 0. Dvs. at der er en tendens til højere tonetydelighed i sidevind end i medvind (største forskel er 4 dB), hvorimod modvindsretningen viser en tendens til lavere tonetydelighed end medvindsretningen (største forskel er knapt 3 dB). For tonens niveau, L_{pt} , er udsvingene større og svinger på begge sider af 0, og det er svært at se en specifik tendens.



FIGUR 58. Toneområde 1. Forskel mellem medvind og de øvrige vindretninger for hhv. ΔL_{ta} og L_{pt} . Dvs. plottene viser resultatet for medvindsretning fratrasket resultatet for den aktuelle øvrige vindretning. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.

FIGUR 59 viser fordelingen af valide perioder, der ville kunne indeholde toner i toneområde 1, samt fordelingen af perioder indeholdende toner i toneområde 1. Som det kan ses, er det kun en lille del af perioderne, hvori der detekteres toner. Det kan også ses, at procentvis (promillevis) flest detektioner sker ved de laveste vindhastigheder uanset position.



FIGUR 59. Fordeling af 1-minutperioder fordelt for vindhastigheder, vindretninger og målepositioner for toneområde 1. Hvert delplot viser en position og vindretning. På hvert plot er vist antal 1-minutoptagelser (dvs. mulige perioder for detektion af toner), antal detektioner (dvs. i hvor mange perioder er der detekteret toner), samt en promillevis fordeling.

Opsummerende for toneområde 1:

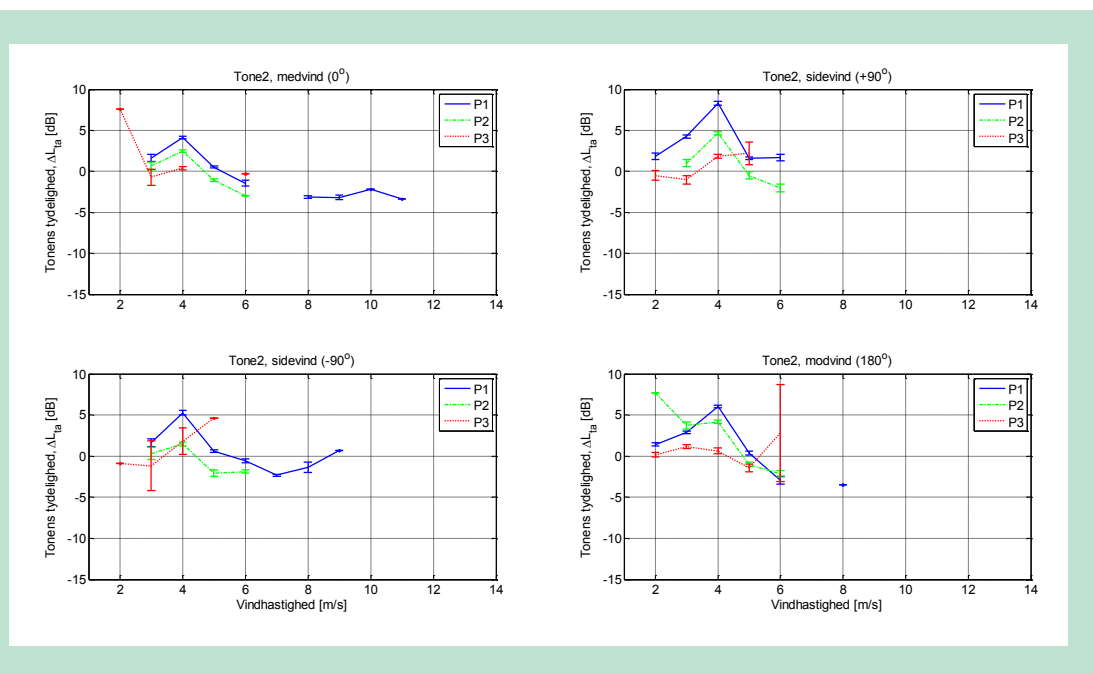
- Lavere vindhastighed end 6 m/s giver højere tonetydelighed, DL_{1a} , end ved 6 m/s
- Næsten ingen detekterede toner for 8 m/s og for højere vindhastigheder end 8 m/s
- Både styrken/niveau af toner og af maskerende støj stiger med stigende vindhastighed (data op til ca. 8 m/s)
- Der ser ud til at være generelt lidt højere tonetydelighed i sidevinds retning end i medvind, mens at der ser ud til at være lidt lavere tonetydelighed i modvinds retning end i medvind.
- Der detekteres procentvis flest toner ved de laveste vindhastigheder (under 4 m/s).

13.1.2 Toneområde 2

For toneområde 2 (100-200 Hz) illustrerer FIGUR 60 til FIGUR 63 på forskellig vis betydning af vindretning og vindhastighed for parametrene ΔL_{ta} (tonens tydelighed), L_{pt} (tonens styrke) og L_{pn} (styrken af den maskerende støj). På den første figur, FIGUR 60, er tonens tydelighed vist sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen (P1 til P3), fordelt på de fire vindretninger over fire delplot.

Det kan af figuren ses at tonerne hovedsageligt er tydeligst tættest på vindmøllerne. Det ser desuden ud til at tonerne er tydeligere for lavere vindhastigheder end for 6 m/s, hvor specielt vindhastigheden 4 m/s giver tydelige toner.

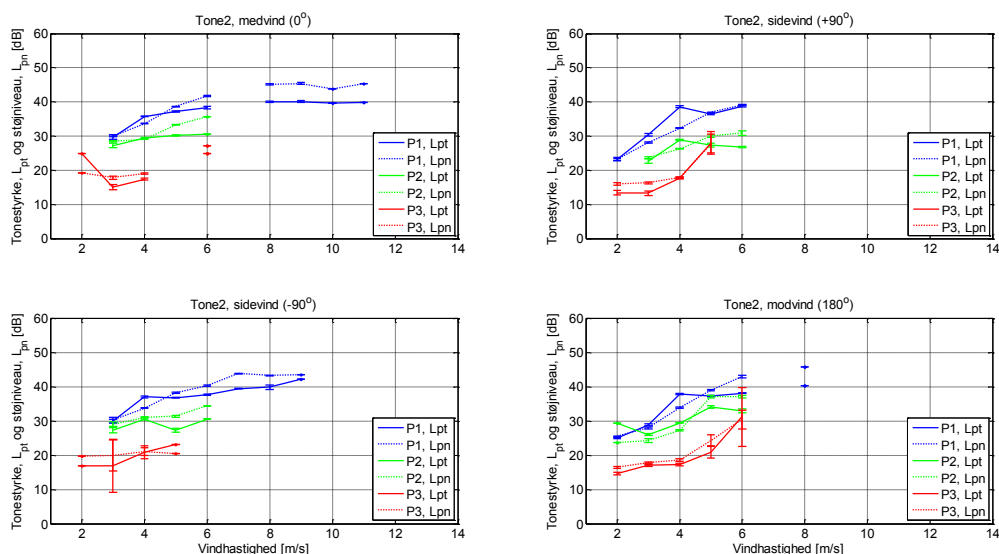
For det aktuelle toneområde afhænger detektion af toner af afstanden til vindmøllen, hvor der i positionen tættest på vindmøllerne (P1) kan detekteres toner i vindhastigheder op til 11 m/s, mens at der i de fjerneste to positioner (P2 og P3) ikke detekteres toner for højere vindhastigheder end 6 m/s. Overordnet følger de fire delplot samme mønster, dvs. overordnet ses der ikke den store betydning af vindretning.



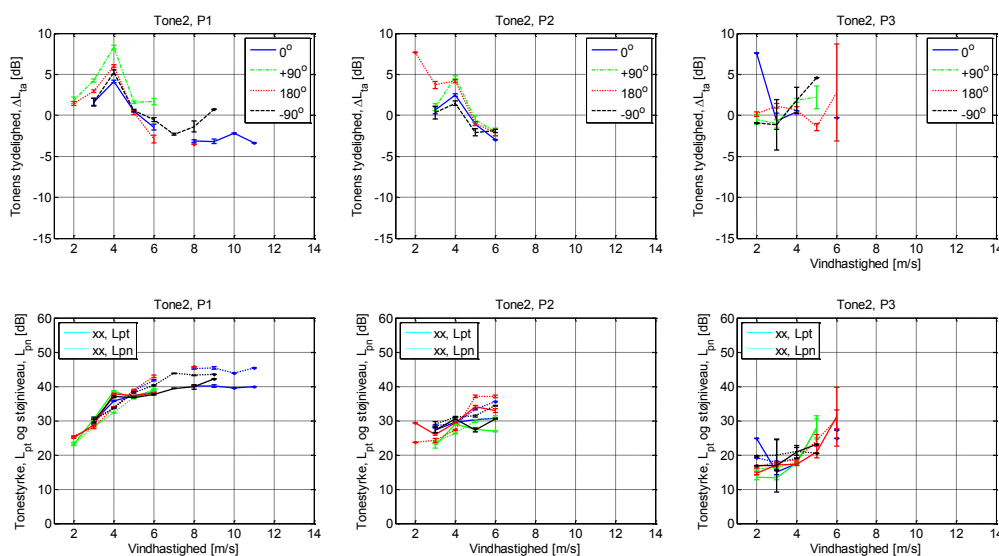
FIGUR 60. Toneområde 2. Tonalitet (ΔL_{ta}) samlet for hver vindmølle, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.

På FIGUR 61, er styrke af både tone og maskerende støj vist sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen, ligeledes fordelt på de fire vindretninger over fire delplot. Det kan af figuren igen ses at styrken af både toner og maskerende støj er generelt kraftigst tættest på vindmøllen og svagest længst fra vindmøllen. Det kan af figuren også ses at niveauet af både tonerne og den maskerende støj stiger med stigende vindhastighed.

På den næste figur, FIGUR 62, er alle parametre vist på samme figur, fordelt på delplots. For de øverste tre delplots er vist tonens tydelighed som en funktion af vindhastighed sammenlignet for de fire vindretninger, fordelt på afstand til vindmøllen over de tre delplot. For de nederste tre delplots er vist styrken af hhv. toner og maskerende støj, fordelt på samme måde som tonens tydelighed. Det ser ikke ud til at der er meget forskel på resultaterne for de forskellige vindretninger.

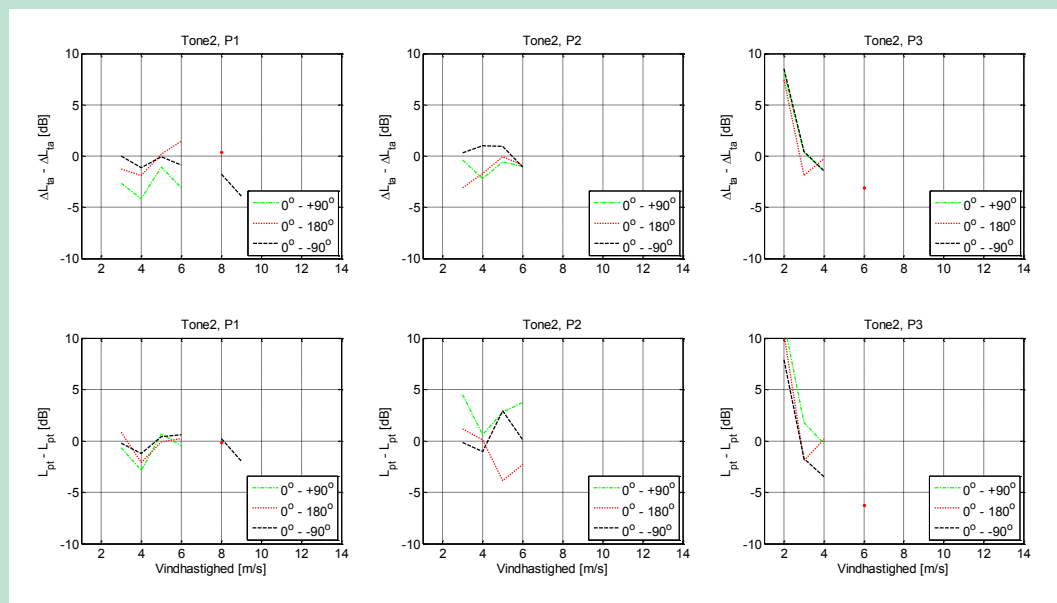


FIGUR 61. Toneområde 2. Tonalitet (L_{pt} og L_{pn}) samlet for hver vindmølle, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.



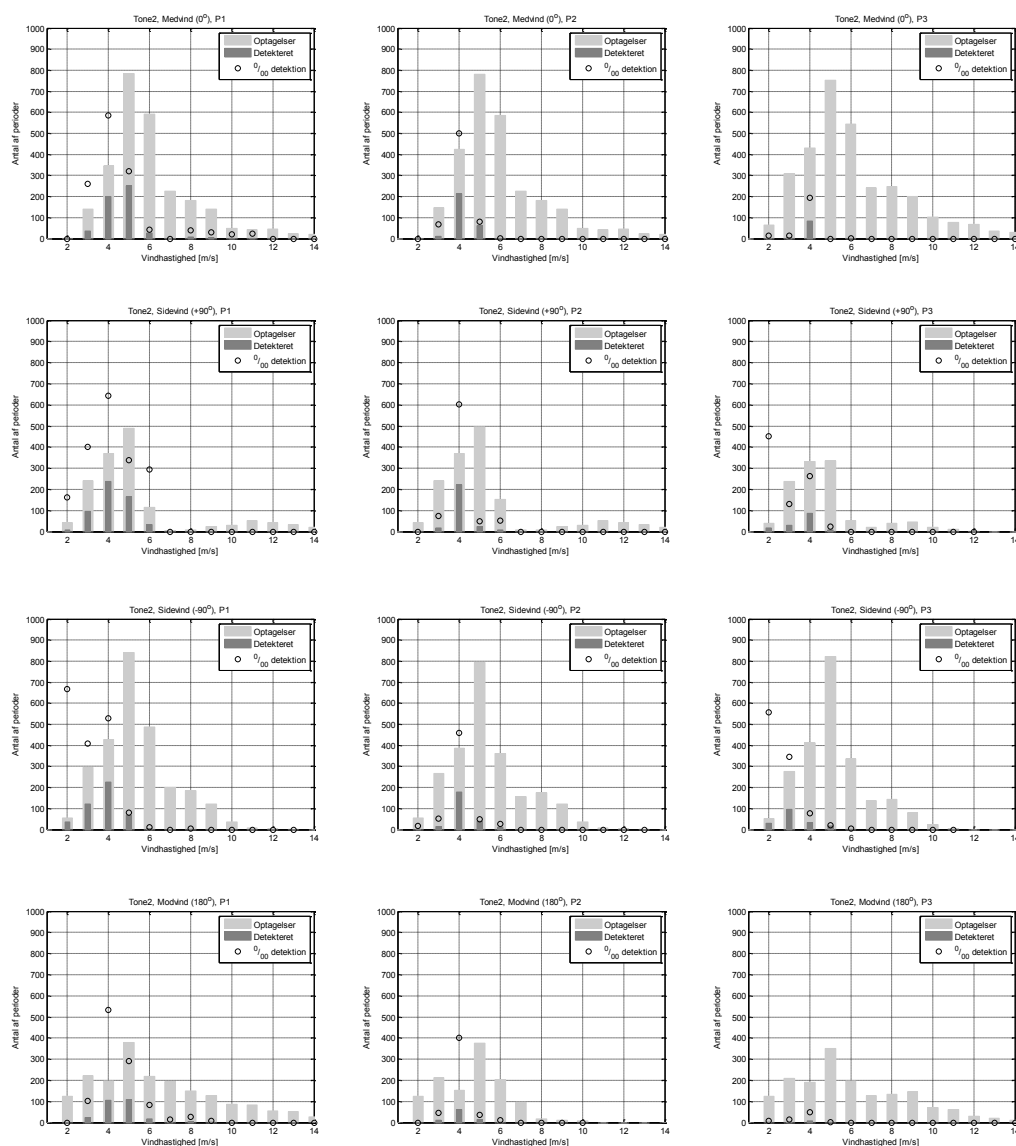
FIGUR 62. Toneområde 2. Toneanalysens tre parametre ΔL_{ta} , L_{pt} og L_{pn} vist som funktion af vindhastigheden, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.

For at kunne se det bedre er forskellen mellem resultaterne for medvindretning i forhold til resultaterne for de øvrige vindretninger udregnet og vist i FIGUR 63. En negativ værdi betyder at den aktuelle vindretning har en højere tydelighed eller styrke end medvindretningen. For tonetydeligheden, ΔL_{ta} , er værdierne generelt lavere end 0, men enkelte er over 0, hvor modvindretningen viser en tendens til højere tonetydelighed end i medvindretningen. For position 3 ser det ud til at enkelte outliers for medvindretningen kommer til at give en forkert udlæsning. For tonens niveau, L_{pt} , er udsvingene større og igen med en tendens til højere værdier for modvindretningen end for medvindretningen.



FIGUR 63. Toneområde 2. Forskel mellem medvind og de øvrige vindretninger for hhv. ΔL_{ta} og L_{pt} , dvs. plottene viser resultatet for medvindsretning fratrasket resultatet for den aktuelle øvrige vindretning. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner, fx P1.

FIGUR 64 viser fordelingen af valide perioder, der ville kunne indeholde toner i toneområde 2, samt fordelingen af perioder indeholdende toner i toneområde 2. Som ved toneområde 1 er det kun en lille del af perioderne hvori der detekteres toner. Det kan igen også ses at procentvis (promillevis) flest detektioner sker ved de laveste vindhastigheder uanset position, dog ved toneområde 2 ses specielt mange detektioner ved 4 m/s.



FIGUR 64. Fordeling af 1-minutperioder fordelt for vindhastigheder, vindretninger og målepositioner for toneområde 2. Hvert delplot viser en position og vindretning. På hvert plot er vist antal 1-minutoptagelser (dvs. mulige perioder for detektion af toner), antal detektioner (dvs. i hvor mange perioder er der detekteret toner), samt en promillevis fordeling.

Opsummerende for toneområde 2:

- Lavere vindhastighed end 6 m/s giver højere tone tydelighed, DL_{ta} , end ved 6 m/s, specielt ved 4 m/s.
- Detekterede toner op til 11 m/s for position 1, kun op til 6 m/s for øvrige positioner.
- Både styrken/niveau af toner og af maskerende støj stiger med stigende vindhastighed op til ca. 8 m/s, jævnt niveau over 8 m/s.
- Der er ikke den store forskel ift. vindretning, men generelt lidt lavere tonetydelighed i medvindsretning end i de øvrige vindretninger.
- Der detekteres procentvis flest toner ved de laveste vindhastigheder, specielt ved 4 m/s.

13.1.3 Toneområde 3

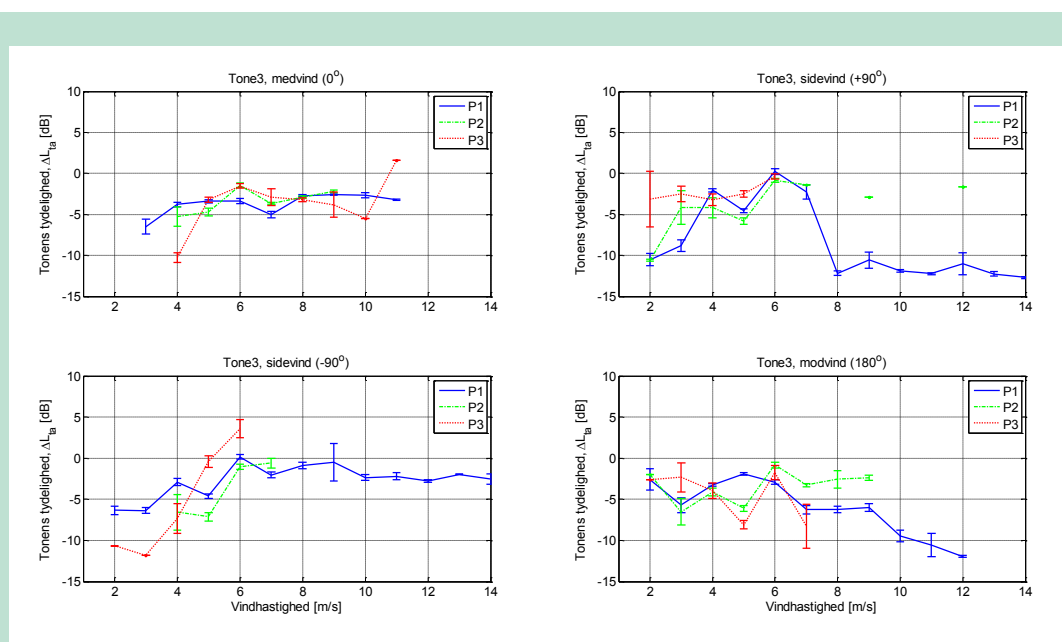
For toneområde 3 (50-70 Hz) illustrerer FIGUR 65 til FIGUR 68 på forskellig vis betydningen af vindretning og vindhastighed for parametrene ΔL_{ta} (tonens tydelighed), L_{pt} (tonens styrke) og L_{pn} (styrken af den maskerende støj). På den første figur, FIGUR 65, er tonens tydelighed vist sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen (P1 til P3), fordelt på de fire vindretninger over fire delplot.

Det kan af figuren ses, at tonerne (i modsætning til de øvrige to toneområder) ikke nødvendigvis er tydeligst tættest på vindmøllerne – dette afhænger af vindhastigheden, og oftest er tonerne tydeligst længst væk fra vindmøllerne.

Toneområde 3 er det sværeste af de tre områder; dels da der er meget lidt variation i tonefrekvens pga toneanalysemetoden, dels da passerende køretøjer (fx lastbiler og traktorer) ofte vil udlede toner i netop dette frekvensområde og dels da maskerende støj fra vegetation ofte vil være lav i dette frekvensområde. Af formentlig samme årsag detekteres tonerne derfor for en højere vindhastighed end de øvrige to toneområder

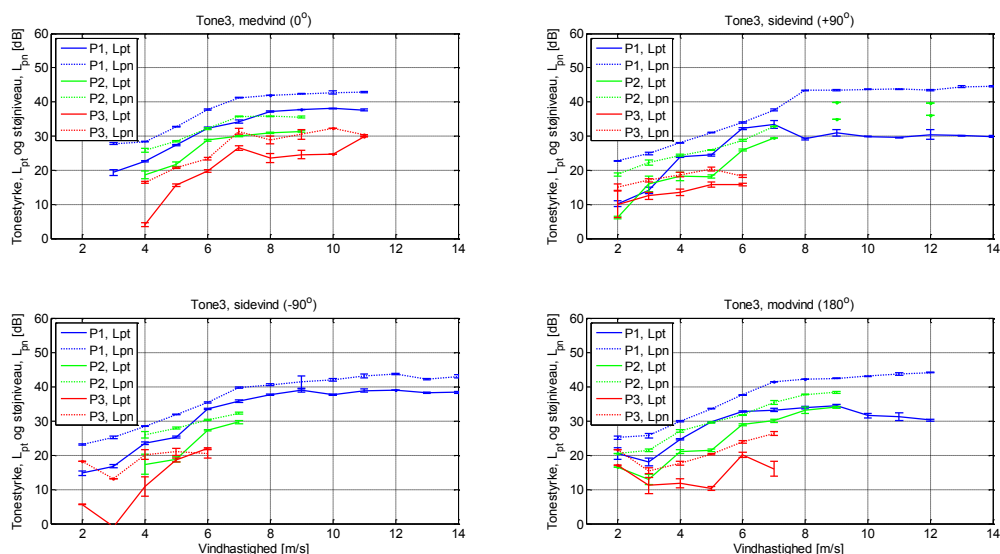
Modsat toneområde 1 og 2 ser der ikke nødvendigvis ud til at være højest tonetydelighed ved de laveste vindhastigheder. For medvind og sidevind ser der generelt ud til at være lavere tonetydelighed for lavere vindhastigheder end 6 m/s sammenlignet med tonetydeligheden ved 6 m/s. For medvind og sidevind (-90 grader) er tonetydeligheden for højere vindhastigheder end 6 m/s ca. sammenlignelig med tonetydeligheden ved 6 m/s. For sidevind (+90 grader) og modvind ser det ud til, at tonetydeligheden er lavere for højere vindhastigheder end 6 m/s, der er dog generelt kun data for position 1. Generelt ser det dog ud til, at nogle af de højeste tonetydeligheder observeres ved 6 m/s.

Overordnet ser der ud til at være end del forskelle, dvs. overordnet ser der ud til at være en betydning af vindretning.

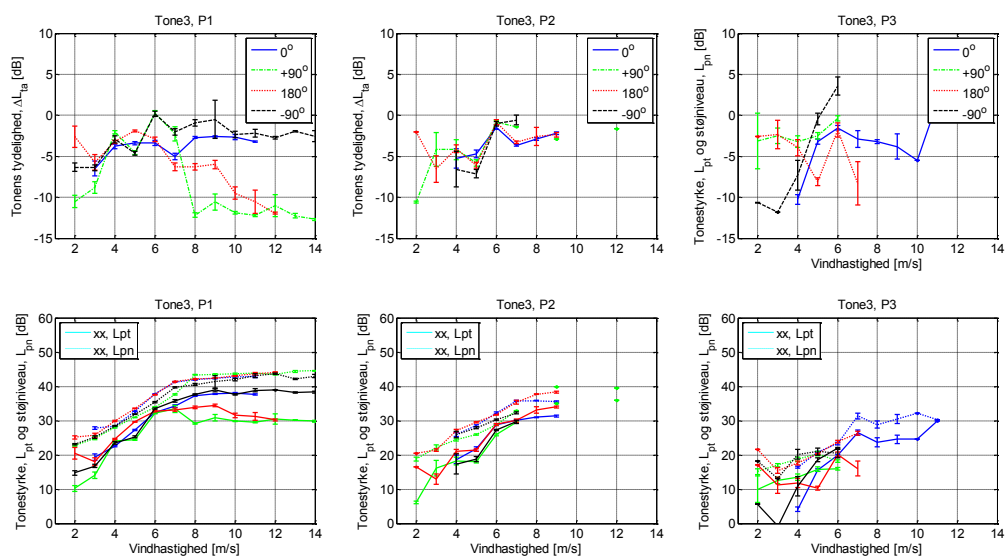


FIGUR 65. Toneområde 3. Tonetydelighed, ΔL_{ta} , fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.

På FIGUR 66 ses styrken af både tone og maskerende støj sammenlignet for de forskellige afstande til vindmøllen, ligeledes fordelt på de fire vindretninger over fire delplot. Det kan af figuren ses, at styrken af både toner og maskerende støj generelt følger samme mønster som ved toneområde 1 og 2, og generelt er kraftigst tættest på vindmøllen og svagest længst fra vindmøllen. Det kan af figuren også ses, at niveauet af både tonerne og den maskerende støj stiger med stigende vindhastighed.



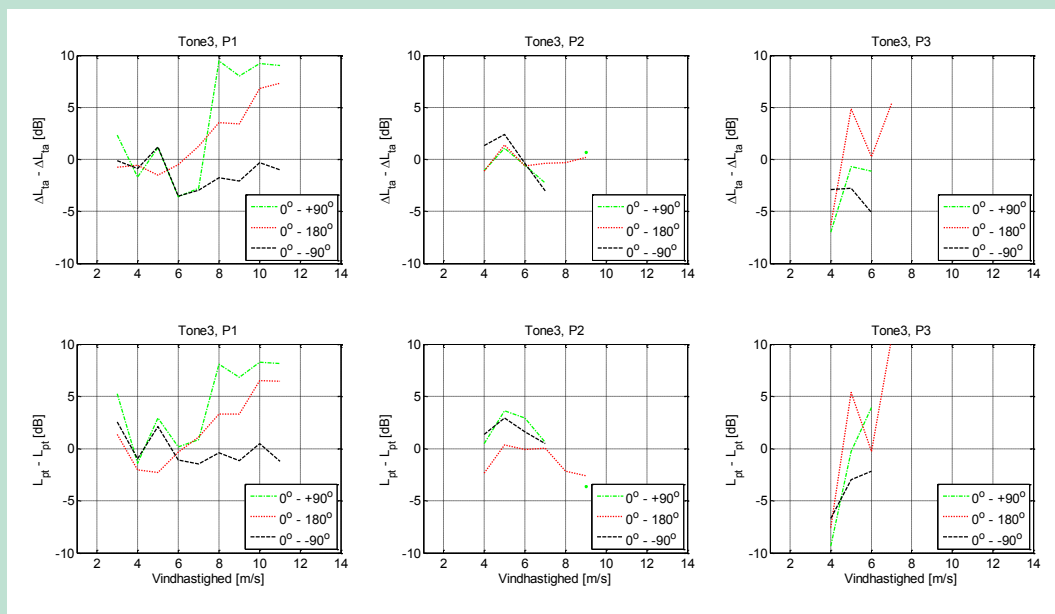
FIGUR 66. Toneområde 3. Tonalitet (L_{pt} og L_{pn}) samlet for hver vindmølle, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.



FIGUR 67. Toneområde 3. Tonalitet (ΔL_{ta} , L_{pt} og L_{pn}) samlet for hver vindmølle, fordelt på vindretning og mikrofonposition. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.

På FIGUR 67 er alle parametrene vist på samme figur, fordelt på delplots for bedst at kunne se eventuelle forskelle på grund af vindretninger. På de øverste tre delplots er vist tonens tydelighed som en funktion af vindhastighed sammenlignet for de fire vindretninger, fordelt på afstand til vindmøllen over de tre delplots. På de nederste tre delplots er vist styrken af hhv. toner og maskerende støj fordelt på samme måde som tonens tydelighed. Der ses en del forskelle i tonetydelighed for vindretningerne i position 1 og 3. For position 1 er det specielt ved vindhastigheder over 6 m/s, at der er forskelle, samt ved 2 m/s, mens kurverne generelt følges ad ved ca. 3-7 m/s. For position 3 følges kurverne generelt ikke, mens kurverne generelt følges ad for position 2.

Forskellen mellem resultaterne for medvindsretning i forhold til resultaterne for de øvrige vindretninger er udregnet og vist i FIGUR 68, hvor en negativ værdi betyder, at den aktuelle vindretning har en højere tydelighed eller styrke end medvindsretningen. Det ses, at mønsteret for tonetydelighed, ΔL_{ta} , svarer godt overens med mønsteret for tonestyrke, L_{pt} , og årsagen til forskellene skyldes formentlig L_{pt} . Generelt giver modvind og sidevind (+90 grader) lavere tonalitet, mens sidevind (-90 grader) giver en højere tonalitet.

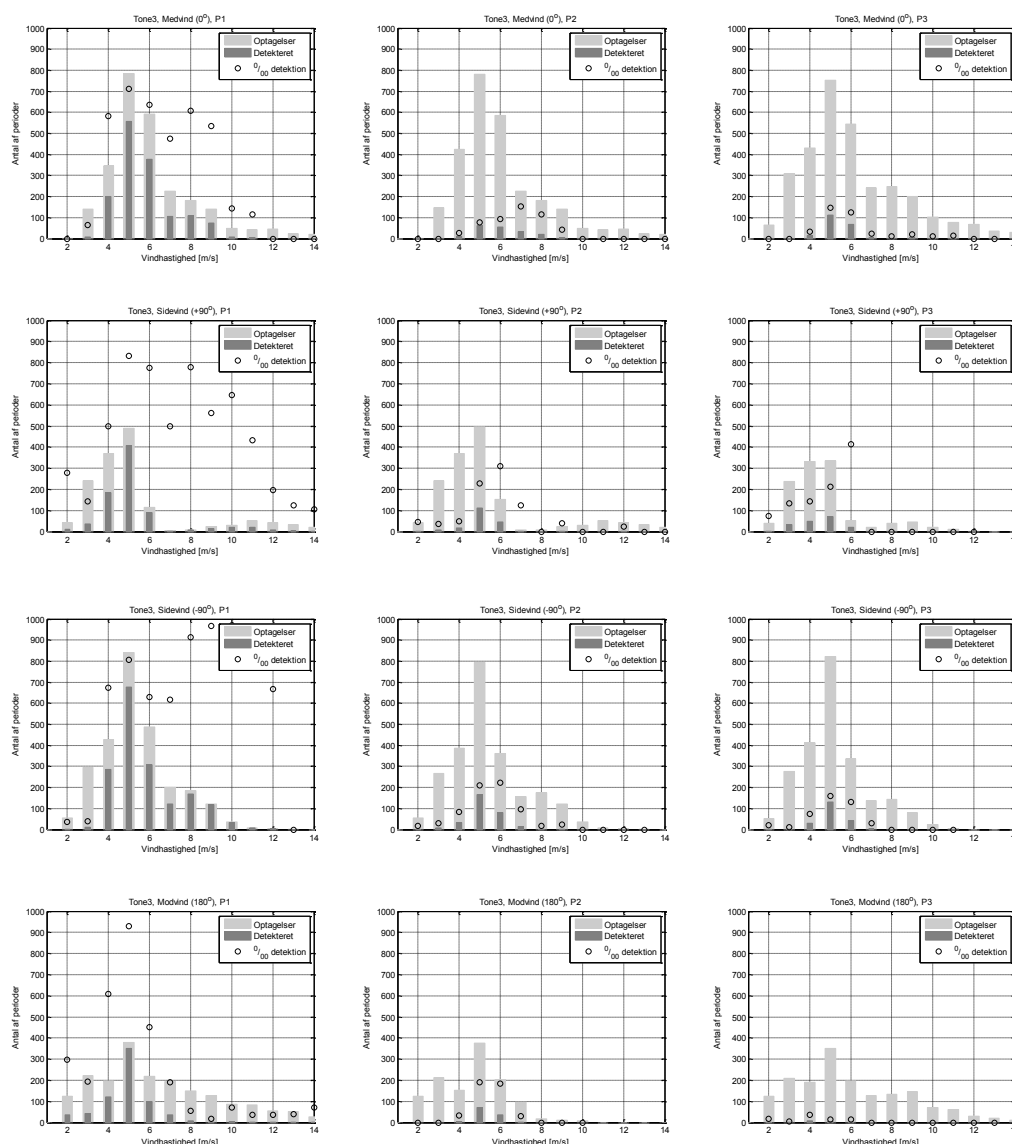


FIGUR 68. Toneområde 3. Forskel mellem medvind og de øvrige vindretninger for hhv. ΔL_{ta} og L_{pt} , dvs. plottene viser resultatet for medvindsretning fratrasket resultatet for den aktuelle øvrige vindretning. Figuren viser de samlede data fra alle 3 vindmøller i tilsvarende positioner fx P1.

FIGUR 69 viser fordelingen af valide perioder, der ville kunne indeholde toner i toneområde 3 samt fordelingen af perioder indeholdende toner i toneområde 3. Generelt detekteres et højt antal toner i position 1 bortset fra ved modvind. Ved position 2 og 3 detekteres – som ved toneområde 2 og 3 – et lavt antal toner. Detektionen af toner er spredt godt ud i vindhastighedsområdet 4-10 m/s.

Opsummerende for toneområde 3:

- Tonetydeligheden er nogenlunde ens for de vindhastigheder, hvor der findes data. Der er også store udsving, men generelt uden tydelige tendenser. Der er dog en lille tendens til højest tonetydelighed ved 6 m/s.
- Der kan detekteres toner for vindhastigheder helt op til 14 m/s for position 1. For position 3 i en enkelt vindretning kan der detekteres toner for vindhastigheder op til 11 m/s, men der for resterende positioner og vindhastigheder generelt kun kan detekteres toner for vindhastigheder op til ca. 8 m/s.
- Både styrken/niveau af toner og af maskerende støj stiger med stigende vindhastighed op til ca. 8 m/s, jævnt niveau over 8 m/s.
- Der er stor forskel i vindretning og position, men ikke noget tydeligt mønster der indikerer, hvad dette skyldes.
- Der detekteres procentvis flest toner ved position 1 – generelt er der god detektionsrate fra ca. 4-10 m/s.



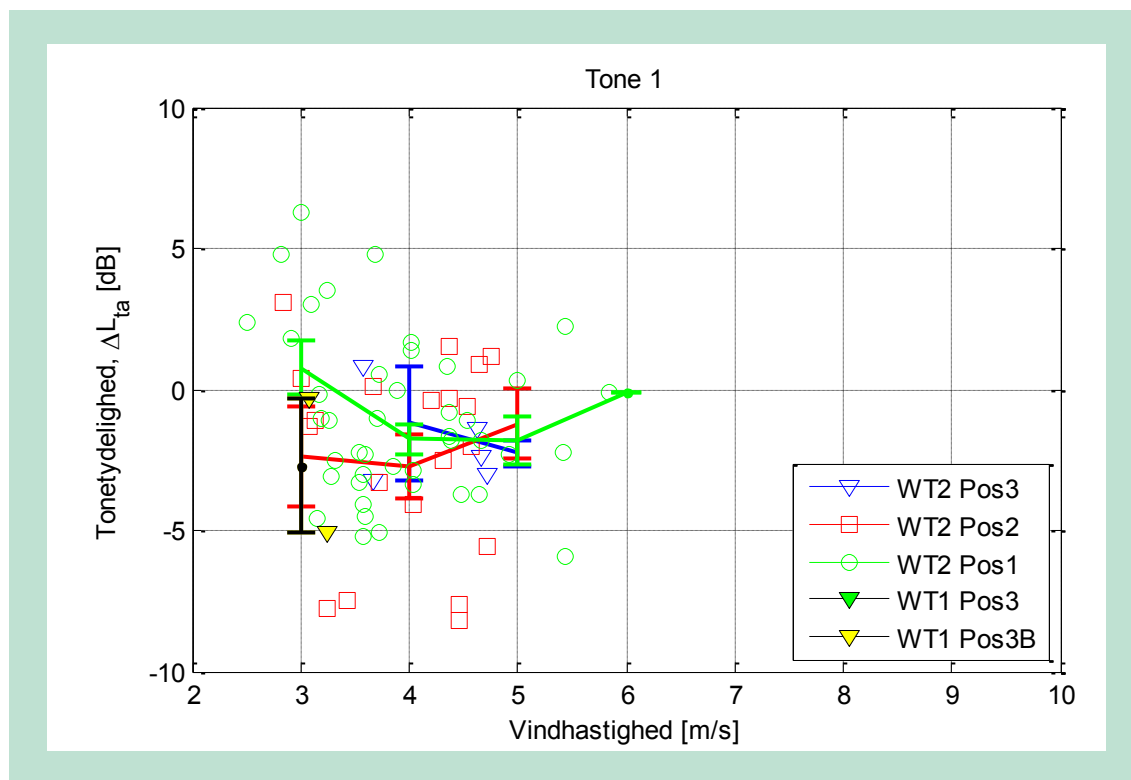
FIGUR 69. Fordeling af 1-minutperioder fordelt for vindhastigheder, vindretninger og målepositioner for toneområde 3. Hver delplot viser en position og vindretning. På hver plot er vist antal 1-minutoptagelser (dvs. mulige perioder for detektion af toner), antal detektioner (dvs. i hvor mange perioder er der detekteret toner) samt en promillevis fordeling.

13.2 Éndagsmålekampagne

Målekampagnen foretaget over én dag i december 2016 er med færre mikrofoner end flerdagesmålekampagnen og ikke nødvendigvis foretaget i samme målepunkter. Det giver derfor ikke mening at slå dataene fra ændagsmålekampagnen sammen med flerdagesmålekampagnen. Analyse i toneområde 1 og 2 giver dog stadig god mening, hvilket er udført og vist i efterfølgende figurer, hvor resultaterne for alle 5 mikrofoner er vist i hver figur.

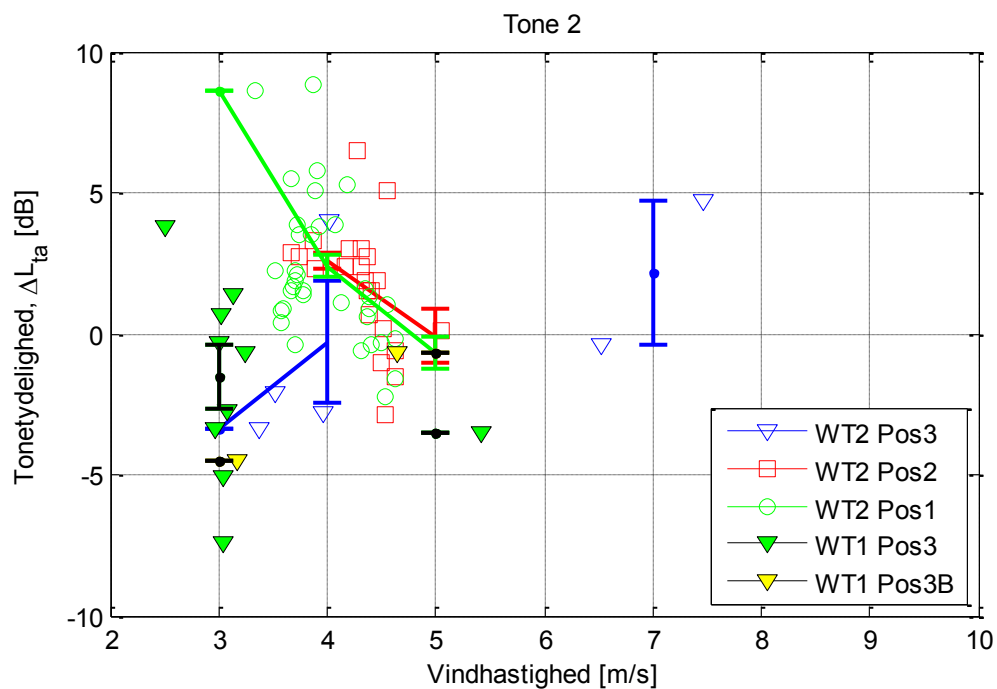
Først er tonetydeligheden vist som DL_{ta} i FIGUR 70 og FIGUR 71 for hhv. toneområde 1 og 2. Både enkelttoner i de to toneområder og middelværdier er vist på figurene, hvor det kan ses, at der detekteres flest toner tættest på vindmøllerne og færre jo større afstand til vindmøllerne. Der er detekteret få data ved 6 m/s (og ingen ved 8 m/s), og dette selvom der for mikrofonpositionerne relateret til WT2 (Pos 1-3) er tæt på samme antal optagne 1-minutperioder mellem 4 og 8 m/s, se FIGUR 76. Vindretningen er under optagelserne relativt konstant omkring VSV-V, se FIGUR 77. Det vil sige, at vindretningen hovedsageligt var sidevind for begge nabopositioner.

For mikrofonpositionerne relateret til WT1 (Pos 3 og 3B) er der ingen optagelser ved 8 m/s, mens der er ca. samme antal optagelser ved vindhastighederne 3-6 m/s. At der detekteres toner ved lavere vindhastigheder end 6 m/s, men næsten ikke nogen ved 6 m/s og slet ikke ved 8 m/s indikerer derfor, at tonerne i de analyserede toneområder er tydeligere ved lavere vindhastigheder end 6 og 8 m/s. For de mikrofonpositioner, hvor der er data nok til at beregne en middelværdi, er der ikke en entydig tendens for tonetydelighed i forhold til vindhastighed, hvilket formentlig skyldes de relativt få datapunkter.

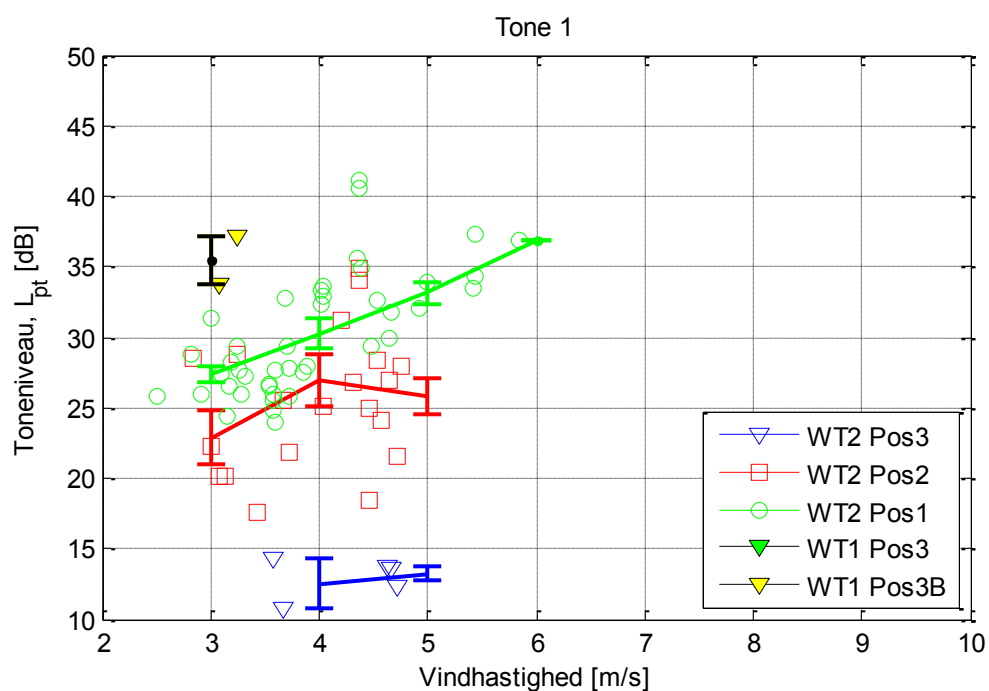


FIGUR 70. Toneområde 1. Tonetydelighed (ΔL_{ta}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.

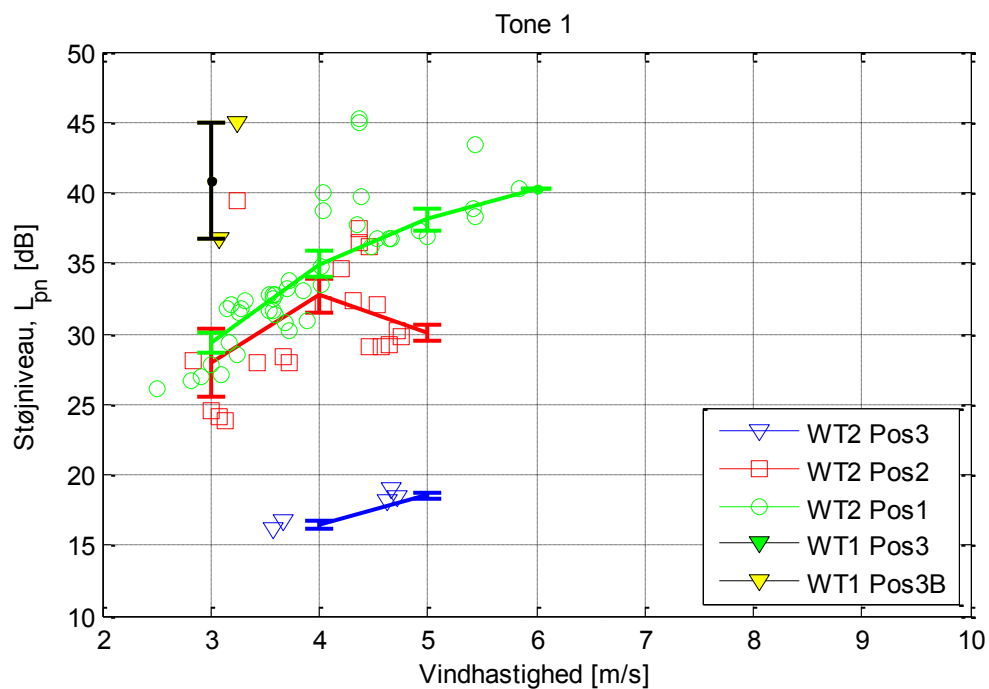
For både toneniveau og niveau af maskerende støjniveau i det kritiske bånd ser der for toneområde 1, se FIGUR 72 og FIGUR 73, ud til, at begge falder jo lavere vindhastighed. For toneområde 2, se FIGUR 74 og FIGUR 75, er tendenserne mindre tydelige, men toneniveauet ser ud til at stige med lavere vindhastighed, mens niveauet af den maskerende støj overordnet ser ud til at falde med lavere vindhastighed.



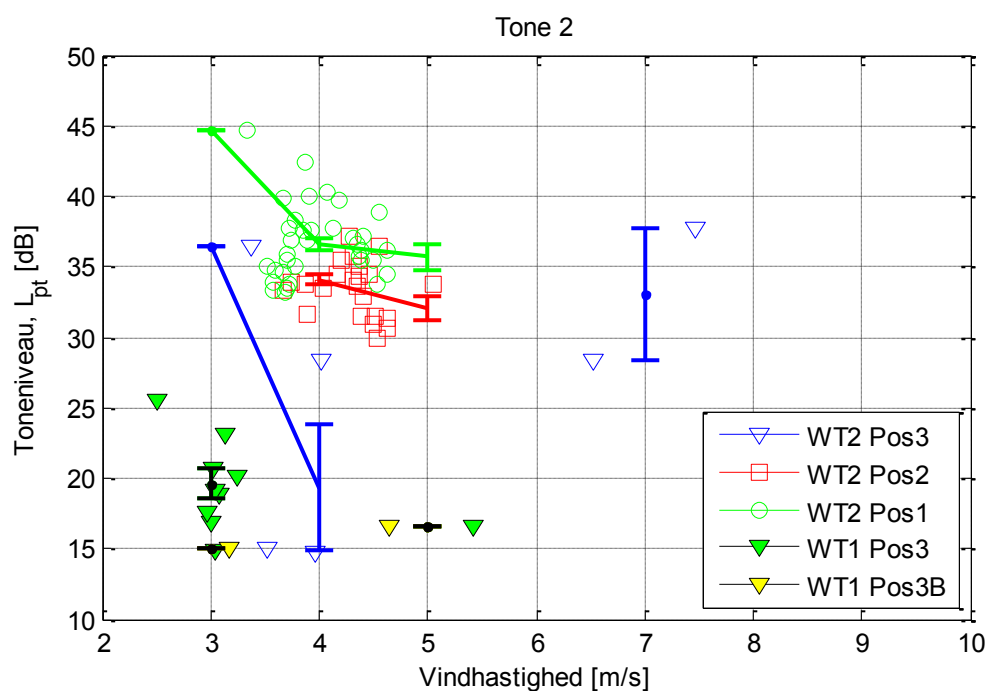
FIGUR 71. Toneområde 2. Tonetydelighed (ΔL_{ta}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.



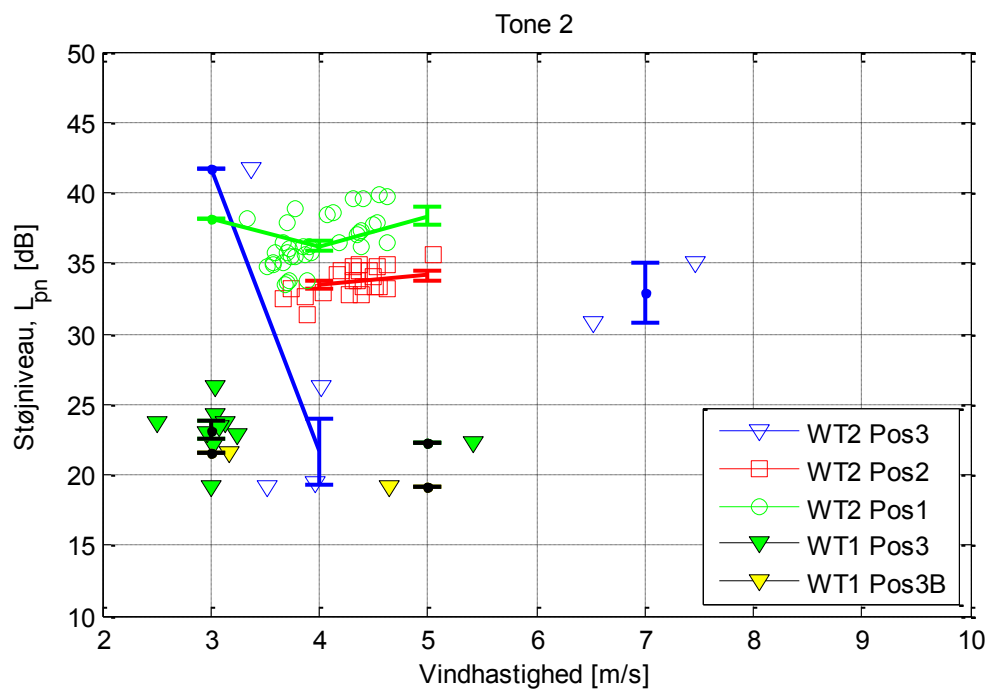
FIGUR 72. Toneområde 1. Toneniveau (L_{pt}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.



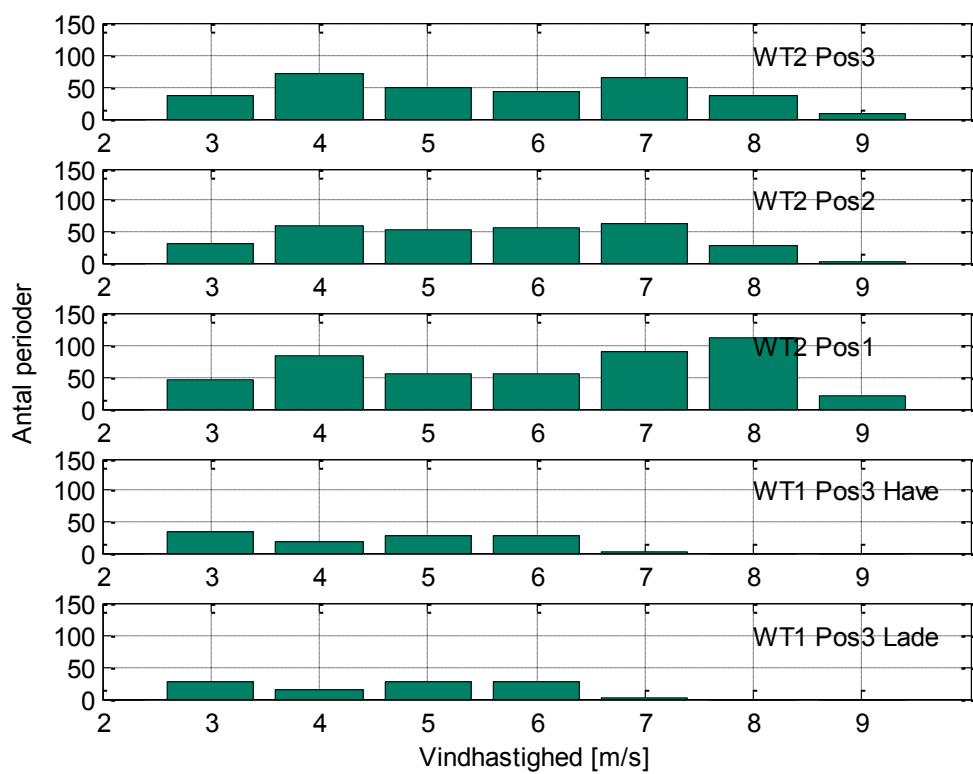
FIGUR 73. Toneområde 1. Niveau af maskerende støj i det kritiske bånd (L_{pn}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.



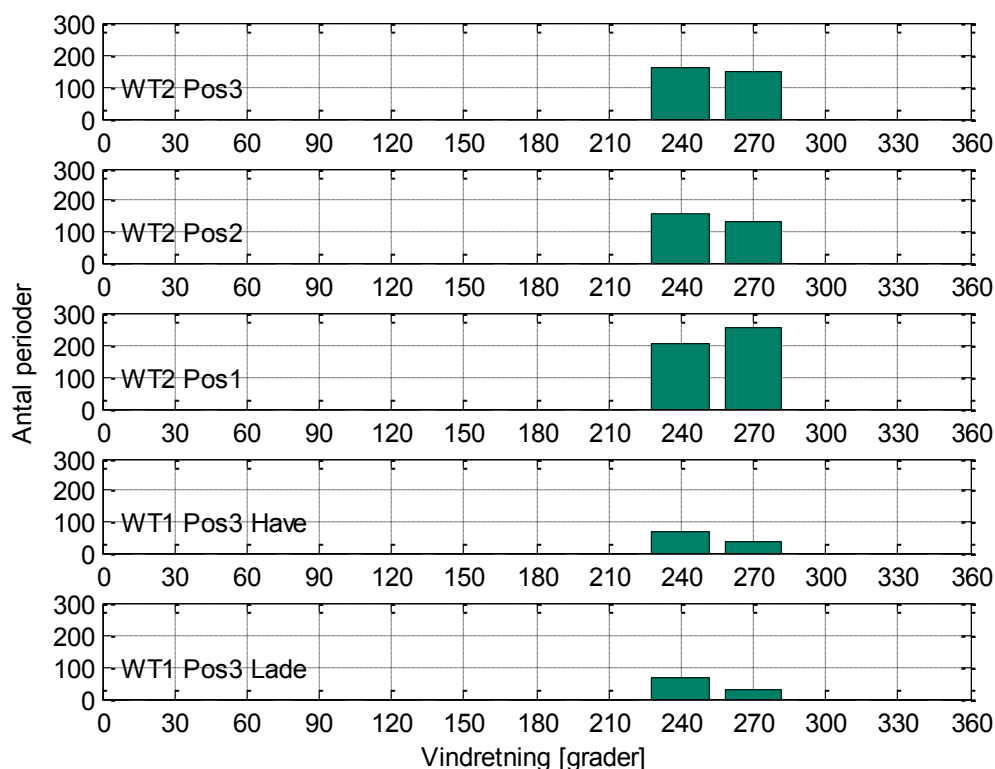
FIGUR 74. Toneområde 2. Toneniveau (L_{pt}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.



FIGUR 75. Toneområde 2. Niveau af maskerende støj i det kritiske bånd (L_{pn}) som en funktion af vindhastighed vist for både hver 1-minutperiode for hver mikrofon og som middelværdi og konfidensinterval.



FIGUR 76. Fordeling af 1-minutperioder med valide optagelser fordelt på mikrofonposition og vindhastighed.



FIGUR 77. Fordeling af 1-minutperioder med valide optagelser fordelt på mikrofonposition og vindretning. X-aksen refererer til kompasretningen, hvor 0° svarer til Nord.

13.3 Opsummering af toneanalyse

Der er udvalgt tre toneområder ved hjælp af mønstergenkendelse, hvori der (for flerdagesmålekampagnen) findes tydelige tonedetekteringer i alle positioner og for både et stort vindhastighedsområde og vindretningsområde:

- Toneområde 1 (tonecenterfrekvenser fra ca. 800 Hz – 1900 Hz)
- Toneområde 2 (tonecenterfrekvenser fra ca. 90 Hz – 200 Hz)
- Toneområde 3 (tonecenterfrekvenser fra ca. 50 Hz – 70 Hz)

På baggrund af mønstergenkendelsen antages, at hovedparten af tonedetekteringerne for toneområde 1 og 2 stammer fra vindmøllen. Resultaterne med toneområde 3 har dog nogle store udsving. Disse kunne forklares med, at der også er kommet toner med fra andre kilder.

Flerdagesmålekampagnen er analyseret for alle tre toneområder, og éndagsmålekampagnen er analyseret for toneområde 1 og 2.

For flerdagesmålekampagnen er data for målepositionerne grupperet, dvs. alle tre mikrofonpositioner i IEC-afstand (P1-positionerne) er samlet til ét datasæt. Ligeledes er alle P2-positionerne samlet og nabopositionerne (P3) samlet til hvert sit datasæt. Vindretningen er udregnet for hver mikrofonposition og indsat relativt.

Analyserne er foretaget for parametrene: tonetydelighed, DL_{ta} , toneniveau, L_{pt} og niveau af maskerende støj, L_{pn} .

På baggrund af den udførte målekampagne ved Nollund kan det konkluderes, at de tydeligste toner ikke nødvendigvis findes ved 6 og/eller 8 m/s. Som oftest forekommer de tydeligste toner ved en lavere vindhastighed end 6 m/s. Betydning-

gen af vindretning er mindre sikker. Som oftest ses der kun lille eller ingen forskel mellem vindretningerne (bortset fra ved toneområde 3). Omvendt er tonerne ikke nødvendigvis tydeligst i medvindsretningen.

Niveauet af både toner og den maskerende støj stiger generelt op til ca. 7 m/s, hvorefter begge sædvanligvis er uændret ved højere vindhastigheder.

Bortset fra toneområde 3 detekteres få toner over 7 m/s, og specielt for toneområde 1 og 2 er den største detektionsrate under 6 m/s.

14. Amplitudemodulation

Amplitudemodulation (ofte forkortet AM) er et fænomen, der kan opstå i vindmøllestøjen, og er en akustisk karakter ligesom tonalitet og impulser i støjen. Brancheforeningen Renewable UK har gennemført et stort studie [18], der beskriver, hvordan og hvorfor AM opstår. Støjen tæt ved en vindmølle vil altid være amplitudemoduleret pga. direktiviteten af den aerodynamiske støj fra vingerne. Jo længere man bevæger sig væk fra vindmøllen, des mindre betydning har direktiviteten af den aerodynamiske støj. På trods af dette kan man i naboafstande opleve, at støjen fra vindmøller også i denne relativt store afstand er amplitudemoduleret i visse perioder.

En af konklusionerne i Renewable UK-studiet er, at fænomenet skyldes en øget vindgradient (forskel i vindhastighed som funktion af højden over terræn), som typisk opstår morgen, aften og nat, men er mindre udtalt i dagperioden på grund af solopvarmningen. Når forskellen mellem vindhastigheden i bunden af vingernes rotation og i toppen af vingernes rotation er stor, kan det ske, at vingerne staller pga. forkert pitchvinkel i den øverste del af rotationen. Dette giver anledning til øget støjudsendelse, og dermed bliver vindmøllestøjen amplitudemoduleret med vingernes rotationsfrekvens, også kaldet Blade Passage Frequency (forkortet BPF). Dette refereres ofte til med onomatopoeiske ord som "swush", "thump" og "whoosh" som en beskrivelse af lyden. Det britiske Institute of Acoustics har på baggrund af Renewable UK-projektet udviklet en metode til at detektere AM i vindmøllestøjen [19].

Indhold af amplitudemodulation er i Storbritannien fundet til at øge genen af vindmøllestøj. Det er dog først i de senere år, at fænomenet har fået opmærksomhed, og hvor der er udført forskning i området. Amplitudemodulation er ikke beskrevet i de nuværende danske regler for vindmøllestøj. Det har dog været et ønske fra Miljøstyrelsen, at et eventuelt niveau af amplitudemodulation vil blive undersøgt som en del af denne undersøgelse. Kvantificering af niveauet af amplitudemodulation i vindmøllestøj giver kun mening i naboafstand, og da beboerne i naboposition WT1 P3 beskrev vindmøllestøjen med nogle af de karakteristiske ord for amplitudemodulation, er vindmøllestøjen i denne position blevet analyseret ved hjælp af metoden udviklet af Institute of Acoustics.

14.1 Amplitudemodulation IOA-metode

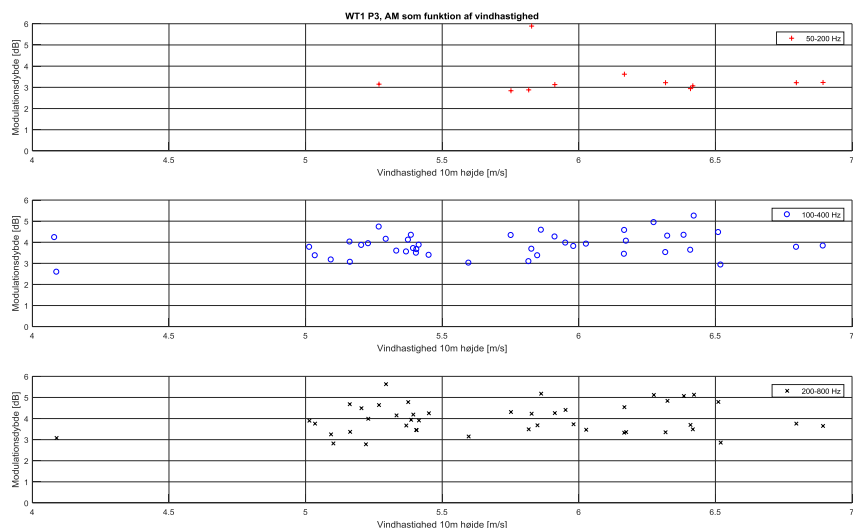
Metoden fra Institute of Acoustics er en hybridmetode, der bygger på analyse af $L_{Aeq,100ms}$ -værdier. Metoden kvantificerer et peak-to-peak niveau, dette er modulationsdybden i støjen. $L_{Aeq,100ms}$ -værdierne inddeles i blokke af 10 sekunder, og der udføres en Fourier-analyse for at fremstille et modulationsspektrum. Hvis der er en klar peak ved den forventede BPF (Blade Passage Frequency) i modulationsspektret, udføres en invers Fourier-analyse, så man igen står med det rå tidssignal.

Modulationsdybden af 10-sekunders perioden bestemmes herefter som forskellen mellem de statistiske værdier L_5 og L_{95} . Dette udføres for støjen i 3 frekvensbånd: 50-200 Hz, 100-400 Hz og 200-800 Hz. Metoden giver en værdi, modulationsdybden, i dB for 10-sekunders perioden. Andre støjklender såsom bilpassager, fugle og andet kan påvirke målingen og i analysen af AM give en falsk, høj AM-værdi. For at gøre metoden mere robust overfor udefrakommende støjklender beregnes en prominence-værdi som forholdet mellem amplituden af værdien ved BPF i modulationsspektret og det maskerende støjniveau.

Den samlede AM-rating beregnes for 10-minutters perioder under kriterierne, at 50 % af perioden indeholder valide 10-sekunders perioder med AM detekteret over 1,5 dB med prominence-værdier over 4.

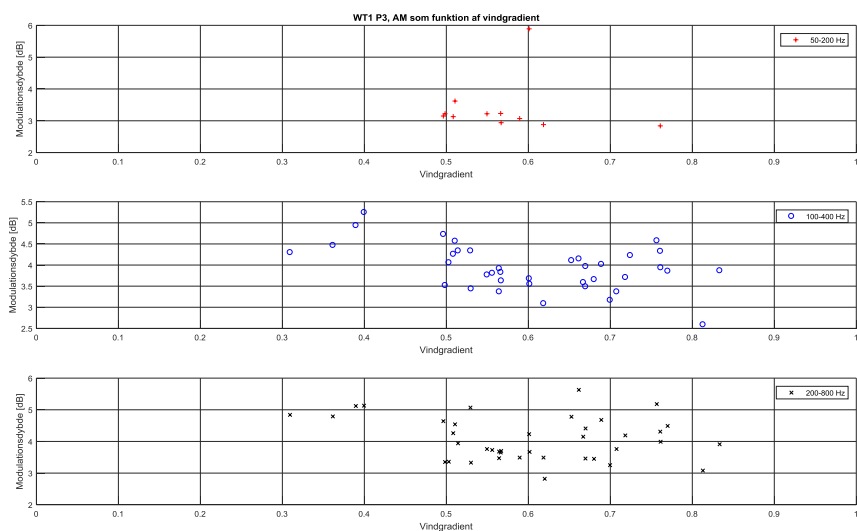
14.2 Amplitudemodulation WT1 P3

Udendørsmålingerne foretaget hos nabo WT1 P3 er analyseret for AM. Første skridt i analysen er udført ved at analysere $L_{Aeq,100ms}$ -værdier. De 10-minutters perioder, hvori der er detekteret AM over 3 dB, er herefter analyseret i de 3 frekvensbånd: 50-200 Hz, 100-400 Hz og 200-800 Hz.



FIGUR 78. 10-minutters perioder med AM > 3 dB detekteret. Værdierne er vist som funktion af vindhastigheden.

Som det ses af FIGUR 78 er der detekteret flere perioder med AM > 3 dB i alle 3 frekvensbånd. Der er dog betydeligt flere perioder med AM i frekvensbåndene 100-400 Hz og 200-800 Hz. Der er ingen sammenhæng mellem modulationsdybden og vindhastigheden. Dog ses det, at AM ikke opstår ved hhv. høje og lave vindhastigheder. Det mindre antal tilfælde med AM ved vindhastigheder over 7 m/s hænger sandsynligvis sammen med, at baggrundsstøjen fra vegetation maskerer den modulation af vindmøllestøjen, som der måtte være. Og ved de lave vindhastigheder er støjniveauet fra møllerne ikke højt nok, til at modulationsdybden overstiger 3 dB, som er sat som den nedre grænse for denne analyse.



FIGUR 79. 10-minutters perioder med AM > 3 dB detekteret. Værdierne er vist som funktion af vindgradienten.

På FIGUR 79 er modulationsdybden for 10-minutters perioder med $AM > 3\text{ dB}$ vist som funktion af vindgradienten. Vindgradienten er for målingerne i Nollund udregnet på grundlag af vindhastigheden i navhøjde (som er beregnet på grundlag af den producerede elektriske effekt eller målt med nacelleanemometeret i de perioder, hvor effekten har oversteget 95 % af den nominelle effekt) samt vindhastigheden i 10 m højde målt med anemometeret på vindmålermasten.

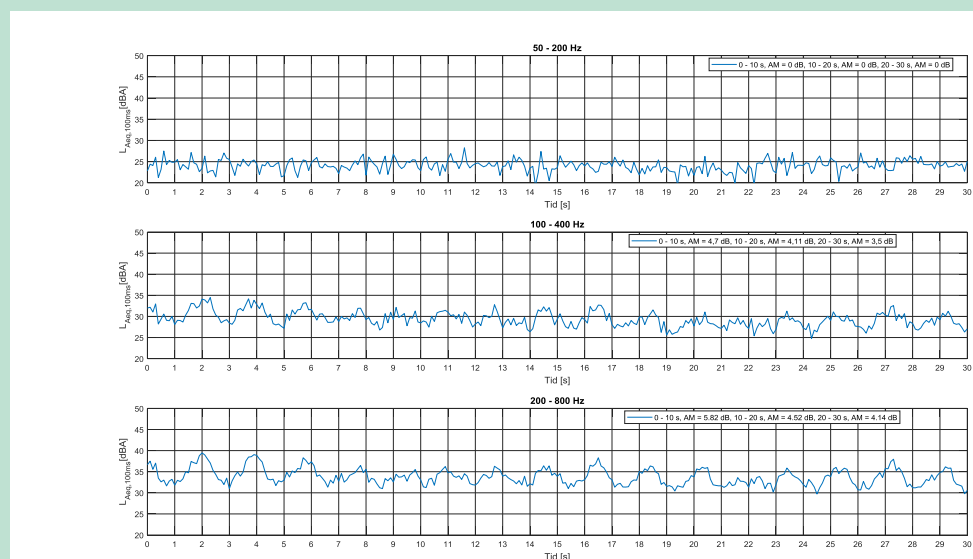
Ud fra resultaterne af Renewable UK-rapporten ville det forventes, at modulationsdybden steg med vindgradienten. Dette er dog ikke tilfældet for vindmøllerne i Nollund. Som det ses af FIGUR 87, så er målingen i WT1 P3 foretaget i haven, hvor man fra positionen kan se den øverste del af rotorplanet fra WT1 og WT2. Med laden fungerende som en støjskærm må det forventes, at støjen udsendt fra den nederste halvdel af rotorplanet bliver dæmpet mere end støjen fra den øverste halvdel af rotorplanet.

Udover en øget vindgradient som årsag til AM kan dette også være med til en øget forekomst af AM, som er specifik for denne nabo og dermed maskere sammenhængen mellem AM og vindgradient.

Perioder med $AM > 5\text{ dB}$ er gennemlyttet og i flere af tilfældene er det tvivlsomt, om modulationen skyldes vindmøllestøjen eller primært fugle i området. Der har ikke været tid i projektet til at gennemlytte båndpassfilterede filer, så hvis dette forhold skal afklares nærmere, skal der foretages en yderligere undersøgelse.

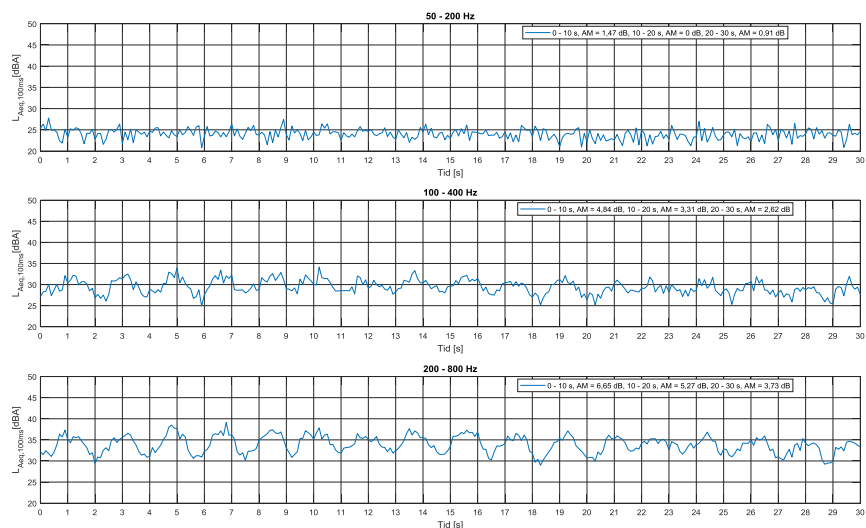
14.3 Eksempler på AM

Af perioderne med AM over 3 dB er der udvalgt tre 30-sekunders passager med tydeligt hørbar AM af vindmøllestøjen.

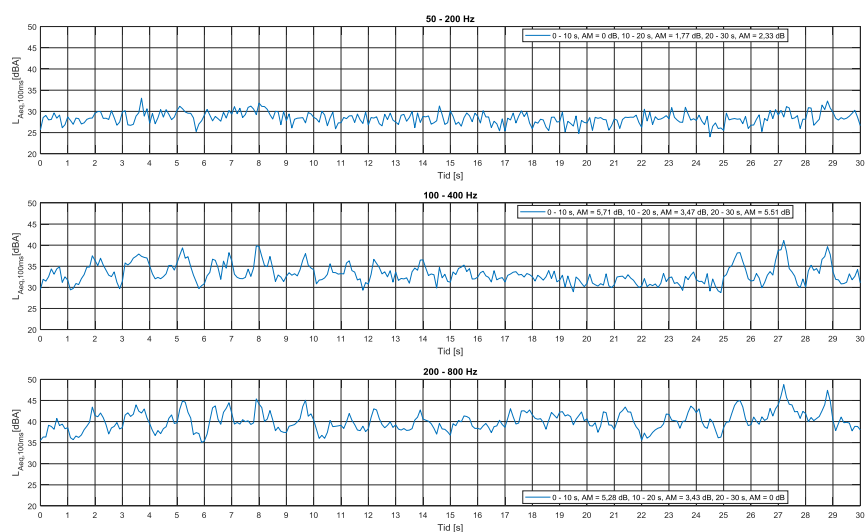


FIGUR 80. Skriverstrimmel der viser $L_{Aeq,100ms}$ i målepunkt WT1 P3 som funktion af tiden for de 3 frekvensbånd. Målingen er fra perioden den 6. januar 2017 kl. 05:57:30 til 05:58:00.

Som det ses i FIGUR 80, så kan man af det nederste plot, 200-800 Hz tydeligt se, hvordan støjen stiger og falder periodisk med, hvad der svarer til BPF (ca. 0,6 Hz i dette tilfælde). Modulationsdybden er beregnet for de tre 10-sekunders perioder, der er i lydklippet på 30 sekunder. Det er tydeligt, at modulationsdybden er størst i frekvensbåndet 200-800 Hz, lidt mindre ved 100-400 Hz og ved 50-200 Hz er der ikke registreret AM.



FIGUR 81. Skriverstrimmel der viser $L_{Aeq,100ms}$ i målepunkt WT1 P3 som funktion af tiden for de 3 frekvensbånd. Målingen er fra perioden den 6. januar 2017 kl. 06:05:50 til 06:06:20.



FIGUR 82. Skriverstrimmel der viser $L_{Aeq,100ms}$ i målepunkt WT1 P3 som funktion af tiden for de 3 frekvensbånd. Målingen er fra perioden den 6. januar 2017 kl. 10:12:00 til 10:12:30.

På FIGUR 81 og FIGUR 82 ses den samme tendens som beskrevet for FIGUR 80. Det ses også tydeligt, at AM er et periodisk fænomen, som er tydeligere i nogle perioder end andre.

14.4 Opsummering amplitudemodulation

Metoden fra IOA benyttet til analysen af amplitudemodulation (AM) har vist sig at være robust. Dog ville en sammenkørsel mellem data fra vindmøllernes rotationsfrekvens og den registrerede peak i modulationsspektret kunne eliminere yderligere "false positives", som fejlregistreringer af AM i algoritmen kaldes.

Ved gennemlytning af AM-passager med en modulationsdybde over 5 dB, var den registrerede peak i modulationsspektret ofte ved en lavere frekvens, end hvad Blade Passage Frequency (BPF) burde være ved denne vindhastighed. Data om vindmøllegeneratorernes omdrejningstal er registreret under målingerne, men da gearingsforholdet ikke kendes for møllen, har det ikke været muligt at sammenkøre data med rotoromdrejningstallet. Metoden er derfor ikke fuldt automatiseret, og perioder med AM kræver derfor stadig en subjektiv vurdering ved gennemlytning af perioden. For den specifikke site (Nollund) er der ved nabomålingerne ikke registreret nogen sammenhæng mellem AM og hhv. vindhastighed eller vindgradient.

Der er registreret flere perioder med $AM > 3$ dB, som ifølge et forslag i en rapport fra Department of Energy & Climate Change i England [19] ville give et straffillæg på mellem 3-5 dB på grund af øget gene.

Det er dog vigtigt at påpege, at det kun er et forslag til et straffillæg, og at det vil kræve yderligere undersøgelse af genen fra amplitudemoduleret vindmøllestøj, førend dette indføres. Straffillægget er desuden udarbejdet i forhold til de engelske støjgrænser. I denne vurdering må det dermed antages, at en vis grad af amplitudemodulation allerede er dækket ind i de geneundersøgelser, som de danske støjregler om vindmøllestøj er sammenlignet med. Det er ikke undersøgt, om niveauet af amplitudemodulation ændrer sig uden for vindforholdene reguleret i Bekendtgørelse 1736, men udelukkende om amplitudemodulation kan detekteres.

15. Konklusion

Formålet med opgaven er at undersøge, om de nuværende retningslinjer for måling af støjemission og beregning af støj fra vindmøller beskrevet i Vindmøllebekendtgørelsen giver et retvisende billede af støjbidraget hos naboerne samt at foretage målinger under andre betingelser end bekendtgørelsen foreskriver.

I undersøgelsen er der foretaget målinger udendørs og indendørs ved naboer til en vindmøllepark ved Nollund i Jylland. Det er tilstræbt, at målingerne omfatter andre vindforhold end forudsat i Vindmøllebekendtgørelsen. Derfor er målingerne foretaget under et bredere interval af vindhastigheder end omkring 6 og 8 m/s i 10 m højde, og der er målt i andre retninger end medvindsretningen fra vindmøller til naboer.

Det er tilstræbt, at måleresultater i muligt omfang bl.a. kan belyse følgende spørgsmål:

- Er der systematiske forskelle mellem måleresultater og beregningsresultater?
- Giver andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s anden støj/tydeligere toner/anden lavfrekvent støj end forventet?
- Giver andre vindretninger mere støj/tydeligere toner/anden lavfrekvent støj end medvind?

For at opnå så stor spredning i vejrforholdene under målingerne som muligt er der udført målinger ad to omgange:

1. Over knapt én dag med op til 5 samtidige mikrofoner – Målinger både indendørs og udendørs.
2. Over ca. 4 dage med op til 15 samtidige mikrofoner – Målinger både indendørs og udendørs.

Der er udført målinger, der dækker næsten alle vindretninger, hvor vindhastigheden varierer mellem 0 og ca. 15 m/s. Målingerne er udført for både positive og negative temperaturer. Det er desuden verificeret, at møllerne har kørt med last.

Der har for begge målekampanjer været opsat mikrofoner både tæt på vindmøllerne og tæt på naboerne. I størstedelen af måleperioderne er der målt totalstøj, dvs. både støj fra vindmøllerne og baggrundsstøj (vegetationsstøj, vindstøj, trafikstøj osv.), men i korte perioder har vindmøllerne været slukket, dvs. at niveauet af baggrundsstøjen har kunne bestemmes for disse perioder.

Generelt observeres det, at niveauet af vindmøllestøjen er kraftigst/tydeligst tæt på vindmøllerne, og at vindmøllestøjen er svagere, jo længere væk fra vindmøllerne der måles. Ved naboerne varierer støjbidraget fra vindmøllerne mellem at være hhv. lavere og højere end baggrundsstøjen.

Kortidsmålingerne viser generelt, at udendørsmålinger ved naboerne er påvirket af baggrundsstøj fra primært vegetation. Derfor er det problematisk at sammenligne målingerne hos naboerne med gældende støjgrænser og ligeledes med beregninger efter både BEK 1736 og Nord2000. Indendørsmålingerne af den lavfrekvente støj målt indendørs har et lavere niveau end støjgrænserne. For støjen indendørs er der en bedre overensstemmelse mellem beregninger og målinger i det lavfrekvente område end mellem resultaterne af beregninger og målinger udendørs for den almindelige støj (20-10.000 Hz).

Der er ved indendørs målingerne af den lavfrekvente støj ikke konstateret resultater for $L_{pA,LF}$, der overskrider støjgrænserne i vindmøllebekendtgørelsen.

Langtidsmålingerne viser generelt, at der for målingerne tæt på møllen ses en klar sammenhæng mellem vindhastigheden og støjen samt et tydeligt mønster af en pitch-reguleret mølle, hvor støjen stiger op til ca. 7 m/s og derefter flader ud. Dette mønster aftager, jo længere man bevæger sig væk fra møllen. Herudover ses det, at støjniveauet i naboafstand (P3) ved nogle vindhastigheder ligger højere end eller på niveau med støjniveauet målt tættere på møllen. Baggrundsstøjen er altså årsagen til, at det er svært at lave valide målinger, jo længere man bevæger sig væk fra møllen.

Ud fra målingerne er der ikke noget der indikerer, at vindmøllernes støjbidrag skulle være kraftigere i andre vindretninger end medvindsretning mellem vindmøller og naboer. Det skal dog bemærkes, at det ikke har været muligt hos naboerne at måle under en tilstrækkelig varieret kombination af vindhastigheder og -retninger inden for dette projekt, og at yderligere målinger hos naboerne bør gennemføres.

Vindmøllernes støjemission ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s er ikke anderledes end antaget; Alle målinger nær møllerne viser den normale tendens til, at støjen niveaumæssigt stabiliserer sig, når vinden kommer over 7 m/s.

Målingerne er sammenlignet med beregninger af lydudbredelse efter hhv. BEK 1736 og Nord2000. Der er generelt god overensstemmelse mellem de målte og beregnede værdier, når man kigger på den statistiske værdi L_{A90} (det A-vægtede støjniveau som overskrides i 90 % af tiden, og som derfor ikke medtager kortvarige forstyrrelser). Der er ikke noget i de sammenligninger, der indikerer systematiske forskelle mellem målinger og beregninger. For højere vindhastigheder er der en lidt lavere overensstemmelse mellem målinger og beregninger, hvilket skyldes det øgede baggrundsstøjniveau fra omkringliggende vegetation.

Ved nabo mod sydøst (WT1 P3) er der registreret flere perioder med amplitudemodulation. Metoden udviklet af Institute of Acoustics har vist sig at være robust, men stadig med et behov for subjektiv gennemlytning for at verificere, hvorvidt amplitudemodulation stammer fra møllerne eller andre uvedkommende støjkluder. Der er ikke for denne specifikke site og måling registreret nogen sammenhæng mellem amplitudemodulation og hhv. vindhastighed eller vindgradient.

Ifølge rapporten fra Department of Energy & Climate Change i England, der har udviklet et 'penalty scheme', ville de registrerede niveauer af amplitudemodulation give anledning til et straffetillæg på 3-5 dB. Det er dog vigtigt at påpege, at det er udarbejdet i forhold til de engelske støjgrænser. I denne vurdering må det dermed antages, at en vis grad af amplitudemodulation allerede er dækket ind i de geneundersøgelser som de danske støjregler om vindmøllestøj er sammenlignet med.

Der er udført toneanalyse for alle 1-minutperioder, og der er udvalgt tre toneområder, der forefindes ved både forskellige vindhastigheder og vindretninger, for at kunne undersøge variationen af disse. Da de fleste af optagelserne er totalstøj (støjbidrag fra både vindmøller og baggrundsstøj), er data for de tre toneområder fundet via mønstergenkendelse, hvorved indflydelsen fra baggrundsstøj begrænses. De tre toneområder ligger i følgende frekvensområder: ca. 800-1900 Hz, ca. 90-200 Hz og ca. 50-70 Hz. For de undersøgte toneområder detekteres der typisk meget få toner for vindhastigheder over 8 m/s.

På baggrund af analyserne for den aktuelle vindmøllepark kan det ses, at den højeste tonetydelighed ikke nødvendigvis ses ved 6 m/s og/eller 8 m/s. Ofte ses en højere tonetydelighed ved lavere vindhastigheder end 6 m/s. Betydningen af vindretning er mindre sikker. De forskelle, der observeres, er ikke systematiske, og forskellene er ofte små. Omvendt er tonetydeligheden ikke nødvendigvis størst i medvindsretningen.

Niveauet af både toner og maskerende støj stiger generelt op til ca. 7 m/s, hvor begge oftest er uændrede ved højere vindhastigheder.

Bilag 1. Referencer

- [1] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1736 af 21. december 2015: "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller".
- [2] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284 af 15. december 2011: "Bekendtgørelse om støj fra vindmøller".
- [3] Vindmøller ved Nollund Kirkevej, VVM-redegørelse og miljørapport, maj 2011.
- [4] Miljøstyrelsens vejledning nr. 1: "Støj fra vindmøller", 2012.
- [5] Rapport: "Validation of the Nord2000 propagation model for use on wind turbine noise", DELTA 2009.
- [6] Rapport: "Proposal for Nordtest Method: Nord2000 – Prediction of Outdoor Sound Propagation", AV1106/07, revideret 13. januar 2014.
- [7] DELTA testrapport: "Dokumentation af støj fra tre vindmøller ved Nollund i Sydjylland", DANAK 100/1666, 2013.
- [8] Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6/1984: "Måling af ekstern støj fra virksomheder".
- [9] Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 9/1997: "Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø".
- [10] Referencelaboratoriets Orientering nr. 13: "Måling af hørbare toner i støj", 1991.
- [11] Referencelaboratoriets Orientering nr. 31: "Forslag til revideret objektiv metode til bestemmelse af tydeligheden af toner i støj", 2001.
- [12] Orientering nr. 47: "Toneanalyser – den danske metode", Referencelaboratoriet 2013.
- [13] Miljøprojekt nr. 1894: "Regler og metoder for støj fra vindmøller i andre lande", Miljøstyrelsen, november 2016.
- [14] Rapport nr. 28 "Vurdering af toneindhold i vindmøllestøj hos naboer", Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Støjmålinger, DELTA 2015.
- [15] Miljøprojekt nr. 1852: "Støj fra store, nyere danske vindmøller som funktion af vindhastigheden", Miljøstyrelsen, 2016.
- [16] DS/EN 61400-11:2013: "Elproducerende vindmøller - Del 11: Teknikker til måling af akustisk støj".
- [17] Miljøprojekt nr. 1852: "Støj fra store, nyere danske vindmøller som funktion af vindhastigheden", Miljøstyrelsen, 2016.
- [18] Rapport: "Wind Turbine Amplitude Modulation: Research to Improve Understanding as to its Cause and Effect", Renewable UK, 2013.
- [19] Rapport: "A method for Rating Amplitude Modulation in Wind Turbine Noise", Institute of Acoustics – Amplitude Modulation Working Group, 2016.
- [20] Rapport: "Wind Turbine AM Review – Phase 2 Report", Department of Energy & Climate Change, 2016.

Bilag 2. Måleudstyr

I nedenstående TABEL 7 er anført det udstyr, der har været brugt under målingerne. Tabellen dækker udstyret brugt både under éndagsmålingen og flerdagsmålingen. Det primære udstyr til støjmålingerne følger DELTA's procedure for kalibrering, dvs. udstyret indsendes til kalibrering med jævne intervaller. Udstyr anvendt til opsamling af sekundær information (som fx vindmålermasterne) har ikke nødvendigvis fulgt kalibreringsintervallerne.

TABEL 7. Udstyr anvendt under målingerne

Nr.	Udstyr	Producent	Model	Kalibrering
17L027	Anemometer	Schiltknecht	655-660-LNE/21 66	Ja
17L046	Vindfane	Vector Instruments	W200P	Nej
17L055	Anemometer	Risø	P2546A	Ja
17L056	Anemometer	Risø	P2546A	Ja
1471L	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4188	Ja
1472L	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4188	Ja
1474L	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4188	Ja
06L038	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4189	Ja
06L042	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4189	Ja
06L045	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4189	Ja
06L047	½" Mikrofon	Brüel & Kjær	4189	Ja
06L057	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L059	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L060	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L061	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L062	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L063	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L064	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
06L067	½" Mikrofon	G.R.A.S.	40AE	Ja
09L031	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L032	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
09L033	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
09L035	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L036	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L037	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
09L038	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
09L039	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L042	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L043	Forforstærker	G.R.A.S.	26CA	Ja
09L044	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
09L045	Forforstærker	G.R.A.S.	26CF	Ja
1480L	Forforstærker	Brüel & Kjær	2671	Ja

1481L	Forforstærker	Brüel & Kjær	2671	Ja
1483L	Forforstærker	Brüel & Kjær	2671	Ja
02L019	Kalibrator	Brüel & Kjær	4231	Ja
11L018	Harddiskoptager	Sound Devices	744T	Ja
11L019	Harddiskoptager	Sound Devices	788T	Ja
1420L	Harddiskoptager	Sound Devices	788T	Ja
14L004	Dataopsamlingskort	National Instruments	9233	Ja
14L012	Dataopsamlingskort	National Instruments	9234	Ja
14L013	Dataopsamlingskort	National Instruments	9234	Ja
14L014	Dataopsamlingskort	National Instruments	9234	Ja
14L007	Dataopsamlingskort	National Instruments	9215	Ja
14L008	Dataopsamlingskort	National Instruments	9215	Nej
14L010	Dataopsamlingskort	National Instruments	9215	Nej
14L015	Dataopsamlingskort	National Instruments	9215	Ja

Bilag 3. Fotos af målesetup

I dette bilag bringes en række fotos af det anvendte målesetup for de to målekampagner.

Bilag 3.1 Endagsmålekampagne



FIGUR 83. Endagsmålekampagne. Foto af mikrofonen placeret ved nabo mod nord. Foto mod syd.



FIGUR 84. Fotos af de to indendørs mikrofoner anvendt ved den nordlige nabo. Foto mod syd.



FIGUR 85. Endagsmålekampagne. Foto af mikrofonen placeret mellem nabo mod nord og midterste vindmølle. Foto mod syd.



FIGUR 86. Endagsmålekampagne. Foto af mikrofonen placeret ved vindmølle WT2. Foto mod syd.



FIGUR 87. Endagsmålekampagne. Foto af mikrofonen placeret i haven ved nabo mod sydøst.
Foto mod nordvest.



FIGUR 88. Endagsmålekampagne. Foto af mikrofonen placeret bagved bygningerne ved nabo mod sydøst – hjørne tættest på vindmøllerne. Foto mod øst.



FIGUR 89. Foto af mikrofonen placeret tæt på vindmølle WT1. Foto mod nordvest.



FIGUR 90. Foto af mikrofonen placeret mellem vindmølle WT1 og nabo mod sydøst. Foto mod nordvest.



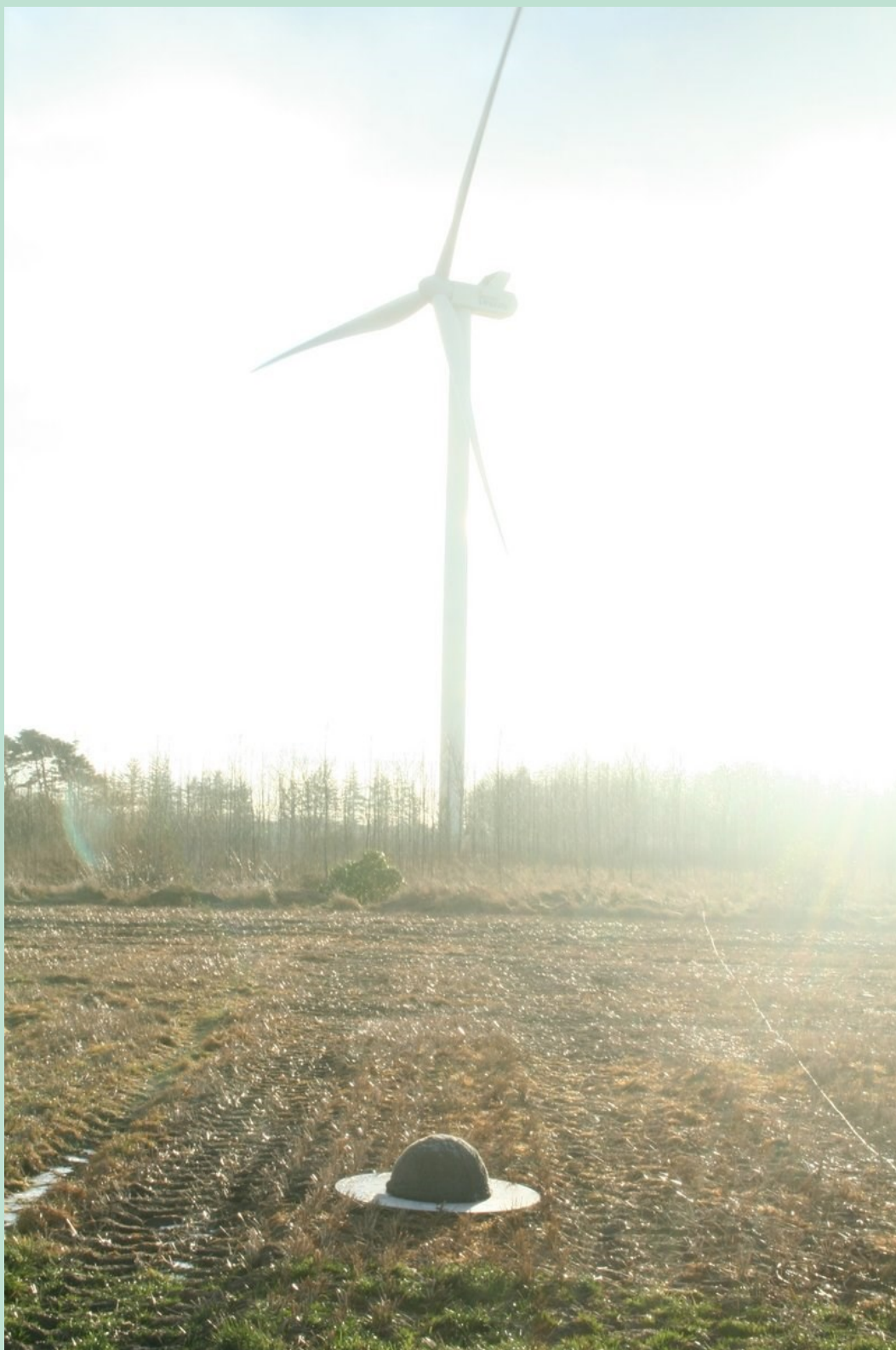
FIGUR 91. Foto fra haven ved nabo mod sydøst, hvor både mikrofon og vindmålermast kan ses. Foto mod vest.



FIGUR 92. Foto fra haven ved nabo mod sydøst, hvor både vindmålermast og mikrofon kan ses. Foto mod nord.



FIGUR 93. Foto af mikrofonen tæt på vindmølle WT2. Foto mod syd.



FIGUR 94. Foto af mikrofonen placeret mellem vindmølle WT2 og nabo mod nord. Foto mod syd.



FIGUR 95. Foto af mikrofonen i haven til nabopunkt nord. Bagved kan vindmålermasten ses.
Foto mod nord.



FIGUR 96. Foto inde fra stuen ved den nordlige nabo af én af de indendørs mikrofoner samt vinduespartiet. Igennem vinduet kan de tre vindmøller ses. Foto mod syd.



FIGUR 97. Foto inde fra stuen ved den nordlige nabo af de tre indendørs mikrofoner samt vinduespartiet. Foto mod syd.



FIGUR 98. Foto af mikrofonen placeret ved vindmølle WT3. Foto mod øst.



FIGUR 99. Foto af vindmålermasten placeret ved vindmølle WT3. Foto mod øst.



FIGUR 100. Foto af mikrofonen placeret mellem vindmølle WT3 og nabo mod sydvest. Foto mod øst.



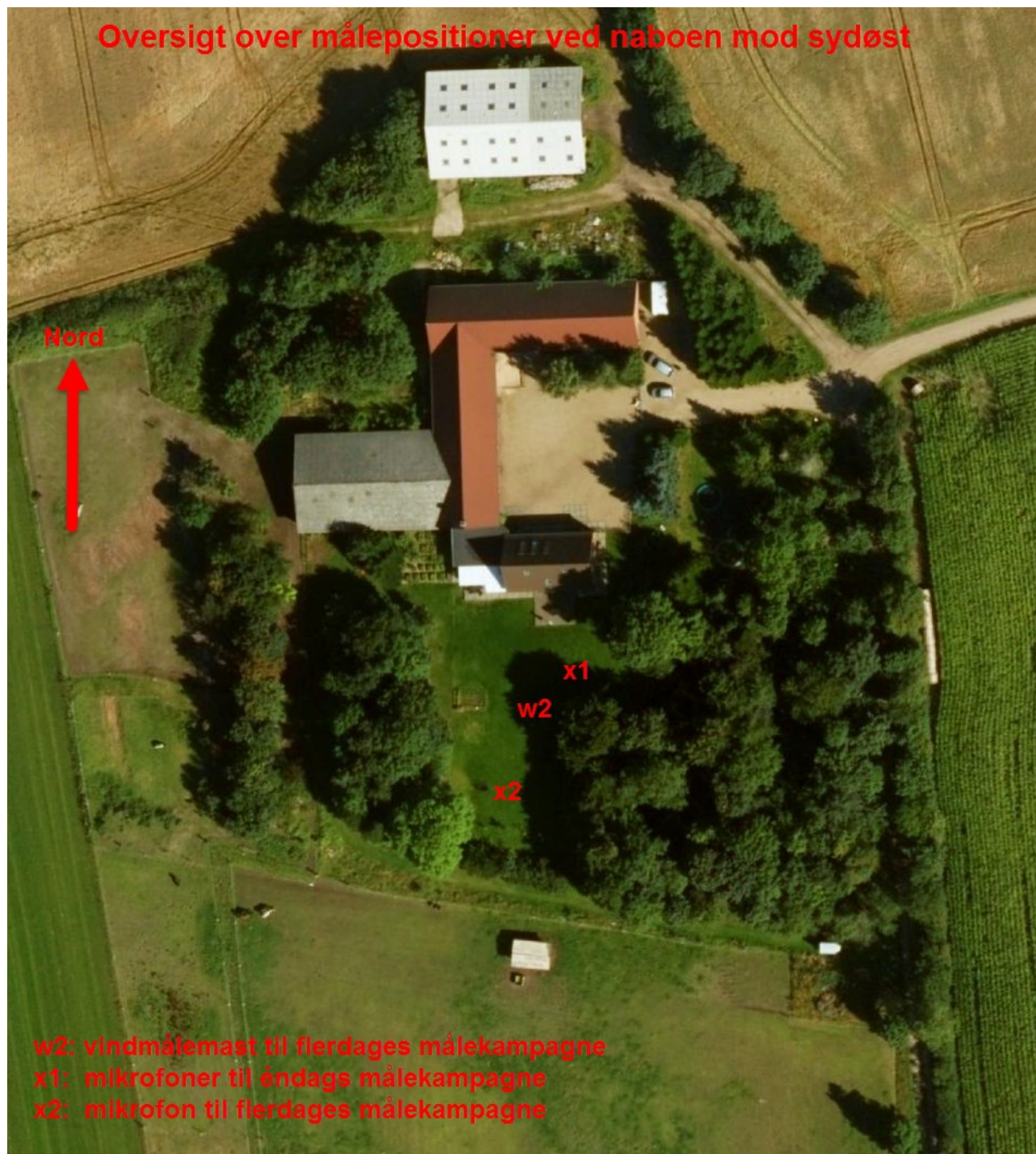
FIGUR 101. Foto af mikrofonen placeret ved nabo mod sydvest. Foto mod øst.



FIGUR 102. Foto af både én af de indendørs mikrofoner samt den udendørs mikrofon ved nabo mod sydvest. Det er desuden muligt at skimte én af vindmøllerne mellem træerne. Foto mod øst.



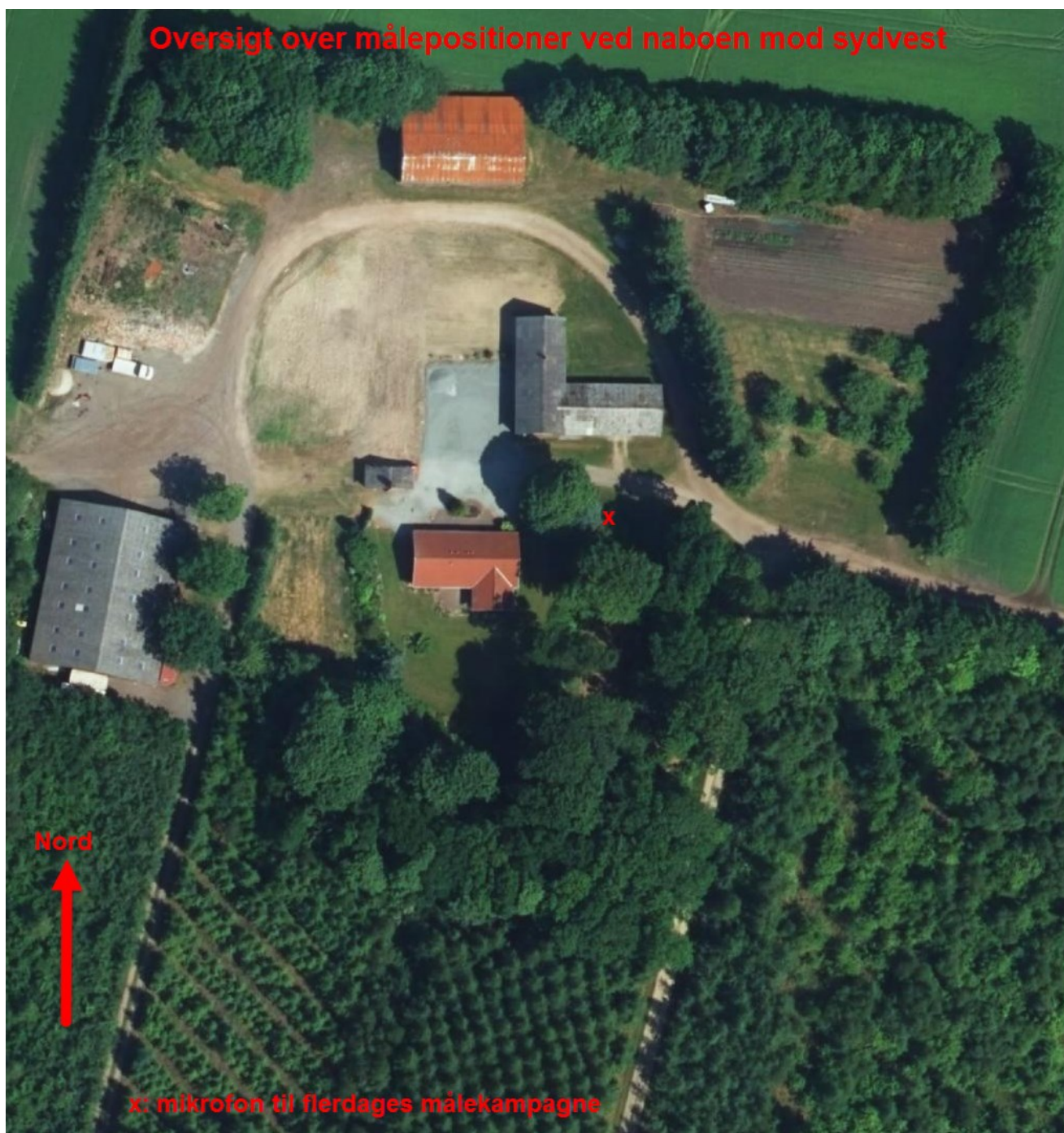
FIGUR 103. Foto af de tre indendørs mikrofoner ved nabo mod sydvest. Foto mod øst.



FIGUR 104. Oversigt over målesetup ved naboen mod sydøst. WT1 P3.



FIGUR 105. Oversigt over målesetup ved naboen mod nord. WT2 P3.



FIGUR 106. Oversigt over målesetup ved naboen mod sydvest. WT3 P3.

Bilag 4. Effektkurve for de primære vindmøller

Under målingen blev effektkurven for luftdensiteten 1,225 kg/m³ anvendt.

Document no.: 0025-7553 V02
Issued by: Technology R&D
Type: T05 – General Description

General Specification V112-3.0 MW
Appendices

Date: 2012-03-29
Class: 1
Page 36 of 59

12 Appendices

12.1 Mode 0

12.1.1 Power Curves, Noise Mode 0

Air density [kg/m³]															
Wind speed [m/s]	1.225	0.95	0.975	1.0	1.025	1.05	1.075	1.1	1.125	1.15	1.175	1.2	1.25	1.275	
3	26	11	12	13	15	16	17	19	20	22	23	25	27	29	
3.5	73	45	48	50	53	55	58	60	63	65	68	70	75	78	
4	133	92	95	99	103	107	110	114	118	121	125	129	136	140	
4.5	207	150	155	161	166	171	176	181	187	192	197	202	213	218	
5	302	223	230	237	244	251	259	266	273	280	287	294	309	316	
5.5	416	312	321	331	340	350	359	369	378	388	397	407	426	435	
6	554	418	431	443	455	468	480	493	505	517	530	542	567	579	
6.5	717	544	560	576	591	607	623	638	654	670	686	701	733	749	
7	907	691	711	730	750	769	789	809	828	848	867	887	926	946	
7.5	1126	860	884	908	932	956	981	1005	1029	1053	1077	1102	1150	1174	
8	1375	1053	1082	1112	1141	1170	1200	1229	1258	1287	1316	1346	1404	1433	
8.5	1652	1270	1305	1340	1375	1410	1445	1480	1514	1549	1583	1618	1687	1721	
9	1958	1510	1551	1592	1633	1674	1715	1755	1796	1837	1877	1917	1997	2037	
9.5	2282	1774	1821	1868	1915	1963	2009	2055	2101	2148	2192	2237	2325	2368	
10	2585	2044	2097	2149	2202	2254	2303	2353	2402	2451	2496	2541	2625	2666	
10.5	2821	2314	2368	2423	2478	2532	2578	2624	2670	2716	2751	2786	2849	2877	
11	2997	2571	2624	2678	2731	2784	2821	2858	2895	2932	2953	2975	3010	3023	
11.5	3050	2790	2830	2870	2910	2950	2969	2988	3007	3027	3034	3042	3054	3059	
12	3067	2943	2965	2987	3009	3030	3037	3044	3051	3059	3061	3064	3069	3071	
12.5	3074	3024	3033	3042	3050	3059	3062	3065	3067	3070	3071	3073	3074	3075	
13	3075	3055	3059	3063	3066	3070	3071	3072	3073	3074	3075	3075	3075	3075	
13.5	3075	3070	3071	3072	3074	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
14	3075	3074	3074	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
14.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
15	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
15.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
16	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
16.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
17	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
17.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
18	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
18.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
19	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
19.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
20	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
20.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
21	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
21.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
22	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
22.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
23	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
23.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
24	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
24.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	
25	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	

Table 12-1: Power curve, noise mode 0.

Bilag 5. Om de udførte toneanalyser

I dette bilag er toneanalysen beskrevet i flere detaljer end i hovedrapporten, samt hvilke valg der er truffet for at fokusere analyserne på de relevante forhold.

Bilag 5.1 Referencelitteratur

De gældende danske regler for toner i vindmøllestøj er beskrevet i Bekendtgørelse 1736 [1] og Miljøstyrelsens vejledning om måling af ekstern støj, nr. 6/1984 [8]. For nem reference er de mest relevante afsnit uddraget i citat nedenfor:

Om toneanalyse står følgende i Bekendtgørelse 1736:

”For at kunne fastlægge støjbelastningen L_r i et givet punkt skal støjens indhold af tydeligt hørbare toner vurderes.

Vurderingen foretages ved den mest støjbelastede bolig ved objektiv måling efter retningslinjerne i kapitel 7 i Miljøstyrelsens vejledning om måling af ekstern støj, nr. 6/1984. Ved brug af metoden skal det dog forudsættes, at tonerne er stationære, således at både niveauet af tonerne og niveauet af den maskerende støj fastlægges ved midling af et antal spektre, som svarer til en analysetid på mindst 1 minut, og frekvensanalyserne skal foretages af A-vægtede spektre.

Støjmålingen skal foretages i et repræsentativt punkt i nærheden af den nærmeste bolig, 1,5 m. over terræn og valgt på en sådan måde, at vindstøjen får mindst mulig indvirkning på måleresultaterne.

Der skal være medvind $\pm 45^\circ$ fra vindmøllen hen mod målepunktet, og vindhastigheden målt 10 m. over terræn skal være mellem 6 og 8 m/s. Der skal måles i et tidsinterval, hvor tonen er tydeligst.

Der er i denne sammenhæng ingen krav til temperaturgradient eller skydække.

Hvis en frekvensanalyse af møllestøjen, målt tæt ved vindmøllen som beskrevet i procedurene for måling af det A-vægtede lydeffektniveau, viser, at der ikke forekommer tydeligt hørbare toner i nærheden af vindmøllen, vil der ikke være toner i støjen ved beboelse, og en særskilt analyse heraf er ikke nødvendig.”.

Bekendtgørelse 1736 afsnit 1.3. Bestemmelse af toner og støjbelastning L_r

Fra kapitel 7 i Miljøstyrelsens vejledning om måling af ekstern støj, nr. 6/1984 finder vi følgende:

”Ud fra de fundne lydtrykniveauer af henholdsvis toner og øvrig støj bestemmes en kriteriестørrelse ΔL_{ts} defineret som:

$$\Delta L_{ts} = L_{p, \text{tone}} - L_{p, \text{krit. bånd}}$$

$L_{p, \text{tone}}$ er lydtrykniveauet af tone/tonerne

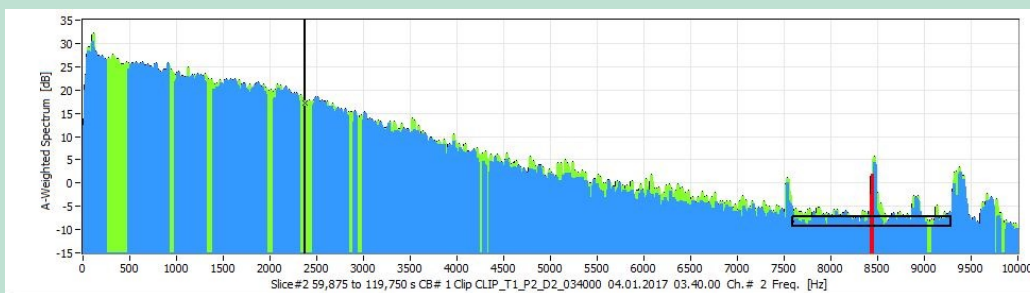
$L_{p, \text{krit. bånd}}$ er lydtrykniveauet af den øvrige støj i det aktuelle kritiske bånd med centerfrekvens $f_{c, \text{krit}}$

ΔL_{ts} er et mål for, hvor kraftig tonen er i forhold til den øvrige støj.”

Vejledning nr. 6/1984: ”Måling af ekstern støj fra virksomheder” Om tildeling af tillæg

Bilag 5.2 Toneanalyse

En toneanalyse for et tilfældigt minut fra optagelserne kan se ud som i FIGUR 107, hvor der er vist en A-vægtet smalbåndsanalyse fra 0 til 10 kHz med en frekvensopløsning på 2 Hz. Båndene er delt op i tre farver; Blå er defineret som maskerende støj, rød er defineret som linjer indeholdende en tone, og grøn definerer linjer, der er hverken maskerende støj eller toner. Det sorte rektangel viser $L_{p, \text{krit. bånd}}$, dvs. den maskerende støj rundt om den aktuelle centerfrekvens.



FIGUR 107. Eksempel på fft-spektrum inklusive toneanalyse foretaget i noiseLAB 4 for en tilfældig 60-sekunders periode med en frekvensopløsning på 2 Hz. Hver 2 Hz-linje opdeles i toneanalysen i; toner (linjer markeret med rød), maskerende støj (linjer markeret med blå) og ingen af delene (linjer markeret med grøn). Desuden markeret et sort rektangel for det aktuelle kritiske bånd og det udregnede maskerende støjniveau for dette kritiske bånd.

For hver 1-minutperiode kan der være ingen, en enkelt eller flere fundne toner – alle med varierende tonetydelighed og med varierende kritisk bånd.

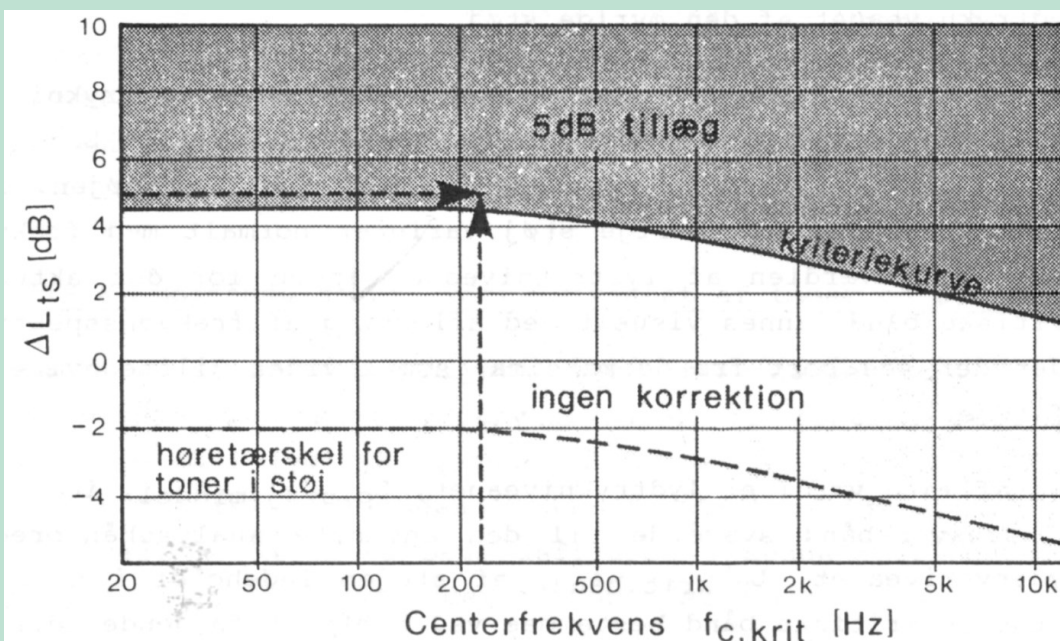
Målemetoden for hørbare toner i støj tager udgangspunkt i det psykoakustiske fænomen, at toners hørbarhed i støj hovedsageligt bestemmes af toneenergien i forhold til energien af støjen i det kritiske bånd, hvor tonerne befinder sig. Dette kan også udtrykkes som forskellen mellem toneniveauet og niveauet af den maskerende støj i et kritisk bånd.

Målemetoden er beskrevet i Vejledning 6/1984 [8] og er senere uddybet i forskellige orienteringer fra Referencelaboratoriet [10][11][12]. Tydeligheden er niveauet i forhold til ”Høretærskel for toner i støj”, også kaldet medhørstærsklen. Når forskellen mellem tone- og støjniveau, ΔL_{ts} , overskrider kriteriekurven, gives et tillæg på 5 dB. Dette opnås med et toneniveau på 6,5 dB over medhørstærsklen, se FIGUR 108. Som det kan ses på figuren, er niveauet af høretærsklen og dermed også kriteriekurven frekvensafhæng. Supplerende kan tonernes tydelighed, DL_{ta} , udtrykt over medhørstærsklen anvendes [11]:

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log\left(1 + \left(\frac{f_c}{502}\right)^{2,5}\right)$$

hvor:

- L_{pt} er det totale lydtrykniveau af tonerne i det kritiske bånd
- L_{pn} er det totale lydtrykniveau af den maskerende støj i det kritiske bånd
- f_c er centerfrekvensen i Hz af det kritiske bånd



Figur 7.1 Kriteriekurve for korrektion for toneindhold i støj.

FIGUR 108. Figur fra Miljøstyrelsens vejledning 6/84 [8]. x-aksen angiver centerfrekvensen for kritiske bånd, og y-aksen angiver forskellen mellem tone- og støjniveau. Høretærsklen for toner i støj, også kaldet medhøretærskel, er vist med punkteret kurve.

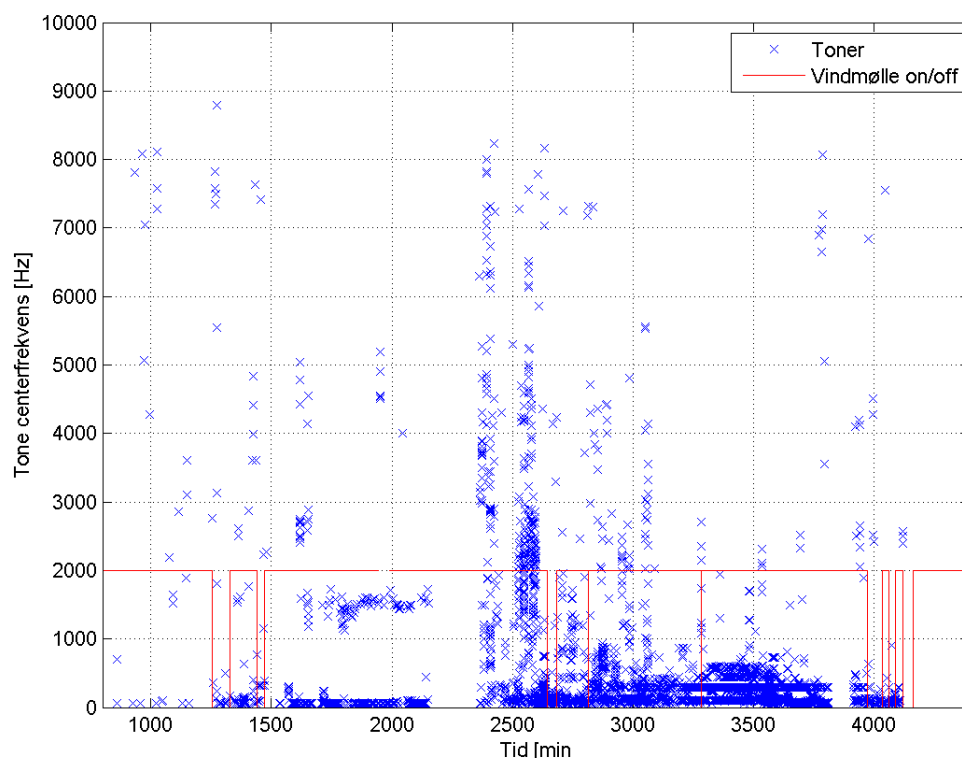
De relevante parametre i forbindelse med toneanalyse i indeværende rapport kan derfor opsummeres i TABEL 8:

TABEL 8. Oversigt over de vigtigste parametre i forbindelse med den anvendte toneanalyse

Parameter	Enhed	Beskrivelse
$L_{pt} / L_{p, \text{tone}}$	dB	lydtrykniveauet af tone/tonerne – tonens/tonernes styrke
$L_{pn} / L_{p, \text{krit. bånd}}$	dB	lydtrykniveauet af den øvrige støj i det aktuelle kritiske bånd med centerfrekvens $f_{c, \text{krit}}$ – støjens styrke
ΔL_{ta}	dB	Tonens tydelighed, et mål for, hvor meget tonens niveau er over medhøretærsklen
ΔL_{ts}	dB	et mål for, hvor kraftig tonen er i forhold til den øvrige støj,
$f_{c, \text{krit}}$	Hz	Centerfrekvens for det aktuelle kritiske bånd (placeret så den højeste L_{pt} opnås)
Kritisk bånd	Hz (interval)	Et begrænset frekvensområde omkring de toner der analyseres

Bilag 5.3 Afgrænsning af frekvensområde

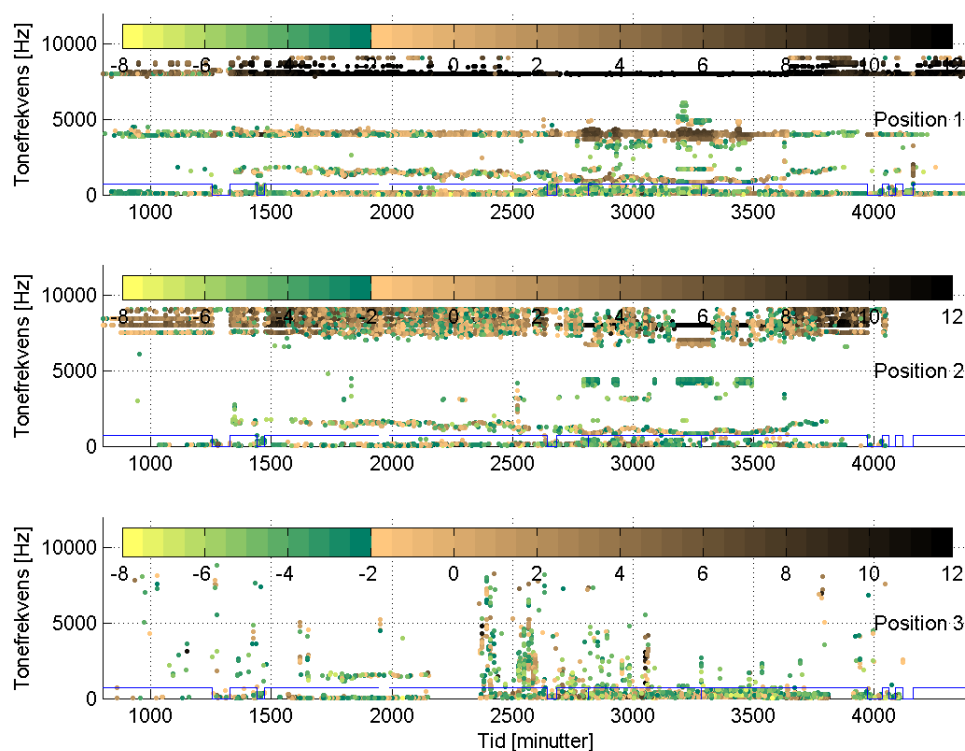
I FIGUR 109 er vist et eksempel på alle toner detekteret af den automatiserede toneanalyse (uanset tydelighed) ved naboen sydøst for parken, WT1_P3. Figuren viser tonecenterfrekvens over tid, hvor hvert blå kryds markerer en detekteret tone (men ikke nødvendigvis en hørbar tone). Det skal for en god ordens skyld igen bemærkes, at data ikke er gennemlyttet, så de detekterede toner kan både stamme fra de nærmeste tre vindmøller, men kan også stamme fra øvrige vindmøller og øvrige støjklender, som fx fly, biler, lastbiler og traktorer.



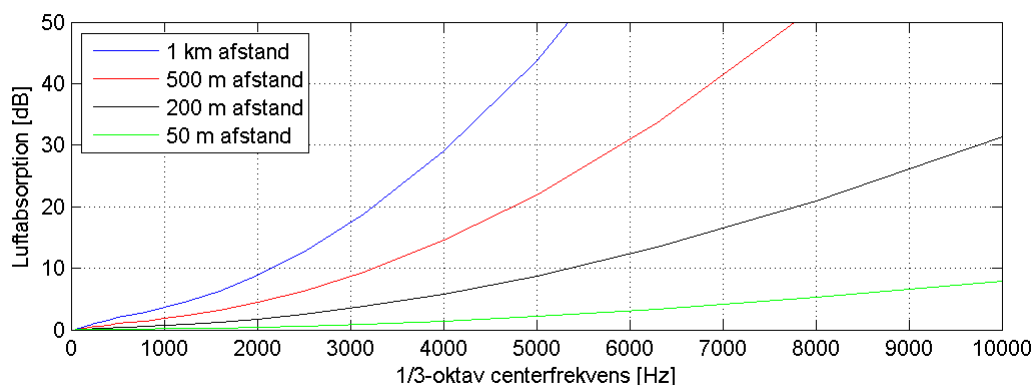
FIGUR 109. Alle toner detekteret ved WT1_P3 via den automatiske analyse. Her vist alle detekterede toner uanset tydelighed. Figuren viser tonernes centerfrekvenser som en funktion over tid (de knap 4 måledage). Ligeledes vises, om vindmøllerne er tændt eller ej (rød linje).

For at øge overskueligheden kan tonerne farves efter tonens tydelighed, DL_{ta} , se fx FIGUR 110. Værdier af DL_{ta} , på mere end 6,5 dB er over kriteriekurven for 5 dB-tillæg anvendt i BEK 1736 [1] og Miljøstyrelsens vejledning [8]. Farvekurven er indstillet, så toner med en tydelighed over medhørstærsklen er vist med bronze-sort farve, mens tonetydeligheder under medhørstærsklen er vist med en gul-grøn farve. I FIGUR 110 er vist toner for alle tre mikrofoner relateret til vindmølle WT1 samt vindhastigheden beregnet fra vindmølle WT1 og målt ved naboen til WT1, WT1_P3. Målingerne tæt på vindmøllen, dvs. P1 og P2, indeholder til tider indstrålet støj ved de højeste frekvenser på grund af de lange kabler. Dette detekteres ofte som toner i toneanalysen, specielt over 8000 Hz.

Luftabsorption stiger med frekvens og afstand, se FIGUR 111, og det forventes derfor, at relevante toner i naboafstand primært vil være under 2000 Hz. Dette bekræftes af FIGUR 110, hvor de tydeligste toner primært ses under 2000 Hz.

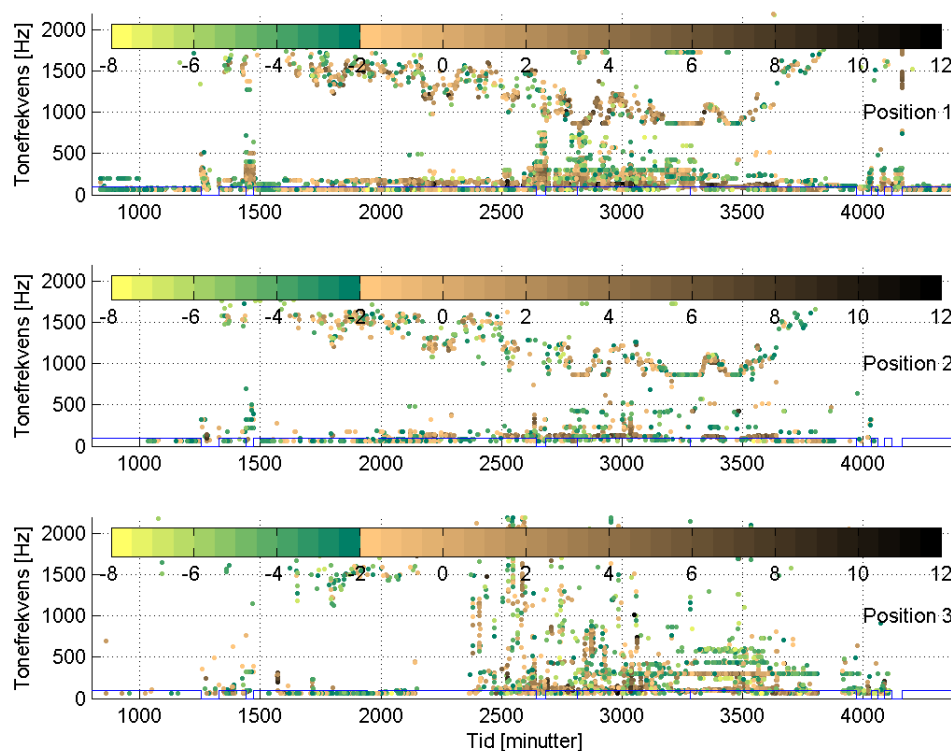


FIGUR 110. DL_{ta} for position 1-3 ved vindmølle WT1 vist som punkter i et tonecenterfrekvens (for frekvensområdet 0-10 kHz) og tidsdiagram. Tonens tydelighed, DL_{ta} , er vist med forskellige farvekoder: Toner med en tydelighed over medhørstærsklen er vist med en bronze-sort farve, mens tonetydeligheder under medhørstærsklen er vist med en gul-grøn farve, jævnfør farveskalaen på figurene.



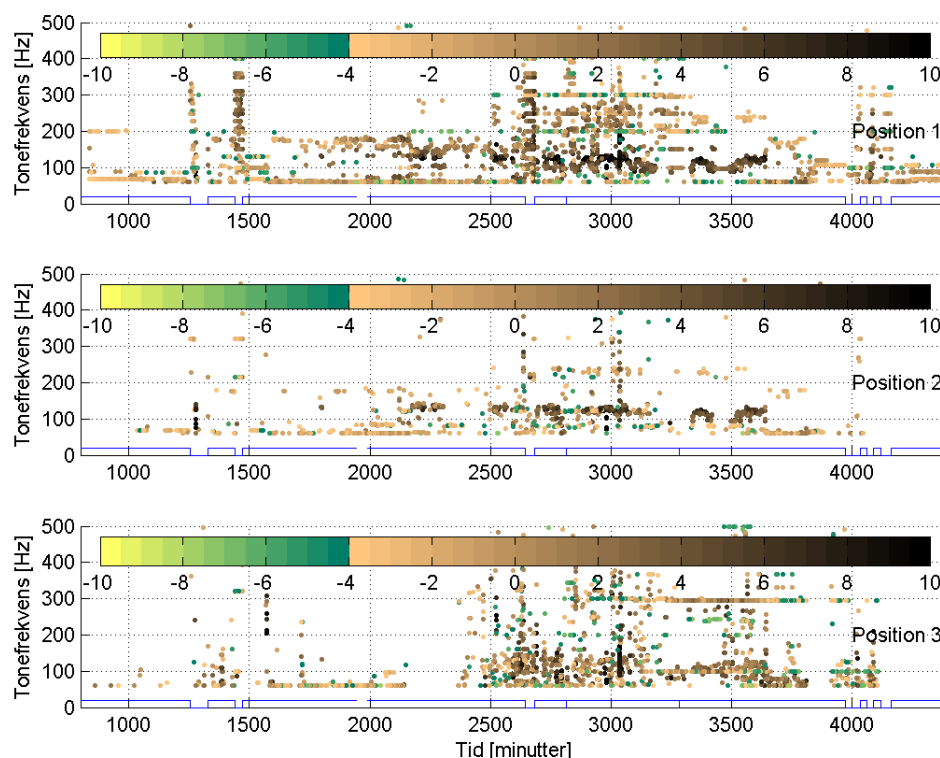
FIGUR 111. Luftabsorption ved forskellige 1/3-oktav centerfrekvenser og forskellige afstande, fra BEK 1736.

FIGUR 112 viser samme data som FIGUR 110, men kun for tonefrekvenser op til 2000 Hz.



FIGUR 112. DL_{ta} for position 1-3 ved vindmølle vist som punkter i et tonecenterfrekvens (for frekvensområdet 0-10 kHz) og tidsdiagram. Tonens tydelighed, DL_{ta} , er vist med forskellige farvekoder: Toner med en tydelighed over medhørstærsklen er vist med en bronze-sort farve, mens tonetydeligheder under medhørstærsklen er vist med en gul-grøn farve, jævnfør farveskalaen på figurene.

På baggrund af viden om luftabsorption og de fundne toner i naboafstand (FIGUR 111 til FIGUR 113) konkluderes det, at de primært relevante toner findes under 2000 Hz, og den fortsatte undersøgelse fokuserer derfor udelukkende på dette frekvensområde.



FIGUR 113. DL_{ta} for position 1-3 ved vindmølle WT1 vist som en funktion over tonecenterfrekvens (for frekvensområdet 0-500 Hz) og tid. Tonens tydelighed, DL_{ta} , er vist med forskellige farve-koder: Toner med en tydelighed over medhørstærsklen er vist med en bronze-sort farve, mens tonetydeligheder under medhørstærsklen er vist med en gul-grøn farve, jævnfør farveskalaen på figurene.

Bilag 5.4 Mønstergenkendelse

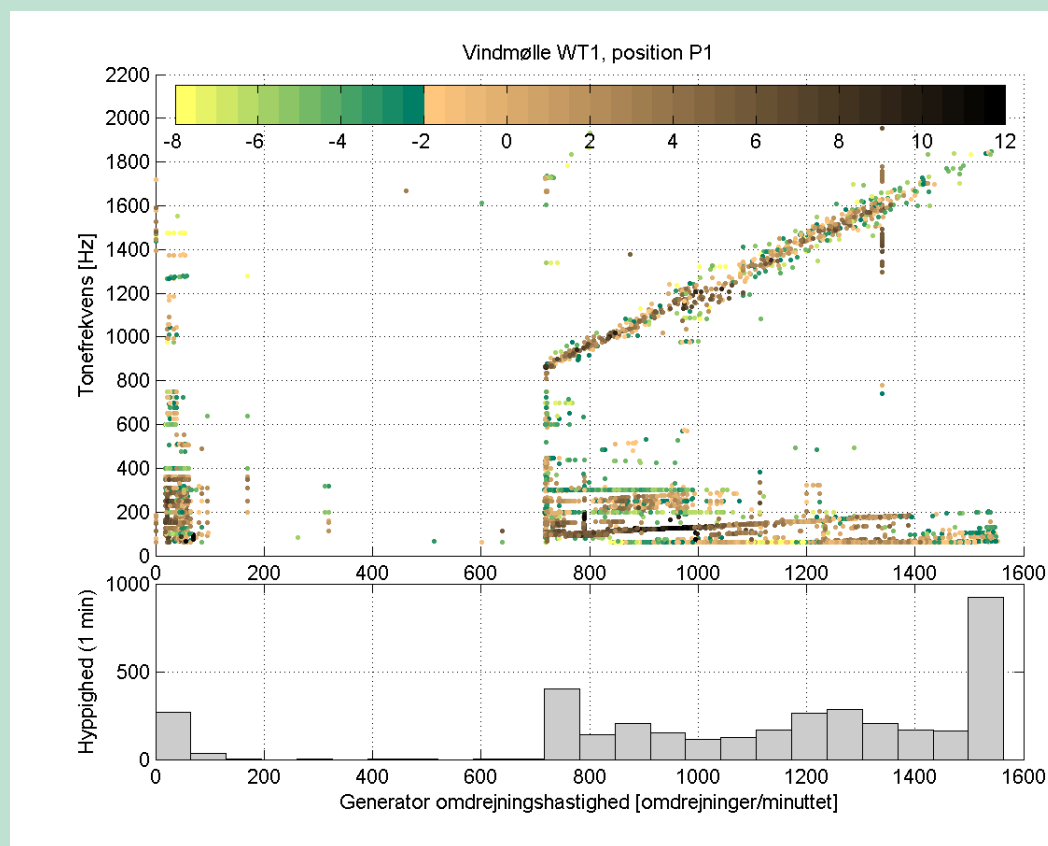
FIGUR 110 til FIGUR 113 viser alle fundne toner i måleperioden, dvs. de viste toner kan både stamme fra de målte vindmøller, men også fra øvrige støjklender i området, fx nabovindmøllerne, trafikstøj (fly, biler og lastbiler), markaktiviteter (traktorer og lignende) og fra støjklender i/ved ejendommene. Det er ikke muligt at lytte alle de mange timers optagelse igennem (9 mikrofoner over 4 dage), i stedet anvendes mønstergodkendelse på vindmøllernes rotationshastighed. Toner i vindmøllestøj stammer sædvanligvis fra de roterende dele, dvs. at der vil formentlig være en sammenhæng mellem centerfrekvensen for tonerne og rotationshastigheden.

I FIGUR 114 er optegnet de detekterede toner for vindmølle 1 position 1 med centerfrekvens under 2000 Hz som en funktion af vindmøllens generatoromdrejningshastighed. De detekterede toner er desuden farvekodet efter tonetydelighed. Der ses som ventet en sammenhæng mellem tonecenterfrekvens og omdrejningshastighed.

På figuren (nederst) er ligeledes vist et histogram, der viser antallet af målte 1-minutperioder ved de forskellige omdrejningshastigheder (bemærk her, at der ikke nødvendigvis er toner i alle perioder, og histogrammet viser derfor ikke antallet af toner, men antallet af perioder med mulighed for toner). Det kan ses, at antallet af perioder med meget lav generatoromdrejningshastighed er ret højt, dvs. perioder hvor møllen ikke har produceret elektricitet.

Ligeledes er der et ret stort antal perioder med en omdrejningshastighed på ca. 1500 omdrejninger i minuttet – dette skyldes, at generatorhastigheden stort set ikke ændres for vindha-

stigheder over 7-8 m/s (eventuelle toner i disse perioder er medtaget på den øverste del af figuren).



FIGUR 114. De detekterende toners centerfrekvens under 2000 Hz vist som en funktion af vindmøllens generators omdrejningshastighed for vindmølle WT1 position 1, både med vindmøllen i drift og ikke i drift. Antallet af 1-minutperioder fordelt på generatoromdrejningshastighed vises også. Tonetydeligheden vises desuden med den sædvanlige farvekode.

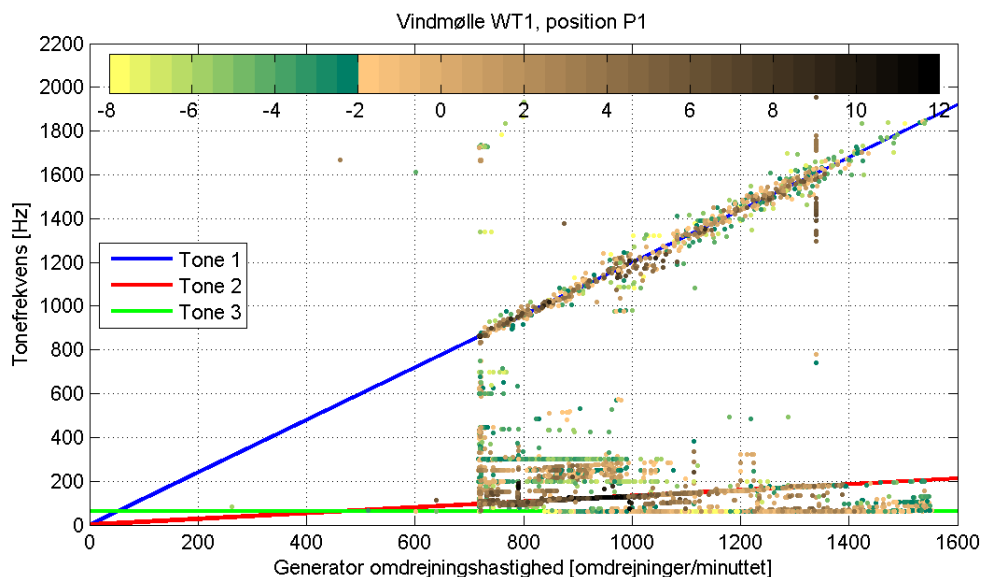
I FIGUR 115 er vist sammenhængen mellem tonecenterfrekvens og generatoromdrejningshastighed for frekvensområdet 0-2000 Hz for perioder, hvor møllen har været i drift. Som det kan ses, er det muligt at indtegne linjer (her vist med blå, rødt og grønt), der viser en klar sammenhæng mellem tonecenterfrekvens og generatoromdrejningshastigheder. Samme data, men kun vist for 0-500 Hz, kan ses på FIGUR 116. Toner uanset måleposition, der ligger på disse linjer, kommer med ret stor sandsynlighed fra vindmøllen/vindmøllerne, og det kan anvendes til en sortering for alle mikrofonpositioner uden at skulle lytte alle optagelser igennem.

Metoden fungerer dog ikke ved de laveste frekvenser (ca. området fra 0-80 Hz), da det laveste kritiske bånd pga. toneanalysemetodens virkemåde altid placeres med en centerfrekvens på 60 Hz. Ved toneanalyse skal de kritiske bånd centreres omkring én eller flere af de tydeligste toner, som kan rummes i det kritiske bånd. Ved meget lave frekvenser er det kritiske bånd 100 Hz bredt. Hvis der nu findes en tone ved f.eks. 40 Hz, vil det kritiske bånd rent matematisk skulle placeres med en centerfrekvens på de 40 Hz, men det ville resultere i, at båndet strakte sig fra minus 10 Hz til 90 Hz, som ikke er logisk.

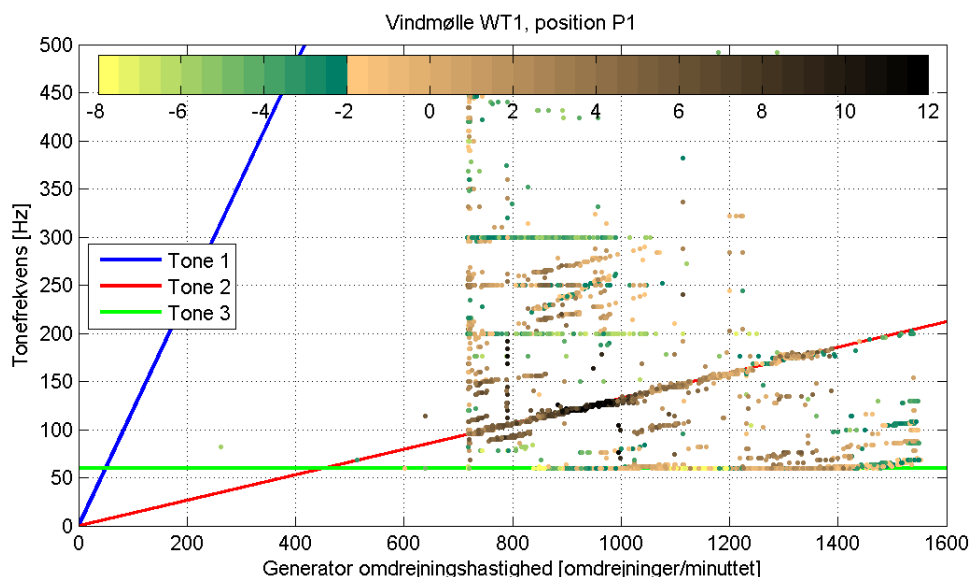
Derfor vælges det normalt, at venstre side af et kritisk bånd har en "stopklods" ved 10 Hz, som betyder, at den tilsvarende laveste centerfrekvens af et kritisk bånd ville være 60 Hz. Derfor kan det godt forekomme, at der rapporteres, at frekvensen af det kritiske bånd ikke er den

samme som en enkelt tone i båndet. Dvs. at toner i frekvensområdet 0-60 Hz altid vil få tildelt centerfrekvensen 60 Hz.

For den grønne linje (Tone 3 / toneområde 3) indlægges derfor det ekstra kriterie for position 2 og 3, at der samtidigt skal detekteres en tone i samme frekvensområde i position 1, og at tonen i position 1 skal have et højere toneniveau (L_{pt}) end den detekterede i enten position 2 eller 3.



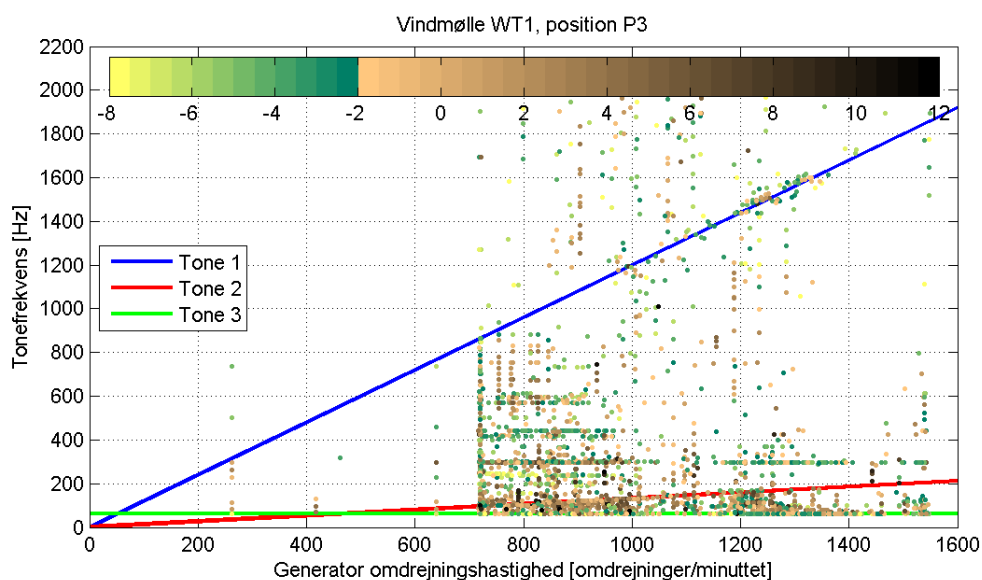
FIGUR 115. Tonefrekvens 0-2000 Hz versus generatoromdrejningshastighed for vindmølle 1, position 1.



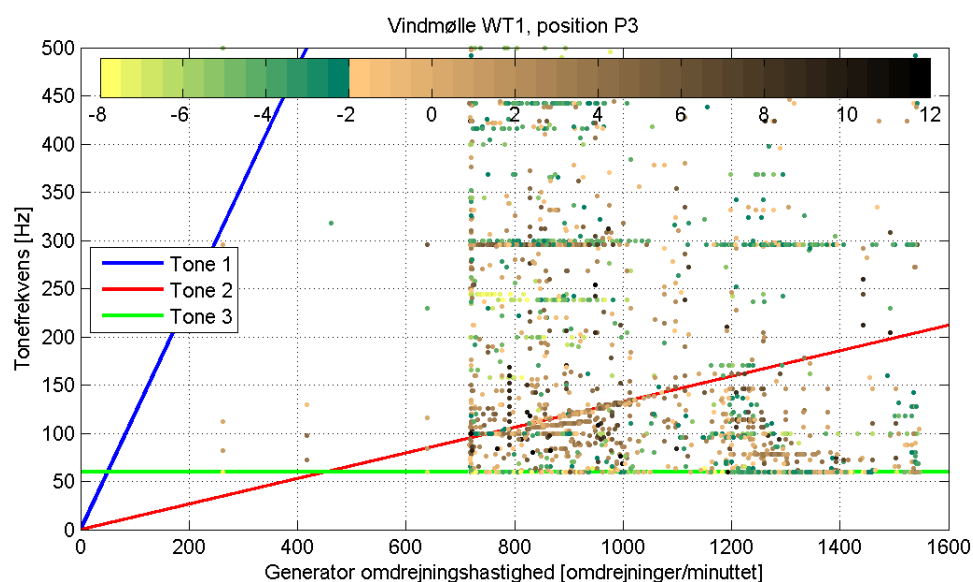
FIGUR 116. Tonefrekvens 0-500 Hz versus generatoromdrejningshastighed for vindmølle 1, position 1.

I FIGUR 115 og FIGUR 116 er optegnet tre linjer, med blåt, rødt og grønt, markeret som hhv. «Tone 1», «Tone 2» og «Tone 3». Der kan sagtens optegnes flere linjer, der følger de mønstre der observeres, men de nævnte tre linjer dækker toneområder, der forefindes for et stort spænd af vindhastigheder og vindretninger, se FIGUR 119 til FIGUR 122.

FIGUR 117 og FIGUR 118 viser det samme som FIGUR 115 og FIGUR 116, men for position 3 i modsætning til position 1.

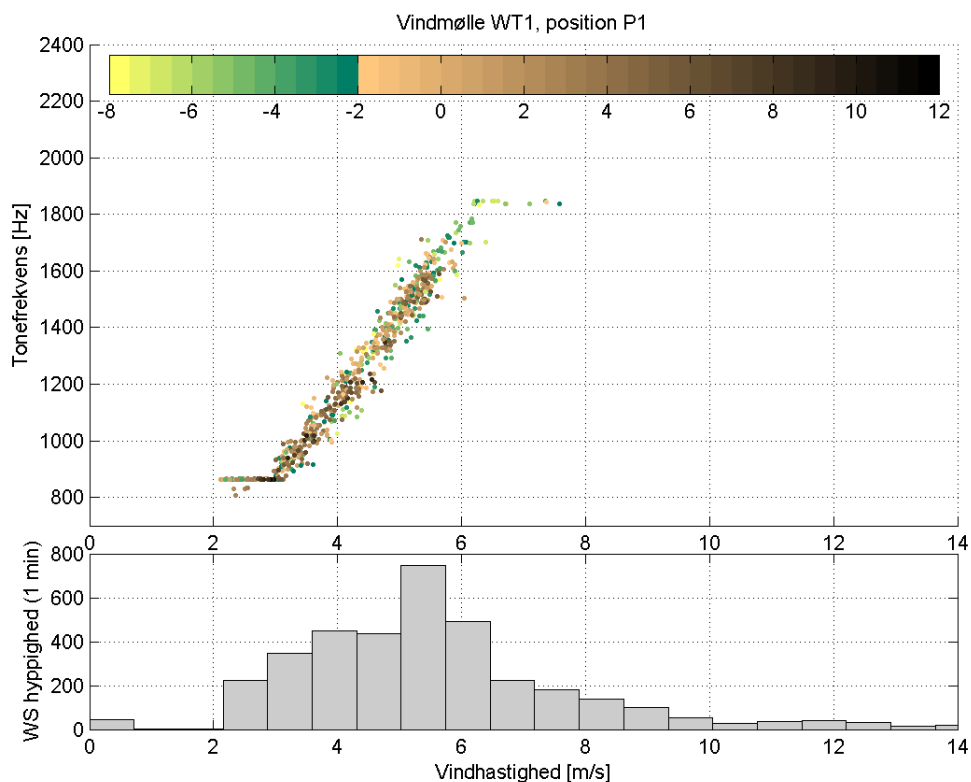


FIGUR 117. Tonefrekvens 0-2000 Hz versus generatoromdrejningshastighed for vindmølle 1, position 3.

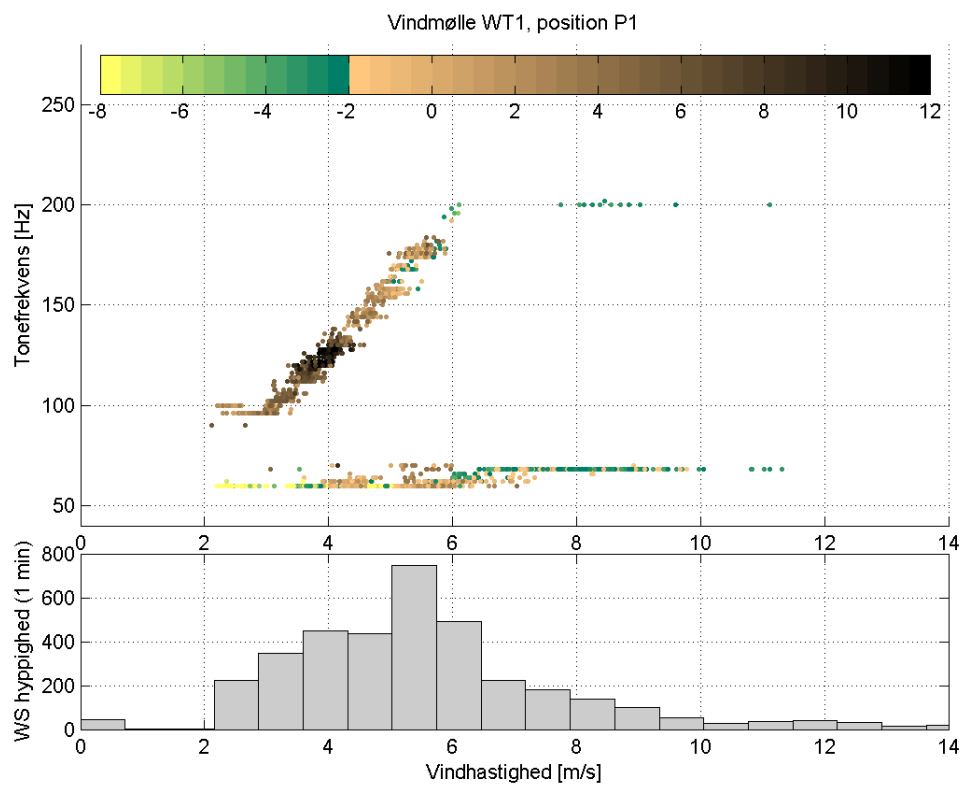


FIGUR 118. Tonefrekvens 0-500 Hz versus generatoromdrejningshastighed for vindmølle 1, position 3.

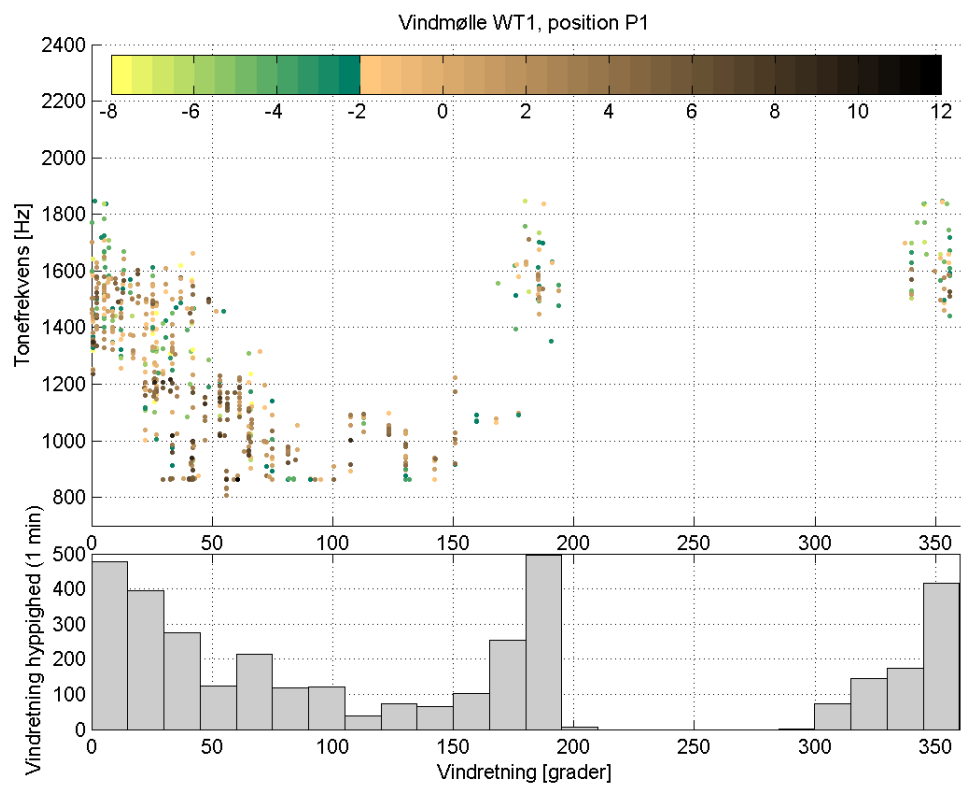
Det er noget sværere at se mønstre/sammenhænge mellem tonecenterfrekvens og generatorrotationshastighed i position 3 end i position 1. Det indikerer, at antallet af toner, der ikke stammer fra vindmøllen, stiger, jo længere fra møllen mikrofonen er. Det er dog stadig muligt at se et mønster/sammenhæng mellem tonecenterfrekvens og generatorrotationshastighed for de tre identificerede toneområder (blå, rød og grøn linje). Det vælges derfor at fokusere på disse tre toneområder i det følgende.



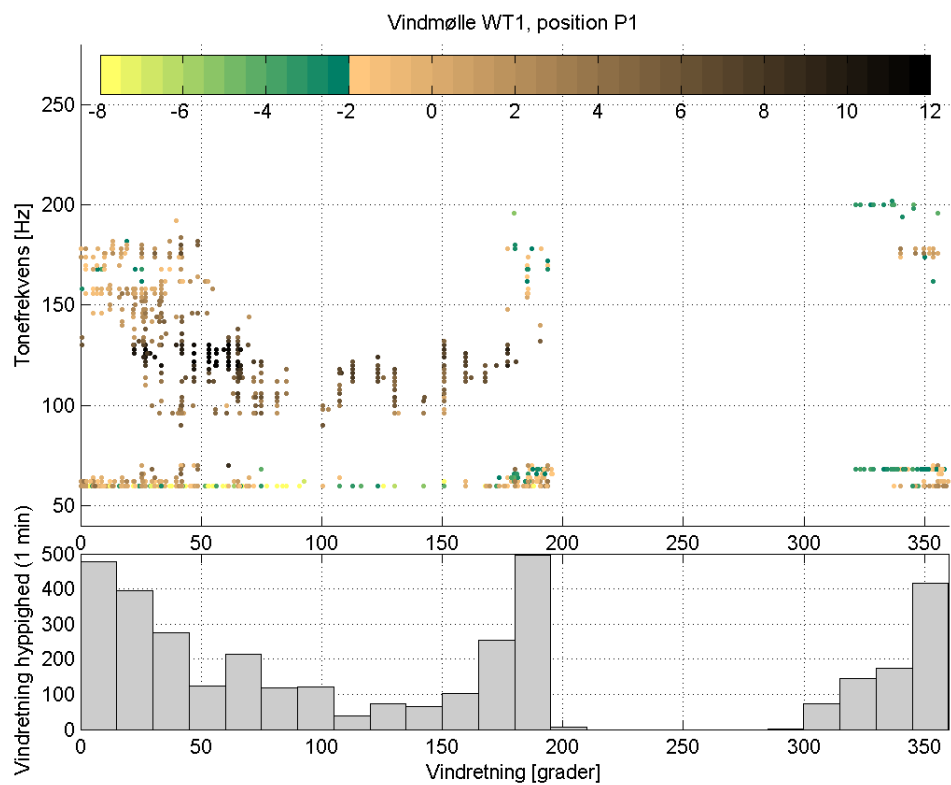
FIGUR 119. Toneområde 1 vist for vindmølle WT1, position 1, som tonecenterfrekvens (700 Hz – 2400 Hz) som en funktion af vindhastigheden, og hvor tonetydeligheden er vist som DL_{ta} i farvekoden.



FIGUR 120. Toneområde 2 (ca. 90 Hz – 200 Hz) og 3 (ca. 50 – 70 Hz) vist for vindmølle WT1, position 1, som tonecenterfrekvens (40 Hz – 270 Hz) som en funktion af vindhastigheden, og hvor tonetydeligheden er vist som DL_{ta} i farvekoden.



FIGUR 121. Toneområde 1 vist for vindmølle WT1, position 1, som tonecenterfrekvens (700 Hz – 2400 Hz) som en funktion af vindretningen, og hvor tonetydeligheden er vist som DL_{ta} i farvekoden.



FIGUR 122. Toneområde 2 (ca. 90 Hz – 200 Hz) og 3 (ca. 50 – 70 Hz) vist for vindmølle WT1, position 1, som tonecenterfrekvens (40 Hz – 270 Hz) som en funktion af vindretningen, og hvor tonetydeligheden er vist som DL_{ia} i farvekoden.

Bilag 6. Ordforklaringer

Nacelle: Vindmøllens "hus" øverst på tårnet indeholdende bl.a. generator (der omsætter rotationen til elektrisk strøm) og gearsystem. Sidstnævnte regulerer omdrejningstallet til generatoren, så strømprодукtionen er størst mulig.

Nacellevindmåler: Vindmåler placeret på nacellen.

Rotor: Det samlede system af vindmøllens 3 vinger.

Rotorplan: Den runde flade, hvori alle 3 vinger er beliggende.

Totalhøjde: I forbindelse med vindmøller er det afstanden fra terræn til toppen af rotorplanet.

Navhøjden: Afstanden fra terræn til rotores akse (nav).

Anemometer: Vindhastighedsmåler. Består oftest af 3 små "kopper" placeret på en lodret akse, som roterer med en hastighed, der afhænger af vindhastigheden. Vindhastigheden kan også måles med ultralyd, hvorved man undgår bevægelige dele.

Vindhastighed: Da vindhastigheden stiger med stigende højde over terræn, er der oftest en væsentlig forskel på vindhastigheden i 10 m højde (som i praksis er nogenlunde den maksimale højde, man kan måle med en transportabel vindmålermast) og navhøjde. I forbindelse med måling af støj fra vindmøller angives vindhastigheden ofte omregnet til vindhastigheden i 10 m højde. Når der måles støj fra vindmøller efter de seneste vindmøllebekendtgørelser, måles vindhastigheden på grundlag af den øjeblikkeligt producerede elektriske effekt. Da man for hver vindmølle kender den producerede effekt som funktion af vindhastigheden, kan den gennemsnitlige vindhastighed, der påvirker rotorplanet, beregnes. Når der måles baggrundsstøj, måles vindhastigheden med en medbragt vindmåler (anemometer) i 10 m højde.

Pitchreguleret: Vindmøllen optimerer produktionen af strøm ved at dreje vingerne om deres længdeakser. Derved kan vingerne løbende – og afhængigt af vindhastigheden – stilles, så energien i vinden udnyttes bedst muligt.

Krøje: Vindmøllen drejer løbende nacellen – og dermed rotoren – så vinden kommer vinkelret ind på rotorplanet. Derved udnyttes energien i vinden bedst muligt. Denne løbende drejning kaldes krøjning.

Yaw: Et udtryk for drejningen (krøjningen) af nacellen omkring den lodrette akse gennem vindmøllertårnet. Angives i grader og har oftest et "tilfældigt" valgt nulpunkt, der sjældent svarer til kompasnord.

Live-data: Beskriver at data fra vindmøllen (bl.a. produceret elektrisk effekt, krøjning, omdrejningstal) leveres løbende under støjmålinger på vindmøllen. Derved kan kildestyrken for vindmøllen som funktion af vindhastigheden løbende beregnes, og det kan under målingerne sikres, at tilstrækkelige støjmålinger er foretaget omkring vindhastighederne 6 og 8 m/s.

Fastlogdata: Hvis livedata ikke kan leveres under målingerne, kan data fra vindmøllen, fx for hvert sekund, leveres efterfølgende. Disse data kaldes ofte fastlogdata.

Scatterplot: Et X-Y-koordinatsystem, oftest visende alle usorterede og ufiltrerede statistiske observationer i forbindelse med stikprøveudtagning eller målinger generelt. Er velegnede til at

danne sig et indtryk af eventuelle tendenser i observationerne. Benyttes ofte i forbindelse med målinger af støj fra vindmøller til at vise målte $L_{Aeq,1minut}$ eller $L_{Aeq,10sek}$ som funktion af vindhastigheden. Når der er tale om stikprøver (som målinger af støjbidraget nær en vindmølle) kan der ligge flere observerede værdier ud for samme X-værdi.

Polært plot: I princippet et X-Y-kordinatsystem, hvor X-aksen er bøjet rundt i en cirkel, fx repræsenterende kompassets 360 grader. Velegnet til fx at vise et målt støjbidrag fra en vindmølle som funktion af vindretningen.

A-vægtning: En filtrering af den målte lyd så lavfrekvente lyde vægtes mindre end lyde i mellem- og højfrekvensområdet. Ved en sådan filtrering vægtes lydens forskellige frekvenser nogenlunde som det menneskelige øre på en normalthørende person.

$L_{Aeq,t}$: Det konstante A-vægtede lydtrykniveau som har samme energiindhold som det varierende lydtrykniveau fra møllen i tiden t. Når der måles støj på en plade i en totalhøjedes afstand fra en vindmølle måles ofte $L_{Aeq,60s}$ eller $L_{Aeq,10s}$. Vindmøllebekendtgørelsen stiller krav til antallet af disse værdier, der skal måles omkring vindhastighederne 6 og 8 m/s.

$L_{A90,t}$: En statistisk værdi som angiver det A-vægtede støjniveau, som overskrides i 90 % af tiden i tidsrummet t. For et støjniveau, der varierer hurtigt som funktion af tiden (fx på grund af bilpassager, fuglekvidder eller kortvarig vegetationsstøj på grund af vindstød) er L_{A90} et udtryk for det (konstante) støjniveau, som kan måles, når forstyrrelserne ikke forekommer. Andre procentværdier kan anvendes. Fx er L_{A5} eller L_{A1} velegnet til at vurdere de højeste lydniveauer, der forekommer i måleperioden. Statistiske værdier af støjen benyttes ikke i forbindelse med støjmålinger efter Vindmøllebekendtgørelsen.

Støjmålinger hos naboer til vindmøller i Nollund

Miljøstyrelsen har iværksat en undersøgelse af støj fra vindmøller. Formålet er at undersøge, om de nuværende retningslinjer for måling af kildestyrke og beregning af støj fra vindmøller beskrevet i Vindmøllebekendtgørelsen giver et retvisende billede af støjbidraget hos naboerne samt at foretage målinger under andre betingelser end bekendtgørelsen foreskriver.

Til brug for undersøgelsen er der foretaget målinger udendørs og indendørs ved naboer til en vindmøllepark ved Nollund i Jylland under meteorologiske forhold, der omfatter flere forskellige betingelser, end der forudsættes i Vindmøllebekendtgørelsen. Vindmølleparken består af 3 stk. 3 MW pitchregulerede vindmøller. Udover støjmålinger ved naboerne er der foretaget målinger tæt ved vindmøllerne samt i en position mellem vindmøllerne og naboerne. Der er foretaget samtidige målinger i op til 15 mikrofoner. Målingerne er foretaget under et bredere interval af vindhastigheder end omkring 6 og 8 m/s, og der er målt i andre retninger end medvindsretningen fra vindmøller til naboer.

Måleresultaterne er derefter sammenholdt med beregninger efter Vindmøllebekendtgørelsen. Der kan drages følgende konklusioner:

Målinger kontra beregninger

Resultaterne viser, at der for de A-vægtede støjniveauer (almindelig støj og lavfrekvent støj) ikke er systematiske forskelle mellem måleresultater og beregningsresultater. Beregninger på grundlag af kildestyrkemålinger er således at foretrække, da det er væsentligt lettere at opnå pålidelige resultater ved beregninger end ved målinger hos naboerne.

Andre vindhastigheder

Støjbidraget fra vindmøllerne ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s er undersøgt med følgende resultater:

- Det A-vægtede støjbidrag (almindelig støj og lavfrekvent støj) svarer til, hvad man kan beregne på grundlag af de målte kildestyrker for vindmøllerne ved andre vindhastigheder end 6 og 8 m/s.
- Eventuelle toner i støjen fra vindmøllen er ikke nødvendigvis tydeligst ved vindhastighederne 6 og 8 m/s. Tydeligere toner kan forekomme ved lavere vindhastigheder.

Andre vindretninger

Støjbidraget fra vindmøllerne ved andre vindretninger end medvind fra vindmøller til nabo er undersøgt med følgende resultater:

- For de undersøgte vindretninger forekommer der ikke højere støjbidrag, hverken for den almindelige støj eller den lavfrekvente støj, ved andre vindretninger end medvind.
- Eventuelle toner i støjen fra vindmøllen kan være mere hørbare i andre vindretninger, end når vinden blæser fra vindmølle til nabo.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk