



Støyutbredelse ved vindkraftverk med "typisk norsk" topografi

Meventus AS og Sinus AS

13
2017



R
A
P
P
O
R
T

Rapport nr 13-2017

Støyutbredelse ved vindkraftverk med "typisk norsk" topografi

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfattere: Meventus AS og Sinus AS

Trykk: NVEs hustrykkeri

Opplag: 1

Forsidefoto: Meventus AS og Sinus AS

ISBN 978-82-410-1565-6

ISSN 1501-2832

Sammendrag: NVE har fått utarbeidet en rapport om støyvirkninger for bebyggelse fra vindturbiner i typisk norsk terreng. Ifølge rapporten kan vindturbiner plassert i landskap med store høydeforskjeller, bart fjell og bebyggelse plassert i dalbunnene under vindturbinene gi andre støyvirkninger enn det som er normalt i flate landskap

Emneord: Vindkraft, vindturbiner, støy, norsk topografi

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

Forord

Det er i dag 25 vindkraftverk i Norge, og ved enkelte av disse har naboer klaget på støyvirkninger. På denne bakgrunn har NVE fått utarbeidet en rapport fra konsultentselskapene Meventus AS og Sinus AS om støy fra vindkraftverk i typisk norsk terreng, med fjell, knauser og daler. Miljødirektoratet har deltatt i en referansegruppe for prosjektet.

Ifølge rapporten er det sannsynlig at vindkraftverk plassert i typisk norsk terreng gir andre støyvirkninger enn vindkraftverk i flate landskap. Dette kan blant annet skyldes refleksjoner fra harde fjellformasjoner og store høyde- og temperaturforskjeller mellom vindturbinene og bebyggelse. Bebyggelse kan også ligge i vindskygge, slik at støyen fra vindturbinene ikke blir maskert av normal bakgrunnsstøy.

Klima- og miljødepartementet har i Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging (T-1442) fastsatt en anbefalt grenseverdi for støy fra vindkraftverk. I tillegg har Miljødirektoratet utgitt en veileder (M-128) for hvordan støyen skal beregnes. Denne veilederen er endret flere ganger, senest i 2014. NVE forholder seg til den anbefalte grenseverdien og til utdypninger i Miljødirektoratets veileder.

Meventus og Sinus anbefaler at det gjøres ytterligere presiseringer i en fremtidig revisjon av veilederen, slik at spesielle virkninger av typisk norsk terreng fanges bedre opp i støyutredningene.

Rune Flatby
avdelingsdirektør

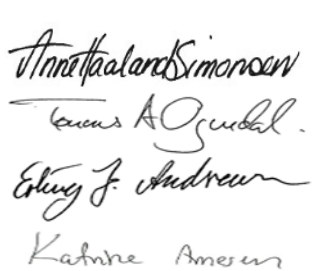
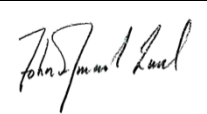
Arne Olsen
seksjonssjef



Støyutbredelse ved vindkraftverk med «typisk norsk» topografi



Til	Norges Vassdrags- og Energidirektorat
Fra	Meventus AS og Sinus AS
Dato	07.03.2017
Tittel	Støyutbredelse ved vindkraftverk med «typisk norsk» topografi
Rapport nr.	2016-002
Skrevet av	Anne Haaland Simonsen (Meventus), Tønnes A. Ognedal (Sinus), Erling J. Andreassen (Sinus) og Katrine Arnesen (Sinus)

	Navn	Dato	Signatur
Skrevet av	Anne Haaland Simonsen (Meventus) Tønnes A. Ognedal (Sinus) Erling J. Andreassen (Sinus) Katrine Arnesen (Sinus)	07.03.2017	
Godkjent av	John Amund Lund (Meventus)	07.03.2017	

Sammendrag

Et studie av støy fra vindturbiner i kompleks topografi i Norge er utført for å kartlegge om kompleksiteten i terrenget medfører spesielle effekter som gjør at støybildet blir annerledes enn forventet. Arbeidet er utført som en kombinasjon av litteraturstudier, feltarbeid, beregninger og teoretiske vurderinger.

Basert på utført feltarbeid, samtaler med naboer ved Lista vindkraftverk og resultatene av beregningene som er utført, er det grunnlag for å tro at støysjenansen kan være større i vindkraftverk med komplekst terreng enn ved vindkraftverk lokalisert i flatere landskap. Dette kan skyldes forskjellige effekter som kan bidra til periodevis stor variasjon i støynivået. Ettersom støyretningslinjen kun angir grenseverdi for gjennomsnittlig lydnivå vil slike forhold ikke bli avdekket med de beregningsmetodene som brukes i dag. Mye tyder på at dette kan være en del av problemstillingen på Lista og trolig også ved andre vindkraftverk i Norge. På Lista kan også støyvirkningene være knyttet til kort avstand mellom vindturbiner og bebyggelse, stor grad av vindskygge og at flere av naboene er delvis omringet av vindturbiner og ligger i vindskygge nedstrøms vindturbiner ved vind fra flere hyppige vindretninger. Lite naturlig bakgrunnsstøy er også medvirkende til en høyere grad av sjenanse enn i mer støyende omgivelser.

Dagens regelverk gir allerede en strengere vurdering av støy fra vindkraftverk enn det man hadde før 2012. Dette reduserer risikoen for sjenanse i nye vindkraftverk hvor støy behandles i henhold til den nye retningslinjen. Det er imidlertid fortsatt enkelte uklarheter i den nye retningslinjen. Man bør forsøke å klargjøre hvilke forutsetninger som skal ligge til grunn i større grad enn hva som nå er tilfellet.

Det kan også være relevant å vurdere bruk av differensierte støygrenser slik at områder med høy eller lav bakgrunnsstøy, eller et gjennomsnittlig lydnivå som ikke er representativt for lydopplevelsen, behandles ulikt. I denne forbindelse anbefales det å avklare om det er mulig å utarbeide gode kriterier for å forutsi risikoen for store variasjoner i lydnivå og/eller risiko for lengre perioder med amplitudemodulasjon, slik at risikoen for sjenanse reduseres ytterligere.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	3
Innholdsfortegnelse	4
1 Bakgrunn	6
1.1 Oppdragsbeskrivelse.....	6
1.2 Befolkningsundersøkelse på Lista.....	6
1.3 Om prosjektet	7
2 Retningslinje.....	9
3 Litteraturstudie	10
3.1 Grunnleggende forhold	10
3.2 Variasjon i lydnivå på grunn av vind i høyden	10
Kommentar til forholdene på Lista.....	11
3.3 Lydutbredelse med stor avbøyning	12
Kommentar til forholdene på Lista.....	12
3.4 Bakgrunnsstøy	12
Regelverk og bakgrunnsstøy	13
Kommentar til forholdene på Lista.....	14
3.5 Komplekst terreng.....	14
Kommentar til forholdene Lista	16
3.6 Amplitudemodulasjon	16
Kommentar til forholdene på Lista.....	18
4 Vindforhold på Lista	19
4.1 Vinddata fra målemast	19
4.2 Modellering av vindfeltet	19
5 Vurdering av lydbildet	22
5.1 Tidligere beregnede og målte støynivåer	22
5.2 Naboenes opplevelse av lydbildet	22
6 Målinger.....	25

6.1	Metode.....	25
6.2	Resultater.....	25
7	Beregninger	27
7.1	Metode.....	27
7.2	Turbindata	27
7.3	Øvrige inngangsdata	28
7.4	Resultater.....	29
7.5	Sammenligning med tidligere utførte støyberegninger.....	30
	Eksempel på konsekvensen av marktype	31
8	Diskusjon.....	32
8.1	Støyforholdene i komplekst terreng.....	32
8.2	Vurdering av overføringsverdien i resultatene.....	32
8.3	Anbefalinger til endringer i gjeldende retningslinje.....	33
8.4	Videre arbeid	34
9	Konklusjon.....	35
10	Referanser	36

1 Bakgrunn

1.1 Oppdragsbeskrivelse

Meventus AS og Sinus AS ble våren 2016 sammen tildelt et oppdrag fra Norges Vassdrags – og Energidirektorat (NVE) om å gjennomføre en studie på støy fra vindturbiner i komplekst terreng. Bakgrunnen for utlysningen var påstander om at støyregelverket ikke tar tilstrekkelig hensyn til om særpregede lydbilder kan opptre i “typisk norsk” topografi med kupert terreng og ofte lite vegetasjon. For å undersøke dette nærmere ble det besluttet å bruke Lista vindkraftverk som egnet sted for et case-studie basert på klager på støynivået og klagernes opplevelse av lydbildet i området.

Følgende problemstillinger ble nevnt som utgangspunkt for studiet:

1. I hvilken grad kan lydbildet fra et vindkraftverk påvirkes av «typisk norsk» topografi, sammenlignet med for eksempel vindkraftverk i flatt terreng?
2. I hvilken grad kan erfaringene fra Lista vindkraftverk innebære at støybildet blir annerledes enn forventet også ved andre norske vindkraftverk?
3. Hvordan bør dette eventuelt reflekteres i NVE og Miljødirektoratets praksis og regelverksutvikling?

1.2 Befolkningsundersøkelse på Lista

Høsten 2015 utførte Transportøkonomisk institutt (TØI) en befolkningsundersøkelse på Lista etter klager på støy fra vindkraftverket.

I undersøkelsen ble alle beboere over 18 år med bolig eller fritidsbolig nærmere enn 2 km fra én eller flere vindturbiner tilhørende vindkraftverket kontaktet. Totalt ble 240 personer kontaktet hvorav 90 personer svarte. Svarprosenten i undersøkelsen var dermed 38 prosent. Gruppen med de laveste beregnede støynivå hadde lavere svarprosent enn personer utsatt for de høyere støynivå.

I undersøkelsen blir bomiljø, helse, støyømfintlighet, skyggekast, holdning til fornybar energi m.m. kartlagt.

Resultatene fra spørreundersøkelsen er benyttet for å utarbeide virkningskurver for støyplage (såkalt dose-respons kurver) utenfor bolig. Disse kurvene tilsier at støy fra vindturbinene på Lista av noen av respondentene oppfattes som 7 – 8 dB høyere enn gjengitt i internasjonale undersøkelser som igjen er lagt til grunn for dagens grenseverdi for støy fra vindturbiner.

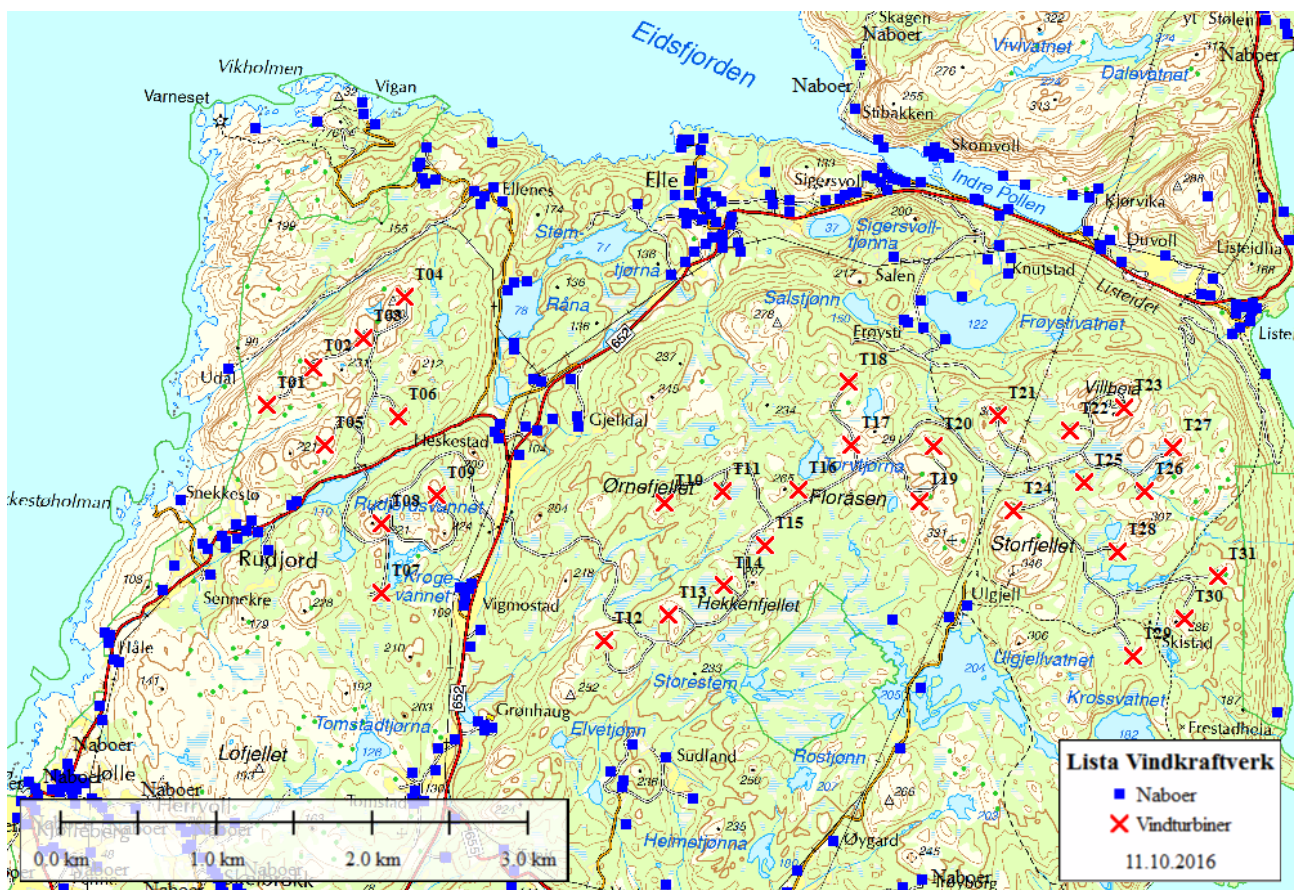
Opplevelsen av sjenanse er sammenholdt med respondentenes holdning til vindkraft. Resultatene viser da at holdning til vindkraft som fornybar energikilde og synet på om vindturbiner generelt er visuelt skjemmende i landskapet har innvirkning på oppgitt sjenanse.

Personer som er positivt innstilt til vindkraft og vindturbiner rapporterer om mindre sjenanse enn andre.

På grunn av at undersøkelsen er utført i et område der det er en konfliktsituasjon, og antallet som har svart er relativt lite, er undersøkelsen omfattet med stor usikkerhet. Det er dermed vanskelig å overføre generelle slutninger om støyplager fra vindturbiner i Norge.

1.3 Om prosjektet

I henhold til prosjektavtalen er arbeidet gjennomført som en kombinasjon av litteraturstudier, skrivebordstudier med beregninger og feltarbeid. Det er tatt utgangspunkt i Lista Vindkraftverk, hvor en del naboer har klaget på høye støynivåer. Lista Vindkraftverk består av 31 turbiner av typen Siemens S93 med navhøyde på 80 m. Turbinene er plassert i kompleks terreng i terrenghøyder mellom 160 og 310 m.o.h.. En oversikt over vindkraftverkets plassering, turbinposisjoner (røde kryss) og bygninger i området (blå firkanter) er vist i Figur 1.



Figur 1 – Oversikt over Lista vindkraftverk (turbinene er markert med røde kryss og naboer med blå firkanter)

Som det fremgår av kartet strekker anlegget seg fra vest mot øst i den nordlige delen av Lista, og for enkelte naboer kan opptil 11 turbiner sees fra boligen. Enkelte naboer er også delvis omringet av vindturbiner og ligger dermed nedstrøms vindturbinene ved vind fra flere retninger.

Beregninger og måling av støy ved Lista Vindkraftverk er tidligere utført av SWECO (2013/2014). I deres rapport ble det konkludert med at årsmidlet lydnivå ved bebyggelse med støyfølsomt bruksformål ved Lista Vindkraftverk møter anbefalt grenseverdi i støyretningslinjen T-1442, med unntak av 2 eiendommer med fritidsbygg vest for Rudjordsvannet, hvor årsmidlet lydnivå vil kunne være noe over den anbefalte grenseverdien i T-1442. Dersom grenseverdien for boliger som ikke ligger i vindskygge legges til grunn vil imidlertid lydnivå være under grenseverdien.

En revidert retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging ble utgitt i 2012. Ettersom den nye retningslinjen trådte i kraft etter at endelig konsesjon for bygging og drift av Lista vindkraftverk ble gitt (2009) er det den tidligere retningslinjen som er gjeldende for anlegget. I denne rapporten er det imidlertid utført beregninger i henhold til den nye retningslinjen fra 2012 og dens veileder (M-128) som kom ut i 2014, for å vurdere om denne i større grad samsvarer med naboenes opplevelse av støynivået og om den dermed er bedre egnet for beregning av støyutbredelse i "typisk norsk" terreng.

For å få en bedre forståelse for lydbildet i nærheten av vindkraftanlegget er det utført intervjuer med utvalgte naboer, samt at det er utført nye orienterende enkeltmålinger over korte tidsrom i aktuelle punkt. Opplevelsen av lydbildet er vurdert sammen med resultater av litteraturstudiet for å finne mulige årsaker til opplevelsen av lydbildet. Videre er det gjort en vurdering av overføringsverdien i resultatene fra Lista og en vurdering av hvordan NVE og Miljødirektoratet bedre kan hensynta støyutfordringer i vindkraftverk i typisk norsk terreng.

2 Retningslinje

Da det ble gitt konsesjon til Norsk Miljø Energi Sør AS til bygging og drift av Lista Vindkraftverk var det den tidligere retningslinjen for behandling av støy i arealplanlegging (T-1442/2005) og dens veileder (TA-2115) som var gjeldende og tidligere utførte støyberegninger for prosjektet er basert på denne. En ny revidert utgave av retningslinjen kom i 2012 (T-1442/2012), med oppdatering av dens veileder (M-128/2014) 2 år senere. De reviderte utgavene av disse dokumentene inneholder endringer i anvisningene for beregning av støy fra vindturbiner. Dette medfører avvik fra støyberegningene som tidligere er utført for vindturbinene på Lista.

Felles for tidligere og nåværende retningslinje er en anbefalt grenseverdi på $L_{den} = 45$ dB for utendørs støynivå. L_{den} er et årsmidlet, A-veiet ekvivalent lydnivå for dag-kveld-natt (day-evening-night) med 5 dB straffetillegg i kveldsperioden og 10 dB i nattperioden (kl. 23–07). I den tidligere retningslinjen var grenseverdien L_{den} 50 dB for mottaker som befinner seg i vindskygge mindre enn 30 % av tiden, forutsatt at vindturbinen ikke gav lyd med rentonekarakter. I den nye retningslinjen er dette strammet inn og L_{den} 45 dB er oppgitt som grense for samtlige boliger uansett plassering i terrenget. En annen viktig endring er at det med den nye retningslinjen skal antas 100 % døgkontinuerlig drift ved utarbeidelse av støyberegninger og støysonkart, mens kravet i tidligere retningslinje var at det for hver vindturbin kun skulle regnes med 7000 driftstimer per år (80 %). Dette utgjør i praksis at støygrensen nå er skjerpet med 1 dB.

Videre er det i den reviderte utgaven av veilederen (M-128/2014) oppgitt at beregningene skal utføres med en av følgende godkjente metodikker:

- Beregningsmetodikk oppgitt i kapittel 9.8.4 i veilederen (M-128/2014)
- NORD2000

Beregninger i henhold til metode 1 skal ifølge veilederen ligge til grunn for f.eks. oversiktsplan, utredning og KU, mens beregninger i henhold til metode 2, som er en mer avansert beregningsmetodikk, kan kreves av konsesjongiver som komplettering.

3 Litteraturstudie

3.1 Grunnleggende forhold

Ifølge programmet for undersøkelse skulle en kortfattet litteraturstudie omfatte følgende forhold:

- Påvirkning av vindgradienter, stabilitetsforhold og turbulens
- Refleksjon av støy
- Effekten av absorpsjonsfaktor og årstidsvariasjoner
- Sylindriske spredningsmodeller for lydutbredelse over hard mark

For noen år siden handlet mye av tilgjengelig litteratur og foredrag på konferanser om påliteligheten i ulike beregningsmodeller for vindturbinestøy under normaliserte forhold. Ut i fra slike studier ble det laget kriterier for beregninger som gir støynivåer som stemmer godt over ens med målinger for situasjonen med medvind på 8 m/s i 10 meters høyde, normalt også på dagtid.

Noe senere er lavfrekvensinnhold og infralyd studert. Etter hvert er det også rimelig stor enighet om at infralyd ikke bidrar nevneverdig til sjenanse. Disse konklusjonene støttes også av nyere rapporter, i de tilfeller infralyd omtales.

Mye av dagens litteratur viser til at økt sjenanse kan knyttes til uventede store variasjoner i lydnivå over tid og til impulsaktige variasjoner i øyeblikksnivået. Det siste fenomenet kalles amplitudevariasjon. Herunder nevnes også forholdet mellom vindturbinestøy og bakgrunnsstøy ved bakkenivå.

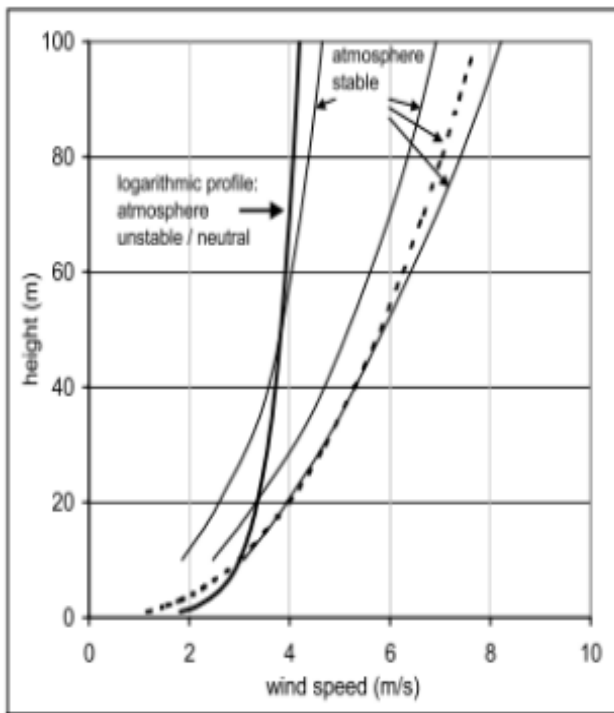
Vi har funnet mindre litteratur om lydutbredelse over kompleks topografi, men litteraturstudien har likevel gitt nyttig informasjon om forhold som kan påvirke situasjonen og støyopplevelsen generelt. Noen forhold kan også knyttes til kompleks topografi og/eller landskapet rundt vindkraftverket på Lista.

Det er ikke funnet noe spesifikt og nevneverdig nytt om absorpsjonsfaktor og årstidsvariasjoner eller om sylindrisk spredning. Disse forholdene er derfor omtalt mer under avsnitt om beregninger.

3.2 Variasjon i lydnivå på grunn av vind i høyden

Vindturbinene er blitt større og høyere enn da de innledende modellene for støyutbredelse ble etablert. Vindforholdene i høyere luftlag kan dermed få en annen betydning både for genereringen av støy og for støyutbredelsen. Dette kan gi nye forutsetninger, som man tidligere ikke hadde behov for å ta hensyn til. Grunnen til ordet "kan" brukes, er at forholdet synes å variere med bl.a. topografien på stedet og med tiden på døgnet.

Det er kjent at hastighetsprofilen kan bli forskjellig under stabile forhold uten turbulens sammenlignet med det man har med normal turbulens i luften. Hastighetsforskjellen (ved en av referansene) er målt til å være opp mot 2.6 ganger større om natten enn den er på dagen i navhøyde til vindturbinene. Dette gir andre lydnivåer både som følge av økt vind og som følge av større hastighetsforskjeller over rotorbladene. Økt vind kan gi høyere lydnivå enn forutsatt ut fra et normalt vindprofil og 8 m/s i 10 meters høyde. Stor variasjon i hastighet over rotorbladet kan gi også dårligere pitch-tilpasning i deler av et rotoromløp. Dette kan både gi opphav til høyere støynivå og større risiko for amplitudemodulasjon.



Figur 2 – Variasjon i vindskjær ved ulike stabilitetsforhold (G.P. van den Berg, 2006)

I et av de omtalte vindkraftverkene (Rhede i Tyskland) er det målt tidvis økning på 15 dB over flat mark med spredte trær, som man regner med kan være forårsaket blant annet av forhold som nevnt over. Dette anlegget er imidlertid fra 2001, og turbinene er ikke nødvendigvis sammenlignbare med dagens turbiner, hvor teknologiutvikling knyttet til blant annet bedre utforming av blader og pitch teknologien gir lavere støyvirkninger.

I Sverige er det gjennomført en stor studie med langtidsmålinger som konkluderer med at lydnivået over variert terreng med skog kan variere med 7 – 14 dB.

I Sverige er det gjennomført en stor studie med langtidsmålinger som konkluderer med at lydnivået over variert terreng med skog kan variere med 7 – 14 dB.

I Sverige er det gjennomført en stor studie med langtidsmålinger som konkluderer med at lydnivået over variert terreng med skog kan variere med 7 – 14 dB.

Kommentar til forholdene på Lista

Det fremgår av vedleggene til målerapporten for Lista Vindkraftverk (fra Sweco) at det er store variasjoner i lydnivået ved varierende vindretning og vindhastighet.

Det kan tenkes at store vindgradienter kan oppstå som følge av flere forhold i norsk topografi. De fremherskende vindretningene på Lista fører i stor grad vinden over vann før den treffer land. Vinden i nedre luftlag i et komplekst terreng, vil da bli bremsset og eller styrt i andre retninger enn høyere oppe p.g.a knauser og koller. Dette vil da kunne bidra både til vertikale og horisontale vindgradienter.

3.3 Lydutbredelse med stor avbøyning

I de situasjonene vindgradienten kan bli større enn normalt, blir lydbanen mer krummet og mulige skjermingseffekter av høyder i terrenget avtar. Dette betyr at muligheten for å høre vindturbiner man ikke ser er økende.

Lydutbredelsen er også bedre over reflekterende terreng enn over mykt absorberende terreng. Dette blir nærmere illustrert i avsnittet med vurdering av ulike beregninger. Man tenker normalt at dette medfører at lyden brer seg lenger bort fra lydkildene. Mer lyd som kommer tidligere ned fra vindturbinene sammen med reflekterende terreng kan imidlertid tenkes å gi økt nivå i nærområdet. Kombinert med adderte refleksjoner fra skrånende flater kan dette sannsynligvis gi en økning i støynivået sammenlignet med det man forventer over normalt flatt terreng, spesielt når det som innledningsvis nevnt – er høye vindgradienter.

(Disse forholdene er ikke direkte omtalt i noe av litteraturen vi har funnet, men kan avledes som en konsekvens av andres vurderinger av lydutbredelse.)

Kommentar til forholdene på Lista

På Lista er terrenget delvis bart fjell, fjell som er dekket av et tynt torvlag og skog. Det er ingen store, plane flater som reflekterer lyden, men forsterkende refleksjoner kan likevel oppstå i ulike retninger fra tilfeldige flater. I denne situasjonen kan små variasjoner i lydbanene med vinden føre til at lyden varierer mye både i tid og fra sted til sted.

3.4 Bakgrunnsstøy

Opplevelsen av støy fra en kilde er koplet til den naturlige bakgrunnsstøyen. Alle som har utført mange målinger av utendørs støy har merket at opplevd lyd fra en kilde er høyere når det er stille i omgivelsene enn når det er mer støy fra andre kilder.

Dette har også vært en del av grunnlaget for det gjeldende regelverket for vindturbinestøy. Man regner med at støyen og sjenansen stiger med stigende vindhastighet opp mot en vindstyrke på 8 m/s i 10 meters høyde. Over denne vindstyrken forventes det;

- for det første at økningen av vindturbinestøyen flater litt av med økende vind og at;
- vindens maskerende effekt demper opplevelsen av vindturbinestøyen.

Inntil for kort tid siden skilte man også mellom hus som lå innenfor eller utenfor vindskygge, fordi det ble antatt at man ville bli mindre forstyrret i boliger som var mer utsatt for vind.

Flere av de leste rapportene fremhever lav bakgrunnsstøy som en mulig kilde til økt sjenanse, spesielt hvis den blir ned mot 30 dBA og lavere. En undersøkelse fra Japan viser at det er stor forskjell på sjenanse fra vindkraftverk i situasjoner hvor man har støy fra bølger og i situasjoner hvor man ikke har det.

Truls Gjesteland har skrevet en rapport om bakgrunnsstøy i Europa, basert på befolkningstetthet. Denne gir som ventet indikasjoner på at bakgrunnsstøyen langs kysten i Norge er vesentlig lavere enn mange steder i Europa hvor det finnes vindkraftverk. Enkle målinger som vi selv har utført har bekreftet at støynivået i kystområder på lune steder borte fra normal sivilisasjon, fort kan komme ned under 30 dBA selv om det blåser i høyden.

Regelverk og bakgrunnsstøy

I de fleste land brukes ekvivalentnivå, L_{Aeq} , ved gitte vindhastigheter i stedet for vektet døgnmiddel, L_{den} , som mål på støynivå. Noen land har også støygrenser som er mer knyttet til bakgrunnsstøy enn vi har i Norge, dette gjelder blant annet Sverige, Danmark og Storbritannia.

I Sverige angir Naturvårdsverket at L_{Aeq} over 40 dB ikke bør overskrides utenfor boliger ved medvindssituasjon og når vindhastigheten ved turbin er 8 m/s i 10 m høyde.

Naturvårdsverket anbefaler i tillegg at en skjerpet grense blant annet i områder der bakgrunnsstøyen er lav, i områder for friluftsliv der lavt støynivå utgjør en viktig kvalitet og der naturlige lyder dominerer lydbildet. I slike områder anbefales det at støy fra vindturbiner ikke bør overskride 35 dB. Det spesifiseres at dette eksempelvis gjelder i fjell og skjærgårder

I Danmark er støy fra vindturbiner regulert av «Vindmøllebekendtgørelsen». Det er differensierte grenser for “beboelse i det åpne land” og “områder til støjfølsom arealanvendelse” i tillegg til egne grenser for vindhastighetene 6 og 8 m/s ved turbin. Følgende grenser er gitt

“Beboelse i det åpne land”:

$$L_{Aeq} = 44 \text{ dB ved vindhastighet } 8 \text{ m/s}$$

$$L_{Aeq} = 42 \text{ dB ved vindhastighet } 6 \text{ m/s}$$

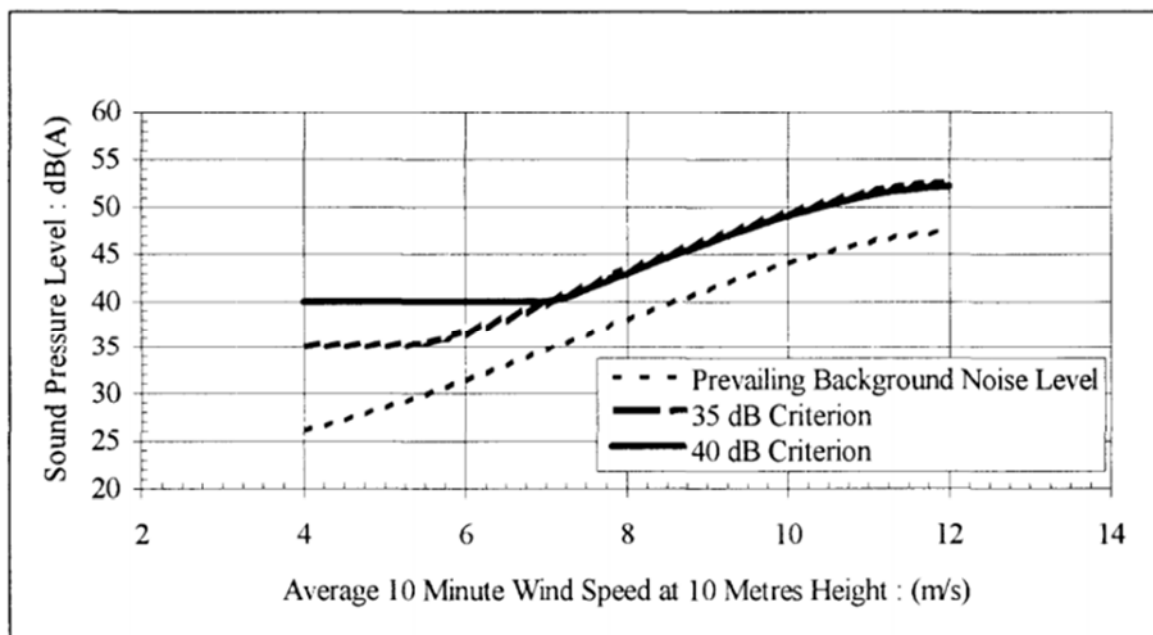
“Støjfølsom arealanvendelse”:

$$L_{Aeq} = 39 \text{ dB ved vindhastighet } 8 \text{ m/s}$$

$$L_{Aeq} = 37 \text{ dB ved vindhastighet } 6 \text{ m/s}$$

Storbritannias grenser for støy fra vindturbiner er satt relativt til bakgrunnsstøyen ved berørte boliger. På dagtid skal ikke støynivået overstige $L_{A9010min} = 35 - 40$ dB, eller bakgrunnsstøynivået pluss 5 dB. Parameteren $L_{A9010min}$ gir typisk 1.5 - 2.5 dB lavere nivå enn $L_{Aeq10min}$.

Figur 3 under viser hvordan grensen kan bli på dagtid, med varierende bakgrunnsstøynivå. Hensikten med å sette en dynamisk grense er å utnytte maskeringseffekten til bakgrunnsstøyen. Det setter imidlertid store krav til kartlegging og fastsetting av hva som er typisk bakgrunnsstøy i et område, eller ved hver enkelt berørt bolig.



Figur 3 – Eksempel på mulig varisjon i støykravet med en dynamisk støygrense (Britisk Regelverk)

Kommentar til forholdene på Lista

Bakgrunnsstøyen som er registrert og referert i målerapporten for Lista er målt etter oppstart av anlegget og derfor begrenset til en registrering ved turbinstopp. Man har dermed ikke noen god oversikt over hvor lav bakgrunnsstøyen kan være når vindturbinene er i drift.

Vindmålinger på Lista viser at vindstyrken i et referansepunkt ved boligene kan være mye lavere enn i høyden. Hvis det ikke er andre lyder av betydning tilsier dette at bakgrunnsstøyen til tider kan være vesentlig lavere enn vindturbinestøyen.

3.5 Komplekst terreng

I en australsk studie er det sett på effekten av forskjellig type topografi. Det har blitt sammenlignet resultater mellom målinger og beregninger for punkter rundt 6 forskjellige vindkraftanlegg. Rundt fire av vindkraftverkene var det målt i hovedsakelig flatt terreng, i de to resterende tilfellene var de nærmeste turbinene på topper 50 – 200 m over målepunktene. Figur 4 og Figur 5 under viser to typiske snitt mellom turbin og målepunkt, der stigningen er konkav i det ene snittet og jevn i det andre. Det var altså resultatene for tre hovedtyper terreng mellom mottaker og kilde som ble sammenlignet: flatt, jevnt stigende og konkavt stigende.

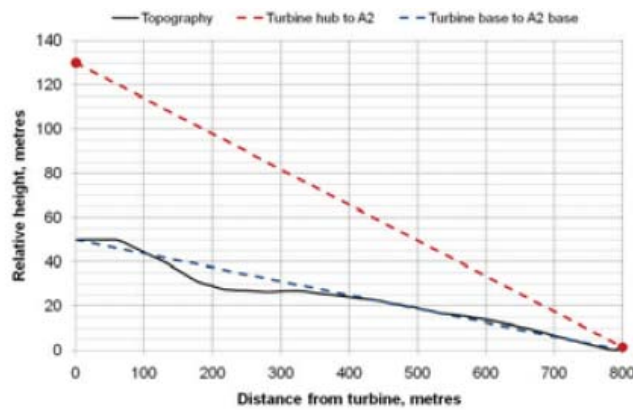
Måleresultatene ble sammenlignet med blant annet beregninger utført med NORD2000 og ISO 9613-2 med hard mark (markabsorpsjon = 0) og med delvis myk mark (markabsorpsjon = 0.5).

Sammenligninger mellom målinger og beregninger utført med NORD2000 viser at avviket var på inntil ± 3 dB. Det kommenteres for øvrig at et stort utvalg av mulige inngangsparametre for

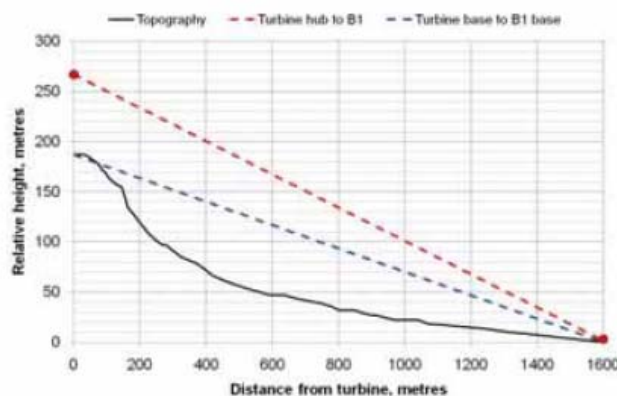
meteorologi i NORD2000-metoden gjør at det trolig er mulig å øke nøyaktigheten i beregningsresultatet. Dette krever imidlertid god kjennskap til meteorologien for de aktuelle områdene som skal vurderes.

ISO 9613-2 med hard mark viser at metoden overestimerer støybidraget med inntil 1.5 dB for flatt terreng, mens for jevnt stigende terreng overestimerer metoden nivået med inntil 4 dB. For konkavt terreng er det imidlertid en underestimering på inntil 2 dB. ISO 9613-2 med delvis myk mark gir imidlertid enda større avvik for denne terrengetypen, men noe bedre samsvar ved øvrige terrengetyper.

Undersøkelsen kommer ikke fram til én metode som er nøyaktig nok for vindkraftverk, og ingen av metodene tar tilstrekkelig høyde for endringer i terreng mellom turbiner og mottakere. Det konkluderes imidlertid med at ISO 9613-2 med hard mark kan gi et typisk øvre nivå for målestedene, men metoden vil også overestimere nivået ved flatt eller jevnt synkende terreng.



Figur 4 – Eksempel på mulig varisjon i støykravet med en dynamisk støygrense (jevnt stigende terreng) (Evans and Cooper, 2012)



Figur 5 – Eksempel på mulig varisjon i støykravet med en dynamisk støygrense (konkavt stigende terreng) (Evans and Cooper, 2012)

Kommentar til forholdene Lista

Terrenget i og rundt vindkraftverket på Lista er kupert med store variasjoner, og stor andel såkalt konkavt terreng. Dette kan gi utslag i økt beregningsusikkerhet og gjerne underestimering av støynivået avhengig av hvilken metode eller marktype som velges.

3.6 Amplitudemodulasjon

Amplitudemodulasjon beskrives generelt som variasjon i nivå som kan skyldes mange ulike faktorer. Det er enda ikke etablert noen felles kriterier for hva som er sjenerende amplitudemodulasjon. Det er også uklart hvilke effekter som skaper den mest sjenerende lyden, men en rekke mulige faktorer nevnes i litteraturen. Problemet kompliseres av at fenomenet bare oppstår periodevis. Her gjenstår mer forskning knyttet til hvilke faktorer som kan utløse amplitudemodulasjon.

De forskjellige fenomenene som er beskrevet i litteraturen omfatter bl.a.:

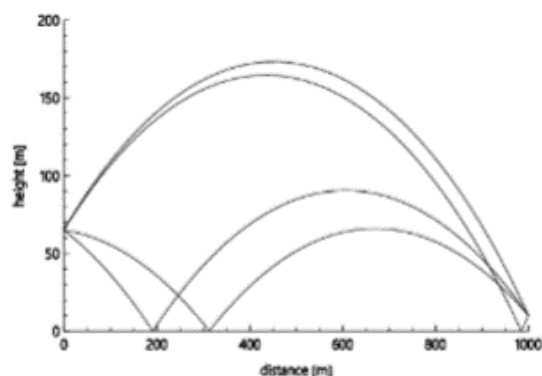
- "Svusjet" når rotorbladene passerer kl. 3 i rotasjonen.
- Endringer i nivået når bladet passerer foten av vindturbinen (oppleves også som et "svusj").
- Direktivitet gir varierende lydutbredelse til mottaker fra ulike deler av omløpet.
- Ulik lyd fra bladet p.g.a. ikke optimal vinkel i ulike høyder (dårligere tilpasset pitch).
- Ulike former for virvelavløsning genererer ulik lyd fra ulike deler av rotor.
- Stor vindgradient over rotor øker variasjonen i ulike lyder på ulike steder i omløpet.
- Endringer i vindens angrepsvinkel gir også variasjoner i lydnivået.
- Ikke-uniform vindstrøm som fører til lokale "stall"-effekter og nivåvariasjoner.
- Ujevn turbulensfordeling gir ulike nivåer fra ulike deler av rotor

Det finnes flere effekter som gir amplitudemodulasjon i nærfeltet (inn til 500–600 m avstand) enn i fjernfeltet fra vindturbinene. Målinger fra en svensk undersøkelse viser at amplitudemodulasjon oppstod i 30 % av tiden i 400 m avstand og 18 % i 1 km avstand, med de kriteriene de la til grunn for å si at amplitudevariasjon var nærværende.

Det synes imidlertid å være enighet om at sjenerende amplitudemodulasjon ofte domineres av «svusjet» fra virvelavløsning. Når bladet passerer foten av vindturbinen genereres en «svusj»-lignende lyd som ifølge noe av litteraturen er mindre direktiv og dermed høres lenger borte fra turbinene. Dette brer seg lenger under stabile vindforhold. Spekteret endres også av at høye frekvenser absorberes mer og mer over økende avstand. Lyden betegnes «thumb» på engelsk, og kan kanskje kalles et dunk eller et "mykt slag" på norsk.

En av de "andre effektene" som er nevnt i en ny rapport, er varierende interferens mellom avbøyd direkte lyd og refleksjon fra bakken fra samme vindturbin. Fenomenet er koplet til direktiv lydavstråling fra bladene på rotor, og lydbanene som vist til i Figur 6. På grunn av at kildehøyden for støy fra rotoren varierer, vil punktet som får interferens mellom direkte lyd og refleksjon fra

bakke variere i avstand fra turbinen. I et fast punkt vil lydbildet dermed bli preget av topper i lydnivå idet interferenspunktet passerer punktet.



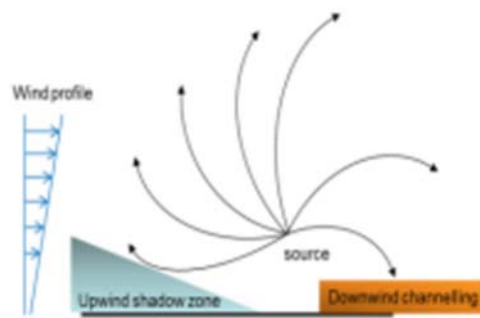
Figur 6 – Interferens mellom avbøyd direkte lyd og refleksjon fra bakken fra samme vindturbin (Kühner, 2016)

Stabile vindforhold gir tilnærmet like hastigheter på vindturbinene. Det kan da bli flere vindturbiner som genererer lyd nesten i takt og i noen situasjoner kan (de små) lydvariasjonene bli sammenfallende.

Amplitudevariasjon kan derfor øke hvis det maksimale lydnivået fra flere vindturbiner opptrer samtidig. Økningen vil selvsagt bli større hvis lydnivået fra mange vindturbiner faller sammen, men sannsynligheten for at dette skjer reduseres jo flere vindturbiner som bidrar til lydnivået i mottakerstedet. I praksis vil risikoen for økt amplitudemodulasjon p.g.a. slike summasjonseffekter være størst når det er 2–3 kilder som dominerer. I disse tilfellene kan maksimalnivåene av svusjet / dunket øke med 3–5 dB.

(Dette fenomenet omtales noen ganger som interferens mellom lyd fra flere vindturbiner, men det er ikke en sann interferens mellom bølgetopper og bølgebunner i lyden. Den effekten ville gitt en økning på 6 dB for interferens mellom to kilder. Her er det bare snakk om maksimalnivåer som faller sammen og økningen opptrer som normal sum av lydenergi.)

Det er vanligst med flatt terreng i de tilfellene som er omtalt i litteraturen vi har lest. I slike situasjoner heter det at amplitudemodulasjon kan opptre i motvindsone som følge av at vindturbinene blir delvis skjermet og/eller at man hører færre eller bare deler av vindturbinene. Man kan også tenke seg at et kupert landskap kan øke effekten på grunn av at landskapet skjuler deler av kildene, slik at man bare hører «halve vindturbiner».



Figur 7 – Forskjell i støyutbredelse oppstrøms og nedstrøms støykilden
(Smith, Bullmore, CAND and Davis, 2012)

Kommentar til forholdene på Lista

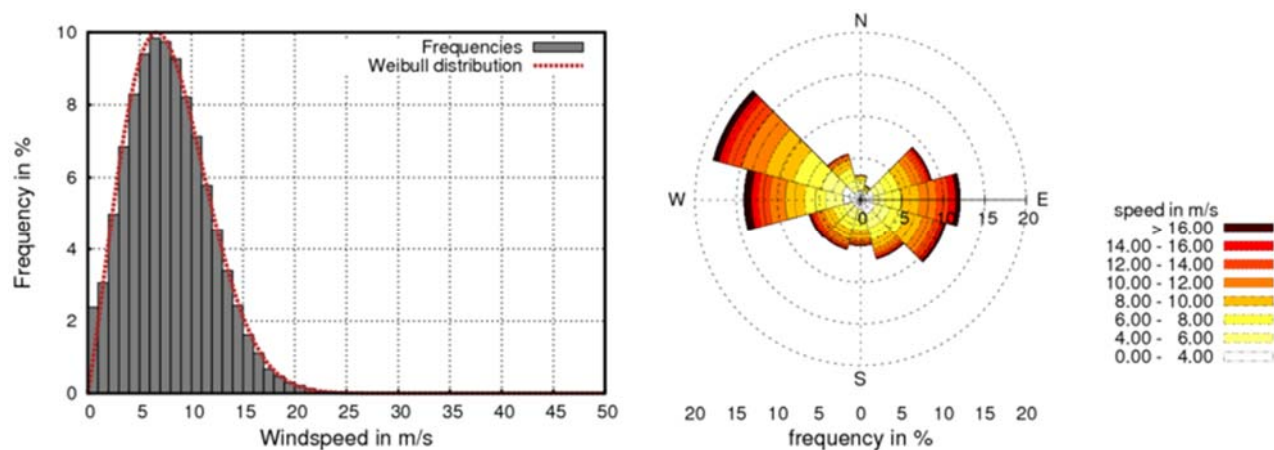
På Lista kan det være flere av forholdene som er omtalt over som kan bidra til amplitudemodulasjon.

4 Vindforhold på Lista

4.1 Vinddata fra målemast

Lista-halvøyas plassering på en utstikker i havgapet på kysten av Sør-Norge gjør området svært vindutsatt. Vinden i dette området følger i stor grad kystlinjen og treffer da området hovedsakelig fra vest-nordvestlig og østlig retning. Kompleksiteten i terrenget, med bratte skrenter, knauser, fjellområder, store vann og dalfører medfører imidlertid store lokale forskjeller i det aktuelle området.

Vinddata for området er tilgjengelig for perioden 19.01.2005 til 08.07.2008 fra en 50 meter høy målemast som sto plassert 30 m fra turbinpunkt T23 (Mast 465). Data fra høyeste målehøyde er langtidskorrigert med en 20 års referansetidsserie for å representere langtidsvindforhold i området. Figuren under viser langtidskorrigert fordeling av vindhastighet.



Figur 8 – Langtidskorrigert fordeling av vindstyrke og vindretning fra mast 465

Som det fremgår av måledataene for området er det vind fra østlig og vest-nordvestlig retning som forekommer hyppigst i dette området. Andelen vind fra 90 graders sektoren som inkluderer vest-sørvestlig, vestlig og vest-nordvestlig vind er på 38.9 %, mens vind fra 90 graders sektoren som inkluderer øst-nordøstlig, østlig, øst-sørøstlig retning forekommer 31.6 % av tiden.

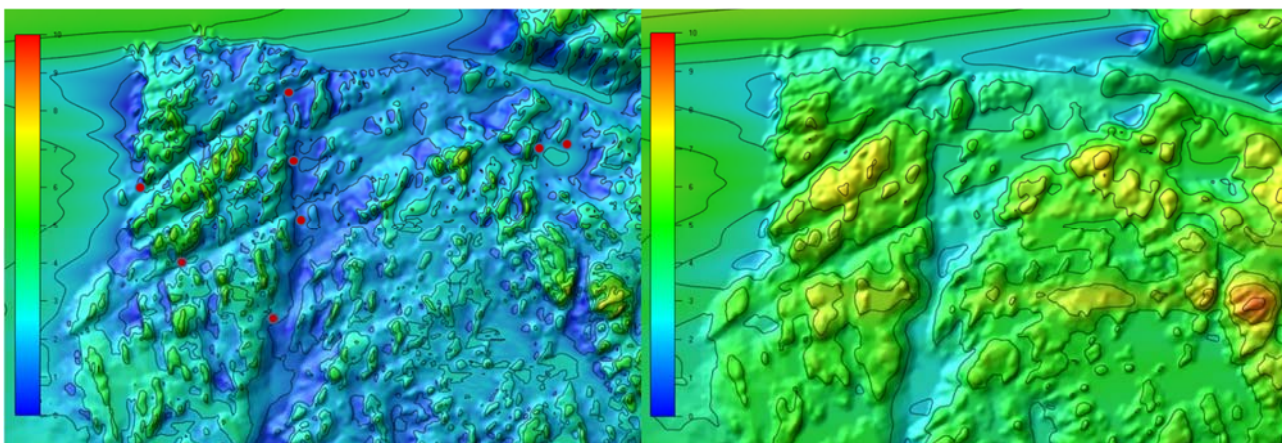
Basert på langtidskorrigerede vinddata er beregnet gjennomsnittlig vindhastighet i 80 m (navhøyde) i turbinposisjonene fra 6.7 til 9.5 m/s, med en middelerdi i vindkraftverket på 8.0 m/s.

4.2 Modellering av vindfeltet

For å kunne vurdere hvordan støyutbredelsen i Lista Vindkraftverk påvirkes av forskjeller i vindfeltet ved støykilde og berørte naboer til parken er det satt opp en CFD strømningsmodell over området. Høydedata med 10 meters oppløsning og ruhetsdata fra Statens Kartverk er benyttet for beskrivelse av terrenget i modellen. Basert på dette er det satt opp en strømningsmodell i programvaren

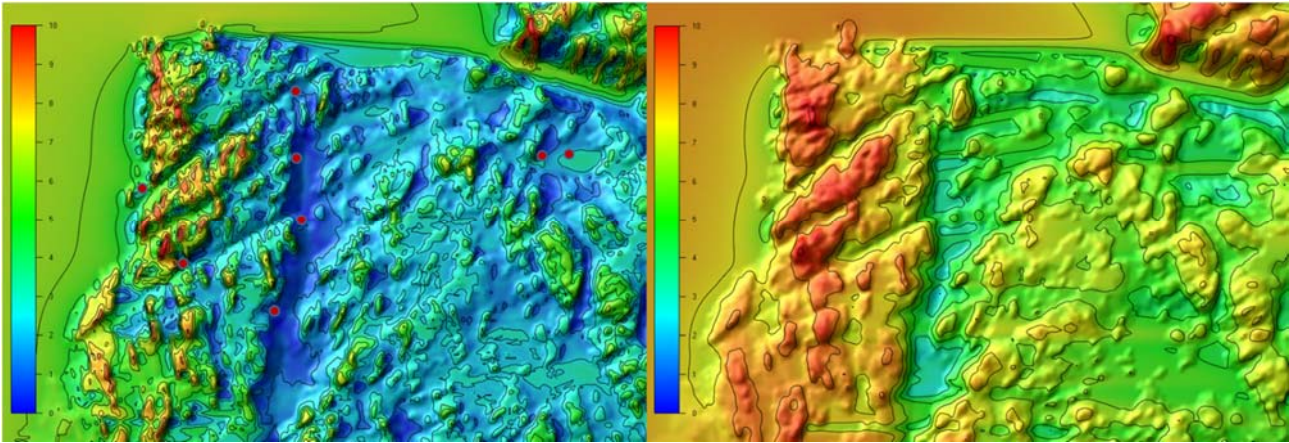
WindSim med 20 m oppløsning. Det modellerte vindfeltet ble skalert med langtidskorrigerte måledata fra mast 465.

Figur 9 under viser vindfeltet i området rundt Lista Vindkraftverk ved vind fra østlig retning i 10 m (til venstre) og vind i navhøyde 80 m (til høyre). Som det fremgår av figurene er det relativt stor forskjell i vindhastighet mellom fjelltoppene i området og nærliggende dalfører. Særlig tydelig er dette i Elledalen som strekker seg fra sør til nord tvers over Lista. Ved vind fra østlig retning blåser vinden normalt på dalen og dalføret blir dermed liggende i vindskygge. Mens vindhastigheten ligger på 6–8 m/s i 80 m over fjelltoppene hvor turbinene er plassert (se figur til høyre) er vindhastighet i 10 m høyde over bakken i lavereliggende områder ved flere av de berørte naboene nær vindstille. I disse beregningene er vindfeltet i 10 m benyttet fordi dette er laveste resultathøyde fra strømningsmodellen, men nær bakken vil vindhastigheten være ytterligere redusert. I slike situasjoner som dette vil forekomsten av naturlig vindsus som kan maskere støyen fra turbinene være liten, og turbinstøyen vil da være langt mer fremtredende enn for områder som ligger mer eksponert for vinden.

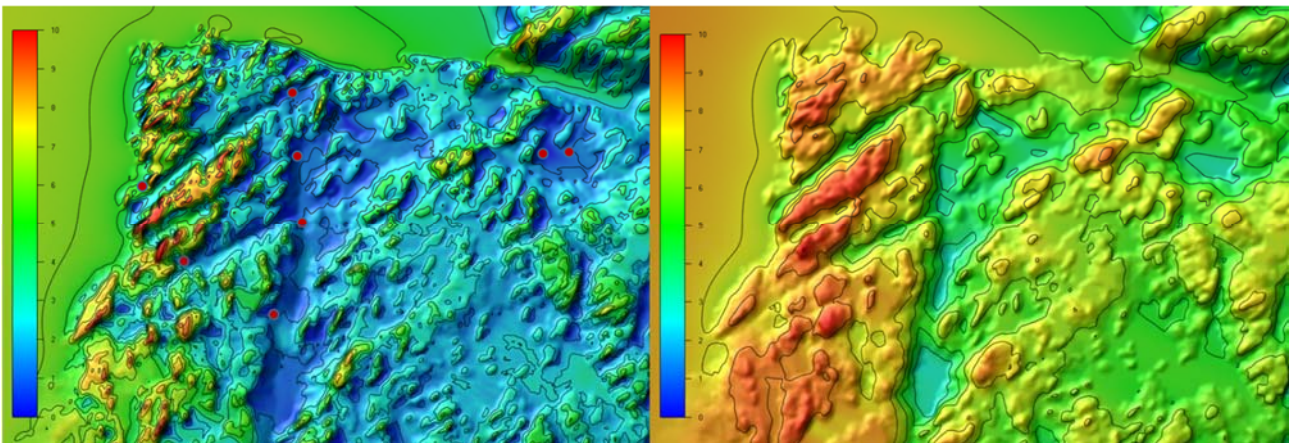


Figur 9 – Modellert vindfelt ved østlig vind (90 grader) for 10 m høyde (venstre) og 80 m høyde (høyre). Utvalgte nabolokasjoner er markert med røde sirkler.

De to neste figurene viser tilsvarende vindfelt for vind fra vestlig og vestnordvestlig retning. For disse vindretningene er normalt vindhastigheten høyere enn for østlig vind. Som det fremgår av figurene ligger hele Elledalen i le også fra disse retningene. Uddal i vest fremstår imidlertid mer eksponert ved disse vindretningene og vil, basert på modellen ikke oppleve den samme skyggeeffekten. Det påpekes at det med 20 m oppløsning i modellen kan være terrengformasjoner som ikke fanges opp i modellen. Disse kan i realiteten gi en lokal skjerming for vinden og medføre vindskygge til tross for at dette ikke fremgår av det modellerte vindfeltet.



Figur 10 – Modellert vindfelt ved vestlig vind (270 grader) for 10 m høyde (venstre) og 80 m høyde (høyre). Utvalgte nabolokasjoner er markert med røde sirkler.



Figur 11 – Modellert vindfelt ved vestnordvestlig vind (300 grader) for 10 m høyde (venstre) og 80 m høyde (høyre). Utvalgte nabolokasjoner er markert med røde sirkler.

Når en støymåling utføres anses bakgrunnsstøyen å være ubetydelig dersom det blåser mindre enn 4 m/s i målepunktet. Dersom man legger dette til grunn for å vurdere om en mottaker ligger i vindskygge er det mulig at flere av boligene som er vurdert i denne undersøkelsen ligger i vindskygge store deler av tiden. Støyen vil i slike områder oppleves som langt mer sjenerende enn i områder som ligger mer eksponert for vinden og som derfor opplever mer maskerende bakgrunnsstøy.

5 Vurdering av lydbildet

5.1 Tidligere beregnede og målte støynivåer

Resultatene av tidligere utførte målinger (SWECO, 2014) og beregninger i samme nabopunkt er presentert i Tabell 1 under.

Tabell 1 - Oversikt over SWECOs resultater av målinger og beregninger av turbinstøy på Lista

Målepkt.	Bruksnr.	Sted	Koordinater		Resultater	
			Ø	N	Beregnet	Målt
1	52/8	Midvann	362098	6449899	44	43
2	52/6	Heskestad	362053	6449045	43	44
3	53/5	Vigmostad	361820	6447877	46	45
4	52/13	Heskestad	362290	6448998	45	43
5	83/23	Grønhaug	361996	6447090	42	45

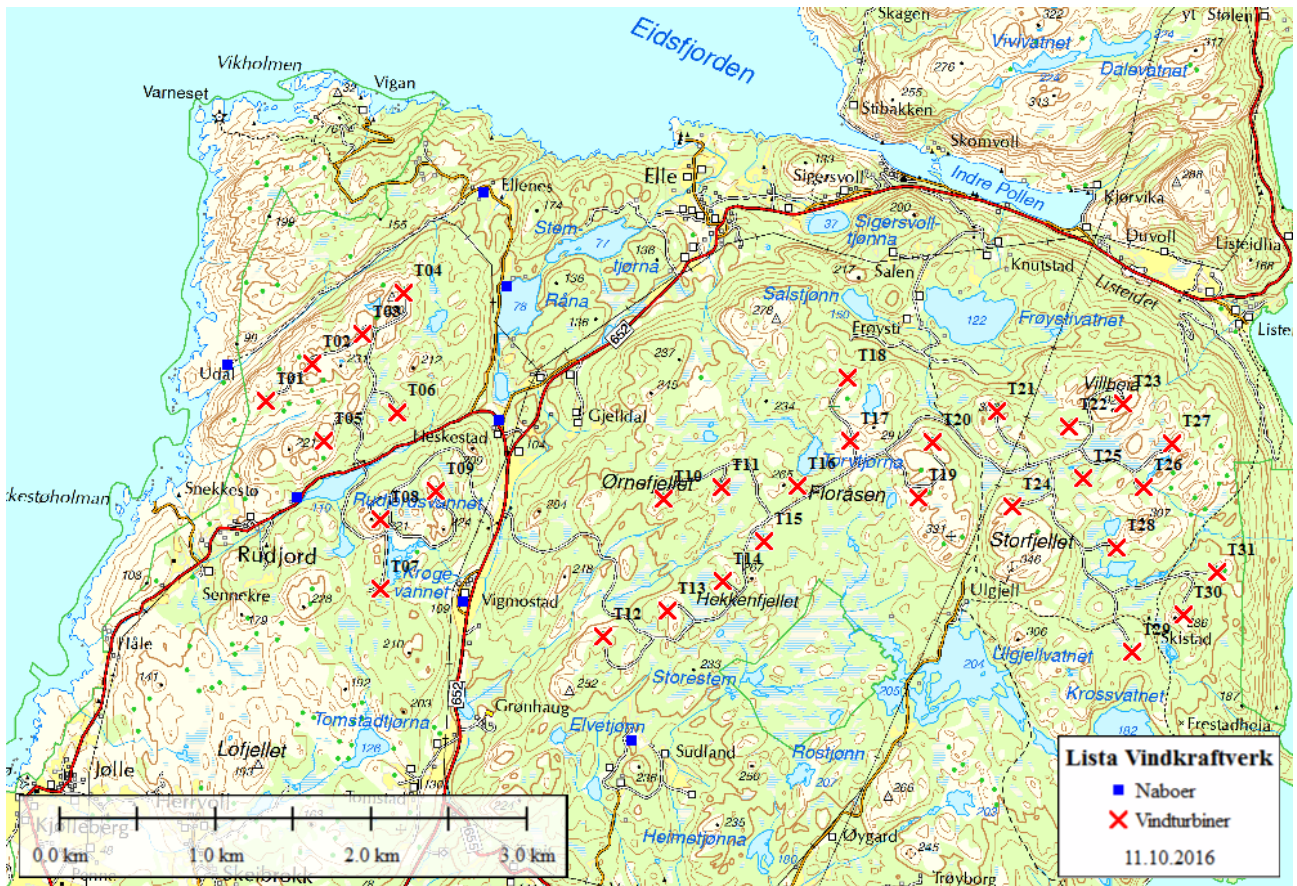
Måleresultatene presentert i tabellen er fremkommet fra målinger over lang tid der støynivåene under vind fra ulike vindretninger og vindstyrker er midlet over året for å finne L_{den} . Man har, så vidt vi kan se, brukt måleverdiene som de er, og ikke regnet om til "normaliserte forhold" (8 m/s i 10 m høyde). På denne måten får man også med virkningen av mulige driftsstopp. Måleresultatene representerer gjennomsnittsverdien for aktuell vind fra ulike retninger over lang tid som antas å tilsvare et år.

Bakgrunnsstøyen har man bare hatt anledning til å måle under en begrenset driftsstopp. Korreksjonene for bakgrunnsstøy er dermed gjort skjønnsmessig. Målearbeidet har vært omfattende og det virker godt dokumentert. Måleresultatet inneholder de tilnærminger som man tidligere kunne bruke innenfor anvisningene når man skulle finne et årsmidlet nivå.

5.2 Naboenes opplevelse av lydbildet

Det fremgår av tilbudsunderlaget at opplevd sjenanse blant naboer er større enn forventet. En av årsakene til dette er trolig at mengden maskerende støy er mindre enn hva man kan forvente i tilsvarende vindkraftverk i mindre komplekst terreng. For å få en bedre forståelse for hvordan lydbildet oppleves i området rundt vindkraftverket og for å avklare når sjenansen inntreffer er det i tillegg utført intervjuer med et utvalg naboer til anlegget.

Gruppen som ble intervjuet består både av fastboende og naboer med fritidsboliger i området, og er hovedsakelig valgt basert på tidligere innsendte klager om støy fra anlegget. Det må derfor bemerkes at utvalget ikke er representativt. Boligene til de utvalgte naboene er markert på kartet i Figur 12.



Figur 12 – Oversikt over boliger til intervjuede naboer (blå firkanter). Vindturbinene i Lista Vindkraftverk er markert med røde kryss.

Det fremgår av intervjuene at støymengden ikke er avhengig av tid på året eller tid på døgnet, men at variasjon i støybildet hovedsakelig skyldes variasjon i vindretning og vindstyrke. Flere av naboene har kommentert at det er betydelig verre ved tåke og regn (høy luftfuktighet), og en kommenterte også at støyen synes å være noe mer fremtredende når det er lav temperatur. Hvilken vindretning som gir kraftigst støy er naturligvis stedsavhengig og varierer ut i fra hvor vindturbinene står plassert i forhold til boligen og terrengforholdene rundt boligen. Samtlige naboer opplever imidlertid sjenanse ved vind fra en eller flere hyppige vindretninger, mens flere hevder at det kan være like ille fra alle retninger.

Naboene beskriver videre tre ulike deler av lydbildet. Samtlige naboer beskriver den rytmiske “svusje”-/“blafre”-/“buldre”-lyden som oppstår når rotorbladene er i nedadgående bevegelse i omløpet som det mest sjenerende. Flere av naboene sammenligner dette med lyden av et jetfly som er i ferd med å ta av eller å lande like ved, og betegner den som turbulensstøy. Det fremgår også av en del av intervjuene at denne støyen tidvis øker på og forekommer mer som en slagstøy med gjentakende slag hver gang turbinbladet passerer tårnet. Støyen i disse perioden er også sammenlignet med lyden som oppstår når en stålcontainer med stein tippes slik at alt innholdet faller ut. Oppfattelsen av varigheten på disse periodene avviker fra nabo til nabo. Enkelte hevder at

de typisk varer i noen minutter, andre i et par timer, mens andre synes støyen kan være kraftig i lengre tid. På Vigmostad er det erfart at det i situasjoner med høy støy er en synlig forskjell i lufttrykk på vingene på turbinene, slik at det av og til ser ut til at de bøyer motsatt vei i vinden. Dette ble hevdet var en konsekvens av turbulens som blir generert i enkelte vindretninger. Det virker da også som at turbinene har vanskelig for å tune seg inn og jobber kontinuerlig opp og ned.

I tillegg til den rytmiske støyen fra rotoren høres en jevn høyfrekvent motordur. Denne er også beskrevet som en hylelyd eller som støyen fra et nærliggende sagbruk, og det er kommentert at det høres som om turbinene konstant retter seg mot vindretningen.

Enkelte naboer har også klaget på en lavfrekvent støy/brummelyd fra turbinene. Ved boligen på Uddal høres denne typisk i situasjoner med lite vind eller situasjoner hvor turbinene står i ro. Årsaken til dette kan for eksempel være ventilasjonsvifter etc. i vindturbinene. Ettersom den er mest fremtredende i rolige perioder høres den godt og kan være veldig plagsom.

Det fremgår for øvrig at det ikke er gjennomsnittstilstanden som er problematisk, og det kan være dager det er nokså stille, men en stor del av tiden, avhengig av vindforholdene, er det kraftig støy fra turbinene.

Noen naboer opplever turbinstøyen som sjenerende. Flere hevder at det går utover nattesøvn og at det er slitsomt å oppholde seg utendørs. Det er prøvd å stenge støyen ute med hørselvern, men lyden trenger gjennom og man må i tillegg høre på musikk for å maskere støyen.

Enkelte naboer hevder at det synes som at turbinstøyen har avtatt noe siden vindkraftanlegget startet opp, men at det like godt kan skyldes at de har blitt vant til det. Andre mener bestemt at det har vært like ille hele tiden, og i hvert fall ikke til det bedre. På Uddal oppleves den lavfrekvente støyen fra motoren å være noe redusert i forhold til oppstarten, og en mulig teori er at det kan ha vært en feil med den nærmeste turbinen som i senere tid er rettet opp.

6 Målinger

6.1 Metode

Det er gjort orienterende målinger i 6 lokasjoner i området ved Lista Vindkraftverk basert på Miljødirektoratets veileder M-290 "Måling av støy fra industri – immisjonsmålemetode".

Veilederen angir at ved måling bør vindhastighet i 2–3 m høyde over bakke ved mottaker i utgangspunktet være 1–3 m/s, men at inntil 5 m/s kan aksepteres. En kompliserende faktor er imidlertid at grenseverdiene for støy fra vindturbiner er gitt for situasjon der vindhastigheten ved turbin er omlag 8 m/s i 10 meter høyde over bakkenivå, noe som i mange tilfeller også kan bety høye vindhastigheter ved mottaker. Rent måleteknisk er derfor situasjoner med vindskygge gunstig.

Det er gjort målinger over 4 dager med forskjellig vær- og vindforhold, samt ulik tid på døgnet og ulik tid på året. Målingene er foretatt etter at vindkraftverket er ferdig utbygd og i full drift. Måleperiode i hvert målepunkt har variert, men har stort sett vært på mellom 2 og 5 minutter. Målinger er foretatt ved vindhastighet 0–4 m/s ved bakkenivå i målepunkt. Under målingene var turbinene hørbare, men de ble også påvirket av generell bakgrunnsstøy i området som sus i vegetasjon, fugler og andre naturlyder. Målinger er forsøkt pauset ved for mye bakgrunnsstøy.

6.2 Resultater

Under følger en kort oppsummering av resultatene fra målingene. Det understrekes at målingene kun er av en orienterende art og dermed ikke utført med den nøyaktighet som kreves for målinger ment for dokumentasjon av støyforhold.

Målepunkt A ligger i Elledalen med vindturbiner både øst og nordvest for området. I dette punktet er det målt i situasjon med medvind fra turbiner i nordvest og situasjon med medvind fra turbiner i sørøst, hvorav vindhastigheten målt på turbinene var noe svakere ved sistnevnte situasjon. Nivået ligger rundt $L_{Aeq} = 43 - 45$ dB for nordvestlig vindretning. For sørøstlig vindretning er målt nivå $L_{Aeq} = 41$ dB.

Målepunkt B ligger også i Elledalen og målinger er her utført i de samme situasjonene som i punkt A. Ved nordvestlig vind ligger støynivået i måleperiodene på $L_{Aeq} = 37 - 45$ dB, avhengig av vindhastigheten ved nærmeste turbin som varierer fra 2 – 8 m/s. For sørøstlig vindretning er målt nivå $L_{Aeq} = 43$ dB.

Målepunkt C ligger nord for vindkraftverket og har kun turbiner i sør. Det er foretatt målinger ved varierende vindretninger og vindstyrker, men ikke med direkte medvindsforhold. Nivåene varierer også her noe basert på vindstyrke og vindretning, men ligger i området $L_{Aeq} = 41 - 46$ dB.

Målepunkt D ligger vest for vindparken med turbiner grovt sett beliggende øst for målepunktet. Målingene som er utført her er foretatt under medvindforhold fra turbin til målepunkt, og vindhastighet på 5 - 6 m/s ved turbin. Målte nivå varierer mellom $L_{Aeq} = 42 - 45$ dB.

Målepunkt E ligger midt i vindkraftverket. Nivået her varierer i området $L_{Aeq} = 47 - 56$ dB.

Målepunkt F ligger i Elledalen, nord for punkt A og B, og har turbiner i vest og mot sørøst. Her er det kun målt ved sørøstlig vind og registrert nivå er $L_{Aeq} = 38$ dB. Det forventes imidlertid høyere nivå for sørvestlig vind da nærmeste turbin ligger i denne retningen, og i vesentlig kortere avstand enn nærmeste turbin i sørøst.

I de støymessig mest ugunstige situasjonene, det vil si relativt sterk medvind mellom bolig og nærmeste turbin, ligger nivået rundt $L_{Aeq} = 45$ dB på de mest støyutsatte stedene. Nivået er ikke korrigert for bakgrunnsstøy, men målingene er pauset ved for mye bakgrunnsstøy. Bakgrunnsstøykorreksjon ligger trolig rundt 1 - 3 dB, men dette er vanskelig å angi korrekt i og med at vi ikke kan måle bakgrunnsstøyen mens turbinene er i drift.

Selv med en bakgrunnsstøykorreksjon tyder målingene på at L_{den} vurdert for medvindssituasjon og 100 % drift generelt ligger over 45 dB i målepunktene. Dersom støynivå fra vindkraftanlegget midles over vindretninger og -styrker som forekommer gjennom året, vil støynivået fra anlegget bli lavere enn de høyeste nivåene vi har målt.

7 Beregninger

7.1 Metode

Det er i denne rapporten kun utført beregninger i henhold til nåværende retningslinje. Beregningene er utført med de to godkjente metodikkene oppgitt i retningslinjen, mens beregninger med ISO 9613-2 (hard mark) er inkludert for sammenligning.

Beregningsmetodikken oppgitt i veilederen (heretter kalt veileder-metoden) er en enkel metodikk som kan benyttes i en tidlig planleggingsfase av et prosjekt. Denne kan benyttes uten bruk av avansert programvare, og gir et enkelt estimat på hva som kan forventes. Den tar ikke hensyn til topografien eller markdemping i det aktuelle området og vil som regel overestimere støynivået noe.

NORD2000 er en mer avansert metode for beregning av støy. Denne metoden ble opprinnelig utviklet for trafikkstøy og har i senere tid blitt validert for beregning av støy fra vindturbiner og erstattet "Nordisk metode for beregning av industristøy" som anbefalt beregningsmetodikk i retningslinjen. En beregning i NORD2000 gir mange muligheter for innstilling av parametere, hvor flere av disse ikke er fastsatt i den norske retningslinjen.

ISO 9613-2 er en internasjonal standardisert metode for beregninger av industristøy. Den er i utgangspunktet ikke utviklet for høye kildetyper som vindturbiner, men blir likevel benyttet som metode for vurdering av støy fra disse i flere land. Denne sammen med "Nordisk metode for beregning av industristøy" ble også benyttet for beregning av støy fra vindturbiner i Norge før ny utgave av T-1442 og M-128 ble utgitt. I ISO 9613-2 har man blant annet mulighet for å justere temperatur, luftfuktighet og legg inn statistisk vindfordeling. Parameteren som imidlertid har mest å si for lydutbredelsen er valg av marktype.

Beregningene utført med de tre metodikkene er basert på oppgitte turbinposisjoner og turbindata, naboposisjoner fra Statens Kartverk, samt valgte innstillinger på øvrige parametere.

7.2 Turbindata

Turbinene på Lista er av typen Siemens S93 2.3MW med navhøyde på 93 m.

Lydeffektnivå og oktavnivåverdier for vindhastigheter basert på 8 m/s i 10 m høyde for de aktuelle turbinene ble gjort tilgjengelige av Fred Olsen Renewables AS. Garantert lydeffektnivå for vindhastigheter mellom 6 og 10 m/s er oppgitt i Tabell 2, mens oktavnivåverdier for vindhastighet 8 m/s i 10 m høyde er oppgitt i Tabell 3.

Tabell 2 – Garantert lydeffektnivå for vindturbinene på Lista

Vindhastighet [m/s]	6	7	8	9	10
Lydeffektnivå, L _{WA} [dB(A)]	104.1	105.4	105.4	105.4	105.4

Tabell 3 – Oktavbåndsverdier av lydeffektnivå, L_{WA} , for vindhastighet 8 m/s i referansehøyde 10 m

Oktavbånd, senterfrekvens [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000
Lydeffektnivå, L_{WA} [dB(A)]	84.6	93.6	100.3	100.7	97.8	94.3	89.0

7.3 Øvrige inngangsdata

I henhold til støyretningslinjen er det benyttet en beregningshøyde på 4 m for mottaker og en driftstid på turbinene på 100 %. Det er antatt en “worst-case”-situasjon med medvind fra alle retninger og beregningene er utført med utgangspunkt i lydeffektnivå for vindhastighet 8 m/s i 10 m høyde.

Øvrige innstillinger i de tre beregningsmetodikkene er ikke fastsatt i retningslinjen. Disse er opp til bruker å sette og resultatet kan variere en del ut i fra hvilke valg man gjør. De ulike metodikkene vil i det følgende betegnes som:

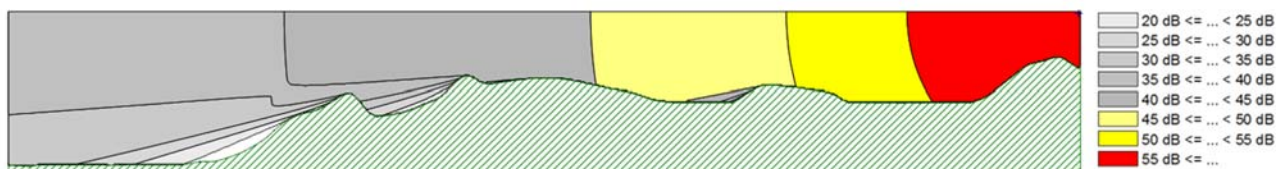
- MET1: Veileder-metoden
- MET2: NORD2000
- MET3: ISO 9613-2

Tabell 4 – Oversikt over innstillinger benyttet for beregning med de ulike metodikkene

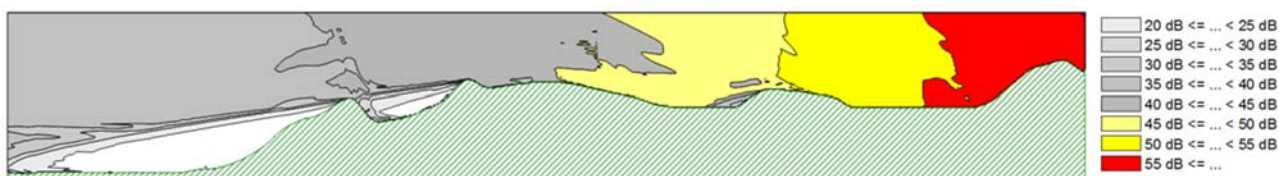
Parameter		MET1	MET2	MET3
Beregningshøyde	m	4	4	4
Terreng				
Oppløsning på høydedata	m	-	10	5
Ruhetslengde, Z_0	m	-	0.05	-
Terrengtype	-	-	Uniform D	Hard mark
Vindforhold				
Referansehøyde	m	10	10	10
Vindhastighet i referansehøyde	m/s	8	8	8
Vindretning	-	Medvind i alle retninger	Medvind i alle retninger	Medvind i alle retninger
Vertikalt vindskjær				
Informasjon om vertikalt vindskjær	-	-	Standard IEC	-
Værforhold/Stabilitet				
Relativ fuktighet	%	-	70	70
Temperatur	°C	-	10	10
Turbulensintensitet (vind)	-	-	0.12	-
Turbulensintensitet (temperatur)	-	-	0.008	-
Standardavvik (vind)	m/s	-	0	-
Invers Monin-Obukhov-lengde	1/m	-	-0.01	-
Temperaturgradient	°C/m	-	0.05	-

I beregningene utført med ISO 9613-2 er det valgt å benytte hard mark (absorpsjonskoeffisient 0) for hele området, selv om det ikke er totalreflekterende mark over alt. Valget er basert på diverse undersøkelser som viser at effekten av bakkedempingen kan overvurderes av ISO 9613-2 for høye kilder i komplekst terreng.

For sammenligning av ISO 9613-2 og NORD2000 har vi i tillegg til punktberegninger utført beregning av lydutbredelsen i et snitt mellom to punkt (innstillingene er angitt i Tabell 4).



Figur 13 – Eksempel på lydutbredelse med ISO 9613-2, Hard mark. (støykilde lengst til høyre)



Figur 14 – Eksempel på lydutbredelse med NORD2000 (støykilde lengst til høyre)

Som det fremgår av figurene gir de to beregningsmetodikkene noenlunde likt resultat, men NORD2000 fremstår som en mer detaljert metode som muligens kan hensynta komplekst terreng i større grad.

7.4 Resultater

Det er utført beregninger for 10 utvalgte nabopunkter i nærområdet til Lista Vindpark. Resultatene av støyberegningene er presentert i Tabell 5 under.

Tabell 5 – Resultater av støyberegningene utført med 1) Veiledermetoden 2) NORD2000 3) ISO9613-2

Målepkt.	Beregnet støy nivå, L_{den}		
	MET1	MET2	MET3
A	53	53	54
B	51	51	51
C	53	52	52
D	50	50	50
E	49	49	50
F	49	46	46
G	51	45	47
H	51	50	49
I	50	48	49
J	49	46	46

Beregningsmetodikken oppgitt i veilederen (M-128) gir som ventet de mest konservative resultatene, men for flere av beregningspunktene gir de tre metodikkene tilnærmet likt resultat.

Støyverdiene beregnet med alle 3 metodene overstiger, for samtlige 10 beregningspunkter, grenseverdien på 45 dB som tidligere gjaldt for vindskygge og noen overstiger også 50 dB som var grenseverdien utenfor vindskygge.

Det påpekes at beregningene er utført med anvisninger etter nåværende retningslinje. Denne retningslinjen er som tidligere nevnt mer konservativ enn retningslinjen som var gjeldende da det ble gitt konsesjon til Lista Vindkraftverk AS, og resultatene avviker dermed fra tidligere støyberegninger som er utført for anlegget.

7.5 Sammenligning med tidligere utførte støyberegninger

Resultater fra tidligere utførte støyberegninger fra 2013 er presentert i Tabell 6 under, sammen med resultatene utført i henhold til ny retningslinje med NORD2000.

Tabell 6 – Sammenligning mellom beregningsresultater fra 2013 og oppdaterte beregninger

Målepkt.	Nordisk metode – gammel retningslinje	NORD2000 – ny retningslinje
A	49	53
B	46	51
C	47	52
D	45	50
E	44	46
F	43	45
G	46	50
H	45	48
I	42	46

De tidligere beregningene ble som nevnt utført i henhold til retningslinjen som var gyldig ved tidspunktet da vindkraftverket fikk konsesjon. Det er benyttet Nordisk metode for beregning av industristøy, markabsorpsjon på 0.7 (relativt myk mark), driftstid på 80 % og en beregningshøyde på 2 m over lokalt terreng.

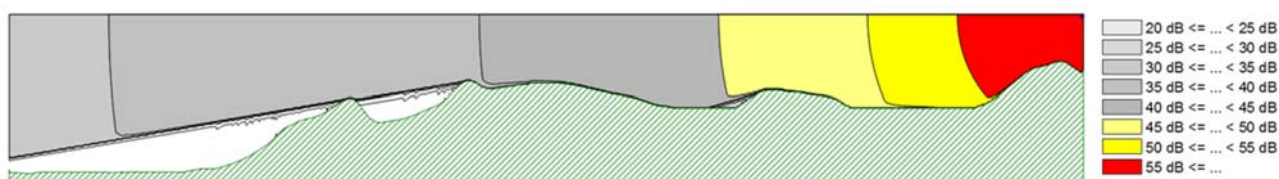
Ny metodikk krever at det skal benyttes 100 % driftstid, mens man før kunne regne med 80%, noe som utgjør 1 dB lavere nivå. Videre brukte man tidligere ofte muligheten for å midle støyen over varierende vindretninger, mens det er mer uklart hva man kan gjøre nå. Midlingen ble gjerne anslått til å redusere lydnivået ytterligere 1 dB.

1 dB av forskjellene i beregnet nivå i forbindelse med konsesjonssøknad og våre beregninger skyldes driftstidforutsetningene. Sett bort fra driftstiden viser våre beregninger 1 – 4 dB høyere nivå enn

tidligere beregninger. Disse avvikene skyldes i hovedsak forskjell i beregningsmetodikk. Som beskrevet i kapitlet om komplekst terreng kan valg av marktype i ISO-9613-2 ha stor betydning for beregningsresultat, spesielt ved konkavt terreng som det er mye av på Lista. Dette gjelder trolig også for «Nordisk metode for beregning av industristøy» og kan dermed forklare beregningsforskjellene.

Eksempel på konsekvensen av marktype

Valg av marktype har som nevnt mest betydning for lydutbredelsen fra en støykilde. Figurene under viser forskjell i lydutbredelse med relativt myk mark sammenlignet med hard mark, beregnet med Nordisk metode for beregning av industristøy.



Figur 15 – Støyutbredelse ved bruk av Nordisk metode med innstilling myk mark (støykilde lengst til høyre)



Figur 16 – Støyutbredelse ved bruk av Nordisk metode med innstilling hard mark (støykilde lengst til høyre)

Som det fremgår av figurene medfører valg av marktype hard mark et langt mer konservativt resultat hvor lyden brer seg mye lengre enn det som er tilfelle ved valg av en mykere marktype.

8 Diskusjon

8.1 Støyforholdene i komplekst terreng

Basert på utført feltarbeid, samtaler med utvalgte naboer rundt vindkraftverket på Lista og resultatene av beregningene som er utført, er det grunnlag for å tro at sjenansen av støy kan være større i vindkraftverk med komplekst terreng enn ved vindkraftverk plassert i flatere landskap. For å belyse årsakene til dette har vi sett nærmere på Lista vindkraftverk. Her er det relativt kort avstand mellom vindturbinene og bebyggelsen i området (minsteavstand på 345 m). Mange av naboene ligger i vindskygge store deler av tiden, og det er lite maskerende bakgrunnsstøy i området.

Vindkraftverkets beliggenhet på en utstikker langs Norskekysten medfører også at vinden ofte blåser inn fra havet. Vindhastigheten er ofte høy og når denne uforstyrrede vinden treffer landskapet vil det, som tidligere beskrevet, skje en oppbremsing i lave høyder, mens vinden beveger seg mer uforstyrret høyere oppe. Dette kan føre til en større vertikal vindgradient over rotoren, noe som kan medføre variasjoner i lydnivået.

At bebyggelse ligger i vindskygge medfører også at vindgradienten mellom turbinene og støymottaker kan bli større enn normalt, som beskrevet i kapittel 3. Dette medfører blant annet at lydbanen blir mer krummet og mulige støyskjermingseffekter av høyder i terrenget avtar, som igjen fører til økt støynivå og en økt mulighet for å høre vindturbiner man ikke kan se i terrenget.

I tillegg til dette er det sannsynlig at enkelte reflekterende flater kan føre til et mer komplekst støybilde. Det er ikke mange store plane flater i det aktuelle området, men forsterkende refleksjoner kan likevel oppstå i ulike retninger fra tilfeldige flater. I denne situasjonen kan små variasjoner i lydbanene med vinden føre til at lyden varierer mye både i tid og fra sted til sted.

I mangel av vindsus og andre lyder av betydning kan bakgrunnsstøyen til tider være vesentlig lavere enn vindturbinestøyen, og støyen fra turbinene kan da oppleves som langt mer sjenerende enn i andre områder.

8.2 Vurdering av overføringsverdien i resultatene

Det komplekse terrenget på Lista er ikke unikt sammenlignet med andre vindkraftverk i Norge. De fleste vindkraftanlegg i Norge er plassert i kompleks topografi med store høydeforskjeller både innad i vindkraftverket og mellom vindturbinene og naboer til anleggene, med skogkledte fjellsider med varierende skoghøyde, snaufjell på toppene, store vann og dype dalfører. Dette vil, på samme måte som på Lista, kunne medføre komplekse vindforhold og kompleksitet i støybildet. Mange av effektene nevnt som mulige årsaker til amplitudemodulasjon kan også oppstå i andre norske vindkraftverk. Effekter knyttet til stabile forhold og sterke vertikale vindgradienter vil i tillegg kunne oppstå hyppigere i innlandsområder hvor stabile forhold er langt mer vanlig enn i kystnære områder.

En vesentlig faktor er imidlertid at minsteavstand mellom turbiner og bebyggelse er mindre på Lista enn det som er tilfelle i mange andre vindkraftanlegg. Det er per i dag ingen krav til minsteavstand i retningslinjen, men støykravet i retningslinjen vil i de fleste tilfeller medføre at en minsteavstand på 500–800 m ved fri sikt til vindturbinene må overholdes. Særlig gjelder dette for nyere vindkraftanlegg hvor støyberegninger må utføres i henhold til den nye, mer konservative retningslinjen fra 2012. Ettersom amplitudemodulasjon forekommer hyppigst innenfor 600 m fra turbinene (30 %), vil sjenerende amplitudemodulasjon være mindre problematisk i vindkraftverk som er prosjektert i henhold til dagens retningslinje.

Vindkraftanlegg plasseres typisk på godt eksponerte lokasjoner i terrenget, mens bebyggelse typisk er lagt til dalfører for å ligge i le for vinden. Dette medfører støyproblematikk knyttet til vindskygge i mange norske vindkraftanlegg. Det er imidlertid vanlig at vindkraftanlegg er plassert i et avgrenset fjellområde og at nærliggende bebyggelse ligger i ytterkant av anlegget og ikke omringet av turbiner.

8.3 Anbefalinger til endringer i gjeldende retningslinje

Beregningsresultatene som er oppnådd ved bruk av gjeldende retningslinje viser støyverdier som overstiger gjeldende støygrense for samtlige støymottakere som er inkludert i analysen.

Beregningene som utføres angir midlede verdier av støynivået. Mye tyder på at lydforholdene er slik noen steder i Norge at sjenanse ikke nødvendigvis er proporsjonal med gjennomsnittlig lydnivå. Dette kan skyldes effekter som oppstår på grunn av kompleksiteten i terrenget. Vi har i denne rapporten kommet opp med noen mulige forklaringer på spesielle støyeffekter som kan oppstå.

De fleste slike effekter er kun hørbare i nærmeste omkrets rundt turbinene (< 600 m). Dersom gjeldende regelverk (etter 2012) overholdes vil dette mest sannsynlig medføre en minsteavstand som overgår denne avstanden og problemet vil dermed reduseres noe.

Slike effekter blir ikke avdekket med de beregningsmetodene som brukes i dag og det vil i slike situasjoner trolig være feil å bruke gjennomsnittlig lydnivå som parameter for forventet sjenanse. Mye tyder på at dette kan være en del av problemstillingen på Lista og trolig også andre steder i Norge.

Kunnskap om hva som forårsaker slike spesielle effekter er imidlertid fortsatt for liten til at man kan gi generelle anvisninger i en ny metode. Man bør likevel diskutere om forholdet skal nevnes.

Vi har likevel valgt å inkludere noen punkter som bør vurderes for å bedre retningslinjen ytterligere:

- Bruk av NORD2000 som metode for beregning av støy fra vindturbiner gir mange valgmuligheter for innstillinger av inngangsparametere. De fleste av disse er opp til bruker å bestemme, og ulike valg av parametere kan gi opptil 2–3 dB i forskjell i lydeffektnivå hos

støymottaker. Det bør vurderes om inngangsparameterne kan standardiseres for å sikre at valgfriheten ikke utnyttes til fordel for prosjektutvikler eller andre berørte parter.

- Krav til valg av vindsituasjon bør tydeliggjøres i retningslinjen. Det er per i dag noe usikkert om beregning av støy fra vindturbiner skal utføres for situasjon med medvind fra alle retninger eller om retningslinjen åpner for bruk av faktisk vindfordeling i stedet. Man bør vurdere å erstatte eksisterende L_{den} -krav med krav til korttidsekvivalentnivå (L_{Aeq}) under gitte medvindsforhold. Det bør også vurderes om dokumenterte kildestøyverdier og usikkerhet skal fremlegges som en del av beregningene. Dette gir en mer entydig situasjon som gjør det lettere både å beregne og etterprøve (måle) lydforholdene.
- Det bør vurderes å ta hensyn til bakgrunnsstøy. Aksepten for støy er langt større i urbane strøk og industriområder, enn i områder hvor det er lite maskerende bakgrunnsstøy. En løsning kan være å ha differensierte grenseverdier i ulike områder.

Det anbefales også for utbygger/utvikler å sørge for god informasjon til vindkraftanleggets naboer gjennom hele prosessen, og spesielt hensynta berørte naboer som ikke er grunneiere og dermed ikke har noen interesse i prosjektet. Dette kan bidra til å redusere konfliktnivået i prosjektene.

8.4 Videre arbeid

Denne studien indikerer at sjenansen i noen tilfeller øker ved at vindforholdene skaper store variasjoner i støynivå målt over tid, eller at det skapes lydforhold som betegnes som amplitudemodulasjon. Hva som skal til for å avklare når slike situasjoner opptrer kan belyses bedre ved å studere de tilfellene der slike forhold er rapportert nærmere samt ved å undersøke allerede utførte målinger ved forskjellige norske vindkraftverk. Det kan også i slike tilfeller utføres flere målinger for å avdekke graden av amplitudemodulasjon.

9 Konklusjon

Dagens regelverk gir allerede en strengere vurdering av støy fra vindkraftverk enn det man hadde før 2012. Dette reduserer risikoen for sjenanse i nye vindkraftverk hvor støy behandles i henhold til den nye retningslinjen.

Det er imidlertid fortsatt enkelte uklarheter i den nye retningslinjen. Man bør klargjøre hvilke forutsetninger som skal ligge til grunn for beregning av vindturbinestøy i større grad enn hva som nå er tilfellet.

Det kan også være relevant å vurdere bruk av differensierte støygrenser slik at områder med høy eller lav bakgrunnsstøy, eller et gjennomsnittlig lydnivå som ikke er representativt for lydopplevelsen, behandles ulikt. I denne forbindelse anbefales det å avklare om det er mulig å utarbeide gode kriterier for å forutsi risikoen for store variasjoner i lydnivå og/eller risiko for lenger perioder med amplitudemodulasjon, slik at risikoen for sjenanse reduseres ytterligere.

10 Referanser

Tittel	Forfatter	Utgiver/hentet fra	Dato
The sounds of high winds, the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise	G.P. van den Berg	Rijksuniversiteit Groningen	Mai 2006
Wind turbine amplitude modulation: Research to improve understanding as to its cause and effect	Ulike forfattere for forskjellige workpackages	RenewableUK	Desember 2013
Response to noise from modern wind farms in The Netherlands	Eja Pedersen, Frits van den Berg, Roel Bakker, Jelte Bouma	The Journal of the Acoustical Society of America	September 2009
Mechanisms of amplitude modulation in wind turbine noise	Malcom Smith, Andrew Bullmore, Matthew CAND, Robert Davis	Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference	April 2012
Sound from wind turbines during different weather conditions	Conny Larsson, Olof Öhlund – Uppsala University	Internoise 2013 – Innsbruck	September 2013
Dose–response relationships for wind turbine noise in Japan	Takashi Yano	Internoise 2013 – Innsbruck	September 2013
Measurement of amplitude modulation frequency spectrum	David McLaughlin	SgurrEnergy	April 2011
A quantitative and qualitative review of amplitude modulation noise from wind energy development	Sarah Large, MAS Environmental	Internoise 2016 – Hamburg	August 2016
Wind turbine noise as experienced by impacted residents	Sveinulf Vågene, Willi Larsen	Proceedings of the 22 nd International Congress on Acoustics	September 2016
Ljud från vindkraftverk	Naturvårdsverket rapport 5933		April 2010
Amplitude modulation of noise from wind turbines due to propagation through the atmosphere	Till D. Kühner, Cervus Consult	Internoise 2016 – Hamburg	August 2016
Befolkningsreaksjoner på vindmøllestøy	Hanne Beate Sundfør, Ronny Klæboe	TØI rapport 1452/2015	Desember 2015
Background noise levels in Europe	Truls Gjestland	Sintef rapport A6631	Juni 2008

Lista Vindkraftverk i Farsund kommune - Støymålinger	Rasmus Nord	Sweco rapport 464721	10.02.2014
ETSU-R-97 The assessment & rating of noise from wind farms	The working group on noise from wind turbines	Department of Trade and Industry, UK	September 1996
Comparison of predicted and Measured wind farm noise levels and implications for Assessments of new wind farms	Tom Evans, Jonathan Cooper	Acoustics Australia, Vol. 40, No. 1	April 2012



Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no

