TEKNISK NOTAT

Høretærskler og genevirkning for lavfrekvent støj i relation til vindmøller

Udført for Miljøstyrelsen

Sagsnr.: 123-33973

TC-102214

Hørsholm, 25. april 2024

Akustik, støj og vibrationer

Kvalitetssikret af	Udfærdiget af
Per Finne	Torben Holm Pedersen & Lars Sommer Søndergaard

Per Finne
2024-04-29
Digitally signed by Per Finne
pfi@forcetechnology.com
Senior Specialist

Torben Holm Pedersen
2024-04-29
Digitally signed by Torben Holm Pedersen
thp@forcetechnology.com
Senior Consultant

OVERSIGT

Titel	Internal TASK for dept. 372
Sagsnr.	123-33973
TC-nr.	102214
	4. april 2024
Kunde	Miljøstyrelsen Tlf.:
Kontaktperson	 E-mail:
Revisioner	Choose an item.
Vores ref.	Taskmanagers initials/Current user initials

Rapporten må kun gengives i sin helhed.

Gengivelse i uddrag kræver skriftlig accept fra FORCE Technology.

Rapporten er kun gyldig med to digitale signaturer fra FORCE Technology. Rapporten forefindes som original i FORCE Technologys database og sendes som elektronisk duplikat til kunden. Den hos FORCE Technology lagrede original har forrang som dokumentation for rapportens indhold og gyldighed.

INDHOLDSFORTEGNELSE

0.1 Resume 5

0.2 English summary 6

1 Baggrund 7

1.1 Opgaven 7

1.2 Udgangspunkt 7

1.3 Metode 7

2 Definitioner 8

2.1 Hørbart frekvensområde 8

2.2 Infralyd 8

2.3 Lavfrekvent lyd 8

2.4 Kritiske bånd 8

2.5 Socio-akustisk måling 8

3 Høretærskel og hørestyrkeniveau 9

3.1 Høretærskel og hørstyrkeniveau for toner 9

3.1.1 Standardiserede høretærskler 9

3.1.2 Høretærskler og hørestyrkeniveau ved lave frekvenser 10

3.1.3 Spredning af høretærskler 15

3.2 Høretærskel for bredbåndsstøj 18

3.3 Maskering 20

4 Genevirkning 21

4.1 Laboratoriemålt genevirkning 21

4.2 Socio-akustiske målinger af genevirkning 23

4.2.1 WHO 25

4.2.2 Svensk-hollandsk studie 25

4.2.3 Dosis-responskurve for lavfrekvent støj 27

4.2.4 Health Canada 29
4.2.5 Polsk studie 31
4.2.6 Norsk studie 32
4.2.7 Finsk studie 33
4.2.8 Amerikansk studie 35
4.2.9 Tysk studie 36
4.2.10 Dansk studie 37
4.2.11 Hollandsk studie 38
4.2.12 Overbliksartikler 38
4.3 Sammenfatning af dosis-responskurver 39
4.4 Moderatorer til dosis-responskurverne 41
5 Sammenfatning 42
6 Referencer 44
7 Bibliografi 48
Bilag 1 Hørbarhed af bredbåndsstøj 52
7.1 HT-weighting 52
7.2 Energy addition of combined analysis bands 54
Bilag 2 Logistiske dosis-responskurver 56

0.1 Resume

I forbindelse med opdatering af regler for vindmøller har Miljøstyrelsen ønsket belyst, hvad der måtte være af ny viden dels om høretærskler i det lavfrekvente område og dels om gene og dosis-responskurver for lavfrekvent støj med relevans for vindmøller. Der er foretaget et litteraturstudie til belysning af dette.

Det kan konstateres, at ændringerne ved de seneste opdateringer i 2023 af de standardiserede høretærskler for toner og smalle støjbånd er så små, at de er uden praktisk relevans. Et finsk studie fra 2022 finder, at høretærsklen i området 4-8000 Hz ligger lidt højere end tidligere undersøgelser, men at der ikke er tale om nogen væsentlig forskel, og intet tyder på, at tærsklen ligger lavere end tidligere fundet. Det finske studie bekræfter de standardiserede hørestyrkeniveau-kurver for frekvenser over 40 Hz. Under 40 Hz ligger kurverne systematisk højere end de tidligere resultater. Der skal nok flere studier til, men i følge det nye studie, er hørestyrkeniveauet ikke højere end tidligere antaget. Det nye studie giver også resultater, som indikerer at genen af lavfrekvente toner målt under laboratorieforhold, er mindre end tidligere antaget.

Der er ikke fundet dosis-responskurver fra socio-akustiske målinger for den indendørs lavfrekvente støj fra vindmøller. Da responsen afhænger af støjkildens art, kan man ikke antage at dosis-responskurver fra andre kilder, hvis de findes, er relevante for vindmøller. Da vindmøllestøjen, inklusiv den lavfrekvente del indendørs, domineres af frekvenser i det normale område, har dosis-responskurver for den almindelige støj også relevans for den lavfrekvente del af støjen.

Der findes en svensk-hollandsk undersøgelse fra 2011, som er den med flest respondenter, og som er meget velbeskrevet. Både WHO 's-rapport fra 2018 og de øvrige undersøgelser sammenligner sig med den.

De tilsyneladende mest sikre resultater er svensk-hollandske, canadiske og finske resultater for L_{Aeq} på henholdsvis 39, 39, 44 og 39 dB ved 8 m/s for 10% stærkt generet udendørs. Ubestemthederne taget i betragtning synes den danske støjgrænse i boligområder på 39 dB(A) at være i overensstemmelse hermed.

Ud fra den svensk-hollandske undersøgelse, er der beregnet en dosis-responskurve for det indendørs lavfrekvente støjniveau, som indikerer, at en støjgrænse indendørs omkring $L_{pA,LF}$ = 20 dB er rimelig.

Andre undersøgelser finder ca. 5 dB lavere udendørs niveauer for 10% stærkt generet indendørs, end den svensk-hollandske. Med danske og canadiske tal for lydisolationen svarer det til indendørs niveauer på omkring 12-13 dB(A). Det er svært at forestille sig, at det i sig selv kan give anledning til 10% stærkt generet. En forklaring kan være, at respondenterne ikke har skelnet skarpt mellem deres svar for udendørs og indendørs gene, når de har svaret.

Den canadiske undersøgelse viste, at man med helt samme metodik får 5 dB forskel for 10% stærkt generet i resultaterne i to forskellige provinser. Det fremgår generelt, at resultater fra de forskellige undersøgelser er påvirket af ikke akustiske faktorer og lokale forhold. Frem for at gå ud fra en gennemsnitlig dosis-responskurve, synes det mere relevant i aktuelle tilfælde at se på lokale forhold, visuelle forhold, holdninger til vindkraft, mølletyper, opstilling (land/hav) ol. og så sammenligne med de undersøgelser, hvor der er størst sammenfald i sådanne faktorer.

Blandt andet holdningen til de lokale støjkilder, til vindkraft, indflydelse på landskabet og de visuelle forhold har en stærk indflydelse på genen. Man kan forestille sig, at klimakrisen og behovet for grøn omstilling har påvirket holdningen til vindkraft, hvilket også kan påvirke dosis-responssammenhænge.

Baggrunden for resultaterne i de refererede undersøgelser er primært (måske alle) undersøgelser af landbaserede møller. Måske er forholdet mellem de forskellige faktorers betydning anderledes for havbaserede møller. Det kan også gælde forholdet mellem amplitudemodulation og lavfrekvent støj.

Der er ikke fundet dosis-responskurver for støjgener fra havvindmøller. Hvis fx forholdende mellem støjgener og visuelle gener er forskellige for landbaserede og havvindmøller, kan det have indflydelse på om de fundne dosis-responssammenhænge kan anses for at være repræsentative for havvindmøller.

0.2 English summary

In connection with updating the rules for wind turbines, the Danish Environmental Protection Agency requested an investigation for new knowledge, if any, about hearing thresholds in the low-frequency range including annoyance and dose-response curves for low-frequency noise with relevance for wind turbines. For this purpose, a literature study has been carried out.

It is found that the changes in the latest updates in 2023 of the standardized hearing thresholds for tones and narrow band noise are so small that they are of no practical relevance. A Finnish study from 2022 finds that the hearing threshold in the 4-8000 Hz range is slightly higher than previous studies indicate, but that there is no significant difference, and at least there is no indication that the threshold is lower than previously found. The Finnish study confirms the standardized loudness level curves for frequencies above 40 Hz. Below 40 Hz, the curves are systematically higher than the previous results. More studies are needed, but according to the new study, the loudness level is not higher than previously assumed. The new study also provides results which indicate that the annoyance of low-frequency tones measured under laboratory conditions may be smaller than previously assumed.

No dose-response curves have been found from socio-acoustic measurements for the indoor low-frequency noise from wind turbines. Since the response depends on the type of noise source, it cannot be assumed that dose-response curves from other sources, if existing, are relevant for wind turbines. Since the wind turbine noise, including the low-frequency part indoors, is dominated by frequencies in the normal range, dose-response curves for the "normal" noise are also relevant for the low-frequency part of the noise.

A Swedish-Dutch study from 2011, has the highest number of respondents, and is very well described. Both the WHO report from 2018 and other studies compare with this.

The apparently most reliable results are Swedish-Dutch, Canadian and Finnish and finds L_{Aeq} levels of 39, 39, 44 and 39 dB at 8 m/s for 10% highly annoyed outdoors. Taking the uncertainties into account, the Danish noise limit in residential areas of 39 dB(A) seems to be in line with this.

Based on the Swedish-Dutch study, a dose-response curve has been calculated for the indoor low-frequency noise level, which indicates that an indoor noise limit of approximately $L_{pA,LF}$ = 20 dB is reasonable.

Other studies find outdoor levels for 10% highly annoyed indoors approx. 5 dB lower than the Swedish-Dutch study. With Danish and Canadian figures for sound insulation, this corresponds to indoor levels of around 12-13 dB(A). One cannot imagine that this level can give rise to 10% highly annoyed. An explanation may be that the respondents did not distinguish sharply between their answers for outdoor and indoor annoyance when answering the survey.

The Canadian study showed that with the exact same methodology, there is a difference of 5 dB for 10% highly annoyed in the results from two different provinces. It appears that results from the various studies are influenced by non-acoustic factors and local conditions. Rather than proceeding from an average dose-response curve, it seems more relevant in an actual case to look at local conditions, visual factors, attitudes to wind power, turbine types, installation (land/sea) etc. and compare these with studies with the highest coincidence in such factors.

Among other things, the attitude to the local noise sources, to wind power, influence on the landscape and the visual conditions have a strong influence on the annoyance. One can imagine that the climate crisis and the need for a green transition have influenced the attitude towards wind power, which can also affect dose-response relationships.

The background for the results in the referenced studies is primarily (perhaps all) studies of land-based turbines. Perhaps the relationship between the importance of the various factors is different for offshore turbines. It can also apply to the relationship between amplitude modulation and low-frequency noise.

No dose-response curves have been found for noise annoyance from offshore wind turbines. If, for example, the ratio between noise annoyance and visual annoyance is different for land-based and offshore wind turbines, this may have an impact on whether the dose-response relationships found can be considered representative of offshore wind turbines.

1 Baggrund

1.1 Opgaven

I forbindelse med opdatering af støjregler for vindmøller har Miljøstyrelsen ønsket belyst, hvad der måtte være af ny viden siden 2012, dog med hovedvægten på ny viden efter 2018, angående:

- Gene og dosis-responskurver for lavfrekvent støj
- Undersøgelser af høretærsklen i det lavfrekvente område,

som måtte være relevant for opfattelsen af støjen fra vindmøller. Undersøgelsen vedrører den oplevede støj hos modtageren (immissionspunktet), dvs. hos "naboer" til vindmøller. Undersøgelsen skal ikke omfatte forhold som lydkilder, lydudbredelse og lydisolation.

1.2 Udgangspunkt

Notatet gør status for den viden om gene og høretærskler, som var tilgængelig omkring 2012. Med udgangspunkt i denne status, er der søgt efter nyere viden, som beskrives i relation til opgaven.

1.3 Metode

Der er taget udgangspunkt i følgende kilder med opfølgning via referencer i de fundne artikler:

- Acta Acustica united with Acustica
- ICBEN International Commission on Biological Effects of Noise
- JASA, The Journal of the Acoustical Society of America
- Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control
- Inter-Noise proceedings
- Wind Turbine Noise procedings
- Research Gate
- Google
- FORCE Akustik & SenseLabs Mendeley litteraturdatabase[1]
- Forfatternavne, med artikler indenfor emnerne nedenfor

Der er søgt efter følgende emner i forskellige kombinationer:

- Annoyance
- Audibility
- Health effects (herunder støjgene)
- Hearing threshold
- Low frequency noise
- Low frequency sound
- Wind turbines

En tværgående søgning i Wind Turbine Noise procedings og Inter-noise proceedings var ikke mulig, og derfor har søgningen i disse af tidsmæssige grunde ikke været systematisk.

De fundne referencer er lagret i FORCE Akustik & SenseLabs Mendeley litteraturdatabase, for evt. senere konsultation. Dette kunne være aktuelt for de mest relevante artikler.

[1] Databasen blev påbegyndt i 2016 under projektet: "Støjs virkning på helbred og velvære" for Styrelsen for Forskning og Innovation. Databasen er løbende blevet udbygget og opdateret og indeholder nu ca. 1600 referencer.

2 Definitioner

2.1 Hørbart frekvensområde

Hørelsen kan opfatte lyd med frekvenser ned til nogle få Hz bare lydstyrken er kraftig nok. Ved frekvenser under ca. 20 Hz opfattes lyden dog mere som en trykken for ørerne end en egentlig lydoplevelse. Derfor angives det ”normale” hørbare frekvensområde ofte til 20-20.000 Hz og støj i dette område vil vi kalde ”almindelig støj”.

Overgangen mellem lydopfattelse og trykopfattelse sker gradvist uden nogen veldefineret overgang, men man opdeler alligevel det lave frekvensområde i lavfrekvent lyd og infralyd.

Det frekvensområde med størst betydning (A-vægtet eller høretærskel-vægtet, se afsnit 3.2) for indendørs støj fra vindmøller vil ofte ligge i den lave del af det normale frekvensområde, nemlig i området 40-160 Hz, [1] og [2], og for fjerne havvindmøller omkring 50-100 Hz, [3].

2.2 Infralyd

Lyd med frekvenser under 20 Hz kaldes infralyd. Lyden opfattes mere som en trykken for ørerne end en egentlig lydoplevelse og tonefornemmelsen forsvinder.

2.3 Lavfrekvent lyd

Det lavfrekvente område defineres ofte som 20-200 Hz. I Miljøstyrelsens vejledning 9/1997 [4] er det lavfrekvente område defineret som 1/3-oktavbåndene 10-160 Hz, dvs. frekvensområdet 9-180 Hz. I nærværende notat vil vi tage udgangspunkt i Miljøstyrelsens definition, hvilket betyder at også en del af infralydområdet og det normale frekvensområde falder ind under denne definition.

2.4 Kritiske bånd

Frekvensbånd, som har betydning for hørelsens opfattelse af lydstyrke og for maskering af én lyd med en anden, har med tilnærmelse en bredde på 100 Hz under 500 Hz og 20% af centerfrekvensen over 500 Hz [5].

2.5 Socio-akustisk måling

I en social undersøgelse, sammenholdes respondenters bedømmelse af støjgener med målte eller beregnede støjniveauer i respondenternes hjemmemiljø. Frit oversat efter ISO/TS 15666 [6].

Ifølge ISO/TS 15666 kan man bruge en 5-punkts verbal skala: Slet ikke generet, Lettere generet, Moderat generet, Kraftigt generet, eller Ekstremt generet, eller en 11-punkts numerisk skala hvor 0 er ”slet ikke generet” og 10 er ”ekstremt generet”.

Oprindeligt er andelen "stærkt generet" defineret som de øverste 28 % (cut-off punkt ved 72%) af den numeriske skala, dvs. de numeriske værdier 8, 9 og 10. Dette ses benævnt som $\%HA_{72}$

Imidlertid kan "stærkt generet" også defineres som de to øverste kategorier på den verbale skala. Det giver et cut-off punkt på 60% ($\%HA_{60}$).

Det betyder, at de to skalaer ikke bruger de samme cut-off’s til at definere "stærkt generet" og det giver en ubestemthed ved sammenligning af forskellige studier.

Man har ved forskning fra store undersøgelser fundet, at sammenligninger mellem de to skalaer kan forbedres ved at andelen, der svarer ”ekstremt generet” regnes fuldt ud, medens andelen der svarer ”kraftigt generet” vægtes med en faktor 0,4 [6].

3 Høretærskel og hørestyrkeniveau

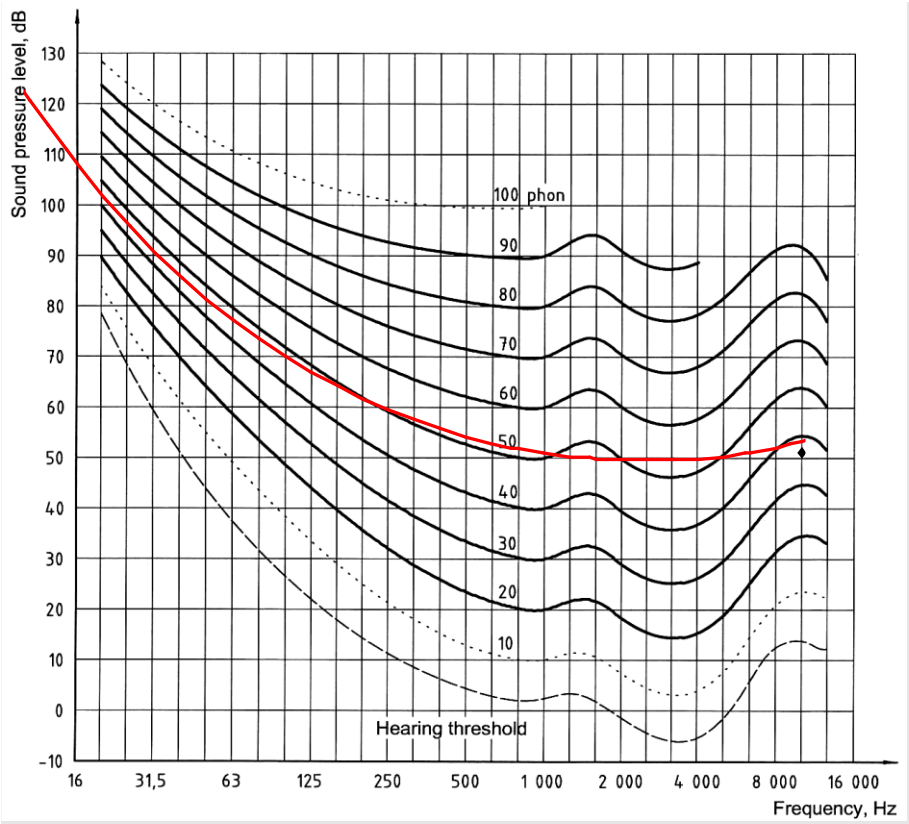
Høretærsklen angiver hvor kraftig en lyd skal være, for at man kan opfatte den. Man skal dog gøre sig klart, at opfattelsen kommer an på lydens karakter (fx toner eller støj), om der er anden støj til stede samtidig (fx maskering fra baggrundsstøj) og i hvilket lydfelt (fx frit eller diffust) lyden optræder.

3.1 Høretærskel og hørstyrkeniveau for toner

3.1.1 Standardiserede høretærskler

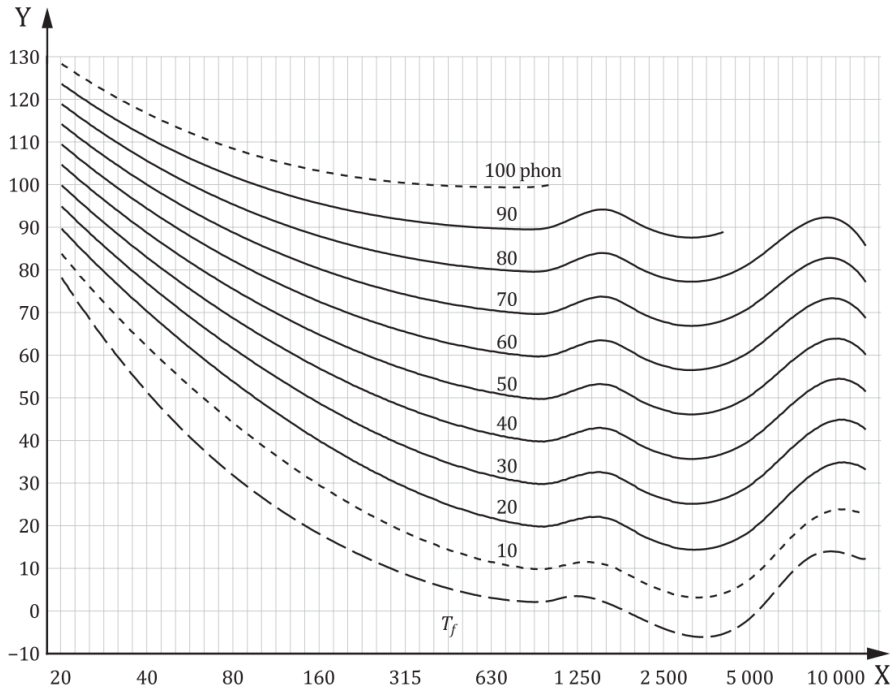
Den standardiserede hørestærskel er specificeret i ISO 226:2023, [7]. Forudsætningen for denne høretærskel er at lytterne er otologisk normale personer (dvs. raske personer, som ikke har tegn eller symptomer på øresygdomme, og ikke har været unødigt eksponeret af støj) i alderen fra 18 år til og med 25 år, og at der lyttes med begge ører i et plant lydfelt med lydkilden direkte foran lytteren. Lydsignalerne er rene toner (uden baggrundsstøj) og lydtrykniveauet måles på den position, hvor midten af lytterens hoved ville forventes at være, men i fravær af lytteren. Tærsklen er defineret som grænsen med 50% sandsynlighed for detektion.

Ud over høretærsklen har styrkeopfattelsen af lyden også betydning. Figur 1 viser kurver over samme lydstyrkeopfattelse ved forskellige frekvenser. Hver kurve angiver et konstant hørestyrkeniveau, som måles i phon. Kurverne på Figur 1 fra 2003, [8].



Figur 1 *Hørestyrkeniveau-kurver (Equal loudness level contours) fra ISO 226:2003,* [8] *vist sammen med den inverse A-vægtningskurve (rød).*

Af Figur 1 ses at A-vægtningen er en udmærket tilnærmelse til hørestyrkeniveaukurven omkring 50 phon.



Figur 2 *Hørestyrkeniveau-kurver (Equal loudness level contours) fra ISO 226:2023,* [7]. *X: frekvens i Hz, Y: Lydtrykniveau i dB re 20 μPa. T_f: Høretærskel ved binaural lytning i frit felt med frontalt indfald.*

Figur 2 viser hørestyrkeniveau-kurverne fra ISO 226:2023, [7], som annullerer og erstatter ISO 226:2003, [8]. Baggrunden for opdateringen er beskrevet i reference [9]. De vigtigste ændringer er som følger:

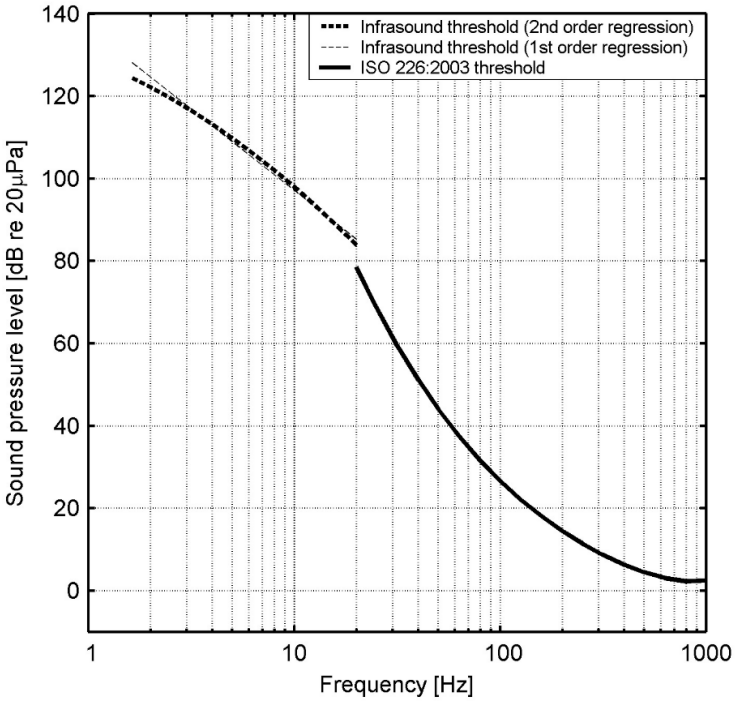
- præcisering af anvendelsesområdet i indledningen samt en opdateret bibliografi;
- tilpasning til ISO 389-7, [10], vedrørende 0 phon-data;
- korrektion af systematiske fejl, der fører til mindre ændringer i alle data op til 0,6 dB;
- 0,4 dB ændring i den normative høretærskel ved 20 Hz.

Det må således konkluderes at ændringerne ved opdateringen fra 2003 til 2023 i de standardiserede høretærskler for toner er så små, at de er uden praktisk relevans for miljøstøj.

I de nævnte standarder er kun konturerne med samme hørestyrkeniveau (loudness level) for rene toner specificeret. Det anføres, at kurverne også er anvendelige på en tredjedel-oktav eller smallere støjbånd.

3.1.2 Høretærskler og hørestyrkeniveau ved lave frekvenser

I reference [11] fra 2004 er der givet et forslag til en normal høretærskel for frekvenser under 20 Hz baseret på analyse af 10 forskellige studier i perioden 1967 til 1997. Forslaget er vist på Figur 3 sammen med den standardiserede høretærskel fra ISO 226:2003, [8]. Det bemærkes, at der ved 20 Hz er en forskel på ca. 5 dB mellem den foreslåede kurve og ISO-kurven.



Figur 3 *Standardiseret høretærskel over 20 Hz (ISO 226:2003,* [8]*) og foreslået normal høretærskel for frekvenser under 20 Hz. Figur fra reference* [11]*.*

Af samme reference fremgår i øvrigt følgende, som har relevans:

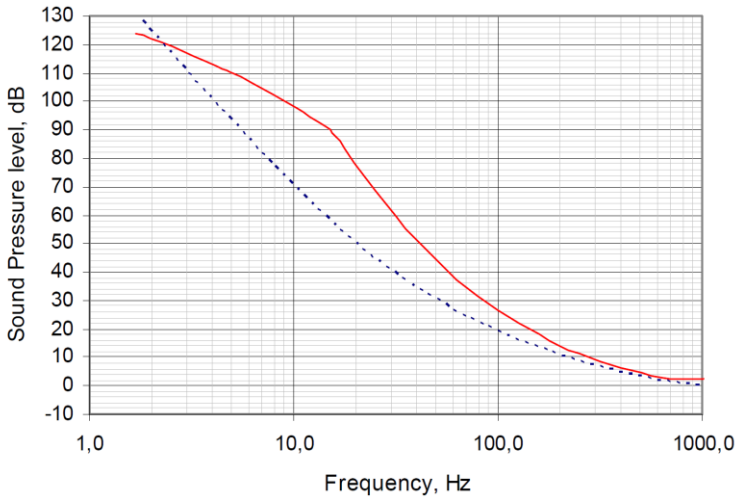
- Der er ikke signifikant forskel på høretærsklen i frit felt og i et trykfelt ved frekvenser mellem 25 og 100 Hz. Der er dermed ingen grund til at antage, at lydfeltet (fx indendørs vs. udendørs) har betydning for høretærsklen ved lave frekvenser.
- Ved forsøg med bl.a. døve personer har man konstateret, at tærsklen for opfattelse af lyd for frekvenser i området 4-25 Hz, med andet end ørerne, ligger 20 dB højere end høretærsklen. Dvs. at svage lavfrekvente lyde og infralyd kun opfattes med ørerne.

Af reference [10] fra 2019 fremgår, at der i det lavfrekvente område ikke er forskel på den standardiserede høretærskel mellem frit felt og diffust felt. Dvs. at høretærsklen er den samme, uanset om det er et udendørs eller indendørs lydfelt.

Et forslag til en normal høretærskel, som forbinder kurverne ved 20 Hz er givet i reference [12] er vist på Figur 4. De to forslag til høretærskler på Figur 3 og Figur 4 er stort set ens bortset fra overgangsområder mellem 14 og 20 Hz.

På Figur 4 er også indtegnet A-vægtningskurven. I modsætning til Figur 1, som viste en god tilnærmelse mellem A-vægtningen og hørestyrkeniveauet omkring 50 phon, er overensstemmelsen mellem høretærskelkurven og A-vægtningen mindre god. Faktisk vil A-vægtningen overvurdere niveauet med 6-30 dB i frekvensområdet 10-100 Hz i forhold til høretærsklen.

Dette ses af følgende: Vi sætter for nemheds skyld høretærsklen til et hørestyrkeniveau på 0 phon (den er ca. 2 phon). Den på Figur 4 tegnede A-vægtning svarer til et A-vægtet lydtrykniveau på 0 dB. Ved 1000 Hz er de to kurver sammenfaldende, men ved 20 Hz ligger A-kurven ca. 30 dB under høretærsklen. Det betyder A-vægtede niveau for høretærsklen ligger på ca. 30 dB ved 20 Hz. Hvis A-vægtning og hørestyrkeniveau passede lige så godt som ved 50 phon, ville man forvente at høretærsklen skulle ligge ved 0 dB(A).

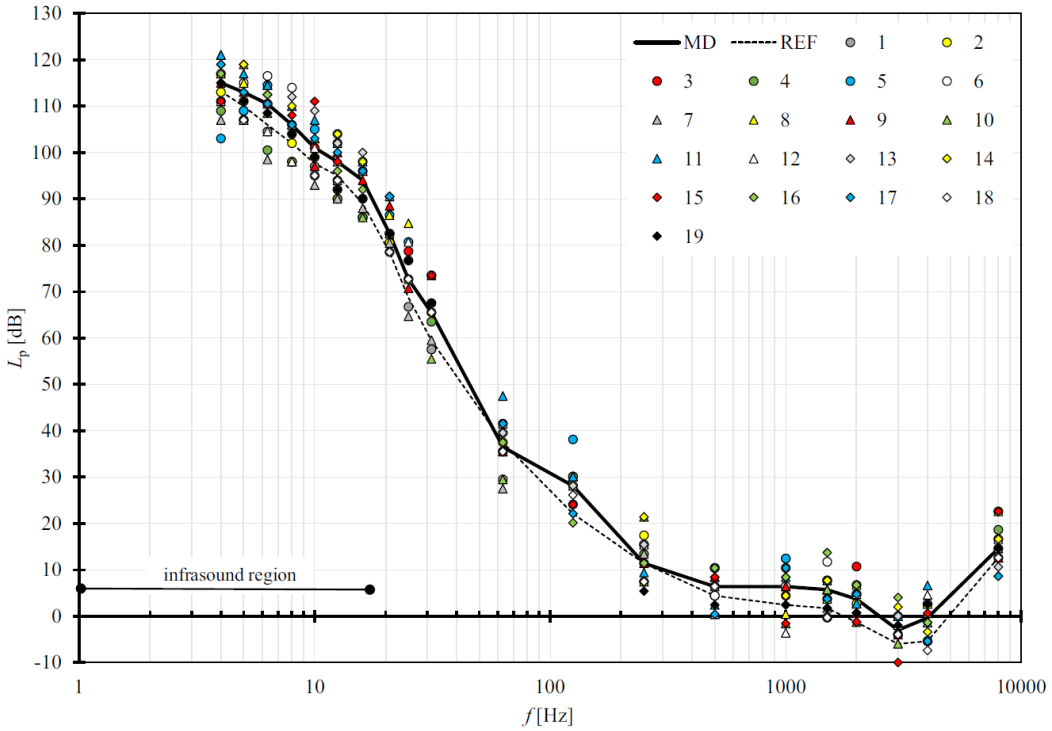


Figur 4 *Forslag til en normal høretærskel for rene toner i et frit felt (fuld linje) fra reference* [12]*. Kurven er konstrueret på basis af data fra Møller & Pedersen, tærskelforslag, [11] – jævnfør Figur 3, (2-14 Hz), Watanabe & Møller, [13], (16 Hz) og ISO 389-7:2005 (20- 1000 Hz). Den omvendte A-kurve er vist med en stiplet linje.*

I et nyere finsk studie fra 2022, [14], er høretærsklerne for toner bestemt i frekvensområdet 4-8000 Hz i et forsøg med 19 normalthørende personer i alderen 19-26 år. Resultaterne ses på Figur 5. Disse data er så nye, at de ikke er indgået i revisionen af ISO 226:2023, [7] eller ISO 389-7:2019, [10].

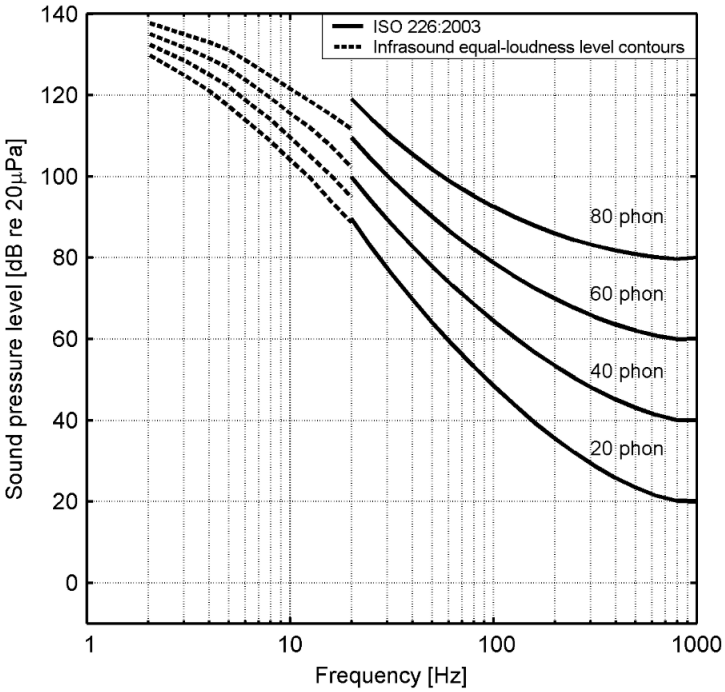
Det ses af figuren, at der er forskelle på de individuelle høretærskler på op til 20 dB og af det supplerende materiale, [15], fremgår at standardafvigelserne ved forskellige frekvenser er 3-6 dB.

I dette studie er høretærsklen i infralydområdet 2-5 dB højere end det tidligere viste forslag [11], se Figur 3 og Figur 6, som var baseret på flere undersøgelser. Set i lyset af de angivne standardafvigelser, måleubestemthed på lydtrykniveauer, forskelligheder i måle-setup's og forsøgspersoner, kan det ikke konkluderes, at der er tale om en væsentlig forskel. I området 20-8000 Hz kan metodeforskelle måske forklare, at tærsklen i dette forsøg ligger lidt højere end den standardiserede høretærskel. Det må således konstateres, at høretærsklen i området 4-8000 Hz, i dette forsøg, ligger lidt højere end angivet i tidligere undersøgelser og standarder, men at der ikke er tale om nogen væsentlig forskel. Der er i hvert fald ikke tegn på at tærsklen ligger lavere end angivet i tidligere resultater.



Figur 5 *Høretærskel. Det uvægtede lydtrykniveau, Lp, af høretærsklen som funktion af frekvensen, f. MD er medianen af 19 deltagere. REF er en kombination af den standardiserede høretærskel fra ISO 226:2003,* [*8], for 20-8000 Hz og forslaget om en høretærskel for infralyd præsenteret af Møller og Pedersen [11], inden for 4-16 Hz. Symboler navngivet fra 1 til 19 repræsenterer de individuelle høretærskler for de 19 deltagere. Figur fra [14].*

Hvad angår hørestyrkekurver ved lave frekvenser er der i reference [11] fra 2004 gengivet resultater fra flere studier af hørestyrkeniveauer indtil 2003. På baggrund af disse foreslår forfatterne hørestyrkeniveau-kurver som vist på Figur 6.



Figur 6 *Forslag til konturer for samme hørestyrkeniveau for infralydområdet sammen med standardiserede (ISO 226:2003) konturer over 20 Hz. Figur fra reference [11].*

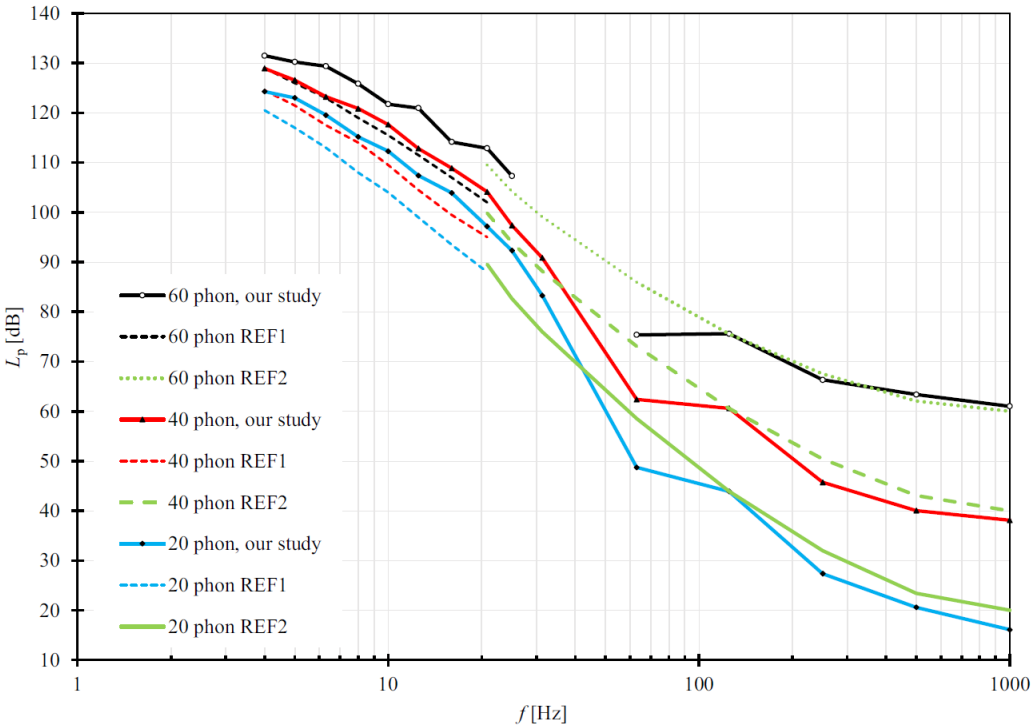
Det bemærkes, at konturerne bør tages med stort forbehold på grund af den sparsomme mængde data og usikkerheden forbundet med de nøjagtige phon-værdier, som de er mærket med. Bl.a. kan det undre, at der er diskontinuiteter mellem de foreslåede kurver under 20 Hz og de standardiserede kurver. Uanset dette forekommer det hævet over enhver tvivl, at konturerne er meget tætte i infralyd- og lavfrekvensområdet.

I det nye finske studie fra 2022, [14], er der også målt hørestyrkeniveau-kurver for toner i frekvensområdet 4 Hz -8000 Hz med 19 normalthørende personer i alderen 19-26 år. Resultatet ses på Figur 7 sammen med tidligere resultater.

Som tidligere finder man også her, at hørestyrkeniveau-kurverne ligger meget tæt ved lave frekvenser. Det betyder i praksis, at en overskridelse af høretærsklen med et vist antal dB ved lave frekvenser, giver en større stigning i hørestyrkeniveauet end ved højere frekvenser. Fx vil en stigning i lydtrykniveau med 5 dB under 10 Hz øge den subjektive lydstyrke (hørestyrkeniveauet) lige så meget som en stigning i lydtrykniveau med 20 dB ved 1 kHz. Når man tager forskellene af høretærsklerne i betragtning, betyder det, at i infralyd og lavfrekvensområdet kan en tone, som er uhørlig for én person, opfattes som kraftig af en anden person.

Af Figur 7 ses endvidere, at over 20 Hz følger resultaterne i det nye finske studie nogenlunde de standardiserede hørestyrkeniveau-kurver fra ISO 226:2003, [8], mens de under 20 Hz ligger systematisk omkring 5 dB højere end de ovenfor nævnte resultater. Forfatterne er inde på, at de tidligere resultater måske ligger for lavt, og begrunder det bl.a. med tidligene nævnte diskontinuiteter ved 20 Hz.

Der skal nok flere studier til at afgøre, om kurverne ligger højere end tidligere foreslået, men ifølge det nye studie ligger de formegentlig ikke lavere.

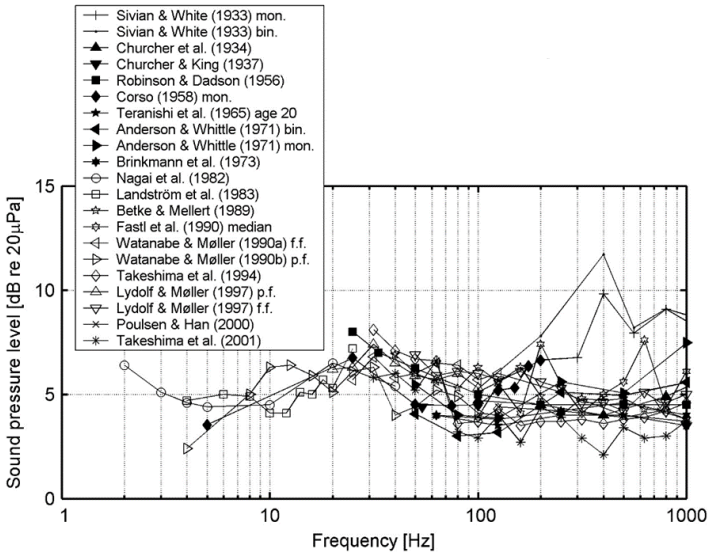


Figur 7 *Hørestyrkeniveau-kurver. Den uvægtede lydtrykniveau, Lp, som funktion af frekvens, f, for de gennemsnitlige hørestyrkeniveau-kurver. REF1 repræsenterer de foreslåede hørestyrkeniveau-kurver som vist på Figur 6 for 4-20 Hz, og REF2 repræsenterer de standardiserede hørestyrke-niveau-kurver i ISO 226:2003, se Figur 1. Figur fra [14].*

3.1.3 Spredning af høretærskler

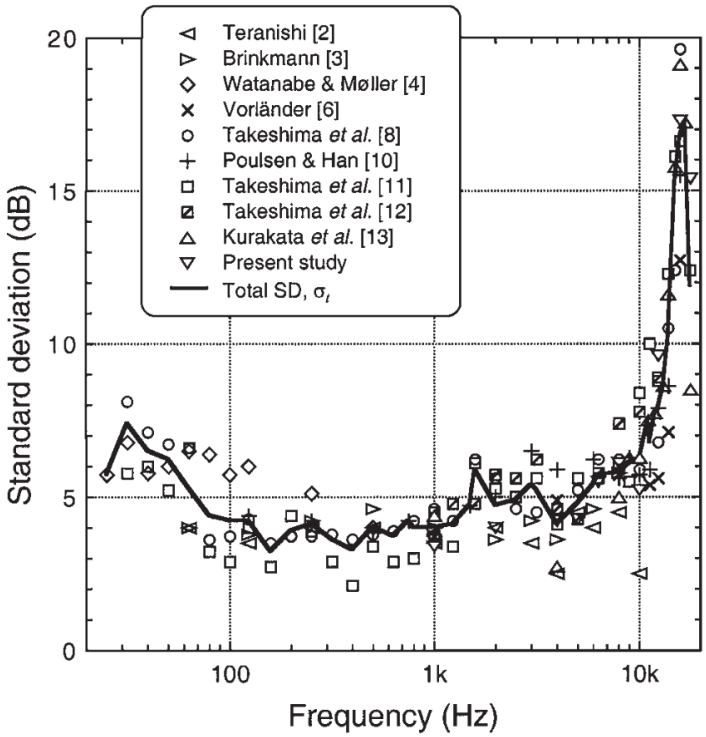
Et emne, der ofte diskuteres er, om forskelle i høretærskler fra person til person er anderledes ved lave end ved højere frekvenser. Hvis forskellene er meget store, bør det måske tages i betragtning ved fastsættelse af grænseværdier.

Ved sammenligning af resultater fra forskellige undersøgelser finder reference [11] fra 2004 at standardafvi-gelserne er af størrelsesordenen 5 dB næsten uafhængige af frekvens, ned til 2 Hz, måske med en lille stig-ning ved 20-50 Hz, se Figur 8.



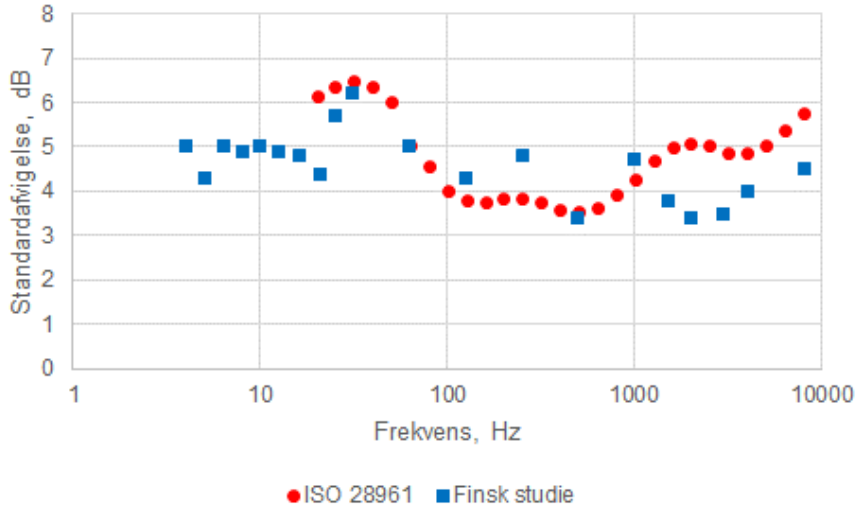
Figur 8 *Standardafvigelsen mellem forsøgspersoner for høretærsklen ned til 2 Hz med resultater fra en række studier. Figur fra reference [11].*

Reference [16] fra 2005 finder en variation af standardafvigelsen med frekvensen som vist på Figur 9. Vi ser også her at standardafvigelsen er omkring 5 dB, dog med en top omkring 30 Hz.



Figur 9 *Standardafvigelser for høretærsklen i forskellige studier og den samlede standardafvigelse som funktion af frekvensen ned til 25 HZ (sort linje). Figuren er fra reference [16]. Tallene i de firkantede parenteser er artiklens referencenumre.*

Forfatterne viser igen figuren i reference [17] fra 2013 med en bemærkning om det usandsynlige i, at tærskelfordelingen ændrer sig så brat mellem tilstødende frekvenser, som de mange toppe og dale på middelkurven viser. Disse toppe og dale betragtes som artefakter, genereret af uregelmæssigheder blandt undersøgelser. Derfor bør kurven udjævnes ved hjælp af et passende polynomium. Sammen med andre data udgør disse data baggrundsmaterialet for DS/ISO 28961 fra 2012, [18]. Denne standard angiver den statistiske fordeling af høretærskler for otologisk normale personer i alderen fra 18 år til 25 år i frit felt. Standarden angiver bl.a. standardafvigelsen på høretærsklen ved forskellige frekvenser, se Figur 10, hvor også resultaterne af den finske undersøgelse [14] er vist.

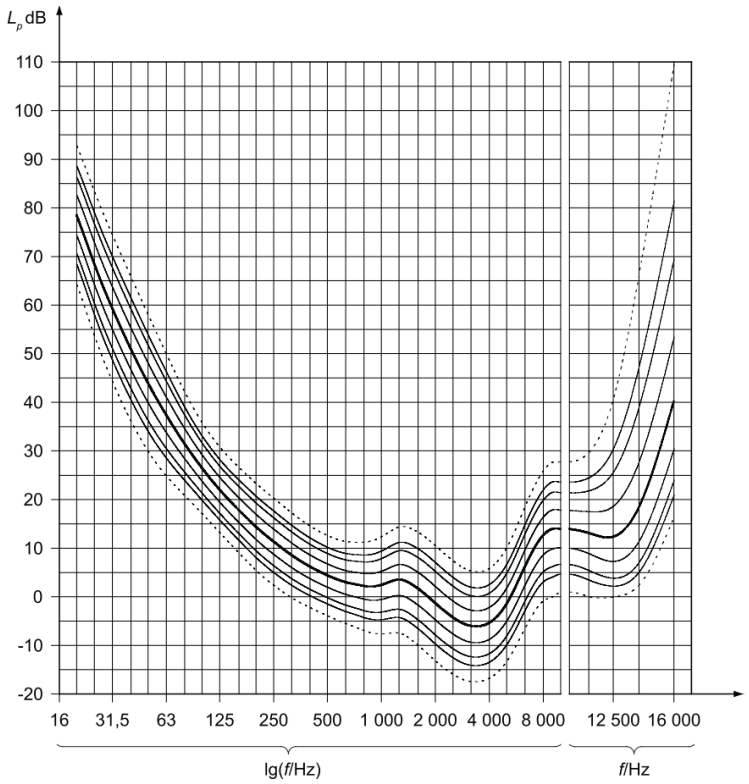


Figur 10 *Standardafvigelse på høretærsklen ved forskellige frekvenser fra henholdsvis DS/ISO 28961:2012, [13] og det finske studie, [14].*

Man kan undre sig over, at begge sæt resultater har et maksimum omkring 30 Hz, men bortset fra dette bemærkes, at spredningen ligger omkring 5 dB, og er ikke væsentlig anderledes i det lavfrekvente område end i resten af frekvensområdet.

I DS/ISO 28961:2012, [18] er der også angivet percentilkurver for høretærsklen, se Figur 11. Figuren viser, at ved fx 100 Hz er der 5%, der hører mere end 7 dB bedre end gennemsnittet og 5% der hører mere end 7 dB dårligere end gennemsnittet.

Ifølge reference [11] er der bevis for, at der findes personer, som har en hørelse meget bedre end normalen (flere gange standardafvigelsen væk fra gennemsnittet). Dette kan muligvis forklare tilfælde, hvor personer synes at blive generet af lyd, der er langt under den normale høretærskel.



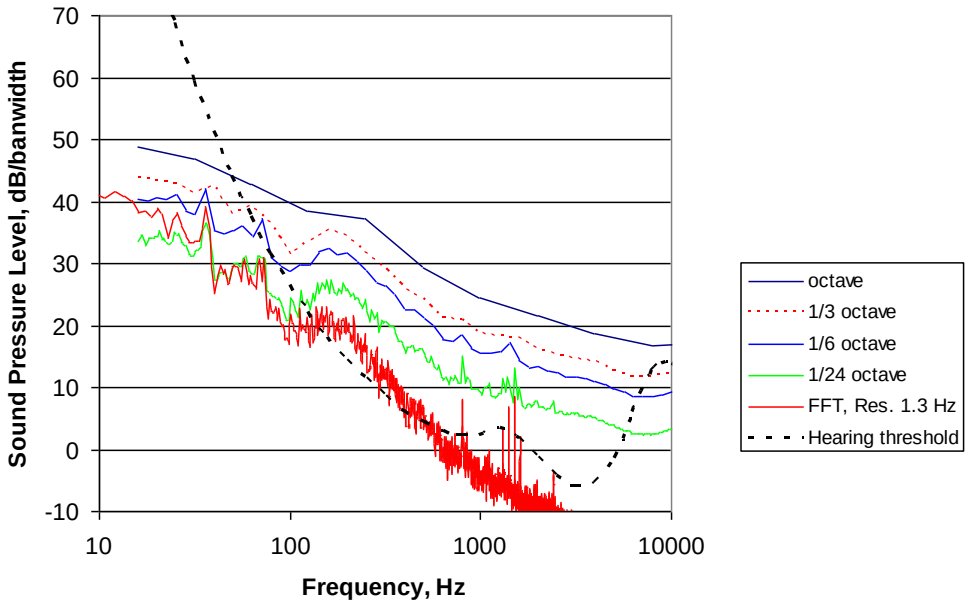
Figur 11 *Percentilkurver for høretærskelfordeling. Figur fra DS/ISO 28961:2012 [18].Til venstre med logaritmisk frekvensskala og til højre med lineær frekvensskala. Fra top til bund er percentilerne P99 (punkteret), P95, P90, P75, P50 (fed), P25, P10, P5, and P1 (punkteret).*

3.2 Høretærskel for bredbåndsstøj

De foregående afsnit har beskrevet høretærskler for toner og smalle støjbånd. Sagen er mere kompliceret for bredbåndet støj, idet hørelsen adderer lydindtrykket i frekvensbånd, de kritiske bånd, med forskellig bredde og følsomhed.

Det ses ofte, at støjspektre vises sammen med høretærsklen for toner, og at der drages konklusioner på baggrund af en direkte sammenligning af spektre og høretærskel. Dette kan føre til fejlagtige konklusioner.

Som et eksempel er der i Figur 12 vist et antal spektre af samme støj fra en vindmølle, men med forskellig båndbredde i frekvensanalysen.



Figur 12 *Spektre med forskellig analysebåndbredde af støjen fra en vindmølle, refereret til en afstand på 280 m. Abscissen er niveauet pr. effektiv analysebåndbredde. Høretærsklen efter ISO 226:2003 [8], er også vist på grafen. Støjens A-vægtede lydtrykniveau er 33 dB. Figur fra reference [12].*

Da kurven med opløsning 1,3 Hz er mindre end 10 dB over høretærsklen, fristes man til at drage den konklusion, at møllen næsten ikke er hørbar, og at de lave frekvenser slet ikke er hørbare.

Hvis man derimod ser på kurven med 1/1 oktav-analysen, og sammenligner med høretærsklen vil man nok drage helt andre konklusioner, men det giver ikke mening, da det er den samme støj.

Dette eksempel viser, at en direkte sammenligning af høretærsklen for toner og støjspektre ikke er meningsfuld, så en anden tilgang er nødvendig ved vurdering af hørbarhed af bredbåndet støj. Man er nødt til at tage hensyn til den måde hørelsen adderer lydindtrykket i de kritiske bånd, og den varierende følsomhed hørelsen har inden for disse, især ved de laveste frekvenser.

I reference [12] er foreslået en psykoakustisk "rimelig" procedure. Metoden er ikke er blevet verificeret systematisk ved lyttetest, men observationer i forbindelse med lyttetests rapporteret i [19] og [20], synes at vise, at den har en vis gyldighed. Metoden er beskrevet i Bilag 1.

Det ses af Figur 4 at A-vægtningen er en dårlig tilnærmelse til hørelsens frekvensafhængige følsomhed ved høretærsklen. Derfor bygger proceduren på, at spektrene frekvensvægtes med den omvendte høretærskelkurve, så man får de såkaldte HT-vægtede spektre.

Metoden konkluderer, at i situationer med meget lav eller ingen baggrundsstøj (f.eks. indendørs), kan den lavfrekvente vindmøllestøj anses for at ligge under høretærsklen, hvis niveauerne i de kritiske bånd af de HT-vægtede vindmøllespektre er mindre end 0 dB.

I reference [2] fra 2017 er gennemgået tre forskellige metoder til vurderingen af hørbarheden af indendørs vindmøllespektre. Ved bedømmelse af hørbarheden er det forudsat, at der ikke forekommer maskering fra vindgenereret støj i vegetation og bygninger eller fra andre eksterne eller interne støjkilder.

Spektrene er bedømt efter tre forskellige metoder:

1. Metode til bedømmelse af hørbarhed af bredbåndet lavfrekvent lyd nær høretærsklen, se Bilag 1.
2. Beregning af hørestyrke og hørestyrkeniveau efter Zwicker-metoden, ISO/DIS 532-1 [21].
3. Bedømmelse af betydningen af spektral balance, [22].

Metoderne er afprøvet på forskellige vindmøllespektre indendørs. For alle spektrene gælder, at de dominerende frekvenskomponenter ligger højere end 50-80 Hz, for nogle spektre over 100 Hz.

Metoderne 1 og 2 giver, for de aktuelle spektre, samstemmende resultater. Da metode 2 er velanset og standardiseret, anbefales det, at hovedvægten lægges på denne. Kun metode 1 kan dog give resultater for frekvenser under 25 Hz.

3.3 Maskering

Om støjen, hvad enten det er toner, smalbåndet eller bredbåndet støj, er over eller under høretærsklen er en ting. Nok så væsentligt er det om støjen fra fx en vindmølle kan høres på grund anden støj, fra fx trafik, vindstøj i vegetation eller brænding, dvs. om den er maskeret mere eller mindre af anden støj.

Maskering af toner og smalle støjbånd er velbeskrevet se og en målemetode er angivet i vindmøllebekendtgørelsen, [23].

Maskering af bredbåndet støj med anden støj er ikke så velbelyst og afhænger af en række faktorer.

Reference [12] sammenstiller viden om forskellige situationer, som kan forekomme i forbindelse med vindmøller. Der skelnes mellem stabile forhold hvor vindmøllestøjen og baggrundsstøjen kan sammenlignes direkte og ustabile forhold, hvor de to støjtyper varierer uafhængigt af hinanden. Sammenfattende konkluderes det:

- For stabile forhold: Vindmøllestøjen anses for maskeret, hvis niveauerne af de kritiske bånd af den A-vægtede vindmøllestøj er mere end 2 dB under niveauerne for de kritiske bånd af den A-vægtede baggrundsstøj.
- For ustabile forhold: Hvis støjen fra vindmøllen skal anses for at være under maskeringstærsklen hele tiden, skal de maksimale niveauer (med tidsvægtning F) af vindmøllestøjen sammenlignes med minimumsniveauerne (udtrykt f.eks. som L_{95}) af baggrundsstøjen efter samme kriterier som nævnt i ovenstående punkt.

Ofte går man ikke ind i de forhold som er angivet ovenfor. Man sammenligner fx bare det A-vægtede niveau af den ene støj med den anden, for at bedømme om der er tale om maskering. Man kan dog ikke sige noget generelt om, hvor meget den maskerende støj skal ligge over den anden støj, for at den er maskeret. Det afhænger af spektrene og den tidsmæssige variation af de to støjtyper.

I forbindelse med et stort studie fra Health Canada [24] er der i en artikel fra 2015 nævnt, at der var et betydeligt fald i hørbarheden af vindmøller når baggrundsniveauer oversteg vindmøllestøjen med mindst 5 dB(A), og at genevirkningen af støjen aftog signifikant i områder, hvor den beregnede natlige A-vægtede baggrundsstøj (tidsvægtning ikke oplyst) oversteg vindmøllestøjen med 10 dB eller mere, se Figur 23. Disse værdier kan altså kun generaliseres i den udstrækning spektrene af vindmøllestøj og baggrundsstøj er de samme som i den canadiske undersøgelse.

4 Genevirkning

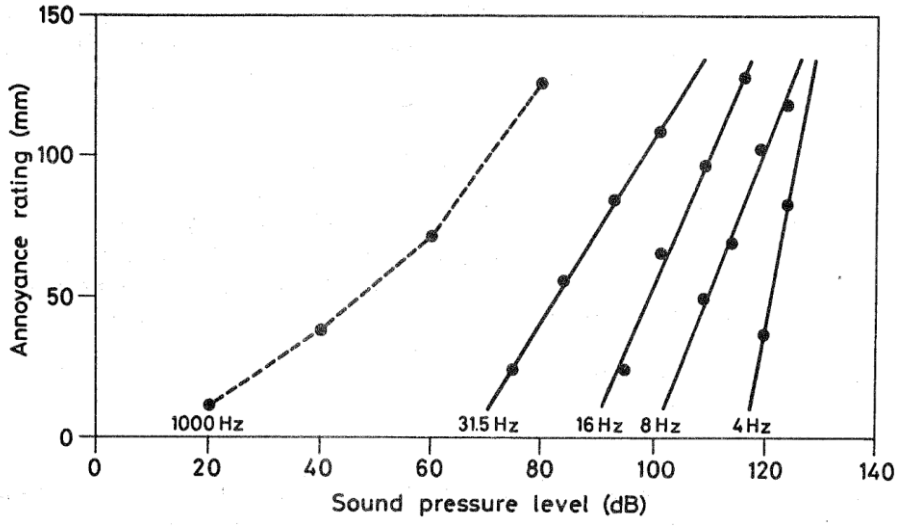
Når der tales om støjens genevirkning, skal der skelnes mellem forsøg i laboratorier (og felt) og socio-akustiske undersøgelser, hvor respondenter svarer på spørgsmål om den oplevede gene, de steder hvor de i det normale liv er udsat for støjen; oftest i deres hjem.

Selv om man i laboratoriet kan skabe og gengive lyden meget nøjagtigt og måske også supplere med visuelle stimuli i form af billeder, videoer og Virtual Reality head-sets, giver forsøg ikke samme holistiske opfattelse af situationen som ved socio-akustiske undersøgelser. Her inkluderes virkningen af ikke akustiske faktorer, som fx forringelser af miljø og ejendomsværdi, frygt for helbredseffekter og holdninger til støjkilden.

Styrken ved laboratorieforsøg er, at man kan sammenligne lyde under veldefinerede og velkontrollerede betingelser, så man fx relativt kan sige om nogle lyde er mere generende end andre, men man får ikke nødvendigvis samme respons som ved socio-akustiske undersøgelser. Sidstnævnte udføres som regel efter standarden ISO 15666, og må anses for den rigtigste metode til at finde de reelle genevirkninger i praksis.

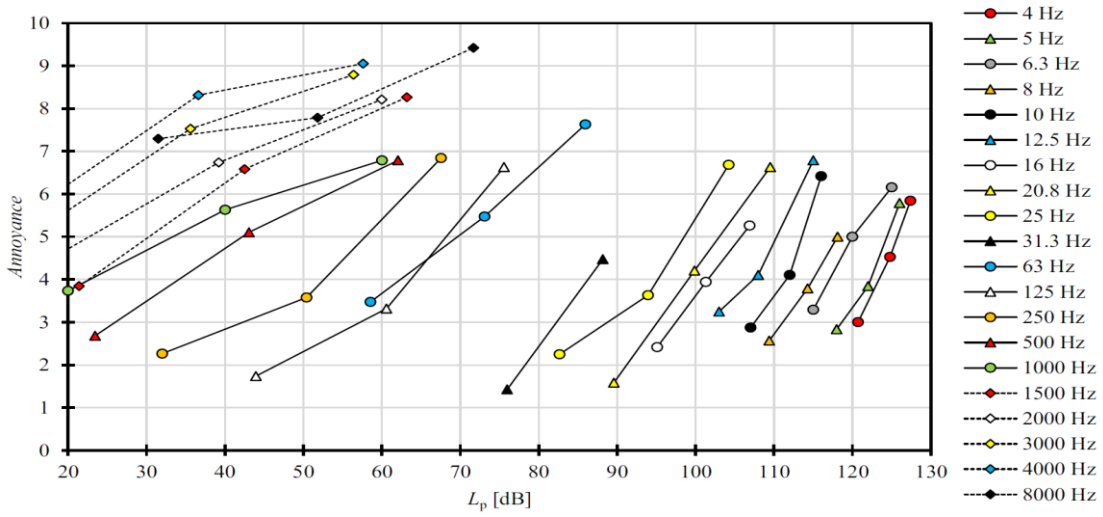
4.1 Laboratoriemålt genevirkning

Genevirkningen af toner i infralyd- og det lavfrekvente område er undersøgt og beskrevet i referencerne [25] fra 1984 og [26] fra 1987, se Figur 13.



Figur 13 *De gennemsnitlige gene (målt i et laboratorium) fra 18 forsøgspersoner med normal hørelse på en 15 cm lang skala fra slet ikke generet til meget generet. Stimuli var rene toner ved forskellige frekvenser. Ved 1 kHz var stimulus et 1/1 oktavbånd af støj. Punkterne på kurverne svarer til gennemsnitlige gener for niveauer på 20, 40, 60 og 80 dB ved 1000 Hz. Fra referencerne [25] og [26].*

I dette forsøg var eksponeringstiden 15 minutter for hver frekvens. Som det ses af Figur 13, skal de laveste frekvenser have et højt niveau for at kunne høres. Når de først er hørbare, ses det, at genen øges meget hurtigt med stigende niveau. I samme reference beskrives et forsøg med stimuli på 30 sekunder, 1 minut og 15 minutter og det konkluderes at længden af stimuli ikke har indflydelse på resultatet.

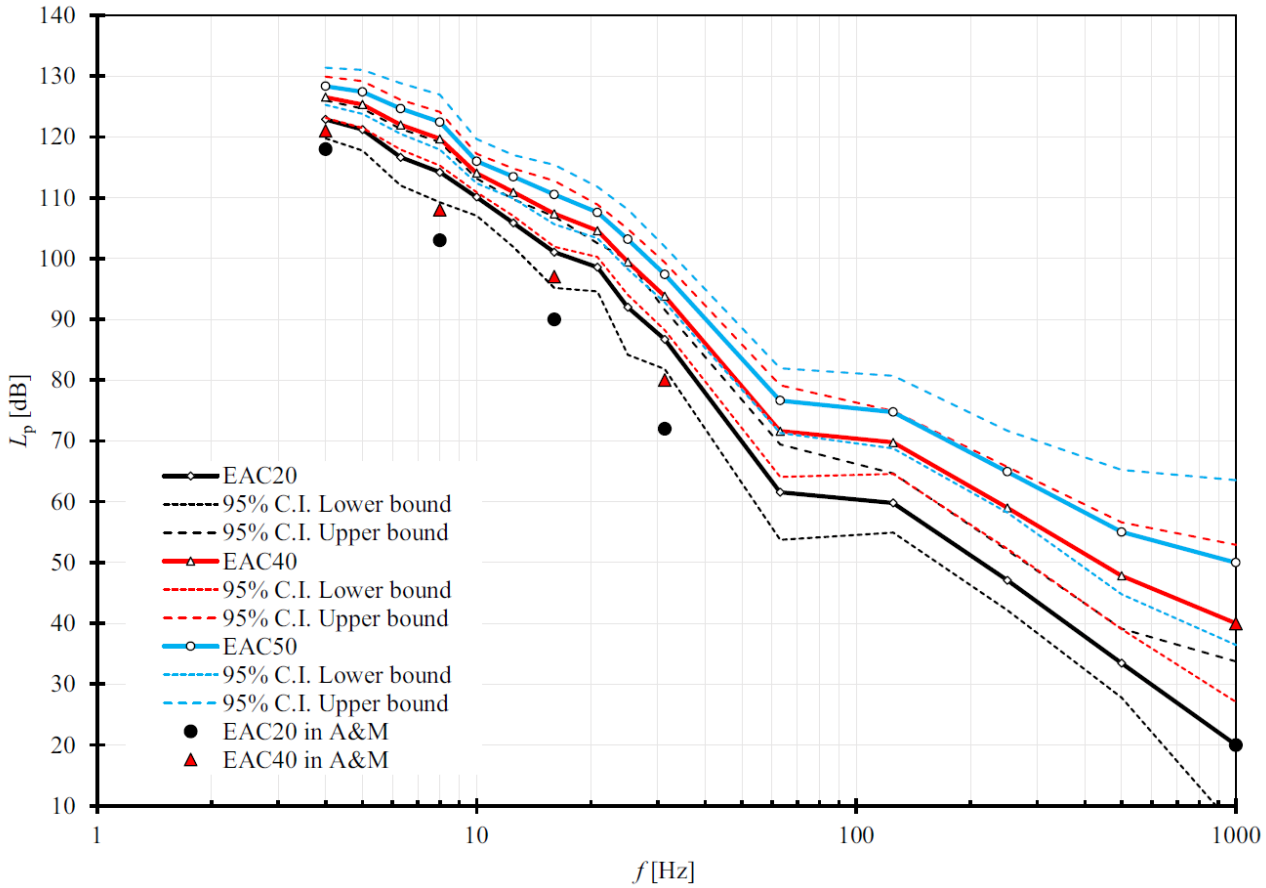


Figur 14 *Den gennemsnitlige gene som funktion af det uvægtede lydtrykniveau, Lp, for de 20 undersøgte frekvenser fra 4 til 8000 Hz. For hver frekvens svarede de tre lydtrykniveauer til høretydkeniveauer på 20 phon (laveste punkt), 40 phon (midterpunkt) og 60 phon (højeste punkt). Svarskalaen var fra 0 (slet ikke generet) til 10 (Ekstremt generet) som i ISO/TS 15666, [6]. Figur fra [14].*

En undersøgelse af genevirkningen af toner er udført i det tidligere omtalte finske studie [14] fra 2022. Dette omfatter en del flere frekvenser end det tidligere studie, se Figur 14.

Det ses umiddelbart, at der er ligheder med det tidligere forsøg og en overraskende god overensstemmelse i betragtning af at forsøgene er lavet i forskellige laboratorier med forskellige forsøgspersoner og med et tidsinterval på 35 år.

Det nye finske studie [14] angiver også kurver for samme gene af toner ved forskellige frekvenser og sammenligner det tidligere studie [25] og [26], se Figur 15.



Figur 15 *Lige-generende kurver som funktion af frekvens, f. Kurven EACx0 viser de lydtrykniveauer af toner, der blev opfattet lige så generende som en 1 kHz tone med et lydtrykniveau på x0 dB. EAC20 og EAC40 rapporteret af Andresen og Møller i reference* [25] *er forkortet til A&M. Figur fra [14].*

Generelt ligger de nye finske resultater højere end de tidligere målte [25]. Forskellen er mere end 10 dB fx ved 16 og 61,5 Hz.

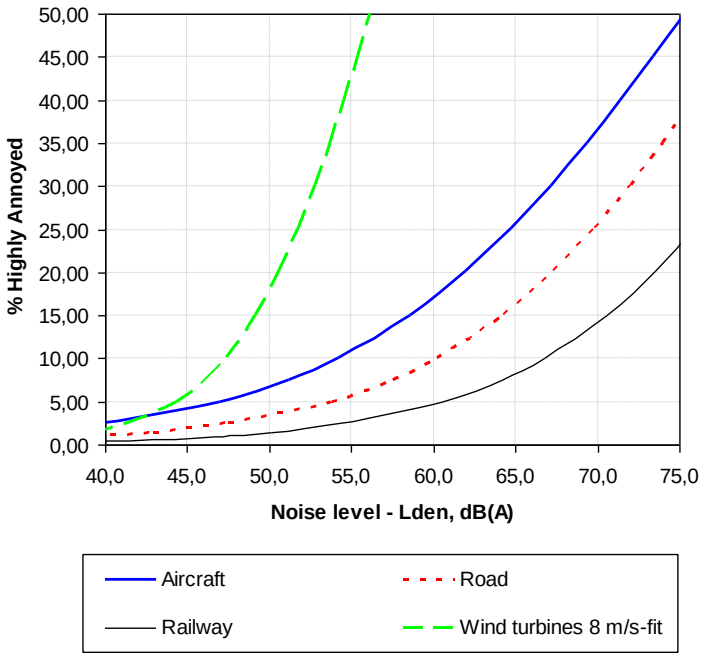
De finske forfattere argumenterer med, at gene-kurven fra de tidligere resultater svarende til genen 20 dB ved 1 kHz, ved 12,5 Hz ligger lidt under den høretærskel som i 2004 er foreslået i reference [11], hvilket antyder, at de tidligere kurver generelt er for lave. Det skal dog også nævnes, at de nye finske resultater for hørestyrkeniveau-kurvene ligger omkring 7 dB højere end de standardiserede kurver i ISO 226:2023, [7] ved 20 og 30 Hz.

Samlet set må det konkluderes, at det nye studie giver resultater, der kunne tyde på, at genen af lavfrekvente toner målt under laboratorieforhold er mindre end tidligere antaget, men at der er forhold, som bør undersøges nærmere, før der kan drages en konklusion om dette.

4.2 Socio-akustiske målinger af genevirkning

Sammenhængen mellem støjgene og støjniveau fundet ved socio-akustiske målinger afbildes ofte i form af dosis-responskurver, hvor støjgenen afbildes som funktion af lydtrykniveauet. Dosis-responskurverne tager som regel udgangspunkt i A-vægtede støjniveauer uden for respondenternes boliger. Til nærværende formål

er det kun relevant at se på data for vindmøller, da genen og dermed dosis-responskurverne er forskellige for forskellige typer af støjkilder, se Figur 16



Figur 16 *Logistiske dosis-responskurver (se Bilag 2) for sammenhængen mellem støjniveau (L_{den}) og % stærkt generet for forskellige støjkilder[2]. L_{den} for vindmøllestøj er beregnet ved at addere 6,4 dB til L_{Aeq}-værdier ved 8 m/s. Figur fra [27].*

Da vindmøllestøjen, inklusiv den lavfrekvente del indendørs, domineres af frekvenser i det normale område (se afsnit 2.1), har forløbet af dosis-responskurver for den almindelige støj også relevans for den lavfrekvente del af støjen, især fordi der i det følgende også er angivet resultater for den indendørs støjgene.

Følgende forhold skal tages i betragtning ved sammenligning af dosis-responskurverne:

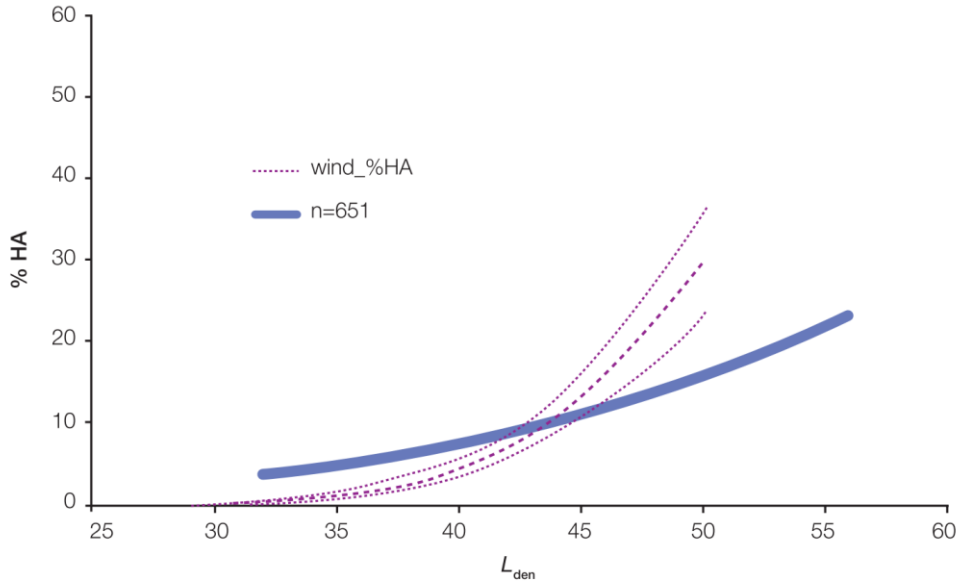
- Det ser ud som om de forskellige studier, der refereres til i det følgende, bruger sammenlignelige geneskalaer, som er defineret eller omregnet til skalaer defineret i standarden ISO/TS 15666 [6]. Det er dog ikke altid tydeligt, hvilket cut-off punkt, se afsnit 2.5, der er anvendt for stærkt generet, hvilket påvirker resultatet.
- En anden ubestemthed ved sammenligning af studier er, at der ofte benyttes forskellige lydudbredelsesmodeller til beregning af lydtrykniveauerne. Flere af studierne har dog verificeret beregningerne ved målinger.
- Endelig skal det bemærkes, at nogle studier beregner L_{den} niveauet ved en fast korrektion til L_{Aeq} ved 8 m/s medens andre studier beregner det faktiske L_{den} niveau ud fra bl.a. de varierende meteorologiske forhold, herunder de varierende vindhastigheder.

Det har ikke været muligt, inden for rammerne af dette projekt, at bedømme hvilken indflydelse disse forhold har på resultaterne eller at omregne dem til en fælles standard.

[2] Figuren er fra 2007. Som det vises i afsnit 4.2.3, er kurven for vindmøllestøj næsten identisk med resultaterne i [29] fra 2011. Kurven for vejtrafikstøj er bekræftet for "ikke motorveje" i Danmark i reference [58] fra 2016. Konstanterne for de viste kurver er: Aircraft s=0,104 f=75,3. Road s=0,115 f=79,4. Railway s=0,120 f=85,0. Vindmøller s=0,189 f=56,3.

4.2.1 WHO

I den store WHO rapport fra 2018 [28] (som dog kun har medtaget data indtil 2014) findes dosis-respons-kurver for vindmøllestøj, som er vist på Figur 17.

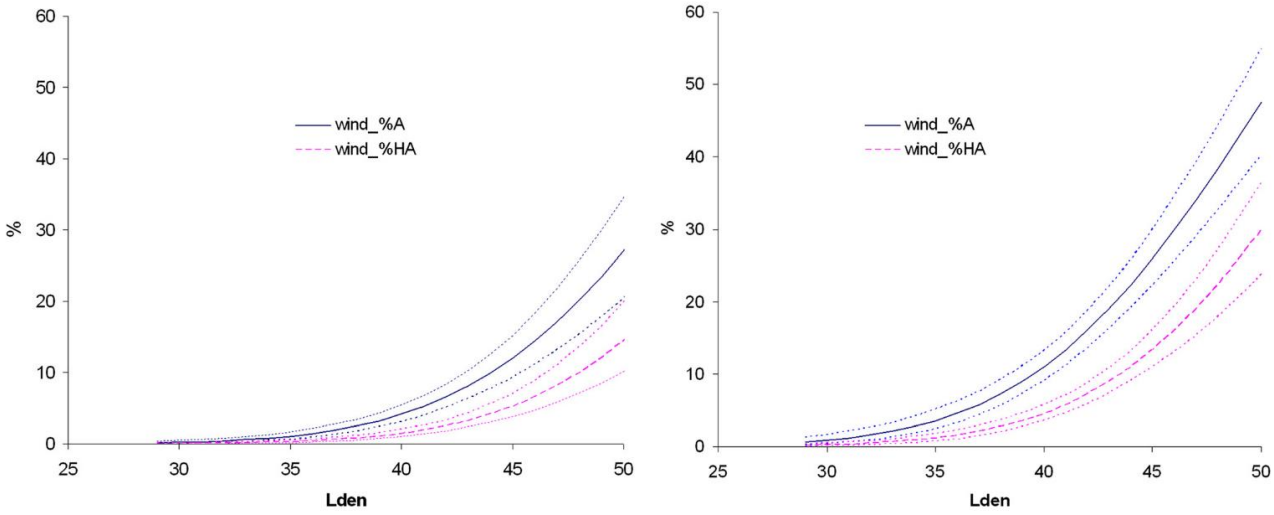


Figur 17 *To grafer for procentdel (udendørs) stærkt generet (%HA) som funktion af L_{den} for vindmøllestøjen fra Janssen et al.* [29] *fra 2011 (N=1820), rødlilla, og Kuwano et al. fra 2014* [30] *(N=651),blå. Kuwano-kurven er baseret på L_{dn}. Figur fra* [28].

Den svensk-hollandske rød-lilla kurve er beregnet med baggrund af data fra to undersøgelser i Sverige (N=341 fra 2000 [31], N=754 fra 2005 [32]), og en undersøgelse i Holland (N=725 fra 2007 [33]), i alt 1820 respondenter. Vi vil i det følgende tage udgangspunkt i denne, dels fordi den bygger på et større antal respondenter end den japanske, dels fordi den i følge det supplerende materiale til WHO rapporten [34], giver en væsentlig bedre korrelation, og endelig fordi de kulturelle og boligmæssige forhold i Sverige og Holland må anses for at ligge nærmest de danske forhold.

4.2.2 Svensk-hollandsk studie

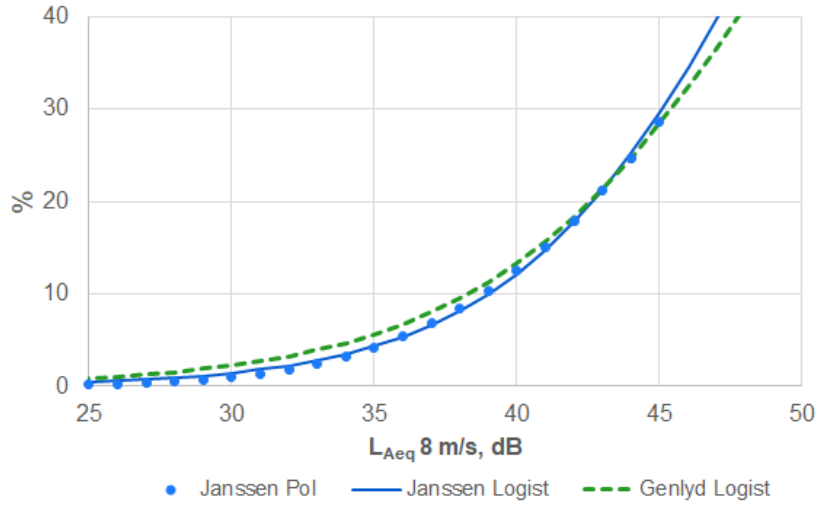
Resultater fra den svensk-hollandske undersøgelse [29] fra 2011 er vist på Figur 18. For hver respondent blev de udendørs A-vægtede lydtrykniveauer fra nærmeste vindmølle(r) bestemt for en neutral atmosfære ved en vindhastighed på 8 m/s i 10 m højde, med en vindretning mod respondentens bolig. L_{den} blev fastsat som det A-vægtede lydtrykniveau plus 4,7 dB(A) som foreslået i reference [35]. Resultaterne viste at generne var mindre blandt beboere, der fik økonomisk udbytte af møllerne og højere blandt beboere, for hvem vindmøllen var synlig fra boligen. Respondenter, der fik økonomisk udbytte af møllerne, er udeladt af analysen bag Figur 18.



Figur 18 *Dosis-responskurver mellem L_{den} og procentdelen af beboere, der er generet (%A) og meget generet (%HA) indendørs (venstre figur) og udendørs (højre figur). Kurverne bygger på to svenske og en hollandsk undersøgelse med i alt 1820 respondenter. Figurer fra reference* [29].

Kurverne på Figur 18 er tredje ordens polynomium-tilnærmelser i et L_{den}-område på 29–50 dB til den bag-vedliggende statistiske analyse med kumulativ normalfordeling.

Det ses af figuren at 10% stærkt generet udendørs svarer til L_{den} = 44 dB medens de 10 % indendørs svarer til L_{den} = 48 dB.



Figur 19 *Procentdel af stærkt generet (%HA) som funktion af lydtrykniveauet L_{Aeq} ved en vindhastighed på 8 m/s. Punkterne "Janssen Pol" er beregnet efter et polynomium i reference* [29], *"Janssen Logist" er en logistist tilnærmelse, se Bilag 2 (konstanter s=0,223, f=48,9) og "Genlyd Logist" er data fra reference* [36] *(konstanter s=0,189, f=49,9).*

Figur 19 Viser med blå punkter de samme data for stærkt generet (%HA) udendørs, som kurven for dette på Figur 18. Dog er der fratrukket de 4,7 dB, som var lagt til L_{Aeq} for at komme til L_{den} på Figur 18. Kurven med den blå linje viser den logistiske kurve, der bedst tilnærmer sig punkterne. Den logistiske dosis-responskurve er nærmere forklaret i Bilag 2. Da konfidensintervallerne for de blå punkter er angivet til +/- 2-4 dB i

området L_{Aeq} = 30-40 dB kan det konkluderes, at der ikke er relevante forskelle mellem de blå punkter og den blå logistiske kurve. Vi vil i det følgende arbejde med den logistiske kurve.

Den grønne punkterede kurve viser data fra reference [36], som er en sammenregning af data fra en tidligere dansk undersøgelse fra 1994 [37] og den svenske undersøgelse fra 2000 [31]. I forhold til reference [36] er der fratrukket 6,4 dB, som var lagt til L_{Aeq} for at komme til L_{den}. Den svenske undersøgelse er som nævnt baseret på 351 observationer fra 5 steder. Den danske undersøgelse repræsenterer 200 respondenter fordelt på 10 lokationer. I alt 551 observationer fra 15 lokationer.

Set i lyset af de ovenfor anførte konfidensintervaller konkluderes, at den grønne kurve for procent stærkt generet fra de tidligere dansk-svenske resultater ikke afviger fra den dosis-responskurve som WHO-rapporten fra 2018 [28] tager udgangspunkt i. Der er altså på det punkt ikke ændringer i forhold til tidligere.

I WHO-rapporten [28] fastsættes den risiko, der bør tages i betragtning ved fastsættelse af grænseværdier, til 10% stærkt generet. Det ses, at for begge kurver på Figur 19 svarer 10% stærkt generet til et støjniveau på ca. 39 dB ved 8 m/s.

4.2.3 Dosis-responskurve for lavfrekvent støj

I dette afsnit beregnes en mulig dosis-responskurve for sammenhængen mellem gene og det indendørs lavfrekvente lydtrykniveau $L_{pA,LF}$. Beregningen er foretaget ud fra data fra den svensk-hollandske undersøgelse [29] og definerede forudsætninger. Resultatet skal tages med de senere angivne forbehold.

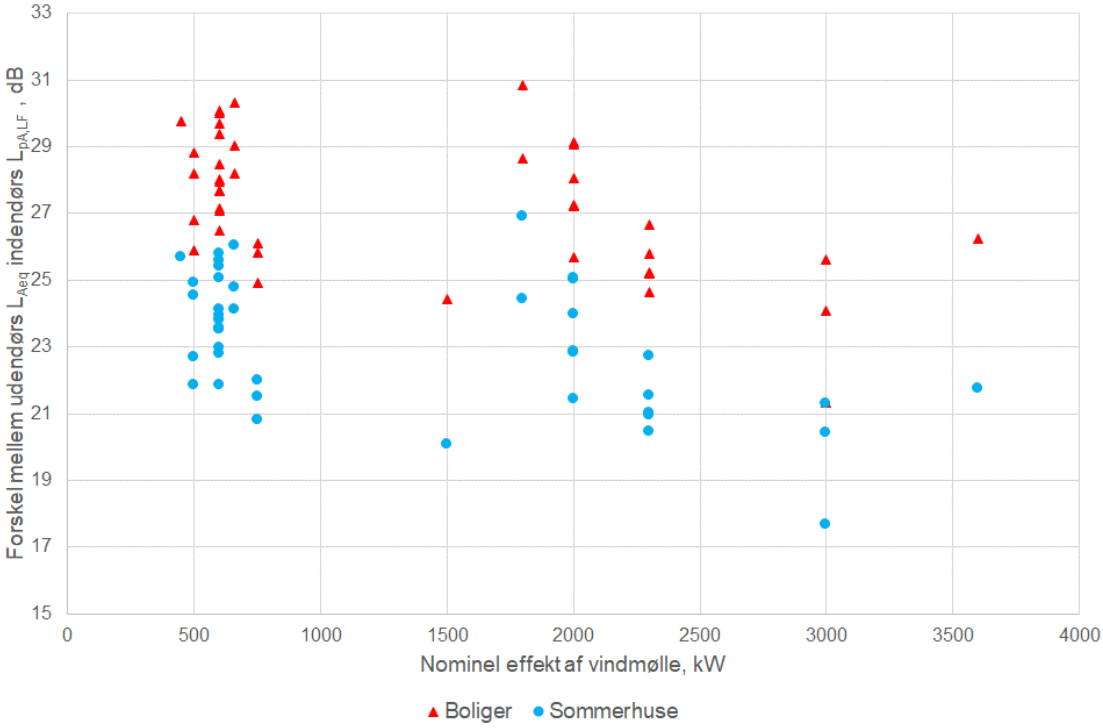
Da vi med Figur 18 til venstre har en dosis-responskurve for den indendørs støjgene, giver det mulighed for at beregne sammenhængen mellem det indendørs lavfrekvente støjniveau, $L_{pA,LF}$ og den resulterende gene.

Ideelt set må vi antage, at den indendørs støjgene er relateret til det indendørs støjniveau, selv om kurven på Figur 18 er angivet i forhold til det udendørs støjniveau. Hvis man kender lydisolationen af boligerne for de relevante vindmøllestøjspektre, kan man beregne de indendørs lavfrekvente lydtrykniveauer.

Resultaterne af en sådan beregning er vist på Figur 20. For at finde møller, der var karakteristiske for den periode, hvor geneundersøgelserne i den svensk-hollandske undersøgelse [29] er lavet, er beregningerne udført med spektre for møller hovedsagelig på 450 kW - 2,3 MW, som var med i EFP 06 projektet [1]. Dette projekt blev gennemført i omtrent samme periode, som den svensk-hollandske undersøgelse. Lydisolationen i beregningen er fastsat efter Vindmøllebekendtgørelsen [23].

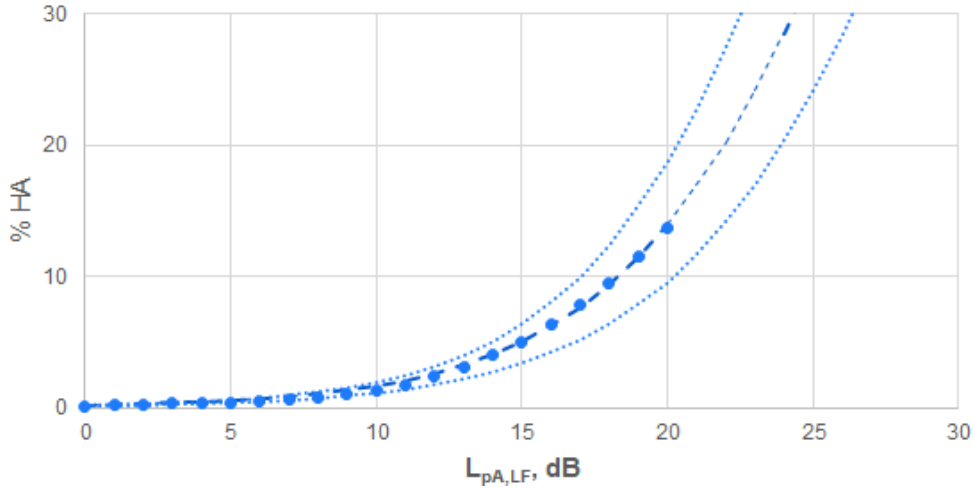
Det ses på Figur 20, at der er store variationer, men den gennemsnitlige forskel på L_{Aeq} udendørs og $L_{pA,LF}$ indendørs for de viste møller er 27 dB for boliger og 23 dB for sommerhuse. Det antages at lydisolationen for den svenske byggeskik mest ligner ”sommerhuse” mens den hollandske måske mere svarer til ”boliger”. Da forskellen mellem de to typer kun er 4 dB, findes det forsvarligt at bruge gennemsnittet på 25 dB.

Til sammenligning kan nævnes, at man i den Canadiske undersøgelse [38] ved brug af vindmøllestøjspektre, har fundet en forskel mellem bredbånd udendørs frit felt og indendørs A-vægtede lydtrykniveauer på 26 dB med lukkede vinduer. Da det indendørs A-vægtede spektrum er domineret af lave frekvenser passer dette tal godt med de 25 dB for $L_{pA,LF}$ der er fundet ovenfor.



Figur 20 *Forskel mellem udendørs A-vægtede lydtrykniveauer, L_{Aeq}, og indendørs lavfrekvente, A-vægtede niveauer, $L_{p,ALF}$, for boliger og sommerhuse beregnet med relevante vindmøllestøjspektre for møller med en afstand på fire gange totalhøjden fra beboelserne.*

Hvis en forskel på 25 dB mellem L_{Aeq} udendørs og $L_{pA,LF}$ indendørs indføres på kurven for stærkt generet for indendørs støjgene fra Figur 18 sammen med korrektionen fra L_{den} til L_{Aeq}, fås resultatet, som er vist på Figur 21.



Figur 21 *Procentdelen af stærkt generet (%HA) indendørs som funktion af det indendørs lavfrekvente lydtrykniveau $L_{pA,LF}$ for vindmøllestøj. Kurven er beregnet ud fra den indendørs gene fra Figur 18 og de gennemsnitlige niveauforskelle ude og inde for data fra Figur 20. Punkterne angiver en tredieordens polynomial beregning, og den punkterede kurve er en logistisk tilpasning med s=0,224 og f=28,1, se Bilag 2. De prikkede kurver angiver 95% konfidensintervaller. Over $L_{pA,LF}$ = 20 dB er der ikke data, så der er dosis-responskurven ekstrapoleret.*

Det ses, at konfidensintervallet (som er overført fra Figur 18) er +/- 5 % stærkt generet (%HA) ved $L_{pA,LF}$ = 20 dB. Som anført er dosis-responskurven ekstrapoleret over dette niveau, og den er derfor mere usikker her.

Figuren viser, ud fra de anvendte data, sammenhængen mellem indendørs lavfrekvente støjniveauer fra vindmøller og den indendørs støjgene. Dosis-responskurven gælder for det indendørs lavfrekvente niveau, $L_{pA,LF}$ for vindmøllestøj, og kan principielt også gælde for moderne møller. Det er ofte lydtrykniveauet, i dette tilfælde altså $L_{pA,LF}$, der forklarer den største andel af genen, men der er alligevel detaljer, som kan give anledning til forbehold:

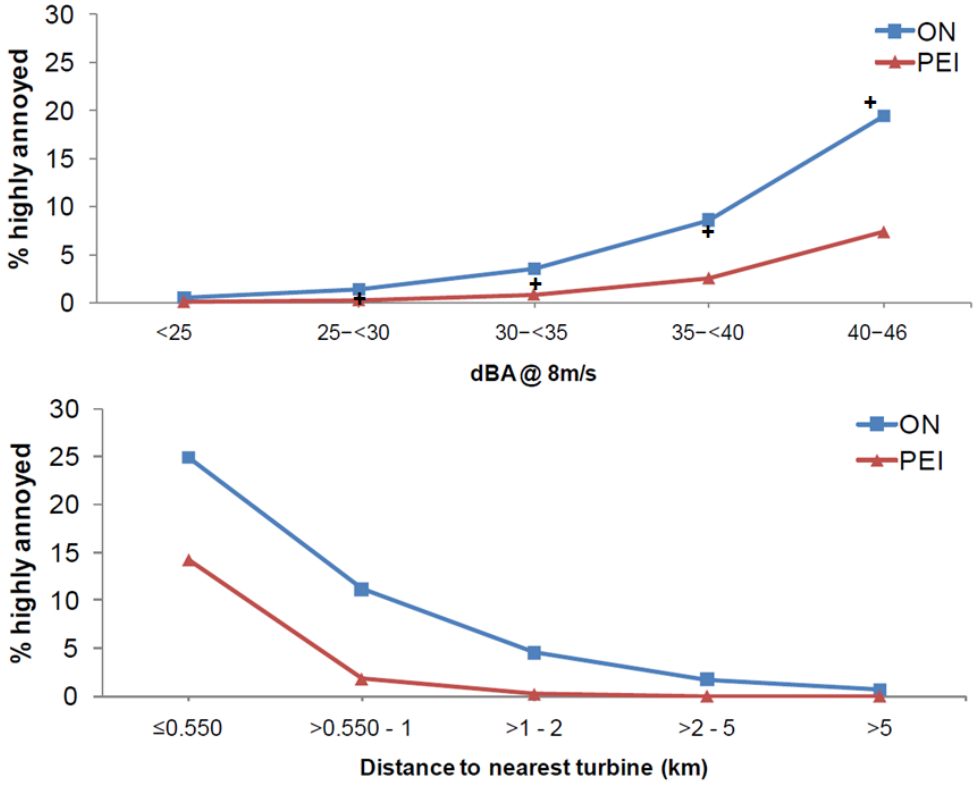
- Baggrundsdata stammer fra en undersøgelse, hvor man spurgte til både indendørs og udendørs gene. Vi ved ikke om respondenterne har skelnet skarpt mellem disse. En undersøgelse, der direkte måler sammenhængen mellem gene og $L_{pA,LF}$ ville være at foretrække.
- Dosis-responskurven på Figur 21 angiver forholdet mellem den oplevede gene og den nominelle støjbelastning ved 8 m/s og lydudbredelse i medvind. Det er i sig selv ikke noget problem, men hvis forholdet mellem den nominelle støjbelastning og den reelle støjbelastning (hvor meteorologiens indflydelse på støjudsendelse og lydudbredelse er indregnet), ikke er den samme, gør det resultatet usikkert. Dette forhold kan tænkes at være anderledes for grupper af meget store vindmøller opstillet i store afstande, sammenlignet med de landbaserede vindmøller på op til 1,5 mW som baggrundsdata er baseret på.
- Teknologien er skiftet fra stall-regulerede møller, som giver stigende støj med stigende vindhastighed, til pitchreguleret møller, som giver stigende støj op til ca. 7 m/s, og derefter er uden stigning. Mindre stall-virkning giver mindre amplitudemodulation. De moderne, større møller står i mindst den dobbelte afstand end tidligere, dvs. at luftabsorptionen dæmper den højfrekvente del af støjen mere, i hvert fald for det udendørs spektrum.
- Det kan tænkes at lydkarakteren fx balancen mellem amplitudemodulation og lavfrekvent støj er anderledes for grupper af store møller i stor afstand fra naboer.

Figur 21 skal således betragtes som en overslagsberegning, som er behæftet med nogen ubestemthed, men den indikerer alligevel, at en indendørs støjgrænse for vindmøllestøj for $L_{pA,LF}$ omkring 20 dB synes rimelig, hvis man går efter et beskyttelsesniveau, der svarer til at 10% er stærkt generet. Hvis nøjagtigheden skal øges, skal der bl.a. kigges nærmere på de svenske og hollandske vindmølletyper, der indgik i undersøgelsen, og de lydisolationer, der var typiske i de to lande.

4.2.4 Health Canada

I 2012 begyndte Health Canada en stor epidemiologisk undersøgelse af vindmøllestøj i samarbejde med Statistics Canada. Resultaterne af dette studie er resumeret i referencerne [24] og [39] fra 2015. Senere er der kommet flere fagfællebedømte artikler med detaljerede analyser.

Studiet er et tværsnits epidemiologisk studie fra de to provinser Ontario (ON) og Prince Edward Island (PEI), som ligger ca. 1700 km fra hinanden. Studiet omfattede 1238 deltagere, der boede mellem 250 m og 11 km fra operationelle vindmøller. De beregnede lydtrykniveauer er understøttet af 4000 timers støjmålinger. Resultater for støjgene er vist på Figur 22

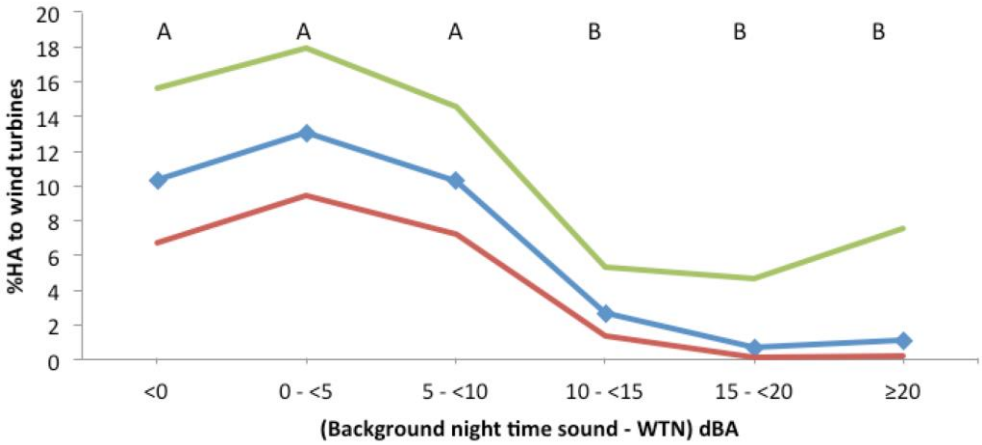


Figur 22 *Procentdel af stærkt generet i de to provinser Ontario (ON) og Prince Edward Island (PEI) udtrykt som funktion af det udendørs støjniveau ved 8 m/s (øverste figur) og afstand til nærmeste vindmølle (nederste figur). Figur fra* [39]. *Forfatteren til nærværende notat har med + indtegnet resultater for %HA ud fra "Janssen Pol" fra Figur 19.*

Af de indtegnede +'er fra den svensk-hollandske undersøgelse, [29] ses, at resultaterne fra denne ligger tæt op ad resultaterne fra Ontario, hvor 10% stærkt generet omtrent svarer til et støjniveau på 39 dB(A) ved 8 m/s. Hvis kurven for Prince Edward Island ekstrapoleres med samme trend, vil niveauet for 10% stærkt generet ligge ca. 5 dB højere, dvs. omkring 44 dB(A)

Artiklen nævner selv den store forskel på resultaterne fra Ontario (ON) og Prince Edward Island (PEI), men bemærker, at det ikke har været opgaven at forklare denne forskel.

En anden figur fra [24] viser baggrundsstøjens indflydelse på genen, se Figur 23. Det fremgår, at generne fra vindmøllestøjen aftager signifikant i områder, hvor den beregnede natlige A-vægtede baggrundsstøj oversteg vindmøllestøjen med 10 dB eller mere.



Figur 23 *Indflydelsen af de beregnede udendørs baggrundsstøjniveauer om natten på procentdelen stærkt generet (%HA) af vindmøllestøjen. Resultaterne er vist som en funktion af i hvilken grad baggrundslydniveauer oversteg vindmøllestøjen beregnet for vindhastigheder på 8 meter/sekund i 10 meters højde. Der er et tydeligt fald i gener, når forskellen overstiger 10 dB. Bogstaverne angiver grupper af gener som er statistisk ens (P>0,05), Grønne og røde linjer repræsenterer henholdsvis de øvre og nedre 95 % konfidensintervaller. Figur fra [24].*

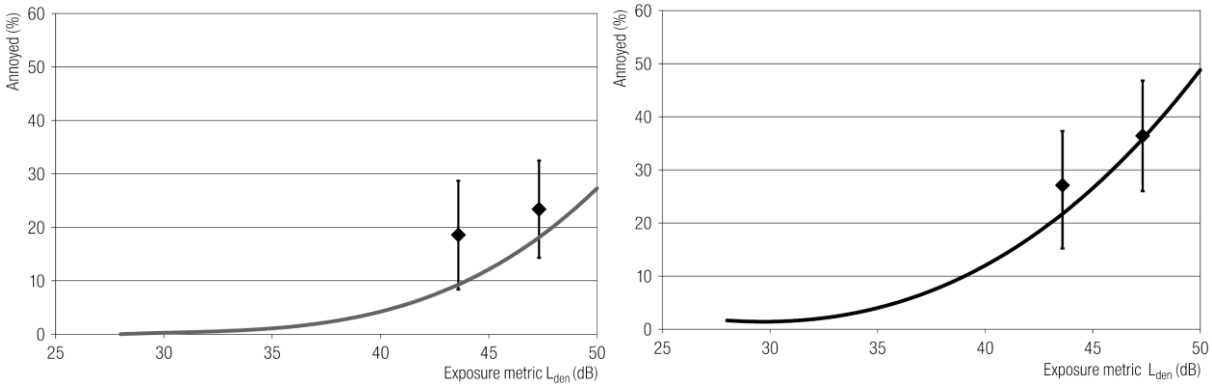
Generelt kan det konkluderes, at støjgenen falder jo mere baggrundsstøjniveauet (L_{Aeq}?) om natten overstiger vindmøllestøjen.

Hvis man vil generalisere dette, skal der tages hensyn til de forbehold, der er nævnt i afsnit 3.3.

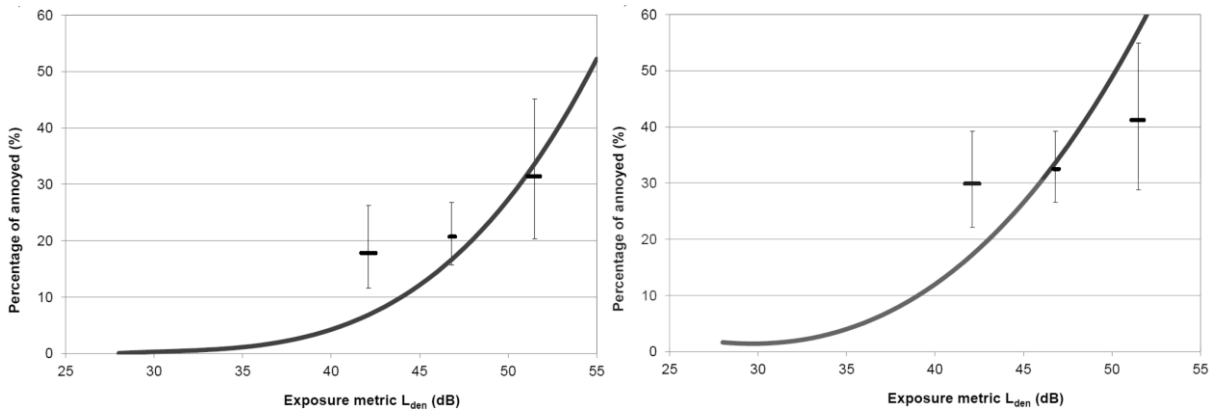
I et Appendiks til [40] har man sammenlignet forskellige studier med CTL metoden, [41], [42]. CTL-metoden (Cummunity Tolerance Level) tilpasser en dosis-responskurve med en fast hældning, så den passer bedst muligt til de forskellige datasæt, uanset om forskellige hældninger kunne give et bedre fit. Denne analyse konkluderer, at ved 50% stærkt generet er forskellen mellem 6 forskellige studier op til 7 dB.

4.2.5 Polsk studie

Et polsk studie [43] (156 respondenter) og [44] (361 respondenter) fra 2014 har også undersøgt sammenhængen mellem støj og gene fra vindmøller. Det nævnes, at sammenlignet med andre europæiske lande, især dem, hvor brugen af vedvarende energikilder er længere fremme, såsom Tyskland, Spanien eller Danmark, er Polen lige i begyndelsen af sit "vindeventyr".



Figur 24 *Venstre: Procentdel af generet (%A) indendørs. Højre: Procentdel af generet (%A) udendørs. Romber viser resultater med 95 % konfidensintervaller for L_{den} af vindmøllestøjen i den polske undersøgelse* [43] *(n=156) af respondenter, der generes af vindmøllestøj. Den optrukne kurve viser resultater af generet (%A) fra den svensk-hollandske undersøgelse* [29]*. Figurer fra* [43]*.*



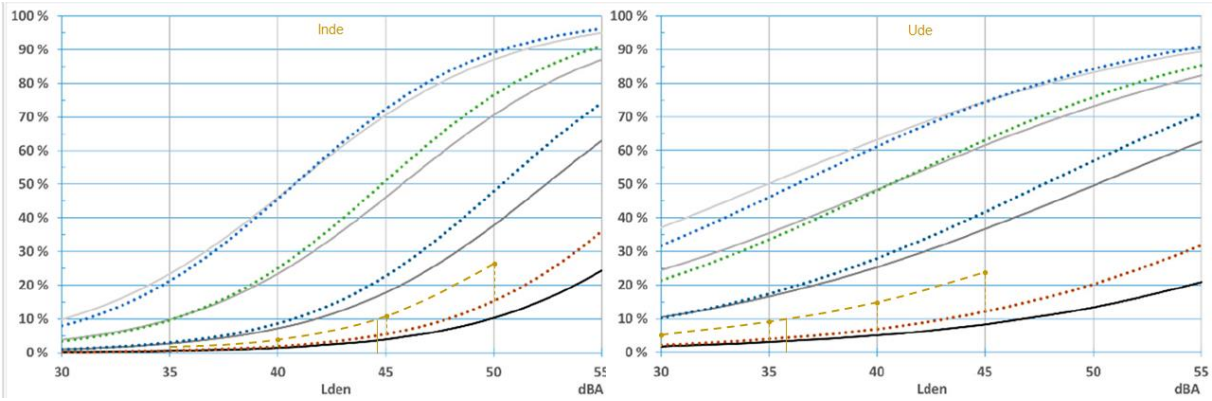
Figur 25 *Venstre: Procentdel af generet (%A) indendørs. Højre: Procentdel af generet (%A) udendørs. Linjestykker viser resultater med 95 % konfidensintervaller for L_{den} af vindmøllestøjen i den polske undersøgelse* [44] *(n=361) af respondenter, der generes af vindmøllestøj. Den optrukne kurve viser resultater af generet (%A) fra den svensk-hollandske undersøgelse* [29]*. Figurer fra* [44]*.*

Det ses af Figur 24 og Figur 25, at der er afvigelse i procentdelen af generet (%A) fra den svensk-hollandske undersøgelse [29], men bortset fra den udendørs gene på Figur 25 er afvigelserne ikke større end konfidensintervallerne.

Da genen kun er opgjort som % generet (%A), kan undersøgelsen ikke umiddelbart sammenlignes med de øvrige undersøgelser, der angiver genen som % stærkt generet (%HA).

4.2.6 Norsk studie

Der er rapporteret om en norsk undersøgelse med 90 respondenter [45] i 2016. Den drejede sig om en lille fokuseret socio-akustisk efterundersøgelse omkring en vindmøllepark med 31 møller på hver 2,3 MW. Resultaterne er vist på Figur 26, som indikerer stærkere reaktioner på vindmøllestøjen end fundet internationalt [29], med det forbehold, at stikprøvestørrelsen er lille (n = 90).



Figur 26 *Dosis-responskurver for gener indendørs (venstre panel) og lige udenfor boligen (højre panel). Kurverne viser parvis resultatet før (stiplede linjer) og efter korrektion for støjfølsomhed. n = 87. Figur fra [43 (der er dog byttet om på ventre og højre figur for at svare til de øvrige figurer i dette afsnit). De fire kurvesæt på hver graf svarer nedefra til ekstremt, kraftigt, moderat og lidt generet. Indtegnet i nærværende notat, er en gul punkteret kurve svarende til procent stærkt generet (%HA) med et cut off punkt på 72%, se afsnit 2.5.*

De gule kurver for procent stærkt generet er tegnet 40% højere end forskellen mellem kraftigt og ekstremt generet svarende til angivelsen for omregning af cut-off punkter i afsnit 2.5. Dette er under antagelse af at de to svargrupper er nogenlunde lige store.

X-aksen på Figur 26 er udtrykt i L_{den} ved addition af 6,4 dB til L_{Aeq} (antageligt ved 8 m/s) og der skal derfor fratrækkes 6,4 dB for at få de A-vægtede niveauer. Herved bliver resultaterne for 10% stækt generet indendørs et udendørs niveau på 38 dB(A), og for 10% stærkt generet udendørs et niveau på 30 dB(A). Det er 5-9 dB lavere end fundet ved den svensk-hollandske undersøgelse [29].

Møllerne var anbragt på fjeldtoppe medens de fleste huse lå nede, hvor den maskerende virkning af vindstøj i vegetation nok er mindre end på fladt land. Resultatet skal også ses i lyset af, at svarene er farvet af en eksisterende lokal konflikt om møllerne. Desuden brugte kun 39 % af respondenterne deres bolig hele året. Omkring 60 % angav, at ejendommene kun er brugt en del af året. Beboerne kan have højere forventninger til lydmiljøet, når de holder ferie eller benytter boligen til rekreative formål. Endelig bemærkes, at omkring 60 procent af dem, der deltog i undersøgelsen, var af den opfattelse, at vindmøller forringer landskabet æstetisk, og de var langt fra overbeviste om, at vindmøller er ønskelige som en vedvarende energikilde (vandkraft er en vigtig alternativ kilde til vedvarende energi i Norge). Holdningen spiller en vigtig rolle ud over det visuelle indtryk, for accepten af vindmøller og de deraf følgende støjgener.

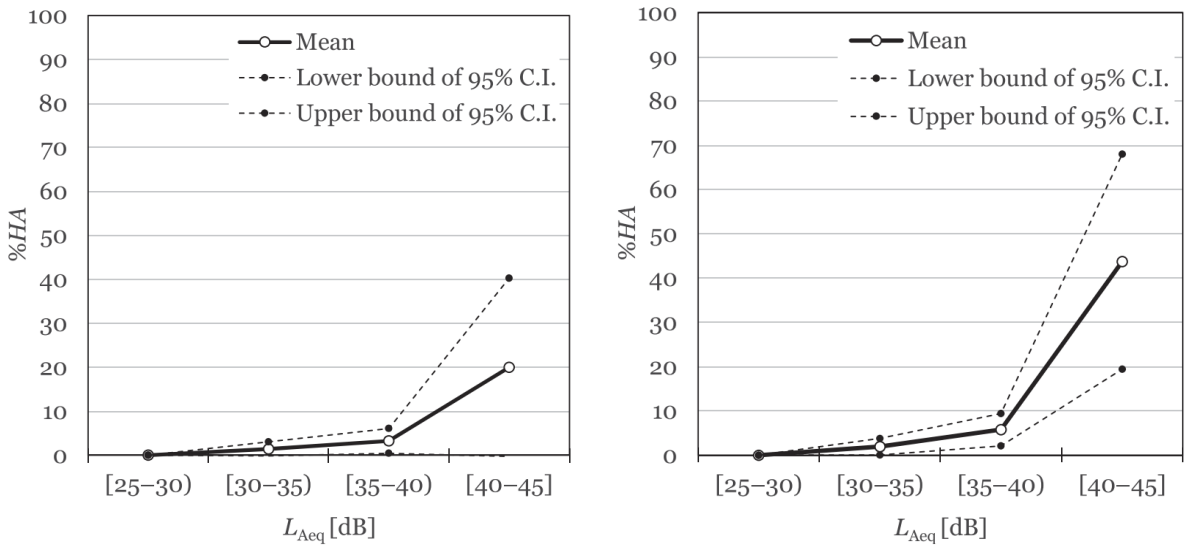
Resultaterne viser, at støjgener afhænger stærkt af ikke-akustiske faktorer. Visuelle og æstetiske faktorer spiller en stor rolle sammen med holdninger til vindmølleparker, som en vedvarende energikilde. I betragtning af det begrænsede antal respondenter er det ikke muligt at adskille disse faktorer, men de moderate sammenhænge indikerer, at modstanden mod vindmølleparken skyldes flere individuelt medvirkende faktorer.

Undersøgelsen konkluderer, at for at sammenligne resultater fra forskellige undersøgelser af vindmøllestøj, synes det nødvendigt at vurdere virkningen af modificerende faktorer.

4.2.7 Finsk studie

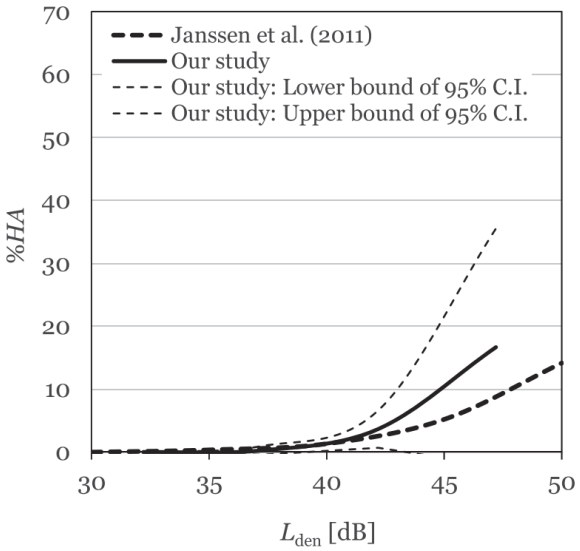
Et finsk studie [46] fra 2017 beskæftiger sig med indendørs støj fra 3-5 MW møller. Begrundelsen for studiet er, at dels er møllerne blevet større end tidligere, og dels mangler der et studie for finske forhold. Studiet

refererer i øvrigt til flere af de studier, der er omtalt tidligere i dette kapitel. Studiet har koncentreret sig om at sætte det udendørs støjniveau i relation til de indendørs støjgener og omfatter 429 respondenter.



Figur 27 *Dosis-responskurve for støjgener indendørs (venstre) og udendørs (højre) med 95% konfidens-intervaller (N=398) i fire niveauklasser. L_{Aeq} det beregnede niveau for vindmøllestøjen ved 8 m/s udendørs. %HA er procentdelen af stærkt generet. Figur fra* [46]*.*

Figur 27 viser procentdelen af stærkt generet indendørs og udendørs i 5 dB klasser af det A-vægtede lyd-trykniveau. Hvis man aflæser interpolationslinerne ved 10% stærkt generet fås et udendørsniveau på 39 dB(A) for indendørsgenen og et niveau på 38 dB(A) for udendørsgenen.



Figur 28 *Dosis-responskurver fra det finske studie (Our study)* [46] *omregnet til L_{den} ved addition af 4,7 dB og sammenlignet med det svensk-hollandske studie* [29]*, se venstre figur på Figur 18. %HA er procentdelen af stærkt generet indendørs. Figur fra* [46]*.*

I relation til Figur 28 bemærker forfatterne til studiet, at deres dosis-responskurve ligger højere end den tidligere kurve [29] for niveauer over L_{den} = 42 dB. Når konfidensintervallet tages i betragtning, kan det dog ikke siges, at der er uenighed mellem de to dosis-responskurver.

Forfatterne er inde på, at en artikel fra Aalborg Universitet [47] fra 2011) viste, at store vindmøller (>2,3MW) udsender markant mere lavfrekvent støj end små vindmøller (0,075–2MW), hvilket kan øge generne indendørs, da lavfrekvent støj lettere kan trænge igennem facadekonstruktionerne end mere højfrekvent støj. Forfatterne nævner, at deres undersøgelse ikke tyder på, at eksponering for store møller fører til større gener indendørs end eksponering for mindre møller. Undersøgelsen lider af et lille antal respondenter over L_{Aeq} = 40 dB, så stærke konklusioner vedrørende forskellen i indendørs gene på store (3-5MW) og små vindmøller (<1,5MW) kan ikke drages. Det skal bemærkes, at ifølge reference [47] er den gennemsnitlige forskel på emissionsspektrene for store og små møller kun 2-4 dB i området 63-125 Hz, og at så små forskelle normalt ikke giver signifikante ændringer i gene, selv ikke i omhyggeligt designede laboratorieforsøg.

I EFP 06 projektet [48] fra 2008, som omfattede møller op til 3,6 MW, konkluderes det, at "frekvensspektrene for den aerodynamiske støj fra rotorvingerne på de største vindmøller ikke afviger væsentligt fra spektrene for mindre vindmøller. Det betyder, at for den aerodynamiske støj er lavfrekvensområdet ikke mere fremtrædende for store møller end for små møller". "For de undersøgte store prototypemøller er det observeret, at den relative mængde lavfrekvent støj er lidt højere end for mindre vindmøller. Dette skyldes hovedsageligt geartoner ved frekvenser under 200 Hz. Der ses en stigning på 2 – 3 dB for støjen i dette frekvensområde for de store møller. Det forventes, at når den nødvendige reduktion af tonerne er foretaget for de store møller, vil denne stigning være mindre end 1 dB".

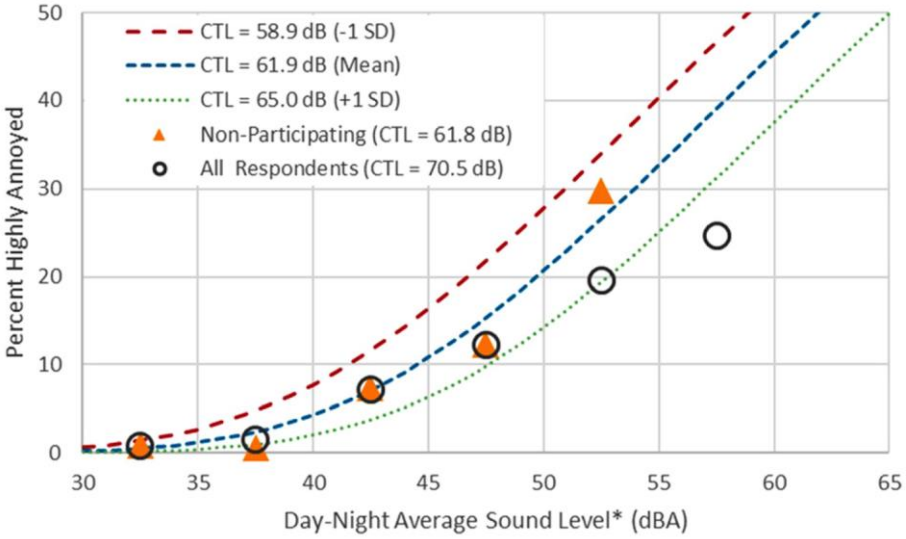
Uanset om den udsendte støj fra store møller er mere lavfrekvent end fra mindre møller, vil større afstand til møllerne betyde at de lave frekvenser bliver relativt mere fremtrædende på grund af luftabsorptionen og samtidig er lydisolationen ringere ved de lavere frekvenser [23]. Det betyder, at når man sammenligner den indendørs støjgene med det udendørs niveau, vil det se ud som om en mere lavfrekvent støj er mere generende. Det er dog ikke givet, at en dosis-responskurve direkte mellem den indendørs gene og det lavfrekvente niveau $L_{pA,LF}$ vil ændre sig. Uanset om dette skulle være tilfældet, er det jo betryggende, at vi i Danmark har en støjgrænse for den indendørs lavfrekvente støj, $L_{pA,LF}$.

4.2.8 Amerikansk studie

Der er udført et studie [49] fra 2019 med 1043 respondenter. Man har brugt en svarskala for gene, der afveg fra ISO/TS 15666 [6], men forfatterne har grupperet svarene sådan, at de skulle være sammenlignelige med tidligere undersøgelser.

Støjbelastningen er angivet som beregnede L_{dn}-niveauer under gunstige lydudbredelsesforhold, men den tager ikke højde for forhold, hvor atmosfærisk stabilitet og vindretning er mindre gunstige for lydudbredelsen. Som et resultat heraf skal resultaterne anført som DNL* ses som den øvre grænse for det faktiske langsigtede L_{dn}-niveau.

Respondenterne er opdelt i "deltagende i projekter" og "ikke deltagende i projekter". Projektdeltagerne kompenseres på en eller anden måde for projektet, f.eks. lejebetalinger for møller på ejendommen eller anden økonomisk kompensation.



Figur 29 *Procent stærkt generet for hver 5 dB DNL* niveaukategori for personer, der bor i nærheden af vindmøller. Punkter for ikke-deltagende respondenter udelukker respondenter, der var kompenseret økonomisk eller havde vindmøller opstillet på deres ejendom. CTL-kurver, som angivet i den canadiske undersøgelse* [40]*, er indsat med punkterede linjer. Figur fra* [49]*.*

Efter oplysninger i artiklen kan det langsigtede L_{Aeq} findes som DNL* –7 dB, dvs. at støjniveauet for 10% stærkt generet ligger omkring L_{Aeq} = 38 dB.

Lydtrykniveauerne var ikke den dominerende faktor i gene-modellen. De stærkeste korrelationer med støjgener var den selvrapporteret støjfølsomhed og det visuelle indtryk.

Hørbarheden var stærkt afhængigt af møllernes støjniveau. Til forskel fra hørbarheden viste det sig, at støjgenerne bedst blev forklaret ved visuel utilfredshed.

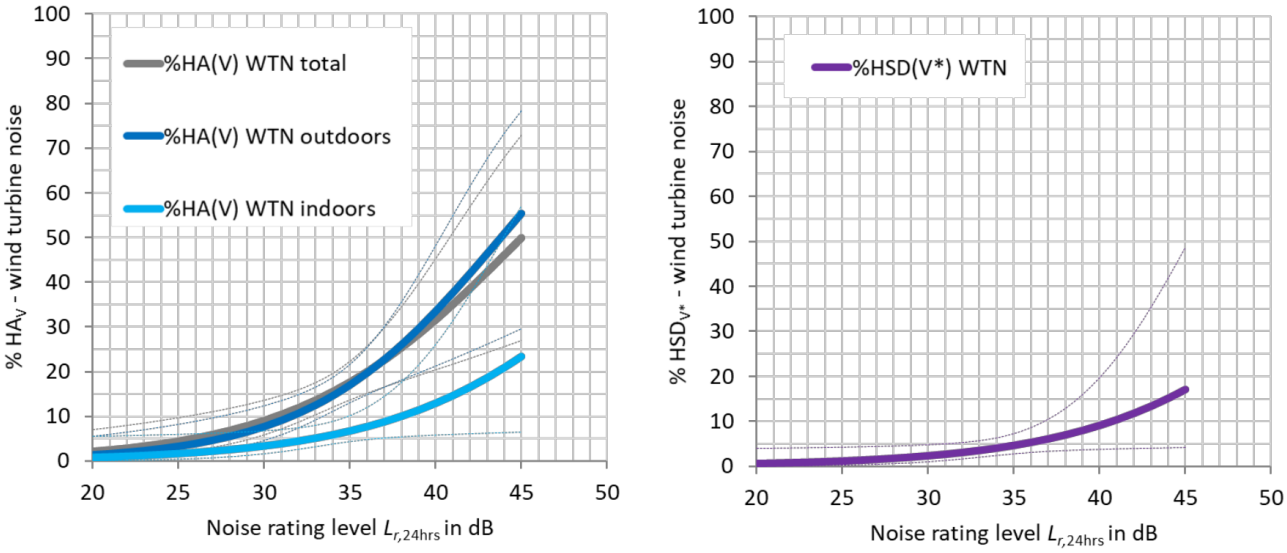
4.2.9 Tysk studie

I et tysk studie fra 2022 [50] med 463 respondenter, på fem forskellige lokationer med landbaserede møller i afstande op til 5 km, gav et resultat, som vist på Figur 30.

"Rating level" L_r for vindmøller i Tyskland er fastsat som følger [51]:

1. Den maksimale støj fastlægges efter IEC 61400-11 [52]
2. Der gives et 3 eller 6 dB tillæg, hvis der er toner eller impulser
3. Der gives et 3 dB tillæg, for eksisterende gamle møller, hvis man kun kender støjen ved 8 m/s

$L_{r,24\ timer}$ betyder i [50], at der er brugt samme resultater for dag og nat, men det er ikke klart ud fra artiklen præcis hvordan $L_{r,24\ timer}$ er fastlagt. For moderne pitch-regulerede møller forekommer den maksimale støj ved en vindhastighed på omkring 8 m/s, men om der er indregnet de i punkt 2 og 3 nævnte tillæg vides ikke. Vi forudsætter i det følgende at $L_{r,24\ timer}$ nogenlunde svarer til L_{Aeq} ved 8 m/s



Figur 30 *Procentdel stærkt generet (%HA(V), venstre) og stærkt søvnforstyrret (%HSD(V)*, højre) på grund af vindmøllestøj i forhold til støjniveauet $L_{r,24\ timer}$. Figur fra* [50].

Det ses af figuren at 10% stærkt generet (total) svarer til et niveau på omkring $L_{r,24h}$ = 31 dB, hvilket er væsentligt lavere end de 39-44 dB(A) som de tidligere nævnte studier har fundet.

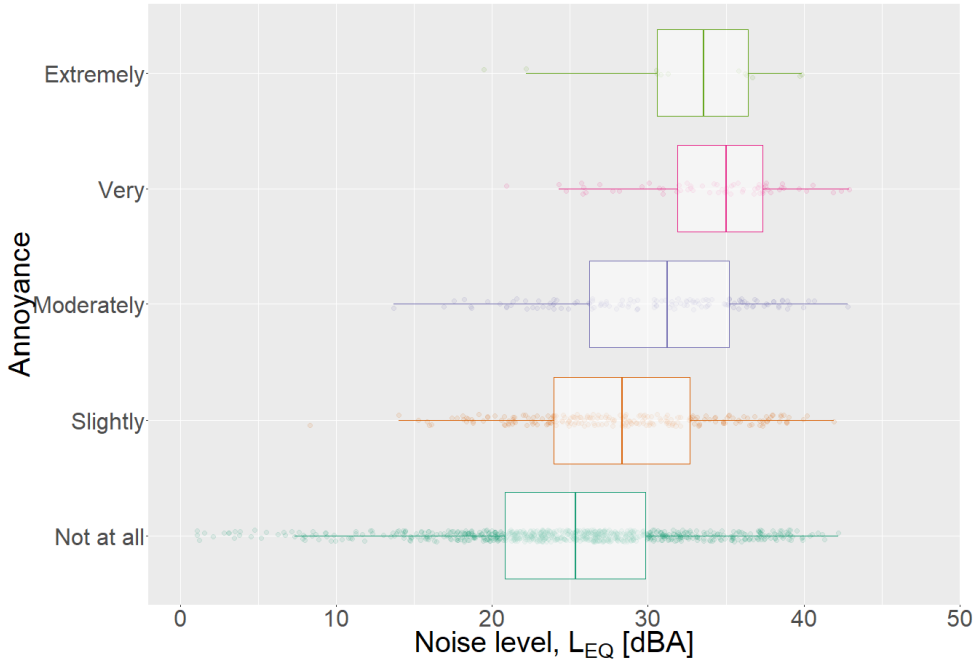
Den indendørs støjgene når 10% stærkt generet ved et udendørs niveau på $L_{r,24h}$ = 38 dB. Resultatet ligger ca. 5 dB lavere end resultatet for indendørs gene på 43 dB(A) (L_{den} – 4,7 dB) på Figur 18.

I WHO-rapporten [28] fastsættes den risiko, som bør tages i betragtning ved fastsættelse af grænseværdier, som 3% stærkt søvnforstyrrede. Det ses af den højre del af Figur 30, at 3 % stærkt søvnforstyrrede svarer til et udendørs niveau i omegnen af $L_{r,24h}$ = 33 dB, hvilket er meget lavt. Hvis man regner med en niveauforskel på 25-26 dB inde og ude, som anført i afsnit 4.2.3, bliver det indendørs niveau omkring 8 dB(A) for 3% stærkt søvnforstyrret.

4.2.10 Dansk studie

I forbindelse med DecoWind projektet blev der udført en socio-akustisk undersøgelse med 68 deltagere fordelt på 14 steder i Danmark, [53] i 2021. Alle deltagere boede inden for en radius af 2 km fra en eller flere >2MW vindmøller og rapporterede deres daglige vindmøllestøjgener i fem sammenhængende uger, både hvad angår aktuel gene og gener inden for de sidste 24 timer. Resultater fra spørgeskemaerne blev kombineret med Nord2000 støjberegninger baseret på timebaserede simulerede meteorologiske data og produktionsdata fra nabovindmøller pr 10 minutter. Undersøgelsen fokuserede på at etablere viden om, hvordan gener påvirkes af faktorer, der kan påvirke den daglige drift af vindmøller til gavn for både ejere og naboer.

Et resultat af undersøgelsen er vist på Figur 31.



Figur 31 *Boksplot af aktuelle vindmøllegener (på tidspunktet for respons) versus det simulerede kombinerede støjniveau for alle vindmøller ved naboers daglige responspositioner. Hver boks omslutter 25 % til 75 % kvartilen af data. Linjerne markerer minimum- og maksimumværdier, medmindre disse går længere ud end 1,5 x interkvartilområdet. Værdier uden for linjerne kan betragtes som outliers. Figur fra* [53].

Figuren er ikke sammenlignelig med de tidligere viste dosis-responskurver, hovedsagelig fordi den relaterer sig til et aktuelt lydtrykniveau frem for et nominelt lydtrykniveau ved fx 8 m/s.

Undersøgelsen viste, at der var høj (0,75) og signifikant ($p<10^{-11}$) korrelation mellem genen og respondenternes angivelse af om de kunne høre møllerne indendørs.

4.2.11 Hollandsk studie

Der er udført et hollandsk studie [54] i 2022 med 662 personer, som bor inden for 5 km afstand fra vindmøller. Referencen indeholder kun foreløbige resultater og opgørelsen af støjgener er kun angivet som funktion af afstanden til møllerne. Der er ikke fundet yderligere referencer om denne undersøgelse.

4.2.12 Overbliksartikler

I to grundige og omfattende overbliksartikler fra 2018 [55] med 123 referencer og fra 2021 [56] med 97 referencer, gennemgås litteratur vedrørende helbredseffekter, herunder støjgene, i relation til støj fra vindmøller. Der er tale om oversigter over konklusionerne af videnskabelige undersøgelser om sundhedseffekter af støj fra vindmøller, med særlig opmærksomhed på infralyd og lavfrekvent lyd. Alle relevante videnskabelige artikler offentliggjort i perioden 2009-2020 blev indsamlet i de to artikler.

Der refereres til flere artikler, der angiver at amplitudemodulation er mere betydende end det lavfrekvente indhold og det konkluderes i [56], at litteraturen ikke viste, at "lavfrekvent lyd" resulterer i ekstra gene udover den almindelige støj. Disse konklusioner skal ses i lyset af, at baggrunden primært (måske alle) stammer fra undersøgelser af landbaserede møller. Måske er forholdet mellem betydningen af amplitudemodulation og lavfrekvent støj forskelligt fra forholdsvis nære landbaserede møller og store fjerne havvindmølleparker, så måske er dette udsagn ikke uden videre gældende for sidstnævnte. I øvrigt indeholder artiklerne

nogle gode og veldokumenterede sammenligninger af lavfrekvent lyd fra vindmøller og andre kilder, som viser, at den lavfrekvente lyd ikke er mere fremherskende fra vindmøller. Det konkluderes, at der ikke er videnskabelig dokumentation for hypotesen om, at vindmølle-infralyd og lavfrekvent lyd har effekter, som andre kilder til infralyd og lavfrekvent lyd ikke har.

Artiklen [56] konkluderer, at selv om lavfrekvent lyd og infralyd kan have andre effekter end 'normal' lyd, er disse effekter højst usandsynlige ved lydniveauer, der er typiske for vindmøller. Hjerneundersøgelser viser, at lavfrekvent lyd og infralyd behandles i de samme dele af hjernen som 'normal' lyd, og der er ingen beviser for, at sub-hørbar infralyd fra vindmøller fremkalder nogen reaktion.

Akustisk adskiller lavfrekvent lyd og infralyd sig fra lyd ved højere frekvenser. På grund af den lave dæmpning bliver lavfrekvent lyd relativt mere fremtrædende ved større afstande og inde i boliger. Infralyd dæmpes endnu mindre, men infralyd fra vindmøller er for svag til, at den kan opfattes i nærheden af beboelser.

Det konkluderes, at lavfrekvent lyd er en del af den samlede lyd fra vindmøller og har de samme effekter, som lyd i det normale område.

Der er rigtig meget information i disse to artikler og deres referencer, som fortjener en nærmere gennemgang.

4.3 Sammenfatning af dosis-responskurver

Der er ikke fundet dosis-responskurver for den indendørs lavfrekvente støj fra vindmøller. Selv om det danske mål for lavfrekvent støj $L_{pA,LF}$ er refereret i flere artikler, har hverken det eller det indendørs niveau direkte været genstand for dosis-responsundersøgelser for vindmøller. Da responsen afhænger af støjkildens art, kan man ikke uden videre antage, at dosis-responskurver for lavfrekvent støj fra andre kilder, hvis de findes, er relevante for vindmøller.

Da vindmøllestøjen, inklusiv den lavfrekvente del indendørs, domineres af frekvenser i det normale område (se afsnit 2.1) har dosis-responskurver for den almindelige støj også relevans for den lavfrekvente del af støjen, især fordi der også er angivet resultater for den indendørs støjgene.

Et overblik over de fundne resultater ses i Tabel 1. Tallene er behæftet med ubestemtheder af grunde som er angivet på side 24.

Den svensk-hollandske undersøgelse [29] har flest respondenter og er meget velbeskrevet, og det er også den, de øvrige undersøgelser sammenligner sig med.

Den canadiske undersøgelse viser, at man med helt samme metodik får meget forskellige resultater i to forskellige provinser. Forskellen kan i dette tilfælde ikke skyldes hverken forskellige geneskalaer eller lydudbredelsesmetoder.

Den norske undersøgelse giver noget lavere resultater for 10% stærkt generet, men påpeger selv forskellige lokale faktorer, der påvirker resultatet i nedadgående retning.

De 38 dB i det amerikanske studie er for de faktiske niveauer og ikke de nominelle niveauer ved 8 m/s. Hvis det antages, at middelvinden i 10 m højde er lavere end 8 m/s vil dette tal skulle være større for at svare til 8 m/s. Det er lidt usikkert hvordan niveauet i den tyske undersøgelse er beregnet, men værdien for lydtrykniveauet for den udendørs gene er meget lavt.

De mest pålidelige resultater er de svensk-hollandske, canadiske og finske resultater for L_{Aeq} på 39, 39, 44 og 39 dB(A) for 10% stærkt generet udendørs. Til sammenligning er den danske støjgrænse i boligområder 39 dB(A) ved en vindhastighed på 8 m/s. Med de ubestemtheder, der tidligere er nævnt, synes den danske støjgrænse rimelig.

Studie	Pub-lic. År	n	Møller, effekt MW	10% HA inde dB(A)	10% HA ude dB(A)	Inde-ude dB
Svensk-hollandsk [29]	2011	1820	0,15-1,5	43	39	4
Polsk [43] og [44]	2014	517	0,1-2	Kun % generet (%A) angivet		-
Health Canada [24] og [39]	2015	1238	0,66-3	-	ON 39 PEI 44	-
Norsk [45]	2016	87	2,3	38	30	8
Finsk [46]	2017	429	3-5	38	39	-1
Amerikansk [49]	2019	1043	>1,5	-	38*	-
Tysk [50]	2022	463	2-3	38	31	7

Tabel 1 *Sammenfatning af resultater fra studierne, som er beskrevet i de foregående afsnit. N er antallet af respondenter, kolonnerne 10% HA angiver de udendørs A-vægtede lydtrykniveauer, der kan aflæses fra dosis-responskurverne for 10% stærkt generet henholdsvis indendørs og udendørs, hovedsagelig med reference til vindhastigheden ved 8 m/s * undtagen det amerikanske studie, hvor værdien referer til de faktiske niveauer i gennemsnit over året*

Ud fra data fra den svensk-hollandske undersøgelse [29] kombineret med relevante gennemsnitlige vindmøllespektre og lydisolationer fra vindmøllebekendtgørelsen [23] er der i afsnit 4.2.3 beregnet en dosis-responskurve for det indendørs lavfrekvente støjniveau. Ud fra disse data ser en støjgrænse indendørs omkring $L_{pA,LF}$ = 20 dB også rimelig ud.

Den finske undersøgelse peger på, at mere lavfrekvente spektre fra de store møller (og større afstande, red.) som en mulig forklaring på de lavere værdier, de finder for lydtrykniveauet for 10% stærkt generet indendørs i forhold til den svensk-hollandske undersøgelse. Det kan skyldes, at lydisolationen generelt er dårligere ved lavere frekvenser. Det betyder, at når man sammenligner den indendørs støjgene med det udendørs niveau, vil det se ud som om en mere lavfrekvent støj er mere generende.

Dette er dog ikke ensbetydende med, at en dosis-responskurve direkte mellem den indendørs gene og det indendørs lavfrekvente niveau $L_{pA,LF}$ som vist på Figur 21, vil ændre sig. Uanset om dette skulle være tilfældet, er det jo betryggende, at vi i Danmark også har en grænse for $L_{pA,LF}$.

Den svensk-hollandske undersøgelse har et udendørs niveau på 43 dB(A) for 10% stærkt generet indendørs. Det lave norske lydtrykniveau for den indendørs gene er begrundet, men det kan alligevel undre, at den norske, finske og tyske undersøgelse ender på et udendørs niveau på 38 dB(A) for 10% stærkt generet indendørs. Hvis de tal for forskellen mellem ude og inde niveauet på 25-26 dB fra Danmark og Canada (se afsnit 4.2.3) er repræsentative, kommer vi frem til indendørs niveauer på omkring 12-13 dB(A). Det er svært at forestille sig, at det i sig selv kan give anledning til 10% stærkt generet.

En forklaring kan være, at respondenterne ikke har skelnet skarpt mellem deres svar for udendørs og indendørs gene, når de har svaret

Overordnet fremgår det, at resultaterne er forskellige fra de forskellige undersøgelser, og at de i stort omfang er påvirket af ikke akustiske faktorer og lokale forhold. Det lader sig selvfølgelig gøre at udføre analyser og sammenstille resultaterne i en fælles gennemsnitlig dosis-responskurve. Det synes dog mere relevant at se på lokale forhold, visuelle forhold, holdninger til vindkraft, mølletyper, opstilling (land/hav) ol., og så i aktuelle tilfælde sammenligne med de undersøgelser, hvor der er størst sammenfald af disse faktorer.

4.4 Moderatorer til dosis-responskurverne

Det har længe været klart, at forskellige støjkilder (vej, bane, fly, vindmøller…) har meget forskellige dosis-responskurver, dvs. at den oplevede gene ved et givet støjniveau afhænger af støjkildens art.

Mange andre såkaldt "ikke akustiske" faktorer eller moderatorer påvirker den oplevede støjgene. Et overblik over de moderatorer og deres effekter, som er i spil for trafikstøj er givet i reference [57]. Mange af disse moderatorer er også i spil for vindmøller, suppleret med visuelle forhold og holdninger til vindkraft m.m. Mange af de gennemgåede artikler og andre referencer angiver, at de ikke akustiske forhold har væsentlig indflydelse på støjgenerne, måske mere end selve støjniveauet.

Generelt har holdningen til støjkilden indflydelse på den oplevede gene, det gælder også for vindmøller og vindkraft, se fx [31], [43] og [55].

Den norske undersøgelse [45] viser, at støjgenerne afhænger stærkt af ikke-akustiske faktorer. Visuelle og æstetiske faktorer spillede en stor rolle sammen med holdninger til vindmølleparker som en vedvarende energikilde. Det anføres også, at en eksisterende lokal konflikt om møllerne kan have påvirket resultaterne.

I det amerikanske studie [49] viste det sig, at selv om hørbarheden var stærkt afhængigt af møllernes støjniveau, blev støjgenerne bedst forklaret ved den visuelle utilfredshed.

Artiklerne [55] og [56] gennemgår de moderatorer, der har væsentlig indflydelse. Det nævnes bl.a., at moderne vindmøller er synlige på betydelig afstand, fordi de rejser sig højt og ændrer landskabet. På grund af deres rotorblades bevægelse er vindmøller mere fremtrædende i landskabet end objekter, der ikke bevæger sig. De visuelle og hørbare aspekter har vist sig at være meget indbyrdes forbundne og virkningen af dem er derfor svære at adskille. Gene fra visuelle aspekter kan øge eller endda forstærke støjgener (og omvendt).

Ifølge reference [56] er der stigende dokumentation for, at støjgenen er mindre, når folk kan deltage i lokaliseringsprocessen for møllerne.

Baggrunden for resultaterne i de refererede undersøgelser er primært (måske alle) undersøgelser af landbaserede møller. Måske er forholdet mellem de forskellige faktorers betydning anderledes for havbaserede møller. Det kan også gælde forholdet mellem betydningen af amplitudemodulation og lavfrekvent støj.

Hvis forholdende mellem støjgener og visuelle gener er forskellige for landbaserede møller og for havvindmøller, kan det have indflydelse på om dosis-responskurverne, som vist i de tidligere afsnit, kan anses for at være repræsentative for havvindmøller. Der er ikke fundet dosis-responskurver for støjgener fra havvindmøller.

Indenfor de sidste år kan man forestille sig, at klimakrisen og holdningen til grøn omstilling har påvirket holdningen til vindkraft i positiv retning, men om det er tilfældet og om det overskygges af NIMBY-effekten (Not In My Backyard), er der ikke fundet undersøgelser over.

5 Sammenfatning

Høretærskler for toner

Ændringerne ved de seneste opdateringer af de standardiserede høretærskler og hørestyrkeniveau-kurver i 2019 [10], og 2023, [7] for toner og smalle støjbånd er så små, at de er uden praktisk relevans for miljøstøj.

I et finsk studie [14] fra 2022 konstateres, at høretærsklen i området 4-8000 Hz ligger lidt højere end tidligere undersøgelser og standarder, men at der set i lyset af spredning og ubestemthed ikke er tale om nogen væsentlig forskel. Der er i hvert fald ikke noget, der tyder på, at tærsklen ligger lavere end fundet i tidligere resultater.

Hvis forskellene i høretærskler fra person til person er meget store, bør det måske tages i betragtning ved fastsættelse af grænseværdier. Data fra DS/ISO 28961:2012, [13] og det finske studie, [14] viser, at spredningen på høretærsklen for forskellige personer ikke er væsentlig anderledes i det lavfrekvente område end i resten af frekvensområdet. Den ligger omkring 5 dB, og stemmer overens med tidligere undersøgelser.

Af reference [10] fra 2019 fremgår, at der i det lavfrekvente område ikke er forskel på den standardiserede høretærskel mellem frit felt og diffust felt, dvs. at høretærsklen er den samme uanset om det er et udendørs eller indendørs lydfelt.

Hørestyrkeniveau-kurver

I det nye studie, [14] fra 2022 bekræftes de standardiserede hørestyrkeniveau-kurver i ISO 226:2003, [8] nogenlunde for frekvenser over 40 Hz. Under 40 Hz ligger de nye resultater systematisk højere end de tidligere resultater. I følge det nye studie er hørestyrkeniveauet altså ikke højere end tidligere antaget for et givet lydtrykniveau. Der skal flere studier til at afgøre, om kurverne reelt ligger højere end tidligere foreslået.

Maskering

I EFP 06 projektet [12] fra 2008 sammenstilles viden om forskellige situationer, som kan forekomme i forbindelse med vindmøller. Det konkluderes, at hvis støjen fra vindmøllen skal anses for at være maskeret hele tiden, så skal de maksimale niveauer (med tidsvægtning F) af de kritiske bånd af den A-vægtede vindmøllestøj ligge mere end 2 dB under minimumsniveauerne (udtrykt f.eks. som L95) for de kritiske bånd af den A-vægtede baggrundsstøj.

I forbindelse med et stort studie fra Health Canada, er det i en artikel fra 2015 [24] nævnt, at der var et betydeligt fald i hørbarheden af vindmøller, når baggrundsniveauer oversteg vindmøllestøjen med mindst 5 dB, og at genevirkningen af støjen aftog signifikant i områder, hvor den beregnede natlige A-vægtede baggrundsstøj (tidsvægtning ikke oplyst) oversteg vindmøllestøjen med 10 dB eller mere. Disse værdier kan kun generaliseres i den udstrækning spektrene af vindmøllestøj og baggrundsstøj er de samme som i den canadiske undersøgelse.

De to måder at anskue maskeringen på kan ikke umiddelbar sammenlignes, så den nye viden er snarere et supplement end en ændring.

Genevirkning målt i laboratorie

Genevirkningen af lavfrekvente toner er målt i laboratorieforsøg tilbage i 1980'erne og igen i et nyt finsk studie, [14] fra 2022. Det nye studie giver resultater, der kunne tyde på, at genen af lavfrekvente toner målt under laboratorieforhold, er mindre end tidligere antaget. Men der er forhold, som bør undersøges nærmere, før der kan drages en konklusion om dette.

Dosis-responskurver

Der er ikke fundet dosis-responskurver for den indendørs lavfrekvente støj fra vindmøller. Da responsen afhænger af støjkildens art, kan man ikke uden videre antage at dosis-responskurver for lavfrekvent støj fra

andre kilder, hvis de findes, er relevante for vindmøller. Da vindmøllestøjen, inklusiv den lavfrekvente del indendørs, domineres af frekvenser i det normale område, har dosis-responskurver for den almindelige støj også relevans for den lavfrekvente del af støjen.

Der findes en svensk-hollandsk undersøgelse [29] fra 2011, som har det største antal respondenter og er meget velbeskrevet. Både WHO's rapport fra 2018 [28] og de øvrige undersøgelser sammenligner sig med den.

De tilsyneladende mest pålidelige resultater fra de fundne undersøgelser er de svensk-hollandske, canadiske og finske resultater for L_{Aeq} ved 8 m/s på 39, 39, 44 og 39 dB(A) for 10% stærkt generet udendørs. Til sammenligning er den danske udendørs støjgrænse i boligområder 39 dB(A) ved en vindhastighed på 8 m/s. Med de ubestemtheder, der tidligere er nævnt, synes den danske støjgrænse i overensstemmelse hermed.

I øvrigt viste den canadiske undersøgelse, at man med helt samme metodik, får 5 dB forskel for 10% stærkt generet i resultaterne i to forskellige provinser.

Ud fra data fra den svensk-hollandske undersøgelse [29], kombineret med relevante gennemsnitlige vindmøllespektre og lydisolationer fra vindmøllebekendtgørelsen [23], er der beregnet en dosis-responskurve for det indendørs lavfrekvente støjniveau. Ud fra disse data ser en støjgrænse indendørs omkring $L_{pA,LF}$ = 20 dB også rimelig ud.

Den svensk-hollandske undersøgelse har et udendørs niveau på 43 dB(A) for 10% stærkt generet indendørs. De norske, finske og tyske undersøgelse ender på et udendørs niveau på 38 dB(A) for 10% stærkt generet indendørs, hvilket svarer til indendørs niveauer på omkring 12-13 dB(A). Det er svært at forestille sig, at det i sig selv kan give anledning til 10% stærkt generet.

En forklaring kan være, at respondenterne ikke har skelnet skarpt mellem deres svar for udendørs og indendørs gene, når de har svaret

Overordnet fremgår det, at resultaterne er forskellige fra de forskellige undersøgelser, og at de i stort omfang er påvirket af ikke akustiske faktorer og lokale forhold. Det lader sig selvfølgelig gøre at udføre analyser og sammenstille resultaterne i en fælles gennemsnitlig dosis-responskurve. Det synes dog mere relevant se på lokale forhold, visuelle forhold, holdninger til vindkraft, mølletyper, opstilling (land/hav) ol., og så i aktuelle tilfælde sammenligne med de undersøgelser, hvor der er størst sammenfald af disse faktorer.

Indflydelse af moderatorer

Mange "ikke akustiske" faktorer eller moderatorer påvirker den oplevede støjgene. Holdningen til de lokale støjkilder og til vindkraft har indflydelse på den oplevede gene. Indflydelse på landskabet og de visuelle forhold har en stærk indflydelse. Indflydelse på opstillingsprocessen betyder noget, især for folk, der boede der før møllerne blev opstillet.

Baggrunden for resultaterne i de refererede undersøgelser er primært (måske alle) undersøgelser af landbaserede møller. Måske er forholdet mellem de forskellige faktorers betydning anderledes for havbaserede møller. Det kan også gælde forholdet mellem betydningen af amplitudemodulation og lavfrekvent støj.

Hvis forholdene mellem støjgener og visuelle gener er forskellige for landbaserede møller og for havvindmøller, kan det have indflydelse på om de dosis-responssammenhænge, der er fundet, kan anses for at være repræsentative for havvindmøller. Der er ikke fundet dosis-responskurver for støjgener fra havvindmøller.

Man kan også forestille sig at klimakrisen og holdningen til grøn omstilling har påvirket holdningen til vindkraft hvilket også kan påvirke dosis-responssammenhænge.

6 Referencer

[1] K. D. Madsen, T. H. Pedersen, and DELTA (Now FORCE Technology), "EFP-06 project Low Frequency Noise from Large Wind Turbines," 2010.

[2] T. H. Pedersen and D. Hoffmeyer, "Vurdering af genevirkning af indendørs vindmøllestøjspektre," 2017.

[3] A. Jensen, "Oplysninger fra Rambøll," 2024.

[4] Miljøstyrelsen, *Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø. Orientering nr. 9/1997*. 1997.

[5] H. Fastl and E. Zwicker, *Psycho-acoustics, Facts and Models*. 2007.

[6] ISO - International Organization for Standardization), "DS/ISO/TS 15666:2021 Akustik – Vurdering af støjgener ved hjælp af sociologiske og socio-akustiske undersøgelser Acoustics – Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys," *ISO - Int. Organ. Stand.*, 2021.

[7] ISO International Standardisation Organisation, "DS/ISO 226:2023 Acoustics – Normal equal-loudness-level contours. Akustik – Normalkurver for toner med samme hørestyrke.," 2023.

[8] ISO International Standardisation Organisation, *ISO 226:2003 Acoustics Normal equal-loudness-level contours*. 2003.

[9] Y. Suzuki, H. Takeshima, and K. Kurakata, "Revision of ISO 226 'Normal Equal-Loudness-Level Contours' from 2003 to 2023 edition: the background and results," *Acoust. Sci. Technol.*, no. October, 2023.

[10] ISO International Standardisation Organisation, *DS/EN ISO 389-7:2019 Akustik – Nulpunktsreference ved kalibrering af audiometre – Del 7 : Høretærskler i frit felt og diffust felt Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7 : Reference threshold of hearing under free*. 2019.

[11] H. Møller and C. S. Pedersen, "Hearing at low and infrasonic frequencies," *Noise Heal.*, vol. 6, no. 23, pp. 37–57, 2004.

[12] T. H. Pedersen, "EFP-06 Project- Low Frequency Noise From Large Wind Turbines - A procedure for evaluation of the audibility for low frequency sound and a literature study," 2008.

[13] T. Watanabe and H. Møller, "Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free Field," *J. Low Freq. Noise, Vib. Act. Control*, vol. 9, no. 3, pp. 106–115, 1990.

[14] V. Rajala, J. Hakala, R. Alakoivu, V. Koskela, and V. Hongisto, "Hearing threshold, loudness, and annoyance of infrasonic versus non-infrasonic frequencies," *Appl. Acoust.*, vol. 198, p. 108981, 2022.

[15] J. Hakala, R. Alakoivu, V. Koskela, and V. Hongisto, "Hearing threshold, loudness, and annoyance of infrasonic versus non-infrasonic frequencies. Supplementary material.," *Turku Univ. Appl. Sci.*, pp. 1–6, 2022.

[16] K. Kurakata, T. Mizunami, K. Matsushita, and K. Ashihara, "Statistical distribution of normal hearing thresholds under free-field listening conditions," *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 5, pp. 440–446, 2005.

[17] K. Kurakata, T. Mizunami, and K. Matsushita, "How large is the individual difference in hearing sensitivity?: Establishment of ISO 28961 on the statistical distribution of hearing thresholds of otologically normal young persons," *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 42–47, 2013.

[18] ISO International Standardisation Organisation, *DS/ISO 28961 Akustik – Statistisk fordeling af*

høretærskler for otologisk normale personer i alderen fra 18 år til 25 år i frit felt Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds of otologically normal persons in. 2012.

[19] T. H. Pedersen, S. Von-hunerbein, and S. Legarth, "Methods for assessment of the characteristics of wind turbine noise," in *Wind Turbine Noise 2011*, 2011, no. April, p. 18.

[20] S. v Hünerbein, A. King, J. Hargreaves, A. Moorhouse, C. Plack, and T. H. Pedersen, "Perception of Noise from Large Wind Turbines (EFP-06-project)," *Univ. Salford, Acoust. Res. Cent. UK*, 2011.

[21] ISO International Standardisation Organisation, *DS/ISO 532-1:2017 Akustik – Fremgangsmåde til beregning af hørestyrke – Del 1 : Zwickers metode Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1 : Zwicker method*. 2017.

[22] H. Leventhall, "Low frequency noise and annoyance," *Noise Health*, vol. 6, no. 23, pp. 59–72, 2004.

[23] Miljø- og fødevareministeriet, *Bekendtgørelse om støj fra vindmøller nr. 135 af 07/02/2019*, no. BEK 135. Denmark, 2019.

[24] D. S. (Health C. Michaud, "Wind Turbine Noise and Health Study: Summary of Results," *Sixth Int. Meet. Wind Turbine Noise*, no. April, pp. 1–21, 2015.

[25] J. Andresen and H. Moller, "Equal annoyance contours for infrasonic frequencies," *J. Low Freq. Noise Vib.*, vol. 3, no. 3, pp. 1–9, 1984.

[26] H. Møller, "Annoyance of audible infrasound," 1987.

[27] T. H. Pedersen, "The 'Genlyd?' Noise Annoyance Model Dose-Response Relationships Modelled by Logistic Functions," 2007.

[28] World Health Organization (WHO), *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. 2018, p. 160.

[29] S. a. Janssen, H. Vos, A. R. Eisses, and E. Pedersen, "A comparison between exposure-response relationships for wind turbine annoyance and annoyance due to other noise sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, no. 6, pp. 3746–53, Dec. 2011.

[30] T. Yano, S. Kuwano, T. Kageyama, S. Sueoka, and H. Tachibana, "Dose-response relationships for wind turbine noise in Japan," in *Inter-noise*, 2013, pp. 1–8.

[31] E. Pedersen and K. P. Waye, "Perception and annoyance due to wind turbine noise--a dose-response relationship.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 116, no. 6, pp. 3460–70, 2004.

[32] E. Pedersen *et al.*, "Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments," *Occup. Environ. Med.*, vol. 64, no. 7, pp. 480–486, 2007.

[33] E. Pedersen, F. van den Berg, R. Bakker, and J. Bouma, "Response to noise from modern wind farms in The Netherlands.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 2, pp. 634–43, 2009.

[34] R. Guski, D. Schreckenberg, and R. Schuemer, "Supplementary Materials: WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and annoyance," 2017.

[35] F. Van Den Berg, "Criteria for wind farm noise: Lmax and Lden," in *Proceedings - European Conference on Noise Control*, 2008, pp. 4043–4048.

[36] T. H. Pedersen, "The 'Genlyd' Noise Annoyance Model Dose-Response Relationships Modelled by Logistic Functions," 2007.

[37] T. H. Pedersen, "Genevirkning af støj fra vindmøller. Rapport-150-1994.pdf," 1994.

[38] S. E. Keith *et al.*, "Wind turbine audibility calculations inside dwellings," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 145,

no. 4, pp. 2435–2444, 2019.

[39] D. S. Michaud, "Self-reported and Objectively Measured Outcomes Assessed in the Health Canada Wind Turbine Noise and Health Study : Results Support an Increase in Community Annoyance a," in *Inter-Noise 2015*, 2015, pp. 1–20.

[40] D. S. Michaud *et al.*, "Personal and situational variables associated with wind turbine noise annoyance.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 139, no. 3, p. 1455, 2016.

[41] ISO, *DS/ISO 1996-1:2016 Akustik - Beskrivelse , måling og vurdering af ekstern støj – Del 1 : Grundlæggende størrelser og vurderingsmetoder Acoustics – Description , measurement and assessment assessment procedures*. 2016.

[42] P. Schomer *et al.*, "Role of community tolerance level (CTL) in predicting the prevalence of the annoyance of road and rail noise," vol. 131, no. 4, 2012.

[43] M. Pawlaczyk-Łuszczyńska, A. Dudarewicz, K. Zaborowski, M. Zamojska-Daniszewska, and M. Waszkowska, "Evaluation of annoyance from the wind turbine noise: a pilot study.," *Int. J. Occup. Med. Environ. Health*, vol. 27, no. 3, pp. 364–88, 2014.

[44] M. Pawlaczyk-Łuszczyńska, A. Dudarewicz, K. Zaborowski, M. Zamojska-Daniszewska, and M. Waszkowska, "Annoyance related to wind turbine noise," *Arch. Acoust.*, vol. 39, no. 1, pp. 89–102, 2014.

[45] R. Klæboe and H. B. Sundfør, "Windmill noise annoyance, visual aesthetics, and attitudes towards renewable energy sources," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 8, pp. 1–19, 2016.

[46] V. Hongisto, D. Oliva, and J. Keränen, "Indoor noise annoyance due to 3–5 megawatt wind turbines—An exposure–response relationship," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 142, no. 4, pp. 2185–2196, 2017.

[47] H. Møller and C. S. Pedersen, "Low-frequency noise from large wind turbines.," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, no. July 2010, pp. 3727–3744, 2011.

[48] B. Søndergaard and K. D. Madsen, "EFP-06 project - Low Frequency Noise from Large Wind Turbines - Summary and Conclusions on Measurements and Methods," 2008.

[49] T. R. Haac *et al.*, "Wind turbine audibility and noise annoyance in a national U.S. survey: Individual perception and influencing factors," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 146, no. 2, pp. 1124–1141, 2019.

[50] D. Schreckenberg and S. Grossarth, "Assessment of community responses to noise from German onshore wind turbines," in *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, 2022.

[51] A. Bauerdorff and T. Myck, "Noise Protection Regulations for Wind Turbines in Germany," in *6 th International Conference on Wind Turbine Noise*, 2015, no. April.

[52] IEC, "IEC 61400-11 Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques." 2012.

[53] L. S. Søndergaard, C. P. Volk, T. R. Hansen, L. Enggaard, T. Sørensen, and A. Pena, "Wind farm neighbourship investigated by a daily app questionnaire combining weather, noise, and annoyance," in *9th International Conference on Wind Turbine Noise*, 2021, no. May, pp. 1–15.

[54] A. Bolders, M. Reedijk, H. van Wijnen, and I. van Kamp, "Annoyance and sleep disturbance responses in people living in the vicinity of wind turbines in the Netherlands," in *Internoise 2022 - 51st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2022.

[55] I. van Kamp and F. van den Berg, "Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound," *Acoust. Aust.*, vol. 46, no. 1, pp. 31–57, 2018.

[56] I. van Kamp and F. van den Berg, "Health effects related to wind turbine sound: an update," *Int. J.*

Environ. Res. Public Health, vol. 18, no. 9133, p. 29, 2021.

[57] S. Eggers, C. Popp, T. H. Pedersen, C. P. Volk, H. Bendtsen, and T. Gjestland, "FActors MOderating people's Subjective reactions to noise Project Report," 2022.

[58] "Støjgener fra byveje og motorveje Vejdirektoratet Rapport 551," 2016.

7 Bibliografi

Artiklerne i dette afsnit har relation til emnet, men der er ikke refereret til dem i notatet fordi de ikke primært bidrager med konkret viden i relation til denne undersøgelses to hovedspørgsmål.

1. Alamir, M. A.; Hansen, K. L.; Zajamsek, B. and Catcheside, P.

   "Subjective responses to wind farm noise: A review of laboratory listening test methods." Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 114, no. August, pp. 1–9, 2019.

2. Alves, J. A.; Paiva, F. N.; Silva, L. T. and Remoaldo, P.

   "Low-frequency noise and its main effects on human health-A review of the literature between 2016 and 2019." Appl. Sci., vol. 10, no. 15, 2020.

3. Alves, J. A.; Silva, L. T. and Remoaldo, P.

   "How can low-frequency noise exposure interact with the well-being of a population? Some results from a Portuguese municipality." Appl. Sci., vol. 9, no. 24, 2019.

4. Baliatsas, C.; van Kamp, I. and van Poll, R.

   "Low frequency noise in relation to health effects: a systematic review." EuroNoise 2015 31 May - 3 June, Maastricht, pp. 829–831, 2015.

5. Baliatsas, C.; van Kamp, I.; van Poll, R. and Yzermans, J.

   "Health effects from low-frequency noise and infrasound in the general population: Is it time to listen? A systematic review of observational studies." Sci. Total Environ., vol. 557–558, no. July, pp. 163–169, 2016.

6. Blumendeller, E. *et al.*

   "Quantification of amplitude modulation of wind turbine emissions from acoustic and ground motion recordings." Acta Acust., vol. 7, 2023.

7. Blumendeller, Esther; Cheng, Po Wen

   "Evaluation of acoustic measurements in relation to annoyance reports from residents in the vicinity of a wind farm." WTN 2023

8. Burke, E.; Uppenkamp, S. and Koch, C.

   "A psychoacoustical study to investigate the perceived unpleasantness of infrasound combined with audio-frequency sound." Acta Acust., vol. 4, no. 5, 2020.

9. Burke, Elisa; Hensel, Johannes; Fedtke, Thomas

   "*Hearing threshold measurements of infrasound combined with audio frequency sound."* ICBEN Congress 2017

10. Doolan, C.
    "A Review of Wind Turbine Noise Perception, Annoyance and Low Frequency Emission." Wind Eng., vol. 37, no. 1, pp. 97–104, 2013.

11. Erdélyi, K. H.; Fuermaier, A. B. M.; Tucha, L.; Tucha, O. and Koerts, J.

    "Low-Frequency Noise: Experiences from a Low-Frequency Noise Perceiving Population." Int. J. Environ. Res. Public Health, vol. 20, no. 5, 2023.

12. Erdélyi, Kristina H.; Fuermaier, Anselm B. M.; Tucha, Lara; Tucha, Oliver; Koerts, V

"Low-Frequency Noise: Experiences from a Low Frequency Noise perceiving population." ICBEN Congress 2021

13. Erdélyi, Kristina; Fuermaier, Anselm; Koerts, Janneke; Tucha, Lara; Tucha, Oliver

"Low-frequency noise: Experiences from individuals reporting LFN complaints." ICBEN Congress 2021

14. Friedrich, B.; Joost, H.; Fedtke, T. and Verhey, J. L.

"Effects of infrasound on the perception of a low-frequency sound." Acta Acust., vol. 7, 2023.

15. Gaßner, L.; *et al.*

"Joint analysis of resident complaints, meteorological, acoustic, and ground motion data to establish a robust annoyance evaluation of wind turbine emissions." Renew. Energy, vol. 188, pp. 1072–1093, 2022.

16. Hansen, K. L.; Nguyen, P.; Zajamšek, B.; Catcheside, P. and Hansen, C. H.

"Prevalence of wind farm amplitude modulation at long-range residential locations." J. Sound Vib., vol. 455, pp. 136–149, 2019.

17. Hansen, K. L.; Walker, B.; Zajemsek, B. and Hansen, C. H.
"Perception and annoyance of low frequency noise versus infrasound in the context of wind turbine noise." in 6 th International Conference on Wind Turbine Noise, 2015, no. April.

18. Hongisto, Valtteri

"An experimental study on the perception of infrasound – Do we need the infrasound term at all?" ICBEN Congress 2021

19. Hübner, G.; Pohl, J. and Firestone, J.

"Monitoring Annoyance and Stress Effects of Wind Turbines on Nearby Residents: A Comparison of U.S. and European Samples." Environ. Int., vol. 132, 2019.

20. Johansson, A.; Bolin, K. and Alvarsson, J.

"Annoyance and partial masking of wind turbine noise from ambient sources." Acta Acust. united with Acust., vol. 105, no. 6, pp. 1035–1041, 2019.

21. Jurado, Carlos; Gallegos, Pablo; Gordillo, Darío; C. J. Moore, Brian

"*The detailed shapes of equal-loudness-level contours at low frequencies."* Journal: The Journal of the Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am. 142, 3821–3832 (2017). https://doi.org/10.1121/1.5018428. Published: December 2017

22. Jurado, Carlos; Larrea, Marcelo; Patel, Hiren; Marquardt, Torsten

"*Dependency of threshold and loudness on sound duration at low and infrasonic frequencies."* Journal: The Journal of the Acoustical Society of America. J. Acoust. Soc. Am. 148, 1030–1038 (2020). https://doi.org/10.1121/10.0001760. Published: August 2020

23. Kageyama, Takayuki; Yano, Takashi; Kuwano, Sonoko; Sueoka, Shinichi; Tachibana, Hideki

"Exposure-response relationship of wind turbine noise with subjective symptoms on sleep and health: a nationwide socioacoustic survey in Japan." ICBEN Congress 2014.

24. Kewan, Sonoko; Yano, Takashi; Kageyama, Takayuki; Sueoka, Shinichi; Tachibana, Hideki

"Social survey on wind turbine noise in Japan." Noise Control Engineering Journal, Volume 62, Number 6, 1 November 2014, pp. 503-520(18)

25. Ki, J.; *et al.*

"Local residents' attitudes about wind farms and associated noise annoyance in South Korea." Energy Policy, vol. 163, p. 112847, 2022.

26. Koch, Christian
"Hearing beyond the limit: Measurement, perception and impact of infrasound and ultrasonic noise." ICBEN Congress 2017

27. Lotinga, MJB; Lewis, T; Powlson, J; Berry, B.

"A scoping review of wind turbine noise effects, including the possible causes, contributing factors and potential impacts of amplitude modulation." In: Proceedings of ICBEN 2023;

28. Maijala, P. P.; *et al.*

"Annoyance, perception, and physiological effects of wind turbine infrasound". J. Acoust. Soc. Am., vol. 149, no. 4, pp. 2238–2248, 2021.

29. Marini, Martino; Mastino, Costantino Carlo; Bella, Antonino Di; Masullo, Massimiliano
"Issues on the evaluation of low frequency noise emitted by wind turbines." INTER-NOISE and NOISE-CON, Inter-Noise16, pages 6841-7829, pp. 7058-7065(8)

30. Poulsen, T., Mortensen, F. R.

"Laboratory evaluation of annoyance of low frequency noise." Danish Environmental Protection Agency, working report no. 1, 2002.

31. Radun, J.; Hongisto, V. and Suokas, M.

*"Variables associated with wind turbine noise annoyance and sleep disturbance."*Build. Environ., vol. 150, no. June 2018, pp. 339–348, 2019.

32. Radun, J.; Maula, H.; Saarinen, P.; Keränen, J.; Alakoivu, R. and Hongisto, V.

*"Health effects of wind turbine noise and road traffic noise on people living near wind turbines."*Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 157, no. October 2021, 2022.

33. Radun, Jenni; Hongisto, Valtteri

*"Non-acoustic and acoustic variables associated with wind turbine noise annoyance."*Conference Paper ICA 2019

34. Rajala, V., Hakala, J., Hongisto, V.

"Equal annoyance contours at frequencies 4-1.000 Hz." International Congress on Acoustics, 2019.

35. Schmidt, J. H. and Klokker, M.

*"Health effects related to wind turbine noise exposure: a systematic review."*PLoS One, vol. 9, no. 12, pp. 1–15, Jan. 2014.

36. Schust, M.

"Effects of low frequency noise up to 100 Hz." Noise Health, vol. 6, no. 23, pp. 73–85, 2009.

37. Smith, M.; Ögren, M.; Thorsson, P.; Hussain-alkhateeb, L. and Pedersen, E.

"Wind Turbine Noise Effects on Sleep: The WiTNES study" In ICBEN 2017, 2017, p. 6.

38. Teneler, A. A. and Hassoy, H.

"Health effects of wind turbines: a review of the literature between 2010-2020." *Int. J. Environ. Health Res.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–15, 2023.

39. Van Kamp, I.; Breugelmans, O.; Van Poll, R. and Baliatsas, C.

"Burden of disease from exposure to low frequency noise: a Dutch inventory." In *ICBEN 2017*.

40. Van Kamp, I.; Breugelmans, O.; Van Poll, R.; Baliatsas, C. and Van Kempen, E.

"Determinants of annoyance from humming sound as indicator of low frequency noise." Proc. Acoust. 2017 Perth Sound, Sci. Soc. - 2017 Annu. Conf. Aust. Acoust. Soc. AAS 2017, vol. 2012, no. 1, pp. 1–7, 2017.

41. Virjonen, P.; Hongisto, V. and Radun, J.

"Annoyance penalty of periodically amplitude-modulated wide-band sound." J. Acoust. Soc. Am., vol. 146, no. 6, pp. 4159–4170, 2019.

42. Vos, J.; Houben, M. M. J.; van der Ploeg, F. and Buikema, E.

"Annoyance caused by low frequency sounds: Spectral and temporal effects." Internoise 2010 - Noise Sustain. Lisbon, Port. 15-16 June 2010. Vol. 9, 7284-7291, pp. 1–8, 2010.

43. Wszołek, Tadeusz; Pawlik, Paweł; Małecki, Paweł; Kłaczyński, Maciej; Mleczko, Dominik; Czapla, Marcjanna; Stępień, Bartłomiej

"Experimental studies of the impact of amplitude modulation (AM) and tonality on the annoyance of wind turbine noise in the low frequency (LF) range." INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, Inter-Noise 23, Chiba, Japan, pages 5996-6993, pp. 6132-6139(8)

44. Yonemura, M.; Lee, H. and Sakamoto, S.

"Measurement of masked threshold of low-frequency tones in outdoor and indoor environmental background noise." In INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, 2019, pp. 2–8.

45. Zajamsek, Branko; Hansen, Kristy; Lechat, Bastien; Liebich, Tessa; Dunbar, Claire; Micic, Gorica; Catcheside, Peter

"Annoyance due to amplitude modulated low-frequency wind farm noise: A laboratory study." The Journal of the Acoustical Society of America, J. Acoust. Soc. Am. 152, 3410–3421 (2022) https://doi.org/10.1121/10.0016499. Published: December 2022

Bilag 1 Hørbarhed af bredbåndsstøj

A "reasonable" procedure for predicting the audibility of broad band sounds near the hearing threshold for frequencies below 500 Hz, [12] og [19].

7.1 HT-weighting

1. The lines/bands in the frequency spectrum are weighted (attenuated) according to the inverse hearing threshold; this is called HT-weighting. The attenuation in dB is given by equations 1-3 that approximates the hearing threshold.

2-20 Hz

$$\mathrm{Att}_{2\text{-}20\mathrm{Hz}} = -1{,}0183 \cdot 10^{-2} \cdot f^{3} + 3{,}8537 \cdot 10^{-1} \cdot f^{2} - 6{,}3935 \cdot f + 133{,}48$$

Equation 1

The attenuation in dB in the range dB, 20-200 Hz is given by

20-200 Hz

$$\mathrm{Att}_{20\text{-}200\,\mathrm{Hz}} = 1{,}5948 \cdot 10^{-11} \cdot f^{6} - 1{,}3537 \cdot 10^{-8} \cdot f^{5} + 4{,}5945 \cdot 10^{-6} \cdot f^{4} - 8{,}0269 \cdot 10^{-4} \cdot f^{3} + 7{,}7761 \cdot 10^{-2} \cdot f^{2} - 4{,}2624 \cdot f + 137{,}99$$

Equation 2

The attenuation in dB in the range dB, 200-500 Hz is given by

200-500 Hz

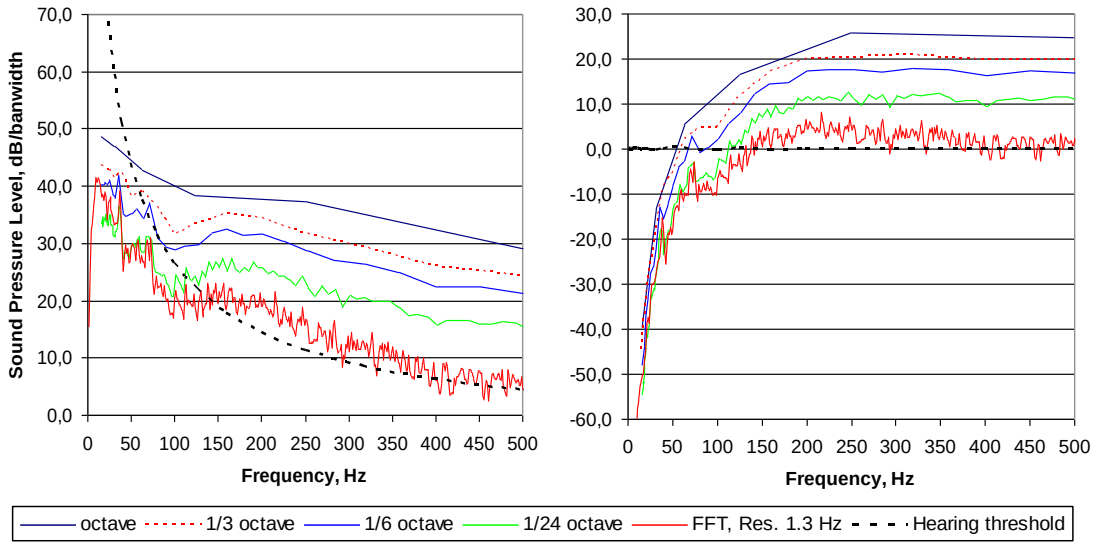
$$\mathrm{Att}_{200\text{-}500\mathrm{Hz}} = -1{,}3635 \cdot 10^{-7} \cdot f^{3} + 2{,}2850 \cdot 10^{-4} \cdot f^{2} - 1{,}399 \cdot 10^{-1} \cdot f + 34{,}306$$

Equation 3

The deviation of these approximations from the hearing threshold shown in Figur 4 is less than 0.4 dB. The attenuation for several frequencies is shown in Tabel 2.

Freq. Hz	Att. dB	Freq. Hz	Att. dB	Freq. Hz	Att. dB
1,6	124,3	20,0	78,2	200	14,4
1,8	123,3	22,4	73,6	224	12,9
2,0	122,2	25,1	69,0	251	11,4
2,2	121,0	28,2	64,3	282	10,0
2,5	119,7	31,6	59,8	316	8,6
2,8	118,3	35,5	55,3	355	7,3
3,2	116,8	39,8	51,1	398	6,2
3,5	115,2	44,7	47,2	447	5,2
4,0	113,5	50,1	43,6	501	4,4
4,5	111,7	56,2	40,3		
5,0	109,8	63,1	37,3		
5,6	107,9	70,8	34,5		
6,3	105,9	79,4	31,9		
7,1	103,9	89,1	29,3		
7,9	101,9	100,0	26,7		
8,9	99,9	112,2	24,1		
10,0	97,9	125,9	21,7		
11,2	95,9	141,3	19,7		
12,6	93,7	158,5	18,1		
14,1	91,4	177,8	16,7		
15,8	88,4				
17,8	84,4				

Tabel 2 *Attenuations for the hearing threshold weighting (HT-weighting) according to formulas 1-3.*



Figur 32 *Same wind turbine noise spectra as shown in Figur 12 with linear abscissa axis. The right figure shows the HT-weighted spectra.*

From the Figur 32 it is still not possible to compare the hearing thresholds with the spectra, but from the right part it is possible to get an impression of which parts of the spectra that contributes most to the audibility of the noise.

7.2 Energy addition of combined analysis bands

Critical band	0-100 Hz	100-200 Hz	200-300 Hz	300-400 Hz	400-500 Hz
Octaves	0-63	125	250	250	500
1/3 octaves	0-80	100-160	200-250	315-400	500
1/6 octaves	0-90	100-180	200-285	320-400	450-506
1/24 octaves	0-98	101-196	201-293	301-390	402-492
FFT analysis	0-99	100-199	200-299	300-399	400-499

Tabel 3 *Centre frequencies in Hz for bands to be energy added from the HT weighted spectra to get the total HT-weighted level per critical band. Only analyses with a resolution of 1/3 octaves or better should be used. This "definite" definition of the placement of the critical bands are for "pragmatic" reasons only. The critical bands of the hearing are not centred at any specific frequencies but can be placed at any frequency.*

From the spectra in the right part of Figur 32 it is possible to calculate the total HT weighted level per critical band. For this purpose, the energy in a number of bands as shown in Tabel 3 have to be added.

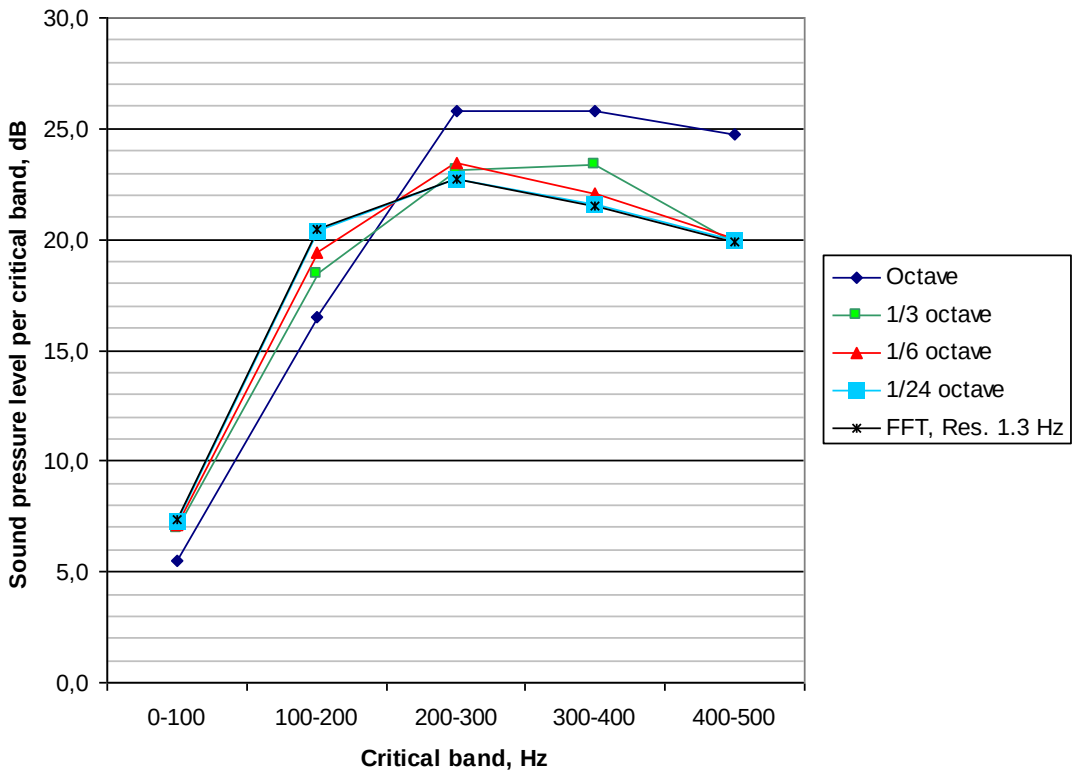
The energy addition is made according to the following formula:

$$L_{crit.band} = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_{HT,i}}{10}}\right)$$ *Equation 4*

Where $L_{HT,i}$ is the HT-weighted level of the i'th frequency band.

It will be seen that the lowest critical band includes both a low frequency and an infrasonic region. As mentioned in section 2 this subdivision is only conventional and there are no physical, physiological, or psychological reasons to maintain it in the above-mentioned calculations.

A procedure that calculates the critical band level as a continuous function of frequency would be more in line with the fact that the critical band may be centred at any frequency, but the above-mentioned procedure may be seen as a first attempt to get an overview of the matter.



Figur 33 *The critical band levels computed from HT weighted frequency analyses of the noise from the wind turbine shown in Figur 12 and Figur 32. The different curves are the result of calculations based on analyses with different analysis bandwidths.*

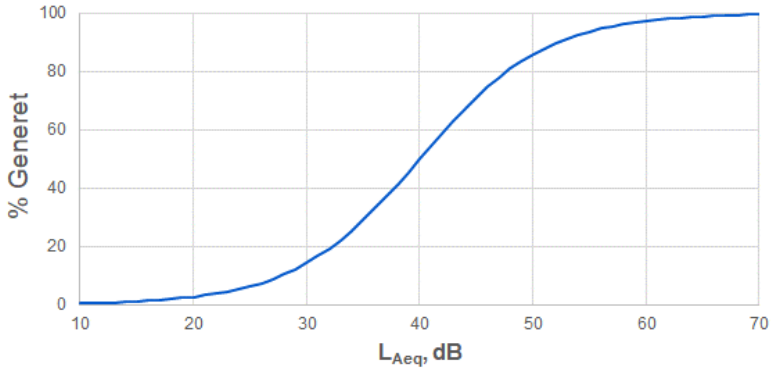
From Figur 33 it is seen that the 1/24 octave band analysis and the FFT analysis gives the most consistent results. Due to the fact that the limiting frequencies of the bands from the other types of analyses does not coincide with the critical bands inaccuracies occur. These depend on the spectrum shape. For the shown spectrum the inaccuracies for 1/3 band analysis are less than 2 dB while the errors for the 1/1 octave analysis are up to 5 dB.

Apart from the mentioned inaccuracies the described method makes it possible to compare spectra measured with different bandwidth in a way that is meaningful in relation to perception, unlike the way the results are displayed in Figur 12.

If the level per critical band is above the hearing threshold, the 0 dB line, it is anticipated that the sound will be audible if it not masked by other sounds. This anticipation definitely holds for sounds with dominating tones or narrow noise bands, because the results just give a direct comparison with the verified threshold shown in Figur 1. For broad band sounds without any dominant frequency regions (after the HT-weighting) a rough verification of this anticipation is made in reference [20], but a systematic listening test is desirable.

Bilag 2 Logistiske dosis-responskurver

Dosis-responssammenhænge kan beskrives ved en logistisk funktion. Det er en s-formet kurve, der går mod nul ved lave eksponeringer og mod et defineret maksimum ved høje eksponeringer, se Figur 34.



Figur 34 *Eksempel på det principielle forløb af en logistisk dosis-responskurve (konstanter s=0,18 og f=40 dB)*

I modsætning til de ofte anvendte anden- eller tredieordens polynomielle tilnærmelser, afspejler de logistiske kurver en fænomænologisk mere rigtig dosis-respons sammenhæng også udenfor et begrænset interval, som er nødvendigt for anden og tredje ordens tilnærmelser. Som det fremgår af reference [36] er det en bedre tilnærmelse til den kumulative normalfordeling, som ligger bag mange analyser, og funktionen har desuden den dyd, at den kan beskrives ved bare to parametre.

Parametrene til den logistiske kurve kan findes ved en logistisk transformation af data og derefter en lineær regression på de transformerede data, processen er nærmere forklaret i reference [36].

Dosis-respons sammenhængen kan derefter beskrives ved formlen:

$$A = \frac{u}{1 + e^{-s(E-f)}} \qquad \textbf{(5)}$$

Hvor

- *A* er et mål for genen (**A**nnoyance): ”% Stærkt generede”, ”% Generede” eller ”% Lidt generede”
- *u* er øvre (**u**pper) grænse for A, dvs. 100 når det er procent.
- *s* er hældningen (**s**lope)
- *E* er støjeksponeringen (**E**xposure), fx L_{Aeq} eller L_{den} i dB
- *f* er værdien for 50% (**f**ifty) gene.

Hvis man ønsker at beregne det niveau som svarer til en given procentdel generede kan følgende formel bruges:

$$E = f - \frac{\ln(\frac{u}{A} - 1)}{s} \qquad \textbf{(6)}$$