

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

Toneanalyser – den danske metode

Orientering nr. 47

JEL/CB/THP/ilk

16. september 2013

Resume

I denne orientering gennemgås den danske toneanalysemetode – Joint Nordic Method – om vurdering af toners hørbarhed i støj, specielt med henblik på implementering af metoden i software.

Orienteringen indeholder analyser og dokumentation af tonehørbarheden af to lydfiler, som udsendes sammen med orienteringen. Lydfilerne kan fx anvendes som en reference til verifikation af instrumenter og software.

Indhold

1. Indledning.....	2
2. Generelt om toner	2
3. Metode	3
4. Fremgangsmåde.....	3
4.1 Frekvensanalyse (FFT).....	3
4.2 Bestemmelse af lydtrykniveauet af toner og øvrig støj	4
4.3 Afgørelse om tildeling af tonetillæg.....	6
5. Indstillinger i analyseprogrammet	6
6. Usikkerheder	7
7. Implementering af metoden i softwareprogrammer	7
8. Lydeksempler	10
9. Dokumentation af toneanalyse	10
10. Referencer	10
Bilag A – Toneanalyse af opgave fra den 19. sammenlignende støjmåling	11
Bilag B – Toneanalyse af opgave fra den 20. sammenlignende støjmåling	15
Bilag C – ISO 1996-2 metoden	17
Bilag D – Eksempel på dokumentation af toneanalyse	18

1. Indledning

Det eksisterende grundlag for vurdering af hørbare toner i støj er beskrevet i Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 fra 1984 [1]. Denne danske metode til udførelse af objektive toneanalyser benævnes også Joint Nordic Method. Metoden er allerede uddybet og præciseret i to tidligere orienteringer fra Referencelaboratoriet: Orientering nr. 13 fra 1991 [2] og Orientering nr. 31 fra 2001 [3]. I sidstnævnte orientering præciseres metoden til brug for implementering i software. Heri beskrives desuden den (senere) europæiske standard ISO 1996-2, Annex C [4] om toner i ekstern støj.

Nærværende orientering forsøger at samle og klargøre den danske metodes mest grundlæggende begreber, idet der er lagt vægt på de forhold, som har voldt problemer i de sammenlignende støjmålinger, som Referencelaboratoriet arrangerer.

Fortolkningen og implementeringen af den danske toneanalysemetode i softwareprogrammer har ligeledes vist sig at volde problemer, som har haft en direkte indvirkning på visse delresultater i den 19. og 20. sammenlignende støjmåling. Denne orientering indeholder derfor nye analyser af lydeksemplerne fra disse to sammenlignende støjmålinger. Resultaterne er dokumenteret i Bilag A og Bilag B. Lydfilerne fra den 19. og 20. sammenlignende støjmåling udsendes sammen med orienteringen.

Der har desuden vist sig et behov for tydeligt at kunne adskille begreberne, som anvendes i henholdsvis den danske tonemetode og i den nævnte europæiske ISO-standard. I Bilag C findes derfor en sammenstilling af de parametre, der anvendes i den danske og den europæiske metode.

Der gøres opmærksom på, at denne orientering ikke erstatter de tidligere orienteringer. Der henvises derfor i teksten til relevante steder i orienteringerne, hvor man kan finde uddybende forklaringer. Betegnelserne "OR13" og "OR31" benyttes for Orientering nr. 13 og nr. 31 og "MST6/1984" benyttes for Miljøstyrelsens vejledning nr. 6 fra 1984.

2. Generelt om toner

I Miljøstyrelsens vejledning nr. 5 fra 1984 [5] om ekstern støj fra virksomheder står der om toner:

"Det er almindeligt anerkendt, at tydeligt hørbare toner i en støj medfører, at støjen er mere generende end en tilsvarende støj med samme styrke, men uden hørbare toner, selv om det ækvivalente støjniveau i dB er det samme.

Denne kendsgerning tilgodeses ved, at man giver et tillæg på 5 dB til den målte værdi af det ækvivalente støjniveau i dB(A) for at få et mere korrekt mål for støjulempen....

...Hvis man ved den subjektive vurdering er i tvivl, om hvorvidt der findes tydeligt hørbare toner, bør dette afgøres ved en objektiv måling".

3. Metode

Den generelle fremgangsmåde til objektiv bestemmelse af toner i støj er beskrevet i [1] således:

- 1) Frekvensanalyse (FFT)
- 2) Bestemmelse af lydtrykniveauet af toner og af den øvrige støj, som kan maskere tonerne
- 3) Afgørelse om tildeling af tonetillæg.

I Referencelaboratoriets Orientering nr. 13 fra 1991 [2] er toneanalysemetoden beskrevet nøjere med hensyn til udførelsen af frekvensanalysen og der gives eksempler på ”svære” tilfælde. Det pointeres her, at det er teknikeren, der udfører analysen, som har det endelige ansvar for, at resultaterne er korrekte.

Metoden til at finde hørbarheden af toner i støj er baseret på en opdeling i mindre frekvensbånd, nemlig hørealsens såkaldte kritiske bånd efter Zwicker [6]. Bredden af det kritiske bånd er sat til 100 Hz for de tonefrekvenser, der ligger mellem 20 Hz og 500 Hz, mens bredden af det kritiske bånd beregnes som 20 % af tonefrekvensen for toner over 500 Hz. Lydoptagelsen af den målte støj FFT-analyseres og hele det hørbare frekvensområde afsøges for toner med det formål at finde det kritiske bånd, hvor tonen (eller tonerne) er mest tydelig(e).

4. Fremgangsmåde

4.1 Frekvensanalyse (FFT)

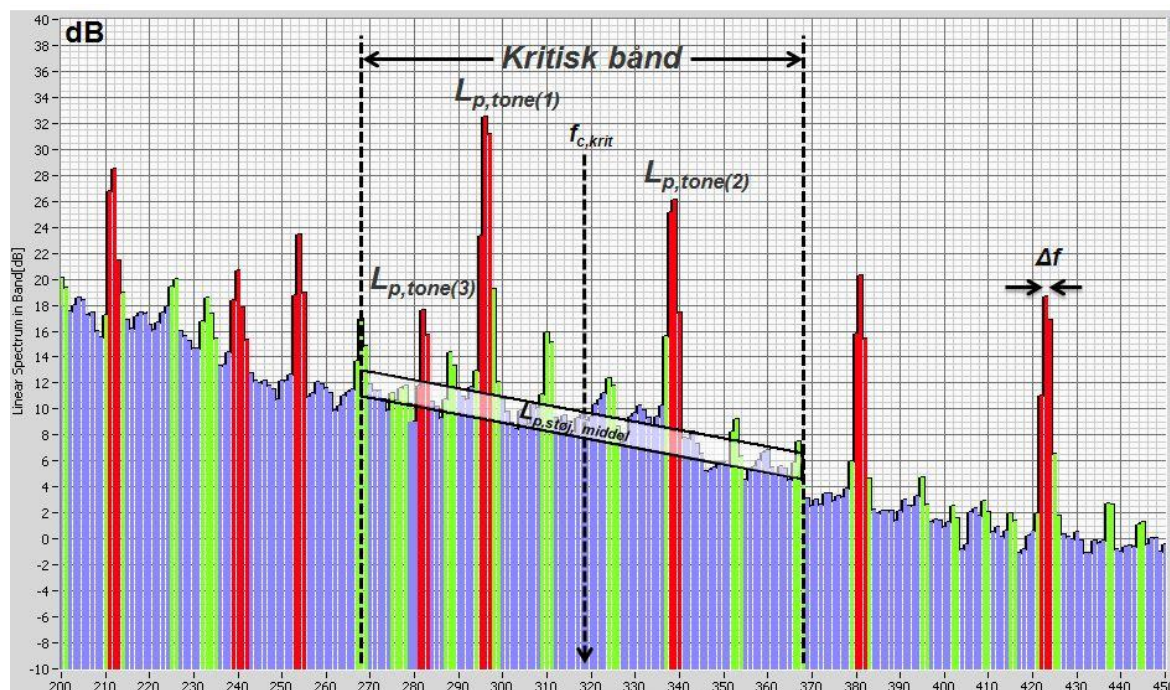
Det forudsættes på dette sted, at man er bekendt med FFT-analyser. Yderligere oplysninger om FFT-analyse af toner findes i OR13 side 16 og OR31 - Del 1.

I det følgende gennemgås toneanalyser for normalt forekommende stationær støj. For mere specielle tilfælde henvises til følgende steder:

- Ikke-stationære forhold: MST6/1984 side 63
- Amplitude- og frekvensmodulerede toner: OR13 side 7
- Smalle støjband: OR13 side 11 og OR31 side 8 note 1

FFT-analysatorens frekvensopløsning, Δf , angiver afstanden mellem linjerne i FFT-spektret, som vist på Figur 1. Da filtrene i analysatoren er bredere end frekvensopløsningen, overlapper disse hinanden frekvensmæssigt. Analysebandbredden beskrives med parameteren: Effektiv analysebandbredde. For Hanning-tidsvinduet, som bør benyttes, er den effektive analysebandbredde 1,5 gange frekvensopløsningen.

Det anbefales som udgangspunkt at benytte en frekvensopløsning på 3 Hz svarende til en effektiv bandbredde 4,5 Hz.



Figur 1

FFT-spektrum af støjeksempel og definitioner af toneanalyseparametre. De røde linjer angiver tonerne, de grønne linjer angiver "støjpauser" (hverken toner eller støj) og de blå linjer angiver baggrundsstøjen (maskeringsstøjen). Det lyse rektangel markerer bredden af det kritiske bånd, men fungerer samtidig som et "hjelpevindue", hvorigennem linjerne i maskeringsstøjen kan kontrolleres visuelt, når $L_{p, støj, middel}$ skal fastlægges. Den vandrette akse er frekvensen i Hz, den lodrette akse er lydtrykniveau i dB pr. analysebåndbredde. Frekvensvægtningen af støjeksemplet er lineær (ikke A-vægtet).

4.2 Bestemmelse af lydtrykniveauet af toner og øvrig støj

Placering af de kritiske bånd

Lydoptagelsen afsøges som sagt for toner. Omkring hver af de mest fremtrædende toner placeres kritiske bånd, så de spænder over så mange fremtrædende toner som muligt. Båndet skal placeres symmetrisk om de mest signifikante toner, hvilket betyder den kraftigste tone i det aktuelle bånd, samt de toner der ligger mindre end 10 dB fra denne tone (OR31 [3] side 9). På Figur 1 er de signifikante toner nr. 1 og 2, idet tone nr. 3 ligger mere end 10 dB fra den kraftigste tone (tone nr. 1).

Det kritiske bånd med de mest fremtrædende toner er afgørende for evt. tildeling af et 5 dB-tillæg.

I hvert af de relevante kritiske bånd skal følgende parametre bestemmes, således at den mest hørbare tone – eller det mest hørbare tonekompleks – kan udvælgles:

$L_{p, \text{tone}}$

Toner defineres som alle de lokale maksima i støjen, som har en 3 dB-båndbredde, der er mindre end 10 % af bredden af det aktuelle kritiske bånd. Alle tonelinjer, der ligger indenfor 6 dB fra det lokale maksimum, hører med til tonen.

$L_{p, \text{tone}}$ angiver det samlede lydtrykniveau af alle toner indenfor et kritisk bånd – ikke kun de mest signifikante toner. For tonerne i det kritiske bånd på Figur 1 betyder det, at $L_{p, \text{tone}(1)}$, $L_{p, \text{tone}(2)}$ og $L_{p, \text{tone}(3)}$ (alle markeret med rødt) skal summeres energimæssigt.

Henvisninger: OR13 side 23 ("Picket fence" effekt) samt OR31 side 8.

$f_{c, \text{krit.}}$

$f_{c, \text{krit.}}$ er centerfrekvensen af det aktuelle, kritiske bånd. For lavfrekvente toner ligger det laveste kritiske bånd fra 20 Hz til 120 Hz. Den laveste centerfrekvens er derfor 70 Hz.

Når det kritiske bånd kun indeholder én signifikant tone, er denne tone samtidig centerfrekvensen for det kritiske bånd $f_{c, \text{krit.}}$. Hvis der er flere signifikante toner i det kritiske bånd, afgøres centerfrekvensen for det kritiske bånd af den symmetriske placering om de mest signifikante toner. Dette er sandsynligvis ikke samme frekvens som én af de signifikante toner i båndet.

Det er centerfrekvensen af det kritiske bånd, $f_{c, \text{krit.}}$, der skal benyttes i den videre beregning af tonetillægget – ikke frekvensen af den kraftigste tone.

$L_{p, \text{støj, middel}}$

$L_{p, \text{støj, middel}}$ angiver middelstøjniveauet af støjen i det aktuelle kritiske bånd, aflæst på spektret (med den aktuelle analysebåndbredde) som det ville være, hvis der ikke var toner i støjen.

Til fastlæggelse af middelstøjniveauet beregnes en regressionslinje for baggrundstøjen – en ret linje, som følger støjens middelforløb i det kritiske bånd (bedømt ud fra de blå linjer inden for det lyse rektangel i Figur 1). Årsagen til, at "middel" indgår i parameterens navn, er at regressionslinjen danner en slags "visuelt middel" af baggrundsstøjens spektrale forløb.

Hvis støjen i det kritiske bånd spektralt varierer så meget, eller hvis der er så mange toner, at det er svært at fastlægge en fornuftig regressionslinje, er det tilladt at inddrage kurveforløbet af baggrundsstøjen i nabobåndene ved at udvide regressionsintervallet med 1,5-4 gange bredden af det kritiske bånd (se afsnit 7). Dette kræver dog, at kurveforløbet i nabobåndene ligner kurveforløbet i det kritiske bånd, dvs. har samme generelle hældning. Henvisning: OR31 side 14.

$L_{p, \text{krit. bånd}}$

$L_{p, \text{krit. bånd}}$ er totalniveauet af "den maskerende støj" i det kritiske bånd og beregnes som middel-lydtrykniveauet af baggrundstøjen i det aktuelle kritiske bånd ($L_{p, \text{støj, middel}}$) korrigeret for forholdet imellem bredden af det aktuelle kritiske bånd og den valgte effektive analysebåndbredde:

$$L_{p, \text{krit. bånd}} = L_{p, \text{støj, middel}} + 10 \log \left(\frac{\text{kritisk båndbredde}}{\text{effektiv analysebåndbredde}} \right)$$

I softwaremæssige implementeringer sættes niveauerne af alle de spektrale linjer i det kritiske bånd lig med regressionslinjens niveauer og summeres energimæssigt til $L_{p,krit.bånd}$.

ΔL_{ts}

ΔL_{ts} er forskellen mellem det samlede toneniveau og den totale maskerende støj i det kritiske bånd og kaldes kriteriestørrelsen:

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

Kriterieværdien

Kriterieværdien, $\Delta L_{ts, kriterie}$, er en frekvensafhængig grænseværdi for tonens hørbarhed over den øvrige støj i det kritiske bånd. Værdien aflæses på kriteriekurven ud for centerfrekvensen for det kritiske bånd ($f_{c, krit.}$). Kriteriekurven er givet ved formlen:

$$\Delta L_{ts, kriterie} = 4,5 - \log \left(1 + \left(\frac{f_{c, krit.}}{502} \right)^{2,5} \right)$$

4.3 Afgørelse om tildeling af tonetillæg

Tonetillægget

Det kritiske bånd med de tydeligste toner, dvs. det bånd hvor forskellen mellem ΔL_{ts} og $\Delta L_{ts, kriterie}$ er størst, er afgørende for tildelingen af et tillæg.

Der tildeles et tonetillæg på $K = 5$ dB, hvis kriteriestørrelsen (ΔL_{ts}) er større end kriterieværdien. Tillægget adderes til virksomhedens støjbidrag L_{Aeq} for de driftstilstande, hvor tonerne er tydeligt hørbare.

Støjbelastning og tonevarighed

Tonetillægget adderes til en virksomheds støjbidrag, L_{Aeq} , men kun i den del af referenceperioden med driftstilstande, hvor tonen er tydeligt hørbar. Støjbelastningen, L_r , fremkommer herefter ved at foretage en tidsvægtet energimidling af støjbidragene for tidsperioder med og uden tonetillæg. Henvisning: MST6/1984 side 65.

5. Indstillinger i analyseprogrammet

Integrationstid. For stationære toner skal FFT-analysen foretages med en lineær integration af måleperioden, som typisk skal være omkring 1 minut.

Tidsvægtning. Hvis tonen varierer i niveau, benyttes eksponentiel midling med tidskonstanten F og lydtrykniveauet af tonen sættes lig med den størst forekommende værdi ($L_{p, maxF}$).

Niveauet af den maskerende støj bestemmes med passende lang fast (lineær) integrationstid, typisk 30-120 sekunder.

Tidsvindue. Der benyttes oftest et Hanning-tidsvindue med 50 % - 75 % overlap.

Frekvensvægtning. I den danske metode til vurdering af toner i ekstern støj fra virksomheder skal der kun analyseres på spektre, der ikke er frekvensvægtede (lineære).

Med støj fra vindmøller forholder det sig anderledes, idet vindmøller skal måles i henhold til vindmøllebekendtgørelsen [7]. Der henvises i bekendtgørelsen til den danske metode, men der er indført enkelte afvigelser herfra: Spektrene skal A-vægtes og der skal midles over et antal spektre, der svarer til en sammenhængende analysetid på 1 minut.

Frekvensopløsning (Δf). Normalt kan der med fordel benyttes en frekvensopløsning på ca. 3 Hz. I tilfælde af mange tætliggende toner kan der benyttes en mindre frekvensopløsning, idet bestemmelsen af baggrundsstøjen herved kan blive mere nøjagtig.

6. Usikkerheder

Det kan oplyses, at i tidligere sammenlignende støjmålinger om toner i støj har det vist sig, at i ”simple tilfælde”, hvor der er få og stationære toner, viser deltagernes resultater en standardafvigelse på ΔL_{ts} på mellem 0,3 og 1,0 dB. I mere ”komplicerede tilfælde” med mange og/eller varierende toner ses der en standardafvigelse på 1-3 dB [8] [9].

Det anbefales, at der gøres særsomt opmærksom på konsekvenserne af denne usikkerhed på bestemmelse af kriteriestørrelsen ΔL_{ts} , specielt i de tilfælde, hvor kriteriestørrelsen ΔL_{ts} ligger tæt på kriterieværdien, fordi udfaldet af analysen kan få en afgørende indflydelse på tildelingen af tonetillægget.

7. Implementering af metoden i softwareprogrammer

I Figur 2 er det illustreret, hvordan en tone kan anskues og opdeles i tonelinjer, støjpauser og baggrundsstøj. Figuren stammer fra Referencelaboratoriets Orientering nr. 31 [3] og der henvises hertil for yderligere oplysninger om baggrundsstøj, støjpauser, toner og tonesøgekriterier. I det følgende gennemgås nogle forhold til brug for implementeringen af metoden i toneanalyse-software.

Frekvensopløsning Δf og effektiv analysebåndbredde

Analysebåndbredden (frekvensopløsningen) Δf angiver afstanden mellem de enkelte linjer i frekvensspektret fra FFT-analysen. Den effektive analysebåndbredde afhænger af typen af det anvendte tidsvindue i FFT-analysen. For det anbefalede tidsvindue ”Hanning” er den effektive analysebåndbredde 1,5 gange analysebåndbredden (frekvensopløsningen).

Den effektive analysebåndbredde skal være mindre end 5 % af det kritiske bånds bredde, hvilket svarer til 5 Hz for frekvenser under 500 Hz. For tidsvægtningen ”Hanning” svarer det altså til en frekvensopløsning på ca. 3 Hz (5 Hz / 1,5). Henvisning: OR31 side 7-8.

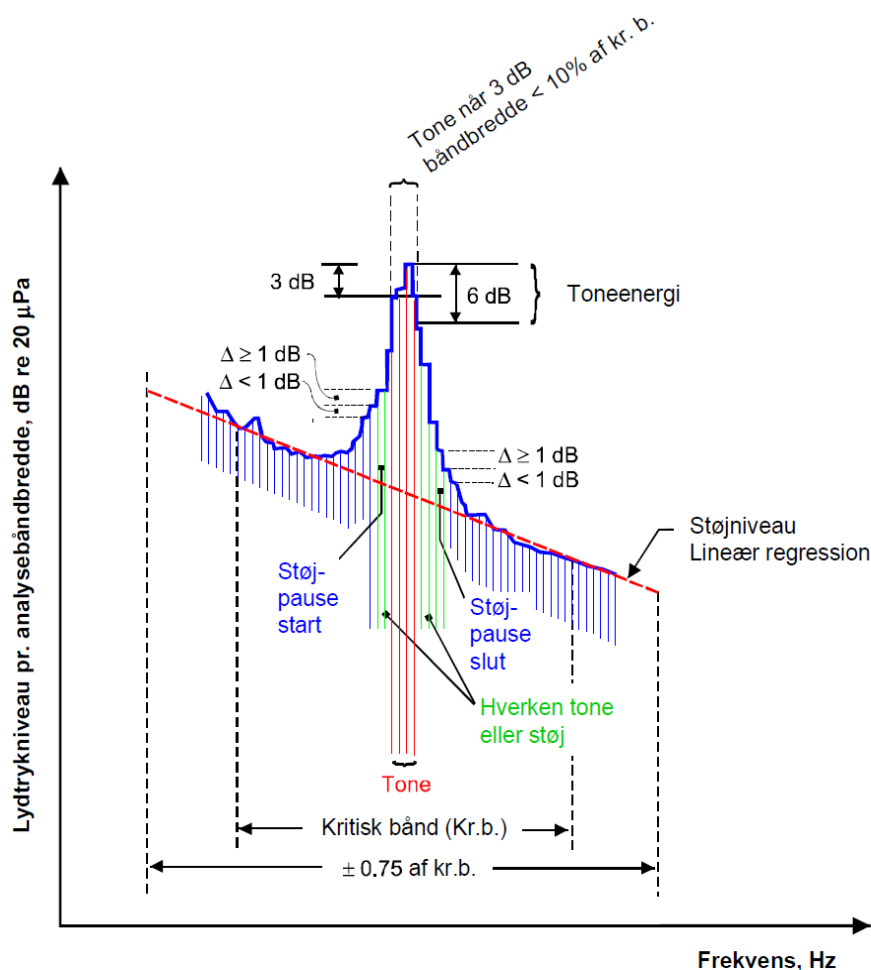
Tonesøgekriterium (hældning, Δ)

Tonesøgekriteriet er et mål for, hvor meget niveauet stiger eller falder pr. linje i spektret. Det benyttes til at adskille toner fra støj og sættes normalt til $\Delta = 1$ dB, men for uregelmæssige spektre kan værdier op til 3 eller 4 dB være nødvendig for at skille toner fra støj.

Tonesøgekriteriet, Δ , er illustreret i Figur 2.

Hvis der benyttes en anden frekvensopløsning end 3 Hz, kan man med fordel sørge for, at forholdet mellem hældning (Δ i dB) og frekvensopløsning (i Hz) er 1:3. Dette har erfaringsmæssigt vist sig at give pålidelige resultater. Det anbefales derfor at benytte dette forhold mellem hældning og frekvensopløsning, hvor det er hensigtsmæssigt.

Hvis der er flere toner i det kritiske bånd, og én af disse toner ligger tæt på grænsen af det kritiske bånd, bør de spektrale linjer, som hører til tonen (sidebåndene), medtages i bestemmelsen af toneniveauet, selvom de ligger uden for det kritiske bånd.



Figur 2

Definitioner for toner, støj, støjpauser, kritisk bånd og regressionslinje for maskeringstøjen (fra [3] samt ISO 1996-2). Søgekriteriet er her sat til $\Delta = 1$ dB. ($\pm 0,75$ af kr.b. = $1,5 \times$ bredden af det kritiske bånd).

Placering af det kritiske bånd

Som nævnt tidligere skal det kritiske bånd placeres symmetrisk omkring de mest signifikante toner, dvs. omkring de toner der ligger mindre end 10 dB fra den kraftigste tone. For helt lave frekvenser kan reglen om en symmetrisk placering af det kritiske bånd dog ikke overholdes, fordi det laveste kritiske bånd er givet på forhånd (20-120 Hz).

I de tilfælde, hvor der kun forekommer én tone i det kritiske bånd, bliver tonens frekvens sammenfaldende med centerfrekvensen for det kritiske bånd $f_{c,krit}$ undtagen i det laveste kritiske bånd pga. asymmetri som nævnt ovenfor.

Regressionslinje for baggrundsstøjen

Regressionsintervallet kan vælges til mellem 1 og 2 gange bredden af det kritiske bånd. Afhængigt af støjens forløb kan regressionsintervallet vælges, så det følger (eller ikke følger) støjens forløb i naboområderne til det kritiske bånd, hvis disse naboområder bedre beskriver kurveforløbet af støjgulvet i det kritiske bånd.

Når kurveforløbet af baggrundsstøjen skal tilnærmes med en regressionslinje, kan regressionsintervallet med fordel ofte vælges til 1,5 gange bredden af det kritiske bånd, som er markeret med lodrette stiplede linjer på Figur 2. Herved får regressionslinjen nogle ”vinger”, der rager lidt ind i nabobåndene til hver side, som derved bliver inddraget i fastlæggelsen af regressionslinjens forløb. Disse vinger kan ses på Figur 3, side 11. Dette er hensigtsmæssigt i de tilfælde, hvor støjgulvet inden for det kritiske bånd er svært at identificere pga. mange og/eller ”brede” toner.

Med lavfrekvente toner skal man dog være særlig forsigtig med at udvide regressionsintervallet, fordi det ikke-A-vægtede støjniveau ofte stiger kraftigt mod lave frekvenser. Her kan den ”venstre vinge” komme til at følge disse høje niveauer og dermed give et forkert billede af støjens forløb. Tonens hørbarhed over støjen i det kritiske bånd underestimeres herved. I disse tilfælde er det bedst at ”klappe vingerne ind”, så regressionslinjen kun ligger indenfor det kritiske bånd. Det modsatte forhold gør sig gældende for vindmøllestøj, som ifølge [7] skal analyseres A-vægtet. A-vægtede støjspektre falder ofte kraftigt mod lave frekvenser og også her skal man passe på med at benytte vingerne til at udvide regressionsområdet med, fordi vingerne kan komme til at følge et atypisk kurveforløb, som ikke repræsenterer støjen i det kritiske bånd korrekt.

Generelt skal man se bort fra kritiske bånd, hvor toneniveauet ligger under høretærsklen. Specielt for lavfrekvente toner er det tilrådeligt at undersøge, om tonerne ligger under høretærsklen (defineret i ISO 226, 1986). Henvisning: OR31 side 8.

Linjerne i de grønne ”støjpauser” i Figur 1 og Figur 2 skal ikke medtages i regressionen af baggrundsstøjens forløb eller ved beregningen af tonernes niveauer.

8. Lydeksempler

For at illustrere betydningen af valget af analysebåndbredde og af regressionsintervallets bredde er der i Bilag A og B vist toneanalyser af lydeksemplerne fra den 19. og 20. sammenlignende støjmåling. Analyserne er foretaget med en frekvensopløsning på både 1, 2 og 3 Hz, og et regressionsinterval på henholdsvis 1 og 1,5 gange bredden af det kritiske bånd.

Lydeksemplerne fra den 19. og 20. sammenlignende støjmåling er tilgængelige på Referencelaboratoriets hjemmeside, www.referencelaboratoriet.dk. Referencelaboratoriet har analyseret disse filer med programmet noiseLAB Batch Processor 3.1.1.4 i forbindelse med udgivelsen af denne orientering.

9. Dokumentation af toneanalyse

Som dokumentation for analysen til rapporter af typen ”Miljømåling - ekstern støj” skal analyseresultaterne anføres tillige med oplysninger om de indstillinger, man har valgt i toneanalyseprogrammet, jf. Afsnit 5. I Bilag D er angivet et eksempel på rapportering af resultaterne fra en toneanalyse. Hvis der er mere end ét kritisk bånd, som kan udløse et tonetillæg, er det tilstrækkeligt blot at nævne centerfrekvensen for de øvrige bånd.

10. Referencer

- [1] Miljøstyrelsens vejledning nr. 6/1984: ”Måling af ekstern støj fra virksomheder”.
- [2] Orientering nr. 13: ”Måling af hørbare toner i støj”, Referencelaboratoriet 1991.
- [3] Orientering nr. 31: ”Forslag til revideret metode til bestemmelse af toner”, Referencelaboratoriet 2001.
- [4] ISO 1996: ”Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels”, Annex C: Objective method for assessing the audibility of tones in noise - Reference method.
- [5] Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1984: ”Ekstern støj fra virksomheder”.
- [6] Hugo Fastl & Eberhard Zwicker: ”Psycho-Acoustics, Facts and Models”, Springer 2006.
- [7] Miljøministeriets bekendtgørelse nr. 1284 af 15. december 2011: ”Bekendtgørelse om støj fra vindmøller”.
- [8] T. H. Pedersen: ”Prominent tones in noise - Proficiency testing among 30 laboratories of the ISO 1996-2 Annex C method and its predecessors” Acoustics-08, Paris 2008.
- [9] J. E. Laursen: ”Proficiency tests on environmental noise”, Inter-Noise, New York 2012.

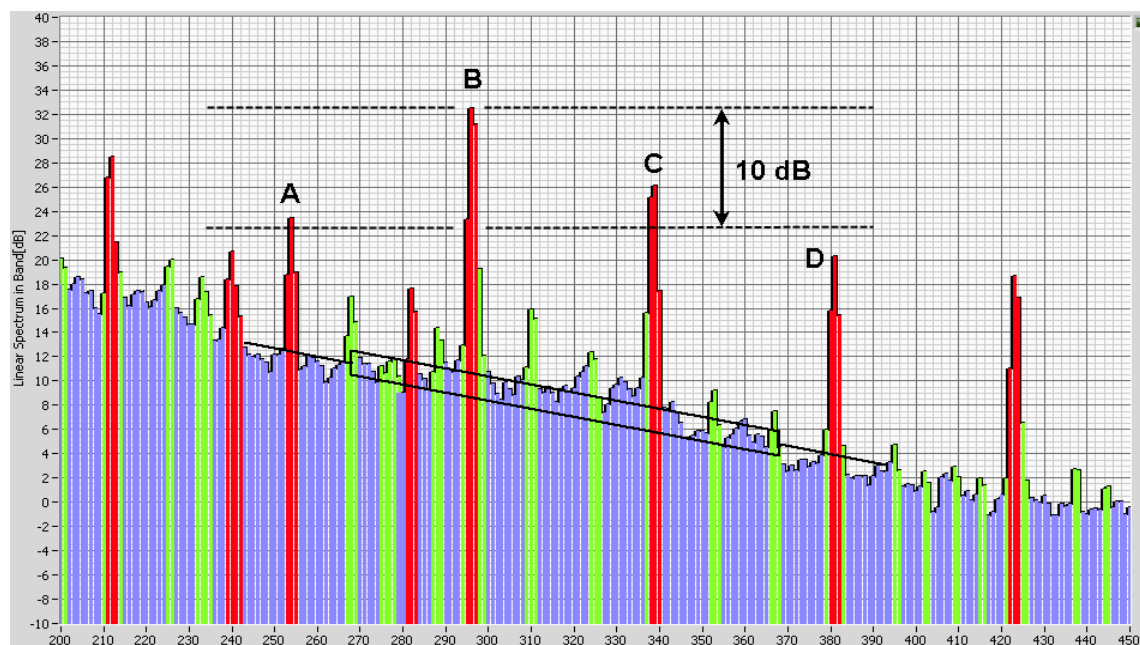
Bilag A – Toneanalyse af opgave fra den 19. sammenlignende støjmåling

Den 19. sammenlignende støjmåling indeholdt en optagelse af støjen fra en lastbilvaskehal, hvor en kompressor til højtryksspuling stod i tomgang (Opgave A). På Figur 3 er vist et resultat af toneanalysen af lydoptagelsen, hvor de kraftigste toner er markeret med bogstaverne A-D. Udstrækningen af det kritiske bånd er markeret med et fladt rektangel, som indrammer den del af baggrundsstøjen, som ligger til grund for at bestemmelsen af $L_{p, \text{støj, middel}}$ og dermed for beregningen af den maskerende støj $L_{p, \text{krit. bånd}}$. Med de stiplede linjer er vist niveauet af den kraftigste tone (tone B) samt niveauet 10 dB under denne tone.

Toneanalyseprogrammet har afsøgt hele det hørbare frekvensområde for toner og fundet, at de mest fremtrædende toner ligger i det kritiske bånd: 268-368 Hz. Dette bånd indeholder to kraftige toner (B og C), som i forhold til baggrundsstøjen giver den største tonehørbarhed (ΔL_{ts}).

Det fremgår også af Figur 3, at det kritiske bånd: 250-350 Hz har et højere toneniveau $L_{p, \text{tone}}$, fordi det – udover tone B og C – også indeholder tone A, men da dette bånd har en højere baggrundsstøj $L_{p, \text{krit. støj}}$ end det førstnævnte bånd, er hørbarheden (ΔL_{ts}) tilsvarende mindre.

Det kritiske bånd mellem 282 og 382 Hz ser også ud til at have et højere toneniveau $L_{p, \text{tone}}$ end det førstnævnte kritiske bånd, fordi det indeholder 3 toner: B, C og D. Ydermere er baggrundsstøjen lavere i dette bånd. Men som det fremgår af Figur 3, ligger tone D mere end 10 dB under den kraftigste tone (B), og metoden dikterer derfor, at denne tone (D) ikke må medtages i vurderingen af en mulig placering af det kritiske bånd omkring tone B.



Figur 3

Toneanalyse af lydsekvensen fra den 19. sammenlignende støjmåling (Opgave A). Den vandrette akse er frekvensen i Hz, den lodrette akse er lydtrykniveauet i dB pr. analysebåndbredde. Analysen er foretaget med Hanning-tidsvindue. Analysebåndbredde (frekvensopløsning) $\Delta f = 1$ Hz. Tonesøgekriterie $\Delta = 1$ dB. Regressionsinterval $= 1,5 \times$ kritisk båndbredde. $f_{c, \text{krit}} = 318$ Hz.

Lydeksemplet fra den 19. sammenlignende støjmåling analyseret med et regressionsinterval, der har samme bredde som det kritiske bånd (vist i Tabel 1), og desuden med et regressionsinterval med en bredde på 1,5 gange det kritiske bånds bredde (vist i Tabel 2 og i Figur 3).

Lydeksempel	19. sammenlignende støjmåling (kompressor i tomgang)		
Analysebåndbredde	1 Hz	2 Hz	3 Hz
Regressionsinterval	1,0 x kritisk bånd	1,0 x kritisk bånd	1,0 x kritisk bånd
Dominerende kritisk bånd	268 Hz – 368 Hz	268 Hz – 368 Hz	667 Hz – 815 Hz
Bredde af kritisk bånd	100 Hz	100 Hz	148 Hz
Centerfrekvens, $f_{c,krit}$	318 Hz	318 Hz	741 Hz
Toner i kritisk bånd:	Frekvens / $L_{p, tone}$ (nr. i)		
Tone nr. 1	296 Hz / 33,3 dB	296 Hz / 33,5 dB	804 Hz / 32,6 dB
Tone nr. 2	339 Hz / 27,2 dB	338 Hz / 27,5 dB	720 Hz / 30,1 dB
Tone nr. 3	282 Hz / 18,5 dB	-	789 Hz / 28,9 dB
Tone nr. 4	-	-	762 Hz / 28,8 dB
Tone nr. 5	-	-	678 Hz / 25,5 dB
$L_{p, tone}$	34,4 dB	34,4 dB	36,7 dB
$L_{p, krit. støj}$	27,2 dB	27,5 dB	30,5 dB
ΔL_{ts}	7,2 dB	6,9 dB	6,2 dB
Kriterieværdi, $\Delta L_{ts, kriterie}$	4,4 dB	4,4 dB	3,9 dB
Tonetillæg, K	5 dB	5 dB	5 dB

Tabel 1

Analyse af lydeksempel fra den 19. sammenlignende støjmåling.

(Opgave A - kompressor i tomgang) Analyseret med henh. 1, 2 og 3 Hz analysebåndbredde.

Regressionsinterval = **1 gange** bredden af det kritiske bånd.

Det ses af Tabel 1, at når der benyttes et regressionsinterval på 1,0 gange bredden af det kritiske bånd og en frekvensopløsning på 1 Hz eller 2 Hz ligger det mest dominerende kritiske bånd ved centerfrekvensen $f_{c,krit} = 318$ Hz. Når der benyttes 3 Hz frekvensopløsning ligger det mest dominerende bånd imidlertid ved $f_{c,krit} = 741$ Hz.

Lydeksempel	19. sammenlignende støjmåling (kompressor i tomgang)		
Analysebandbredde	1 Hz	2 Hz	3 Hz
Regressionsinterval	1,5 x kritiske bånd	1,5 x kritiske bånd	1,5 x kritiske bånd
Dominerende kritisk bånd	268 Hz – 368 Hz	268 Hz – 368 Hz	268 Hz – 368 Hz
Bredde af kritisk bånd	100 Hz	100 Hz	100 Hz
Centerfrekvens, $f_{c,krit}$	318 Hz	318 Hz	318 Hz
Toner i kritisk bånd:	Frekvens / $L_{p, tone}$ (nr. i)		
Tone nr. 1	296 Hz / 33,3 dB	296 Hz / 33,5 dB	297 Hz / 33,5 dB
Tone nr. 2	339 Hz / 27,2 dB	338 Hz / 27,5 dB	339 Hz / 27,6 dB
Tone nr. 3	282 Hz / 18,5 dB	-	-
$L_{p, tone}$	34,4 dB	34,4 dB	34,5 dB
$L_{p, krit. støj}$	26,6 dB	26,9 dB	27,3 dB
ΔL_{ts}	7,8 dB	7,6 dB	7,2 dB
Kriterieværdi, $\Delta L_{ts, kriterie}$	4,4 dB	4,4 dB	4,4 dB
Tonetillæg, K	5 dB	5 dB	5 dB

Tabel 2

Analyse af lydeksempel fra den 19. sammenlignende støjmåling.

(Opgave A - kompressor i tomgang) Analyseret med henh. 1, 2 og 3 Hz analysebandbredde.

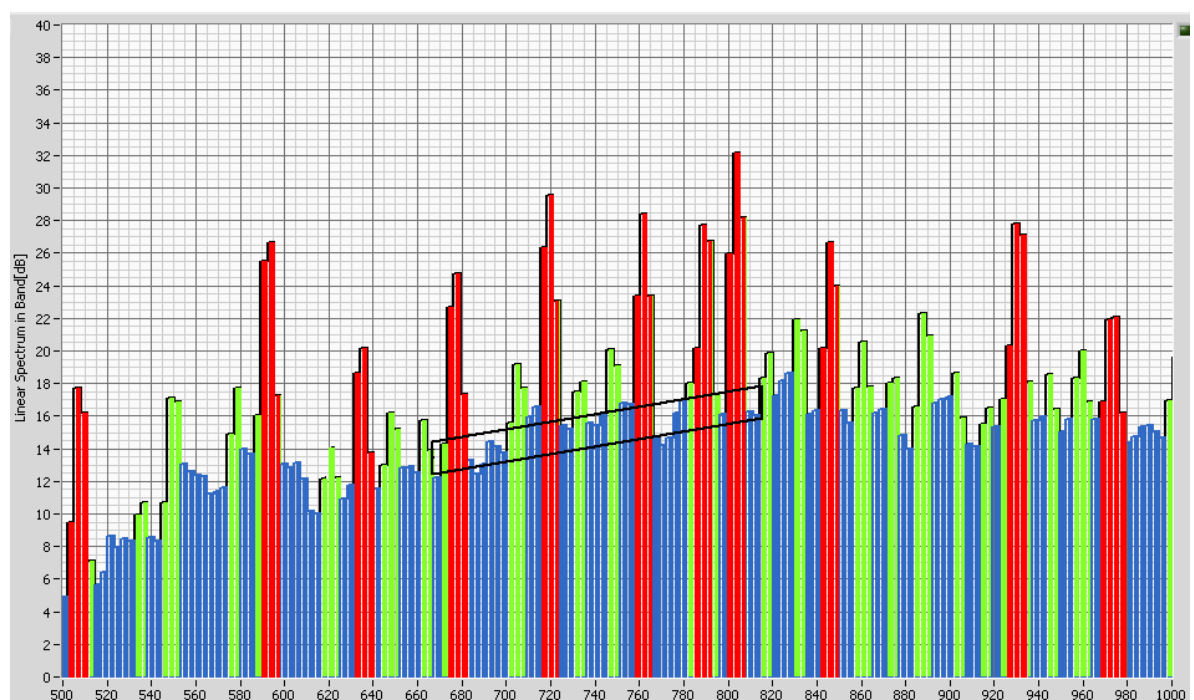
Regressionsinterval = **1,5 gange** bredden af det kritiske bånd.

Som det ses af Tabel 1 og Tabel 2 har valget af analyseparametre en forholdsvis begrænset indflydelse på resultatet af ΔL_{ts} . Variationen er i alt ca. 1 dB. Det får i dette tilfælde ikke indflydelse på tildelingen af 5 dB-tillægget.

Det foreliggende eksempel – en kompressor i tomgang – er præget af mange toner i mange forskellige kritiske bånd og resultatet af analyserne viser, at to af båndene tilfældigvis havner meget tæt på hinanden mht. ΔL_{ts} . I dette tilfælde kan små variationer forårsaget af valg af analyseparametre være afgørende for udfaldet. Det ses, at analyseprogrammet i én af de seks analyser finder et andet kritisk bånd ($f_{c,krit} = 741$ Hz, se Figur 4) som det mest dominerende bånd, hvilket adskiller sig fra de fem andre analyser, som finder det mest dominerende kritiske bånd ved $f_{c,krit} = 318$ Hz. Det ses også, at analysen med frekvensopløsningen 1 Hz og regressionsintervallet = 1,5 gange det kritiske bånd giver den største værdi for kriteriestørrelsen ($\Delta L_{ts} = 7,8$ dB, $f_{c,krit} = 318$ Hz). Da det kritiske bånd omkring 318 Hz er mest robust over for ændrin-

ger i analyseparametre vil det være rimeligt at angive dette som det udslagsgivende. Det er i øvrigt også dét resultat, man får med den anbefalede frekvensopløsning på 3 Hz og et regressionsinterval på 1,5 gange det kritiske bånd.

Når støjen indeholder et stort antal fremtrædende toner, som det er tilfældet med kompressoren i lydoptagelsen fra den 19. sammenlignende støjmåling, kan valget af frekvensopløsning og regressionsinterval være afgørende for beliggenheden af det mest dominerende kritiske bånd. Det er derfor vigtigt visuelt at inspicere, om regressionslinjen er korrekt placeret, og det anbefales at benytte en frekvensopløsning på 3 Hz, hvor det er muligt dels fordi denne frekvensopløsning erfaringsmæssigt har vist sig at give pålidelige resultater, dels for at skabe ensartethed mellem støjlaboratoriets resultater.



Figur 4

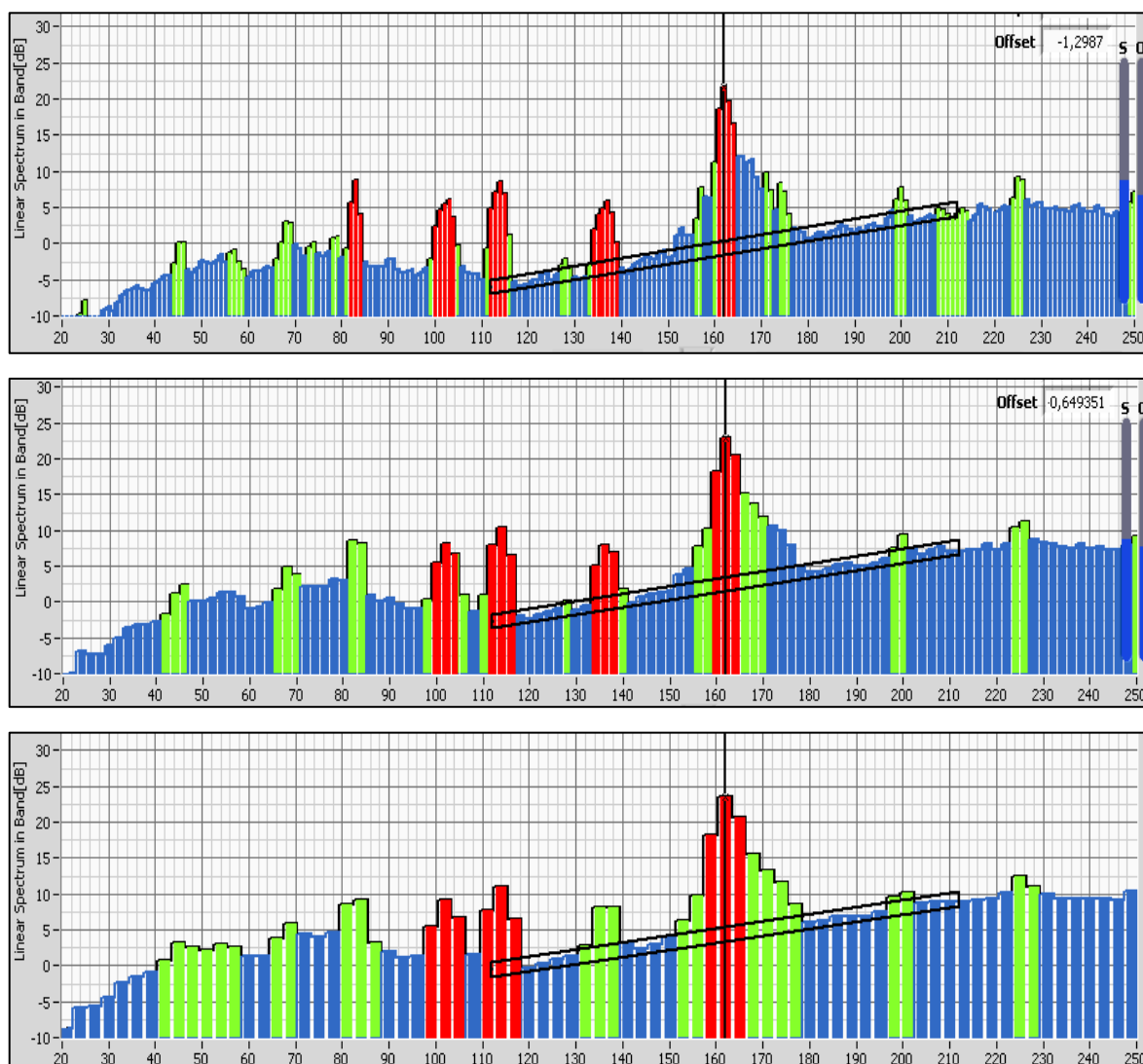
Toneanalyse af lydeksempel fra den 19. sammenlignende støjmåling (Opgave A). Den vandrette akse er frekvensen i Hz, den lodrette akse er lydtrykniveauet i dB pr. analysebåndbredde.

Analysen er foretaget med Hanning-tidsvindue. Analysebåndbredde (frekvensopløsning) $\Delta f = 3$ Hz. Tonesøgekriterie $\Delta = 1$ dB. Regressionsinterval = $1,0 \times$ kritisk båndbredde.

$f_{c,krit} = 741$ Hz.

Bilag B – Toneanalyse af opgave fra den 20. sammenlignende støjmåling

Den 20. sammenlignende støjmåling indeholdt en A-vægtet optagelse af støjen fra en husstandsvindmølle (Opgave A). På nedenstående graf er vist 3 toneanalyser af det første minut af den 10 minutter lange lydoptagelse analyseret med forskellige analysebåndbredder. Lydfilen er tilgængelig på Referencelaboratoriets hjemmeside. Optagelsen er A-vægtet på forhånd, fordi toneanalysen ifølge vindmøllebekendtgørelsen [7] skal foretages på det A-vægtede signal.



Figur 5

Grafisk afbildning af 3 toneanalyser af støjen fra en vindmølle. Støjen er A-vægtet. Den vandrette akse er frekvensen i Hz, den lodrette akse er lydtrykniveauet i dB pr. analysebåndbredde. Frekvensopløsningen er henholdsvis 1 Hz, 2 Hz og 3 Hz på graferne oppe fra og ned. I Tabel 3 er angivet de tilsvarende analyseresultater. $f_{c,krit} = 162$ Hz.

Det fremgår af Figur 5, at der er anvendt et regressionsinterval, der har samme bredde som det kritiske bånd. Det er ikke fundet nødvendigt, at ”klappe vingerne ud” og dermed anvende et større regressionsområde, fordi kurveforløbet af støjen i det kritiske bånd er tilstrækkeligt tydeligt til, at man kan fastlægge en fornuftig regression på basis af linjerne indenfor båndet. Faktisk bør kurveforløbet til venstre for det kritiske bånd i Figur 5 ikke anvendes, fordi det ikke er repræsentativt for baggrundsstøjens forløb indenfor det kritiske bånd.

Lydeksempel	20. sammenlignende støjmåling (støj fra vindmølle)		
Analysebåndbredde	1 Hz	2 Hz	3 Hz
Regressionsinterval	1,0 x kritisk bånd	1,0 x kritisk bånd	1,0 x kritisk bånd
Dominerende kritisk bånd	112 Hz – 212 Hz	112 Hz – 212 Hz	112 Hz – 212 Hz
Bredde af kritisk bånd	100 Hz	100 Hz	100 Hz
Centerfrekvens, $f_{c,krit}$	162 Hz	162 Hz	162 Hz
Toner i kritisk bånd:	Frekvens / $L_{p, tone}$ (nr. i)		
Tone nr. 1	162 Hz / 23,7 dB	162 Hz / 23,9 dB	162 Hz / 24,4 dB
Tone nr. 2	114 Hz / 11,2 dB	114 Hz / 11,6 dB	114 Hz / 11,8 dB
Tone nr. 3	137 Hz / 9,9 dB	136 Hz / 9,7 dB	-
$L_{p, tone}$	24,1 dB	24,3 dB	24,6 dB
$L_{p, krit. støj}$	18,6 dB	18,6 dB	18,5 dB
ΔL_{ts}	5,5 dB	5,7 dB	6,1 dB
Kriterieværdi, $\Delta L_{ts, kriterie}$	4,5 dB	4,5 dB	4,5 dB
Tonetillæg, K	5 dB	5 dB	5 dB

Tabel 3

Analyse af lydeksempel fra den 20. sammenlignende støjmåling

(Vindmøllestøj, opgave A – det første minut) Analyseret med henh. 1 Hz, 2 Hz og 3 Hz analysebåndbredde (frekvensopløsning). Regressionsinterval = 1 x bredden af det kritiske bånd.

Det ses af Tabel 3, at valget af analyseparametre har en forholdsvis lille indflydelse på resultatet af ΔL_{ts} . Variationen er ca. 0,6 dB. I dette tilfælde får det ingen indflydelse på tildelingen af 5 dB-tillægget.

Bilag C – ISO 1996-2 metoden

Indholdet af ISO 1996-2 Annex C [4] blev gennemgået i Referencelaboratoriets Orientering nr. 31/2001 [3] og forskellene fra den danske metode blev fremhævet med gråt i orienteringens tekst.

Nedenstående skema er en oversigt over de forskellige parametre og betegnelser, der benyttes i henholdsvis den danske toneanalysemetode og ISO-metoden.

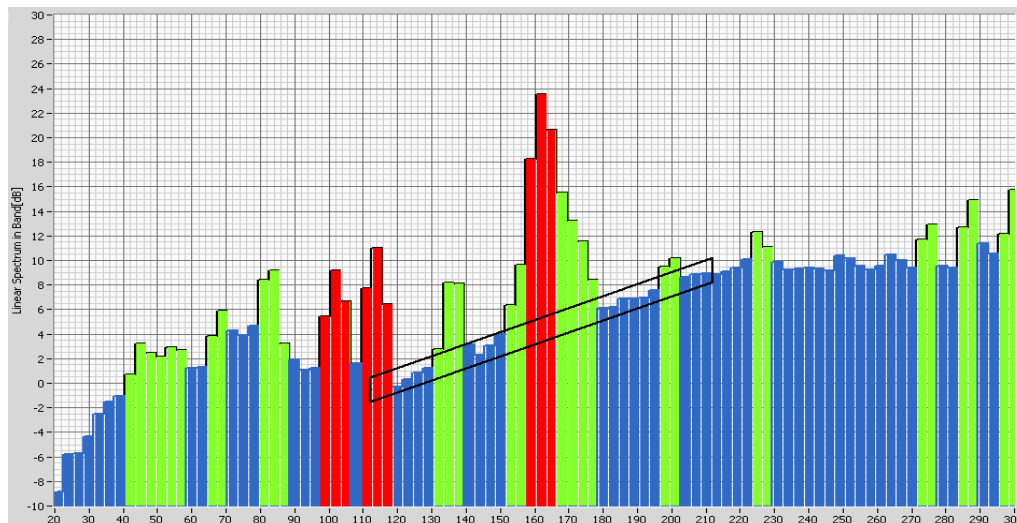
Vindmøllebekendtgørelsen nr. 1284 af 15. december 2011 foreskriver brugen af den danske toneanalysemetode (JNM) med følgende afvigelser: Analysen skal foretages på A-vægtede spektre af sammenlagt mindst 1 minut varighed (som i ISO-metoden).

	Den danske metode (JNM)	ISO 1996-2, Annex C
Frekvensvægtning	Lineær	A-vægtning
Midlingstid	Ikke angivet, ca. et minut anbefales. Hvis varierende toneniveau bruges $L_{p,max,FAST}$	Langtidsmidling (mindst 1 minut)
Tidsvægtning	Lineær	Lineær
Tidsvindue	Ikke angivet (Hanning anbefales)	Hanning vægtning
Centerfrekvens	$f_{c,krit.}$ (Laveste = 70 Hz)	f_c (Laveste = 50 Hz)
Toneniveau (sum)	$L_{p, tone}$	L_{pt}
Middelstøjniveauet	$L_{p, støj, middel}$	$L_{pn, avg}$
Maskerende støj	$L_{p, krit. bånd}$	L_{pn}
Tonernes hørbarhed	Kriteriestørrelsen (tone/støj-forholdet) $\Delta L_{ts} = L_{p, tone} - L_{p, krit. bånd}$	Tone audibility (tonetydelighed over maskeringstærsklen, MT) $\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log \left(1 + \left(\frac{f_c}{502} \right)^{2,5} \right)$
Kriterieværdi	$\Delta L_{ts, kriterie} = 4,5 - \log \left(1 + \left(\frac{f_{c, krit.}}{502} \right)^{2,5} \right)$	-
Tonetillæg	$\Delta L_{ts} \geq \Delta L_{ts, kriterie}$: K = 5 dB $\Delta L_{ts} < \Delta L_{ts, kriterie}$: K = 0 dB	K_T gradueret fra 0 til 6 dB afhængig af størrelsen af ΔL_{ta} : 10 dB < ΔL_{ta} : $K_T = 6$ dB 4 dB ≤ ΔL_{ta} ≤ 10 dB : $K_T = \Delta L_{ta} - 4$ dB $\Delta L_{ta} < 4$ dB : $K_T = 0$ dB

Tabel 4

Parametre og betegnelser der benyttes i henholdsvis den danske toneanalysemetode (Joint Nordic Method) og den europæiske standard ISO 1996-2, Annex C.

Bilag D – Eksempel på dokumentation af toneanalyse



Måleobjekt	Vindmølleoptagelse til 20. sammenlignende støjmåling		
Måledato	23. maj 2012		
Analyseværktøj	NoiseLAB version 3.0.17, NoiseLAB Batchprocessor 3.1.1.4		
Måleforskrift	Vindmøllebekendtgørelsen nr. 1284 af 15. december 2011		
Analyseparametre			
Måletidsrum	1 minut		
Tidsvægtning	Hanning		
Frekvensvægtning	A		
Analysebandbredde	3 Hz		
Beregning af tonehørbarhed			
Regressionsinterval	1,0 x kritisk bånd		
Dominerende kritisk bånd	112 Hz – 212 Hz		
Bredde af kritisk bånd	100 Hz		
Centerfrekvens, $f_{c,krit}$	162 Hz		
Toner i kritisk bånd:	Frekvens	$L_{p, tone}$ (nr. i)	
Tone nr. 1	162 Hz	24,4 dB	
Tone nr. 2	114 Hz	11,8 dB	
	$L_{p, tone}$	24,6 dB	
	$L_{p, krit. støj}$	18,5 dB	
	ΔL_{ts}	6,1 dB	
Kriterieværdi, $\Delta L_{ts, kriterie}$	4,5 dB		
Tonetillæg		5 dB	
Andre kritiske bånd med tonetillæg ($f_{c, krit}$):		Ingen	