

# ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

## Forslag til revideret objektiv metode til bestemmelse af tydeligheden af toner i støj

Orientering nr. 31

Torben Holm Pedersen/JK/lm

2001-02-06

- FORSLAG TIL REVISION AF NUVÆRENDE METODE
- PRÆCISERINGER SOM KAN BRUGES ALLEREDE NU
- ÆNDRINGER SOM IKKE KAN TAGES I ANVENDELSE ENDNU
- KRAV TIL DOKUMENTATION
- BEGRUNDELSER FOR ÆNDRINGERNE

### Indhold

<b>1. Introduktion .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Metode.....</b>	<b>7</b>
2.1 Frekvensanalyse.....	7
2.2 Bestemmelse af lydtrykniveauer.....	8
2.3 Beregning af tonernes tydelighed, $\Delta L_{ta}$ , og tillægget, $K_T$ .....	10
<b>3. Dokumentation.....</b>	<b>11</b>
3.1 Frekvensanalysen.....	11
3.2 Beregningerne i det afgørende kritiske bånd .....	11
<b>4. Generelt overblik .....</b>	<b>12</b>
4.1 Støjpauser .....	13
4.2 Toner.....	14
4.3 Maskerende støj .....	14
<b>5. Eksempler .....</b>	<b>15</b>
<b>6. Referencer.....</b>	<b>17</b>
<b>Appendix: Begrundelser for nogle af de indførte ændringer.....</b>	<b>18</b>

---

Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Støjmålinger  
c/o DELTA Dansk Elektronik, Lys & Akustik – Bygning 356 – Akademivej – 2800 Kgs. Lyngby  
Tel.: 45 93 12 11 – Fax: 45 93 19 90 – www.delta.dk/reflab

## Indledning

Støj med indhold af tydeligt hørbare toner opfattes som mere generende end tilsvarende støj uden toner. For at kompensere for denne ekstra gene gives et tillæg til de målte støjniveauer ( $L_{Aeq}$ -værdier). Selv om udgangspunktet er subjektivt, er det ønskeligt med et objektivt grundlag for administration af tillægget. For at give meningsfulde resultater skal det objektive grundlag være i overensstemmelse med gennemsnittet af subjektive vurderinger.

En målemetode, der opfylder dette, blev offentliggjort i 1978 [1], og metoden blev i nogle år brugt som støtte for de subjektive vurderinger, der udgjorde det officielle grundlag for administration af tillægget. På baggrund af de praktiske erfaringer med metoden blev den formuleret som en del af det nugældende vejledningssystem, helt konkret som Afsnit 7 i vejledning nr. 6/1984 [2].

Sammenlignende målinger og praktiske analyser afslørede et behov for uddybning af beskrivelsen af metoden i vejledningens Afsnit 7 og et behov for praktiske anvisninger på udførelse af frekvensanalyser. Derfor udsendte Referencelaboratoriet i 1991 Orientering nr. 13 om måling af hørbare toner i støj [3].

Ideelt set skal målemetoden give samme resultater, når forskellige måleinstanser bruger metoden. Det har vist sig problematisk for toner med varierende niveau, specielt i forbindelse med støj fra vindmøller. Ifølge metoden skal man i sådanne tilfælde fastlægge toneniveauet som en middelværdi af mindst fem forekomster af maksimalværdien  $L_{pAmax}$  (maksimalværdier af det A-vægtede lydtrykniveau målt med tidsvægtning F), jf. [3], side 8. Der er to problemer med dette: For det første er resultatet af en sådan måling ikke det, der i statistikken hedder en central estimator. Det betyder i praksis, at resultatet kan ændre sig i stedet for at stabilisere sig, jo længere måletidsrum (med samme driftstilstand af kilden) man benytter. For det andet har der vist sig forskellige praktiske problemer med tilnærmelsen til tidskonstanten F i forbindelse med FFT-analyse.

Da netop denne problematik er væsentlig i forbindelse med udnyttelse af vindkraft og deklaration af støj fra vindmøller, gennemførte DELTA et projekt for Energistyrelsen med det formål at definere en målemetode for toner i støj fra vindmøller [4]. I forbindelse med projektet blev der udviklet en dynamisk metode, der løbende kunne angive tydeligheden af toner i støjen. Forskellige typer støj blev analyseret efter den dynamiske metode, og støjeksemplerne, herunder vindmøllestøj med varierende toneindhold, blev præsenteret i en lyttetest. Den dynamiske metode gav gode resultater. Dog viste en forenklet version (lang integrationstid i stedet for de 5 maksimalværdier) af den nugældende metode at give tilsvarende gode resultater ved sammenligning med lyttetesten. Uanset at den dynamiske metode i visse sammenhænge kunne være interessant, blev arbejdet koncentreret om en forenklet version af den nugældende metode.

Metoden blev kaldt ”Joint Nordic Method – Version 2” og blev i en form egnet til standardisering præsenteret for arbejdsgruppen ISO TC43/SC1/WG45, som arbejder med revision af ISO

1996 om ekstern støj. Forslaget blev vel modtaget og er sendt til høring i medlemslandene. Metoden er desuden offentliggjort ved Inter-Noise 2000 [5].

Denne orientering fra Referencelaboratoriet gengiver en dansk version af ”Fælles nordisk metode – Version 2”. Den engelske tekst blev udleveret til deltagerne på Referencelaboratoriets emnedag den 4. april 2000, hvor også en del af baggrunden blev gennemgået, men Referencelaboratoriets styringsgruppe har vurderet, at det er væsentligt, at metoden udkommer på dansk i form af denne ”Orientering”.

## Vigtigt!

Det skal understreges, at den gældende metode stadig er den, der er beskrevet i [2] og [3]. I disse referencer er det anført, hvorledes målinger udføres i felten, og hvordan analyserne i laboratoriet skal udføres.

Forslaget til revisionen af den gældende metode indeholder dels præciseringer, som også er relevante for den nugældende metode, og dels ændringsforslag, som ikke må tages i anvendelse, før metoden evt. bliver officielt anerkendt af Miljøstyrelsen som den gældende metode.

Ændringer, som ikke må tages i anvendelse endnu, er markeret med grå baggrund!

## Om den reviderede metode og dens baggrund

Metoden baserer sig på anvendelsen af kritiske bånd efter Zwicker. En nærmere beskrivelse af metodens psykoakustiske baggrund kan f.eks. findes i [6].

Metoden er et forslag til revision af den nugældende fælles nordiske metode og følger samme principper. Ifølge denne gives et 5 dB-tillæg til det ækvivalente A-vægtede støjniveau, når støjen indeholder tydeligt hørbare toner, for at bestemme støjbelastningen. Stationære og ikke stationære toner analyseres forskelligt. Metoden anbefales brugt ved alle målinger i forbindelse med forvaltningen af ekstern støj.

De væsentligste problemer med den nuværende metode er følgende:

- Resultaterne fra flere sammenlignende målinger har vist, at selv om nøjagtigheden generelt er tilfredsstillende, er der større forskelle mellem resultater fra forskellige laboratorier for varierende end for stationære toner.
- Metoden afspejler ikke de store forskelle i høretærsklen inden for det laveste kritiske bånd, hvilket i nogle tilfælde har givet resultater, der må formodes at afvige fra den opfattede støj.
- Det faste 5 dB-tillæg forøger måleubestemtheden drastisk i grænsetilfælde (en minimal ændring kan udløse et 5 dB-tillæg) og svarer ikke til den subjektive opfattelse af toner med lille forskel i tydelighed.
- Tone- og støjniveauer er ikke defineret så præcist, at metoden er egnet til automatisering.

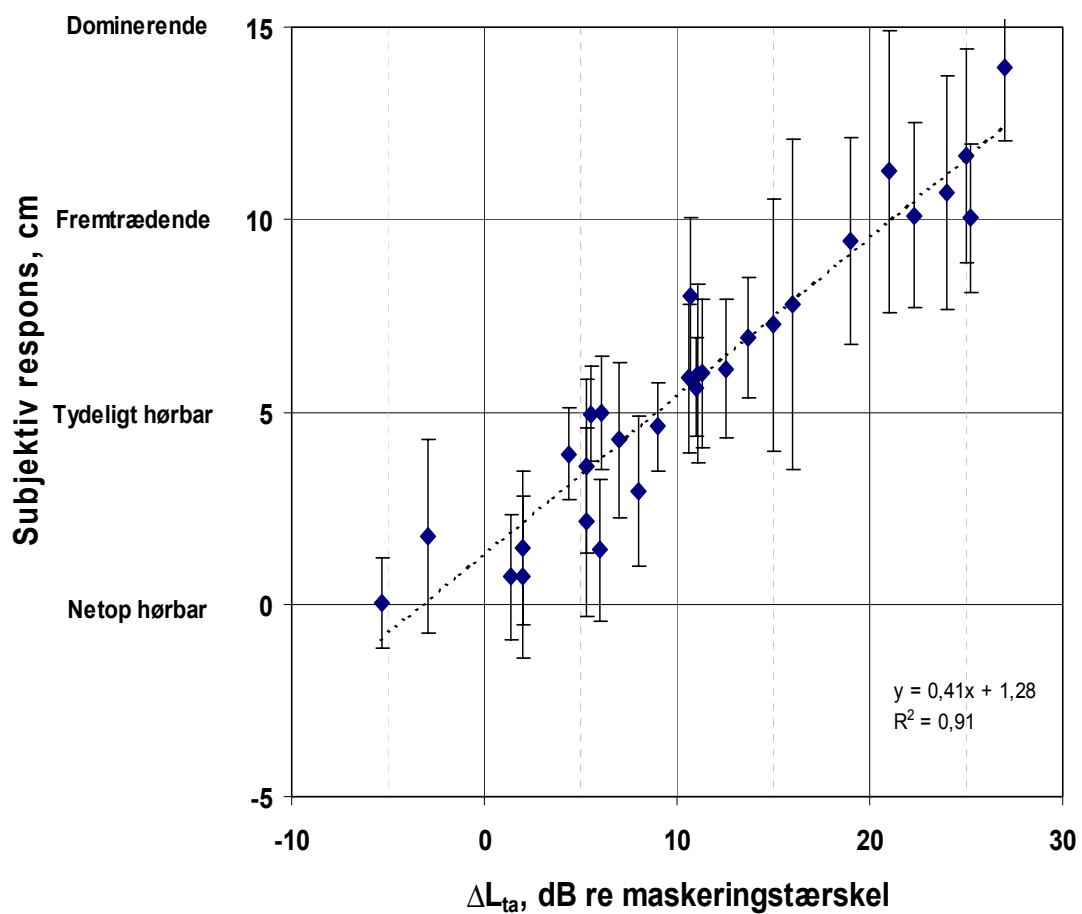
For at håndtere disse problemer er der indført følgende større ændringer i ”Fælles nordisk metode – Version 2”:

1. Den reviderede metode tager udgangspunkt i det A-vægtede frekvensspektrum af lydtrykniveauet målt med lang integrationstid (mindst et minut).
2. Stationære og ikke-stationære tilfælde analyseres principielt på samme måde (langtidsmidling).
3. Et gradueret 0-6 dB-tillæg erstatter det faste 5 dB-tillæg.
4. Præcise definitioner af tone- og støjniveauer er inkluderet i metoden.

Lyttetest har vist god korrelation (andel forklaret varians  $R^2 = 0,91$ ) mellem subjektive vurderinger af tonernes hørbarhed og resultater af analyser efter den reviderede metode, både for stationære og ikke-stationære toner og støj.

Metoden er testet i to omgange: Først vurderede 10 personer hørbarheden af tonerne i 17 forskellige støjeksempler. Disse eksempler var udendørs kunsthovedoptagelser af støj fra et vandværk med toner i (i frekvensområdet 70-7000 Hz), udsendt af en højttaler placeret på vandvær-

ket. Støjen fra selve vandværket var stationær og bredbåndet. I anden runde vurderede 13 personer hørbarheden af tonerne i 14 andre eksempler (mono-optagelser). Disse bestod dels af syntetisk støj samt optagelser af virksomhedsstøj, dels af støj fra vindmøller. I de fleste af eksemplerne varierede både tone- og støjniveau. I figuren nedenfor er resultaterne fra begge forsøg sammenstillet.



*Subjektive vurderinger af toner i støj. X-aksen angiver tonernes hørbarhed,  $\Delta L_{ta}$  i dB over medhørstærsklen bestemt efter "Fælles nordisk metode – Version 2". Hvert punkt i diagrammet angiver gennemsnittet af de subjektive vurderinger, og de lodrette liniestykker angiver  $\pm$  standardafvigelsen.*

## Oversigt over metoden

Beskrivelsen af metoden falder i tre dele:

### **Del 1: Generel procedure baseret på en visuel inspektion af et frekvensspektrum, Afsnit 1-3**

Afsnit 1-3 er den generelle del, og ved ”manuelle” analyser er de øvrige dele normalt ikke nødvendige.

### **Del 2: Uddybende definitioner af tone- og støjniveau, Afsnit 4**

Her gives mere omfattende definitioner af toner og støj egnet for computerfortolkninger af de målte spektra.

### **Del 3: Eksempler, Afsnit 5**

Formålet med denne del er at gøre metoden mere tydelig og forebygge fejltolkning af frekvensspektra.

## Objektiv metode til bestemmelse af tydeligheden af toner i støj

### Del 1: Generel procedure baseret på visuel inspektion af et frekvensspektrum

#### 1. Introduktion

Målet er at bestemme tydeligheden af toner i overensstemmelse med gennemsnitlige subjektive vurderinger. Metoden baserer sig på begrebet kritiske bånd, som er frekvensbånd defineret på en sådan måde, at toner uden for et kritisk bånd ikke bidrager signifikant til hørbarheden af toner inden for båndet.

Metoden indeholder procedurer for stationære og for varierende toner, for smalbandsstøj samt for lavfrekvente toner, og resultatet er et graderet tillæg på mellem 0 og 6 dB.

#### 2. Metode

Metoden har tre trin:

1. Smalbåndsfrekvensanalyse (FFT-analyse foretrækkes)
2. Bestemmelse af midlede lydtrykniveauer for tone(r) og maskerende støj inden for et kritisk bånd omkring tonen/tonerne
3. Beregning af tonernes tydelighed,  $\Delta L_{ta}$  og tillægget,  $K_T$

##### 2.1 Frekvensanalyse

Det A-vægtede smalbandspektrum fastlægges ved lineær midling i mindst et minut (langtidsmidling).

Den effektive analysebåndbredde skal være mindre end 5% af bredden af det kritiske bånd med tonekomponenter. Bredden af de kritiske bånd er givet i Tabel 1.

Frekvensanalysatoren skal kalibreres i dB re 20  $\mu$ Pa, og det anbefales at bruge Hanning-vægtning.

Noter:

- 1) Med det anbefalede Hanning tidsvindue er den effektive analysebåndbredde 1,5 gange frekvensopløsningen. Frekvensopløsningen er afstanden mellem spektrets linier.
- 2) Med en effektiv analysebåndbredde på 5% af et kritisk bånd vil netop hørbare toner normalt ses som lokale maksima på mindst 8 dB over den omgivende støj i det midlede spektrum.
- 3) I sjældne tilfælde med kompleks af mange tætliggende toner kan en finere opløsning (mindre båndbredde) være nødvendig for at bestemme niveauet af den maskerende støj korrekt.
- 4) Hvis frekvensen af hørbare toner inden for midlingstiden varierer mere end 10% af bredden af det aktuelle kritiske bånd, kan det være nødvendigt at underdele langtidsmidlingen i et antal midlinger med kortere varighed.

## 2.2 Bestemmelse af lydtrykniveauer

### 2.2.1 Lydtrykniveau af toner, $L_{pt}$

Tonerne identificeres ved visuel inspektion af smalbåndsspektret, og lydtrykniveauet af tonerne fastlægges ud fra spektret<sup>1)</sup>.

Alle lokale maksima med en 3 dB-båndbredde, der er mindre end 10% af båndbredden af det aktuelle kritiske bånd, betragtes som en tone.

Niveauerne,  $L_{pti}$ , af alle toner nr. i inden for det samme kritiske bånd skal adderes på energibasis for at give det totale toneniveau i dette bånd,  $L_{pt}$ :

$$L_{pt} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_{pti}}{10}} \quad (1)$$

Noter:

- 1) Hvis en "tone" faktisk er smalbåndsstøj, eller hvis frekvensen af tonen varierer, vil tonen vise sig som et antal linier i det midlede spektrum. I sådanne tilfælde er  $L_{pti}$  energisummen af alle linier med niveauer inden for 6 dB af det lokale maksimum, korrigeret for indflydelsen af den anvendte vinduesfunktion (for Hanning-vinduet er dette energisummen minus 1,8 dB), se også Afsnit 4.2.
- 2) I tilfælde hvor toner optræder ved lave frekvenser, er det tilrådeligt at undersøge, om det totale toneniveau er over høretærsklen (se ISO 226, 1987). Hvis det totale toneniveau i et kritisk bånd er under høretærsklen, skal der ses bort fra dette kritiske bånd ved fastlæggelse af tillægget for toners hørbarehed.

<sup>1)</sup> Denne beskrivelse forudsætter kendskab til frekvensanalyse. For bestemmelse af toneniveauer, se f.eks. [3], side 23-24.



## 2.2.2 Båndbredde og centerfrekvens for kritiske bånd

Båndbredderne af kritiske bånd er vist i Tabel 1.

Centerfrekvens, $f_c$ [Hz]	50-500	Over 500
Båndbredde [Hz]	100	20% af $f_c$

**Tabel 1**

*Bredden af kritiske bånd.*

De kritiske bånd skal placeres med centerfrekvens,  $f_c$ , lig med tonefrekvensen. I nogle tilfælde er der flere toner i spektret. Hvis flere eller alle tonerne kan være inden for det samme kritiske bånd, skal det kritiske bånd placeres symmetrisk omkring de mest signifikante toner på en sådan måde, at forskellen mellem det totale toneniveau,  $L_{pt}$ , og niveauet af den maskerende støj,  $L_{pn}$ , (se Afsnit 2.2.3) bliver størst muligt.

Noter:

- 1) Med henblik på fastsættelse af centerfrekvensen af det kritiske bånd,  $f_c$ , anses kun toner indenfor 10 dB fra tonen med det højeste niveau som signifikante.
- 2) Centerfrekvensen af de kritiske bånd er ikke bundet til bestemte værdier.
- 3) Det laveste kritiske bånd er 0 Hz - 100 Hz.

## 2.2.3 Lydtrykniveau af den maskerende støj i et kritisk bånd, $L_{pn}$

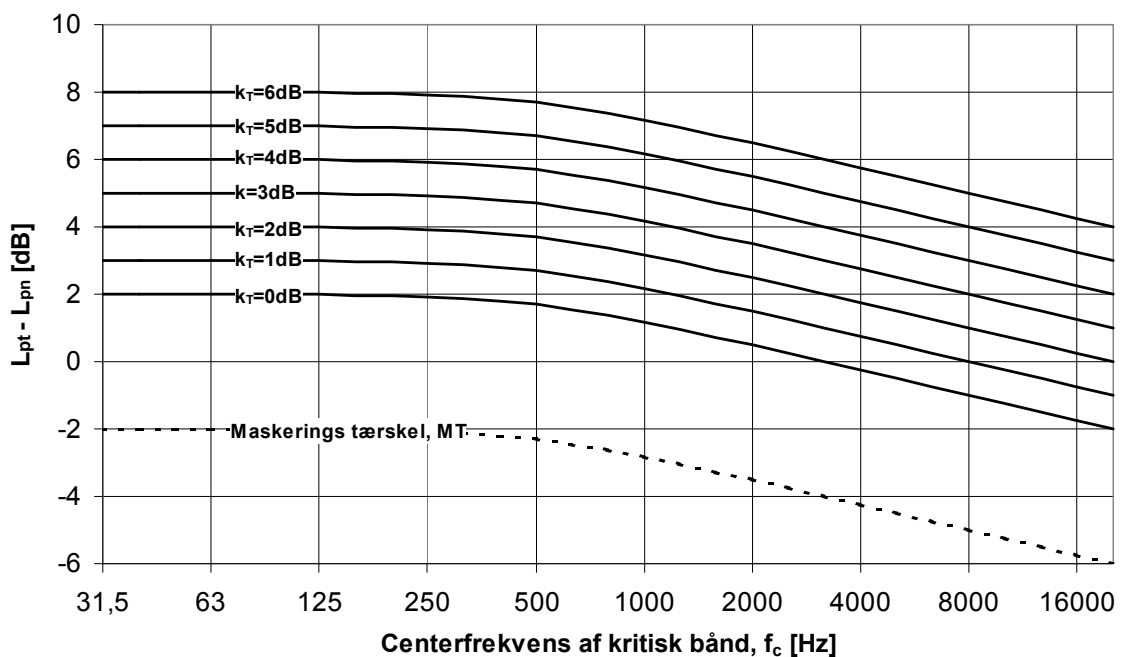
Middelstøjniveauet i et kritisk bånd,  $L_{pn,avg}$ , kan findes ved visuel midling af niveauerne af spektrets ”støjlinier” inden for et område på mellem  $\pm 0,5$  og  $\pm 1$  kritisk bånd omkring centerfrekvensen,  $f_c$ . ”Støjlinierne” findes ved at se bort fra alle maksima i spektret som skyldes toner og deres eventuelle sidebånd i det pågældende område.

Det totale lydtrykniveau af den maskerende støj i et kritisk bånd,  $L_{pn}$  beregnes ud fra middelstøjniveauet i samme kritiske bånd,  $L_{pn,avg}$ , som følger:

$$L_{pn} = L_{pn,avg} + 10 \log \frac{\text{Båndbredde af kritisk bånd}}{\text{Effektiv analysebåndbredde}} \quad (2)$$

### 2.3 Beregning af tonernes tydelighed, $\Delta L_{ta}$ , og tillægget, $K_T$

Tonernes tydelighed,  $\Delta L_{ta}$ , udtrykkes i dB over medhørstærsklen, MT. Tillægget,  $K_T$ , er den størrelse, der adderes til  $L_{Aeq}$  for et tidsrum for at få den tonekorrigerede støjbelastning i dette tidsrum. Ud fra forskellen mellem niveauet af tone og støj i et kritisk bånd,  $L_{pt} - L_{pn}$ , kan både  $\Delta L_{ta}$  og  $K_T$  bestemmes ved hjælp af Figur 1.



**Figur 1**

Maskeringstærskel, MT, og kurver til bestemmelse af tillægget,  $K_T$ .  $L_{pt}$  er det totale lydtrykniveau af tonerne i et kritisk bånd, og  $L_{pn}$  er det totale lydtrykniveau af den maskerende støj i samme bånd.

Tydigheden af tonerne i et kritisk bånd kan beregnes ved hjælp af ligning (3):

$$\Delta L_{ta} = L_{pt} - L_{pn} + 2 + \log \left( 1 + \left( \frac{f_c}{502} \right)^{2.5} \right), \text{ dB re MT} \quad (3)$$

hvor  $L_{pt}$  er det totale lydtrykniveau af tonerne i det kritiske bånd,

$L_{pn}$  er det totale lydtrykniveau af den maskerende støj i det kritiske bånd, og

$f_c$  er centerfrekvensen i Hz af det kritiske bånd.

Tillægget,  $K_T$ , i dB kan bestemmes ud fra udtrykket (4):

$10 \text{ dB} < \Delta L_{ta}$ :	$K_T = 6 \text{ dB}$	}	<b>(4)</b>
$4 \text{ dB} \leq \Delta L_{ta} \leq 10 \text{ dB}$ :	$K_T = \Delta L_{ta} - 4 \text{ dB}$		
$\Delta L_{ta} < 4 \text{ dB}$ :	$K_T = 0 \text{ dB}$		

Note:  $K_T$  er ikke begrænset til heltallige værdier.

Hvis der i samme tidsrum optræder flere toner (eller grupper af toner) i forskellige kritiske bånd, skal der foretages særskilte beregninger for hvert af disse bånd. Det kritiske bånd, der indeholder de(n) tydeligste tone(r) (dvs. det, der giver den højeste værdi af  $\Delta L_{ta}$ ), er afgørende for  $\Delta L_{ta}$  og for tillægget,  $K_T$ , i tidsrummet.

### 3. Dokumentation

Toneanalysen skal dokumenteres ved følgende:

#### 3.1 Frekvensanalysen

- Måletidsrum, antal spektra/midlingstid og effektiv analysebåndbredde
- Tidsvindue (f.eks. Hanning), tidsvægtning (Lin) og frekvensvægtning (A)
- Et typisk spektrum med indikation af beliggenheden af det afgørende kritiske bånd og middelstøjniveauet i det bånd

#### 3.2 Beregningerne i det afgørende kritiske bånd

- Angiv, om resultaterne er opnået ved visuel midling eller ved automatisk beregning.
- Grænsefrekvenser for det kritiske bånd og området for visuel midling eller lineær regression (se Afsnit 4.3).
- Frekvenser og niveauer af tonerne og det totale toneniveau,  $L_{pti}$  og  $L_{pt}$ , i dB re 20  $\mu\text{Pa}$ .
- Niveauet af den maskerende støj i det kritiske bånd,  $L_{pn}$ , i dB re 20  $\mu\text{Pa}$
- Tydeligheden af tone(r),  $\Delta L_{ta}$ , i dB over medhørstærsklen.
- Størrelsen af tillægget,  $K_T$ , i dB.

Toner i andre kritiske bånd, der kan udløse et tillæg, skal i det mindste angives ved deres frekvens.



Generel note:

Teknikeren, som udfører analysen, har det endelige ansvar for, at resultaterne er korrekte. Det er derfor vigtigt, at softwareimplementeringer gør det muligt visuelt at inspicere resultaterne. Som det mindste behøves et spektrum, hvor det angives, hvilke linier der er defineret som toner sammen med en markering af det omgivende kritiske bånd med tilhørende regressionslinie for støjen. Yderligere vil det være en hjælp med en angivelse af, hvilke linier der er karakteriseret som støj, støjpause og toner. Dette kan f.eks. ske ved brug af forskellige farver af spektrets linier som i Figur 2.

#### 4.1 Støjpauser

Støjpauser er lokale maksima i spektret med mulighed for forekomst af toner. Støjpauserne defineres og findes ud fra følgende princip:

Starten af en støjpause findes på den positive (venstre) flanke af et lokalt maksimum som linien,  $s$ , hvor følgende betingelser er opfyldt:

$$L_s - L_{s-1} \geq \Delta \text{ dB} \quad \text{OG} \quad L_{s-1} - L_{s-2} < \Delta \text{ dB} \quad (5)$$

hvor  $L_s$  er niveauet af linie nr.  $s$  og  $L_{s-1}$  er niveauet af linie nr.  $s-1$ , osv.  $\Delta$  er tonesøgekriteriet, som normalt vælges til 1 dB.

Note: For normale og jævne spektra virker tonesøgekriteriet  $\Delta = 1$  dB uden problemer. For uregelmæssige spektra (f.eks. spektra målt med kort midlingstid som omtalt i Afsnit 4.2) kan værdier op til 3 eller 4 dB give mere rigtige resultater. Det anbefales, at denne parameter er brugerdefineret i softwareimplementeringer af metoden.

Slutningen af støjpausen er fastsat på den negative (højre) flanke af det lokale maksimum, som linien,  $e$ , hvor følgende betingelser er opfyldt:

$$L_e - L_{e+1} \geq \Delta \text{ dB} \quad \text{OG} \quad L_{e+1} - L_{e+2} < \Delta \text{ dB} \quad (6)$$

Alle linierne fra og med  $s$  til og med  $e$  defineres som tilhørende en foreløbig støjpause.

Søgningen efter næste støjpause begynder med linie nr.  $e+1$ .

En støjpause kan kun indeholde én støjpause start og én støjpause slut. En procedure svarende til den ovenstående skal supplerende gennemføres ved at undersøge linierne i spektret fra høje mod lave frekvenser (baglæns procedure).

#### Resulterende støjpauser

Linier, der defineres som tilhørende foreløbige støjpauser både ved nævnte ”forlæns” og ”baglæns” procedure, udgør de resulterende støjpauser.

## 4.2 Toner

Toner findes inden for støjpauuserne. Der kan være tale om en tone, når niveauet af en linie inden for støjpausen er 6 dB eller mere over niveauet af linierne nr.  $s-1$  og  $e+1$ .

Toner er defineret i Afsnit 2.2.1. Definitionen indbefatter både toner og smalle støjbånd. Båndbredden af det fundne lokale maksimum er defineret som 3 dB-båndbredden ud fra den højeste linie i støjpausen.

Når 3 dB-båndbredden er mindre end 10% af den kritiske båndbredde, klassificeres alle linier inden for 6 dB fra det lokale maksimum som tone. Tonefrekvensen fastlægges ud fra frekvensen af linien med det højeste niveau inden for støjpausen.

Noter:

- 1) Når 3 dB-båndbredden er større end 10% af den kritiske båndbredde, betragtes linierne hverken som toner eller smalbandsstøj. Der gives ikke tillæg for et sådant fænomen, medmindre det er forårsaget af en tone med varierende frekvens. I så fald er det nødvendigt at gennemføre analysen med en kortere midlingstid.
- 2) Toner med varierende frekvens kan vise sig i det langtidsmidlede spektrum som brede maksima. Bredden af disse afhænger af variationsområdet for tonefrekvensen i midlingstiden. Når frekvensen af en tone varierer mere end 10% af bredden af det omgivende kritiske bånd inden for midlingstiden, skal der ses bort fra 10%-båndbreddereglen (se Afsnit 2.2.1), og enten skal alle linier inden for det brede maksimum klassificeres som toner, eller også skal der bruges kortere midlingstider.

## 4.3 Maskerende støj

Alle linier, som ikke er karakteriseret som tilhørende støjpauuser, defineres som maskerende støj og betegnes ”støjlinier” i Afsnit 2.2.3.

Niveauet af den maskerende støj inden for et kritisk bånd fastlægges ved 1. ordens lineær regression mellem niveauerne af alle linier, der er defineret som støj, og frekvensen. Området for regressionen vælges sædvanligvis som  $\pm 0,75$  kritisk båndbredde omkring centerfrekvensen af det kritiske bånd.

Note: For uregelmæssige spektra eller for spektra med en bred støjpause kan området for den lineære regression udvides til  $\pm 1$  eller 2 kritiske bånd, hvis dette giver bedre overensstemmelse med det generelle støjguld. Det anbefales, at området for lineær regression gøres brugerdefineret i softwareimplementeringer af metoden.

Hver spektrallinie i det kritiske bånd tilskrives niveauet,  $L_n$ , af regressionslinien. Det totale lydtrykniveau af den maskerende støj i det kritiske bånd,  $L_{pn}$ , bestemmes som energisummen af de tilskrevne niveauer,  $L_n$ , for alle spektrallinier i det kritiske bånd, korrigeret for indflydelsen af den anvendte vinduesfunktion:

$$L_{pn} = 10 \log \sum 10^{\frac{L_n}{10}} + 10 \log \frac{\text{Frekvensopløsning}}{\text{Effektiv analysebåndbredde}} \quad (7)$$

## Del 3: Praktiske eksempler

### 5. Eksempler

Eksemplerne i dette afsnit er analyseret med en automatisk procedure som følger:

- Antal spektra: 350, måletid: 2 minutter
- Hanning-vindue, lineær midling
- Effektiv analyse båndbredde: 4,39 Hz

#### Eksempel 1

Kritisk bånd: 3,6 kHz – 4,4 kHz

Toner: 4 kHz, 46,7 dB

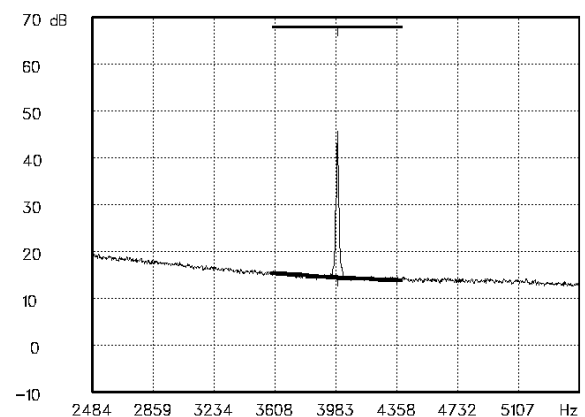
Toneniveau,  $L_{pt}$ : 46,7 dB

3 dB-båndbredde af tone: 0,5% af 800 Hz

Støj,  $L_{pn}$ , i kritisk bånd: 37,3 dB

Tydelighed af tone,  $\Delta L_{ta}$ : 13,7 dB re MT

Tillæg,  $K_T$ : 6,0 dB



#### Eksempel 2

Kritisk bånd: 380 Hz – 480 Hz

Toner: 395 Hz, 53,1 dB  
468 Hz, 47,0 dB

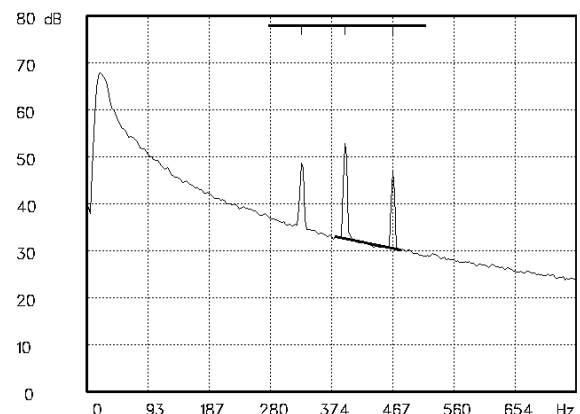
Toneniveau,  $L_{pt}$ : 54,1 dB

3 dB-båndbredde af tone: 3,1% af 100 Hz

Støj,  $L_{pn}$ , i kritisk bånd: 45,2 dB

Tydelighed af tone,  $\Delta L_{ta}$ : 11,1 dB re MT

Tillæg,  $K_T$ : 6,0 dB



*Note:* De to toner med de højeste frekvenser giver den største værdi af  $\Delta L_{ta}$ .

### Eksempel 3

Kritisk bånd: 258 Hz – 358 Hz

Toner: 278 Hz, 33,3 dB  
299 Hz, 38,4 dB  
319 Hz, 54,3 dB  
334 Hz, 37,1 dB

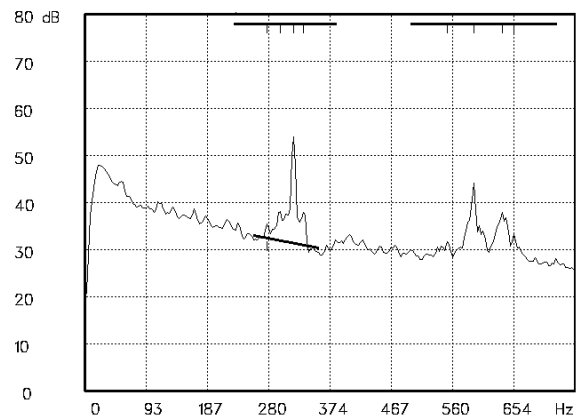
Toneniveau,  $L_{pt}$ : 54,6 dB

3 dB-båndbredde af tone: 3,4% af 100 Hz

Støj,  $L_{pn}$ , i kritisk bånd: 45,5 dB

Tydighed af tone,  $\Delta L_{ta}$ : 10,6 dB re MT

Tillæg,  $K_T$ : 6,0 dB



### Eksempel 4

Kritisk bånd: 680 Hz – 830 Hz

Variierende tone: 680-758 Hz

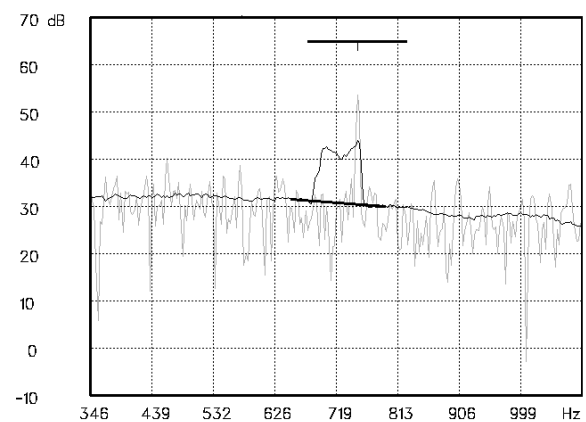
Toneniveau,  $L_{pt}$ : 53,6 dB

Støj,  $L_{pn}$ , i kritisk bånd: 45,5 dB

Tydighed af tone,  $\Delta L_{ta}$ : 10,7 dB re MT

Tillæg,  $K_T$ : 6,0 dB

*Note:* Grafen viser både et midlet spektrum og et øjebliksspektrum. Ifølge Afsnit 2.2.1 og 4.2 kan det totale toneniveau enten findes ved energisumation af linierne i det brede maksimum på det midlede spektrum eller ved midling af toneniveauerne fra et antal korttidsspektre, som tilsammen giver samme totale midlingstid.





## 6. Referencer

- [1] Torben Holm Pedersen: *Forslag til objektiv målemetode for hørbare toner i støj*, Proceedings, Nordisk Akustisk Selskabs Møde, NAM-78 p.145-148, Odense 1978.
- [2] *Måling af ekstern støj fra virksomheder*, Miljøstyrelsens vejledning nr. 6/1984, København, november 1984.
- [3] Torben Holm Pedersen: *Måling af hørbare toner i støj*, Miljøstyrelsens Referencelaboratorium for Støjmålinger, Orientering nr. 13, Kgs. Lyngby, 1991.
- [4] Morten Søndergaard, Torben Holm Pedersen og Jørgen Kragh: *Method for Assessing Tonality of Wind Turbine Noise*, DELTA Rapport AV 1940/99, Kgs. Lyngby 1999.
- [5] Torben Holm Pedersen: *Objective Method for Assessing the Audibility of Tones in Noise*, Inter-Noise 2000 proceedings & CD-ROM..
- [6] E. Zwicker & H. Fastl: *Psycho-acoustics, Facts and Models*, Springer Verlag, Berlin 1999.

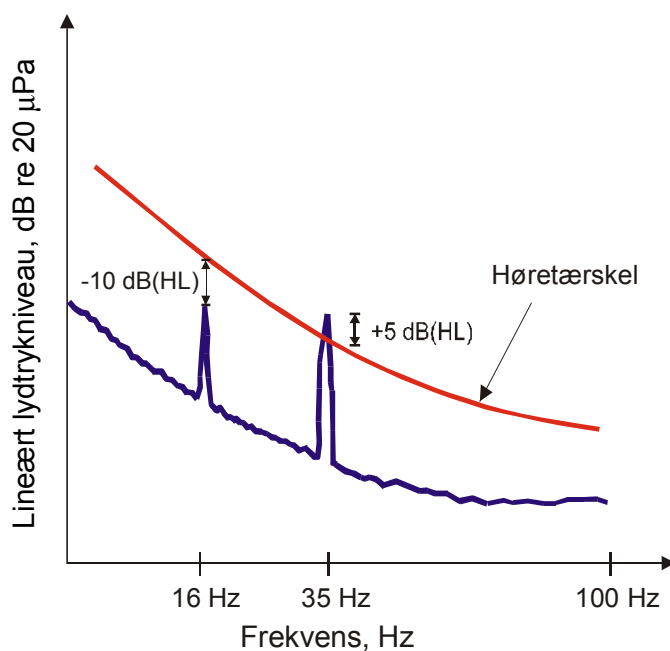
## Appendix

### Begrundelser for nogle af de indførte ændringer

#### A-vægtet spektrum

Den nugældende metode anbefaler, at man anvender lineær frekvensvægtning ved toneanalyse. Denne anbefaling skyldes, at det psykoakustiske grundlag for metoden ikke bygger på frekvensvægtede spektra. I størstedelen af frekvensområdet vil man få næsten samme tydelighed af toner, hvad enten man går ud fra et lineært eller et A-vægtet spektrum.

Det har imidlertid vist sig, at når der forekommer et antal toner i det laveste kritiske bånd (0-100 Hz), vil man kunne få resultater, der ikke er i overensstemmelse med den viden, vi har om hørelsen. Dette indses ved at betragte Figur 3.



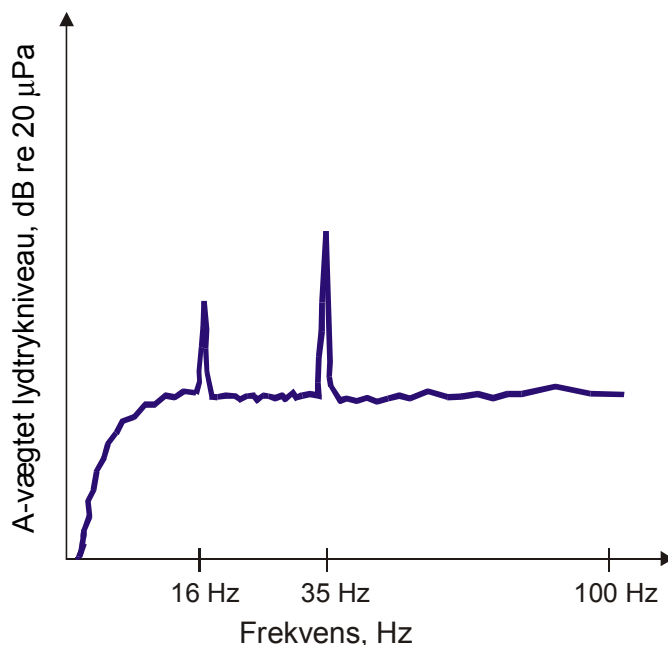
**Figur 3**

*Tænkt frekvensspektrum af støj med to lavfrekvente toner. Den viste "Høretærskel" illustrerer høretærsklen for toner, men kunne også have været en hørestyrkekurve ved f.eks. 40 phon.*

Af figuren fremgår det, at tonen ved 16 Hz høres svagere end tonen ved 35 Hz. Tilsvarende vil støjen ved 16 Hz høres svagere end støjen ved 35 Hz. Når toneanalyserne foretages med ud-

gangspunkt i et lineært spektrum, tilgodeses disse fænomener ikke. Ideelt set burde analyserne udtrykkes i termer af "sensation levels" eller lignende, men det vil gøre metoden væsentligt mere kompliceret.

Som en pragmatisk tilnærmelse og praktisk håndterbar løsning er det i den reviderede metode i stedet valgt at foretage toneanalyserne ud fra et A-vægtet spektrum. Resultatet af A-vægtningen er vist på Figur 4. Der er større overensstemmelse mellem spektrets form og den måde, man opfatter toner og støj på.



**Figur 4**  
 En A-vægtet udgave af spektret i Figur 3.

Det skal bemærkes, at brugen af A-vægtede spektra kun har været afprøvet ved toneanalyser i begrænset omfang.

### Langtidsmidling

Som omtalt i indledningen benyttes der i den reviderede metode principielt spektra målt med lang midlingstid. Den eneste undtagelse skyldes problemer med at tolke spektra med toner, hvis frekvens varierer mere end 10% af et kritisk bånd, men i sådanne tilfælde beregner man sig frem til en langtids middelværdi.

Lyttetesten [4] viste god overensstemmelse med resultater opnået efter den reviderede metode, og langtidsmidlingen gør det lettere at opnå ensartede analyseresultater ved varierende toner og støj.

### **$\Delta L_{ta}$ i stedet for $\Delta L_{ts}$**

Som det fremgår, har den tidligere så centrale størrelse,  $\Delta L_{ts}$  - forskellen mellem tone- og støjniveau - ikke så fremtrædende en plads. Den figurerer dog (indirekte) på ordinataksen af Figur 1. I stedet er indført begrebet  $\Delta L_{ta}$ , som direkte angiver tydeligheden af tonerne i et kritisk bånd. Denne størrelse vurderes at være mere sigende for ikke-specialister end forskellen mellem tone- og støjniveau.

### **Gradueret tillæg**

Det første udkast til den nugældende målemetode indeholdt et gradueret tillæg, men man var i sin tid bange for, at noget sådant ville give en for kompliceret administration. Det urimelige i et fast tillæg er anført i indledningen, og efterhånden som målemetoden er blevet rutine, er det blevet alment kendt, at det ikke er sværere at administrere et gradueret end et fast tillæg, måske snarere tværtimod.