

# ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

## MÅLEUDSTYR TIL MÅLING AF INFRALYD, LAVFREKVENT STØJ OG VIBRATIONER

Orientering nr. 28

Ole F. Carlsen/Stig Z. Jønsson/THP

1999-02-23

- VALG AF MÅLEUDSTYR
- TOLERANCER FOR MÅLEUDSTYR
- ANALYSEMETODE
- KALIBRERING
- KORREKTION FOR FREKVENSKARAKTERISTIK

1. INDLEDNING
2. MÅLEMETODE FOR MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ
  - 2.1 Måling af lavfrekvent støj
  - 2.2 Måling af infralyd
3. TOLERANCEKRAV FOR MÅLEUDSTYR TIL MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ
4. MÅLEUDSTYR TIL MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ
  - 4.1 Akustiske kalibratorer
  - 4.2 Målemikrofoner
  - 4.3 Mikrofonforstærkere
  - 4.4 Lydtrykmåler/måleforstærkere etc.
  - 4.5 Båndoptagere
  - 4.6 Frekvensanalysatorer
5. FREMGANGSMÅDE VED FREKVENSANALYSE
6. KORREKTION FOR MÅLEUDSTYRETS FREKVENSKARAKTERISTIK
7. KALIBRERING AF MÅLEUDSTYR TIL MÅLING I FREKVENSSOMRÅDET 1 Hz - 200 Hz
8. MÅLING AF VIBRATIONER I BYGNINGER
9. MÅLEUDSTYR TIL VIBRATIONSMÅLING I BYGNINGER
  - 9.1 Vibrationspickup
  - 9.2 Forforstærkere - Signalkonditionering
  - 9.3 Båndoptagere
  - 9.4 Vibrationsmetre - Analysatorer
10. KALIBRERING AF VIBRATIONSMÅLEUDSTYR

## 1. INDLEDNING

Miljøstyrelsen har udgivet "Orientering om lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø", nr. 9, 1997. Heri er givet anvisninger og råd vedrørende de forhold, man skal være opmærksom på, når det skal måles og vurderes, om der er infralyd, lavfrekvent støj eller vibrationer over de fastsatte grænser i en bolig eller anden bebyggelse. Orienteringen giver en bred dækning af alle aspekter vedrørende måling, beregning og vurdering.

Denne orientering fra Referencelaboratoriet supplerer Miljøstyrelsens vejledning med valg af måleudstyr til måling af infralyd og lavfrekvent støj. Endvidere vil måleudstyr til måling af vibrationer også blive omtalt.

## 2. MÅLEMETODE FOR MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ

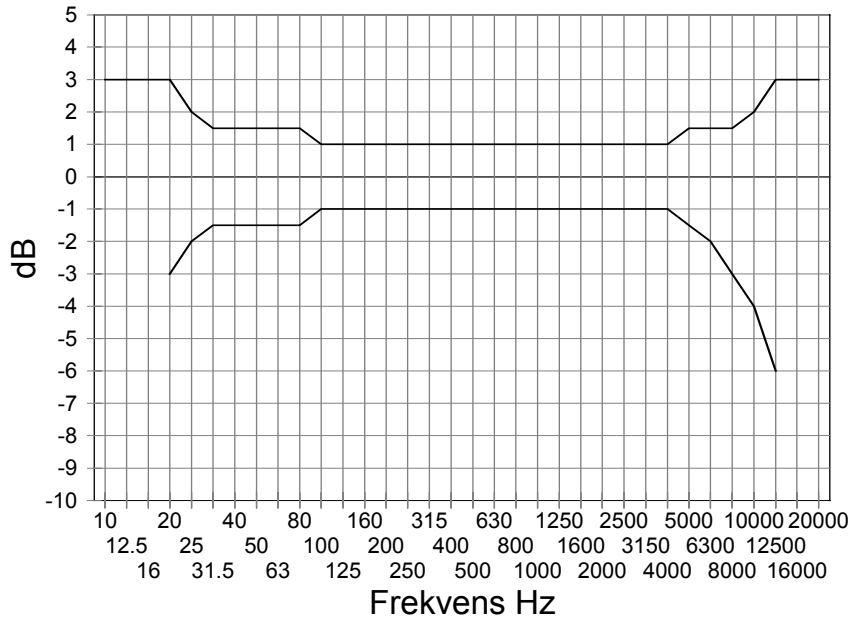
Bortset fra frekvensområdet er målemetodikken den samme ved måling af infralyd og lavfrekvent støj. Metoden er udførligt omtalt i Miljøstyrelsens orientering. Målingerne foretages indendørs i et antal målepositioner (normalt tre).

Målemetoden er baseret på frekvensanalyse af lyden, og det vil derfor i de fleste tilfælde være mest hensigtsmæssigt at optage signalet på bånd for senere analyse i laboratoriet. Optagelse i flere positioner samtidigt er det mest fordelagtige, men det er ikke en betingelse. Den samme mikrofon kan i stedet flyttes rundt til de udvalgte positioner, men den samlede måletid bliver herved længere, da kravet om minimum 5-10 minutters uforstyrret optagelse gælder hver måleposition. Det kan generelt være et problem at få uforstyrrede målinger, både fordi der er tale om lave støjniveauer nær høretærsklen, og fordi det i mange tilfælde ikke er muligt for måleteknikeren at høre lyden. Hermed kan det være vanskeligt at vurdere, om optagelsen er fri for uvedkommende støj, før den analyseres i laboratoriet.

### 2.1 Måling af lavfrekvent støj

Lavfrekvent støj er støj, hvor en væsentlig del af energien er i frekvensområdet 10-160 Hz.

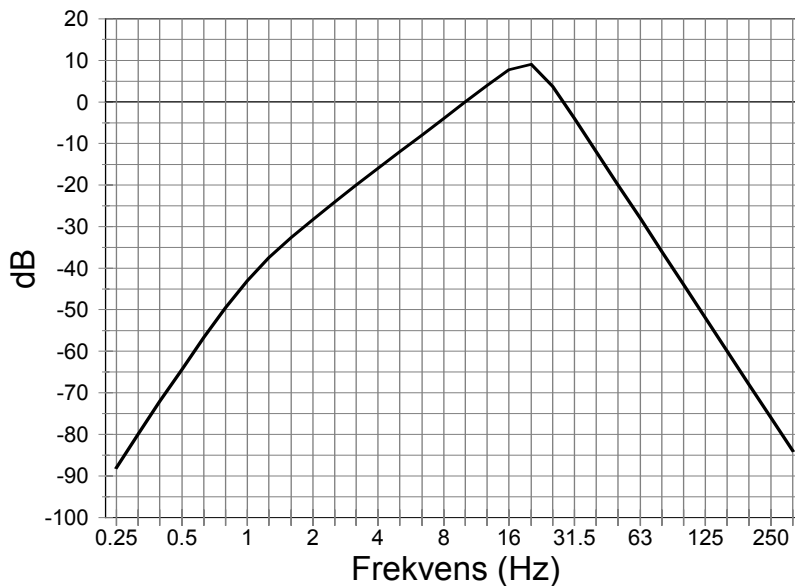
Måleresultatet angives som det A-vægtede lydtrykniveau  $L_{pA,LF}$  i frekvensområdet 10-160 Hz. Da A-filtret er specificeret i frekvensområdet 10 Hz - 20 kHz, er der i princippet ikke problemer med at måle lavfrekvent støj med almindeligt lydmåleudstyr. Man skal dog være opmærksom på, at i frekvensområdet 10 Hz - 20 Hz er kravene til frekvenskarakteristik for lydtrykmåler (IEC 651 type 1), se Figur 1, angivet med tolerancer +3 dB og  $-\infty$  dB. Det betyder teoretisk, at lydtrykmåleren kan dæmpe frekvenser under 20 Hz vilkårligt meget og alligevel overholde kravene. I praksis går det aldrig så galt, idet kravet ved 20 Hz er  $\pm 3$  dB. Det medfører, at lydtrykmåleren også vil have en vis følsomhed ved 10 Hz. Men der kan godt være en dæmpning på 5-10 dB.



**Figur 1**  
Tolerancer for lydtrykmålere IEC 651 type 1.

## 2.2 Måling af infralyd

Infralyd er lyd i frekvensområdet under 20 Hz. I ISO-standarden 7196 (1995) "Frequency weighting characteristics for infrasound measurements" specificeres et "G"-filter til måling af infralyd. Filtrets gennemgangsområde er defineret til 1-20 Hz, se Figur 2. Filtret er ikke "flat" i gennemgangsområdet, men har en stejlnhed på 40 dB pr. dekad. Uden for frekvensområdet 1-20 Hz båndbegrænses med høj- og lavpasfiltre.



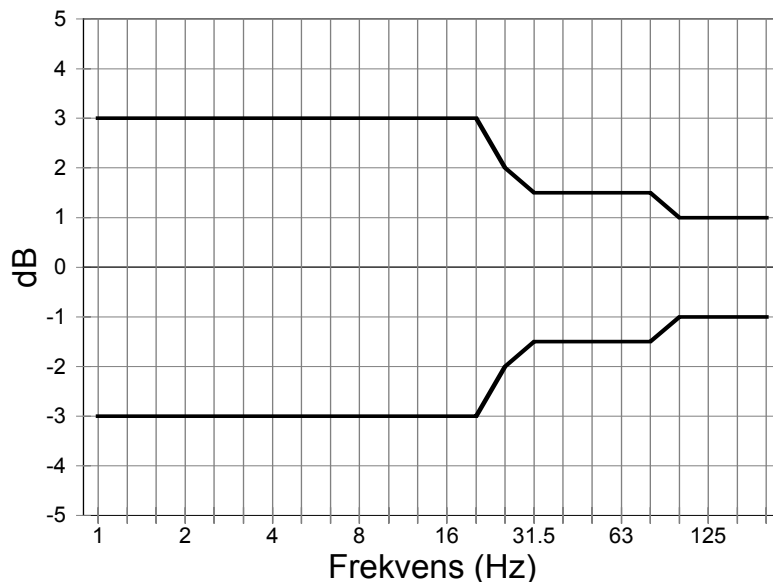
**Figur 2**  
G-filter til måling af infralyd (ISO 7196).

I Miljøstyrelsens orientering anføres, at det skønnes, at det i de fleste tilfælde ikke er nødvendigt at medtage frekvensområdet under ca. 5 Hz. Det G-vægtede niveau beregnes efter Miljøstyrelsens vejledning ud fra en frekvensanalyse af signalet i et frekvensområde, som mindst omfatter 5-20 Hz.

### 3. TOLERANCEKRAV FOR MÅLEUDSTYR TIL MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ

Der er ikke angivet krav til tolerancer på det anvendte måleudstyr i Miljøstyrelsens orientering. Den gældende IEC 651-standard for almindelige lydtrykmålere specificerer kun lydtrykmåleren i frekvensområdet over 20 Hz, se Figur 1. I frekvensområdet under 20 Hz (og over 12,5 kHz) er der kun et krav på maksimalt +3 dB afvigelse på frekvenskarakteristikken, idet en vilkårlig negativ afvigelse er tilladt. For G-filtret er der i ISO 7196 specificeret tolerancer på  $\pm 1$  dB i frekvensområdet 1-20 Hz. Disse tolerancer kan vanskeligt overholdes med det gængse støjmåleudstyr. Derfor er det fundet nødvendigt at fastlægge tolerancekrav, der sikrer, at infralyd og lavfrekvent støj måles med måleudstyr, som giver tilstrækkeligt lille målefejl til formålet.

Da måleusikkerheden ved måling af infralyd (og lavfrekvent støj) generelt er større end ved normale støjmålinger, kan det accepteres, at tolerancerne på måleudstyret er noget større end normalt. Idet IEC 651 specificerer en tolerance for type 1 lydtrykmålere på  $\pm 3$  dB ved 20 Hz, vil det være rimeligt at forlange, at tolerancen på hele målekæden er  $\pm 3$  dB i frekvensområdet 1-20 Hz og i øvrigt som IEC 651 for frekvensområdet 20-200 Hz. Tolerancer er givet i Figur 3.



**Figur 3**

*Tolerancer for måleudstyr til måling af infralyd og lavfrekvent støj.*

Til måling af lavfrekvent støj er det tilstrækkeligt, at udstyret overholder  $\pm 3$  dB ned til 10 Hz.

Såfremt udstyret ikke kan overholde kravet på  $\pm 3$  dB i det frekvensområde, som har betydning for det G-vægtede lydtrykniveau i den pågældende målesituation, skal der så vidt muligt korrigeres for udstyrets afvigelse (se Afsnit 7), eller målefejlsens indflydelse skal vurderes og angives ved rapporteringen.

#### 4. MÅLEUDSTYR TIL MÅLING AF INFRALYD OG LAVFREKVENT STØJ

For at kunne foretage måling og analyse af infralyd og/eller lavfrekvent støj i henhold til Miljøstyrelsens orientering vil der typisk være brug for følgende måleudstyr:

- Akustisk kalibrator
- Målemikrofon
- Mikrofonforforstærker
- Mikrofonspændingsforsyning
- Båndoptager (digital eller analog)
- Frekvensanalysator eller PC-analysesystem

I stedet for mikrofonforforstærker og mikrofonspændingsforsyning kan man bruge en egnet lydtrykmåler, hvor AC-udgangen tilsluttes båndoptagerens indgang.

I mange tilfælde vil det være nødvendigt at afbryde netspændingen i den bolig, hvor der måles, fordi målingerne ellers kan forstyrres af netstøj (brum). Herved bliver der også afbrudt for køleskab, fryser m.m., som også ofte kan give problemer i form af uvedkommende støj. Det anvendte måleudstyr bør derfor normalt være batteridrevet, således at målingerne kan gennemføres uden netspænding.

De typer instrumenter, som omtales i det følgende er primært de typer, som laboratorierne her i landet allerede har. Såfremt der viser sig et stigende behov for måling af infralyd, vil det være fordelagtigt at anskaffe særligt egnet udstyr. Det omtalte udstyr er hovedsageligt fra Brüel & Kjær, idet dette fabrikat er mest udbredt i Danmark.

Det omtalte udstyr inddeles i tre kategorier:

1. Egnet til infralyd (kravet er måling ned til minimum 5 Hz,  $\pm 3$  dB)
  2. Egnet til lavfrekvent støj (kravet er måling ned til 10 Hz,  $\pm 3$  dB)
  3. Kun egnet til almindelige støjmålinger (kravet er måling ned til minimum 20 Hz,  $\pm 3$  dB)
- ad 1) For måleudstyr i denne kategori vil det så vidt muligt også blive anført, hvorledes udstyrets egenskaber er i frekvensområdet 1-5 Hz. Udstyr i denne kategori er normalt også egnet til de to andre kategorier.
- ad 2) Udstyr i denne kategori vil normalt også være egnet til måling i kategori 3.
- ad 3) Udstyr i denne kategori omtales normalt ikke nærmere; endvidere vil en del udstyr fra denne kategori slet blive nævnt, idet det falder uden for denne orienterings formål.

Når specifikationerne for måleudstyr vurderes (udstyrets frekvensområde), gælder det, at den resulterende frekvenskarakteristik for målekæden er summen af afvigelserne på hvert enkelt instrument. Da et instrument næsten altid har negativ afvigelse ved de laveste frekvenser, vil summen af afvigelser på flere instrumenter blive ”mere negativ”, og herved vil de tilstrækkelige specifikationer kun kunne opnås i et mindre frekvensområde end for hvert af instrumenterne. Det vil derfor normalt være nødvendigt at kræve snævrere tolerancer (eller lavere 3 dB-grænsefrekvens) for hvert af de anvendte instrumenter end for hele målekæden.

Ved måling af infralyd er det derfor hensigtsmæssigt, at det enkelte instrument har en nedre 3 dB-grænsefrekvens på ca. 2 Hz, hvis målekæden skal overholde  $\pm 3$  dB ned til ca. 5 Hz.

I nogle tilfælde er det et enkelt instrument i målekæden, som sætter den nedre grænse for måleudstyret. I disse tilfælde kan hele tolerancen tilskrives dette instrument; f.eks. vil det i en del tilfælde primært være båndoptageren, som sætter den nedre grænse for frekvensområdet.

#### 4.1 Akustiske kalibratorer

Normalt anvendes en 1 kHz/94 dB kalibrator til kalibrering af måleopstillingen. Selv om frekvensområdet for infralyd/lavfrekvent støj ligger væsentligt under kalibratorens frekvens, giver det normalt ikke problemer, idet målesystemet i stilling LIN har samme følsomhed ved 1 kHz og i frekvensområdet for infralyd/lavfrekvent støj. Kalibrering af udstyret foretages derfor på normal måde (uden vægtningsfilter).

#### 4.2 Målemikrofoner

Mikrofoner, der anvendes til støjmålinger, er i praksis altid kondensatormikrofoner, enten konventionelle kondensatormikrofoner, der skal tilføres polarisationspænding eller forpolariserede mikrofoner.

Begge typer mikrofoner kan i princippet gå ned til vilkårligt lave frekvenser. For at undgå, at mikrofonen virker som en slags barometer, er der indført en udluftning af hulrummet mellem bag-elektrode og membran. Uden denne udluftning ville selv mindre variationer i det barometriske tryk påvirke mikrofonen så kraftigt, at det vil umuliggøre måling af lyd, idet lydtrykket normalt er væsentligt mindre end ændringerne i det barometriske tryk. Ændringer i det barometriske tryk er typisk op til 50 hPa (fra lavtryk til højtryk). Et lydtryk på 94 dB re 20  $\mu$ Pa er netop 1 Pa og er derfor kun 1/5000 af de normale ændringer i det barometriske tryk.

Udluftningen af mikrofonen kan enten have direkte forbindelse til det "fri" på et sted, som påvirkes af lyden, eller udluftningen kan være ført ad en omvej til det fri. I det første tilfælde vil mikrofonens lavfrekvenssegenskaber blive reduceret mere end i det andet tilfælde. Dimensionerne af udluftningshullet har også betydning for mikrofonens nedre grænsefrekvens.

Typisk er 3 dB-afskæringsfrekvensen for 1" og ½" kondensatormikrofoner 1-4 Hz. Derfor vil de fleste målemikrofoner kunne anvendes uden problemer til måling i frekvensområdet over 4-5 Hz

(kategori 1). Det er muligt at øge mikrofonens frekvensområde nedadtil ved at tætte udluftningen, men da det kan være vanskeligt at afgøre, om forseglingen er tæt nok, kan metoden generelt ikke anbefales.

#### *Mikrofoner med grænsefrekvens ca. 1 Hz*

For mikrofon Brüel & Kjær type 4155, hvor afskæringsfrekvensen er ca. 4 Hz, kan en adaptor type UC 5265 udvide frekvensområdet ned til ca. 1 Hz. Tilsvarende kan frekvensområdet for mikrofonerne type 4165 og 4166 udvides ned til 1 Hz med samme adaptor.

Desuden findes der specielle infralydmikrofoner Brüel & Kjær type 4147 og 4193. Brüel & Kjær 4193 kan anvendes med en normal forforstærker, og nedre grænsefrekvens sættes af forforstærkeren med den pågældende mikrofonens kapacitet. Grænsefrekvensen vil være under 1 Hz. En adaptor mellem mikrofon og forforstærker kan ændre nedre grænsefrekvens til under 0,1 Hz. Da følsomheden samtidigt reduceres væsentligt, er den ikke velegnet til måling i området 1-20 Hz. Brüel & Kjær 4147 skal bruges sammen med et særligt infralydssystem Brüel & Kjær 2631, hvor der kan være problemer med at opnå tilfredsstillende lavt egenstøjniveau fra dette system.

#### *Mikrofoner med grænsefrekvens ca. 2 Hz*

Følgende gængse mikrofontyper af fabrikatet Brüel & Kjær kan anvendes ned til ca. 2 Hz inden for  $\pm 2-3$  dB:

Brüel & Kjær type 4144, 4145, 4165, 4166, 4190, 4191 og 4192

#### *Mikrofoner med grænsefrekvens ca. 5 Hz*

Følgende gængse mikrofoner kan anvendes ned til 4-5 Hz indenfor  $\pm 2-3$  dB:

Brüel & Kjær type 4133, 4134, 4149, 4155 og 4189

#### *Mikrofoner til lavfrekvent støjmåling*

Til lavfrekvent støj (kategori 2) kan alle gængse Brüel & Kjær kondensatormikrofoner anvendes. Det gælder både forpolariserede mikrofoner og mikrofoner, som skal tilføres polarisationsspænding.

Da det skal være muligt at måle støjniveauer ( $L_{pA,LF}$ ) under 20 dB, er de bedst egnede mikrofoner enten 1" eller ½" mikrofoner med høj følsomhed som Brüel og Kjær 1" type 4144 og 4145 eller ½" type 4155, 4165, 4166, 4176, 4188, 4189 og 4190.

#### *Sammenfatning*

Den bedste løsning til infralydmåling i frekvensområdet ned til 1 Hz er Brüel & Kjær 4155 eller 4165 med adaptor UC 5265 eller infralydmikrofon type 4193.

Til måling af infralyd og lavfrekvent støj i området ned til ca. 2 Hz er mikrofoner Brüel & Kjær type 4144, 4145, 4165, 4166 og 4190 velegnede.

### 4.3 Mikrofonforforstærkere

Kondensatormikrofoner skal tilsluttes en forforstærker, med meget høj indgangsimpedans, for at mikrofonsignalet ikke bliver dæmpet af forforstærkeren. Forforstærkeren er enten første del af en lydtrykmåler (indgangstrin) eller et separat instrument.

Mikrofonens kapacitet (typisk 10-60 pF) og forforstærkerens indgangsimpedans (typisk 5-50 G $\Omega$ ) danner tilsammen et højpasfilter, hvorved de laveste frekvenser dæmpes, når mikrofonen tilsluttes forforstærkeren. For mikrofoner med en kapacitet over 12 pF (alle gængse ½" og 1" mikrofoner) vil frekvensområdet række ned til 1 Hz inden for 1 dB med forforstærkere som Brüel og Kjær type 2639/2669.

Med den ældre forforstærker Brüel & Kjær type 2619 opnås et frekvensområde ned til 1-2 Hz inden for  $\pm 1-3$  dB afhængigt af forforstærkerens alder (gælder for mikrofonkapacitet  $C > 17$  pF).

Følgende forforstærkere kan uden problemer anvendes til infralydmålinger ned til 1 Hz med gængse ½" eller 1" mikrofoner:

Brüel & Kjær type 2619, 2639 og 2669

Den ny forforstærker Brüel & Kjær type 2671 (Delta Tron) er kun egnet til almindelige støjmålinger (kategori 3), idet nedre 3 dB-grænsefrekvens er 12 Hz. Denne egenskab skyldes, at strømforstyrrelse til forforstærkeren etableres gennem samme ledning som signalet (BNC-stik).

### 4.4 Lydtrykmåler/måleforstærkere etc.

En lydtrykmåler består normalt af en mikrofon og en række elektriske kredsløb, som omdanner signalet fra mikrofonen til et viserudslag eller et tal i et display. De elektriske kredsløb kan enten være analoge eller digitale.

Ved måling af infralyd og lavfrekvent støj i henhold til Miljøstyrelsens orientering kan lydtrykmåleren normalt kun anvendes som forsats for optagelse af signalet på bånd eller som forsats til en frekvensanalysator. Lydtrykmåleren skal stilles uden vægtningsfilter (LIN). Hvis lydtrykmåleren har Peak-visning, er denne indstilling egnet til at vurdere, om signalet bliver indspillet korrekt på båndoptageren. Det gælder især i tilfælde, hvor båndoptagerens udstyringsmeter ikke kan indikere de lavfrekvente signaler, se nærmere herom i Afsnit 4.5.

#### *Måling af infralyd*

Af de gængse Brüel & Kjær lydtrykmålere, som ofte bruges i Danmark, er følgende typer egnet til måling af infralyd i området minimum ned til 4-5 Hz (kategori 1), såfremt den rigtige mikrofon anvendes:

Brüel & Kjær type 2230, 2231, 2235 og 2260



Brüel & Kjær 2230 er kun specificeret ned til 10 Hz, men signalet fra lydtrykmålerens AC-udgang kan bruges til registrering på bånd, idet nedre 3 dB-grænsefrekvens typisk er under 2 Hz. Derimod er lydtrykmålerens RMS-detektors nedre 3 dB-grænsefrekvens omkring 4 Hz.

Brüel & Kjær 2231 er den bedst egnede lydtrykmåler til infralydmåling, idet den er specificeret ned til 2 Hz inden for  $\pm 1$  dB. Brüel og Kjær tilbyder et infralydsfilter, Brüel & Kjær type 1627, som sammen med Brüel & Kjær 2231 og mikrofonen Brüel & Kjær 4155 med UC5265 kan bruges direkte til måling af infralyd i frekvensområdet 1-20 Hz.

Brüel & Kjær 2260 er specificeret til en nedre 3 dB-grænsefrekvens på ca. 1 Hz. Brüel & Kjær 2235 har en nedre 3 dB-grænsefrekvens på ca. 5 Hz.

Også de ældre lydtrykmålere Brüel & Kjær type 2204/09 kan anvendes som forsats for båndoptagelser, når lydtrykmålerens nedre grænsefrekvens stilles til 2 Hz (skrue i bunden af stik til indgangstrinnet).

Brüel & Kjær type 2236 er ikke særligt velegnet til infralydmåling, idet dæmpningen ved 4 Hz er ca. 10 dB, mens den er 5 dB ved 5 Hz (dæmpningerne er incl. mikrofonens dæmpning).

Endvidere vil følgende mikrofonspændingsforsyninger eller måleforstærkere (med mikrofon og forforstærker som nævnt tidligere) kunne anvendes (alle typer  $\pm 1$  dB til 2 Hz eller bedre):

Mikrofonspændingsforsyninger Brüel & Kjær type 2804, 2807\*, 5935  
Måleforstærkere\* Brüel & Kjær type 2606, 2607, 2610, 2636

\* Netdrevne instrumenter

#### *Måling af lavfrekvent støj*

Til måling af lavfrekvent lyd (kategori 2) vil de fleste type 1 lydtrykmålere kunne anvendes. Ud over ovennævnte udstyr er det bl.a. følgende lydtrykmålere:

Brüel & Kjær type 2203, 2215, 2218

Brüel & Kjær typerne 2221/2222 er ikke egnede til måling lavfrekvent støj, idet lydtrykmåleren i stilling LIN har en nedre grænsefrekvens på ca. 50 Hz. Endvidere er typerne 2206 og 2232 ikke egnede.

#### **4.5 Båndoptagere**

Traditionelle analoge båndoptagere (spole eller kassette) er ikke egnede til infralydmålinger. Det skyldes, at de lavfrekvente signaler ikke kan afspilles, fordi afspillehovedet ikke er følsomt for frekvenser under ca. 20 Hz ved "normal" båndhastighed. FM-båndoptagere kan anvendes til formålet, men disse har normalt ikke et dynamikområde på mere end ca. 40 dB og er i øvrigt ikke særligt udbredte. FM-sporet på den tidligere meget anvendte båndoptager Kudelski type NAGRA

IV-SJ kan anvendes til infralydregistrering. Vedrørende brug af analoge båndoptagere til infralydmåling henvises til Orientering nr. 5 fra Referencelaboratoriet.

De fleste støjlaboratorier i Danmark anvender nu digitale (DAT) båndoptagere til støjmålinger.

Det digitale princip er velegnet til optagelse af alle signaler op til en frekvens, der er det halve af samplingsfrekvensen. Dette giver normalt en øvre grænsefrekvens på ca. 20 kHz (for egentlige målebåndoptagere kan øvre grænsefrekvens ofte vælges afhængigt af formålet). Det brugbare dynamikområde for DAT-båndoptagere er normalt omkring 70 dB.

I princippet kan det digitale system registrere signaler ned til DC (0 Hz). Når de fleste DAT-båndoptagere alligevel ikke er ideelle til registrering af infralyd, skyldes det de analoge kredsløb i båndoptageren og ikke det digitale system. De analoge kredsløb er bygget med en afskæringsfrekvens, der ofte er omkring 10 Hz. Denne begrænsning i båndoptagerens indgangsforstærkere er netop valgt for at undgå, at lavfrekvente lyde (som normalt er uønskede ved lydoptagelser) bliver registreret ved optagelsen. Begrundelsen for at dæmpe de lavfrekvente lyde er, at de ofte er så kraftige, at de kan "overdøve" den øvrige lyd på optagelsen, således at båndoptagerens dynamikområde ikke udnyttes optimalt. Som eksempel kan anføres, at vindstøjen i en mikrofon (med normal vindhætte) er omkring 20 dB kraftigere i frekvensområdet 2 Hz - 20 Hz end i hele frekvensområdet 20 Hz - 20 kHz.

De fleste DAT-båndoptagere har en linieindgang, som i en vis udstrækning kan anvendes til lavfrekvent støj og infralydoptagelse. Derimod vil båndoptagerens mikrofonindgang normalt ikke være egnet til infralyd/lavfrekvent støj. I øvrigt er mikrofonindgangen på nogle DAT-båndoptagere heller ikke egnet til "almindelige" støjmålinger, da indgangskredsløbet ofte har en afskæringsfrekvens mellem 20 og 100 Hz.

Referencelaboratoriet har foretaget målinger på en række DAT-båndoptagere i frekvensområdet 2 Hz til 2 kHz, for at vurdere båndoptagernes egnethed til måling af infralyd og lavfrekvent støj.

Målinger er foretaget på begge spor af båndoptageren. I alle tilfælde var resultaterne for de to spor dog så ens, at kun et resultat, som er repræsentativt for begge spor, er angivet. I Tabel 1 er dæmpningen ved ind/afspilning ved 2 og 4 Hz angivet, Endvidere er 3 dB-grænsefrekvensen angivet.

Det ses af tabellen, at følgende båndoptagere har en 3 dB-grænsefrekvens, der er lavere end 4 Hz:

Sony TCD 3, Sony TCD 10, Sony TCD 10 PRO, HHB 1 Pro, HHB Portadat 1000

Båndoptagere med 3 dB-grænsefrekvens mellem 5 og 10 Hz er kun egnet til måling af lavfrekvent støj (kategori 2). Hvis der foretages korrektion for båndoptagerens frekvenskarakteristik, kan de bruges til infralydregistrering. Denne karakteristik bør måles individuelt for hver båndoptager, idet der muligvis kan være individuelle forskelle mellem båndoptagerne, selv om de er af samme type.

For Sony TCD 10 (uden "Pro"), som i øvrigt er velegnet til optagelse af infralyd, og for FM-sporet på NAGRA IV-SJ gælder det særlige, at båndoptagerens udstyringsindikator ikke indikerer korrekt for signaler i infralydfrekvensområdet. Dette må der tages særligt hensyn til under optagelsen, f.eks. ved at bruge en egnet lydtrykmåler til at kontrollere udstyringen af båndoptageren.

Båndoptagertype	3 dB grænsefrekvens (Hz)	Dæmpning ved 2 Hz (dB)	Dæmpning ved 4 Hz (dB)
Sony TCD 3	1,3	1,5	0,5
Sony TCD 7	7	-	-
Sony TCD 8	8	>20	10
Sony TCD 10	2	3	2
Sony TCD 10 PRO	3	5	1,5
HHB 1 Pro	4	7	3
HHB Portadat 1000	4	7	3
Technics SV 260	9	>20	9

**Tabel 1**

*DAT-båndoptager dæmpning i infralydområdet.*

Der findes også instrumentationsbåndoptagere og disc-recordere med 4-16 kanaler, som er beregnet til registrering af signaler ned til DC (0 Hz). Disse registreringssystemer er velegnede til registrering af infralyd (og lavfrekvent støj). De vil ikke blive omtalt nærmere her, idet båndoptagerne normalt umiddelbart kan bruges til formålet. Desuden er det kun ganske få laboratorier, der på nuværende tidspunkt har sådanne båndoptagere/disc-recordere.

#### 4.6 Frekvensanalyser

Frekvensanalysen skal foretages i frekvensområdet 4 til 200 Hz (evt. ned til 1 Hz), hvis både infralyd og lavfrekvent støj skal bestemmes. De fleste frekvensanalyser kan umiddelbart anvendes til analyse i pågældende frekvensområde. Bl.a. kan følgende Brüel og Kjær analyser anvendes:

1/3-oktav analyse: Brüel & Kjær type 2123, 2131\*, 2133, 2143, 2144, 2145

FFT analyse: Brüel & Kjær type 2031, 2032, 2033, 2034, 2148

\* laveste 1/3-oktav filter er 1,6 Hz

Endvidere kan der bruges andre typer af analyseudstyr, som er baseret på en PC med signalbehandlingskort og et analyseprogram. F.eks. kan følgende systemer bruges:

Concerto (01 dB, Frankrig)

NOISELAB/VIBLAB (DELTA Akustik & Vibration)

SpektrumLAB (Spektrum Instruments, Danmark)

PC-systemer til anvendelse ved ”almindelige” støjmålinger er nærmere beskrevet i Orientering nr. 26 fra Referencelaboratoriet.

## 5. FREMGANGSMÅDE VED FREKVENSANALYSE

I Miljøstyrelsens orientering er angivet vægtningskarakteristikken for beregning af det G-vægtede niveau i frekvensområdet (2) 4 Hz - (20) 25 Hz og det A-vægtede niveau i frekvensområdet 8 Hz - (170) 200 Hz. Tallene i parentes gælder for korrektion af FFT-analyse.

Hvis man både har mulighed for at foretage 1/3-oktav analyse og FFT-analyse, anbefales det at udføre analysen som 1/3-oktav analyse, idet 1/3-oktav filtrene er fastlagt i en standard og 1/3-oktav analyse er den enkleste analysemetode for brugeren, idet der opnås en passende analysebåndbredde i hele frekvensområdet ved én analyse. Analysen kan så udvides ned til 1 Hz, idet G-kurven som nævnt i Afsnit 2.2 har en hældning på 40 dB pr. dekade. Det giver 4 dB pr. 1/3-oktav.

Ved 1/3-oktav analyse indstilles analysatoren, så det ønskede frekvensområde bliver analyseret. Analyserne fortages over de tidsrum, hvor optagelsen ikke er forstyrret af uvedkommende støj. På de fleste analysatorer er der mulighed for at "pausere" analysen, når der er forstyrrende baggrundsstøj. De målte spektre korrigeres evt. for målekædens frekvenskarakteristik. Endvidere korrigeres for baggrundsstøjens indflydelse, hvis den er målt og har betydning for resultatet. Ud fra frekvensspektret beregnes det A-vægtede lavfrekvente lydniveau  $L_{pA,LF}$  og det G-vægtede infralydniveau  $L_{pG}$  for hver måleposition i henhold til orienteringen fra Miljøstyrelsen.

Ved FFT-analyse foretages en analyse med passende øvre grænsefrekvens. Det optimale vil være at indstille til en opløsning på 1-2 Hz. Herved fås i almindelighed tilstrækkelig opløsning i det relevante frekvensområde. Ved beregning af det A-vægtede lavfrekvensstøjniveau og det G-vægtede infralydniveau anvendes korrektionsværdierne, som er angivet i Miljøstyrelsens orientering. Såfremt liniefrekvenserne ikke er sammenfaldende med frekvenserne i tabellen i Miljøstyrelsens orientering, kan der interpoleres mellem de angivne korrektioner. Når der er flere linier i spektret end angivet i tabellen, anvendes den samme korrektion ved flere frekvenser. For at resultatet skal blive korrekt, skal alle linier i spektret, inden for det angivne frekvensområde regnes med ved energisummingen og der skal korrigeres for Hanning-vægtning, hvis analysen er foretaget hermed.

Til slut beregnes energimiddelværdien af måleresultaterne for alle målepositioner i samme rum. Resultatet for hvert rum (hvis der er målt i flere rum) sammenlignes herefter med de angivne grænseværdier.

## 6. KORREKTION FOR MÅLEUDSTYRETS FREKVENSKARAKTERISTIK

Den angivne tolerance i Figur 3 gælder for hele målekæden fra mikrofon til det endelige analyseresultat (1/3-oktav eller FFT-analyse). Såfremt målekæden ikke umiddelbart kan overholde tolerancekravet i hele det ønskede frekvensområde, kan analyseresultatet korrigeres for frekvenskarakteristikken for målekæden. Hvis det kun er et af de indgående instrumenter i målekæden, som

har betydning for nedre grænsefrekvens for målekæden, er det i almindelighed tilstrækkeligt at korrigere for dette instruments afvigelse. Det kræver, at den samlede afvigelse på resten af målekæden overholder kravene  $\pm 3$  dB.

Såfremt mikrofonen har en 3 dB-grænsefrekvens, som er lig med eller lavere end det frekvensområde, som der skal måles i (se Afsnit 4.2), er det ikke nødvendigt at korrigere for mikrofonens frekvenskarakteristik. Herved kan korrektionen begrænses til en korrektion for frekvenskarakteristikken af det "elektriske" måleudstyr. I praksis er det i de fleste tilfælde kun båndoptageren, der skal korrigeres for.

Frekvenskarakteristikken for den "elektriske målekæde" kan enten bestemmes ved addition af afvigelserne for hvert af de indgående instrumenter, eller også kan frekvenskarakteristikken måles for den "elektriske målekæde".

Måling af frekvenskarakteristikken for den "elektriske" målekæde udføres ved at tilføre et kendt signal til mikrofonterminalen gennem en kapacitet, der svarer til mikrofonens, og analysere signalet (efter at det har været gennem hele målekæden) med analysatoren. Som testsignal kan enten anvendes et støjsignal (lyserød eller hvid støj) eller et antal sinussignaler med frekvenser inden for måleområdet eller et sinussweep.

Såfremt det tilførte testsignal ikke er kendt tilstrækkelig godt, kan det analyseres direkte med analysatoren, og herved kan frekvenskarakteristikken af måleudstyret bestemmes som forskellen mellem resultatet af analyse direkte af signalet og via målekæden. Denne metode kræver, at analysatoren ikke har afvigelser i det relevante frekvensområde, men det vil normalt også være opfyldt for analysatorer beregnet til analyse i dette frekvensområde.

## **7. KALIBRERING AF MÅLEUDSTYR TIL MÅLING I FREKVENSBOMRÅDET 1 Hz - 200 Hz**

Såfremt måling af lavfrekvent støj eller infralyd rapporteres som "Miljømåling - ekstern støj", skal det anvendte udstyr være kalibreret sporbart. For at dokumentere udstyrets egenskaber i frekvensområdet 1-200 Hz skal der foretages måling af frekvenskarakteristikken for udstyret i frekvensområdet fra 1 Hz til minimum 1 kHz, idet tolerancerne er angivet i forhold til 1 kHz, hvor der normalt foretages akustisk kalibrering. Desuden skal udstyret kontrolleres i henhold til Nordtest NT ACOU 068 "Sound Level Meters, Verification Procedure" for andre egenskaber, der er relevante for brugen af udstyret til måling af infralyd og lavfrekvent støj. Målingen kan enten foretages på de enkelte instrumenter i målekæden eller på hele målekæden under et. Kontrollen kan foretages af laboratoriet selv eller af et akkrediteret kalibreringslaboratorium.

For kondensatormikrofoner er det tilstrækkeligt, at mikrofonen er kalibreret til almindelige støjmålinger, når mikrofonen er specificeret til en 3 dB-grænsefrekvens, som er lig med eller lavere end det frekvensområde, hvor den anvendes. Det skal verificeres, at mikrofonen ikke har huller i membranen, eller det skal på anden måde sikres, at mikrofonens nedre grænsefrekvens ikke er ændret.

Kontrol af lydtrykmålere og mikrofonforforstærkere skal foretages med mikrofonen erstattet af en adaptor med samme kapacitet som mikrofonen. Herved sikres det, at den målte frekvenskarakteristik også er gældende, når instrumentet bruges med mikrofon (mikrofonens egen frekvenskarakteristik skal tillægges for at få den samlede karakteristik; typisk frekvenskarakteristik for mikrofonen anvendes i stedet for at måle den).

Såfremt udstyret i forvejen er kalibreret sporbart til brug ved "almindelige støjmålinger", er det tilstrækkeligt at supplere disse kalibreringer med en kontrol af målekædens frekvenskarakteristik (uden mikrofon) i frekvensområdet 1 Hz - 20 Hz relativt til 1 kHz. Kontrollen skal foretages sporbart enten af laboratoriet selv eller af et akkrediteret kalibreringslaboratorium.

## **8. MÅLING AF VIBRATIONER I BYGNINGER**

Måling af vibrationer i bygninger i relation til genevirkning over for mennesker foretages i henhold til Miljøstyrelsens orientering nr. 9/1997 som KB-vægtet (whole-body combined) accelerationsniveau i dB re  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. Der måles båndbegrænset i frekvensområdet 1 Hz - 80 Hz.

Vibrationsniveauet i en bygning afhænger af mange parametre som f.eks. jordbundsforholdene, afstand mellem kilde og modtagerpunkt, modtagerpunktets højde over jorden og placering på etagen, bygningskonstruktionen, kildens driftsforhold osv. Disse forhold gør det vanskeligt præcist at anvise, hvor modtagerpunktet skal placeres, og i hvilken retning der skal måles. Orienteringen fra Miljøstyrelsen angiver nogle retningslinier for placeringen, men den bør nøje overvejes fra tilfælde til tilfælde.

## **9. MÅLEUDSTYR TIL VIBRATIONSMÅLING I BYGNINGER**

De vejledende grænseværdier i orientering fra Miljøstyrelsen er angivet i KB-vægtet accelerationsniveau (dB re  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>) for frekvensområdet mellem 1 og 80 Hz. Der måles med tidsvægtningen "Slow" eller alternativt ved at benytte en midlingstid på 2 sekunder. Af de højeste vægtede accelerationsniveauer fra de benyttede målepunkter beregnes energimiddelværdien som udgangspunkt for vurdering af vibrationerne.

I de fleste tilfælde vil en målekæde, der anvendes til gængse vibrationsmålinger, uden problemer kunne anvendes til måling af vibrationer i bygninger. Der kræves dog altid en vibrationspickup med høj følsomhed og dermed lav egenstøj i målesystemet, for at de forholdsvis lave vibrationsniveauer kan måles. Egenstøjen i målesystem bør KB-vægtet være 60 dB eller lavere.

Hvis målingerne foretages med et instrument, hvor frekvensanalyse ikke er mulig, skal der specielt passes på jordsløjfer, der giver 50 Hz netbrum.

I de følgende afsnit gennemgås forhold, som kræver særlig opmærksomhed for de instrumenter, der indgår i målekæden.

## 9.1 Vibrationspickup

Vibrationstransducerne skal være lineære i frekvensområdet 1-80 Hz. Hastigheds- og forskydningstransducere kan anvendes, hvis der i ét af de efterfølgende trin i målekæden er mulighed for at differentiere signalet.

Fastgørelse af vibrationstransducerne er ikke specielt kritisk. Normalt vil anvendelse af bivoks eller dobbeltdækkende tape være tilstrækkeligt. På tæppebelægninger som ikke kan fjernes, kan man anvende den monteringsklods, som er vist i orienteringen fra Miljøstyrelsen.

I de fleste tilfælde er piezoelektriske accelerometre velegnede til formålet, idet de har en frekvensafhængig følsomhed over et stort frekvensområde, som også dækker 1-80 Hz.

Ved målinger i bygninger har vibrationspickuppens vægt normalt ingen betydning, og derfor kan høj følsomhed prioriteres højt uden hensyn til vægten.

Følgende gængse accelerometre, som har tilstrækkeligt høj følsomhed, kan anvendes:

Brüel & Kjær type 4370, 4378, 4379, 4381 og 8318  
Endevco type 2262, 7701, 7751 og 7754

## 9.2 Forforstærkere - Signalkonditionering

Det skal sikres, at forforstærkere eller andre signalkonditioneringsenheder ikke skærer af frekvensområdet, specielt nedadtil. Enheden skal have mulighed for at justere forstærkning, idet de gængse vibrationskalibratorer giver et kalibreringsniveau, som er 60-70 dB højere end de vibrationer, der måles i bygningen. Signalet bør så vidt muligt lavpasfiltreres for at udnytte dynamikområdet optimalt.

Når der anvendes accelerometre af den piezoelektriske type, er den bedst egnede konditioneringsforstærker en ladningsforstærker. Såfremt der anvendes en traditionel spændingsforstærker (f.eks. indgangen på en lydtrykmåler), bliver den resulterende følsomhed for systemet afhængig af kabellængden. Endvidere skal forstærkeren have en passende høj indgangsimpedans for at få en frekvenslineær omsætning mellem vibration og spænding. Indgange på lydtrykmålere og mikrofonforforstærkere er normalt egnet til formålet, mens andre "almindelige" forstærkerindgange med indgangsimpedanser under ca. 1 G $\Omega$  ikke kan anvendes, hvis frekvensområdet skal gå ned til ca. 1 Hz.

Følgende gængse signalkonditioneringsenheder kan anvendes:

Brüel & Kjær type 2525, 2635 og 2692  
Endevco type 102, 104, 106, 109, 4430A, 4416B

### 9.3 Båndoptagere

Med hensyn til båndoptagere henvises generelt til Afsnit 4.5 i denne orientering. Da kravet til frekvensområde ved KB-vægtet måling er 1-80 Hz, kan normale DAT-båndoptagere som hovedregel ikke anvendes. I stedet kan instrumenteringsbåndoptagere, som normalt kan registrere ned til DC (0 Hz), anvendes. Især de nyeste typer digitale båndoptagere eller disc-recordere med 4, 8 eller 16 kanaler er egnet til formålet.

### 9.4 Vibrationsmetre - Analysatorer

Enkelte vibrationsmetre har en nedre grænsefrekvens, som opfylder kravet til det frekvensområde, der skal måles ved bygningsvibrationer. I mange tilfælde er vibrationsmetre ikke forsynet med et KB-filter. I stedet kan et KB-filter tilsluttes eksternt, eller instrumentet kan eventuelt modificeres til KB-vægtning.

Enkelte lydtrykmålere kan ved hjælp af et adaptorstik monteres med et accelerometer og anvendes til vibrationsmålinger. Frekvensområdet for forskellige lydtrykmålere er omtalt i Afsnit 4.3. Det vil ofte være muligt at tilslutte et KB-filter til lydtrykmåleren.

Der skal anvendes tidsvægtning "Slow" ved bestemmelse af maksimalniveauerne eller 2 sekunders lineær integration.

Normalt bør der tilsluttes en niveauskriver eller lignende til udgangen af vibrationsmetret/lydtrykmåleren til dokumentation af den tidsmæssige variation af vibrationsniveauet. Denne skriver skal tilsluttes DC-udgangen på vibrationsmetret. Hvis vibrationsmetret har en logaritmisk DC-udgang, skal skriveren have en lineær karakteristik. Hvis vibrationsmetret har en lineær DC-udgang, bør skriveren have en logaritmisk karakteristik.

Særlige PC-målesystemer til måling af vibrationer kan også anvendes. Der henvises til Afsnit 4.6.

Såfremt det ikke er muligt at foretage en direkte KB-vægtet måling/registrering af de maksimale vibrationsniveauer, kan metoden, hvor signalet frekvensanalyseres som angivet i Miljøstyrelsens orientering, anvendes. Da det kan være vanskeligt at bestemme det KB-vægtede maksimalniveau ved denne metode, er metoden bedst egnet, når vibrationsniveauet er nogenlunde konstant. Også når frekvenssammensætningen af signalet er nogenlunde konstant, således at det KB-vægtede maksimalniveau forekommer, når det uvægtede spektrum er maksimalt, kan metoden anvendes. I det generelle tilfælde er der ikke sikkerhed for, at det KB-vægtede niveau er maksimalt, når det uvægtede spektrum er maksimalt.

Nogle analysatorer har en synthesizerfunktion, hvor KB-vægtningen kan beregnes som et polynomium med polen 5,7 og herefter ganges på det målte lineære accelerationsniveau. Endvidere skal beregningen båndbegrænses til 1-80 Hz. Herved kan det KB-vægtede maksimalniveau bestemmes direkte under analysen.



De i Afsnit 4.6 nævnte analysatorer vil kunne bruges til vibrationsmåling med de begrænsninger, som er angivet ovenfor. For Brüel & Kjør 2231 er frekvensområdet begrænset til 1,6 Hz som laveste 1/3-oktav frekvens.

## **10. KALIBRERING AF VIBRATIONSMÅLEUDSTYR**

Når målinger af vibrationer rapporteres som "Miljømåling - ekstern støj", skal det anvendte måleudstyr være sporbart kalibreret. Kalibreringen kan udføres af laboratoriet selv eller af et akkrediteret laboratorium. Kalibreringen udføres efter principperne i Nordtest NT ACOU 094, "Vibration Measuring Instrumentation, Verification Procedure". Såfremt det ikke er muligt at få udført kalibreringen som akkrediteret kalibrering, kan kalibreringen udføres af et laboratorium, som har sporbarhed på de relevante parametre til et internationalt anerkendt laboratorium.

Brugeren af udstyret skal kalibrere måleudstyret før og efter målingen med en vibrationskalibrator ved én frekvens / ét niveau.