



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R45:1983

Mätning av lågfrekvent buller från luftbehandlings- anläggningar

Sven Tyrland
Jörgen Svensson

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION

Accnr

Plac

ser

*V
And*

Byggeforskningsrådet

R45:1983

MÄTNING AV LÅGFREKVENT BULLER
FRÅN LUFTBEHANDLINGSANLÄGGNINGAR

Sven Tyrland
Jörgen Svensson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790062-3 från Statens råd för byggnadsforskning
till Ingemanssons Ingenjörbyrå AB, Göteborg.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R45:1983

ISBN 91-540-3924-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1983

INNEHÅLL

	SAMMANFATTNING	s. 5
1	INLEDNING	s. 5
2	BAKGRUND	s. 7
2.1	Bullernivåer	s. 7
2.2	Lågfrekvent buller	s. 7
2.3	Receptorer för lågfrekvent buller	s. 8
2.4	Hörselskydd mot lågfrekvent buller	s. 8
2.5	Sammanfattning	s. 9
3	PROJEKTETS SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR	s. 10
3.1	Avgränsningar	s. 10
3.2	Kriteriefrågan	s. 10
4	UTFÖRDA MÄTNINGAR	s. 11
4.1	Mätobjekt	s. 11
4.1.1	Beskrivning av mätobjekt och mätförfarande i fält	s. 11
4.1.1.1	Spektrum och nivåfördelning med/utan ventilation	s. 11
4.1.1.2	Lokalisering av källan	s. 13
4.1.1.3	Skillnad mellan mätpunkter	s. 13
4.1.2	Beskrivning av modellmätningar	s. 13
4.2	Mätresultat	s. 14
4.2.1	Mätningar i fält	s. 14
4.2.1.1	Spektrum med/utan ventilation	s. 14
4.2.1.2	Nivåfördelning med/utan ventilation	s. 15
4.2.1.3	Lokalisering av källan	s. 16
4.2.1.4	Skillnad mellan mätpunkter	s. 17
4.2.1.5	Mätnoggrannhet	s. 18
4.2.2	Modellmätresultat	s. 19
4.2.2.1	Slutet mättrum	s. 19
4.2.2.2	Mättrum med öppningar	s. 19
5	KRAV PÅ MÄTNINGAR - REKOMMENDATIONER	s. 20
5.1	Mätpunktsval	s. 20
5.1.1	Teoretiska bedömningar	s. 20
5.1.2	Praktiska överväganden	s. 21
5.1.3	Rekommendationer	s. 21
5.2	Mättider och bakgrunds nivåer	s. 22
5.2.1	Praktiska överväganden	s. 22

5.2.2	Rekommendationer	s. 23
5.3	Mätutrustningen	s. 24
5.3.1	Praktiska överväganden	s. 24
5.3.2	Rekommendationer	s. 24
5.4	Krav på lokalen	s. 25
5.4.1	Praktiska överväganden	s. 25
6	KRAV PÅ UTVÄRDERINGEN - REKOMMENDATIONER	s. 25
6.1	Frekvensområde	s. 25
6.2	Amplitudfördelning	s. 25
7	RESULTATDISKUSSION	s. 26
7.1	Ljudtrycksnivå	s. 26
7.2	Frekvensområde	s. 27
7.3	Amplitudfördelning	s. 28
	APPENDIX REFERENSER	s. 29
	FIGURBILAGOR 1 - 31: Mätning av lågfrekvent buller	s.31

SAMMANFATTNING

Det existerar idag inga kriterier eller mätetal för lågfrekvent ljudtryckspåverkan som ger god överensstämmelse mellan subjektivt upplevda störningar och objektiva mätningar. Föreliggande rapport har som huvudsyfte att bereda väg för framtida forskningsinsatser inom området genom att lämna anvisningar om var och på vilket sätt mätningar respektive utvärderingar måste utföras för att inte viktig information skall gå förlorad. Rapporten avhandlar endast luftburet lågfrekvent buller från ventilationsanläggningar inom frekvensområdet 0-100 Hz. Den övre gränsen är vald för att erhålla överlappning till existerande fungerande kriterier för vanligt buller (t.ex. dB(A) och NR-värden).

Andra forskningsinsatser inom området visar att skillnaden i ljudtrycksnivå mellan uppfattbarhet och störning är mycket liten inom lågfrekvensområdet varför mätningar och utvärderingar måste vara entydiga och precisa.

Mätningar har utförts i ett 40-tal anläggningar där förändringar av ventilationsanläggningen, mätpunktsändring, skillnaden mellan olika ventilationssystem, inverkan av fönster och dörrar m.m. behandlas. Vidare behandlas lokalisering av bullerkälla inom lågfrekvensområdet med hjälp av koherent mätteknik.

De resultat i rapporten som kan anses viktiga för vidare forskning och för mätning av lågfrekvent buller är följande:

1. Vid mätning av lågfrekvent buller bör man alltid mäta i flera positioner där en position bör vara i ett hörn. Mätning och utvärdering bör utföras i ett så brett frekvensområde som möjligt och dessutom bör amplitudfördelning av ljudtrycket registreras på något sätt.
2. Våra mätresultat visar att de idag föreslagna nationella och internationella vägningskurvorna för infraljud eventuellt kommer att undertrycka eller försumma viktig information som behövs för framtida kriterieforskning.

1 INLEDNING

På senare år har debatten kring infraljudets eventuella skadeverkningar intensifierats. Reaktionen har observerats hos människan, vilka kan misstänkas härröra från infraljudpåverkan, men som ej alltid står i proportion till de kriterier som hittills framtagits. Det existerar ett flertal undersökningar publicerade inom detta forskningsområde, där det i huvudsak redovisas mätresultat samt i vissa fall reaktioner under korttidspåverkan kopplade till infraljudsproblemet. Dock saknas ännu i stort sett rapporter som på ett entydigt sätt beskriver vilka egenskaper hos infraljudet som orsakar problem under långtidspåverkan. Eftersom frågan om infraljudets långtidseffekter allt oftare aktualiseras är det viktigt att gränsvärden tas fram som stöd för bedömning av eventuella åtgärder. Vid framtagningen av gränsvärdena är det väsentligt att beskrivningen av infraljudet ej låses till en enda storhet som kanske inte ger den bästa korrelationen med de fysiologiska eller psykologiska symtom som uppträder. Samtidigt som mätstorheternas antal och det frekvensområde de omspanner utökas, ställes större krav på välunderbyggda mätförfaranden för att tillförlitliga mätvärden skall erhållas.

I det här redovisade projektet har mätmetoder och mätstorheter för infraljud granskats närmare. Undersökningar har genomförts i syfte att klarlägga vilka begränsningar i mätförfarandet man kan tillåta sig utan att informationen som kan vara relevant i den framtida kriterieforskningen skall gå förlorad. Nyare mätutrustning ger också möjligheter som bör utvecklas för att lättare kunna lokalisera det lågfrekventa bullret och kartlägga dess transmissionsegenskaper.

2 BAKGRUND

2.1 Bullernivåer

Vid mätning och behandling av "normala" bullersituationer förutsättes bland annat att följande två kriterier är uppfyllda.

- a) de objektiva mätresultaten har god överensstämmelse med de subjektiva störnivåerna. Detta gäller speciellt med tanke på vägningskurvor och medelnivåer för fluktuerande buller.
- b) personerna som är störda av bullret måste ha ungefär samma känslighet dvs besvärsgrensens förhållande till de uppträdande nivåerna bör vara detsamma för alla. Detta är speciellt viktigt då nivåerna är så höga att risk för skada föreligger.

För att uppfylla dessa kriterier använder man sig idag av den A-vägda ekvivalenta ljudnivån som mått för att erhålla största möjliga överensstämmelse mellan mätvärde och störning. För lågfrekvent buller och kraftigt fluktuerande buller (t.ex. intermittent drift eller transient buller) är denna överensstämmelse högst diskutabel.

2.2 Lågfrekvent buller

De ovan nämnda kriterierna uppfylls ej för lågfrekvent buller dvs man saknar idag lämpliga ensiffermått som ger erforderlig korrelation mellan upplevda störningar och objektiva mätresultat. Nedan redovisas ett antal forskningsresultat som ger en samlad bild av hur människan uppfattar lågfrekvent buller.

Studera figurerna 1 och 2, den ena hämtad från (11) (Yamada - Okai, Yeowart) och den andra hämtad från (15) (Paap, Gaál). Dessa båda undersökningar beskriver att skillnaden mellan uppfattbarhetsströskeln för en medelpopulation och enstaka individer kan vara mycket stor och dessutom ökar denna skillnad mot lägre frekvenser.

Nästa figur 3, hämtad från (12) (Yamada et al) visar på ytterligare en egenskap som skiljer lågfrekvent buller från normalt buller. I figuren visas nivåskillnaden mellan uppfattbarhetsströskeln och nivån då ljudtrycksnivån tycktes subjektivt störande (obs stationära rena toner).

Av dessa forskningsresultat framgår att skillnaden mellan uppfattbarhetskurvan och upplevd störning går mot noll för lägre frekvenser! Till detta skall läggas andra forskningsresultat (13) (Leventhall) som entydigt fastslår att genom att utsätta försökspersonerna för fluktuerande buller (speciellt fluktuationer med periodtid runt 1 s) så kan störningen erhållas vid ännu lägre nivåer dvs så låga att ekvivalentnivån ligger under personens uppfattbarhetströskel (jfr vibrationsstörningar).

Ur samma forskningsrapport kan även utläsas att tillvänjningen till lågfrekvent buller är svårare än för "normalt" buller eller snarare sker motsatsen dvs störnivån och stresseffekten ökar med exponeringstiden. De flesta forskare verkar dessutom vara eniga om att de flesta störningarna i frekvensintervallet 0-50 Hz återfinnes i intervallet 20-50 Hz och inte i det så kallade infraljudsområdet.

2.3 Receptorer för lågfrekvent buller

Det finns idag ej nöjaktigt bevisat att örat vid alla frekvenser skulle vara den känsligaste sensorn i kroppen. Speciellt inte om man betraktar långtidspåverkan eller försökspersoner under stresstillstånd. De undersökningar som har utförts angående uppfattbarhetströskeln är antingen utförda som helkroppsexitering eller enbart exitering via yttre hörselgången. Dessa resultat visar på i stort sett samma uppfattbarhetströskel. Av detta bör man kunna dra slutsatsen att örat är det känsligaste organet.

Detta resonemang förutsätter dock att man tillskriver den känsligaste sensorn den största störningsgraden. Förmodligen uppvisar alla vibrations- och/eller ljudtryckskänsliga receptorer i kroppen stora skillnader i uppfattbarhetströskeln från person till person. För en och samma person kan alltså det inträffa att t.ex. ljudtryckspåverkan via yttre hörselgången är mindre störande än t.ex. påverkan av andra sensorer (t.ex. tryckpåverkan av mellangärdet).

2.4 Hörselskydd mot lågfrekvent buller

Figur 4 Yeowart (14) visar ändringen av uppfattbarhetströskeln vid användning av hörselkåpor. Vi ser där att dämpningen går mot noll för lägre frekvenser. Detta beror på att normala hörselkåpor i kombination med fästbyglarna utgör ett alltför vekt system, som svänger med i ljudfältet vid låga frekvenser, se t.ex. Zwislocki (18).

Vid användning av öronproppar erhålles en konstant insättningsdämpning av ca 20 dB över hela det lågfrekventa området. Även vid användning av öronproppar utgör infästningen ett alltför vekt system (både skinnnet och proppen rör sig med ljudfältet) vilket medför att dämpningen borde kunna vara större vid riktigt utformade hörselskydd. Några undersökningar av uppfattbarhetsströskel med garanterat utesluten ljudväg via ytterörat finns ej redovisade. Detta skulle vara angeläget då övriga mänskliga receptorer då skulle bestämma störnivån.

2.5 Sammanfattning

Enligt ovan redovisade punkter 1.1-1.4 framgår följande mycket intressanta iakttagelser angående lågfrekvent ljudpåverkan.

- 1) För normala människor är skillnaden mellan uppfattbarhetsnivå och störande nivå liten (jfr vibrationer).
- 2) Spridningen mellan individernas uppfattbarhetsnivå är stor och ökar mot lägre frekvenser.
- 3) Det är ej helt klarlagt att andra tryck känsliga receptorer förutom örat ger större störnivå än hörselorganet dvs störning kan inträffa trots att försökspersonerna inte "hör" något.
- 4) Fluktuerande nivåer uppfattas som mer störande än stationärt buller vid lika ekvivalentnivå.
- 5) Hörselkåpor dämpar inte lågfrekvent buller.

Av ovan sagda framgår att alla störningar inom lågfrekvensområdet måste betraktas som unika händelser knutna till de störda personerna dvs man måste betrakta alla inrapporterade störningar som reella. Dessutom framgår det klart att trots lågfrekvensproblematikens extremt låga "dynamik" måste mätningarna utföras och redovisas på ett entydligt och korrekt sätt. Det är förmodligen av dessa två orsaker som så stora skillnader i störnivå kan uppträda trots tillsynes identiska mätresultat.

3 PROJEKTETS SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

3.1 Avgränsningar

Föreliggande rapport behandlar mättekniska problem och deras lösning vad avser lågfrekvent luftburet buller från luftbehandlingsanläggningar. Anledningen till att just denna avgränsning göres är att det inrapporterats att stort antal upplevda ljudstörningar vars orsak sannolikt står att finna i lågfrekvent luftljud i begränsade lokaler.

Endast luftburet lågfrekvent buller behandlas då stomburet buller vid dessa låga frekvenser är direktkopplat till människans uppfattbarhetsströskel för vibrationer dvs de vibrationsnivåer som ger upphov till de registrerade ljudnivåerna är normalt klart uppfattbara även som vibrationer.

Inga mätningar eller diskussioner rör i andra storheter än ljudtrycksnivån L_p i dB. Detta betyder att vi i denna rapport betraktar örat som ren tryckkännare samt att hjärnans upplevelse av detta relativa dynamiska tryck överensstämmer med en logaritmiskt överföring. Mer om detta i resultatdiskussionen.

En annan mycket viktig avgränsning som göres är att vi på intet sätt tar ställning till vilka ljudtrycksnivåer som är störande eller skadliga för människan. Vi tycker att detta är mycket viktigt att påpeka då de uppmätta nivåerna ibland kan tyckas så låga att inga mänskliga receptorer överhuvud taget kan uppfatta de uppmätta signalerna.

Frekvensmässigt måste en avgränsning göras såväl uppåt som nedåt. Undre gränshfrekvensen är satt till 0,05 Hz då ytterligare sänkning skulle medföra onormala mättider. Övre gränshfrekvensen är satt till ca 100 Hz för att med säkerhet "överlappa" andra mätmetoder och kriterier t.ex. NR- och dB(A)-kurvorna.

3.2 Kriteriefrågan

Det finns inom litteraturen redovisat ett stort antal rapporter (se t.ex. ref. 9 och 10) som beskriver och behandlar korttidseffekter vid upp till en vecka av påverkan av lågfrekventa ljudtrycksvariationer. Däremot saknas emellertid i stort sett beskrivningar och uppmätningar av långtidseffekter. Försök till kartläggning redovisas i referenserna 7 och 8, där man har att hantera ett mycket komplicerat samband mellan olika

miljöfaktorer och fysiologiska eller psyko-fysiologiska reaktioner.

I detta sammanhang kan nämnas att det är föga belagt vilka fysiologiska / akustiska storheter som ger stor överensstämmelse med de upplevda subjektiva störningarna. Detta gör att det vore ytterligt olyckligt om man fastnade för kriterievärden resp. mätmetoder innan man penetrerat mätproblematiken ordentligt. Vi har därför sökt beskriva olika analysformer och menar att man bör så långt möjligt redovisa alla dessa resultat tills man funnit den storhet eller de storheter som ger bäst korelation med besvärreaktionerna. Exempelvis är det lika tänkbart att en störning initieras av ett momentant överskridet tröskelvärde för ljudtrycksvariationerna som av en alltför hög ekvivalentnivå.

Varken ur medicinsk eller ur teknisk synvinkel finns det därvid något motiv att låsa gränserna för kriteriernas frekvensområde till 2 eller 20 Hz. Det övre värdet är enbart betingat av hörselns förmåga att uppfatta ljud i form av periodiska lufttrycksförändringar och berör ej övriga kroppsfunktions känslighet för lufttryckspåverkan.

Vidare diskussion om kriterieforskning med utgångspunkt från mätningarna i denna rapport redovisas under Resultatdiskussion.

4 UTFÖRDA MÄTNINGAR

4.1 Mätobjekt

Projektets datainsamlingsfas har genomförts på två områden: dels i byggnader där ventilationsanläggningar utgjort ljudkälla, dels i laboratorium där modellutrustning använts för beskrivning av ljudfältens form.

4.1.1 Beskrivning av mätobjekt och mätförfarande i fält

4.1.1.1 Spektrum och nivåfördelning med/utan ventilation

Fältmätningarna har omfattat byggnader, där sammanlagt 40 rum kartlagts med avseende på lågfrekvent ljud. Byggnaderna har indelats i följande klasser, beaktande luftbehandlingsanläggningens typ:

Klass	Typ av luftbehandlings- anläggning	Beteckning för byggnad	Mätning antal rum
1	Äldre system med låg luftomsättning	SM	4
		CH	2
		CM	2
		AX	1
2a	Modernt system med såväl till- som frånluft i rummet	SK	5
		LM	7
		SH	2
2b	Modernt system med till- luft i rummet och öppning till korridor för frånluft	TV	4
		TR	5
		FK	4
3	Halvmodernt system med mycket stor central fläkt	OD	4

I varje rum har en bandinspelning av ljudtrycket i ett av rummets hörn (vid golv) företagits under ca 3 min med respektive utan luftbehandlingsanläggning i drift. Följande utrustning har använts:

1. Bärfrekvensmikrofonsystem Brüel & Kjaer 2631 med mikrofon
Brüel & Kjaer 4146 (1 tum)
Frekvensområde 0,01 Hz och uppåt
2. Impulsljudnivåmätare Brüel & Kjaer 2204 alt. 2209 med signal från bärfrekvensmikrofonsystemet
Frekvensområde 2 Hz och uppåt
3. FM-bandspelare Brüel & Kjaer 7003

För efterföljande analys i laboratorium har använts en digital signalanalysator Hewlett-Packard 5420A med plotter Hewlett-Packard 9872A och mikrodator ABC-80 via IEEE-interface.

Anm. Mätningarna från 2 Hz och uppåt har även använts inom det projekt som redovisas i ref. 20, kompletterade med nivåskrivareregistreringar. Referensen behandlar utförligare skillnaden i ljudalstring mellan olika typer diskussion kring frekvensspektra.
Olika analysförfaranden har använts. Dessa beskrivs närmare i avsnitt 3.2.

4.1.1.2 Lokalisering av källan

I ett av objekten har kompletterande mätningar genomförts i avsikt att prova tillämpningen av koherent mätteknik för bestämning av infraljudets härkomst. Den 2-kanaliga signalanalysatorn har därvid använts på mätplatsen, objektbeteckning OD. Mikrofonkanalerna har utgjorts av 2 st impuls ljudnivåmätare Brüel & Kjaer 2209 med mikrofon 4145 (1 tum).

4.1.1.3 Skillnad mellan mätpunkter

I några objekt har mätningar i flera mikrofonpositioner företagits i syfte att redovisa ljudfältets rumsliga variationer. Rummen har varit av normal kontorsrumsstorlek, ca 50 m³. Samtidigt har vibrationsnivån mitt på golvet registrerats för bedömning av andelen stomljud. Använd utrustning:

Kanal 1 Accelerometer Brüel & Kjaer 8006, laddningsförstärkare Brüel & Kjaer 2635

Kanal 2 Bärfrekvensmikrofonsystem Brüel & Kjaer 2631 från 0,01 Hz

Kanal 3 Dito via mätförstärkare Brüel & Kjaer 2607 från 2 Hz

Kanal 4 Impuls ljudnivåmätare Brüel & Kjaer 2209 från 2 Hz, mikrofon 4145

Kanalerna avser FM-bandspelare Brüel & Kjaer 7003.

3.1.2 Beskrivning av modellmätningar

För att utröna ljudfältets utseende i ett vanligt rum vid låga frekvenser har vissa begränsade modellmätningar utförts i skala 1:10, se figur 5. Rummets dimensioner har valts till 6,3x3,5x2,5 m vilket ger en första rumsresonans vid $f_0=27$ Hz. Ljudtrycksnivåerna har registrerats i ett stort antal positioner. Ljudeffekten matas från en högtalare via en rund kanal till ett hörn i rummet. Rummet är försett med ett antal öppningar (fönster, dörrar etc) för att utröna inverkan av dessa på ljudtrycksfördelningen. Det använda kanalsystemet kan varieras för att simulera olika diameter, längd, fördelning samt inre impedans hos högtalaren (fläkten).

För att lättare kunna beräkna skillnaden mellan ljudtrycksnivån vid olika frekvenser och positioner användes kompressorteknik dvs den ena av de båda ljudtrycksnivåerna hålls konstant (t.ex. i hörn eller vid inmatningsöppningen).

4.2 Mätresultat

4.2.1 Mätningar i fält

4.2.1.1 Spektrum med/utan ventilation

Mätserien består av 40 mätningar i olika rum med ventilation i drift, 40 mätningar med stillastående fläktar. (I det senare fallet kan ej uteslutas att kvarstående nivåer härrör från utifrån kommande infraljud eller infraljudalstrat genom vindturbulens vid färskluftsintagen som fortplantas via kanalerna).

Mätningarna har Fourieranalyserats i frekvensområdet upp till 10 Hz med 512 punkters upplösning vilket ger en konstant filterbandbredd på 0,06 Hz. Undre gränzfrequens i mikrofonsystemet är 0,01 Hz. Analystid ca 3 minuter. För varje par av spektra har spektrum (rms) med ventilation dividerats med spektrum (rms) utan ventilation, vilket ger skillnaden i dB ljudtrycksnivå för varje frekvens. Dessa skillnader har sedan medelvärdesbildats, vilket motsvaras av operationen

$$\Delta L = \frac{10 \log \frac{p^2_{\text{på 1}} \cdot p^2_{\text{på 2}} \cdot \dots \cdot p^2_{\text{på 40}}}{p^2_{\text{av 1}} \cdot p^2_{\text{av 2}} \cdot \dots \cdot p^2_{\text{av 40}}}}{40}$$

Detta aritmetiska medelvärde av dB-värdena för nivåskillnader i spektra med/utan ventilation redovisas i figur 6. Energimedelvärdet av samtliga spektra med resp. utan ventilation redovisas i fig. 7. Detta diagram har utsträckts till 50 Hz med hjälp av medelvärdet av 32 par registreringar från 2 Hz och uppåt ur samma mätserie (parallell kanal på FM-bandspelaren). Nivån har justerats med hänsyn till filterbandbredden, i det senare fallet 0,5 Hz (analysområde 0-80 Hz), så att alla spektra avser filterbandbredden 0,06 Hz. Motsvarande oktavbandsspektra visas i

figur 7b. Mät punkt är i samtliga fall ett av rummets hörn, vid golv.

Ett enskilt exempel på spektra med och utan ventilation visas på figur 8. Här har också angivits uppmätt elektrisk bakgrundsnivå då mikrofonen ersatts med en 47 pF kondensator. (Toppen vid 5 Hz härrör från brum vid analysen, 10 ggr hastighetsökning).

Infraljudbidraget från ventilationen kan som exemplet visar vara avsevärt över 20 dB, vid frekvenser långt under 2 Hz. De små skillnaderna i figur 7 förklaras av att en hög bakgrundsnivå i någon enstaka mätning kraftigt påverkar det logaritmiska medelvärdet (energimedelvärdet). Figur 6 är dock opåverkad av denna effekt då medelvärde av dB-skillnaderna använts.

4.2.1.2 Nivåfördelning med/utan ventilation

För att utröna ljudtryckets variation i tiden har den momentana signalen 0,01-80 Hz samplats med intervallet 3 ms och histogram bildats i signalanalysatorn H-P 5420A. Detta har sedan bearbetats i mikrodator ABC-80 så att kumulativa fördelningskurvor över ljudtrycksnivåns variation erhållits. Procent-axeln anger den del av totala mättiden som den momentana nivån överskrider respektive ljudtrycksnivå. Skalan har valts logaritmisk för att bättre belysa de väsentliga höga nivåerna. Exempel med undre gränzfrequensen 0,01 resp. 2 Hz visas i figurerna 9-12. Linjär frekvensvägning har använts upp till 80 Hz.

Två iakttagelser göres omedelbart:

1. Nivåerna vid det lägre frekvensområdet är genomgående högre än vid 2 Hz undre gränzfrequens. Detta framgår också av spektrum. Ventilationsanläggningen påverkar här även de högsta nivåerna uppåt.
2. I frekvensområdet över 2 Hz ökar ekvivalentnivån (linjära) som en följd av att ventilationen höjer de "medelhöga" nivåerna. Topparna förblir dock opåverkade till nivå och till och med sjunker i antal, varför de troligen ej härrör från ventilationen. Dörrstängningar i byggnaden är en vanlig orsak till höga, kortvariga nivåtoppar.

Anm. Ljudtrycksnivåns variationer kan även fås ur nivåskrivareregistrering men resultatet blir beroende av vilken pennhastighet som väljes. Vad som är mest relevant kan diskuteras - vilken tröghet har människans reaktioner på tryckvariationerna?

4.2.1.3 Lokalisering av källan

Den tvåkanaliga mättekniken medger under ideella utbredningsförhållanden härledning av bullerkällan via koherensfunktionen. Om effektivvärdesspektrat i mottagarpositionen multipliceras med koherensfunktionen mellan en position nära källan och mottagarpositionen erhålles det koherenta spektrat, dvs den del av mottagarspektrat som härrör från den aktuella källan. Genom att flytta ena mikrofonen mellan olika tänkbara källor kan den mest bidragande spåras. Användningen av denna mätteknik begränsas om dispersion (varierande utbredningshastighet) längs utbredningsvägen förekommer eller om ljudfältet består av stående vågor (olika faslägen för olika frekvenser). Amplitudskillnader har däremot ingen betydelse. Under första rumsresonansfrekvensen är dock fasläget detsamma i hela rummet, varför koherent mätning mellan en punkt i rummet och en punkt vid den tänkta källan bör ha viss relevans.

I ett rum med måtten 4,90x7,00x2,65 m företogs sådana mätningar, varvid följande infraljudskällor penetrerades:

1. Utifrån, via fönstren infallande ljud (mät punkt 1 m utanför fönstret)
2. Tilluftdonet (mät punkt dikt an mot donet)
3. Frånluftdonet (mät punkt 20 cm under donet)
4. Från korridoren, via dörren infallande ljud (mät punkt 1 m utanför dörren)

Mät punkten i rummet var belägen i ett hörn, 0,5 m från ytterväggen, 1 m från innervägg och golv. Figurerna 13-16 visar erhållna koherenta spektra. I diagrammen har även kompletta spektra med respektive utan ventilation inlagts. Observera att ljudnivåmätarens undre gränshastighet är 2 Hz.

Man finner att nivåerna i rummet då ventilationen är igång är relativt opåverkade av utomhusbullret. De likheter som förekommer kan också bero på via fasaden utstrålat ljud (figur 13a).

Under ca 3 Hz är ljudtrycksfördelningen i rummet uniform och någon separation av källorna kan ej företas. Vid 5 Hz och däröver förefaller frånluftdonet ge de dominerande bidragen till rummets ljudnivåer. I området 6-13 Hz är ljudbilden identisk med korridorens, vilket kan bero på att utrymmena är anslutna till samma kanalsystem. Tilluftsystemet ger ett visst bidrag till 8 Hz-nivån men är i övrigt tyst.

Det är värt att notera att frånluftssystemets toner vid 8 och 13 Hz kvarligger i viss grad vid avstängd fläkt, vilket tyder på att vindturbulens exciterar kanalresonanser vid dessa frekvenser. Tolkningarna får ses med viss reservation eftersom bekräftande försök ej kunnat utföras.

4.2.1.4 Skillnad mellan mätpunkter

Mätkanal 2 (den flyttbara) i föregående mätningar placerades även i samma rum, mitt i rummet respektive på 1/4 av rumsdiagonalen, närmast kanal 1. Resultat visas i form av effektivvärdesspektra i figur 17 och 18. Man ser att väl under första rumsresonansen vid 24 Hz är nivåerna lika i de tre punkterna. Figur 18 visar även utrustningens elektriska bakgrundsnivå med 47 pF i stället för mikrofonen.

De huvudsakliga mätningarna under denna rubrik företogs emellertid i projektets början, för att utvärdera möjligheterna att begränsa sig till en mätpunkt. För normala kontorsrum återfinnes ingen rumsresonans i infraljudområdet. Därtill erfordras rumsmått överstigande 8,5 m. Detta borde medföra att infraljudnivåerna är i stort sett oberoende av mätpunktens placering. Figurerna 19-23 visar ett antal synkrona jämförelser mellan två positioner: den ena i hörn vid golv, den andra vid arbetsplats (ungefär i rummets mitt). Resultatet bestyrker antagandet i frekvensområdet upp till ca 10-14 Hz, däröver uppträder skillnader på 5 dB eller mera. (Skillnaderna vid de lägsta frekvenserna beror på de olika förstärkarnas filtrering).

Parallellt med de senare mätningarna registrerades även vibrationerna mitt på golvet. En jämförelse med infraljudnivån i rummets hörn göres som exempel i figur 24, där även registreringar vid lägre frekvenser än 2 Hz inlagts, normaliserade i nivå till filterbandbredden 0,06 Hz.

Figur 25 redovisar en koherent mätning (enligt föregående avsnitt) i samma rum, där golvvibrationernas andel i rummets luftljud beräknats genom multiplikation med koherensfunktionen. Ett klart samband visas vid 20 Hz och däröver, men ej i infraljudområdet. Detta tyder på att infraljudet anländer som luftljud och ej via stommen.

4.2.1.5 Mätnoggrannhet

En serie mätningar i en och samma mikrofonposition företogs i ett rum under, såvitt kunde bedömas, identiska yttre betingelser. Mättiden och samtidigt antalet delmätningar i medelvärdesbildningen varierades. Den digitala signalanalysatorn Hewlett-Packard typ 5420 A utnyttjades, vilket innebär FFT-analys och konstant filterbandbredd. Frekvensområdet 64 Hz innebär upplösningen 0,25 Hz (256 linjer) och filterbandbredden 0,8 Hz. Varje delmätning tar då 4 sekunder. Resultatet i figurerna 26 respektive 27 ger avvikelser relativt medelvärdet av # A=256 överlappande delmätningar under 68 sekunder (FREE RUN) respektive #A=32 separata delmätningar under 158 sekunder (INTERNAL TRIG).

Om man jämför ungefärligen lika mättider, exempelvis 35 respektive 39 sekunder, finner man betydligt större avvikelser i fallet INTERNAL TRIG. Om vi då håller oss till FREE RUN (tidsfönstrets dämpning av de tidiga och sena samplen inom varje delmätning motiverar en viss överlappning) i figur 26 ser vi att det fordras minst 128 delmätningar för att hålla mätfelet inom ± 2 dB. Figur 27, översta bilden, ger samma noggrannhet vid 158 s mättid och INTERNAL TRIG. I båda fallen antas # A=256 vid FREE RUN vara korrekt mätning.

För att erhålla en BT-produkt på 30 erfordras vid 0,8 Hz bandbredd mättiden 38 sekunder. Detta motsvarar # A=128 vid FREE RUN MAX RATE, vilket synes ge ± 2 dB mätfel. Teoretiskt blir standardavvikelsen i estimatet $1/\sqrt{2BT}$ vilket motsvarar drygt 1 dB. Med 95% sannolikhet ligger då mätfelet inom +2,0/-2,6 dB.

4.2.2 Modellmätresultat

Vid mätningarna har mätuppställning enligt figur 28 använts. Mätresultaten redovisas i figur 29. Av mätningarna framgår att ljudtrycksfördelningen vid mycket låga frekvenser är relativt jämn så när som på området intill kanalöppningen i väggen. Detta närfält beror på den kraftiga impedansändring som ljudvågen utsätts för då den kommer ut i

rummet. Närfältets utseende påverkas av kanalens placering och kanaldiametern, men är opåverkad vid förändringar av t.ex. kanallängden. Observera alltså att mätningar i ventilationsöppningen kan ge felaktiga resultat.

Som väntat blir ljudfältet vid första rumsresonans (ca 27 Hz) symmetriskt kring en tänkt yta mitt i rummet. Skillnaden i detta speciella mätfall mellan ljudtrycksnivån mitt i rummet och i ett hörn är 30 dB.

Skillnaden i ljudtrycksnivå mellan olika hörn framgår av ljudtryckskurva i mätpunkt 5. Under ca 35 Hz finns ingen mätbar skillnad men ovanför denna frekvens kan stora ojämnheter urskiljas.

4.2.2.1 Slutet mätrum

Ljudtrycksnivån i de olika mätpunkterna har registrerats med en sondmikrofon vars läge bestäms genom förborrade hål i rummets tak (21 stycken). Höjden över golvet kan varieras kontinuerligt till önskat läge. Ett mycket stort antal mätningar har utförts med varierande rörlängder, inre impedans hos högtalare, olika öppningar i rummet etc. De viktigaste mätningarna finns registrerade i figur 29 som visar ljudtrycksfördelningen i rummet i ett plan 1,25 m över golv. Ljudtrycksnivån i ett hörn har varit konstant med frekvensen för alla mätningarna. Dessutom redovisas ljudtryckets frekvensvariation i ett antal mätpunkter.

4.2.2.2 Mätrum med öppningar

Om rummet förses med en eller flera öppningar (fönster, dörrar) förblir ljudtrycksfördelningen i det närmaste oförändrad i rummet. Däremot förändras ljudtrycket drastiskt vid de frekvenser där resonans mellan rummet och öppningen erhålles. Figur 30 visar ljudtrycket som funktion av frekvensen där man tydligt urskiljer kallade Helmholtzfrekvensen. Denna kan approximativt beräknas enligt formel

$$f_H^2 = 2,92 \cdot 10^3 \cdot A / V(L + 0,96 \sqrt{A})$$

Vi har i detta fall $A = 0,40 \text{ m}^2$
 $V = 55,1 \text{ m}^3$
 $L = 0,19 \text{ m}$

vilket ger $f_H = 5,2 \text{ Hz}$ som väl överensstämmer med uppmätt frekvens enligt figur 30. Observera att hur mycket högre ljudtryck som

erhålls vid resonansfrekvensen, dvs resonansens Q-värde, bestäms bland annat av fläktens inre impedans, väggarnas eftergivlighet (absorption) samt öppningens utseende. Däremot påverkas resonansen lite av t.ex. förekomsten av "vanliga" absorberer eller möbler i rummet, se vidare referens (17) Koopmann.

Lägg dessutom märke till att med konstant inmatad ljudeffekt i rummet erhålls mycket lägre ljudtryck vid frekvenser under Helmholtzfrekvensen förutsatt att inte ljudeffekten når rummet via öppningen.

5 KRAV PÅ MÄTNINGARNA - REKOMMENDATIONER

5.1 Mätpunktsval

5.1.1 Teoretiska bedömningar

Ljudtrycksfördelningen vid låga frekvenser i normala rum är väl behandlad i litteraturen. Förutsättningarna är dock att begränsningsytorna är stela samt att rummet är slutet för att de teoretiska beräkningarna skall vara relativt enkla att utföra. Under första rumsresonansen blir det uppmätta ljudtrycket relativt jämnt och för frekvenser under ca $f_{(1,0,0)}/2$ är ljudtrycksnivån i rummet konstant oberoende av mätpunkten (se vidare modellmätningarna). Om vi tillåter rummets väggar att röra sig på grund av ljudtryckspåverkan i rummet (jfr. membranabsorberer) blir dock förhållandena betydligt besvärligare att förutsäga, se t.ex. referens (17) Koopmann. Ljudfältet är dock fortfarande beräkningsbart t.ex. med finita elementmetoden.

5.1.2 Praktiska överväganden

Lägsta rumsresonansen $f_{(1,0,0)}$ hamnar för många normala rum ovanför 20 Hz (längsta dimension mindre än 8,5 m). Ett rum med måtten 7,85x6,25x4,95 m ger nedanstående resonansfrekvenser under 50 Hz.

n_x	n_y	n_z	f (Hz)
1	0	0	21,7
0	1	0	27,2
0	0	1	34,3
1	1	0	34,8
1	0	1	40,6
2	0	0	43,3
0	1	1	43,8
1	1	1	48,9

Den ovan omtalade gränsen $f_{(1,0,0)}/2$ blir alltså i detta fall 11 Hz dvs ljudtrycket blir konstant i rummet vid en så låg frekvens att flera mätpunkter måste användas för att erhålla en korrekt information.

Enligt modellförsöken och teoretiska betraktelser kan visas att alla rumsresonanser har maximum i rummets hörn varför man vid val av en sådan mätpunkt kan uppnå två fördelar. Förutom att man registrerar den högsta ljudtrycksnivån i rummet så kan man med "hörn"mätningen aldrig mäta i en antiresonans vilket skulle innebära kraftigt undertryckt ljudtrycksnivå om bullret bestod av ren ton vid denna antiresonans.

Skillnaden mellan detta ljudtryck i hörn och på den aktuella mätplatsen där bullret normalt avlyssnas är liten (vid mycket låga frekvenser) men kan vid högre frekvenser, ovanför $f_{(1,0,0)}$ bli mycket stor. Om den normala mätpunkten ligger i ett minimum till en rumsresonans kan alltså grov felbedömning av ljudtrycksnivån företas.

5.1.3 Rekommendationer

För att undvika att mätresultaten leder till feltolkningar av bullrets styrka och sammansättning rekommenderas att mätningar företas i minst två punkter.

Mätpunkt 1 skall naturligtvis vara placerad i det område där personer uppehåller sig eller förväntas uppehålla sig.

Mätpunkt 2 bör placeras i ett hörn för att med säkerhet ge de högsta nivåerna vid alla frekvenser dvs med mikrofonen placerad i ett hörn erhålles störst chans att inte missa någon viktig mätinformation. Dessutom kan man med viss "utvärderingsvana" göra grova beräkningar av ljudfördelningen i rummet med utgångspunkt från hörnmätningen. Lämpliga mikrofonpositioner framgår av figur 31.

Anm. Observera att mätning i ventilationsgallret inte nödvändigtvis ger de högsta ljudtrycksnivåerna även om ljudeffekten når rummet via detta galler.

5.2 MÄTTIDER OCH BAKGRUNDSNIVÅER

5.2.1 Praktiska överväganden

Det lågfrekventa ventilationsbullret är vanligen brusartat och kräver lång mättid. Om vi antar att ljudtrycket p är en normalfördelad stokastisk variabel beskrivs mätvärdets standardavvikelse från det korrekta effektivvärdet av

$$\varepsilon = \frac{p}{\sqrt{2BT}}$$

Med 95%-ig sannolikhet ligger mätfelet inom ± 2 dB. Produkten $B \cdot T$ är avgörande för storleken hos detta konfidensintervall. Följande tabell kan beräknas:

	BT = 30	BT = 50	BT = 100
$\pm 2\varepsilon/p$ i %	± 26 %	± 20 %	± 14 %
$\pm 2\varepsilon/p$ i dB	+2,0 dB -2,6 dB	+1,6 dB -1,9 dB	+1,1 dB -1,3 dB

Mättid vid

B = 1,4 Hz	21 s	35 s	71 s
B = 0,8 Hz	38 s	63 s	125 s
B = 0,5 Hz	60 s	100 s	200 s
B = 0,25 Hz	120 s	200 s	400 s
B = 0,13 Hz	240 s	400 s	800 s
B = 0,06 Hz	480 s	800 s	1600 s

Vid relativ bandbredd som hos tersfilter eller oktavbandsfilter beräknas B som 23% resp. 71% av lägsta bandets mittfrekvens.

Om bullret till sina intressanta delar är av deterministisk karaktär, såsom rena toner, kan mättiden förkortas. Toner som fluktuerar i nivå bör dock behandlas som brus vad avser mättiden. Vi förutsätter då att ekvivalentnivån eftersträvas - vi har

tidigare påpekat värdet av fördelningsanalysen som komplement. Om bullerspektrat varierar långsamt i nivå (fluktuerande buller) bör mättiden utsträckas så att några perioder av fluktuationerna omfattas.

Då bandinspelningen företas bör tillräckliga start- och stoppmarginaler inkluderas. Uppspeedning vid analyser kräver särskilt rymliga marginaler.

Det är ofta svårt att undvika störningar i form av dörrstängningar eller verksamhet i byggnaderna. Störningarna i det lågfrekventa området kan ej alltid avgöras genom lyssning, men syns oftast vid övervakning av analysen. Vid bandinspelning störda avsnitt. Blåst, trafik, vibrationer etc. kan också ge tillfälligt höga nivåer i lågfrekvensområdet, vilka ej alltid står i överensstämmelse med de upplevda störningarna.

Mätutrustningens elektriska bakgrunds nivå måste understiga mätvärdena med åtminstone 10 dB för att ej påverka resultatet. Det största bidraget erhålles oftast från bandspelaren.

5.2.2 Rekommendationer

I det lågfrekventa (infraljuds-) området har vi knappast behov av större mätprecision än ± 2 dB. Produkten BT=50 bör därför vara ett rimligt val. Mättiden (effektiva) 200 sekunder ger då utrymme för tersbandsanalys ned till 1 Hz alternativt 256 linjers FFT-analys upp till 20 Hz vid val av tidsfönster som då ger effektiva filterbandsbredden 0,25 Hz.

Bakgrunds nivåerna bör observeras och även registreras med ventilationsanläggningen avstängd. Överväg om andra bullerkällor än ventilationsanläggningen också är av intresse.

Den elektriska bakgrunds nivån bör medge mätning ner till ca 50 dB eller lägre, åtminstone i området över 10 Hz.

5.3 Mätutrustning

5.3.1 Praktiska överväganden

De två mest vitala parametrarna hos mätutrustningen är dynamik (maximalt signal/brus-förhållande) och frekvensområde. Dynamiken bestäms i sitt övre område av utrustningens interna

spänningsbegränsningar. Undre gränsen bestäms av egenbrus i elektronikkomponenterna. Detta ökar mot låga frekvenser och tenderar alltså att begränsa dynamikområdet speciellt för infraljud. Frekvensindelningen av en bärvåg resp. digital inspelning (PCM) är två sätt att åstadkomma god dynamik vid låga frekvenser. Metoderna tillämpas bland annat i instrumentbandspelare, medan man vid direktinspelning endast i undantagsfall når under 10 å 20 Hz.

Bärvågssystem användes även på mikrofonsidan. Därigenom kan frekvenser ner till 0,01 Hz nås, medan 2 Hz är en vanlig gräns i till exempel precisionsljudnivåmätare och mätförstärkare. Mikrofonerna bör vara av kondensatortyp. Genom att tillsluta ventileringsskanalen på membranets baksida mer eller mindre kan undre gränshfrekvensen varieras.

Speciella kalibreringssystem för låga frekvenser har utvecklats.

Vid mätning av mycket låga frekvenser är det viktigt att mätsystemets likspänningsdrift är försumbar.

5.3.2 Rekommendationer

För framtagning av mätdata som kriterieunderlag ser vi det önskvärt att frekvensområdet omspanner 0,2-100 Hz för lågfrekvent ljud av typ ventilationsbuller, se figur 6. Toleransen ± 1 dB bör vara tillräcklig i området under 20 Hz, ± 2 dB under 2 Hz.

Med dagens instrument innebär detta att precisionsljudnivåmätare (Brüel & Kjaer 2209 eller motsvarande) kan användas ner till 2 Hz och att bärfrekvenssystem med speciell lågfrekvensmikrofon måste tillgripas för lägre frekvenser. Förhoppningsvis utvecklas tekniken så att ett och samma instrument kan användas i hela lågfrekvensområdet, ner till åtminstone 0,5 Hz.

För inspelning användes alternativen FM- eller PCM-(digital-) bandspelare.

Brusnivån bör medge ostörd registrering av 50 dB oktavbandsnivå vid 20 Hz, och spektraltätheten kan tillåtas stiga med 6 dB per oktav mot lägre frekvenser.

På analysidan bör finnas tillgång till såväl ters- och oktavbandsfilter som FFT-analysator, samt system för analys av toppvärden och ljudtrycksfördelning i tiden. Entalsvärdering med så kallat IL-filter avrådes från då väsentlig frekvensinformation i detta fall går förlorad.

5.4 Krav på lokalen

5.4.1 Praktiska överväganden

Öppna dörrar och fönster har stor inverkan på ljudnivåerna. I de fall det är relevant mätes med såväl öppna som stängda dörrar resp. fönster.

Endast mätpersonalen skall vara närvarande vid mätningen för undvikande av störningar.

Ofta måste mätningarna förläggas till tidpunkter då "normala" aktiviteter, dörrstängningar och dyl. är så ringa att de ej påverkar mätresultatet.

Vindhastigheten utomhus bör noteras då denna ger vissa upplysningar om bakgrunds-nivån (mätes också med avstängd ventilation). Även vägtrafik, flygplatser och dyl. bör noteras.

6 KRAV PÅ UTVÄRDERINGEN - REKOMMENDATIONER

6.1 Frekvensområde

Då det gäller kriterieunderlag bör man så långt möjligt frigöra sig från frekvensgränser dikterade av befintlig instrumentpark eller mätpraxis. Vi ser att ventilationsbullret skiljer sig från bakgrundsbullret i genomsnitt ned till ca 0,2 Hz, vilket kan motivera denna undre gränshfrekvens för analysen. 256 linjers FFT-analys 0-20 Hz av effektivvärdesspektrum, kompletterad med dito 0-100 Hz, är en lämplig kombination för presentation i fast bandbredd eller om smalbandsanalys kan avslöja rena toner.

Hastighetstransformation 8 eller 10 ggr av bandinspelning ger möjlighet att utnyttja konventionella ters- eller oktavbandsfilter från 2 Hz och uppåt för presentation i relativ bandbredd.

Båda bandbreddsalternativen bör redovisas för fullständig beskrivning av bullrets ekvivalentnivåer. För analystider se avsnitt 4.2. Notera även A-vägt och linjärt värde.

6.2 Amplitudfördelning

För ljudtrycksfördelning i tiden är kumulativ fördelningsanalys av momentanvärdet ett åskådligt alternativ till (upptransformerad) nivåskrivarremsa. Fördelningsanalyserna bör utföras med några olika undre gränsfrekvenser, ex. 0,2 resp. 2 och 20 Hz.

Särskilt bör toppnivåerna noteras då dessa kan avgöra uppfattbarheten av ljudet.

7 RESULTATDISKUSSION

7.1 Ljudtrycksnivå

Under punkt 2.1 Avgränsningar nämndes att några andra parametrar än ljudtrycksnivå inte har använts för att beskriva infraljudsproblematiken. Vi antar alltså att örat och andra receptorer som kan vara aktuella som mottagare av dessa luftvibrationer är helt och hållet tryckkänsliga. Detta kan vi naturligtvis inte visa i detta arbete och dessutom är det inte helt säkert att det är sant för alla typer av störningar. T.ex. kan man tänka sig att partikelhastigheten vore en bättre parameter då människans hörselorgan består av två mottagare som tillsammans med hjärnan är kapabla att erhålla högre störnivå om man ändrar de inbördes fasförhållandena för de signaler som når öronen (jfr. lågfrekventa stereofoniska störningar från hörtelefoner vid avlyssning av grammofonskivor).

Om man betraktar hörselorganet vid riktigt låga frekvenser ser man att om utjämningskanalen mellan svalg och inneröra är öppen blir örat hastighetskänsligt då det är skillnad mellan trycket på trumhinnans bägge sidor som ger upphov till förflyttningen.

På senare år har framkommit förutsättningar att mäta ljudintensiteten L_I (Watt/m²) direkt antingen med realtidsanalysator eller med hjälp av tvåkanals FFT. Detta har inneburit ett stort tillskott till uppmätning av den primärt intressanta storheten ljudeffekt som sedan kan användas som ingångsdata i en mängd viktiga beräkningar och utvärderingar.

För lågfrekvent buller i begränsade lokaler är däremot intensitetsmätning av mindre värde då intensiteten L_I är noll i slutna rum. De aktuella objekten tillhör i stort sett denna

kategori varför kraftiga feltolkningar skulle erhållas. Dessutom är det oerhört svårt att mäta korrekt ljudintensitetsnivå vid dessa låga frekvenser. Örat som företrädesvis är tryckkänsligt skulle uppleva ett ljudfält som är helt skilt från intensitetsfältet i rummet.

7.2 Frekvensområde

De begränsningar som gjorts vid inspelning och utvärdering av utförda mätningar är helt avhängiga de mättekniska svårigheterna. Vi har däremot avsiktligt undvikit att begränsa frekvensområdet på grund av existerande kriteriekurvor.

Den övre gränsfrekvensen, som i detta arbete valts till ca 100 Hz, är vald efter principen att god "överlappning" skall erhållas till existerande fungerande vägningskurvor t.ex. dB(A)-vägning eller NR-kurvor. Olika vägningskurvor diskuteras numera livligt där vissa forskare föreslår både D-och C-kurvan som bättre objektivt mått för frekvensvägning. Bland de personer som var med att utforma dB(A)-kurvan är det med viss förvåning man åser kurvans användning i de mest skilda sammanhang. Det största motståndet mot att ändra de existerande vägningskurvorna kommer dock från det faktum att det skulle vara administrativt omöjligt att ändra dagens standard i detta avseende, hur felaktig den än är.

Den undre gränsfrekvensen vid mätning och utvärdering av lågfrekventa ljudstörningar skall naturligtvis väljas så lågt det är möjligt av tekniska skäl. Intressant vore att utföra mätningen med $f_u = 0$ Hz då man skulle ha möjligheten att utvärdera inverkan av fluktuationer i det statiska trycket (mikrometeorologi).

Innan man kan visa att uppfattbarheten och/eller skadeverkningarna är små för vissa frekvensområden verkar det oansvarigt att begränsa frekvensområdet på grundval av instrumenttekniska svårigheter.

Senare forskning behöver ju dessa mätvärden för att visa kriteriernas giltighet.

7.3 Amplitudfördelning

Då det gäller uppfattbarheten för t.ex. ljudtrycksvariationer och vibrationer bestäms den naturligtvis av hur starka toppnivåer som förekommer inom varje frekvensband av intresse. Tidsaspekten saknar i stort sett betydelse i detta sammanhang då signalens

varaktighet vid låga frekvenser överstiger hjärnans integrationstid (för ljudtryck ca 35 ms). Med de i kapitel 1 redovisade synpunkterna om den lilla skillnaden mellan uppfattbarhetsnivå och störnivå inses att toppnivåerna förmodligen ger bättre överensstämmelse med upplevda störningar inom lågfrekvensområdet.

Om vi däremot betraktar en situation där alla de i ljudtrycksvariationerna förekommande momentantopparna överstiger personens uppfattbarhetskurva borde förmodligen något vägt medelmått (t.ex. ekvivalentnivå) ge bättre överensstämmelse med den subjektiva störningen.

Av ovanstående framgår att ett fluktuerande buller ger upphov till kraftigare störningar än stationärt kontinuerligt buller med samma ekvivalentnivå. Detta får till följd att dynamiken mellan uppfattbarhet och störning krymper ytterligare och medför att kravet på hög mätprecision måste uppfyllas.

Ovanstående resonemang går naturligtvis inte att tillämpa om de skulle visa sig att även nivåer som ej når uppfattbarhetströskeln skulle vara skadliga vid långtidspåverkan.

För att få en uppfattning om hur kraftig bullrets tidsvariation är bör man alltså utföra någon form av amplitudfördelningsmätning. I enklaste fall sker detta naturligtvis med skrifvarregistrering i lämpliga frekvensband. Med moderna instrument kan det ske genom mätning av den kumulativa fördelningen dvs en mätning som visar hur länge en viss nivå överskrids. Dessa mätningar tillsammans med nivåmätningar borde ge god överensstämmelse med störnivåerna då ljudtrycksvariationerna är små. Vi har vid ett flertal mätningar kunnat konstatera att man vid t.ex. avstängning av en ventilationsanläggning har erhållit liten eller ingen ändring av ekvivalentnivån medan däremot toppnivåerna och störningen ändrats kraftigt.

APPENDIX REFERENSER

1. M.E Bryan: Annoyance effects due to low frequency sound. British Acoustical Society, nov. 1971.
2. W. Tempest: Loudness and annoyance due to low frequency sound. *Acustica* vol. 29, p. 205-209, 1973.
3. S.D Kraemer: Annoyance of low frequency sound. Dissertation, Chelsea College, London 1973.
4. R.N Vasudevan, C.G Gordon: Experimental study of annoyance due to low frequency environmental noise. *Applied Acoustics* vol. 10, p. 57-69, 1977.
5. M.E Bryan: Low frequency annoyance. *Infrasound and low frequency vibration* (W. Tempest ed.) p. 65-69, Academic Press 1976.
6. D.L Johnson: Auditory and physiological effects of infrasound. *Inter-Noise 75*, Sendai, p. 475-482, 1975.
7. S Hörnqwist, P. Löfstedt, J. Hedendahl, L. Liszka: Sammanställning av lågfrekvent ventilations/fläktbuller i kontors- och industrilokaler. *Arbetarskyddsstyrelsen* 1978.
8. L. Liszka, Å. Danielsson, L. Söderberg, A. Lindmark: En undersökning av långtidseffekter av ventilationsbuller på människor. *Arbetarskyddsstyrelsen* 1978.
9. Proceedings of Conference on Low Frequency Noise and Hearing. Aalborg University Center, May 7-9, 1980.
10. S. Einarsson, J. Svensson: Reserapport från Conference om Low Frequency Noise and Hearing, Aalborg 1980. Ingemansson Akustik rapport H-9229-A, Bygghörsningsrådets projekt 790062-3.
11. Yamada, Okai, Yeowart: Perceptionströsklar sammanställda i figur 3 ur ref. 10 ovan, baserade på ref. 9.
12. Yamada et al: Hearing of low frequency sound and intence on human body. Figur 5-6 p. 100 i ref. 9 ovan, se även p. 8 i ref. 10.

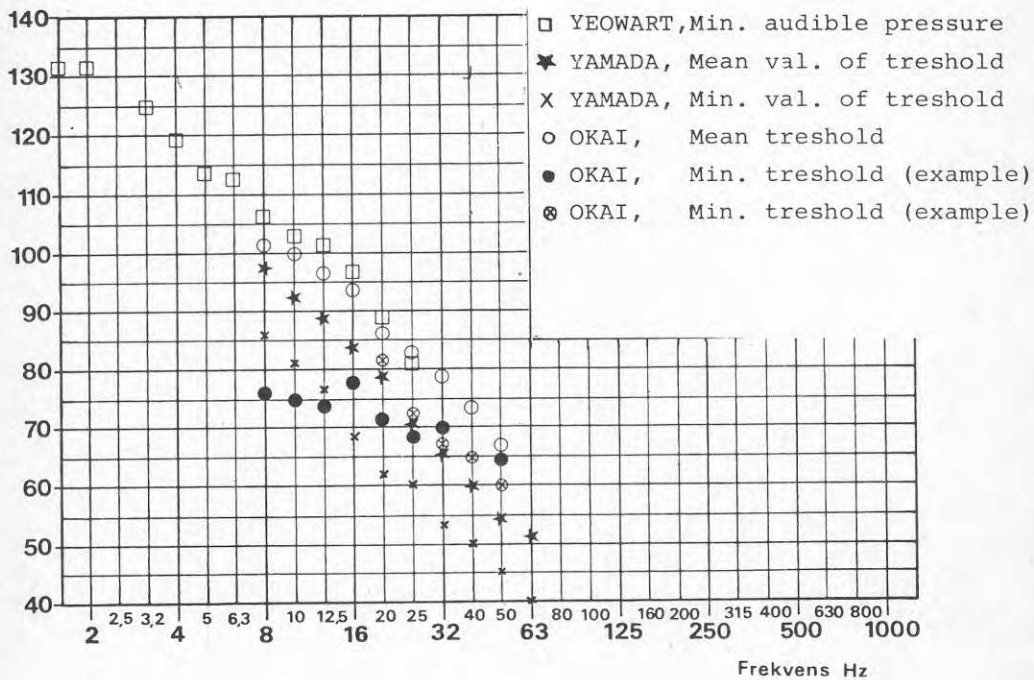
13. H.G. Leventhall: The occurrence, measurement and analysis of low frequency sound pp. 15 i ref. 9 ovan.
14. N.S Yeowart Thresholds of hearing and loudness for very low frequencies. Infrasound and low frequency vibration (W. Tempest e.d) Academic Press 1976.
15. Paap, Gaál: 7th Colloqium on Acoustics, Budapest 1979.
16. L.S Wittle et al: The audibility of low-frequency sounds. Journal of Sound and Vibration pp 431-448 1972.
17. G Koopmann and H Pollard. Modell studies of Helmholtz resonances in rooms with windows and doorways. Journal of Sound and Vibration pp 489-503 1971.
18. J Zwislocki JASA, volume 29, nr 7, july 1957 pp 795-805: In search of the boneconduction theeshold in free sound field.
19. B. Körle, S. Einarsson: Regler och riktlinjer för beaktande av infraljud vid projektering av VVS-installationer. Byggforskningsrådet, slutredovisning av projekt 781154-1, AXRO Consult AB / Ingemansson Akustik, Göteborg 1980.
20. J. Svensson, S. Einarsson: Diskussionsdag om arbetsmiljöns långtidseffekter - lågfrekvent ljud. Byggforskningsrådets projekt 810840-4. Ingemansson Akustik rapport H-9312-A 1982.

**figurbilaga
1-31**

MÄTNING AV LÅGFREKVENT BULLER

FIGUR 1

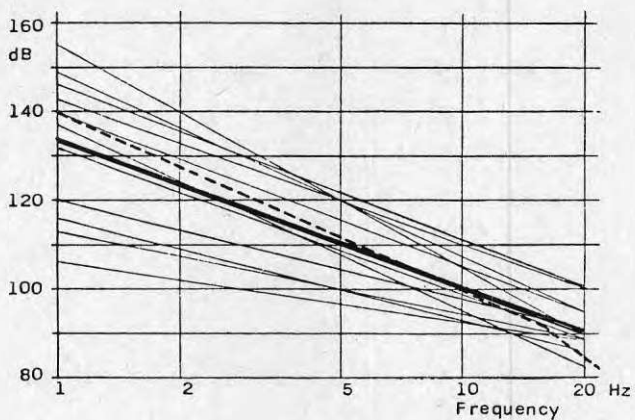
Ljudtrycksnivå (rms) för sinuston
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa



Jämförelse mellan olika uppmätta perceptionströsklar,
inklusive exempel på tröskelvärden för känsliga individer.

Hämtad från ref. 10

FIGUR 2



Hearing threshold curves in infrasonic range

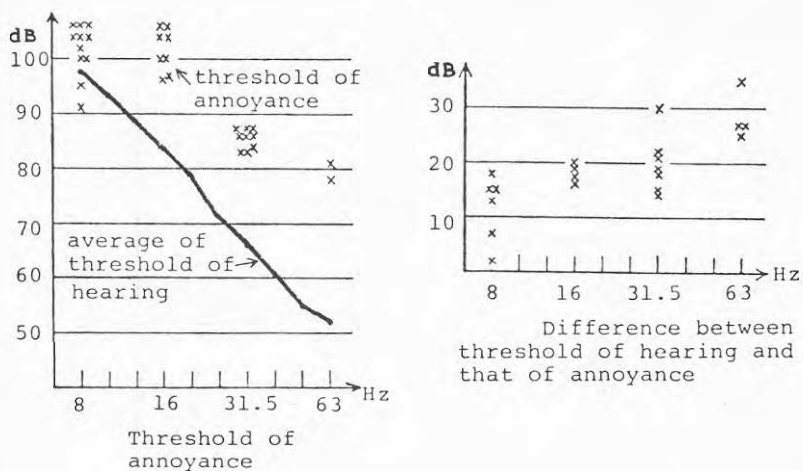
— threshold curves for our subjects
 — average of our threshold curves
 - - - Yeowart's threshold curve

Hörseltröskelmätningar i infraljudsområdet

— uppfattbarhetskurvor för våra mätningar
 — medelvärde av våra uppfattbarhetskurvor
 - - - - Yeowarts redovisade uppfattbarhetskurva

Hämtad från ref.15

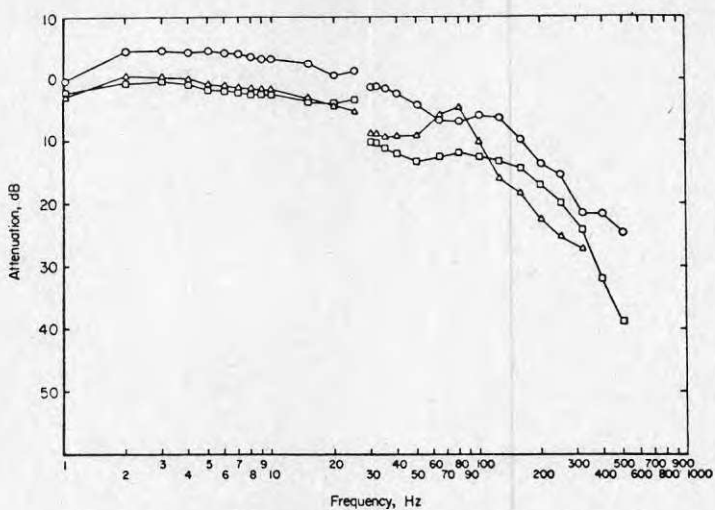
FIGUR 3



Figur som visar skillnaden mellan uppfattbarhetskurvan (medelvärde) och den subjektiva nivån för störning (ett x för varje undersökt individ)

Hämtad från ref. 9

FIGUR 4



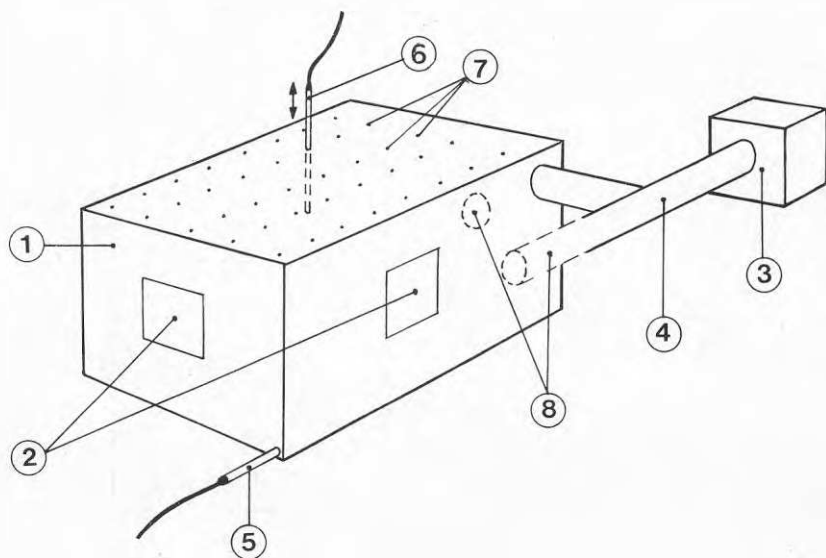
Earmuff hearing protection against infrasound and low frequency energy.

Insättningsdämpning för olika hörselkåpor

- hörselkåpa A
- ▲ hörselkåpa B
- hörselkåpa C

Hämtad från ref. 14

FIGUR 5



Mätmodellens utseende

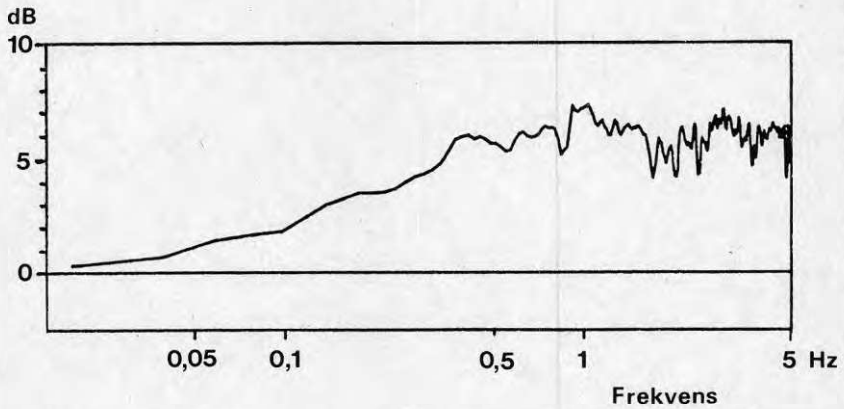
- 1 Modellrum 63·35·25 cm
- 2 Luckor för simulering av fönster, dörrar etc
- 3 Ljudkälla med omställbar inre impedans
- 4 Kanalsystem, diameter 20-100mm, med eller utan ljuddämpare.
- 5 Kompressormikrofon B&K 4134
- 6 Sondmikrofon B&K 4134 med svanhals
- 7 Alternativa hål för sondmikrofonen (normalt tätade)
- 8 Alternativa dragningar av kanalsystemet

Mätuppkoppling enligt fig.28

FIGUR 6

Aritmetiskt medelvärde av 40 differenser i dB mellan ljudtrycksspektrum med ventilation i drift och motsvarande spektrum med ventilation avstängd.

Mätningarna har skett i kontorsrum

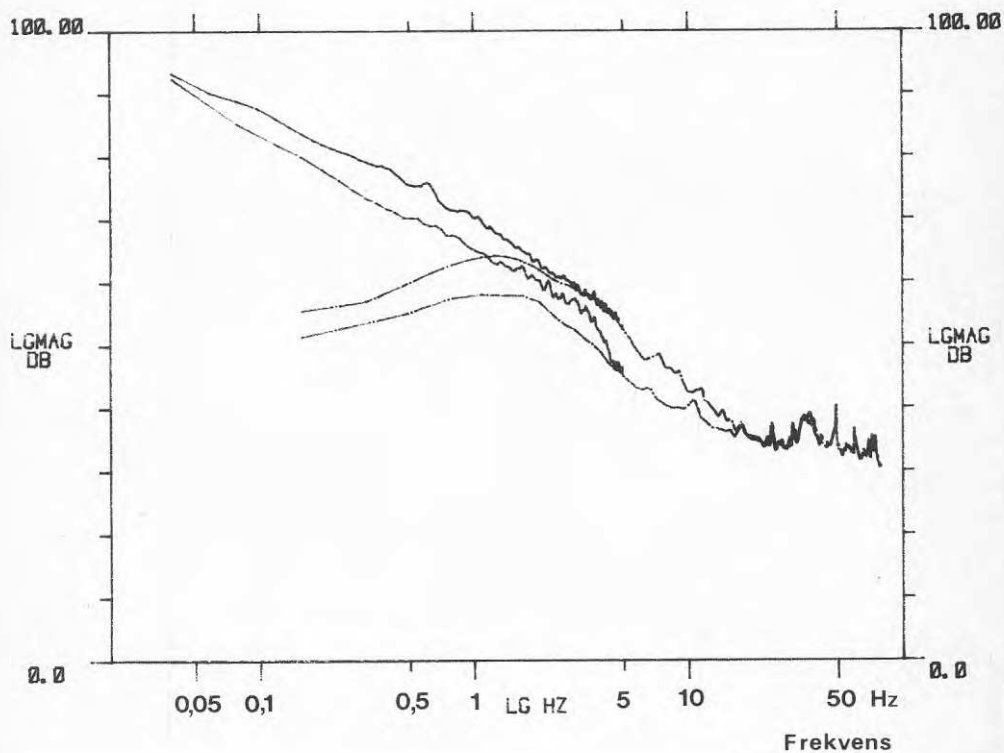


FIGUR 7a

Energimedelvärden av spektra med resp. utan ventilation
i drift i kontorsrum.

- 40 + 40 mätningar med $f_u = 0,01$ Hz
 - - - - - 32 + 32 mätningar med $f_u = 2$ Hz

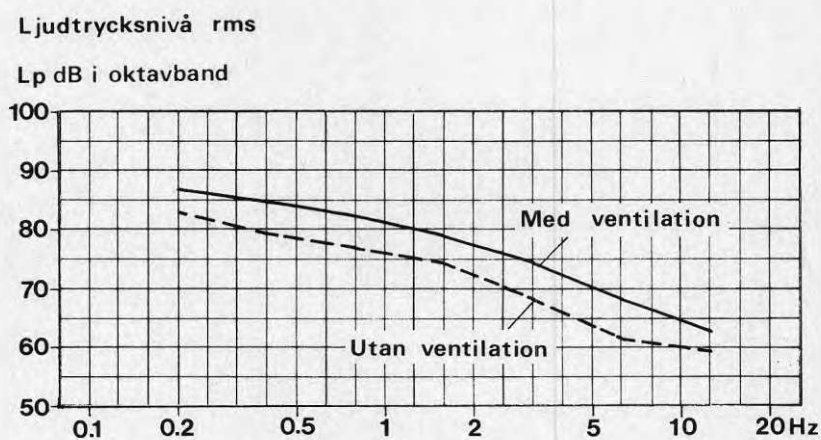
Ljudtrycksnivå rms, filterbandbredd 0,06 Hz



FIGUR 7b

Energimedelvärden av spektrum i kontorsrum med resp. utan ventilation i drift.

Samma underlag som i föregående figur.



FIGUR 8

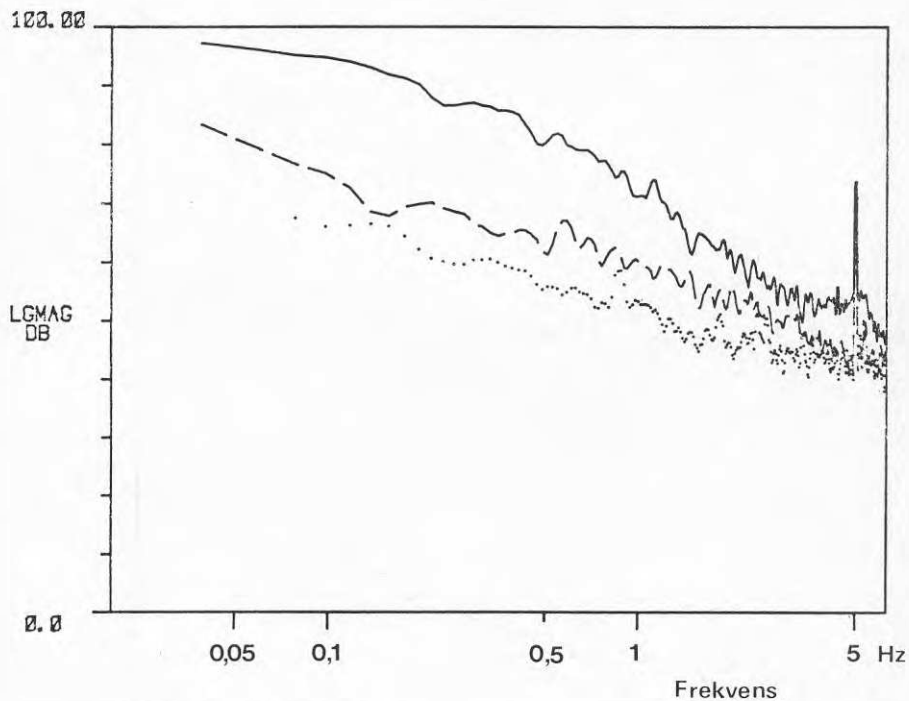
Exempel på infraljudspektra från kontorsrum

———— med ventilation i drift

----- ventilationsanläggningen avstängd

..... elektrisk bakgrunds nivå då mikrofon-
kapseln ersatts med ekvivalent kapacitans
47 pF

Ljudtrycksnivå rms vid filterbandbredden 0,06 Hz

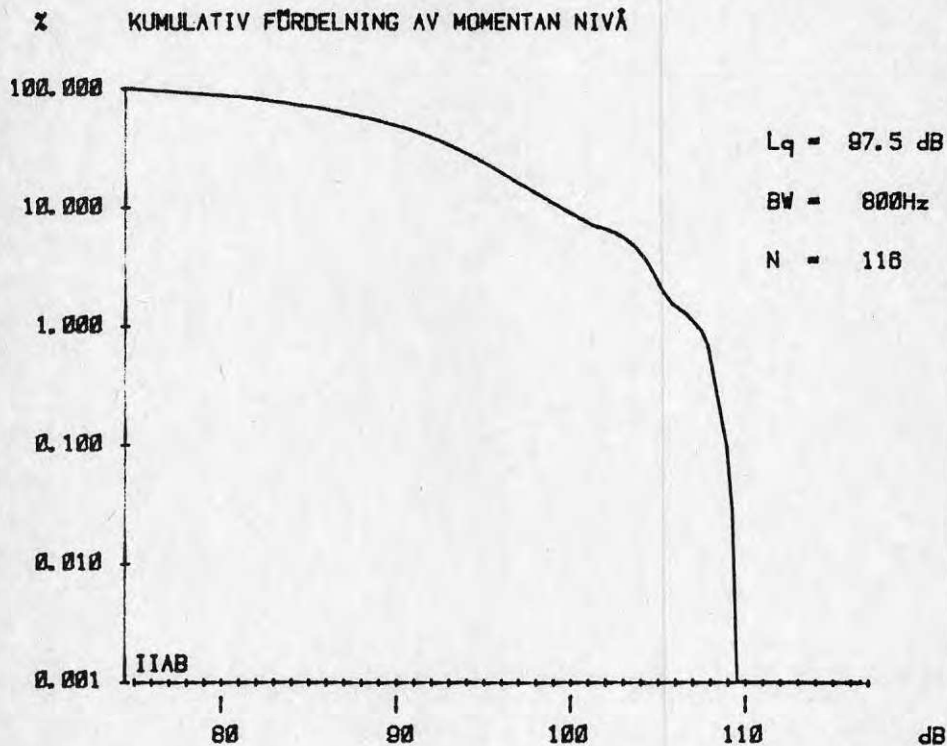


(Nätbrum vid 5 Hz x 10)

FIGUR 9

Fördelningsanalys av ljudtrycksnivån i ett kontorsrum med ventilation i drift.

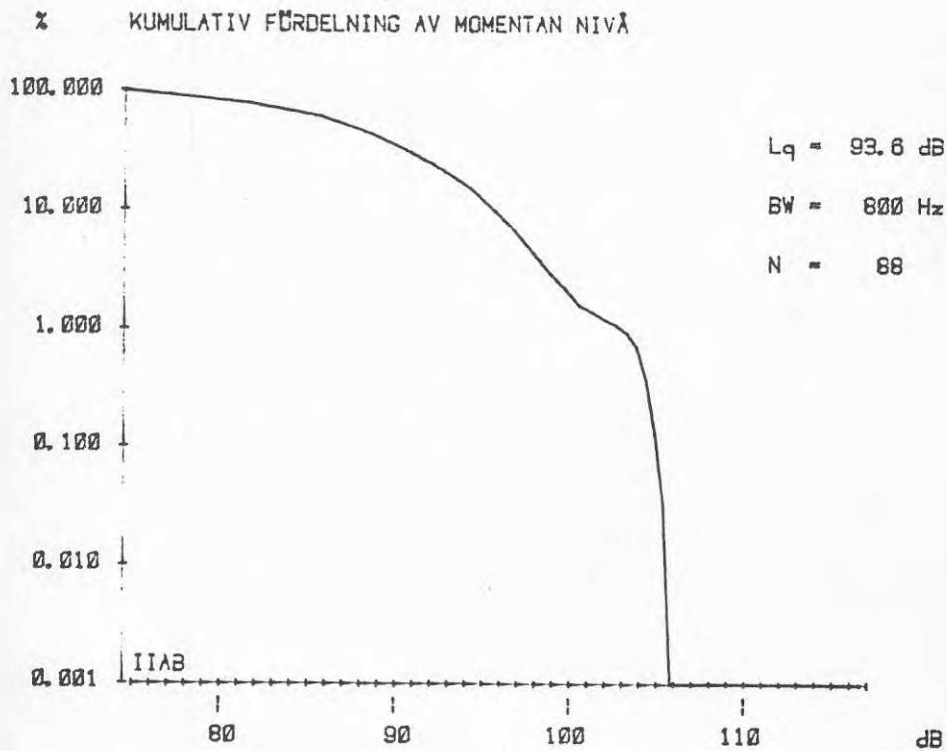
Undre gränshfrekvens 0,01 Hz



FIGUR 10

Fördelningsanalys av ljudtrycksnivån i ett kontorsrum med ventilationen avstängd (jfr. föregående fig.)

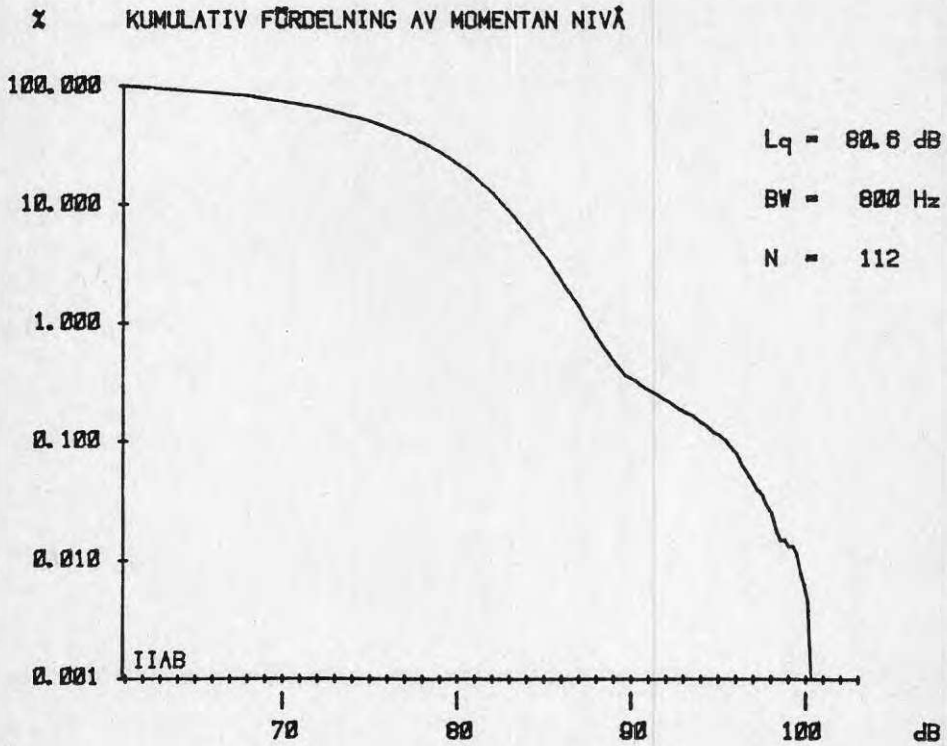
Undre gränshfrekvens 0,01 Hz



FIGUR 11

Fördelningsanalys av ljudtrycksnivån i ett kontorsrum
(samma som föreg.) med ventilation i drift.

Undre gränshfrekvens 2 Hz.

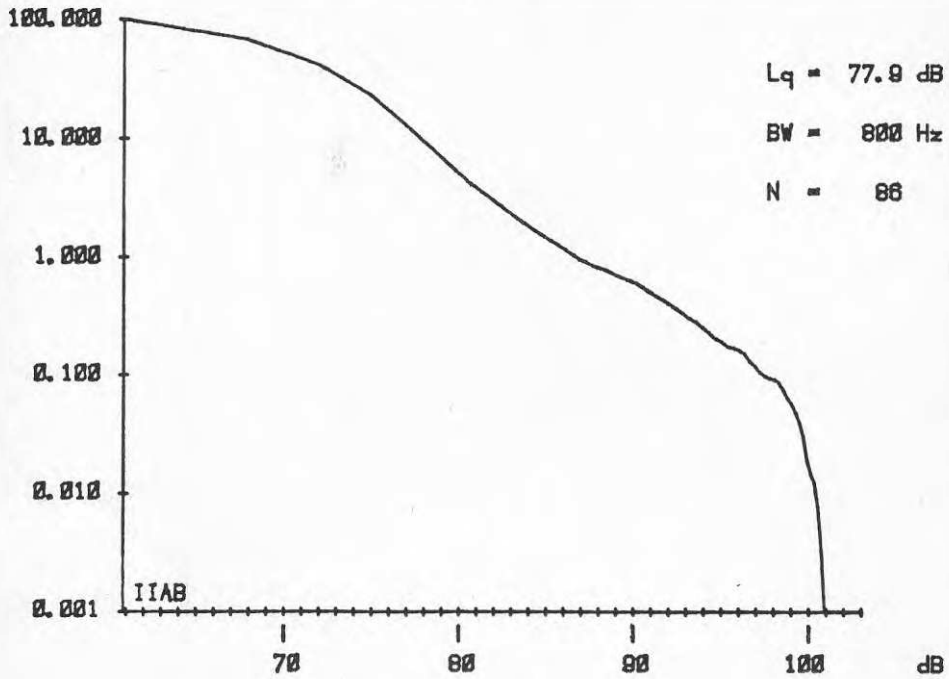


FIGUR 12

Fördelningsanalys av ljudtrycksnivån i ett kontorsrum med ventilationen avstängd (jfr.föreg.fig.).

Undre gränshfrekvens 2 Hz

Σ KUMULATIV FÖRDELNING AV MOMENTAN NIVÅ



FIGUR 13a

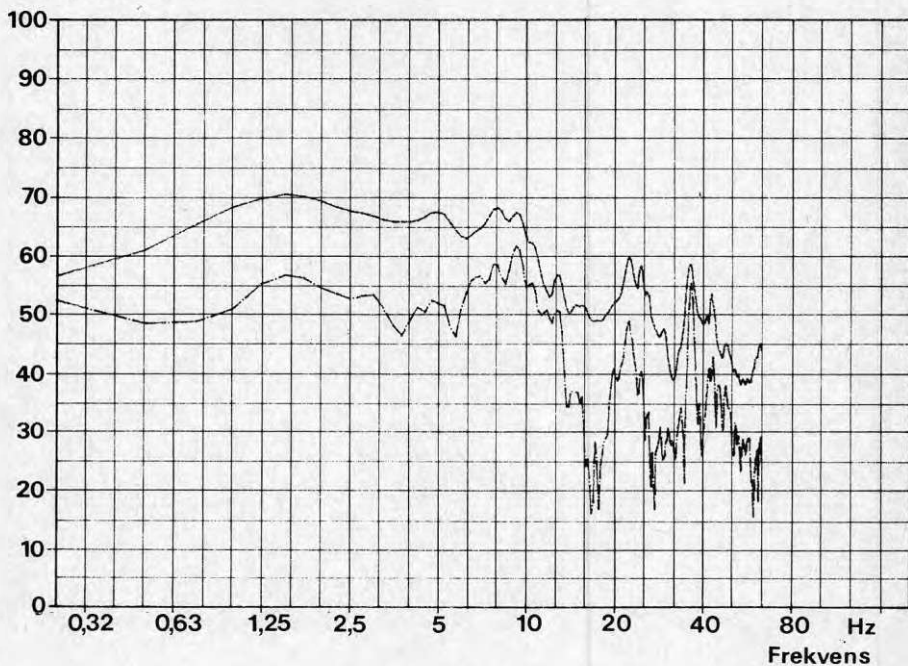
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn.

- Ventilation i drift, totalspektrum
- - - - - Med utomhusbullret koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 13b

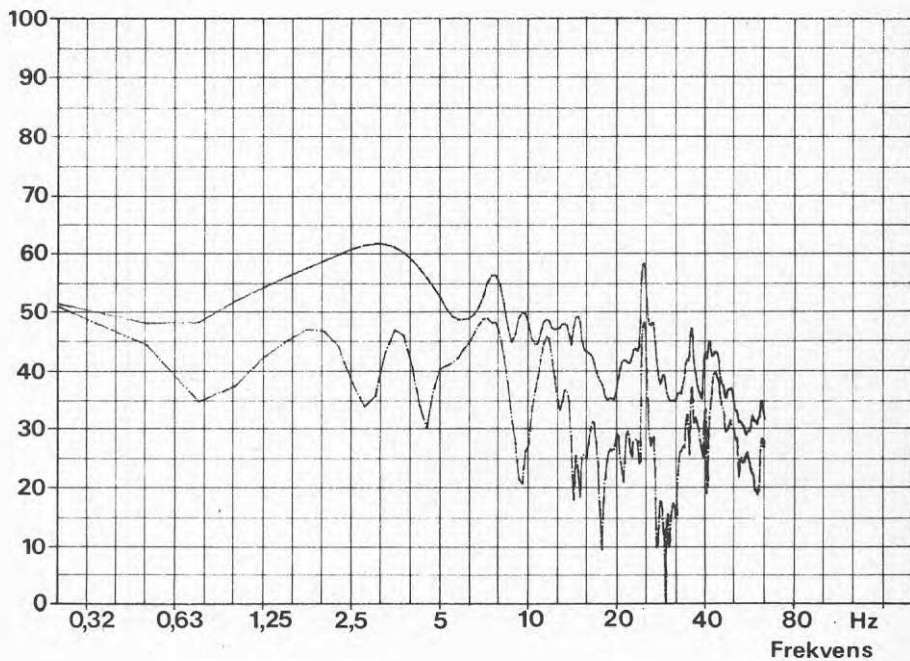
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn (som föreg.)

- Ventilation avstängd, totalspektrum
- - - - - Med utomhusbullret koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 14

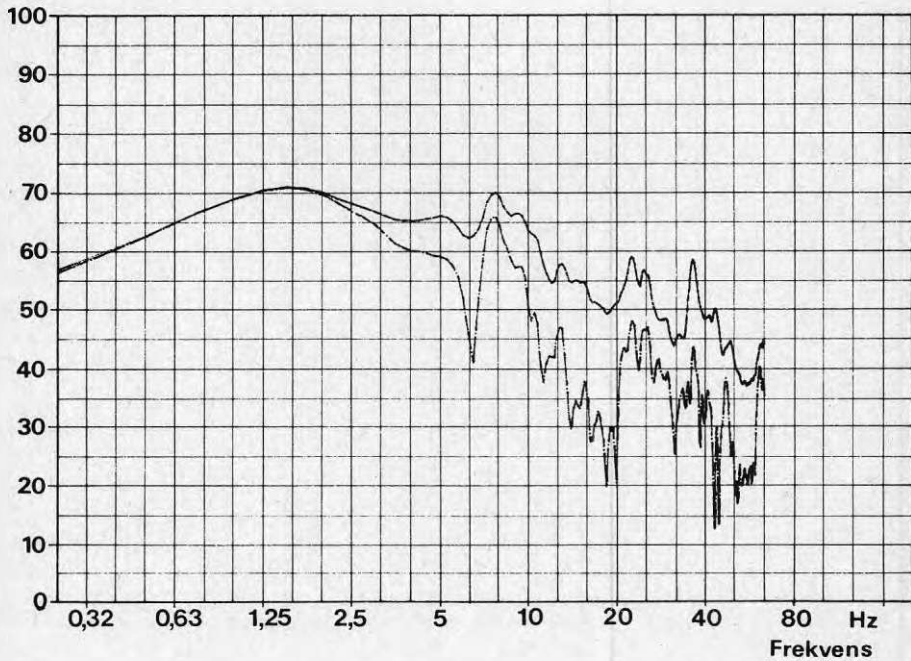
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn

- Ventilation i drift, totalspektrum
 - · - · - · - · - Med bullret från tilluftdonet koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
 dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 15a

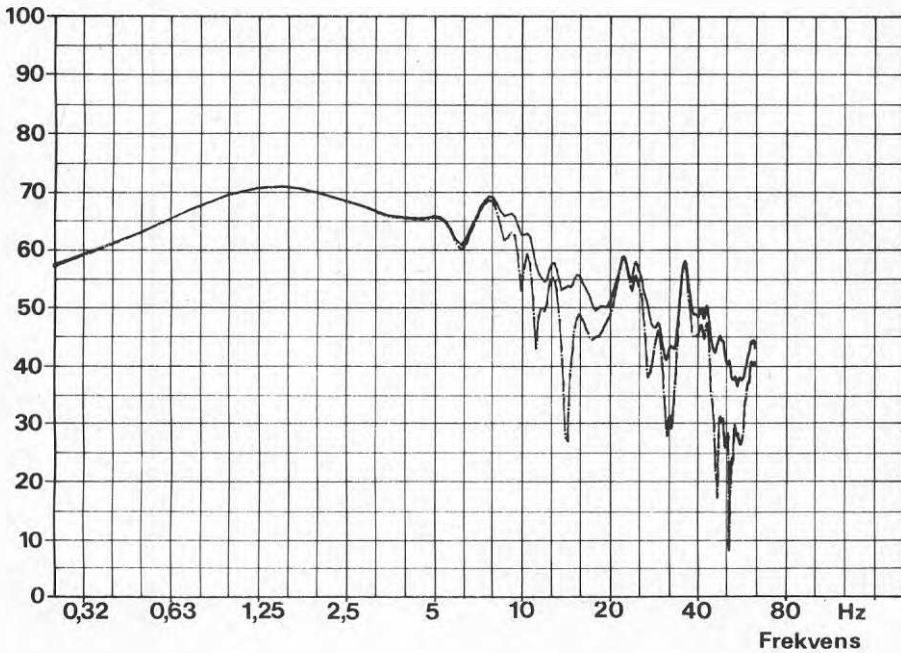
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn

- Ventilation i drift, totalspektrum
 - - - - - Med bullret från frånluftdonet koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
 dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 15b

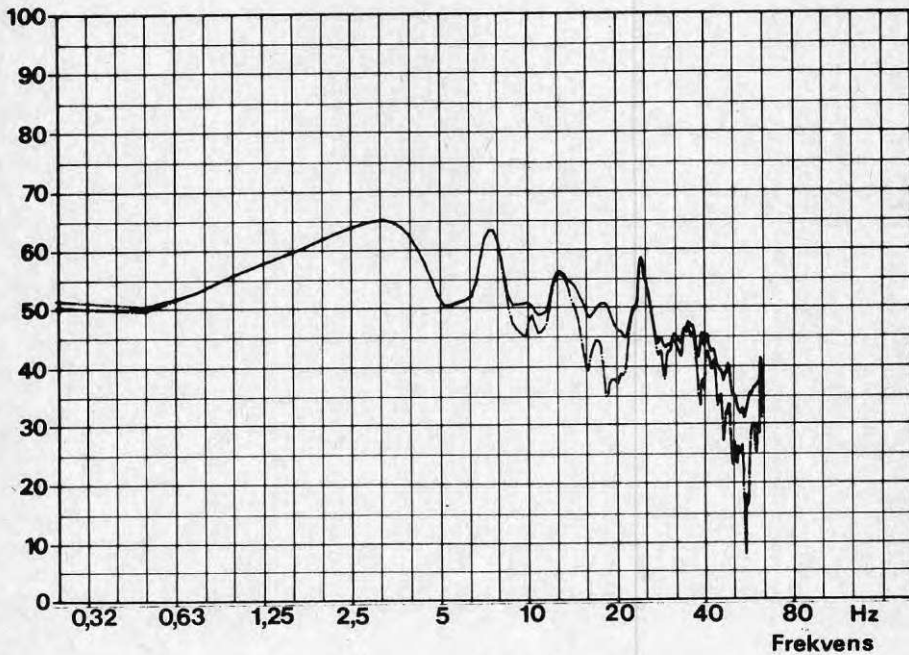
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn

- Ventilation avstängd, totalspektrum
 - - - - - Med bullret från frånluftdonet koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
 dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 16

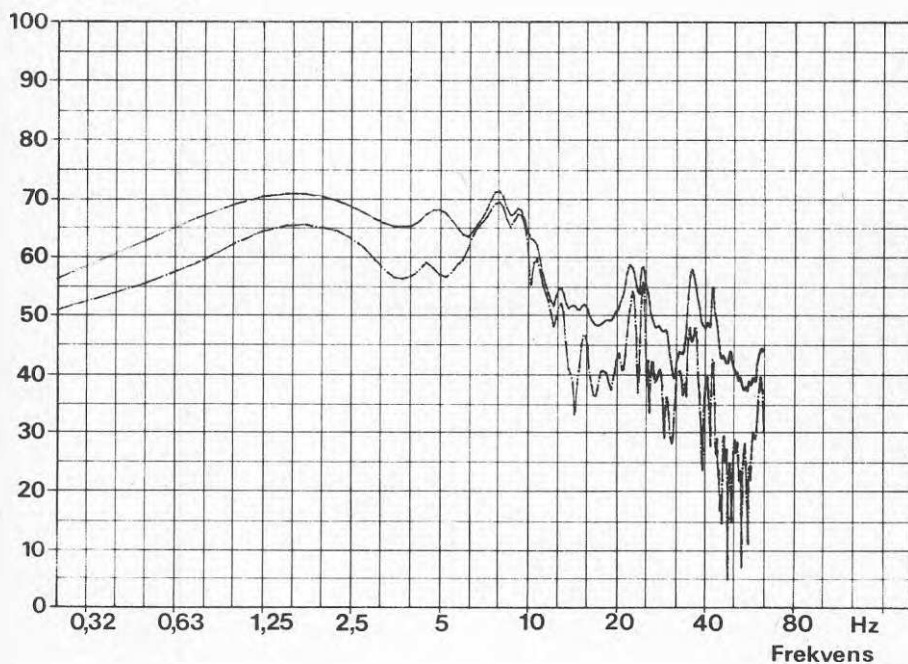
Lokalisering av ljudkällan med koherent mätteknik

Mät punkt i rummets ena hörn

- Ventilation i drift, totalspektrum
- - - - - Med korridorbullret koherent delspektrum

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



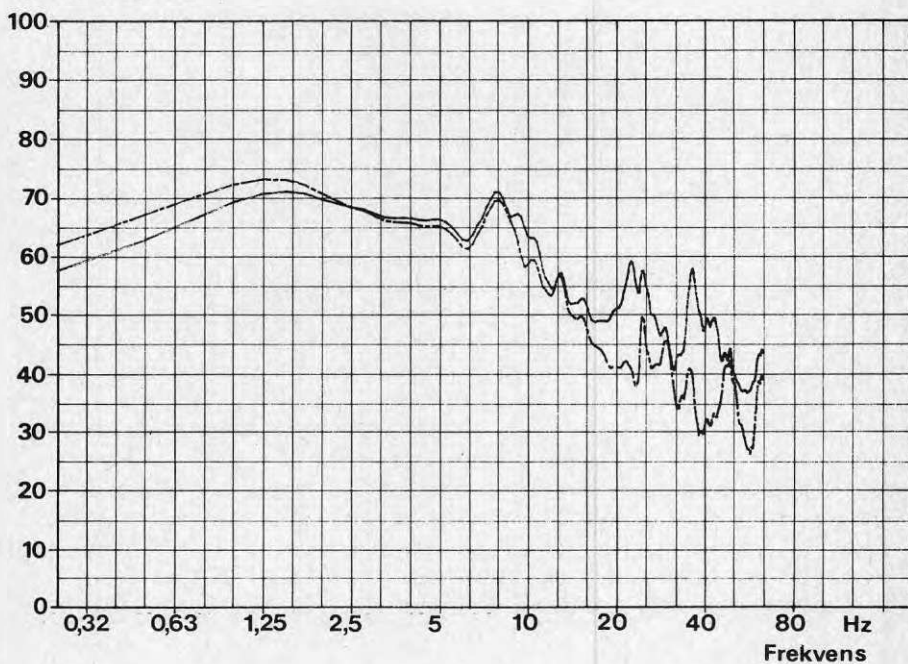
FIGUR 17

Skillnad mellan mätpunkter

- Mätpunkt i rummets ena hörn
- - - - - Mätpunkt mitt i rummet

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



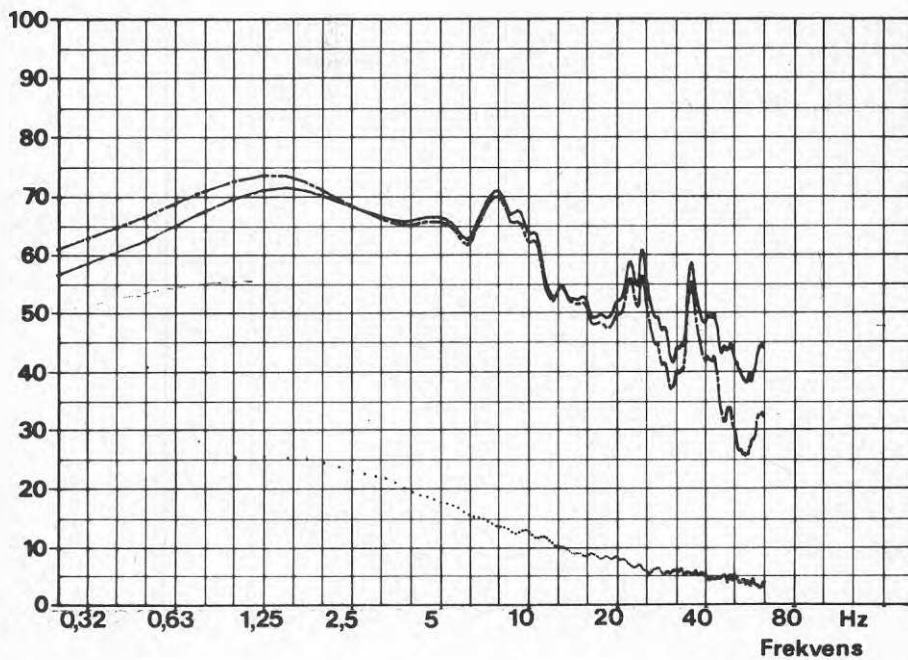
FIGUR 18

Skillnad mellan mätpunkter

- Mät punkt i rummets ena hörn
- - - - - Mät punkt på 1/4 av rumsdiagonalen
- Elektrisk bakgrunds nivå med 47 pF mikrofondummy

Ljudtrycksnivå vid $B=0,8$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 19

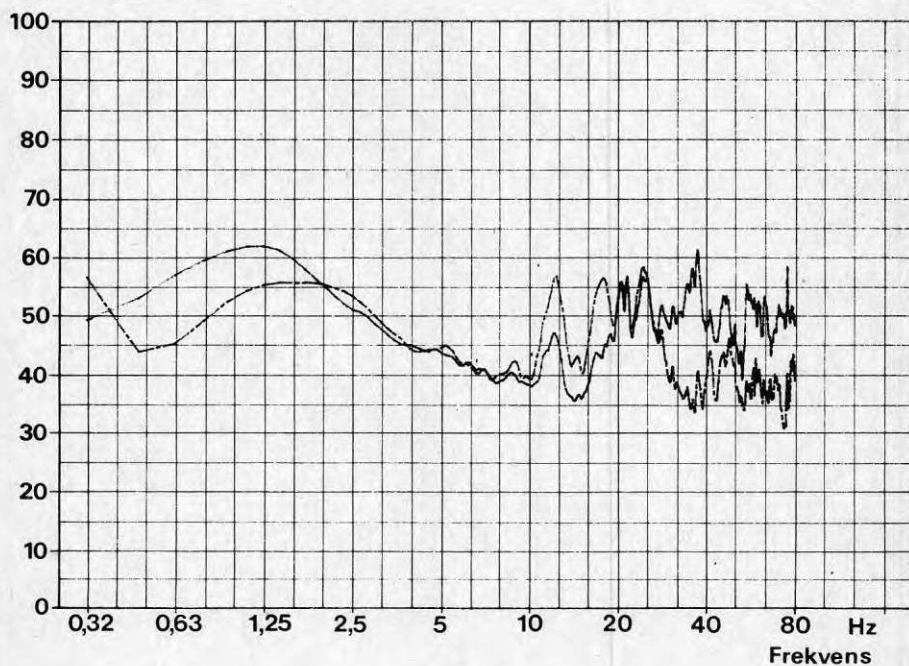
Skillnad mellan mätpunkter

Rum 1

- Mätpunkt i rummets ena hörn
- - - - - Mätpunkt vid arbetsplats

Ljudtrycksnivå vid $B=0,5$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 20

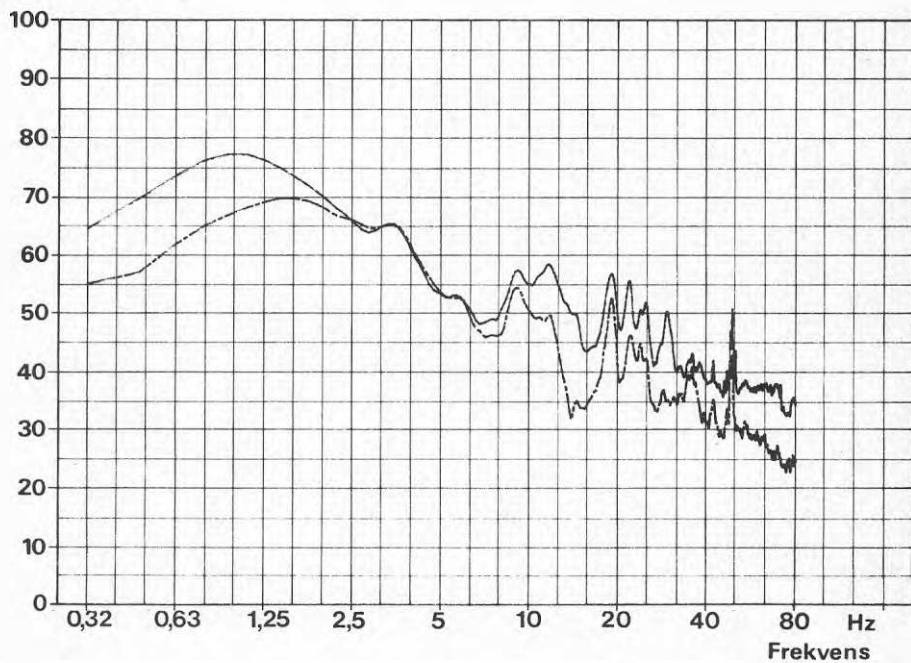
Skillnad mellan mätpunkter

Rum 2

- Mätpunkt i rummets ena hörn
- - - - - Mätpunkt vid arbetsplats

Ljudtrycksnivå vid $B=0,5$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 21

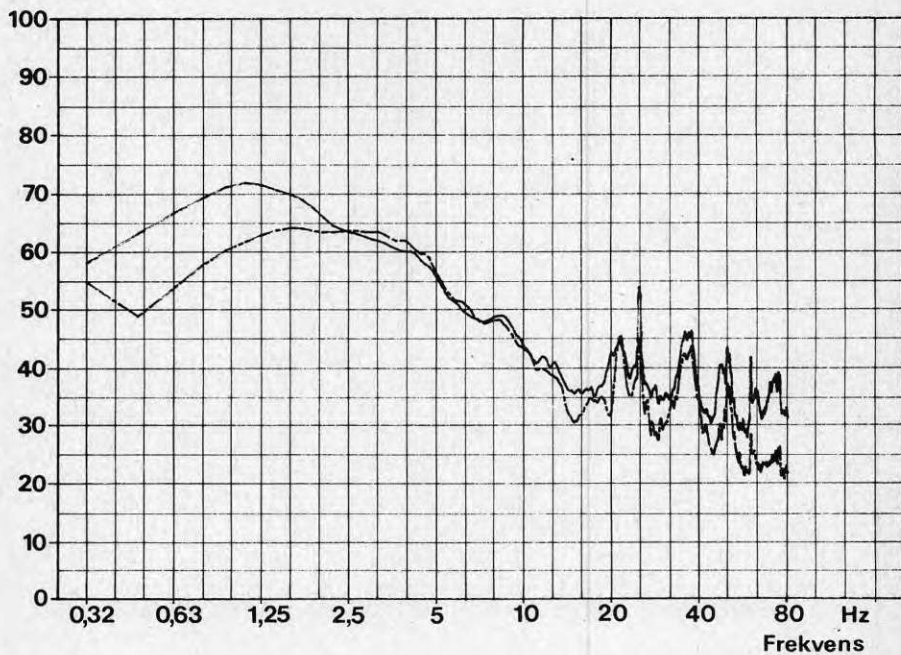
Skillnad mellan mätpunkter

Rum 3

- Mät punkt i rummets ena hörn
- - - - - Mät punkt vid arbetsplats

Ljudtrycksnivå vid $B=0,5$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 22

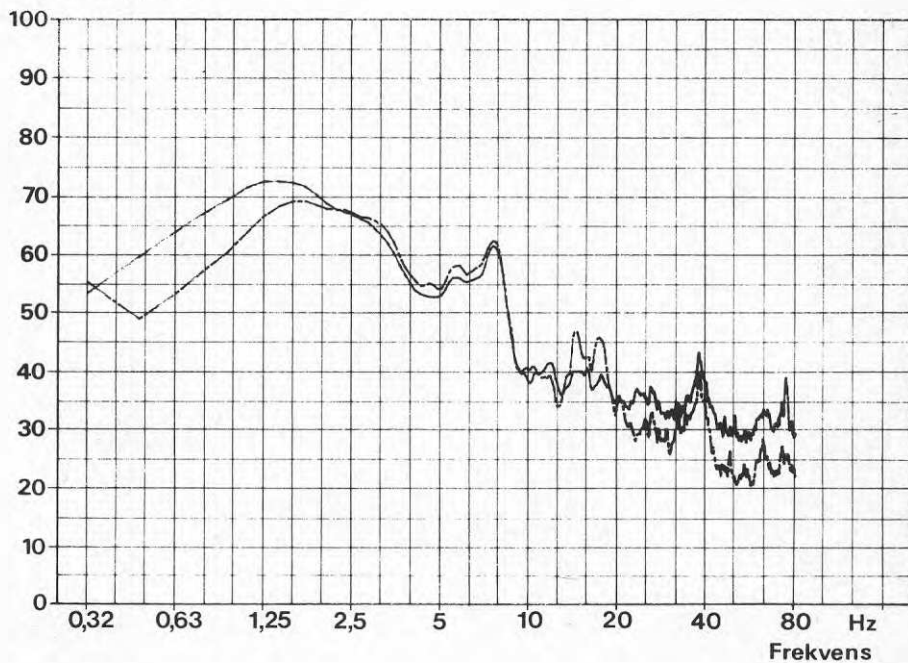
Skillnad mellan mätpunkter

Rum 4

- Mätpunkt i rummets ena hörn
- - - - - Mätpunkt vid arbetsplats

Ljudtrycksnivå vid $B=0,5$ Hz
dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



FIGUR 23

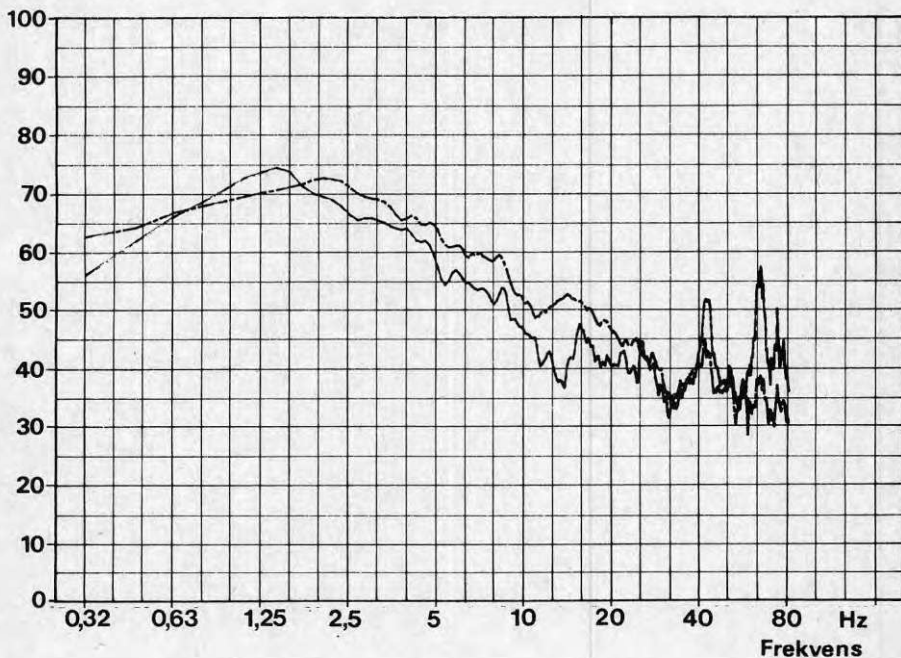
Skillnad mellan mätpunkter

Rum 5

- Mätpunkt i rummets ena hörn
 - - - - - Mätpunkt vid arbetsplats: Denna analys innehåller ovidkommande transienter som ger felaktigt höga nivåer (varnande exempel).

Ljudtrycksnivå vid $B=0,5$ Hz
 dB rel $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

Undre gränshfrekvens 2 Hz



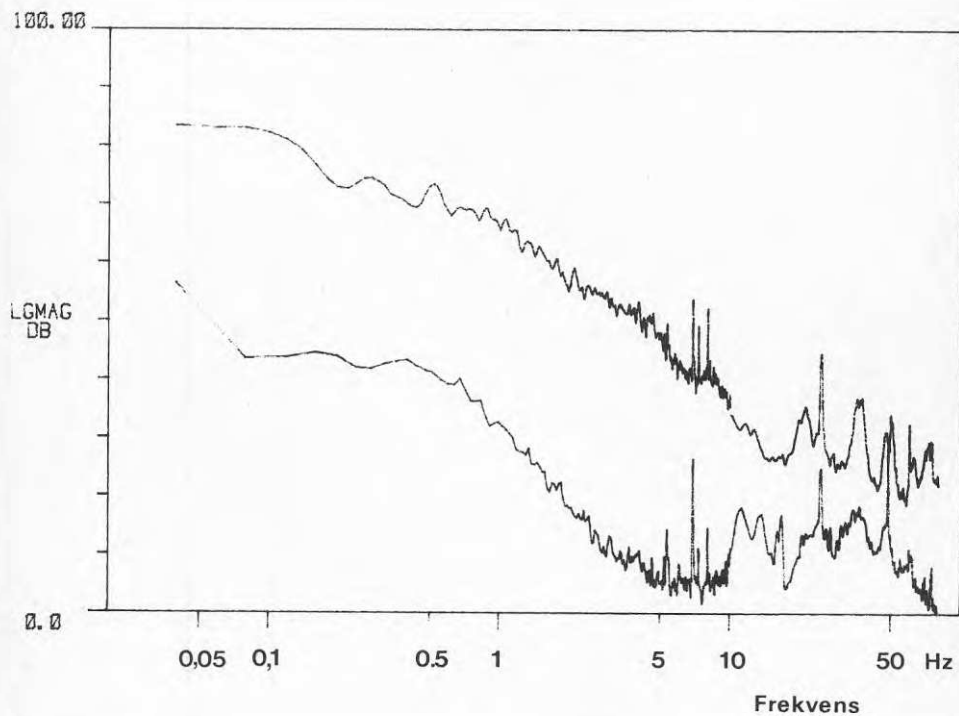
FIGUR 24

Samband mellan luftljud och vibrationer

Övre kurvan :Luftljuds nivåer i dB rel. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa i rummets
ena hörn.

Undre Kurvan:Vibrationshastighetsnivå i dB rel. $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
mitt på golvet.

Analysbandbredden normaliserad till 0,06 Hz

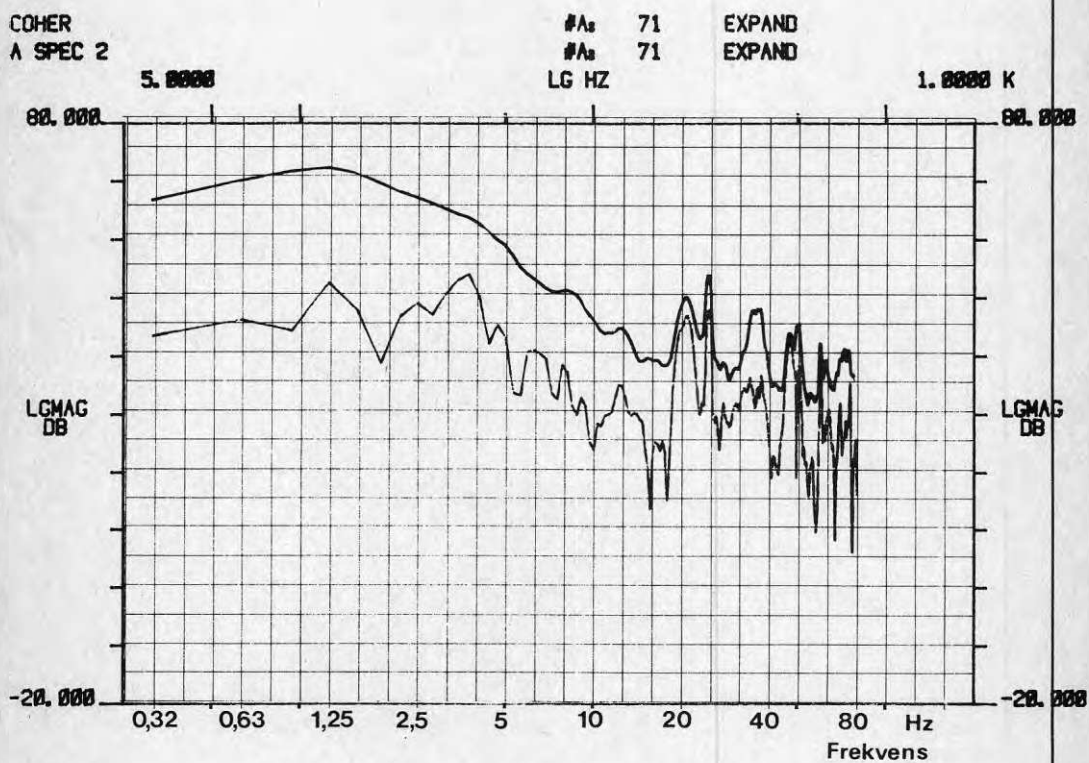


FIGUR 25

Samband mellan luftljud och vibrationer

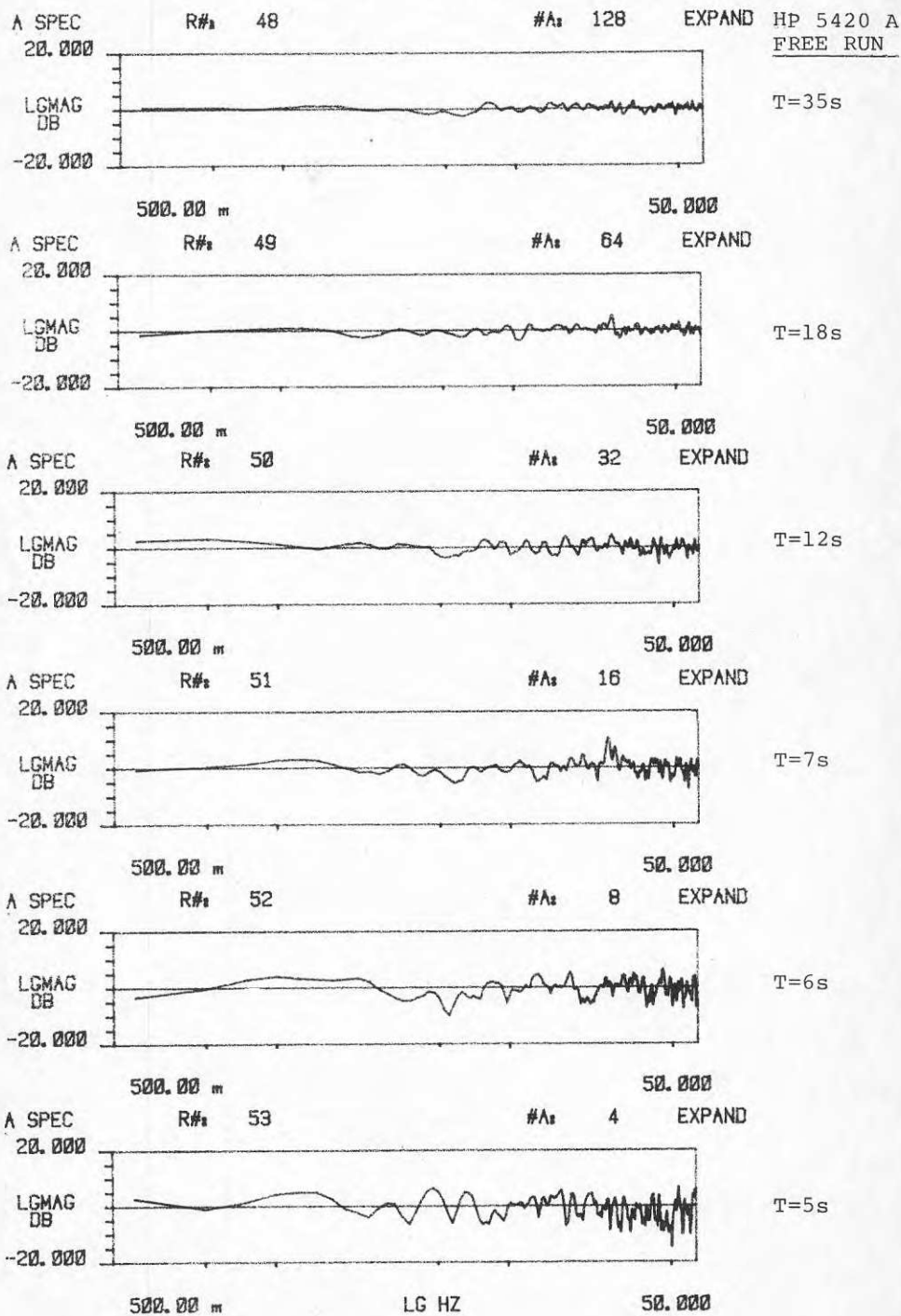
Övre kurvan: Luftljuds-nivå i rummets ena hörn

Undre kurvan: Med golvvibrationerna koherent delspektrum

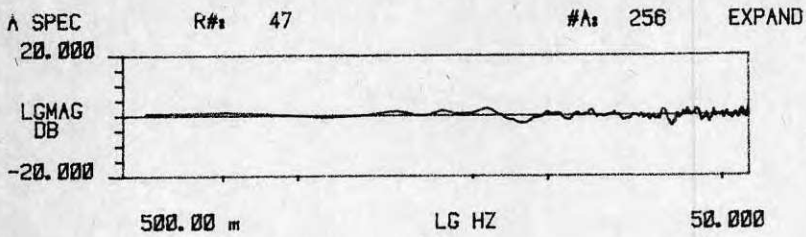


FIGUR 26

Mät noggrannhet som funktion av analys-
tiden T vid bandbredden $B=0,8$ Hz
Avvikelser relativt $\#A=256$ överlappande delmätningar ($T=68s$)



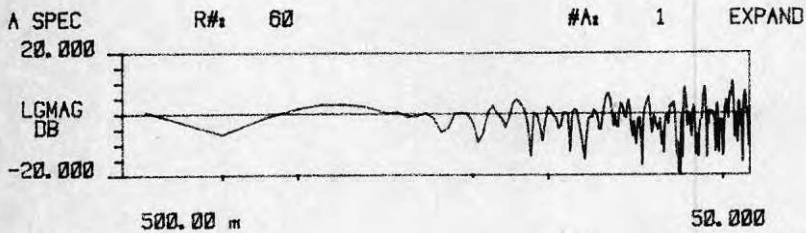
FIGUR 27 Mät noggrannhet som funktion av analys-
tiden T vid bandbredden B=0.8 Hz



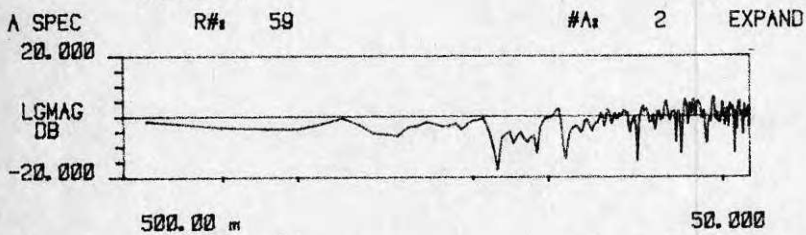
T=68s
(överlappande
Kontra konsekutiva)

Avvikelser relativt # A = 32 konsekutiva delmätningar

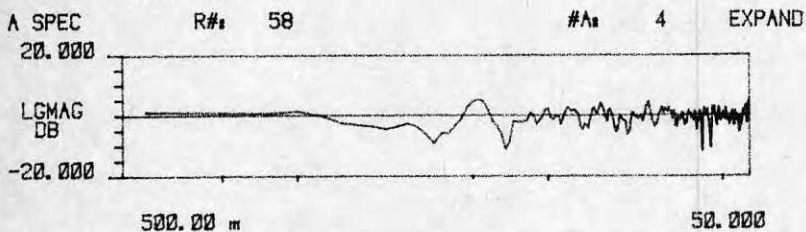
(T= 158s)
HP 5420A
INTERNAL TRIG



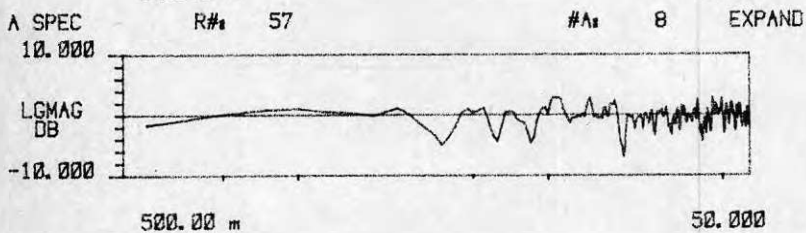
T=4s



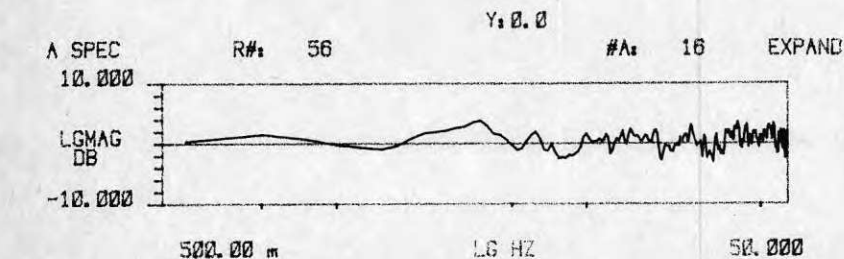
T=10s



T=19s

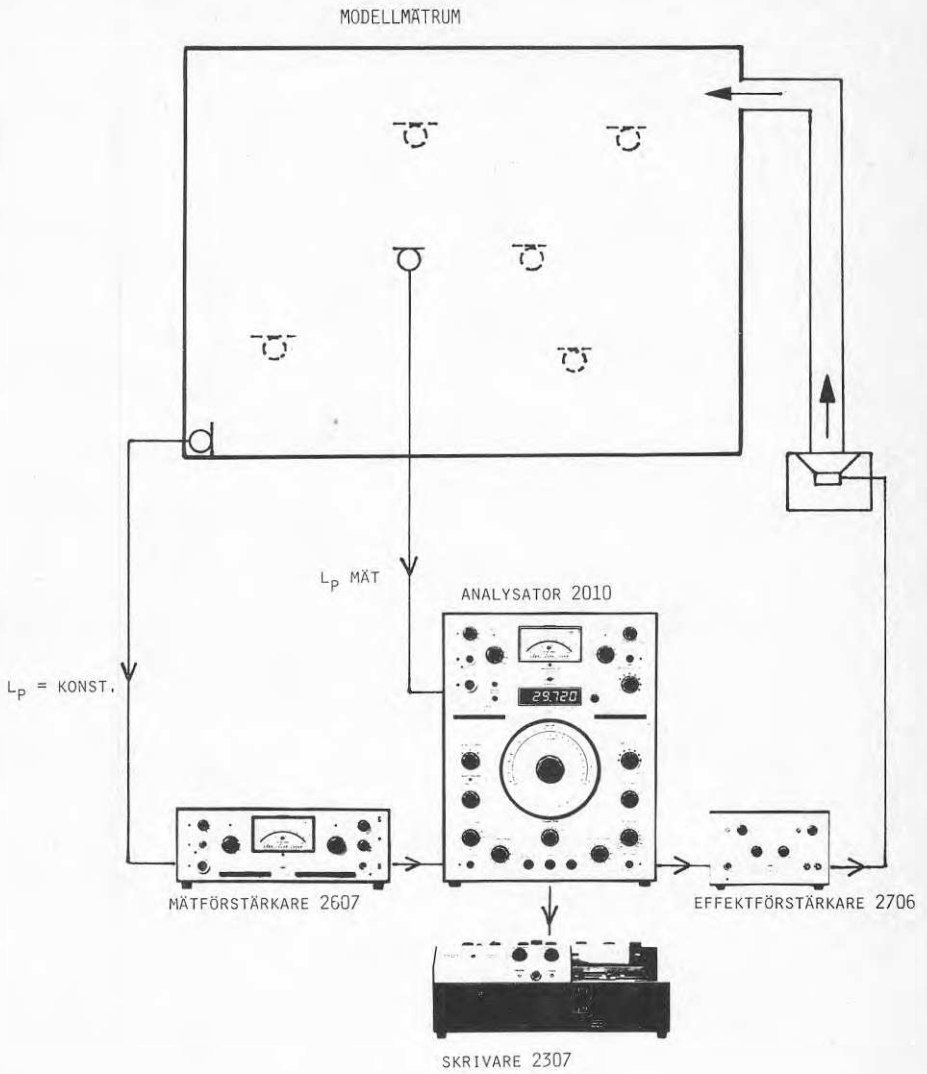


T=39s

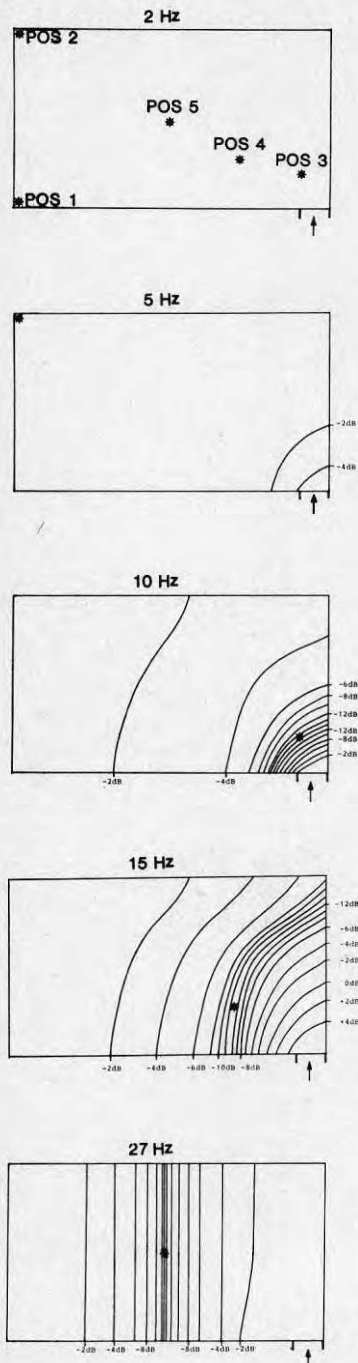
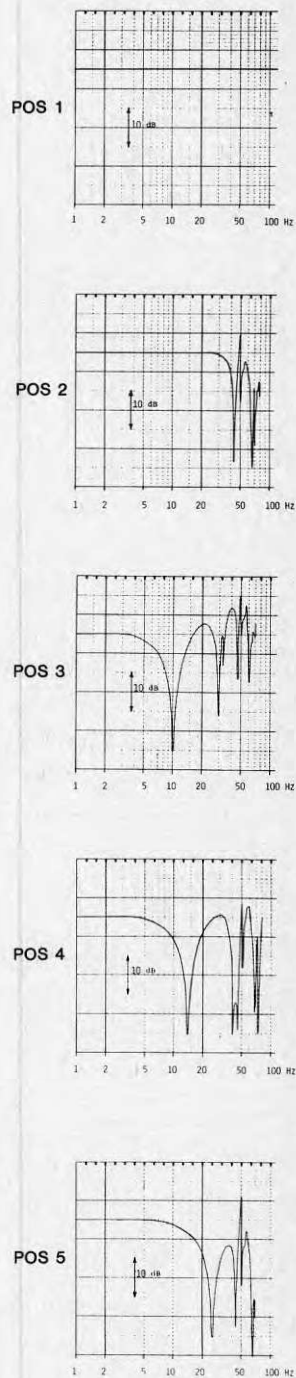


T=80s

FIGUR 28

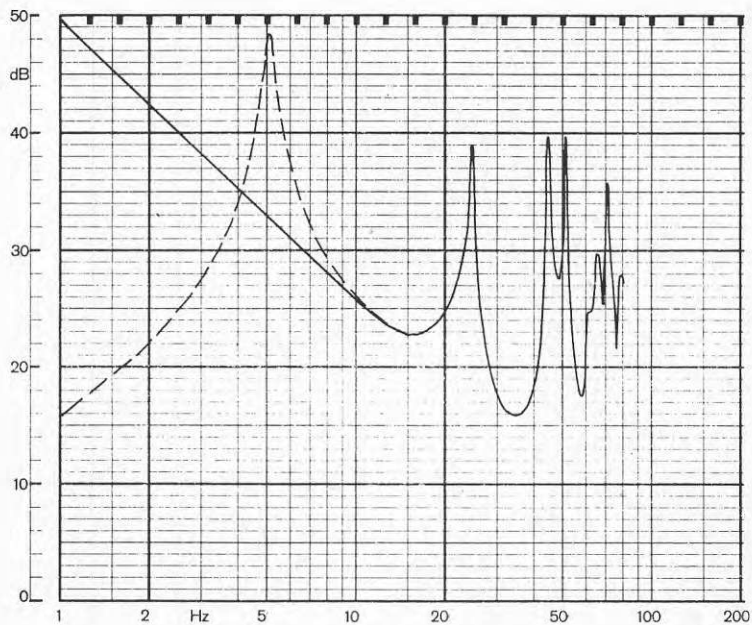


FIGUR 29

LJUDTRYCKSFÖRDELNING I RUMMET
VID OLIKA FREKVENSERFREKVENSPANALYS I OLIKA
POSITIONER

FIGUR 30

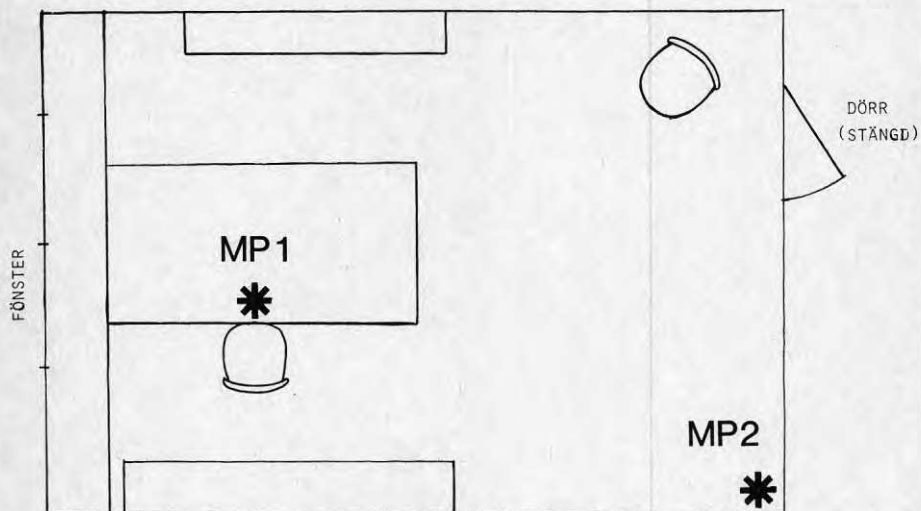
Ljudtrycksnivåer i rum med
stela väggar 6,3·3,5·2,5 m



— slutet rum
- - - rum med öppning (tex fönster)
(Helmholtzfrekvens 5,2 Hz)

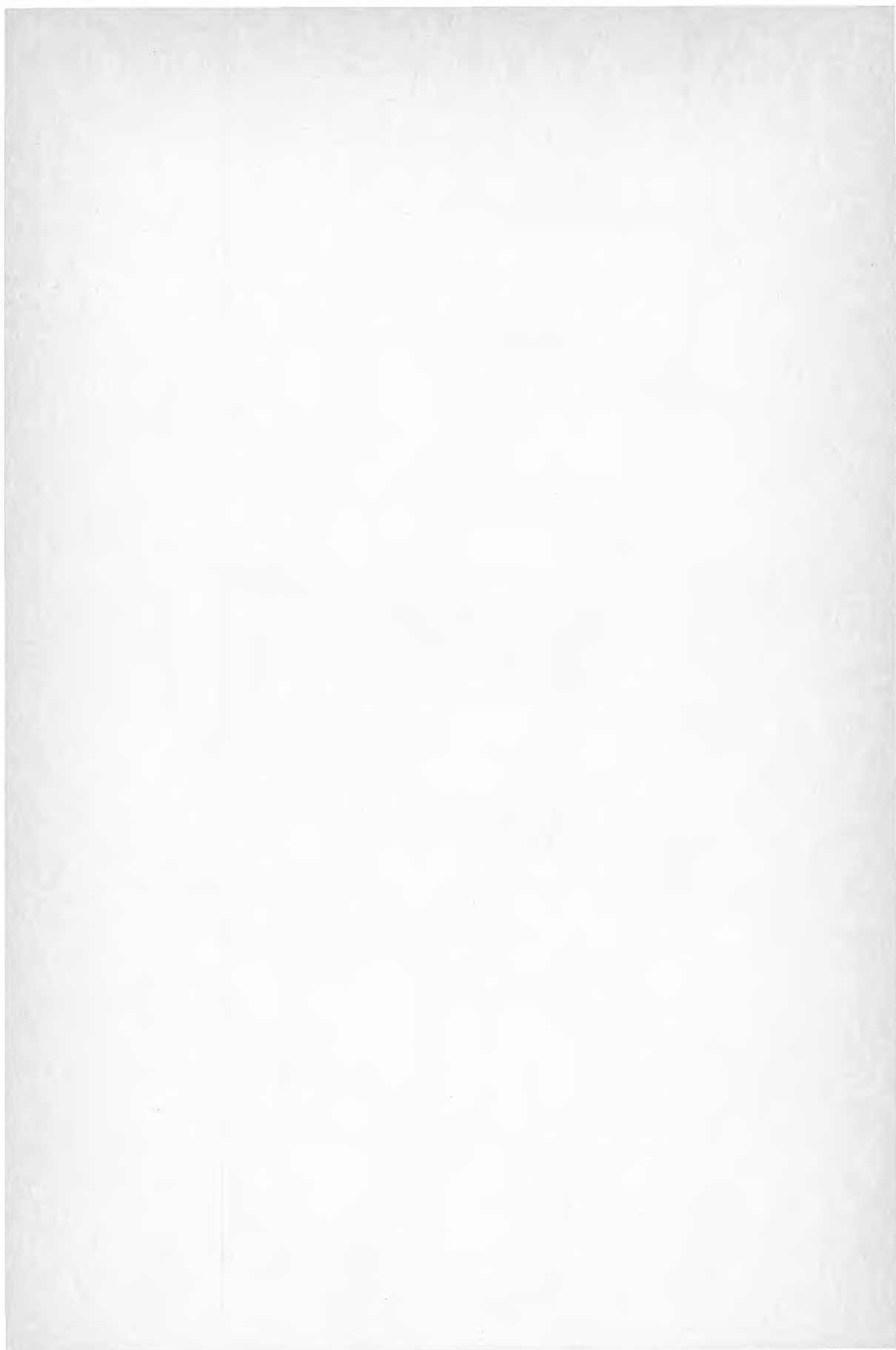
FIGUR 31

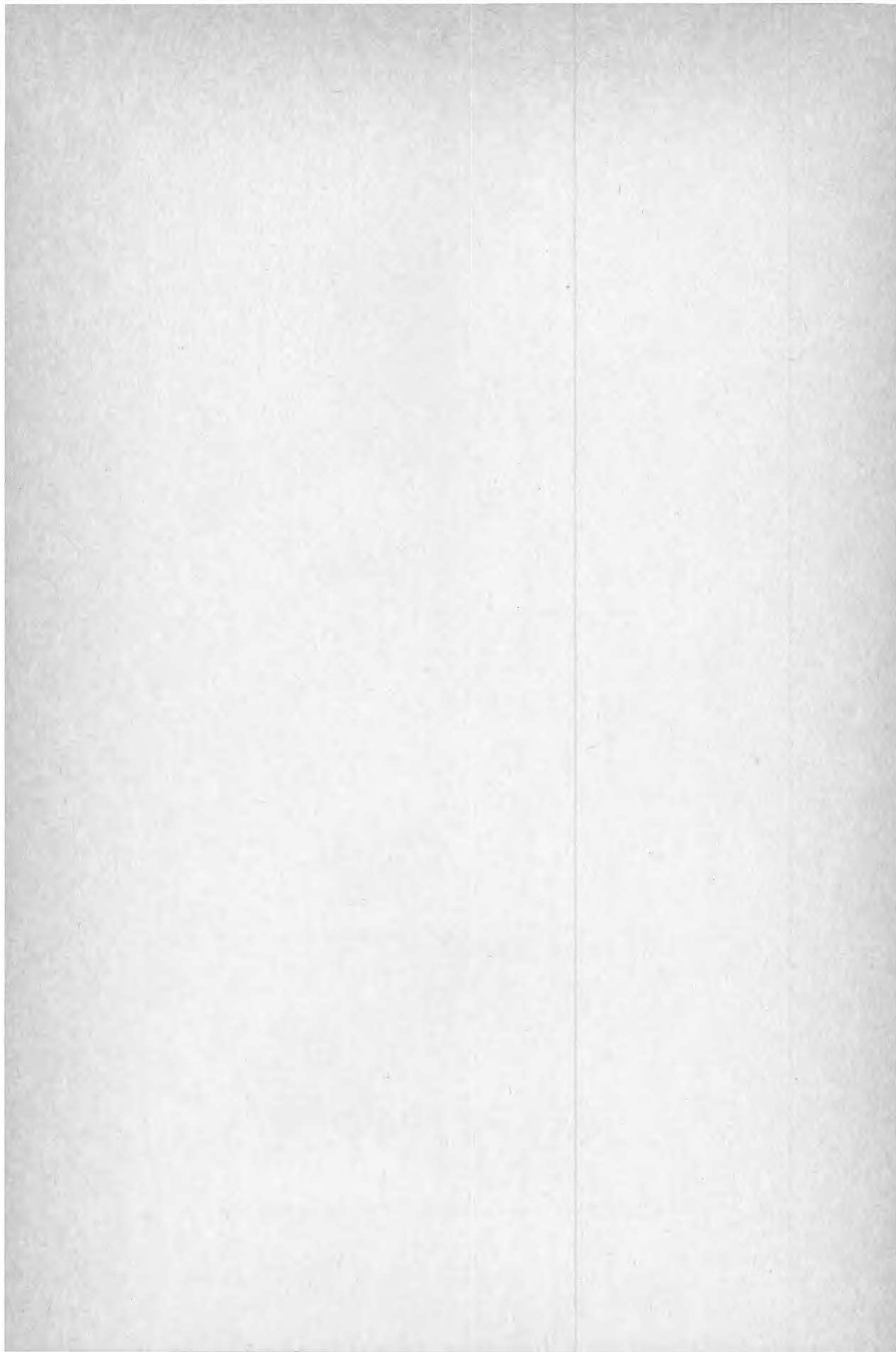
Val av mätpunkt
Exempel: kontorsrum

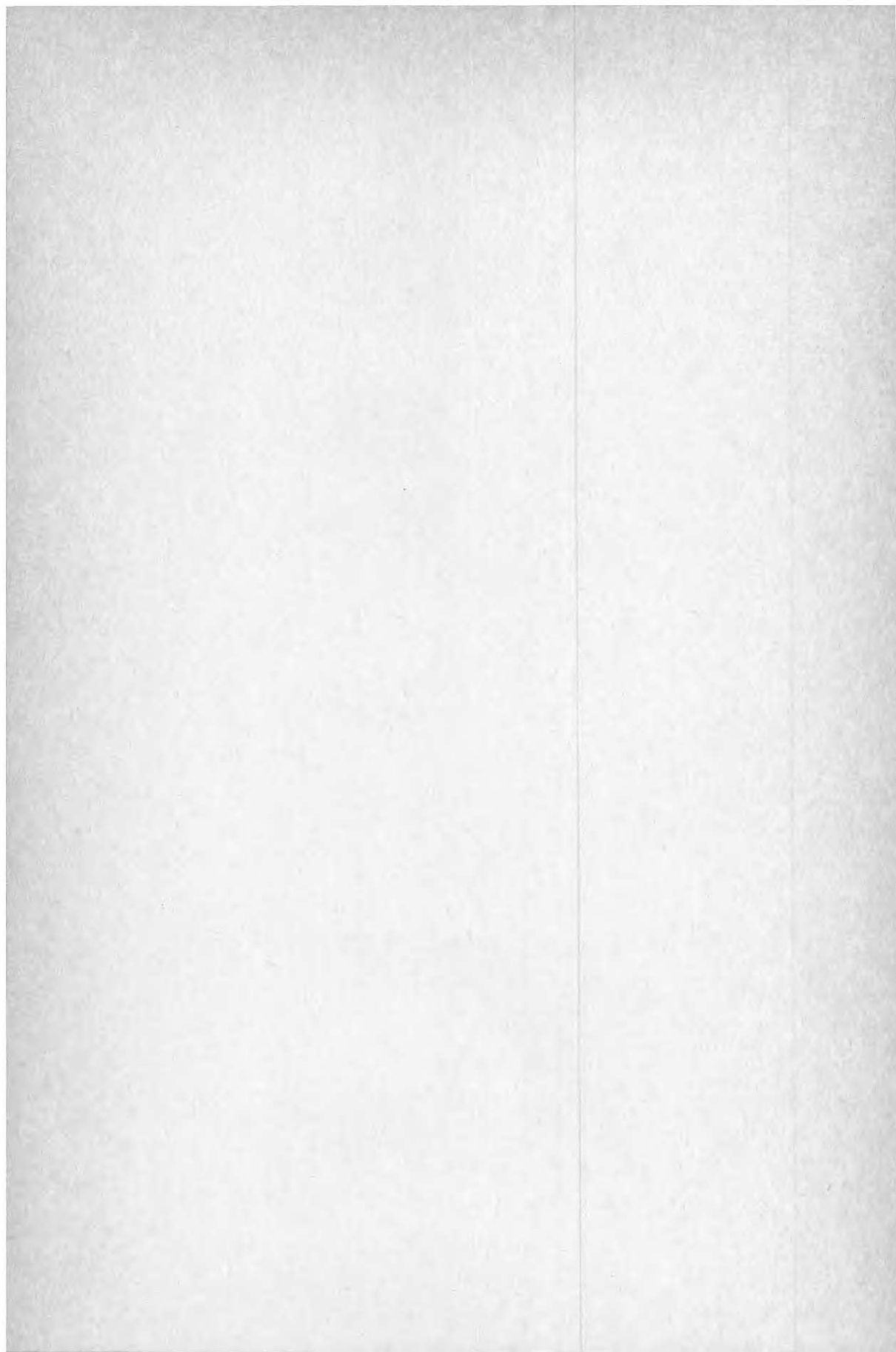


Mp 1 Mät punkt vid arbetsplats
i öronhöjd
(endast mätpersonal närvarande)

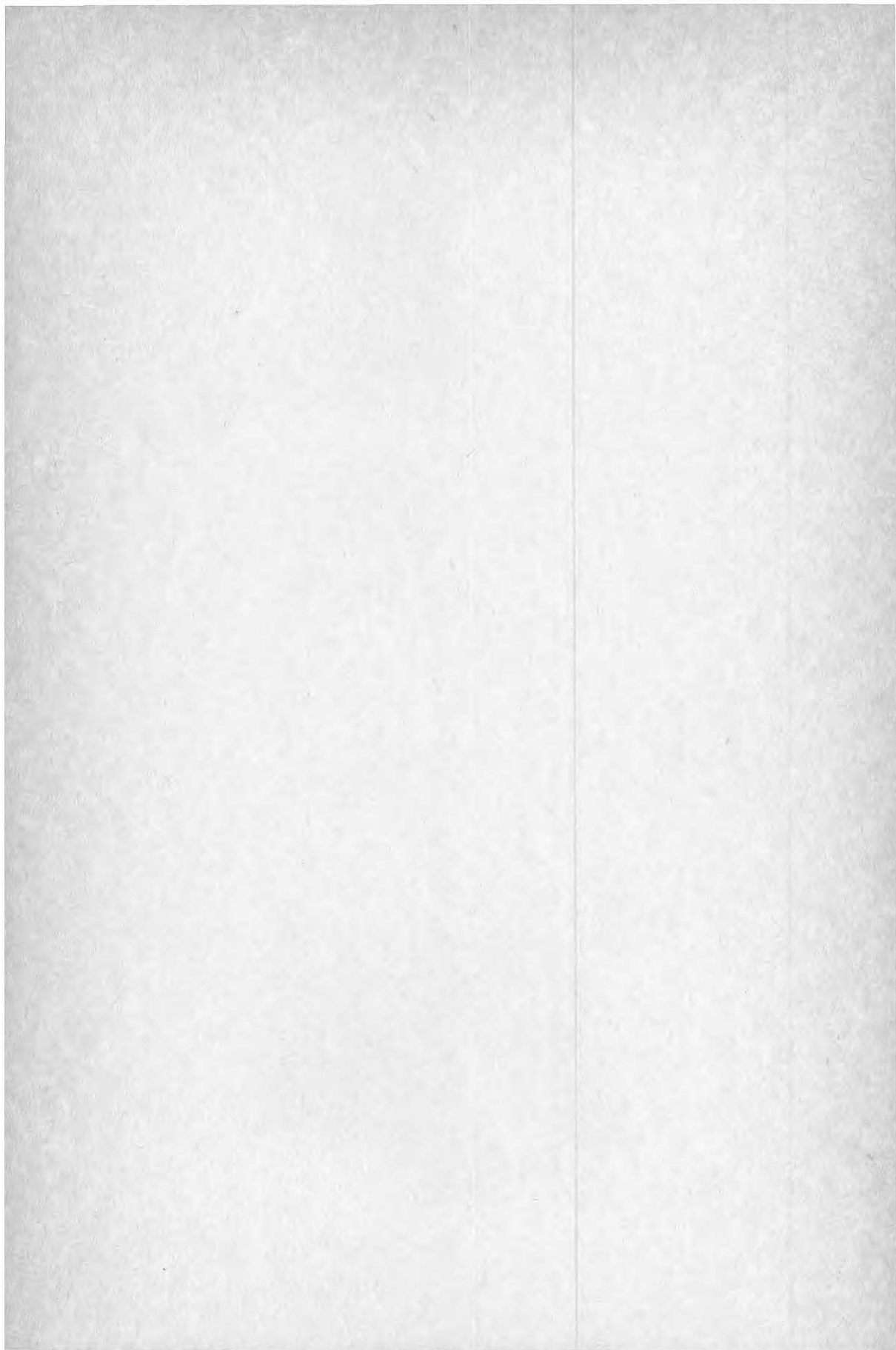
Mp 2 Mät punkt i hörn på golv
(placeras så långt från ventilations-
galler som möjligt)











**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
790062-3 från Statens råd för byggnadsforskning
till Ingemanssons Ingenjörbyrå AB, Göteborg.**

R45: 1983

ISBN 91-540-3924-X

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700745

**Abonnemangsgrupp:
W. Installationer**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm**

Cirkapris: 30 kr exkl moms