



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Optimering af lydisololation for 3-lags termoruder

Rasmussen, Birgit

Publication date:
1985

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Rasmussen, B. (1985). *Optimering af lydisololation for 3-lags termoruder*. Danmarks Tekniske Højskole, Lydteknisk Institut. Rapport Nr. 128

General rights

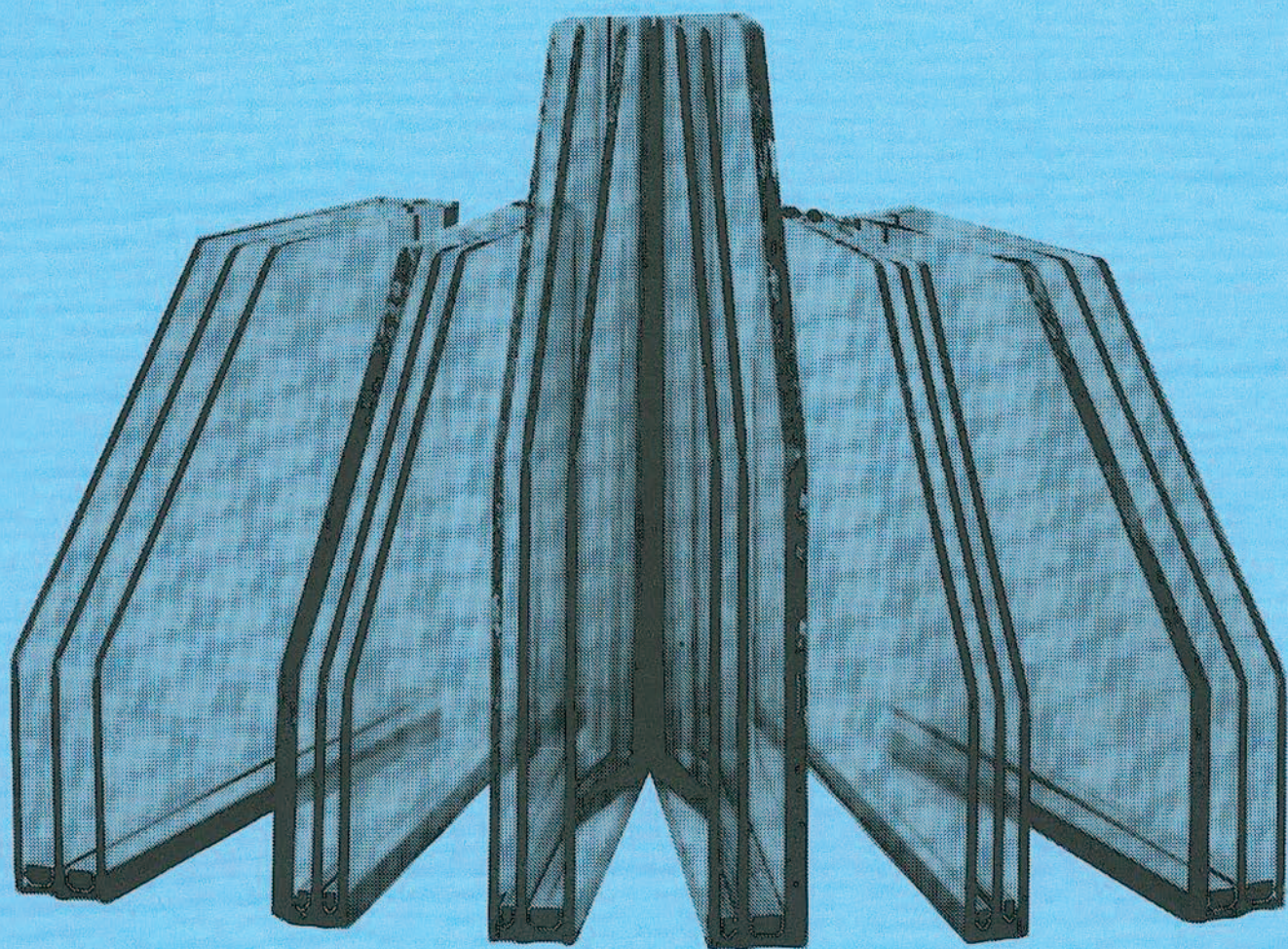
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Optimering af lydisolation for 3-lags termoruder





Postadresser:

- Bygning 356
Akademivej
DK-2800 Lyngby
Telefon: 02-93 12 11
Telex: 37529 dth/dia dk
Giro: 6 07 91 48
 Gregersensvej 3
DK-2630 Tåstrup
Telefon: 02-99 77 55

TEKNISK RAPPORT

Rapport nr. 128	Dato Marts 1985 BR/KS/bm
Rapporttitel Optimering af lydisolation for 3-lags termoruder	Institulleder <i>Knud Skovgård</i> Knud Skovgård
Klient/Rekvirent Teknologistyrelsen	Klientens/Rekvirentens ref. 1983-133/317-83.009
Udført af Birgit Rasmussen	Sign. <i>Birgit Rasmussen</i>

Resumé

Rapporten beskriver en eksperimentel undersøgelse af lydisolation for 3-lags termoruder. Reduktionstallets afhængighed af glastykkelser, laminering, hulrumdybder og -fyldning er undersøgt. Formålet med undersøgelsen er at give vindues- og rudeproducenter samt projekterende bedre muligheder for at vælge en rude med en lydisolation, der er optimeret i forhold til rudens vægt, tykkelse og pris.

For at opnå maksimal anvendelighed af projektresultaterne er der primært valgt prøveemner, som er "realistiske", dvs. ikke ekstremt tunge/tykke/dyre. Ved undersøgelsen er der benyttet vinduer i størrelsen 12M × 12M. Der er udført målinger på termoruder monteret dels i en fast karm, dels i et oplukkeligt vindue.

Baseret på anvendelse af R_w (DS 2186.3-1982) som mål for et vindues lydisolerende evne fås følgende hovedresultater fra undersøgelsen af 3-lags termoruder (gas benyttes som betegnelse for SF₆). En forbedret lydisolation opnås med:

- Asymmetri mht. glastykkelser.
- Laminering af glas.
- Forøgede glasafstande - gælder især gasfyldte ruder.
- Gasfyldning i ét af rudens to hulrum. NB: Med gasfyldning i begge hulrum fås i mange tilfælde en forringet lydisolation.

Undersøgelsen viste generelt, at en optimering af termorudens opbygning vil medføre en forbedret lydisolation, alternativt en lavere vægt, tykkelse eller pris.

Projektet er 2. fase i et 3-delt projekt, der også omfatter undersøgelser af 2-lags termoruder og karm/ramme-konstruktioner.

Distribution

- LI
 Fri
 Rekvirent

Antal sider
118



INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
ENGLISH SUMMARY.....	5
1. INTRODUKTION	7
1.1 Projektets baggrund	7
1.2 Projektets formål	8
2. VINDUERS LYDISOLATION	10
2.1 Lydtransmission gennem vindueskonstruktioner	10
2.2 Myndigheds- og bygherrekrav vedr. facaders lyd- isolation	12
2.3 Produktudvikling - principper	16
3. LYDISOLATION FOR 3-LAGS TERMORUDER	22
3.1 Beskrivelse af 3-lags termorude	22
3.2 Reduktionstalskurve for 3-lags termorude	23
3.3 Resonansfrekvenser for 3-lags termoruder	25
3.4 Koincidens	31
3.5 Egensvingninger i termorudens hulrum	32
3.6 Tidligere undersøgelser af lydisolation for 3-lags glaskonstruktioner	33
4. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE	37
4.1 Formål og afgrænsning	37
4.2 Forsøgsplanlægning og -teknik	38
4.3 Forsøgsplan	40
4.4 Beskrivelse af prøveemner	43
4.5 Montage af prøveemner	47
4.6 Målemetode og målerum	49
4.7 Nøjagtighed af måleresultater	52



	Side
5. MÅLERESULTATER	61
5.1 Generelle bemærkninger	61
5.2 Oversigter over resultater	62
5.3 Glastykkelser	68
5.4 Laminering	71
5.5 Glasmellemrum (hulrumsdybder)	75
5.6 Gasfyldning	78
5.7 Fast karm / oplukkeligt vindue	85
5.8 Sammenligning af lydisolationsforhold for 2- og 3-lags termoruder	88
6. OPTIMERING AF LYDISOLATION	97
6.1 Fremgangsmåde ved optimering af lydisolationsforhold	97
6.2 Optimering af lydisolationsforhold i forhold til rudens vægt og/eller tykkelse	98
6.3 Optimering af lydisolationsforhold i forhold til rudens pris	104
6.4 Eksempler på optimering af lydisolationsforhold	108
7. KONKLUSION	112
8. REFERENCER	116



ENGLISH SUMMARY

Project: Optimization of sound insulation for sealed triple glazings. Report (in Danish): "Optimering af lydisolering for 3-lags termoruder". Danish Acoustical Institute, Lyngby, Denmark. Report No. 128, 1985.

The report describes an experimental investigation of sound insulation of triple glazings (sealed units). Influence of glass thicknesses, laminating, interpane spacings and gas filling on the sound reduction index has been examined. The aim of the experiments is to give window and glazing manufacturers better possibilities to optimize the sound insulation in relation to total weight, thickness and price of the glazing.

In order to achieve a maximum of applicability of the project results, test specimens which are "realistic", i.e. not extremely heavy/thick/expensive, have been chosen. The total thickness of the glazings was 24 to 44 mm and the weight 30 to 42 kg/m². The size of the windows for the experiments was 1,2 m x 1,2 m. Measurements have been carried out on glazings mounted in a firm frame, as well as in a hinged window.

The experimental results indicated below should be evaluated in the light of ordinary triple glazings being symmetric as regards glass thicknesses (normally 3 to 4 mm), interpane spacings (normally 6 to 9 mm) and interpane fillings.

Based on R_w (ISO 717/3-1982) as a measure of the sound insulating property of a window, the following main results have been achieved from the experiments with triple-glazed windows (the gas used is SF₆). The sound insulation is improved by:

- Asymmetry in glass thicknesses
- Using laminated glass
- Increasing the interpane spacings - this applies especially to glazings with gas-filled cavities
- Gas filled into one of the two cavities of the glazing.

The last-mentioned result is particularly interesting, because it is a rather simple way of improving the sound insulation. Gas filling in both cavities causes only in a few cases an increase of the sound insulation. With small spacings (6 to 9 mm) the sound insulation is reduced by the gas filling. The experiments have been carried out using SF₆, which is the type of gas used mostly. The results cannot be applied right away, when using other types of gas with substantially different acoustic properties.

The exact influence of one single change of design cannot be predicted generally - the significance of a detail is, unfortunately, dependent on the overall construction of the window - nor is there a simple connection between the sound insulation and the total thickness or weight of the triple-glazed window.



The experiments showed that an optimization of a triple-glazed window, often results in a 3 to 5 dB higher sound insulation (R_w -value), alternatively a lower weight, thickness or price.

Generally, the best sound insulation is obtained for windows which are asymmetric as regards glass thicknesses, interpane spacings and interpane fillings. Qualitatively indicated, a good and economic "design" of a 3-layer window is achieved by the following order of glasses and interpane spacings:

- Thick glass, or laminated glass, if necessary
- Large interpane spacing with gas filling
- Thin glass
- Small interpane spacing with atmospheric air
- Thin glass

As regards the gas filling pure SF_6 or a gas mixture with SF_6 as the main constituent is assumed.

The importance of each construction detail of the glazing and of the sash and frame is connected with different frequency regions. Thus there is a close connection between the evaluation method and the window details which are to be "attacked" in order to comply with certain requirements/wishes as to the sound insulation.

An evaluation value calculated according to one evaluation method normally cannot right away be converted into another type of evaluation value, as the differences are not constant. For example the evaluation value used previously: I_a [24] can only be converted into R_w [7], if the measurement results per 1/3-octave are known. During the examination of triple-glazed windows, the difference between R_w and I_a was between 0 and 3 dB. At the examination of double-glazed windows [1], differences of between 0 to 7 dB were found. This proves that a change of evaluation method may be of different importance to different types of constructions.

In Denmark the R_w -value is used as a basis for classification of windows [10]. It is frequently asserted - in Denmark as well as abroad - that the R_w -value is not suitable for the evaluation of windows and other facade components. In some countries other methods are used for such components. However, an alternative to R_w will not be internationally standardized until a reasonably high certainty has been achieved that a new method is better than the present one. In short, the difficulties are due to the fact that the frequency content of traffic noise depends both on the type of source (road traffic, trains or aircrafts) and on the distance from source of noise.

Experiences from the experiments with glazings show that the unsolved problems as regards the sound insulation of windows are especially connected with the importance of the frame/sash-construction and of the evaluation method. These problems are being examined more closely in a project which will be finished in 1986.



1. INTRODUKTION

Projektet er 2. fase i et 3-delt projekt vedrørende optimering af vinduers lydisolations. Det samlede projekt er opdelt i følgende delprojekter:

- 1) 2-lags termoruder (Lydteknisk Institut, Rapport nr. 113 [1]).
- 2) 3-lags termoruder (foreliggende rapport).
- 3) Karm/ramme-konstruktioner. Vurderingsmetoder for vinduers lydisolations.

Alle 3 delprojekter indeholder eksperimentelle undersøgelser. Disse undersøgelser gennemføres under ensartede forsøgsbetingelser. Herved opnås bedst mulig sammenlignelighed mellem forsøgsresultaterne fra forskellige måleserier.

Rapporten vedrørende 2-lags termoruder [1] indeholder en del generelle oplysninger om vindueskonstruktioners lydisolations samt specifikke oplysninger om undersøgelsen af 2-lags termoruder. Den foreliggende rapport skal betragtes som en fortsættelse, og der vil i stort omfang blive benyttet henvisninger til [1], der også indeholder en mere detaljeret beskrivelse af projektets baggrund og af forsøgsplanlægningen.

1.1 Projektets baggrund

Undersøgelser har vist, at trafikstøj er den type støj, der generer flest mennesker i deres dagligdag [2]. I Danmark er der over en million boliger med udendørs støjniveauer, der er utilfredsstillende høje som følge af støj fra biler, tog og fly. I de eksisterende bygningsreglementer BR-S 85 [3] og BR 82 [4], der gælder for hhv. énfamiliehuse og andre bygninger, er der krav til trafikstøj-niveauet indendørs i boliger ved veje og jernbaner, men der er ikke tilsvarende krav for boliger i flystøjbelastede områder. Myndighedskrav er nærmere omtalt i afsnit 2.2.



For at sikre et acceptabelt miljø indendørs er det nødvendigt at anvende lydisolerende facadekomponenter. Normalt er valget af vindueskonstruktion af afgørende betydning for støjniveauet indendørs.

Selv om den bedste lydisolation kan opnås med separate forsatsvinduer, anvendes disse nødtigt pga. høj pris og besværlig betjening. I Danmark benyttes næsten udelukkende karm/ramme-konstruktioner i standardudførelse, også når der ønskes en god lydisolation. En forhøjet lydisolation skal i disse tilfælde opnås med et hensigtsmæssigt valg af termorude og vinduestype (karm/ramme-konstruktion).

Umiddelbart skulle man mene, at en optimal vindueskonstruktion kunne vælges på grundlag af teoretiske overvejelser. Problemet er imidlertid, at de foreliggende teoretiske modeller for lydisolation kun i meget begrænset omfang er anvendelige for vinduer.

Undersøgelsen af 3-lags termoruder er gennemført på baggrund af erfaringerne fra undersøgelsen af 2-lags termoruder og fra andre kendte undersøgelser (se afsnit 3).

1.2 Projektets formål

Formålet med undersøgelsen af 3-lags termoruder er at give vindues- og rudeproducenter samt projekterende bedre muligheder for at vælge en 3-lags termorude med en lydisolation, der er optimeret i forhold til rudens vægt, tykkelse og pris.

For at opnå maksimal anvendelighed af projektresultaterne er der blandt langt over 1000 mulige 3-lags termoruder primært valgt prøveemner, der er "realistiske", dvs. ikke ekstremt tunge/tykke/dyre.

Projektet og dets formål skal ses i sammenhæng med de to andre delprojekter, men der er lagt vægt på at opnå separat anvendelige forsøgsresultater. Resultaterne for 3-lags termoruder vil



- sammen med resultaterne for 2-lags termoruder - blive benyttet i det opfølgende og afsluttende projekt om karm/rammekonstruktioner og vurderingsmetoder. Konklusionerne vil i den forbindelse blive betragtet i sammenhæng og evt. uddybet.

Vindues- og rudeproducenter samt brancheorganisationer har vist megen interesse for projektet. Generelt er der mødt stor velvilje mht. besvarelse af spørgsmål og leverancer af prøveemner. En speciel tak skal rettes til A/S Vip-let vinduer og døre, Dansk Plastplade Værk A/S og Panolook Glas A/S, som har leveret henholdsvis karm/ramme-konstruktioner, laminater og termoruder til undersøgelsen af 3-lags termoruder.



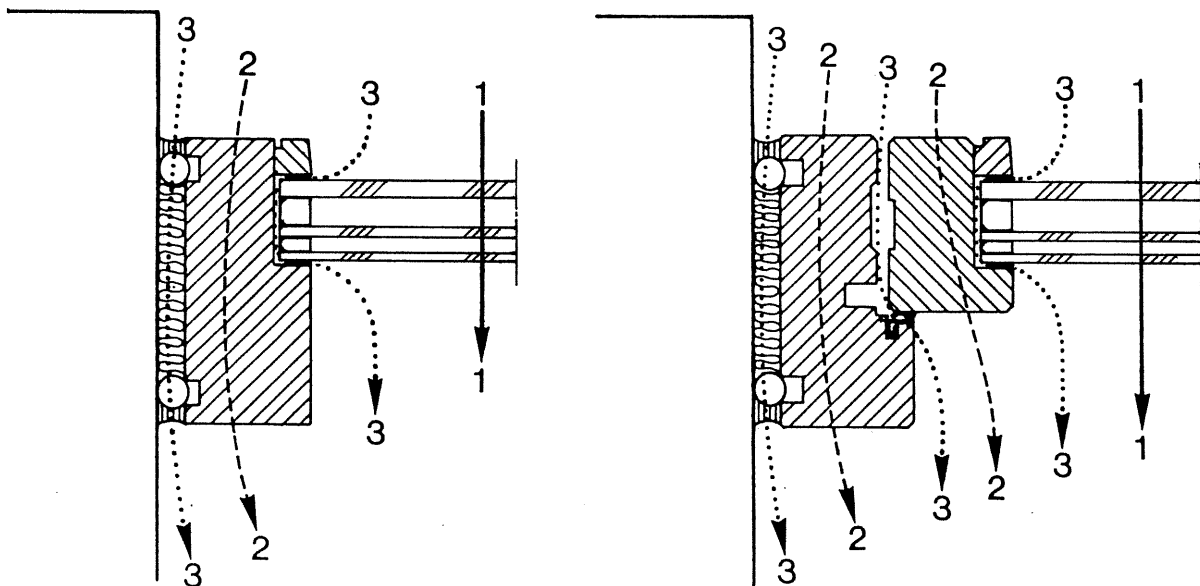
2. VINDUERS LYDISOLATION

2.1 Lydtransmission gennem vindueskonstruktioner

En vindueskonstruktion er sammensat af flere delkomponenter, hvoraf de vigtigste er ruden (egentlig glaskonstruktionen) og karm/ramme. Herudover anvendes diverse tætningslister og -materialer til tætning af fuger i og omkring vinduet.

I den foreliggende rapport regnes med, at glaskonstruktionen er en termorude. Visse lydisolierende foranstaltninger betragtes derfor som uanvendelige, f.eks. anvendelse af lydabsorberende beklædning (karmabsorbenter) mellem glaslagene.

Lydtransmissionen gennem en vindueskonstruktion består af bidrag transmitteret gennem de enkelte konstruktionsdele. Dette er illustreret på figur 2.1 for en termorude monteret i henholdsvis et fast og oplukkeligt vindue.



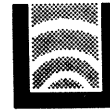
Termorude i fast karm

Termorude i oplukkeligt vindue

Signaturer for lydtransmissionsveje:

1 ———→	1	Rude
2 - - - - -→	2	Karm/ramme
3 ······→	3	Fuger

Figur 2.1 Illustration af lydtransmissionsveje i henholdsvis fast og oplukkeligt vindue.



Lydisolationen for en vindueskonstruktion afhænger især af følgende konstruktionsdetaljer:

- RUDE Glastykkelser
 Laminering
 Glasmellemrum
 Hulrumsfyldning
 Randforbindelse (via afstandsprofil)
 Rudens bredde og højde
 Rudedimensioner i forhold til total vinduesåbning

- KARM/RAMME Materiale og udformning
 Tykkelse
 Bredde

- FUGER Dybde og geometri
 Antal tætningsplaner, placering og effektivitet

Det er naturligvis lydisolationen for den samlede vindueskonstruktion, der er afgørende for "kvaliteten" af vinduet. Ved produktudvikling er det afgørende at vide, hvilke konstruktionsdele, der skal ændres for at opnå det ønskede resultat.

Nøjagtige oplysninger om lydisolationen for en vindueskonstruktion kan kun fås ved at udføre måling af lydisolation for den aktuelle kombination og størrelse af vindue og rude. Kendskab til et vindues lydisolerende egenskaber kan opnås ved en laboriemåling af reduktionstallet R som funktion af frekvensen.

Laboriemåling af reduktionstallet udføres efter en standardiseret metode [5], der foreskriver måling pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz. Når en bygningsdels lydisolation ønskes karakteriseret ved et enkelt tal, sammenlignes måleresultaterne pr. 1/3 oktav med en vurderingskurve, og resultatet af sammenligningen benyttes som mål for bygningsdelens lydisolerende evne. Den almindeligste vurderingsværdi for vinduer er det vægtede reduktionstal R_w , jvf. [6] eller [7], men alternative vurderinger kan foretages på grundlag af de samme målere-



sultater pr. 1/3 oktav. Ved produktudvikling er det vigtigt, at vurderingsmetoden er fastlagt, da krav i henhold til forskellige metoder kan nødvendiggøre forskellige konstruktionsændringer.

Principper for produktudvikling er omtalt i afsnit 2.3. Betydningen af rudedetaljer er kort beskrevet i afsnit 3. En mere fyldig beskrivelse af rudedetaljer og fugetætninger findes i rapport 113 ([1], afsnit 4 og 5). Disse emner samt arealeffekter er også behandlet (mere teoretisk) i [8].

Det skal bemærkes, at de fleste eksisterende teoretiske beregningsmodeller for bygningskonstruktioners lydisolations er udviklet for vægge. De teoretiske modeller er ikke i særlig høj grad anvendelige til vinduer og specielt ikke til termoruder. Dette skyldes dels konstruktive forskelle (bl.a. dæmpning af hulrum), dels de specielle størrelsesforhold for vinduer. Således er hulrumsdybder i termoruder meget små, og almindelige vinduesbredder og -højder er også små sammenlignet både med dimensioner for vægge og med lydbølgelængder i det relevante frekvensområde.

2.2 Myndigheds- og bygherrekrav vedr. facaders lydisolations

Med virkning fra hhv. 1. april 1984 og 1. april 1985 er der i bygningsreglementerne BR 82 [4] og BR-S 85 [3] indført bestemmelser vedr. facaders lydisolations. Kravene gælder beboelsesbygninger, hoteller, plejeinstitutioner mv. placeret i områder med kraftig støjbelastning fra vej- og jernbanetraffic (udendørs døgnmiddelniveau $L_{Aeq,24h}$ over 55 dB).

Myndighedskrav til facaders lydisolations kan endvidere forekomme i lokalplaner og cirkulærer. Eksempelvis findes der et cirkulære [9] gældende for de flystøjbelastede områder omkring Kastrup Lufthavn. Bygningsreglementskrav vedrørende lydisolations mod flystøj forventes indarbejdet i de kommende bygningsreglementer.



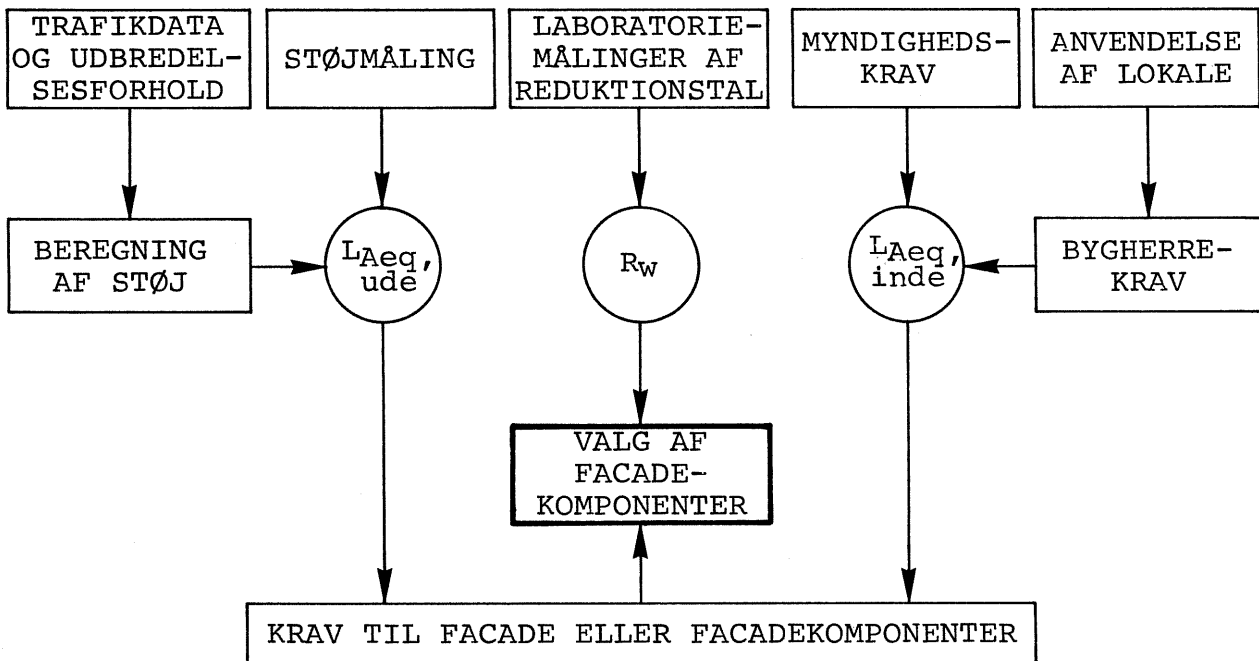
Kravet i BR 82 og BR-S 85 er angivet som krav til trafikstøjniveauet indendørs. Af praktiske grunde er der tillige vist en tabel, hvor man ud fra et kendt udendørs støjniveau kan finde den lydisolationsklasse, der kræves for henholdsvis ydervægge og vinduer. Tabelværdierne gælder typiske rum. En detailprojektering kan derfor i nogle tilfælde give andre resultater, f. eks. når vinduesarealerne mod støjkilden er relativt små eller store.

Lydisolationsklassen for et vindue bestemmes i henhold til DS 1084: "Vinduer. Lydisolation. Klassifikation" [10]. Vinduet klassificeres på grundlag af den laboratoriemålte R_w -værdi [6].

Uanset eventuelle myndighedskrav har en bygherre mulighed for at stille supplerende krav til en facades lydisolation. Almindeligvis vil sådanne krav være angivet som krav til R_w -værdien for facaden eller til støjniveauet indendørs.

En beregning af R_w -værdien for en facade kan foretages, når der foreligger oplysninger om facadekomponenternes arealer og reduktionstal som funktion af frekvensen. Beregning af støjniveauet indendørs forudsætter tillige kendskab til niveau og frekvenssammensætning for støjen udendørs.

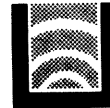
Problemstillingen ved projektering af facaders lydisolation er anskueliggjort på figur 2.2.



Figur 2.2 Principiel fremgangsmåde ved projektering af lydisolierende facader.
Figur frit gengivet efter [11].

I byggerier med tunge facader vil det ofte være lydtransmissionen gennem vinduer og eventuelle ventilationsåbninger, der er afgørende for støjen indendørs. I disse tilfælde vil et krav til facadens lydisolations reelt være et krav til lydisolations for vinduerne og udeluftventilerne.

Fremgangsmåden ved beregning af reduktionstallet for en sammensat konstruktion ud fra kendte komponent-data er beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 3.4). Vedrørende friskluftventilerne skal man dog være opmærksom på, at måledata ikke refererer til ventilens areal, men til et referenceareal, som endog ikke er ens i alle lande. Ved udregning af lydisolations for en facade med udeluftventiler skal derfor benyttes en lidt ændret fremgangsmåde, som vil blive beskrevet i en vejledning, der udgives ultimo 1985.



Ved eksport af vinduer kan det forekomme, at der stilles krav til lydisolations beregnet efter vurderingsmetoder, der ikke benyttes i Danmark. I rapport 113 ([1], afsnit 3.3) er beskrevet eller refereret nogle forskellige vurderingsmetoder. Det kan tilføjes, at DIN 52 210 Teil 04 er revideret i 1984, og at den tyske R_w -værdi [12] nu beregnes efter helt samme retningslinier som ISO's R_w -værdi, der anvendes i Danmark.

I nogle lande findes vurderingsmetoder, hvor der som grundlag for vurderingen af facadekomponenter benyttes et standardiseret spektrum for vejtrafikstøj. I princippet kan sådanne vurderingsværdier beregnes ud fra måleresultaterne (pr. 1/3 oktav) i en prøvningsrapport - uanset måleinstitutionens nationalitet. Der kan dog forekomme forskelle i måleforskrifter, som indebærer, at de beregnede vurderingsværdier bør betragtes som vejledende.

Det er naturligvis lydisolationsniveauet over for den faktisk forekommende støj, der bedst beskriver vinduets ydeevne "in situ". Selv om det umiddelbart virker indlysende, at en vurderingsmetode baseret på et spektrum for trafikstøj må være bedre end en R_w -vurdering, er det ikke nødvendigvis tilfældet. Og en alternativ vurdering (på grundlag af de samme måleresultater pr. 1/3 oktav) bliver ikke internationalt standardiseret, før der opnås en rimeligt høj sikkerhed for, at den nye metode - generelt betragtet - er bedre end den nuværende. Vanskelighederne ligger kort fortalt i, at frekvensindholdet af trafikstøj afhænger både af kildens art (vejtrafik, tog eller fly) og af afstanden til støjekilden, og at ét spektrum derfor ikke gælder for al trafikstøj.

Det skal bemærkes, at en vurderingsværdi beregnet efter én vurderingsmetode ikke umiddelbart kan omregnes til en anden type vurderingsværdi, da der ikke er konstante forskelle. Beregningen kan normalt kun foretages på grundlag af måleresultaterne pr. 1/3 oktav.



2.3 Produktudvikling - principper

Ved produktudvikling skal man være opmærksom på, at betydningen af de enkelte konstruktionsdetaljer er knyttet til forskellige frekvensområder, og forskellige ændringer kan ikke uden videre erstatte hinanden. Der er således en nøje sammenhæng mellem vurderingsmetoden (dvs. vægtningen af reduktionstalskurven) og de vinduesdetaljer, der skal "angribes" for at opfylde bestemte krav/ønsker til lydisolationen.

For producenterne er det vigtigt at kende årsagen til et måleresultat samt at kunne vurdere, om og hvordan en ønsket forbedring kan opnås med minimale omkostninger. Specielt er det af afgørende betydning at have kendskab til, om den ønskede forbedring kan opnås ved en ændring af termoruden eller om det er nødvendigt at forbedre karm/ramme-konstruktion og/eller tætninger. En bestemt lydisolation kan måske kun opnås ved at ændre flere konstruktionsdetaljer.

Udvikling af lydisolerende vindueskonstruktioner kan være krævende, både tidsmæssigt og økonomisk. For de fleste vinduesproducenter er det ideelt at benytte et standardprodukt som udgangspunkt, da det også indebærer store produktionstekniske fordele. Standardprodukter vil ofte med små indgreb kunne få en noget forbedret lydisolation, mens krav herudover er vanskeligere eller umulige at opfylde.

For enhver vindueskonstruktion vil der være en øvre grænse for ydeevne, således at højere krav kun kan opfyldes med mere komplicerede, evt. dobbelte konstruktioner (forsatsvinduer). Som regel vil både producenter og brugere have interesse i at kende den lydmæssigt set bedste løsning, der kan opnås inden for standardprodukternes begrænsninger. Meromkostninger, der ikke forbedrer vinduets egenskaber, ønskes sparet eller i stedet anvendt på en måde, der øger ydeevnen. Det er instituttets erfaring, at R_w -værdier på over ca. 40 dB er meget vanskelige at opnå for "almindelige" vinduer med lydrunder, idet termorude, karm/ramme-konstruktion og karm/ramme-fuge hver for sig udgør svage punkter set i relation til den ønskede lydisolation.

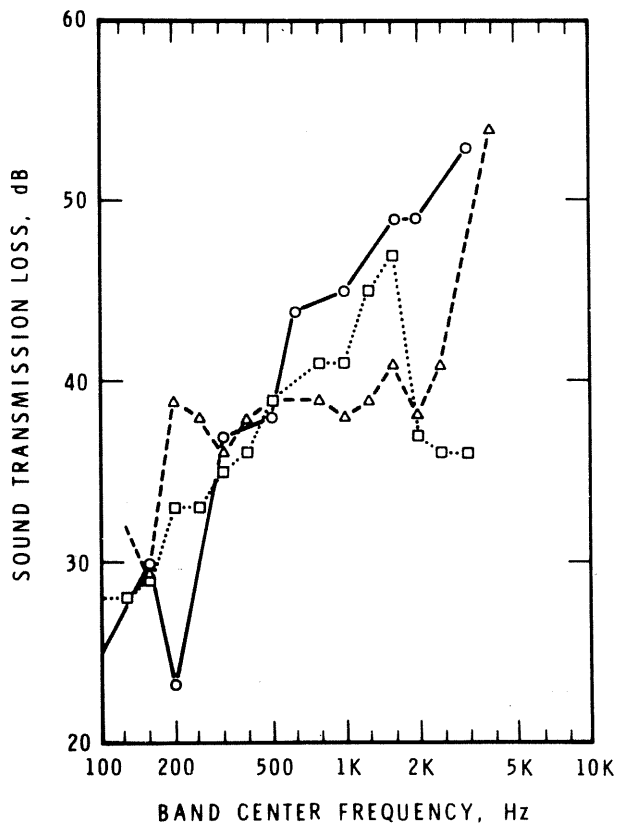


Det er ikke muligt at foretage en nøjagtig projektering af lyd-isolationen for en total vindueskonstruktion på grundlag af måleresultater for ruden alene. Problemerne ligger bl.a. i, at lyd-isolationen for rude og karm/ramme ikke er uafhængige størrelser, og at det desuden er vanskeligt at vurdere tætningens betydning. Vekselvirkningen mellem lyd-isolationen for rude og karm/ramme indebærer også, at indbyrdes sammenligninger af måleresultater for ruder ofte er værdiløse, hvis der ikke er benyttet helt samme målebetingelser. En forudsætning for en frugtbar sammenligning er bl.a., at prøveemnerne har samme størrelse og at der ikke er benyttet principielt forskellige monteringsmaterialer.

Ved sammenligning af måleresultater for "hele" vindueskonstruktioner er det nærliggende at fokusere på forskelle i rudernes opbygning. Men producenterne skal også her være opmærksomme på, at måleresultaterne kan påvirkes stærkt af andre konstruktions-specifikationer og -detaljer, f.eks. vinduesstørrelse, karm/ramme-type, tætninger mv.

Der må således advares mod ukritisk anvendelse af måleresultater, såfremt forsøgsbetingelserne er ukendte. Figur 2.3 illustrerer forskelle mellem publicerede data for tre nominelt ens vinduer målt under forskellige betingelser. Ved nogle frekvenser varierer reduktionstallet mere end 10 dB. Figuren er gengivet fra [13] og illustrerer data fra [14], som er omtalt summarisk i afsnit 3.6.

I afsnit 4.7 findes en mere generel, men summarisk omtale af måleresultaters nøjagtighed, herunder også af systematiske forskelle mellem laboratorier.



Figur 2.3 Lydisolationsdata fra tre forskellige målinger af nominelt ens vinduer (to lag 6 mm glas med ca. 100 mm mellemrum). Figur gengivet fra [13].

Ved udviklingsarbejde vil der typisk blive undersøgt en række konstruktioner, hvoraf nogle kun er lidt forskellige. Ved fastlæggelse af forsøgsprogram er det naturligvis en stor fordel at have erfaringer fra tidligere undersøgelser, fordi de fleste relevante konstruktionsændringer så kan forudses og forberedes af producenten. Konstruktionsdetaljernes betydning vurderes på grundlag af de konstaterede forskelle mellem måleresultater. Specielt for vinduer kan størrelsesforhold og monteringsbetingelser influere meget på resultaterne, og der bør i enhver måleserie tages udgangspunkt i en "kendt" konstruktion, helst et standardprodukt.



Principielt er der følgende trin ved produktudvikling af et lydisolerende vindue:

- (1) Fastlæggelse af vurderingsmetode for lydisolation (i Danmark benyttes normalt R_w -værdi).
- (2) Fastlæggelse af krav til ydeevne vedr. lydisolation og andre egenskaber.
- (3) Referencemåling af ønsket konstruktion eller standardprodukt.
- (4) Skal lydisolationen forbedres?
- (5) Hvilket frekvensområde er afgørende for den målte lydisolationsevne?
- (6) Ændring af konstruktionsdetalje(r), som skønnes at have betydning for reduktionstallet i det pågældende frekvensområde.
- (7) Måling af ændret konstruktion.

Punkterne (4)-(7) gentages, indtil den ønskede lydisolation er opnået (fremgangsmåden kan naturligvis også benyttes, når målet er en lavere lydisolation). Hvis en producent tidligere har fået udført undersøgelser af lignende produkter, vil antallet af forsøg ofte kunne reduceres væsentligt. Forsøgsmålinger gennemføres normalt hurtigt efter hinanden i en samlet måleserie. Det er i nogle tilfælde praktisk at simulere en konstruktionsændring. Målinger på sådanne konstruktioner skal kun opfattes som foreløbige og bør efterfølges af en prøvning af det færdige produkt.

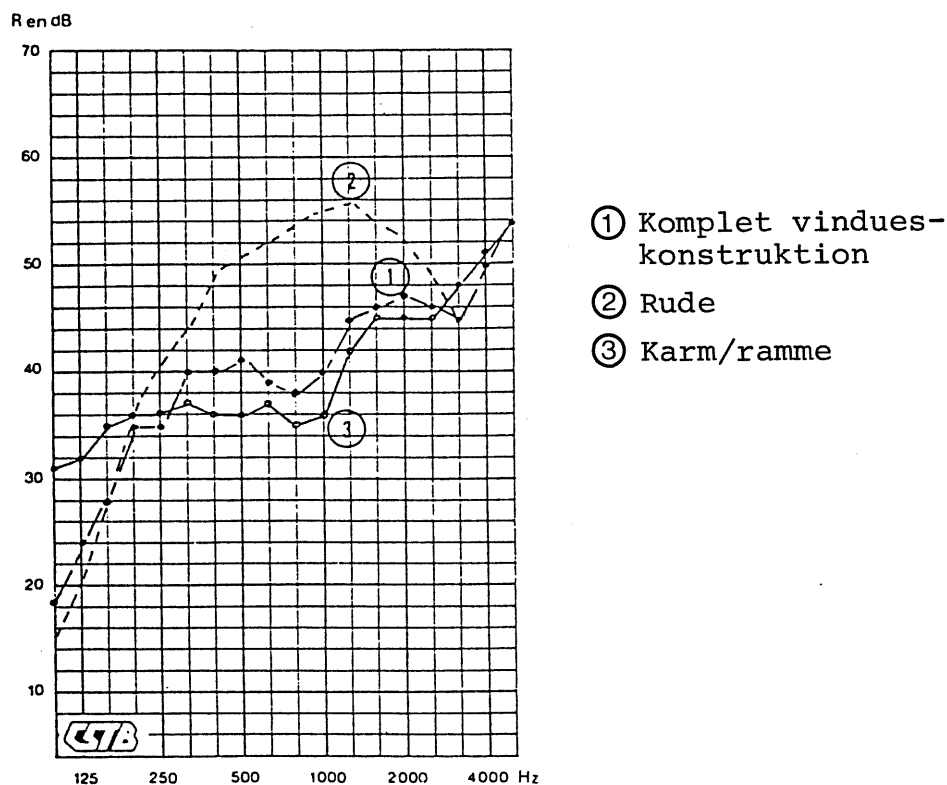
Jo højere lydisolation der ønskes, jo større bliver kravene til vinduets holdbarhed. Eksempelvis skal tætningslister efter nogle års brug stadig fungere rimeligt godt eller eventuelt udskiftes.

Et optimalt, lydisolerende vindue er sammensat af rude, karm/ramme og tætninger, der tilsammen giver den bedste ydeevne (lydisolation) i forhold til omkostningerne. Rude, karm/ramme og fuger er ofte "svage" i forskellige frekvensområder. Ved produktudvikling er det naturligvis nødvendigt med et vist kendskab til de enkelte detaljers kvalitative og kvantitative



betydning i forskellige frekvensområder. Forskellige ændringer har forskellig pris. Det gælder også i overført betydning, f.eks. mht. udseende og betjening.

På figur 2.4 er vist et eksempel på betydning af hhv. rude og karm/ramme (incl. fuge). På figuren findes lydisolationskurver for den samlede vindueskonstruktion og for rude og karm/ramme hver for sig (der er benyttet samme referenceareal for alle 3 kurver). Figuren er gengivet fra [15], hvor forsøgene er nøjere beskrevet. Figuren illustrerer, at vinduets lydisolations ved de laveste frekvenser er bestemt af ruden og i mellemfrekvensområdet af karm/ramme. Ved de højeste frekvenser bidrager rude og karm/ramme nogenlunde ligeligt til lydtransmissionen.



Figur 2.4 Eksempel på lydisolations for en komplet vindueskonstruktion og for rude og karm/ramme hver for sig. Diagram gengivet fra [15].



Ved optimering af et vindues lydisolation skal man være opmærksom på, at forskellige vurderingsmetoder kan medføre forskellige krav til konstruktionsdetaljer. Konstruktionsændringer, der er nødvendige på grundlag af den anvendte vurderingsmetode, kan være utilstrækkelige - eller overflødige - hvis der anvendes en anden vurderingsmetode. Hvis en producent har kendskab til, at der vil blive stillet særlige krav til et vindue (f.eks. ved eksport), bør man være opmærksom på dette allerede på produktudviklingsstadiet.

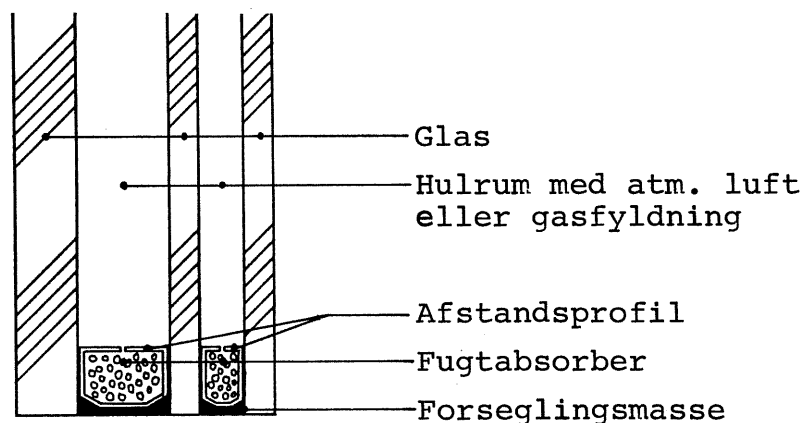


3. LYDISOLATION FOR 3-LAGS TERMORUDER

3.1 Beskrivelse af 3-lags termorude

En 3-lags termorude består af 3 lag glas adskilt af forseglede hulrum med atm. luft eller gasfyldning. Et eller flere af glassene kan være laminater. Laminater er væsentligt dyrere end almindeligt glas og anvendes for at opnå en forhøjet lydisolations og/eller sikkerhed.

På figur 3.1 er vist en principskitse af en 3-lags termorude (klæbet rude). En mere detaljeret beskrivelse af termoruder findes i rapport 113 ([1], afsnit 4.3).



Figur 3.1 Snit i 3-lags termorude (principtegning).

Selv om 3-lags termoruder har en bedre varmeisolation end 2-lags termoruder, er 2-lags termoruder endnu mest almindelige i Danmark. Men i f.eks. Norge og Sverige anvendes mest 3-lags termoruder.

Termoruder er ikke lagervarer hos rudeproducenterne, men fremstilles efter en ordre, hvori rudens opbygning specificeres. Nedenstående er angivet nogle typiske valgmuligheder for glas-tykkelser, glasafstande (hulrumdybder) og fyldninger:



Glastykkelser: 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 mm

Glasafstande: 6, 9, 12, 16 og 20 mm

Fyldninger: Atm. luft, Argon, SF₆ samt blandinger

Hvis der anvendes laminater, kan andre glastykkelser end de nævnte forekomme. 3-lags termoruder, der ikke skal opfylde bestemte krav til lydisolations eller styrke, er almindeligvis opbygget af ca. 4 mm glas og har 6, 9 eller 12 mm hulrum.

I den foreliggende rapport er der ved angivelse af en termorudes opbygning benyttet følgende terminologi (mål i mm):

glastykkelse - hulrum - glastykkelse - hulrum - glastykkelse

Ved beskrivelse af laminater angives tykkelserne af de glaslag og lamineringsmaterialer, laminatet består af (mål i mm):

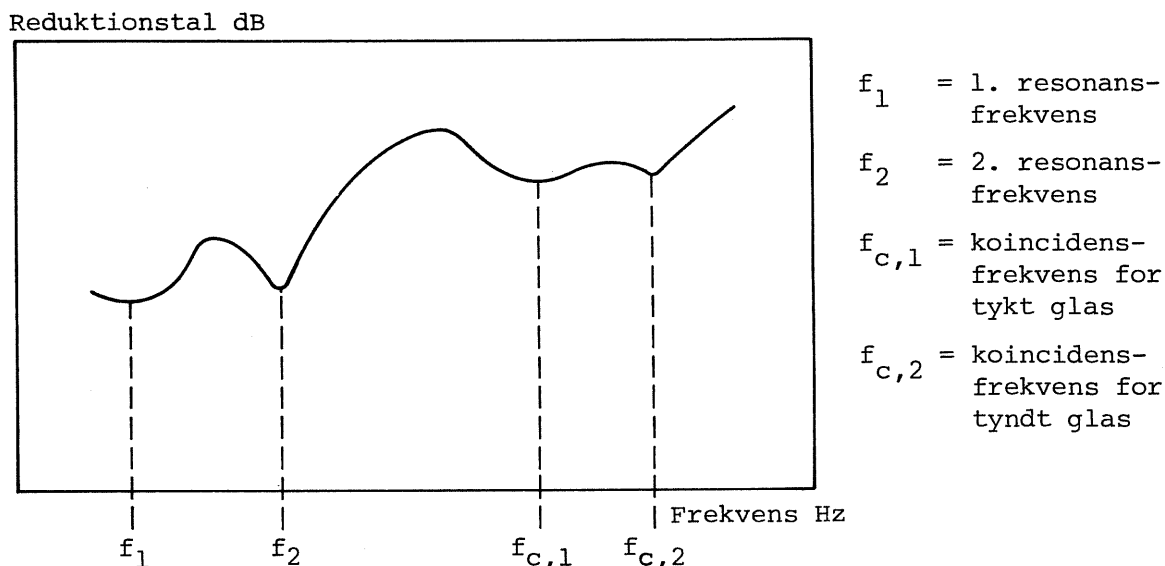
glas / lamineringsmateriale / glas

Luftarten i termorudens hulrum angives af praktiske grunde med bogstavs-signaturerne L = atm. luft eller G = gas (SF₆), selv om betegnelsen "gas" normalt ikke er entydig.

Eksempelvis angiver signaturen 4/2/4-12-4-6-4 GL, at termoruden er opbygget af et 10 mm tykt laminat og to alm. 4 mm glas samt at de to hulrum er hhv. 12 og 6 mm dybe og har fyldning af hhv. SF₆ og atm. luft (i den angivne rækkefølge).

3.2 Reduktionstalskurve for 3-lags termorude

På figur 3.2 er vist et eksempel på reduktionstalskurve for en 3-lags termorude. Det valgte eksempel illustrerer, at der kan forekomme flere resonans- og koincidensdyk. Herudover er reduktionstalskurven præget af egensvingninger i termorudens hulrum (parallelt med glassene).



Figur 3.2 Eksempel på forløb af reduktionstalskurve for 3-lags termorude opbygget af ét tykt og to tynde (ens) glas. Gasfyldning i hulrum.

Det skal påpeges, at kurveforløbet - incl. dykkenes placering og størrelse - afhænger stærkt af glastykkelser, laminering, hulrumsdybder og hulrumsfyldninger.

Typiske 3-lags termoruder har dominerende "resonanser" i følgende frekvensområder:

- | | |
|---|--------------|
| 1) ruderens 1. resonansfrekvens | 125-250 Hz |
| 2) ruderens 2. resonansfrekvens | 250-400 Hz |
| 3) egensvingninger i hulrum (atm. luft) | 200-800 Hz |
| 4) koincidens i 6-10 mm glas | 1250-2000 Hz |
| 5) koincidens i 3-5 mm glas | 2500-4000 Hz |

De nævnte resonanser viser sig som dyk i reduktionstalskurven eller evt. blot som "svage" områder.

Almindelige, symmetriske ruder med ens glastykkelser og ens hulrum har særligt dybe dyk, se f.eks. figur 5.9 og 5.10 i afsnit 5. Med et hensigtsmæssigt valg af ruderens opbygning er det



dog muligt at opnå et "bedre" kurveforløb. Desværre kan reduktionstalskurven ikke forudsiges ved hjælp af foreliggende beregningsmodeller. Problemet er, at det er vanskeligt at udarbejde teoretiske modeller gældende i resonans- og koincidensfrekvensområderne, som netop ofte er afgørende for lydisolationen.

En termorudes opbygning kan som nævnt ikke vælges optimalt ud fra teoretiske overvejelser alene. Teorien kan beskrive nogle forhold kvalitativt, f.eks. beliggenheden af resonans-, koincidens- og egensvingningsfrekvenser. Ved vurdering af kvantiteten, dvs. lydisolationens faktiske størrelse, må der tillige gøres brug af erfaringer. Det samme gælder, når betydningen af en konstruktionsændring skal vurderes.

Kendskab til en rudes resonans-, koincidens- og egensvingningsfrekvenser kan være nyttig, f.eks. når det skal vurderes, om måleresultaterne for en samlet vindueskonstruktion primært er bestemt af rudens egenskaber. I modsat fald skal der evt. søges efter "fejl" i karm/ramme eller fuger. Beregning af de nævnte frekvenser er beskrevet i afsnit 3.3-3.5.

Vedrørende egentlige design-kriterier for lydisolerende 3-lags termoruder henvises til afsnit 3.6, der indeholder referencer til tidligere undersøgelser, samt til afsnit 5, 6 og 7. Valget af glastykkelser, laminering, hulrumsdybder og hulrumsfyldninger skal naturligvis også foretages under hensyntagen til produktionsteknik og til termorudens egenskaber iøvrigt, bl.a. varmeisolation og holdbarhed. I rapport 113 er beskrevet en del forhold, som er fælles for 2- og 3-lags termoruder.

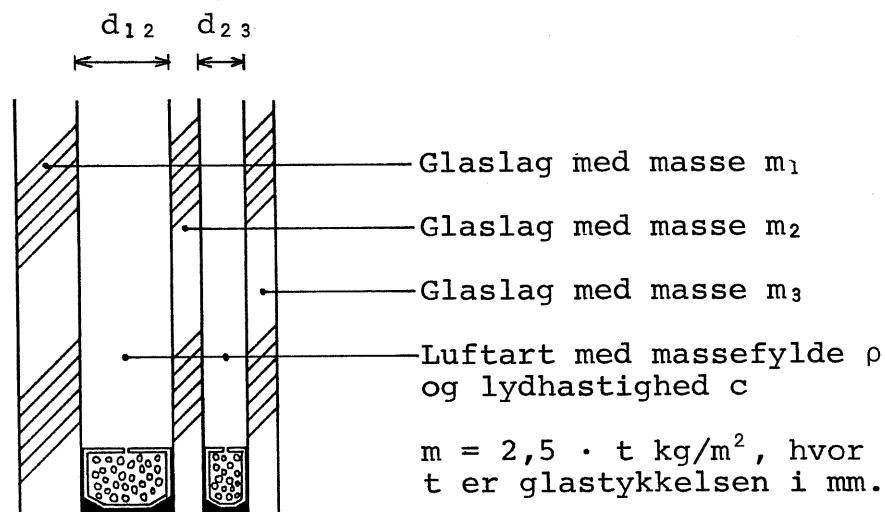
3.3 Resonansfrekvenser for 3-lags termoruder

Et lukket hulrum mellem to masser virker som en fjeder. En 3-lags termorude er et masse-fjeder-masse-fjeder-masse-system, som har 2 resonansfrekvenser (en "nedre" og en "øvre" resonansfrekvens). Omkring disse frekvenser vil der principielt optræde



dyk i reduktionstalskurven som følge af en særlig kraftig lydtransmission. Resonansfrekvenserne afhænger af masse-fjeder-egenskaberne. Ved at ændre kombinationen af glasmasser og hulrum er det i et vist omfang muligt dels at flytte resonansfrekvenserne, dels at ændre dybden af dykkene i reduktionstalskurven.

Resonansfrekvenserne kan findes ved at opstille og løse et ligningssystem for 3-lags ruden betragtet som et svingende system. Løsningerne afhænger af glassenes masse pr. m^2 samt af hulrummenes stivhed, dvs. af hulrummenes dybder og luftartens massefylde og lydhastighed. På figur 3.3 er symboler for disse størrelser indføjet på et snit i termoruden.



Figur 3.3 Snit i termorude med angivelse af symboler for glasmasser og hulrumsegenskaber.

Beregning af resonansfrekvenserne for en 3-lags termorude kan gennemføres vha. formlerne (3.1)-(3.4), når materialeegenskaberne kendes. Stofværdier for en række luftarter findes i rapport 113 ([1], afsnit 4.9). En tilnærmet beregning af resonansfrekvenser kan udføres vha. formlerne (3.5)-(3.7).



De 2 resonansfrekvenser, der her kaldes f_1 og f_2 , kan beregnes af formlerne (3.1)-(3.4):

$$\left. \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \end{matrix} \right\} = \sqrt{\frac{1}{2} [(f_{12}^2 + f_{23}^2) \mp \sqrt{(f_{12}^2 + f_{23}^2)^2 - 4 f_{123}^4}]} \quad (3.1)$$

$$f_{12} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{(\rho c^2)_{12}}{d_{12}}} \quad (3.2)$$

$$f_{23} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2 + m_3}{m_2 \cdot m_3} \cdot \frac{(\rho c^2)_{23}}{d_{23}}} \quad (3.3)$$

$$f_{123} = \frac{1}{2\pi} \sqrt[4]{\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 \cdot m_2 \cdot m_3} \cdot \frac{(\rho c^2)_{12}}{d_{12}} \cdot \frac{(\rho c^2)_{23}}{d_{23}}} \quad (3.4)$$

hvor

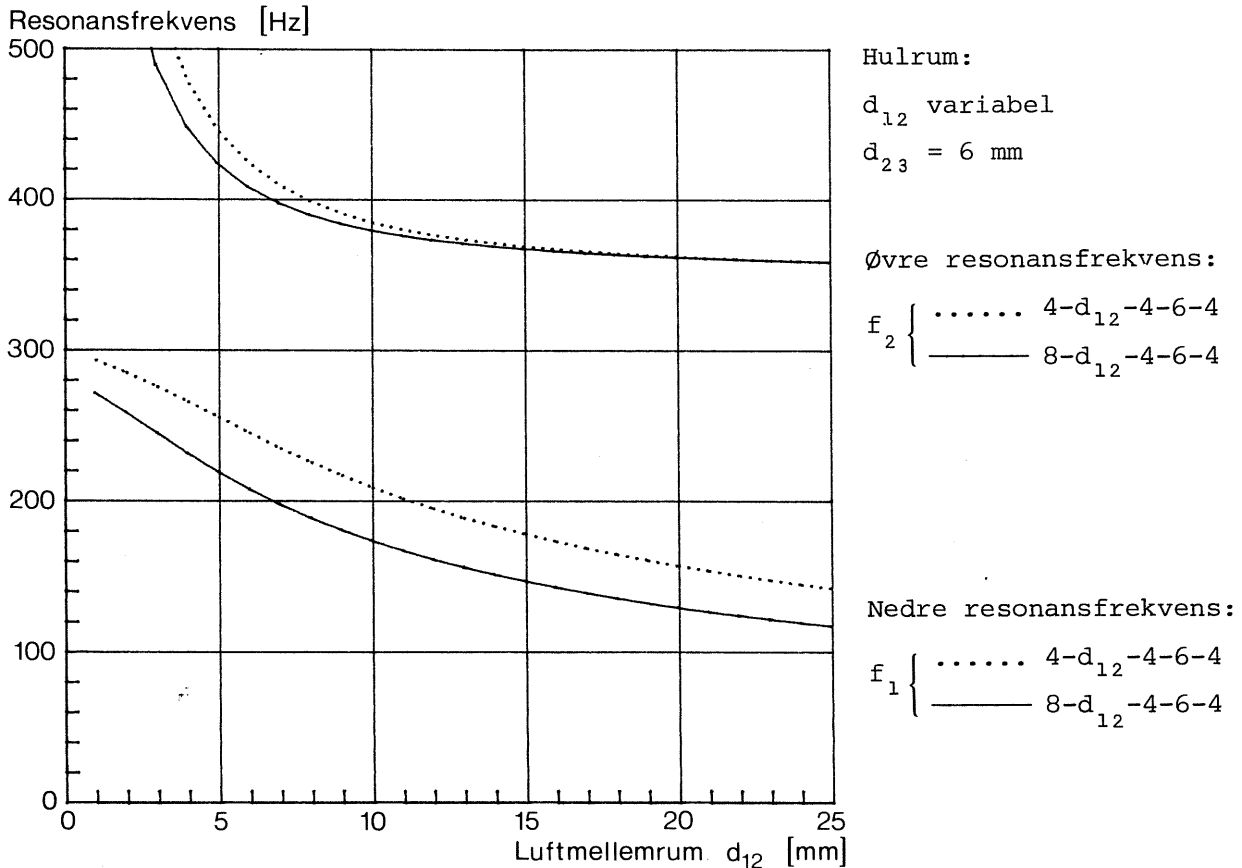
f_1	= "nedre" resonansfrekvens (1. resonansfrekvens)	[Hz]
f_2	= "øvre" resonansfrekvens (2. resonansfrekvens)	[Hz]
m_1	= masse pr. arealenhed af glaslag 1	[kg/m ²]
m_2	= masse pr. arealenhed af glaslag 2	[kg/m ²]
m_3	= masse pr. arealenhed af glaslag 3	[kg/m ²]
d_{12}	= hulrum mellem glaslag 1 og 2	[m]
d_{23}	= hulrum mellem glaslag 2 og 3	[m]
ρ	= massefylde for luftart i hulrum	[kg/m ³]
c	= lydhastighed for luftart i hulrum	[m/s]

Frekvenserne f_{12} og f_{23} har en fysisk betydning, idet de er resonansfrekvenser for 2-lagskonstruktioner bestående af glaslag nr. 1+2 hhv. nr. 2+3. Frekvensen f_{123} er derimod en fiktiv regnestørrelse uden klar fysisk betydning. Beregningerne efter formlerne (3.1)-(3.4) kan simplificeres lidt, såfremt der er ens fyldninger i begge hulrum (dvs. $(\rho c^2)_{12} = (\rho c^2)_{23}$).

Ud fra diagrammerne på figur 3.4 og 3.5 kan f_1 og f_2 aflæses eller skønnes for de fleste typer 3-lags termoruder. Bemærk, at d_{12} og d_{23} af praktiske grunde er angivet i mm på diagrammet (i formlerne er benyttet SI-enheden m). Kurverne gælder termoruder med atm. luft i hulrummene. Diagrammerne kan dog også benyttes



for ruder med andre hulrumsfyldninger, da afvigelserne normalt er under ca. 15%. Eksempelvis har en termorude med SF₆ i begge hulrum resonansfrekvenser, der ligger 15% lavere end angivet på diagrammerne.

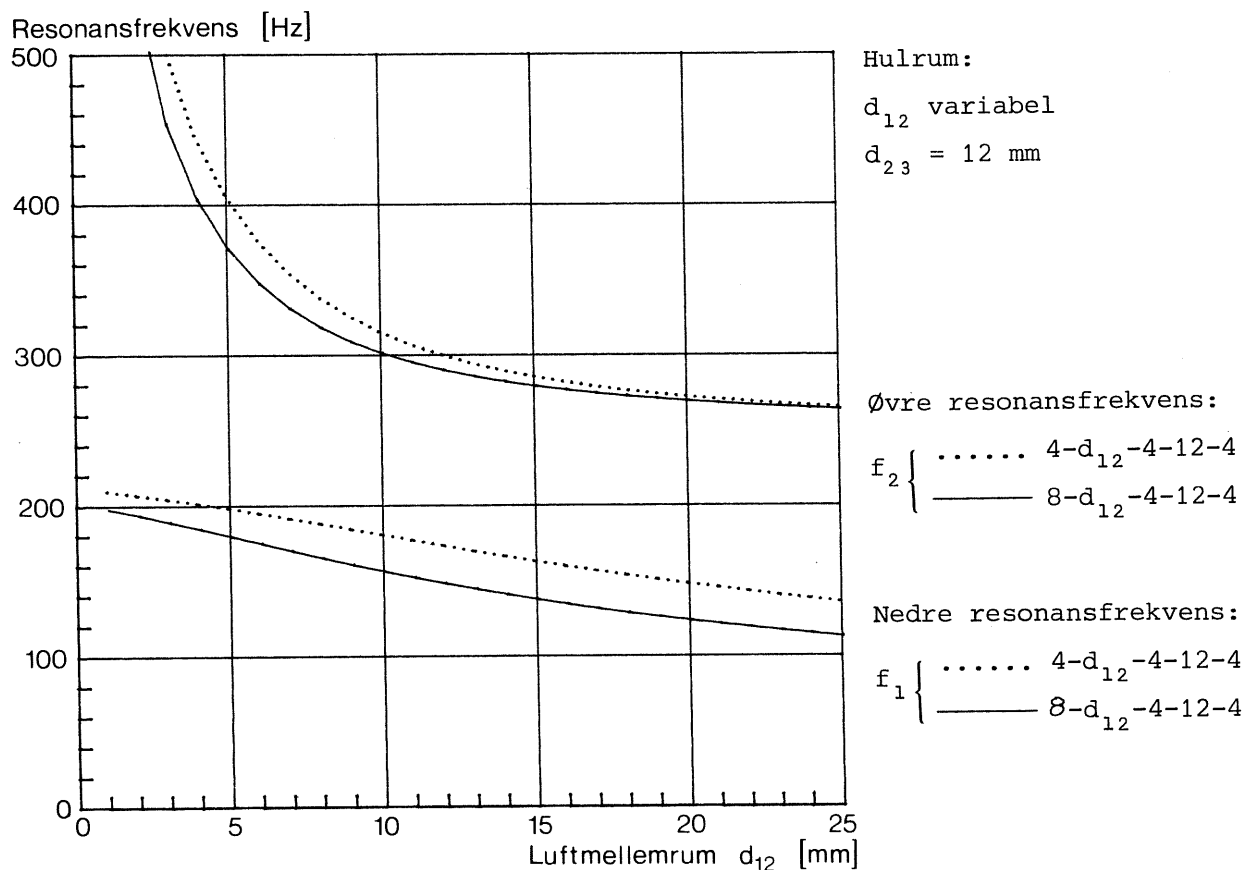


Figur 3.4 Resonansfrekvenser f_1 og f_2 for 3-lags termoruder 4- d_{12} -4-6-4 og 8- d_{12} -4-6-4 med atm. luft i hulrum. Ang. andre hulrumsdybder og/eller masser henvises til teksten, hvor nogle muligheder for omregning er beskrevet.

Resonansfrekvenser for 3-lags termoruder med andre kombinationer af glasmasser og/eller hulrumsdybder kan i visse tilfælde findes ved interpolation eller omregning af de aflæste værdier. Hvis f.eks. alle 3 glasmasser eller begge hulrumsdybder ændres



med en faktor x , ændres resonansfrekvenserne med en faktor $1/\sqrt{x}$. Ved ændring af både glasmasser og hulrum med en faktor x ændres resonansfrekvenserne med en faktor $1/x$. Et beregningseksempel er vist sidst i afsnittet.



Figur 3.5 Resonansfrekvenser f_1 og f_2 for 3-lags termoruder 4- d_{12} -4-12-4 og 8- d_{12} -4-12-4 med atm. luft i hulrum.
Ang. andre hulrumdybder og/eller masser henvises til teksten, hvor nogle muligheder for omregning er beskrevet.



Tilnærmede beregninger af resonansfrekvenserne kan udføres vha. udtrykkene (3.5)-(3.9). Der er indsat talværdier for atm. luft.

Det midterste glaslag er næsten uden betydning for f_1 :

$$f_1 \approx f_{13} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_3}{m_1 \cdot m_3} \cdot \frac{1}{d_{12} + d_{23}}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.5)$$

Betydningen af m_1 , m_3 , d_{12} og d_{23} er angivet under formlerne (3.1)-(3.4). Bemærk specielt, at d_{12} og d_{23} skal indsættes i SI-enheden m.

Hvis termoruden er symmetrisk eller næsten symmetrisk kan den "øvre" resonansfrekvens f_2 beregnes af:

$$f_2 \approx \sqrt{3} f_1 \quad (3.6)$$

For stærkt asymmetriske ruder opnås en bedre tilnærmelse til den øvre resonansfrekvens f_2 med følgende formel:

$$f_2 \sim \max (f_{12}, f_{23}) \quad (3.7)$$

hvor

$$f_{12} \approx 60 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{1}{d_{12}}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.8)$$

$$f_{23} \approx 60 \sqrt{\frac{m_2 + m_3}{m_2 \cdot m_3} \cdot \frac{1}{d_{23}}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.9)$$

Symbolforklaringer findes under formlerne (3.1)-(3.4). Ved beregningerne skal talstørrelserne indsættes i SI-enheder, dvs. masser i kg/m^2 og hulrumsdybder i m.

Et eksempel på en nøjagtig og tilnærmet beregning af resonansfrekvenserne f_1 og f_2 er angivet nedenstående for en 3-lags termorude 8-15-4-9-4 LL (atm. luft i begge hulrum). En nøjagtig beregning af f_1 og f_2 efter formel (3.1) giver $f_1 = 141$ Hz og $f_2 = 310$ Hz. Ved en tilnærmet beregning efter formlerne (3.5) og (3.7) fås $f_1 = 150$ Hz og $f_2 = 282$ Hz, hvilket er tilstrækkeligt nøjagtigt til de fleste anvendelser. Resonansfrekvenserne kan også findes vha. diagrammerne på figur 3.4 eller 3.5.



F.eks. kan figur 3.4 benyttes til at finde resonansfrekvenserne for en 8-10-4-6-4 rude (faktor $x = 1,5$). Der aflæses 173 Hz og 378 Hz. Derefter ganges med $1/\sqrt{x} = 1/\sqrt{1,5}$ og resultatet bliver $f_1 = 141$ Hz og $f_2 = 309$ Hz, hvilket svarer meget nøjagtigt til den eksakte beregning efter formel (3.1).

Generelt betragtet bør det tilstræbes, at forskellen mellem de to resonansfrekvenser er så stor som muligt, jvf. afsnit 3.6. For en konkret rude skal resonansfrekvensernes størrelse og forskel dog også vurderes i sammenhæng med, om der vil fremkomme dybe dyk i reduktionstalskurven, se afsnit 5.

3.4 Koincidens

Reduktionstallet for et massivt glas forringes i et frekvensområde på 1-2 oktaver omkring koincidensfrekvensen for glasset. Koincidensfrekvensen f_c afhænger af glastykkelsen:

$$f_c \approx \frac{12000}{t} \quad [\text{Hz}] \quad (3.10)$$

hvor t er glastykkelsen i mm.

Begrebet koincidens er nærmere beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 4.5-4.7). Ovennævnte formel gælder strengt taget for glas i atm. luft, men der er ikke observeret specielle forhold for gasfyldte termoruder.

Reduktionstalskurven for en termorude har dyk (mere eller mindre tydelige) ved koincidensfrekvenserne for de enkelte glaslag. Virkningen af koincidens kan mindskes ved at opbygge termoruden af glas i forskellige tykkelser. Koincidensfrekvenserne for de to udvendige glas bør være forskudt ca. 1/1 oktav. Koincidensdyk kan desuden mindskes ved anvendelse af lamineret glas.



3.5 Egensvingninger i termorudens hulrum

En 3-lags termorude har 2 hulrum, der hver især er afgrænset af afstandsprofiler, se f.eks. figur 3.1. Når ruden påvirkes af lydbølger, vil der i hulrummene opstå egensvingninger parallelt med glassene. Egensvingningerne er 2-dimensionale, stående bølger. For en rektangulær rude med hulrumsbredde og -højde l_x og l_y kan egensvingningsfrekvenserne bestemmes af følgende formel:

$$f_{n_x, n_y} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2} \quad (3.11)$$

f_{n_x, n_y} = egensvingningsfrekvens

c = lydhastighed i gassen/luften

l_x, l_y = hulrummets bredde og højde

n_x = 0, 1, 2, 3

n_y = 0, 1, 2, 3

Ved frekvenser over den laveste egensvingningsfrekvens øges lydtransmissionen på grund af stående bølger, og reduktionstallet mindskes.

I 3-lags termoruder er der 2 hulrum, der nødvendigvis har samme dimensioner og dermed samme egensvingningsfrekvenser. Lydbølgerne i hulrummene er "på bølgelængde" og lydtransmissionen kan derfor blive særligt kraftig.

Overvejelser vedr. kobling af lydfelter (jvf. [1], afsnit 6.10) førte imidlertid til planerne om at undersøge virkningen af forskellige fyldninger i termorudens to hulrum. Herved opnås forskellige lydhastigheder og dermed forskellige dimensioner - målt i bølgelængder.

I tabel 3.1 er angivet de laveste egensvingningsfrekvenser for en 12M × 12M vinduesåbning (niche) og for den tilsvarende termorude i en fast karm og i et oplukkeligt vindue. Rudedimensioner fra den eksperimentelle undersøgelse (afsnit 4) er benyttet. Ens egensvingningsfrekvenser (lodret i tabel) skyldes, at vinduet er kvadratisk.



Egen- svingnings- frekvens [Hz]		Vindues- åbning 1,21 m × 1,21 m	Rude i fast karm 1,10 m × 1,10 m Atm. luft SF6		Rude i opluk- keligt vindue 1,00 m × 1,00 m Atm. luft SF6	
1-dimensionale egensvingninger	$f_{1,0}$	140	155	60	170	66
	$f_{0,1}$	140	155	60	170	66
	$f_{2,0}$	280	310	120	340	131
	$f_{0,2}$	280	310	120	340	131
2-dimensionale egensvingninger	$f_{1,1}$	200	220	85	240	93
	$f_{2,1}$	315	345	133	380	147
	$f_{1,2}$	315	345	133	380	147
	$f_{2,2}$	400	440	170	480	186

Tabel 3.1 12M × 12M vindue. Tabel over de laveste 1- og 2-dimensionale egensvingningsfrekvenser for hhv. luft- og gasfyldt hulrum i termorude.

Resultaterne af de gennemførte forsøg med gasfyldninger er beskrevet i afsnit 5.6.

3.6 Tidligere undersøgelser af lydisolationsfor 3-lags glaskonstruktioner

Lydisolationsfor 3-lags glaskonstruktioner er kun behandlet i en lille del af litteraturen om vinduers lydisolationsfor. Og det er karakteristisk - både for undersøgelser af 2- og 3-lags vinduer - at især "store" konstruktionstykkelser på 30-300 mm er omtalt. Derimod er undersøgelsesresultater for industrielt fremstillede termoruder kun publiceret i et meget beskedent omfang. En termorudes hulrum er almindeligvis 6-20 mm, og rudens totaltykkelse er sjældent over ca. 35 mm.



Af litteratur, der omhandler relevante undersøgelser af lydiso-
lation for 3-lags glaskonstruktioner, kan nævnes Hoffmeyer [16]
og Quirt [17]. Herudover er 3-lags glas nævnt i Brekke [18] og
[19]. I [14] findes sammenstillinger af data fra forskellige
undersøgelser beskrevet i diverse tidsskrifter, men store kon-
struktionstykkelser og varierende forsøgsbetingelser medfører
begrænsede anvendelsesmuligheder (se figur 2.3), hvad angår
termoruder. De øvrige referencer, [16], [17], [18] og [19], er
kort omtalt på de efterfølgende sider.

I [16] er beskrevet en eksperimentel undersøgelse af lydisola-
tion for 3-lags vinduer, og der er desuden gennemført en litte-
raturundersøgelse, hvor der refereres resultater for 3-lags
glaskonstruktioner med totaltykkelse 33-321 mm og totalvægt 15-
50 kg/m². Ved den eksperimentelle undersøgelse er der udført
målinger på et stort antal prøveemner i modelskala 1:4 og der-
efter målinger på nogle få prøveemner i fuldskala. Prøveemnerne
til modelmålingerne var opbygget af separate glaslag. Prøvefel-
tets areal var 0,126 m² (0,42 m × 0,30 m). Omregnet til fuld-
skala var prøvefeltets areal 2,02 m² (1,68 m × 1,20 m), glas-
konstruktionernes totaltykkelser 27-180 mm og totalvægten 30-60
kg/m². Der er især undersøgt forskellige kombinationer af glas-
tykkelser og hulrumsdybder. I fuldskala er der udført målinger
på 7 termoruder. Prøvefeltets areal var 1,62 m² (1,21 m × 1,34
m), rudernes totaltykkelse 36-44 mm og totalvægten 30-43 kg/m².
I undersøgelsen konkluderes, at de bedste resultater kan opnås
med asymmetriske hulrum og glastykkelser. Rækkefølgen af hul-
rumsdybder og glastykkelser er dog ikke ligegyldig. Med ud-
gangspunkt i en traditionel, symmetrisk 3-lags termorude anbe-
fales det således at øge tykkelsen af det ene yderglas, hvori-
mod ændring af det midterste glas alene ikke medfører en for-
bedret lydiso-lation. Der synes ikke at være en yderligere ge-
vinst ved at øge tykkelsen af to eller alle tre glaslag til
samme tykkelse. Det anbefales at tilstræbe størst mulig spred-
ning af resonansfrekvenserne, hvilket opnås ved en asymmetrisk
opbygning af ruden. Ved undersøgelsen er der kun konstateret et
egentligt resonansdyk ved den nedre af 3-lags vinduets to reso-



nansfrekvenser. Hovedvægten af undersøgelsen ligger på modelmålinger, og betydningen af gasfyldning er ikke undersøgt.

Referencerne [13] og [17] beskriver en undersøgelse af 2- og 3-lags glaskonstruktioner opbygget af separat monterede glas. Prøvefeltet, der havde et totalareal på $3,64 \text{ m}^2$ ($2,02 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$), bestod af 3 nominelt ens vinduer med glasarealer à $0,56 \text{ m} \times 1,75 \text{ m}$. Det konstateredes, at lydisolationens afhængighed af glasmasser og hulrumdybder ikke svarer til hvad der teoretisk set skulle forventes. Prøveemnerne til undersøgelsen af 3-lags vinduer havde totaltykkelser på 15-ca.120 mm og en totalvægt på 23-30 kg/m^2 . Resultaterne for 3-lags vinduer er sammenlignet med resultater for de tilsvarende 2-lags vinduer uden det midterste glas, men med samme totale hulrumdybde. Under den nedre resonansfrekvens, svarende til de to udvendige glaslag, opnås en lidt bedre lydisolation for 3-lags end for 2-lags konstruktioner. Nogle typer 3-lags vinduer har tillige en højere lydisolation i koincidensområdet. Hovedkonklusionen er dog, at reduktionstalsdata for 2- og 3-lags glas er meget ens. Artiklerne indeholder en del nyttige betragtninger, og det bekræftes, at der er specielt store problemer knyttet til prediktering af vinduers lydisolation. Der er ikke undersøgt termoruder og ej heller betydningen af gasfyldning.

I [18] angives, at den nedre resonansfrekvens for et 3-lags vindue ses tydeligt på reduktionstalskurven, men at den anden resonansfrekvens ikke har nogen praktisk betydning. Det anføres i [19], at det midterste glas almindeligvis ikke har betydning for reduktionstallet - undtagen ved høje frekvenser som i praksis kun har lille betydning for vinduets lydisolation. Der er vist et enkelt eksempel herpå, men ellers refereres til [18], der primært omhandler beregningsmetoder for vægges reduktionstal, men kun i mindre omfang metodernes anvendelse på vinduer.

Litteraturundersøgelsen viser, at der hidtil har manglet en eksperimentel undersøgelse af industrielt fremstillede 3-lags termoruder, hvor det er muligt at vurdere virkningen af de en-



kelte parametre, samtidigt med at der opnås en realistisk vekselvirkning med de øvrige konstruktionsparametre. Denne vekselvirkning er specielt udpræget for gasfyldte ruder, som ikke indgår i de nævnte undersøgelser.

Formålet med og behovet for den foreliggende undersøgelse er nøjere beskrevet i afsnit 4.1.



4. EKSPERIMENTEL UNDERSØGELSE

4.1 Formål og afgrænsning

Formålet med den eksperimentelle undersøgelse er at tilvejebringe en større og mere anvendelig viden om lydisoleringen for 3-lags termoruder. Reduktionstallets afhængighed af glastykkelser, laminering, hulrumsdybder og hulrumsfyldninger ønskes belyst så godt som muligt.

En 3-lags termorude er opbygget af 3 lag glas (evt. laminater) og har 2 hulrum (evt. med gasfyldning). Der er således utallige muligheder for opbygning af termoruden. Selv om valgmulighederne begrænses til 3-lags termoruder med rimelige kombinationer af konstruktionsparametre, er der imidlertid langt over 1000 forskellige ruder. Det er naturligvis umuligt - og også unødvendigt - at udføre måling på alle disse rudetyper.

Ved valg af prøveemner er det tilstræbt, at typisk forekommende variationer af konstruktionsparametre er repræsenteret. Afgrænsningen af undersøgelsens omfang er foretaget på basis af foreliggende, tilgængelige undersøgelsesresultater for 3-lags glaskonstruktioner, dels på baggrund af erfaringerne fra undersøgelsen af 2-lags termoruder.

En kort omtale af nogle tidligere undersøgelser af 3-lags vinduer findes i afsnit 3.6.

Der er i det foreliggende projekt lagt vægt på at belyse forhold, der ikke indgår samlet i tidligere undersøgelser af 3-lags glaskonstruktioner. Her tænkes især på anvendelse af:

- "ægte" termoruder som prøveemner
- små glasmellemrum (6-9 mm)
- gasfyldning i hulrum

Desuden ønskedes specielt virkningen af forskellige fyldninger i termorudens to hulrum undersøgt.

Den eksperimentelle undersøgelse af 3-lags termoruder er tilrettelagt efter samme principper som undersøgelsen af 2-lags



termoruder. Der er således benyttet samme vinduesformat, 12M x 12M. De fleste målinger er gennemført med ruder monteret i en fast karm, og en del af målingerne er dubleret med målinger på samme rudetype monteret i et oplukkeligt vindue.

Undersøgelsen omfatter laboratoriemålinger af reduktionstal pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-5000 Hz samt beregning af vurderingsværdien R_w [6] på basis af måleresultaterne for frekvensområdet 100-3150 Hz. En udvidet databehandling vil blive gennemført i forbindelse med det efterfølgende projekt (omtalt i bl.a. afsnit 1), hvor der også vil blive udført målinger med flere typer karm/ramme-konstruktioner.

4.2 Forsøgsplanlægning og -teknik

Generelt er anvendeligheden af måleresultaterne for et prøveemne afhængig af nøjagtigheden af såvel prøveemne som måleresultater. Forsøgsteknikken skal vælges således, at usikkerheden pga. målemetode og forsøgsbetingelser bliver små i forhold til de forskelle, der skyldes variation af de undersøgte konstruktionsdetaljer.

Ved undersøgelsen af 3-lags termoruder var antallet af mulige prøveemner meget stort, og forsøgene blev opdelt i 2 måleserier, der blev udført med knapt et års mellemrum. Prøveemnerne til den 1. måleserie blev valgt på baggrund af erfaringerne fra bl.a. undersøgelsen af 2-lags termoruder. Prøveemner til 2. måleserie blev først fastlagt efter databehandling af resultater fra 1. måleserie.

Alle prøveemner blev bestilt med gasfyldning og målt i den leverede tilstand inden udskiftning af fyldningen til atm. luft. På de fleste ruder blev udluftningen af hulrummene udført i 2 omgange, og der blev målt lydisolation på termoruden med gasfyldning i kun ét af hulrummene. Det var forventet, at også rækkefølgen af fyldningerne havde betydning for ruder, der var asymmetriske mht. glastykkelser og/eller hulrumsdybder. Nogle



få rudetyper (4 stk.) blev derfor bestilt i 2 eksemplarer samtidigt for at kunne afprøve begge muligheder (GL hhv. LG, jvf. forsøgsplan i afsnit 4.3). Samtidigt gav disse dubleringer mulighed for at kontrollere rudernes ensartethed.

Udskiftning af gasfyldning med atm. luft blev gennemført ved udluftning af det pågældende hulrum. Der blev boret et $\phi 3$ mm hul, først foroven og dernæst fornedet (de samme steder, som oprindeligt var blevet benyttet ved rudens gasfyldning). Dernæst stod ruden urørt (mindst 10 cm over gulv) ca. $\frac{1}{2}$ døgn, således at gassen kunne sive ud. Derefter blev ruden udluftet med trykluft, og efter yderligere ca. 1 time blev den forseglet igen. Ved undersøgelsen af 2-lags termoruder blev det vist, at en "udluftet" (tidl. gasfyldt) rude gav samme måleresultater som en rude, der var produceret uden gasfyldning (se [1], afsnit 5.5).

Som før nævnt var den eksperimentelle undersøgelse opdelt i flere måleserier med tidsmæssig forskel (ca. $\frac{3}{4}$ år). Det var derfor nødvendigt at kontrollere, dels om måleresultater for de samme prøveemner var helt ens i begge måleserier, dels om "ens" prøveemner produceret på forskellige tidspunkter gav identiske måleresultater.

Alle de nævnte kontrolforsøg har naturligvis generel interesse, da resultaterne illustrerer pålideligheden af produkt og måling. Resultater fra nogle af kontrolforsøgene er beskrevet i afsnit 4.7.

Nogle flere principper vedr. forsøgsplanlægning og forsøgsmetodik er beskrevet i [1].

Forsøgsplanen for den eksperimentelle undersøgelse blev tilrettelagt således, at betydningen af glastykkelser, laminering, glasafstande og gasfyldning blev belyst bedst muligt inden for projektets økonomiske rammer.

For hver af de nævnte parametre er det tilstræbt, at normale variationer forekommer i undersøgelsen. Hvor dette er umuligt,



er der valgt typiske variationer eller yderpunkter. Som hulrumsfyldninger er der således kun valgt to "rene" luftarter, nemlig SF₆ og atm. luft. Dette valg er foretaget af 2 grunde. Dels repræsenterer disse luftarter yderpunkter mht. lydhastighed, dels opnås den størst mulige sikkerhed for, at hulrumsfyldningen har de tilstræbte egenskaber. Det sidstnævnte er forsøgsteknisk set vigtigt.

4.3 Forsøgsplan

Ved den eksperimentelle undersøgelse af 3-lags termoruder er der benyttet ruder med følgende materialeparametre:

- GLAS: 4 mm, 6 mm, 8 mm
4/2/4 mm laminat (opbygget af to lag 4 mm glas med 2 mm blød acryl imellem)
- HULRUM: 6, 9, 12, 20 mm med hovedvægten lagt på 6 og 12 mm hulrum
- FYLDNING: Atm. luft, SF₆

Termorudernes totaltykkelse var 24-44 mm og vægten 30-42 kg/m². Tykkere og/eller tungere ruder anvendes sjældent i praksis.

Størstedelen af målingerne er gennemført med ruder monteret i en fast karm, men nogle udvalgte rudetyper er tillige målt i et oplukkeligt vindue med og uden supplerende tætning af karm/ramme-fuge.

Til undersøgelsen er der benyttet de samme vinduestyper som ved undersøgelsen af 2-lags termoruder. Karm/ramme-konstruktionerne er af træ. Det oplukkelige vindue er et vendevindue. En kortfattet beskrivelse af vinduerne findes i afsnit 4.4. En mere detaljeret beskrivelse af vinduerne og baggrunden for de valgte konstruktionsdetaljer og forsøgsbetingelser findes i rapport 113 ([1], afsnit 5.4, 5.6 og 5.7).

Ved undersøgelsen er der benyttet vinduer i formatet 12M × 12M (vinduesåbning 121 cm × 121 cm), som er en almindelig vindues-

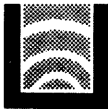


størrelse, og som i NT ACOU 013-1979 (prøvningsmetode) og DS 1084-1982 (klassifikation af vinduer) anbefales til typeprøvnings af vinduer. Vinduernes mål fremgår af tabel 4.1.

12M × 12M vindue	Fast karm [mm × mm]	Oplukkeligt vindue [mm × mm]
Vinduesåbning	1210 × 1210	1210 × 1210
Udv. karmmålt	1188 × 1188	1188 × 1188
Glasfalsmålt	1132 × 1132	1036 × 1023
Glasmålt	1124 × 1124	1028 × 1015

Tabel 4.1 Oversigt over dimensioner for prøveemner.

En oversigt over samtlige prøveemner findes i tabel 4.2. Der er ved alle målinger benyttet ruder af samme fabrikat (svarende til fabrikat I i [1]).



TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	HULRUMSFYLDNINGER			
			GG	GL	LG	LL
4-6-4-6-4	30	24	F + O	F + O	se GL	F + O
4-9-4-9-4	-	30	F + O	F + O	se GL	F + O
4-12-4-6-4	-	-	F + O	F + O	F	F + O
4-12-4-12-4	-	36	F	F	se GL	F
6-6-4-6-4	35	26	F + O	F		F
6-9-4-9-4	-	32	(F)*			F
6-12-4-6-4	-	-	F + O	F + O		F + O
8-6-4-6-4	40	28	F + O	F + O	F	F + O
8-9-4-9-4	-	34	F	F		F
8-12-4-6-4	-	-	F + O	F + O	F	F + O
8-12-4-12-4	-	40	F	F	F	F
8-20-4-6-4	-	42	F	F		F
4/2/4-6-4-6-4	42	30	F + O	F + O		F + O
4/2/4-9-4-9-4	-	36	F			F
4/2/4-12-4-6-4	-	-	F + O	F + O		F + O
4/2/4-12-4-12-4	-	42	F	F		F
4/2/4-20-4-6-4	-	44	F	F		F

Terminologi for en termorudes opbygning er beskrevet i afsnit 3.1.

F: Rude monteret i fast karm
 O: Rude monteret i oplukkeligt vindue
 G: Gasfyldning af 100% SF₆
 L: Atm. luft

GG, GL, LG og LL symboliserer fyldningerne i termorudens to hulrum. Bogstaverne er angivet i samme rækkefølge som de tilhørende hulrumdybder (glasafstande) i tabellens 1. kolonne.

*) planlagt måling mangler pga. fejlløseleverance.

Tabel 4.2 Oversigt over prøveemner.



Af tabel 4.2 fremgår, hvilke rudetyper der er målt i det oplukkelige vindue. For hver af disse ruder er der udført måling af lydisolations for vinduet uden supplerende tætning af karm/ramme-fuge og med tape-tætning af fugen:

- (A) Vindue uden supplerende tætning
- (B) Tape over karm/ramme-fuge indvendigt
- (C) Tape over karm/ramme-fuge både indv. og udv.

Placeringen af tape-tætningerne er vist på figur 4.3. I den 1. måleserie blev der udført A-, B- og C-måling på alle prøveemnerne, men i 2. måleserie blev B-måling udeladt for prøveemner, hvor den skønnedes overflødig.

Det oplukkelige vindue er et vendevindue med ét anslag, og lyden har via fugerne næsten fri adgang til de indre konstruktionsdele. I modsætning hertil har sidebundhængte vinduer som regel 2-3 anslag, hvilket har betydning ikke alene for tætningsmulighederne, men også for karm/ramme-konstruktionens lydisolations (se [1], afsnit 4.11-4.12).

Måling (B) er udført for at kontrollere effektiviteten af vinduets tætningsliste, og den supplerende tape-tætning er placeret meget nær tætningslisten. Resultaterne af måling (C) giver en indikation af, hvad der maksimalt kan opnås med 2 effektive tætningsplaner, idet den "frie" spalte mellem karm og ramme er afspærret (sml. med figur 4.3, der viser snit i vindue). Måling (C) kan dog ikke uden videre erstatte resultater for andre karm/ramme-konstruktioner med 2 "ægte" tætningsplaner.

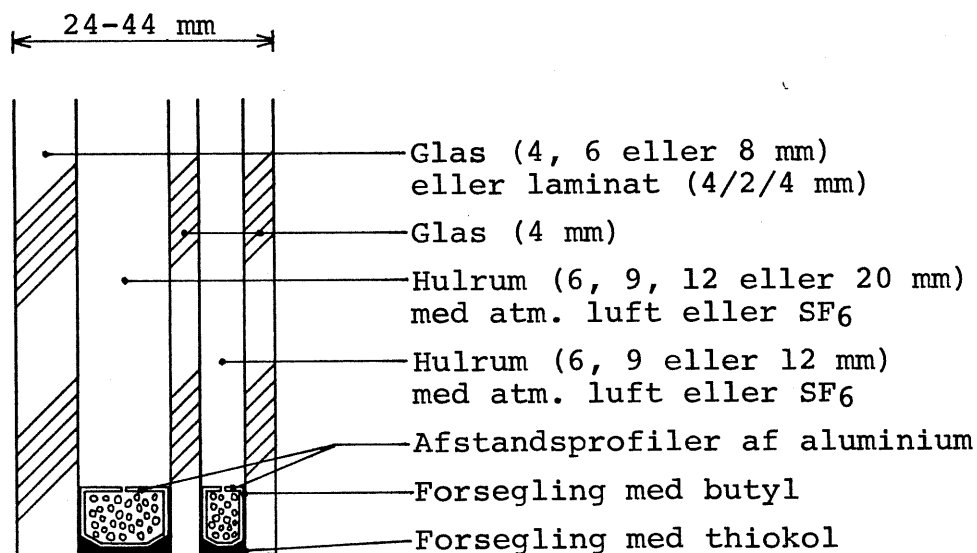
4.4 Beskrivelse af prøveemner

Til alle målinger blev benyttet termoruder af samme fabrikat. Termoruderne blev monteret i en fast karm eller i et oplukkeligt vindue. Nedenstående er beskrevet prøveemnerne samt monteringen i laboratoriet.



Termoruder

Termorudernes opbygning er vist på figur 4.1. Alle termoruder blev bestilt med hulrumsfyldning af SF₆. Til målinger på luftfyldte ruder blev anvendt de samme ruder efter udluftning af hulrum. Udluftningsproceduren er beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 5.5).



Figur 4.1 Snit i termorude.

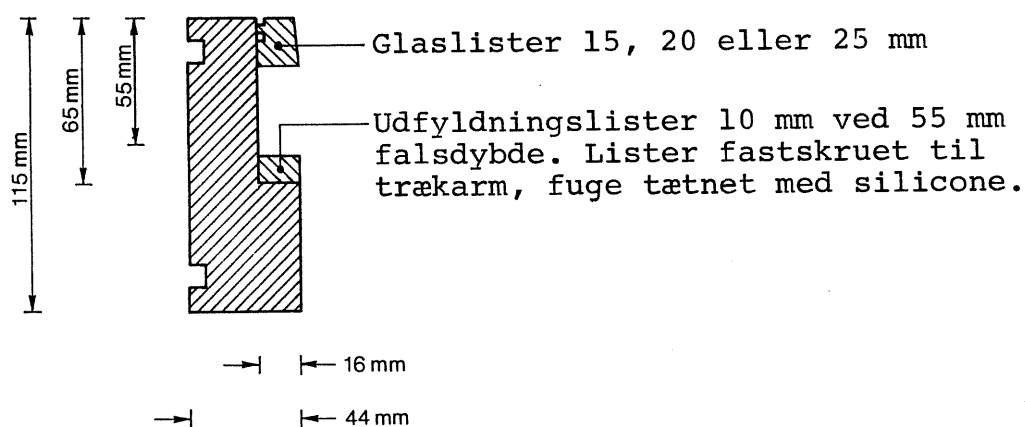
Laminaterne består af 2 lag 4 mm glas med et 2 mm tykt mellem-læg af en acrylmasse (blød polymethacrylat, rumvægt ca. 1100 kg/m³). Laminaterne har handelsnavnet Riaphon og produceres af Dansk Plastplade Værk A/S (DPV). Termoruderne er produceret af Panolook Glas A/S (laminater er leveret direkte fra DPV til Panolook).

Termorudernes totaltykkelse var 24-44 mm og totalvægten var 30-42 kg/m².



Fast karm

Som fast vindue blev benyttet en trækarm. På fig 4.2 er vist et snit i karmen, som var specialfremstillet, fordi der ønskedes variabel falsdybde. Karmen blev produceret af A/S Vip-let vinduer og døre.

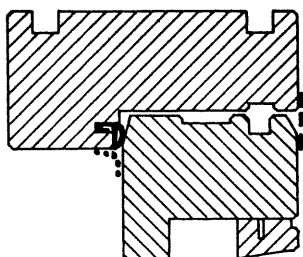


Figur 4.2 Fast karm med falsdybde 55 mm eller 65 mm. Snit i side-, over- og underkarm er ens. Målestok 1:3.

Ruderne fastholdes i karmen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt. Mod det faste anslag og mod glaslisten anvendes tætningslister. Karmens glasfals var ikke ventileret. Baggrunden for de valgte detaljer er nøjere beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 5.6).

Oplukkeligt vindue

Det oplukkelige vindue var et vendevindue (standardprodukt) fra A/S Vip-let. Et vendevindue har en topstyret, udadgående ramme, der kan drejes 180° rundt uden for facaden. Vinduet er étgrebsbetjent. På figur 4.3 er vist et lodret og vandret snit i vindueskonstruktionen.



Signatur for tape-tætninger:

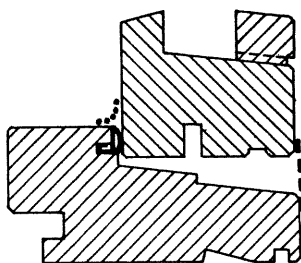
..... Tape indvendigt
 ---- Tape udvendigt

Målingerne er benævnt A, B eller C, jvf. afsnit 4.3:

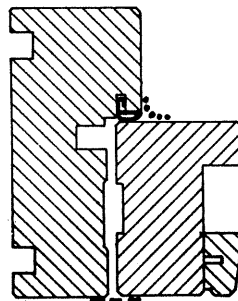
A: Uden tape over karm/ramme-fuge

B: Tape indv.

C: Tape indv. + udv.



Snit i overkarm/ramme
 og underkarm/ramme



Snit i sidekarm/ramme

Figur 4.3 Oplukkeligt vindue. Snit i side-, over- og underkarm/ramme. Målestok 1:3. Placering af tape-tætninger ved supplerende målinger er vist på figuren.

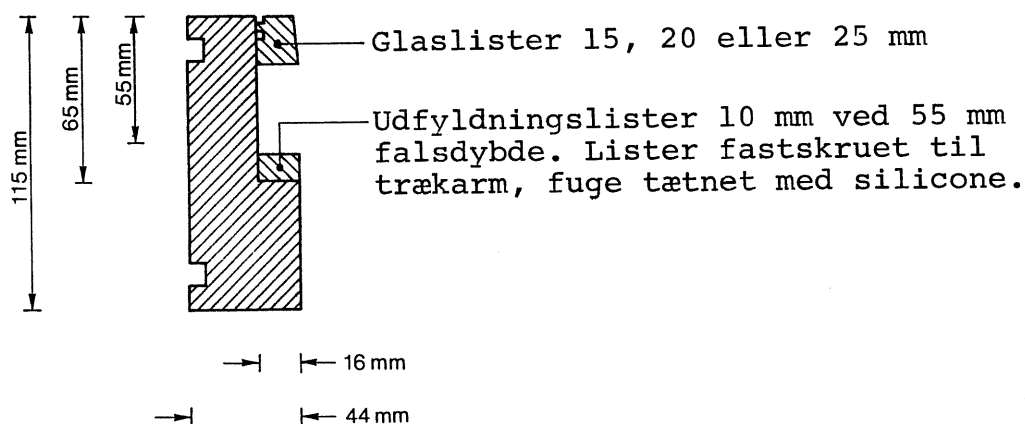
Vindueskarm og -ramme er fremstillet af træ. Karmen er enkelt-falset, og rammen har ét anslag mod karmen. Til tætning af fugen mellem ramme og karm er der i karmfalsen monteret en PVC-tætningsliste (type VB 826). Rammen er ophængt i to vendebeslag (et i hver side) og låses i karmen ved hjælp af en paskvillås med to tilholdere (endelukke).

Ruden fastholdes i rammen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt. Mod det faste anslag og mod glaslisten monteres tætningslister. Underrammens glasfals drænes via 3 mm × 20 mm udskæringer pr. ca. 20 cm i bundglaslisten.



Fast karm

Som fast vindue blev benyttet en trækarm. På fig 4.2 er vist et snit i karmen, som var specialfremstillet, fordi der ønskedes variabel falsdybde. Karmen blev produceret af A/S Vip-let vinduer og døre.

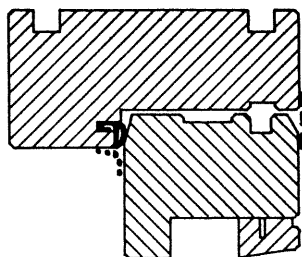


Figur 4.2 Fast karm med falsdybde 55 mm eller 65 mm. Snit i side-, over- og underkarm er ens. Målestok 1:3.

Ruderne fastholdes i karmen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt. Mod det faste anslag og mod glaslisten anvendes tætningslister. Karmens glasfals var ikke ventileret. Baggrunden for de valgte detaljer er nøjere beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 5.6).

Oplukkeligt vindue

Det oplukkelige vindue var et vendevindue (standardprodukt) fra A/S Vip-let. Et vendevindue har en topstyret, udadgående ramme, der kan drejes 180° rundt uden for facaden. Vinduet er étgrebsbetjent. På figur 4.3 er vist et lodret og vandret snit i vindueskonstruktionen.

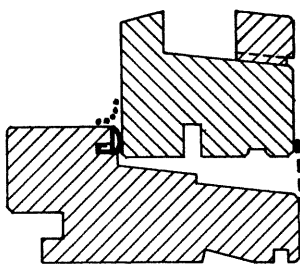


Signatur for tape-tætninger:

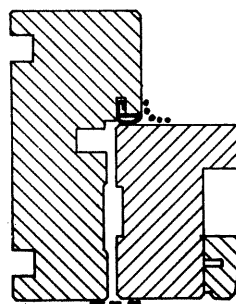
- Tape indvendigt
- Tape udvendigt

Målingerne er benævnt A, B eller C, jvf. afsnit 4.3:

- A: Uden tape over karm/ramme-fuge
- B: Tape indv.
- C: Tape indv. + udv.



Snit i overkarm/ramme
og underkarm/ramme

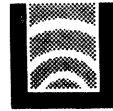


Snit i sidekarm/ramme

Figur 4.3 Oplukkeligt vindue. Snit i side-, over- og underkarm/ramme. Målestok 1:3. Placering af tape-tætninger ved supplerende målinger er vist på figuren.

Vindueskarm og -ramme er fremstillet af træ. Karmen er enkelt-falset, og rammen har ét anslag mod karmen. Til tætning af fugen mellem ramme og karm er der i karmfalsen monteret en PVC-tætningsliste (type VB 826). Rammen er ophængt i to vendebeslag (et i hver side) og låses i karmen ved hjælp af en paskvillås med to tilholdere (endelukke).

Ruden fastholdes i rammen af et fast anslag indvendigt og af en glasliste udvendigt. Mod det faste anslag og mod glaslisten monteres tætningslister. Underrammens glasfals drænes via 3 mm × 20 mm udskæringer pr. ca. 20 cm i bundglaslisten.



Vinduesrammens glasfals er 50 mm dyb. Der anvendes 15, 20 eller 25 mm glaslister (alle standardmål), afhængigt af rudetykkelsen. Ved de aktuelle forsøg er der benyttet rudetykkelser på op til 36 mm. I praksis bør der dog ikke til en 50 mm glasfals anvendes ruder, der er tykkere end 30-32 mm.

4.5 Montage af prøveemner

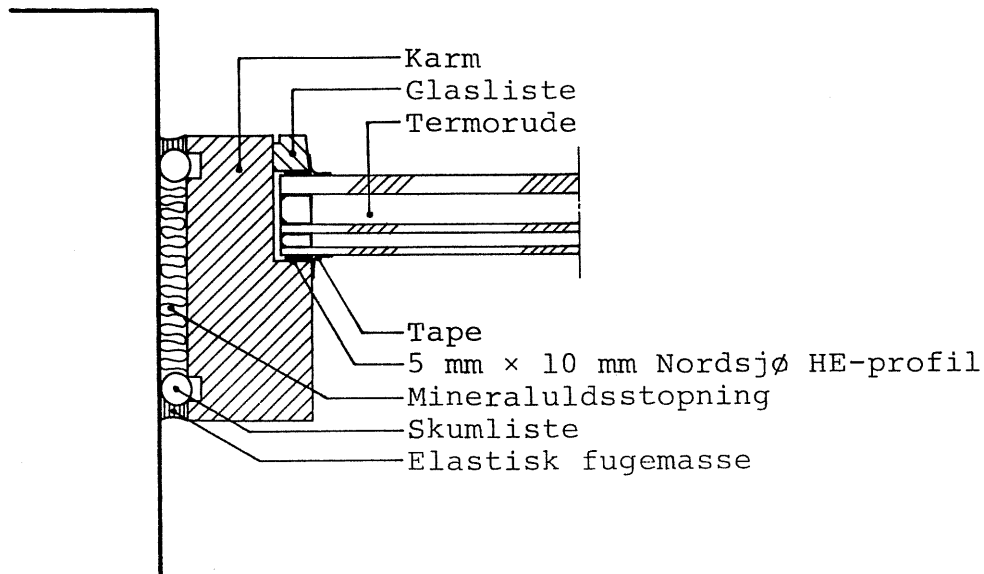
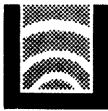
Vinduerne blev monteret i en 37,5 cm tyk dobbeltvæg, der var opført i en åbning mellem to lydharde rum. Prøveåbningens størrelse var 1210 mm × 1210 mm.

Vinduerne blev monteret med en udvendig nichedybde på ca. 5 cm og fastgjort med 2-3 skruer i hver side. Fugen omkring karmen blev stoppet med mineraluld, hvorefter den indvendigt og udvendigt blev afspærret med en skumliste og forseglet med elastisk fugemasse.

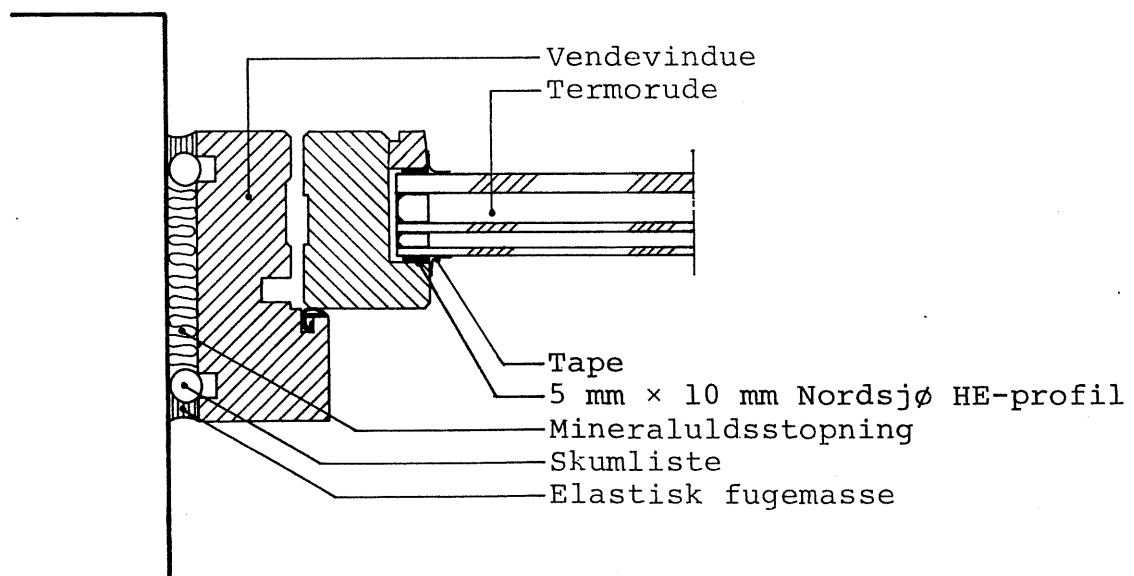
Ved montagen af ruderne blev benyttet 5 mm × 10 mm Nordsjø HE-profil mod det faste anslag og mod glaslisten, og der blev tætnet med tape indvendigt og udvendigt.

Montagen af vinduerne er vist på figur 4.4 og 4.5.

Ved målinger af ruder i det oplukkelige vindue ønskedes realistiske målebetingelser, og glasfalsen var derfor ventileret. Ved målingerne på ruder i fast karm ønskedes mere neutrale forhold, og glasfalsen var ikke ventileret.

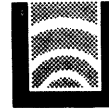


Figur 4.4 Termorude i fast vindue.
Montage i laboratoriet.
Målestok 1:3.



Figur 4.5 Termorude i oplukkeligt vindue.
Montage i laboratoriet.
Målestok 1:3.

Tætning af karm/ramme-fuge (se figur 4.3):
Måling A: Uden tape over karm/ramme-fuge
Måling B: Tape over karm/ramme-fuge indv.
Måling C: Tape over karm/ramme-fuge indv. + udv.



Grunden til, at der blev anvendt ekstra tætning af fugerne omkring ruden (se figur 4.4 og 4.5) var, at det ellers var vanskeligt at sikre sig helt mod tilfældige utætheder. Erfaringer fra [1] viste, at virkningen af utætheder var specielt kraftig, når glasfalsen var ventileret. Når fugebåndene var effektivt komprimeret, blev lydisolationen ikke forringet af en ventileret glasfals, men heller ikke forbedret af en silicone topforsegling.

Da formålet med den eksperimentelle undersøgelse var at undersøge virkningen af forskellige rudeparametre, valgtes det at erstatte topforseglingen med en kraftig tape. Ved anvendelse af tapetætning opnåedes der flere fordele: 1) monteringstiden for ruderne mindskedes, 2) måling og udskiftning af rude skulle ikke afvente hårdning af silicone og 3) karmen/rammen kunne benyttes til mange målinger, da den ikke blev ødelagt ved gentagne afrensninger af forseglingsmassen.

Der blev udført målinger af lydisolation for det oplukkelige vindue både uden og med supplerende tætning af karm/ramme-fugen, jvf. figur 4.5 og 4.3. Formålet med de supplerende målinger er beskrevet i afsnit 4.3.

4.6 Målemetode og målerum

Målingerne af reduktionstal blev udført efter retningslinierne i DS/ISO 140/3-1978: "Måling af bygningselementers luftlydisolation i laboratorium" [5].

Ved måling af reduktionstallet efter DS/ISO 140/3-1978 placeres prøveemnet mellem et senderum og et modtagerum, der opfylder kravene i DS/ISO 140/1-1978 [5], og reduktionstallet bestemmes efter nedenstående formeludtryk, der forudsætter, at lydfelterne i rummene er diffuse:



$$R = L_S - L_M + 10 \log_{10}(S/A_M) \quad \text{og} \quad A_M = \frac{0,163 \cdot V_M}{T_M}$$

R = Prøveemnets reduktionstal [dB]

L_S = Lydtrykniveau i senderum [dB/20 μ Pa]

L_M = Lydtrykniveau i modtagerum [dB/20 μ Pa]

S = Prøveemnets areal [m²]

A_M = Ækvivalent absorptionsareal i modtagerum [m²]

V_M = Modtagerummets volumen [m³]

T_M = Efterklangstid i modtagerum [s]

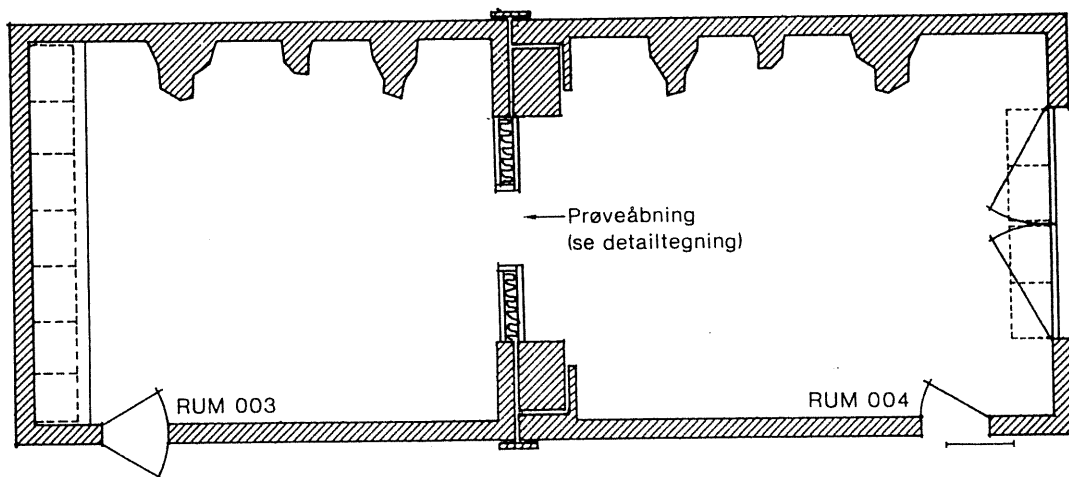
Ved beregning af reduktionstallet for et vindue benyttes der i korrektionsleddet til lydtrykniveaudifferensen arealet af den prøveåbning, som vinduet var monteret i. Reduktionstallet korrigeres for lydtransmission uden om prøveemnet, såfremt denne er større end 1/50 af lydtransmissionen gennem prøveemnet. Største anvendte korrektion - svarende til et transmissionsforhold på 1:3 - er 1,3 dB. Korrektionen beregnes efter Nordtest-metode NT ACOU 013-1979 [20].

Målingerne er udført i to lydhårde rum, 004 og 003, i bygning 355 på Danmarks tekniske Højskole. Rummene er udført af beton. Mellem rummenes endevægge findes en 80 cm tyk betonramme med en 3,70 m \times 2,69 m åbning. Begge rummene og betonrammen er opført på separate fundamenter. På to af væggene og på loftet er der anbragt lyddiffuserende elementer af beton og af dæmpet stålplade, hvorefter rummenes volumener er henholdsvis ca. 230 m³ (rum 004) og ca. 215 m³ (rum 003). Et vandret snit i målerummene findes på figur 4.6. På figur 4.7 findes et lodret snit i rummene.

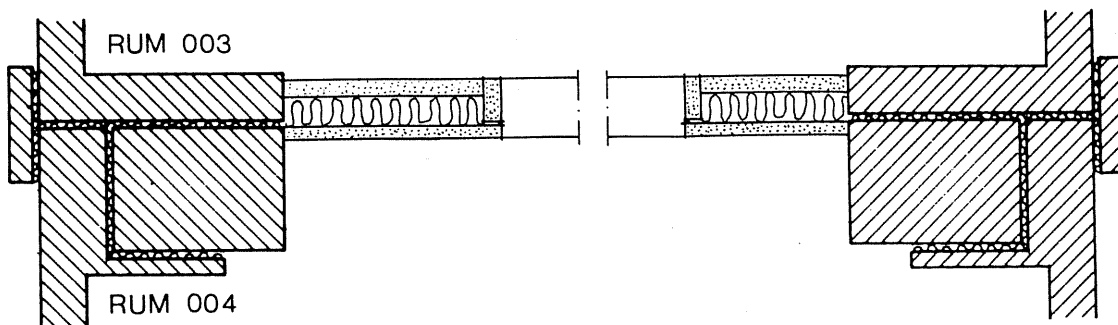
Vinduerne blev monteret i en prøveåbning i en væg, der var opført i åbningen i betonrammen. Væggens R_w -værdi var i 1. og 2. måleserie (jvf. afsnit 4.2) henholdsvis 73 dB og 75 dB. Ved referencemålingen af væggen var prøveåbningen etableret, men udfyldt med elementer som den øvrige del af væggen. Væggen var udført som en 37,5 cm tyk dobbeltkonstruktion med mineraluld i hulrummet. De to væghalvdele var opbygget af 7,5 cm henholdsvis 10 cm tykke, 50 cm brede Gasbeton vægelementer sammenlimet med



Plus lydlim og understøbt med cementmørtel. Mod betonrammens sider og top var fugerne elastiske. I prøveåbningen var der overfladebehandlet med spartelmasse, og fugen mellem de to væghalvdele var afspærret med elastisk fugemasse. Prøveåbningens afstand til betonrammens bund og ene side var henholdsvis 60 cm og 148 cm.



Vandret snit i målerum. Målestok 1:125.

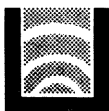


Vandret snit i prøveåbning for vinduer. Målestok 1:50.

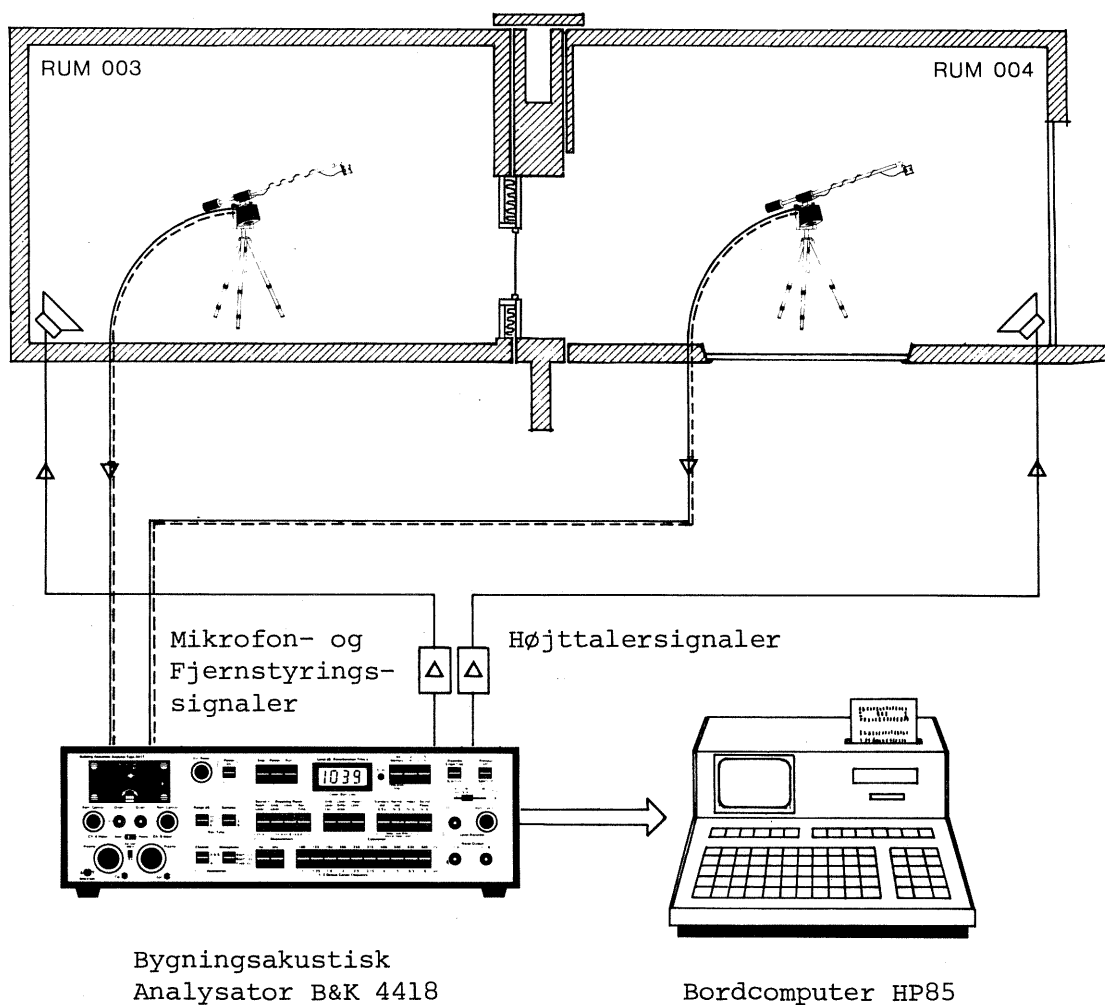
Figur 4.6 Vandret snit i målerum og prøveåbning.

Målingerne af reduktionstal blev udført sekventielt i 1/3 oktavniveau fra 100 Hz til 5000 Hz (i DS/ISO 140/3-1978 er kun foreskrevet måling ved frekvenser op til 3150 Hz).

Ved målingerne blev benyttet en måleopstilling som vist på figur 4.7. Ved målingerne af lydtrykniveau blev der benyttet roterende mikrofoner. Måleproceduren opfylder præcisionskravene



anført i DS/ISO 140/2 [5]. Måleprocedure og instrumentering er beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 5.11).



Figur 4.7 Lodret snit i målerum og principtegning af måleopstilling.

4.7 Nøjagtighed af måleresultater

I dette afsnit findes nogle generelle betragtninger om måleresultaters nøjagtighed. Sidst i afsnittet er omtalt nogle kontrolmålinger, som af forsøgstekniske grunde er nødvendige for den aktuelle undersøgelse, men som også er relevante for producenter af bygningskomponenter.



Brugbarheden af et måleresultat afhænger dels af målingens nøjagtighed, dels af produktets nøjagtighed. Værdien af et nøjagtigt måleresultat forringes, hvis prøveemnet ikke er så veldefineret, at der kan fremstilles flere eksemplarer af produktet.

Prøvningsresultater fra en laboratiemåling af en komponent kan anvendes til forskellige formål:

- Dokumentation af komponentens egenskaber
- Sammenligning med resultater for andre komponenter målt i det samme eller andre laboratorier.

Med henblik på disse anvendelser er det indlysende, at der må stilles visse krav til målenøjagtigheden. Hvis der udføres 2 prøvninger af samme produkt i samme eller forskellige laboratorier, bør/skal forskellen ligge inden for visse grænser. Derfor er det nødvendigt med retningslinier for udformning af målerum og for præcision af den anvendte måleprocedure. Til beskrivelse af troværdigheden af måleresultaterne benyttes i den forbindelse begreberne repeterbarhed og reproducerbarhed. Disse størrelser angiver, hvor store forskelle, der (med en vis sandsynlighed) kan fremkomme ved gentagelse af en måling i samme laboratorium hhv. i et andet laboratorium.

Repeterbarheden kunne også kaldes "lokal" målenøjagtighed og reproducerbarheden "global" målenøjagtighed. I begge tilfælde er begreberne dog knyttet til målinger, der er korrekt udført efter en konkret, standardiseret metode. Jo mindre talværdier repeterbarheden og reproducerbarheden har, jo bedre er målenøjagtigheden.

Repeterbarheden er den maksimalt forventelige forskel mellem to måleresultater for samme prøveemne målt under samme betingelser, dvs. samme laboratorium, samme måleprocedure, samme måleudstyr, samme operatør og kort tidsforskel.

Reproducerbarheden er den maksimalt forventelige forskel mellem to måleresultater for identiske prøveemner målt efter samme metode, men under forskellige målebetingelser, dvs. forskellige



laboratorier, forskelligt måleudstyr og forskellige operatører. Reproducerbarheden beskriver altså størrelsen af de systematiske forskelle, der kan optræde ved målinger (efter samme metode) i forskellige laboratorier.

Repeterbarhed og reproducerbarhed er detaljeret beskrevet i hhv. [21] og [22] og er desuden behandlet i [23], hvor der er lagt særlig vægt på at belyse problemerne knyttet til målinger og vinduer.

Det skal bemærkes, at begreberne repeterbarhed og reproducerbarhed er relateret til måleresultater for identiske prøveemner. Forskelle i måleresultater forårsaget af "tilfældige" forskelle i prøveemner er således ikke indregnet.

I tabel 4.3 er oversigtsmæssigt angivet de hovedfaktorer, der har indflydelse på den "totale" nøjagtighed af en måling på et produkt.

Forskelle i måleresultater for "ens" produkter kan skyldes:	Krav til nøjagtighed medfører krav til:
(1) Måleproceduren	Repeterbarheden
(2) Laboratoriet	Reproducerbarheden
(3a) Utilsigtede produktforskelle	Produkt-nøjagtighed (materialer, produktionsteknik og -tolerancer)
(3b) Forskelle i prøveemnets dimensioner	Begrænsning af dimensionsforskelle

Tabel 4.3 Vinduers lydisolations. Oversigt over hovedfaktorer, der har betydning for måleresultaters nøjagtighed/brugbarhed.

Den samlede usikkerhed af et resultat findes ved en sammenlægning af de enkelte usikkerhedsbidrag (NB: ikke almindelig summation). Normalt er bidraget fra (1) væsentligt mindre end bi-



draget p.g.a. (2). Bidraget fra (3a) afhænger stærkt af produktets art samt af producentens krav til produktspecifikationer og -tolerancer. Bidragene fra (1), (2) og (3a) følger ikke en naturlov, og der er - ihvertfald teoretisk - visse muligheder for at forbedre nøjagtigheden. Hvad angår (3b), henvises til [8] og [10]. Der findes i mange lande præferencestørrelser fastlagt bl.a. på grundlag af byggeskikken i de pågældende lande. Standardiserede dimensioner ved laboratoriemålinger øger værdien af resultatsammenligninger, men andre dimensioner kan være yderst relevante, f.eks. når resultaterne skal bruges til projektering af et konkret byggeri med specielle vinduesstørrelser. Såfremt bestemte vinduesstørrelser er valgt velovervejet, kan forskelle i vinduesstørrelsen ikke kaldes "tilfældige" i statistisk betydning, men må snarere betragtes som tilsigtede variationer af principielt ens produkter (dvs. med uændrede materialespecifikationer).

Ved en eksperimentel undersøgelse af konstruktionsparametres betydning vil man naturligvis søge at eliminere "fejlkluder", der kan tilsløre undersøgelsesresultaterne.

Ved den aktuelle undersøgelse er alle målinger udført i samme målerum, og der er benyttet samme størrelse prøveåbning. Nøjagtigheden af måleresultaterne er derfor hovedsageligt bestemt af måleproceduren (1) og utilsigtede produktforskelle (3a), jvf. tabel 4.3. Måleprocedurens nøjagtighed er beskrevet i rapport 113 ([1] afsnit 5.11). I det følgende beskrives derfor primært emnet produkt-nøjagtighed, og i den forbindelse er det også relevant at verificere, at der fås samme måleresultater for samme produkt målt i de to måleserier, undersøgelsen er opdelt i (jvf. afsnit 4.2).

Det er indlysende, at "tilfældige" forskelle i måleresultater er mindst, såfremt prøveemnerne er fremstillet samtidigt og målingerne udføres hurtigt efter hinanden i samme laboratorium. Derfor bør denne fremgangsmåde foretrækkes ved eksperimentelle undersøgelser, hvor betydningen af små konstruktionsforskelle skal vurderes.



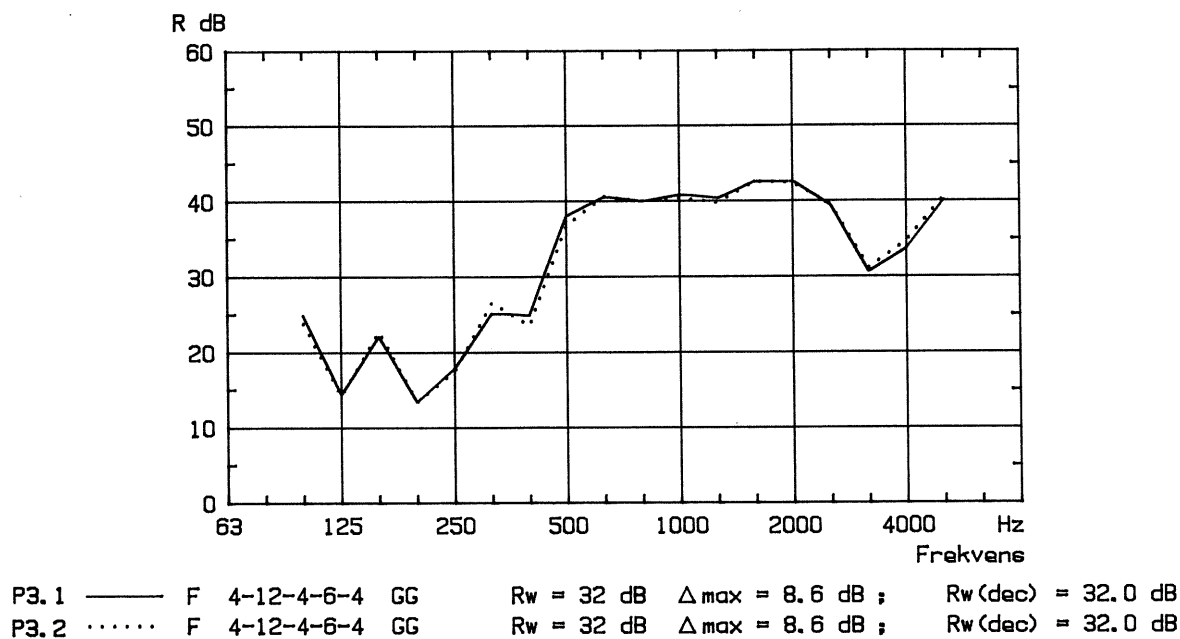
Ved den aktuelle undersøgelse var antallet af mulige prøveemner meget stort (over 1000), og det var nødvendigt at begrænse antallet af prøveemner, bl.a. ved at opdele undersøgelsen i 2 måleserier med en mellemliggende databehandling af resultaterne fra 1. måleserie.

Til måleserie 1 blev leveret ialt 17 gasfyldte ruder. Heraf var 4 eksemplarer dubletter, der var nødvendige for at kunne undersøge de ønskede kombinationer af gasfyldninger. Af de ruder, der blev leveret i 2 eksemplarer, blev eksemplar 1 benyttet til GG- og GL-målinger, og eksemplar 2 til LG- og LL-målinger (se forsøgsplan i afsnit 4.3). Der er dog udført GG-målinger på begge eksemplarer, især for at kontrollere, at der er velbegrundet basis for sammenligningerne i afsnit 5.6, men også fordi det har generel interesse at vide, hvor ensartede ruderne er.

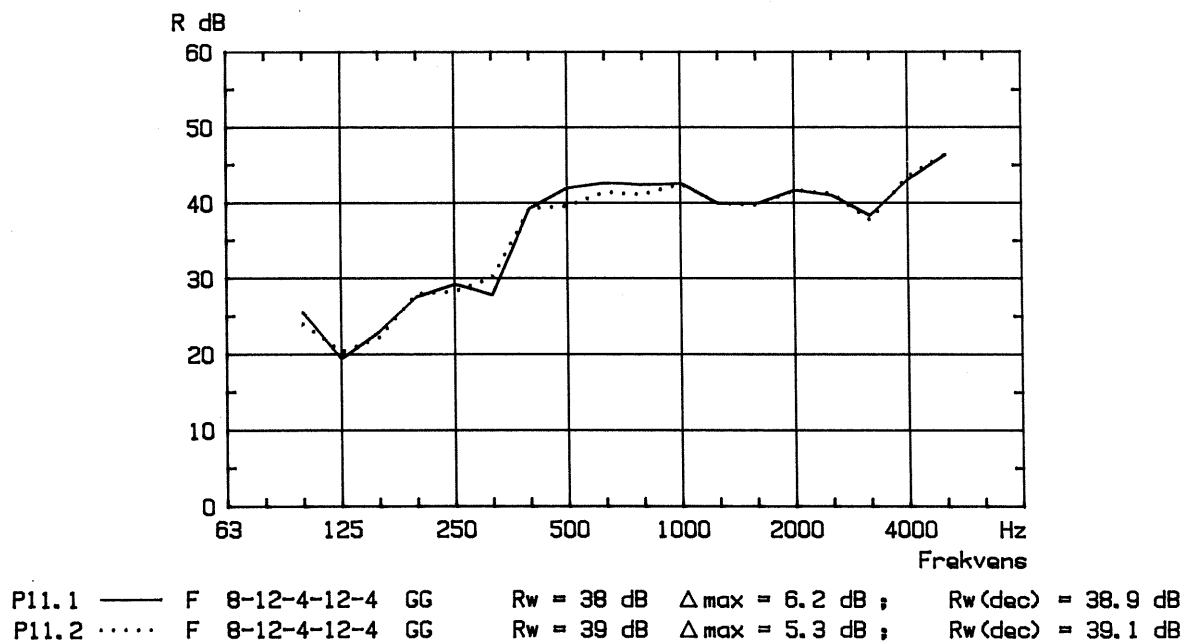
Måleserie 2 blev gennemført ca. 1 år senere, og der blev leveret 15 gasfyldte ruder. Heraf var 2 ruder af en type, der også indgik i måleserie 1. Disse 2 ruder skulle benyttes til en kontrol af, at der ikke var sket produktændringer i mellemtiden.

På figur 4.8-4.13 er vist nogle måleresultater, der illustrerer produkt- og målenøjagtighed. Ruderne er identificeret ved et Px.y, hvor x angiver rudens nummer og y eksemplar-nummer (ved samtidig leverance af flere eksemplarer).

På figur 4.8 og 4.9 er vist sammenligninger af måleresultater for 2 eksemplarer af en rude produceret samtidigt og målt samtidigt (dvs. med kort tidsinterval). I begge tilfælde fås meget små forskelle i måleresultater, og det samme var tilfældet for de to andre ruder, der blev leveret i 2 eksemplarer. Selv med næsten identiske måleresultater kan der dog i grænsetilfælde fås afvigende R_w -værdier som det fremgår af figur 4.9, hvor forskellen er 1 dB. Konklusionen af forsøgene er, at de leverede ruder er ensartede. Måleteknisk er kontrollen effektiviseret ved at benytte samme mikrofonbaner ved de "samtidige" målinger, således at produktforskelle ikke sløres af måleusikkerhed.



Figur 4.8 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2 eksemplarer af 3-lags termorude 4-12-4-6-4 GG produceret samtidigt (1983) og målt samtidigt (1983). Se også figur 5.17 med resultater for de samme 2 ruder med forskellige fyldninger.



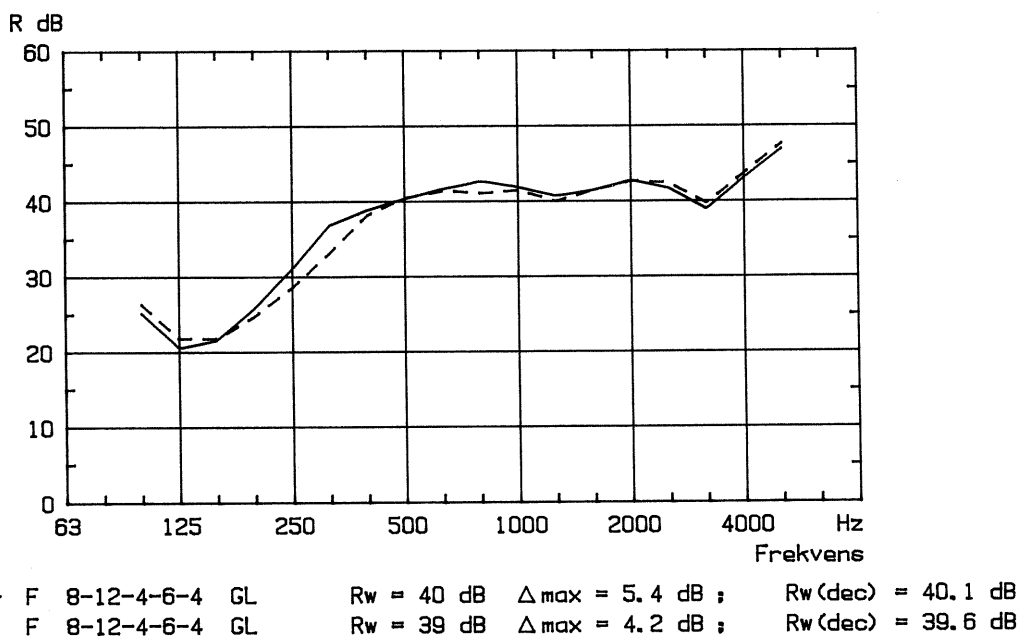
Figur 4.9 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2 eksemplarer af 3-lags termorude 8-12-4-12-4 GG produceret samtidigt (1983) og målt samtidigt (1983). Se også figur 5.16 med resultater for de samme 2 ruder med forskellige fyldninger.



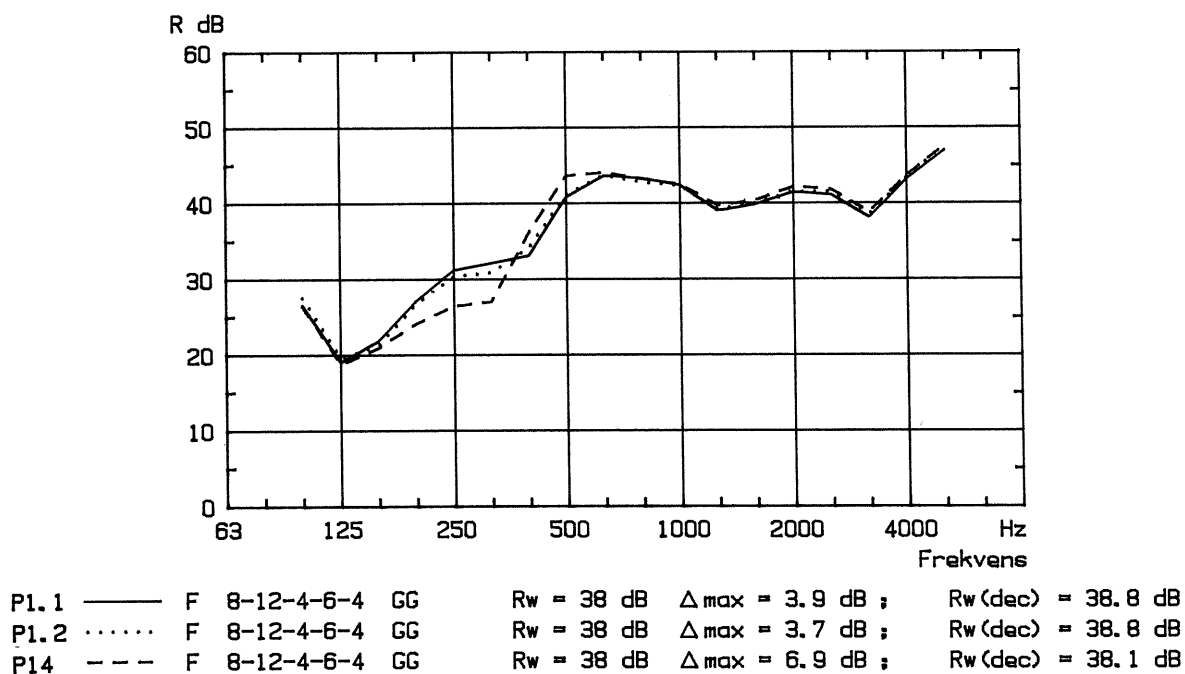
På figur 4.10 og 4.11 er vist nogle måleresultater, der illustrerer produktets "langtidsstabilitet". Det ses, at ruder produceret med et års mellemrum - som forventet - er mere forskellige end ruder produceret samtidigt. Resultaterne viser, at gasfyldningen har betydning for produkt-nøjagtigheden. Således er måleresultaterne for ruderne P1.1 og P14 mere ens, når der kun er gasfyldning i ét hulrum (figur 4.10) end når begge hulrum er gasfyldte. Der er ikke udført sammenlignende målinger på ruderne helt uden gasfyldning.

Hvad angår gasfyldningens nøjagtighed, viser erfaringerne - også fra rekvirerede målinger - at det kan forekomme, at gasfyldningen helt mangler. I nogle tilfælde vil det kunne ses tydeligt på reduktionstalskurverne (se f.eks. figur 5.19). Men i andre tilfælde er det vanskeligt at konstatere med sikkerhed, uden at ruden punkteres (se f.eks. figur 5.20). Generelt må det tilrådes, at konklusioner vedr. gasfyldninger underbygges grundigt.

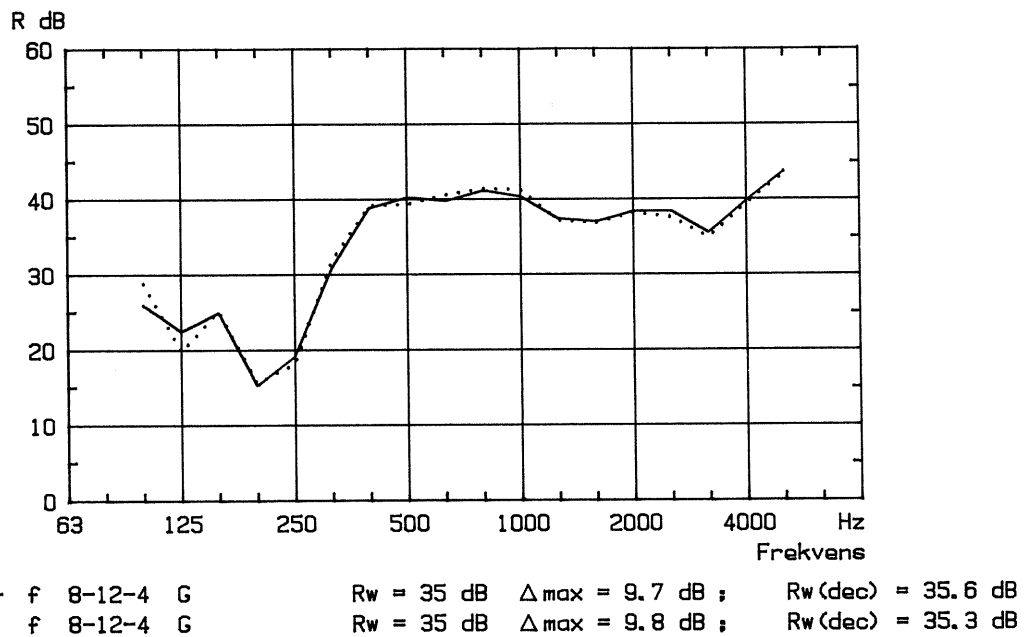
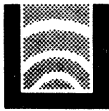
Figurerne 4.12 og 4.13 viser sammenligninger af måleresultater for samme prøveemne målt i forskellige måleserier. På figur 4.12 er sammenlignet resultater fra 1982 og 1983. Prøveemnet er en 2-lags termorude, der blev leveret til undersøgelsen [1]. På figur 4.13 er sammenlignet resultater for en 3-lags termorude målt i 1983 og i 1984, dvs. hhv. 1. og 2. måleserie. Sammenligningerne tyder på, at der i meget høj grad er opnået ens målebetingelser i alle 3 måleserier, og at måleresultater derfor kan sammenlignes på tværs af måleserierne.



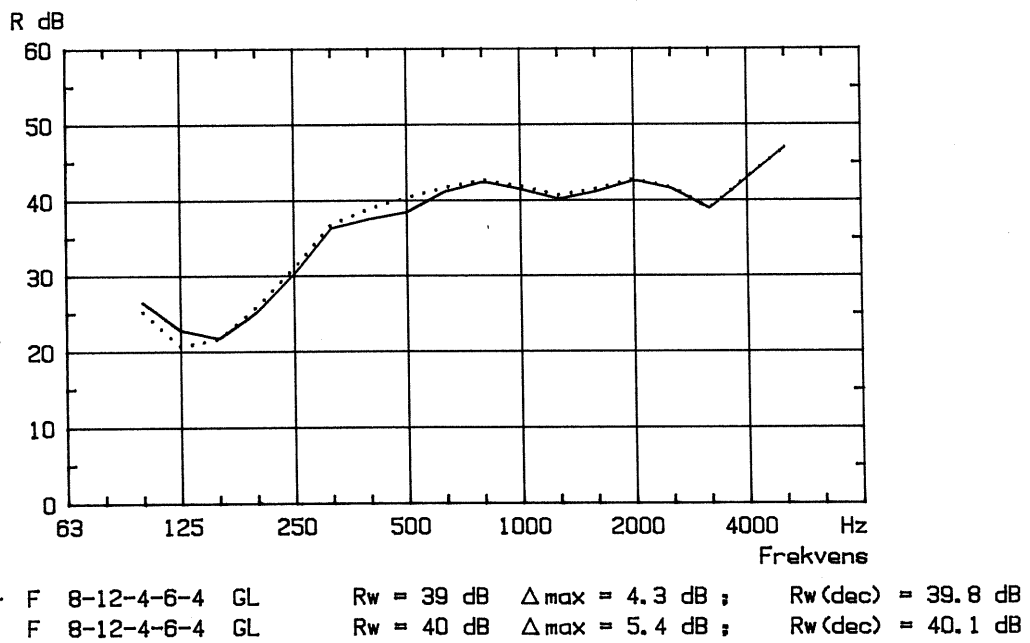
Figur 4.10 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 2 eksemplarer af 3-lags termorude 8-12-4-6-4 GL produceret med 1 års mellemrum (1983 og 1984), men målt samtidigt ((1984, 2 dages mellemrum)).



Figur 4.11 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3 eksemplarer af 3-lags termorude 8-12-4-6-4 GG. De 2 førstnævnte eksemplarer er produceret samtidigt (1983) og målt samtidigt (1983), mens det sidste eksemplar er produceret og målt 1 år senere (1984).



Figur 4.12 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for ét eksemplar af 2-lags termorude 8-12-4 G produceret i 1982 og målt i hhv. 1982 [1] og 1983.



Figur 4.13 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for ét eksemplar af 3-lags termorude 8-12-4-6-4 GL produceret i 1983 og målt i hhv. 1983 og 1984.



5. MÅLERESULTATER

5.1 Generelle bemærkninger

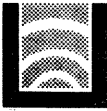
Afsnit 5.2 indeholder oversigter over resultater (R_w -værdier) fra den eksperimentelle undersøgelse af lydisolations for 3-lags termoruder. I de efterfølgende afsnit er vist nogle figurer, der illustrerer undersøgelsesresultaterne.

I afsnit 5.3-5.6 findes grafiske afbildninger af måleresultater, der eksemplificerer betydningen af glastykkelser, laminering, glasafstande og hulrumsfyldning. I afsnit 5.7 er vist nogle diagrammer med reduktionstal for samme rudetype monteret i hhv. en fast karm og et oplukkeligt vindue. Afsnit 5.8 indeholder nogle enkelte sammenligninger af måleresultater for 2- og 3-lags termoruder.

Ikke alle måleresultater er afbildet i diagrammer, men i tabellerne i afsnit 5.2 findes R_w -værdier for alle rudetyper. Til afbildningerne er der så vidt muligt valgt måleresultater, som viser typiske resultater eller tendenser. Der er vist reduktionstal pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-5000 Hz.

Generelt skal der ikke lægges for megen vægt på forskelle ved enkelte frekvenser, men mere på kurvernes principielle forløb eller på vurderingsværdier (f.eks. R_w). Det skal tages i betragtning, at afbildningerne viser faktiske måleresultater og at nøjagtigheden af resultaterne afhænger både af produktets og målingens "nøjagtighed", jvf. afsnit 4.7. Der er ingen grund til at foretrække én rude frem for en anden på et alt for spinkelt grundlag. Forskelle i R_w -værdi på 1 dB har ikke altid nogen praktisk betydning, og valget af rude kan i så fald foretages under hensyntagen til andre egenskaber.

I figurtekster mv. benyttes betegnelsen "gas", "gasfyldning" eller blot "G" som synonym for luftarten SF₆, og atm. luft betegnes som "luft" eller "L". Den anvendte terminologi til beskrivelse af rudernes opbygning findes i afsnit 3.1.



5.2 Oversigter over resultater

På de efterfølgende sider findes oversigter over R_W -værdier for de undersøgte prøveemner. Det vægtede reduktionstal R_W er valgt til resultat-angivelsen, fordi dette begreb anvendes i de danske bygningsreglementer, [3] og [4], og i øvrigt benyttes som grundlag for klassifikation af vinduer efter DS 1084-1982 [10].

R_W beregnes efter metoden i DS 2186.3-1982 [6]. Denne metode er identisk med vurderingsmetoden i ISO 717/3-1982 [7]. R_W -værdien er pr. definition et helt tal og angives sammen med den maksimale, ugunstige afvigelse (Δ_{\max}) i forhold til vurderingskurven. R_W -værdier med 1 decimal er angivet for at muliggøre bedre sammenligninger af resultater for forskellige konstruktioner.

I resultatoversigterne er ikke angivet I_a -værdier [24], som nu er udgået af de fleste reglementer og normer. I_a -værdien for en konstruktion kan dog let beregnes, når R_W (heltalsværdi) og Δ_{\max} kendes. Hvis Δ_{\max} højst er 8,0 dB er I_a -værdien identisk med R_W -værdien. Såfremt Δ_{\max} overskrider 8,0 dB findes I_a -værdien ved at trække overskridelsen fra R_W -værdien. I_a -værdien er - ligesom R_W -værdien - et helt tal, og der skal rundes nedad. Med $R_W = 31$ dB og $\Delta_{\max} = 9,1$ dB fås eksempelvis $I_a = 29$ dB. Begge vurderingsværdier beregnes på basis af reduktionstallet pr. 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz. Vurderingsmetoderne er nøjere beskrevet i rapport 113 ([1], afsnit 3.3), hvor der også er vist et beregningseksempel.

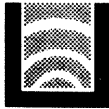
I tabel 5.1 findes R_W -værdier for ruder monteret i en fast karm. Nogle rudetyper er også målt i oplukkeligt vindue, og disse resultater findes i tabel 5.2. I tabel 5.3 og 5.4 er angivet R_W -værdier med 1 decimal.

Måleresultaterne for de bedst lydisolerende termoruder er i nogen grad influeret af lydtransmission gennem karmen/rammen. Af hensyn til undersøgelsens helhed er alle ruder alligevel monteret i de samme vinduestyper, idet forringelsen af reduktionstallet fandt sted i mellemfrekvensområdet, der ikke er afgørende for hovedresultaterne af undersøgelsen. Betydningen af karm/



ramme-konstruktionen vil blive nøjere undersøgt i projektfase 3, jvf. afsnit 1.

Alle målinger er udført på vinduer i størrelsen 12M × 12M. Andre størrelser og kantforhold giver ikke nødvendigvis samme resultater. Målingerne på det oplukkelige vindue er udført på vinduet med og uden ekstra tætninger, jvf. afsnit 4.3 og 5.2. En detaljeret beskrivelse af prøveemnerne findes i afsnit 4.3-4.5.



TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	R _w / Δ _{max} [dB / dB]			
			HULRUMSFYLDNINGER I RUDE			
			GG	GL	LG	LL
4-6-4-6-4	30	24	30 / 10,2	32 / 9,4		32 / 8,6
4-9-4-9-4	-	30	31 / 8,2	34 / 8,7		31 / 6,7
4-12-4-6-4	-	-	32 / 8,6	35 / 8,4	32 / 7,1	32 / 6,6
4-12-4-12-4	-	36	32 / 7,4	35 / 7,8		32 / 6,0
6-6-4-6-4	35	26	34 / 7,7	37 / 9,6		36 / 7,0
6-9-4-9-4	-	32	*			35 / 6,4
6-12-4-6-4	-	-	37 / 7,2	38 / 8,0		36 / 5,8
8-6-4-6-4	40	28	36 / 10,0	38 / 7,2	37 / 8,8	37 / 6,7
8-9-4-9-4	-	34	37 / 6,3	38 / 4,2		37 / 6,0
8-12-4-6-4	-	-	38 / 3,9	39 / 4,3	38 / 5,9	38 / 4,8
8-12-4-12-4	-	40	38 / 6,2	39 / 4,8	39 / 5,1	39 / 6,5
8-20-4-6-4	-	42	41 / 5,5	41 / 4,5		40 / 5,2
4/2/4-6-4-6-4	42	30	36 / 9,4	40 / 7,4		38 / 7,4
4/2/4-9-4-9-4	-	36	38 / 9,3			38 / 4,9
4/2/4-12-4-6-4	-	-	40 / 6,6	42 / 6,4		40 / 6,9
4/2/4-12-4-12-4	-	42	41 / 9,3	41 / 6,4		40 / 8,0
4/2/4-20-4-6-4	-	44	43 / 5,0	42 / 4,4		42 / 6,5

Terminologi for termorudens opbygning er beskrevet i afsnit 3.1.

G: Gasfyldning af 100% SF₆

L: Atm. luft

GG, GL, LG og LL symboliserer fyldningerne i termorudens to hulrum. Bogstaverne er angivet i samme rækkefølge som de tilhørende hulrumsdybder (glasafstande) i tabellens 1. kolonne.

* Planlagt måling mangler.

Tabel 5.1 Oversigt over målt R_w/Δ_{max} for 3-lags termoruder i fast karm.

R_w-værdier med 1 decimal findes i tabel 5.3.



TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	KARM/ RAMME- FUGE	R _w / Δ _{max} [dB / dB]		
				HULRUMSFYLDNINGER I RUDE		
				GG	GL	LL
4-6-4-6-4	30	24	A	31 / 8,2	34 / 8,6	33 / 6,8
			B	31 / 7,8	34 / 7,9	33 / 6,0
			C	31 / 8,5	34 / 8,0	34 / 7,7
4-9-4-9-4	-	30	A	33 / 8,7	34 / 8,2	34 / 5,9
			B	32 / 7,4	34 / 8,7	34 / 6,3
			C	33 / 8,7	34 / 8,9	34 / 6,4
4-12-4-6-4	-	-	A	33 / 7,7	36 / 9,3	35 / 6,0
			B	33 / 8,5	36 / 8,4	35 / 6,4
			C	33 / 8,1	36 / 8,9	35 / 6,0
6-6-4-6-4	35	26	A	36 / 9,1		
			B			
			C	36 / 9,9		
6-12-4-6-4	-	32	A	38 / 5,5	38 / 5,2	38 / 5,3
			B			
			C	39 / 6,8	40 / 6,9	39 / 5,8
8-6-4-6-4	40	28	A	36 / 7,8	38 / 5,5	38 / 4,0
			B	36 / 7,7	38 / 5,8	38 / 4,0
			C	37 / 9,5	40 / 7,9	39 / 5,1
8-12-4-6-4	-	34	A	38 / 5,1	39 / 4,8	38 / 4,9
			B	38 / 5,0	39 / 4,9	39 / 5,1
			C	40 / 6,2	41 / 6,9	40 / 5,8
4/2/4-6-4-6-4	42	30	A	38 / 9,1	39 / 5,4	39 / 5,8
			B			
			C	39 / 10,1	41 / 7,6	41 / 6,9
4/2/4-12-4-6-4	-	36	A	40 / 5,1	40 / 6,6	39 / 7,1
			B	40 / 4,4	41 / 6,8	39 / 5,9
			C	42 / 7,0	43 / 8,6	41 / 8,5

Terminologi vedrørende termoruder: se tabel 5.1.

A: Uden tape over karm/ramme-fuge

B: Tape over karm/ramme-fuge indvendigt

C: Tape over karm/ramme-fuge indvendigt + udvendigt

Tabel 5.2 Oversigt over målt R_w/Δ_{max} for 3-lags termoruder i oplukkeligt vindue (vendevindue med ét tætningsplan).

R_w-værdier med 1 decimal findes i tabel 5.4.



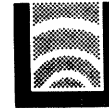
TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	R _w * (1 dec.) [dB]			
			HULRUMSFYLDNINGER I RUDE			
			GG	GL	LG	LL
4-6-4-6-4	30	24	30,4	32,9		32,2
4-9-4-9-4	-	30	31,9	34,0		31,6
4-12-4-6-4	-	-	32,0	35,8	32,6	32,5
4-12-4-12-4	-	36	32,6	35,0		32,3
6-6-4-6-4	35	26	34,7	37,0		36,0
6-9-4-9-4	-	32	**			35,5
6-12-4-6-4	-	-	37,2	38,3		36,8
8-6-4-6-4	40	28	36,1	38,3	37,4	37,0
8-9-4-9-4	-	34	37,0	38,8		37,3
8-12-4-6-4	-	-	38,8	39,8	38,5	38,7
8-12-4-12-4	-	40	38,9	39,9	39,5	39,0
8-20-4-6-4	-	42	41,0	41,3		40,4
4/2/4-6-4-6-4	42	30	36,7	40,5		38,6
4/2/4-9-4-9-4	-	36	38,1			38,7
4/2/4-12-4-6-4	-	-	40,7	42,0		40,2
4/2/4-12-4-12-4	-	42	41,3	41,5		40,5
4/2/4-20-4-6-4	-	44	43,3	42,8		42,2

Terminologi vedrørende termoruder: se tabel 5.1.

* Ifølge DS 2186.3-1982 (ISO 717/3-1982) er R_w-værdien defineret som et helt tal. Decimalværdier er angivet for at muliggøre bedre sammenligninger mellem målinger.

** Planlagt måling mangler.

Tabel 5.3 Oversigt over målt R_w (decimalværdier) for 3-lags termoruder i fast karm.



TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	KARM/ RAMME- FUGE	R _w * (1 dec.) [dB]		
				HULRUMSFYLDNINGER I RUDE		
				GG	GL	LL
4-6-4-6-4	30	24	A	31,6	34,5	33,7
			B	31,8	34,5	33,9
			C	31,6	34,5	34,0
4-9-4-9-4	-	30	A	33,2	34,8	34,2
			B	32,8	34,7	34,3
			C	33,0	34,7	34,2
4-12-4-6-4	-	-	A	33,8	36,2	35,5
			B	33,7	36,6	35,7
			C	33,5	36,8	35,6
6-6-4-6-4	35	26	A	36,2		
			B			
			C	36,7		
6-12-4-6-4	-	32	A	38,5	38,9	38,6
			B			
			C	39,7	40,3	39,7
8-6-4-6-4	40	28	A	36,8	38,6	38,3
			B	36,9	38,8	38,6
			C	37,9	40,1	39,8
8-12-4-6-4	-	34	A	38,4	39,5	38,6
			B	38,6	39,8	39,1
			C	40,1	41,5	40,2
4/2/4-6-4-6-4	42	30	A	38,4	39,4	39,3
			B			
			C	39,5	41,0	41,1
4/2/4-12-4-6-4	-	36	A	40,0	40,4	39,3
			B	40,7	41,0	39,8
			C	42,4	43,0	41,2

Terminologi vedrørende termoruder: se tabel 5.1.

A: Uden tape over karm/ramme-fuge

B: Tape over karm/ramme-fuge indvendigt

C: Tape over karm/ramme-fuge indvendigt + udvendigt

* Ifølge DS 2186.3-1982 (ISO 717/3-1982) er R_w-værdien defineret som et helt tal. Decimalværdier er angivet for at muliggøre bedre sammenligninger mellem målinger.

Tabel 5.4 Oversigt over målt R_w (decimalværdier) for 3-lags termoruder i oplukkeligt vindue (vendevindue med ét tættningsplan).



5.3 Glastykkelser

Almindelige "varmeisoleringsruder" er opbygget af glaslag i samme tykkelse, normalt 3 eller 4 mm, afhængigt af rudens størrelse. Til termoruder med et areal på mere end ca. 3 m² anvendes dog tykkere glas for at opnå tilstrækkelig styrke mod f.eks. vindbelastning.

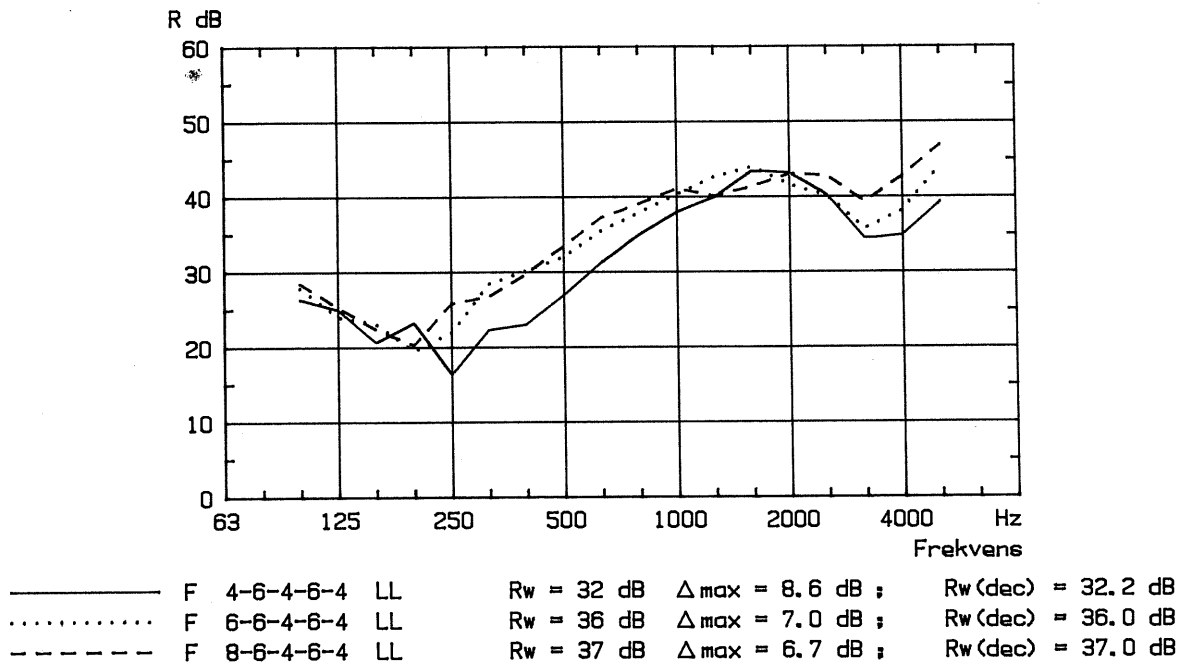
Symmetriske ruder af 3-4 mm glas har en relativt dårlig lydisolations. Dette skyldes dels at ruden er let, dels at symmetrien i glastykkelser medfører særligt dybe resonans- og koincidensdyk. De fuldt optrukne kurver på figur 5.1-5.4 er eksempler på reduktionstalskurver for 3-lags termoruder af 4 mm glas. Disse dybe dyk er også karakteristiske for symmetriske ruder med tykkere glas. Hvis tykke glas er nødvendige pga. rudens størrelse, bør der i stedet anvendes mindre ruder eller alternativt ruder af laminater, der helst skal have forskellige tykkelser.

Med udgangspunkt i en typisk 3-lags termorude af 3 lag 4 mm glas fås en væsentlig forbedret lydisolations ved blot en lille forøgelse af tykkelsen af det ene udvendige glaslag. Der er udført målinger på følgende glaskombinationer:

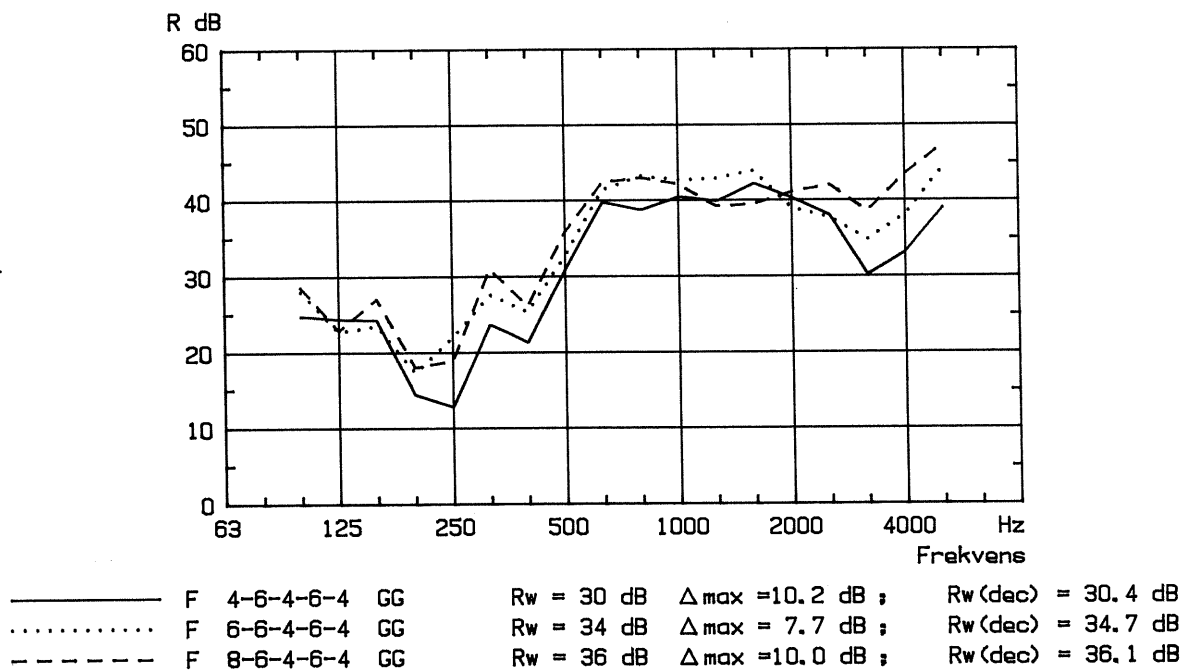
- 4 + 4 + 4 mm glas, totalvægt 30 kg/m²
- 6 + 4 + 4 mm glas, totalvægt 35 kg/m²
- 8 + 4 + 4 mm glas, totalvægt 40 kg/m²

På figur 5.1 og 5.2 er vist resultatsammenstillinger for henholdsvis luft- og gasfyldte ruder med 6 + 6 mm hulrum. På figur 5.3 og 5.4 er vist resultater for de tilsvarende ruder, blot med 12 + 6 mm hulrum. Alle ruderne var monteret i en fast karm.

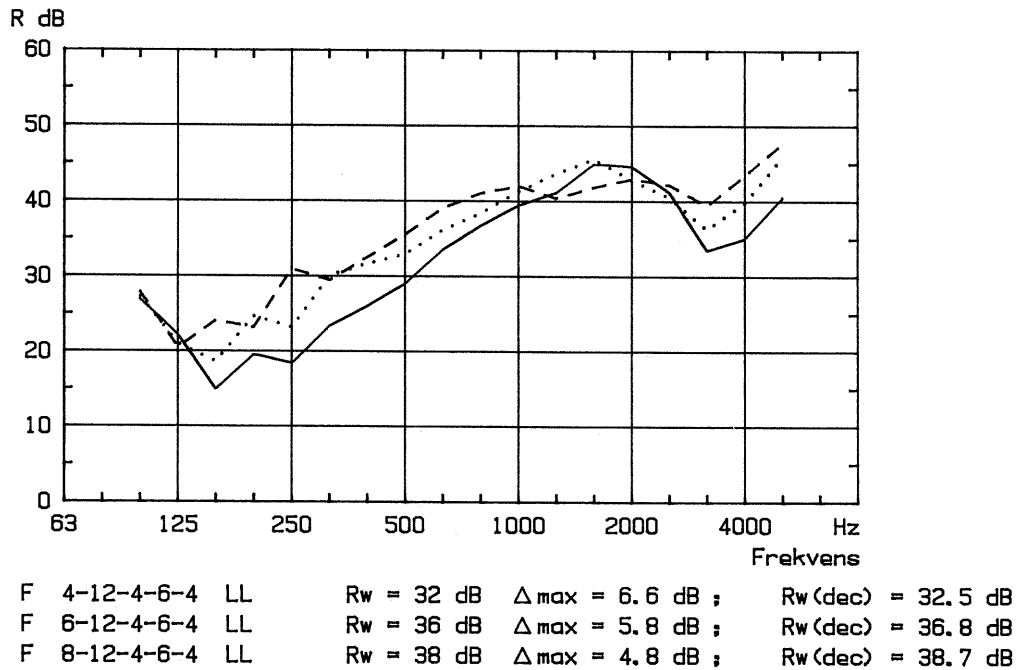
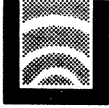
Kurveforløbene er ved de lave frekvenser præget af bl.a. ruderens resonansdyk, og ved de høje frekvenser er der dyk eller tendenser til dyk omkring koincidensfrekvenserne 1500, 2000 og 3000 Hz for hhv. 8, 6 og 4 mm glas. I mellemfrekvensområdet afhænger reduktionstalskurvernes forløb af hulrumsfyldningen. For de luftfyldte ruder ses den øvre resonansfrekvens ikke, hvori- mod der er tydelige dyk eller udfladninger i kurverne for de gasfyldte ruder.



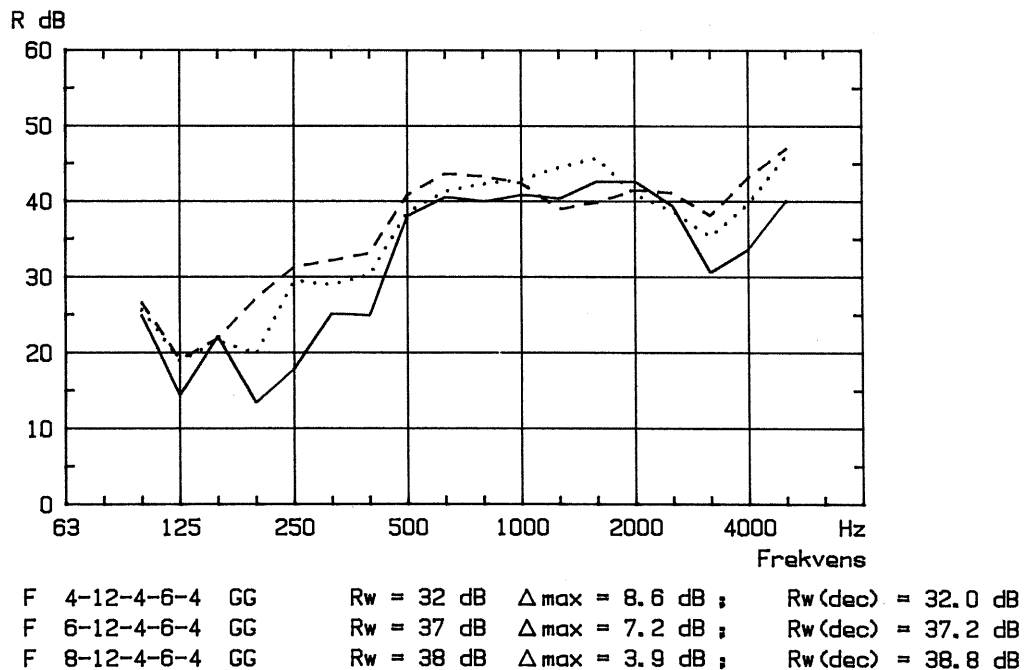
Figur 5.1 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termoruder af 2 lag 4 mm glas og ét lag glas i tykkelsen 4, 6 eller 8 mm.
Hulrum: 6 + 6 mm med atm. luft.



Figur 5.2 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termoruder af 2 lag 4 mm glas og ét lag glas i tykkelsen 4, 6 eller 8 mm.
Hulrum: 6 + 6 mm med SF₆.



Figur 5.3 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termoruder af 2 lag 4 mm glas og ét lag glas i tykkelsen 4, 6 eller 8 mm.
Hulrum: 12 + 6 mm med atm. luft.



Figur 5.4 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termoruder af 2 lag 4 mm glas og ét lag glas i tykkelsen 4, 6 eller 8 mm.
Hulrum: 12 + 6 mm med SF₆.



En sammenligning af R_w -værdierne viser, at:

- R_w -værdien vokser ca. 4 dB, når glastykkelserne ændres fra 4 + 4 + 4 mm til 6 + 4 + 4 mm
- R_w -værdien vokser yderligere ca. 1 dB når glastykkelserne ændres til 8 + 4 + 4 mm

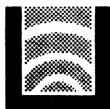
Forbedringerne af R_w -værdierne skyldes især højere reduktions-tal i frekvensområdet 200-800 Hz. De nævnte konklusioner bekræftes af måleresultater for samme glaskombinationer med andre hulrum.

Når der for en "almindelig" 3-lags termorude ønskes en noget forhøjet lydisolation med kun små meromkostninger kan det altså stærkt anbefales at forøge tykkelsen af det ene glas med 2 mm. En yderligere forøgelse af tykkelsen for det pågældende glas giver kun lidt ekstra, men der opnås dog systematisk bedre resultater. Disse sammenligninger viser, at den forhøjede lydisolation primært skyldes glassenes asymmetri og kun sekundært vægtforøgelsen. Der kan således også forventes relativt gode resultater for en 3-lags termorude af 6 + 3 + 3 mm glas, som vil kunne anvendes i nogle tilfælde, hvor tungere/tykkere ruder ikke er brugbare.

5.4 Laminering

Lamineringens betydning for lydisolationen er undersøgt ved målinger på termoruder af 8 + 4 + 4 mm glas med og uden laminering af det tykke glas. Det har primært interesse at kende lamineringens maksimale effekt, og der er kun undersøgt laminering med blød acryl, som er mest effektivt. Der er valgt en lagtykkelse på 2 mm, da tykkere acryllag sjældent anvendes.

På figur 5.5-5.7 er vist nogle typiske eksempler på lamineringens indflydelse på reduktionstalskurvernes forløb. Koincidensfrekvensen for 8 mm glas er ca. 1500 Hz, og der fås en tydelig effekt af lamineringen ved frekvenser over ca. 1250 Hz. Ved disse frekvenser fås et 3-7 dB højere reduktionstal for de la-

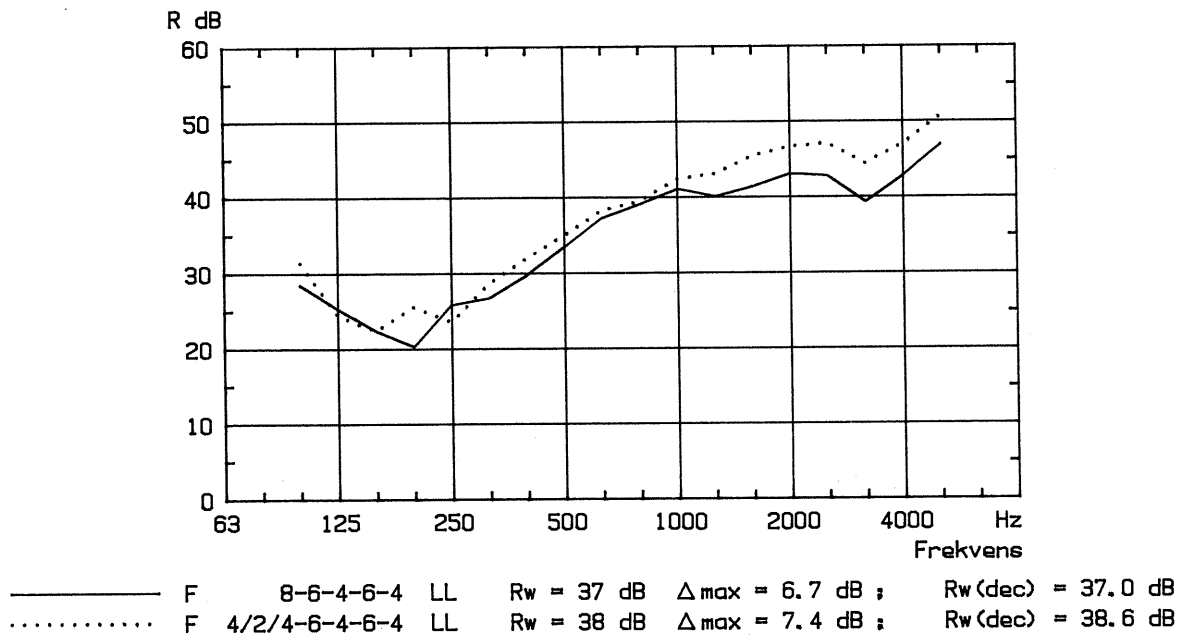
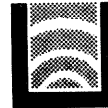


minerede ruder. Ved de lave frekvenser er der enten ingen ændringer eller usystematiske ændringer, og lamineringen kan ikke på det foreliggende grundlag (20 sammenligninger) tillægges væsentlig betydning for reduktionstallet ved de lave frekvenser. Ved sammenligninger skal det også tages i betragtning, at det laminerede og ulaminerede glas har lidt forskellig vægt, hvilket kan give anledning til en lille forskydning af resonansdyk, og at produktforskelle (f.eks. forskelle i gasfyldningsgrad) kan influere på måleresultaterne.

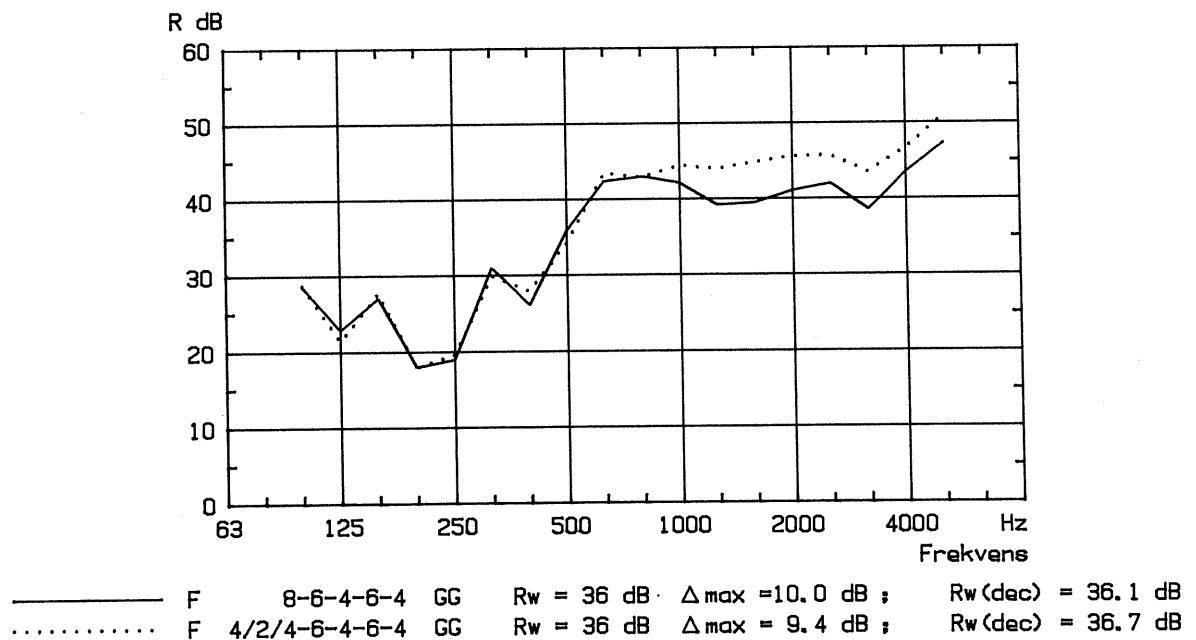
Sammenligninger af R_w -værdier viser, at der med laminering typisk opnås en 2 dB højere R_w -værdi, men at væksten i R_w -værdi er afhængig af rudetypen og varierer mellem 0 og 3 dB. På figur 5.5 og 5.6 er vist reduktionstalskurven for hhv. luft- og gasfyldte ruder med 6 + 6 mm hulrum. R_w -værdien for den gasfyldte rude er bestemt af måleresultaterne ved de lavere frekvenser og derfor fås ikke en højere R_w -værdi, selv om reduktionstallet ved de høje frekvenser forbedres. På figur 5.7 og 5.8 er vist resultater for tilsvarende ruder, blot med større hulrum.

Lamineringsmaterialer af PVB-folie fås i tykkelsen 0,38, 0,76 og 1,14 mm. Folielaminater er tyndere og billigere end lamina-ter med blød acryl, men også mindre effektive ifølge erfaringer fra [1] og fra rekvirerede målinger. Laminering med blød acryl kan udføres med valgfrie lagtykkelser fra ca. 2 mm til ca. 6 mm. Der er altså flere valgmuligheder, men normalt også en forlænget leveringstid, da laminaterne leveres i den aktuelle størrelse og ikke kan tilskæres hos termorudeproducenten.

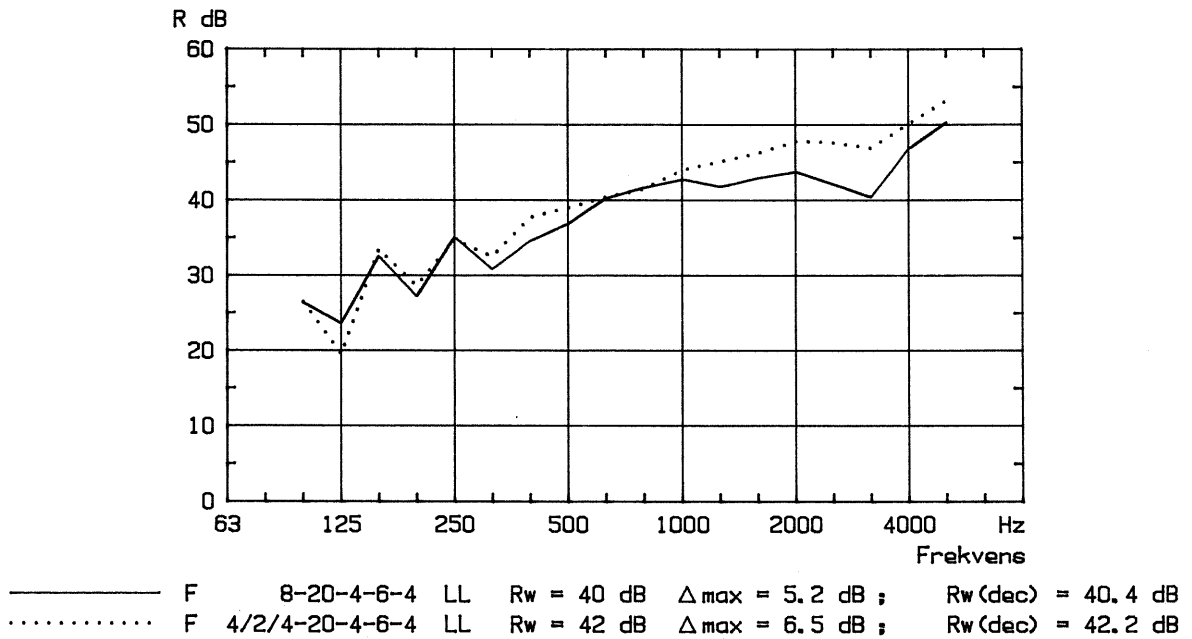
Sammenfattende kan det konstateres, at lamineringens indflydelse på lydisolationen, dvs. R_w -værdien, er afhængig af rudetypen. Laminering kan dog betragtes som et sikkert middel til at opnå en vis yderligere forbedring af R_w -værdien, når ruden i forvejen har en optimal opbygning.



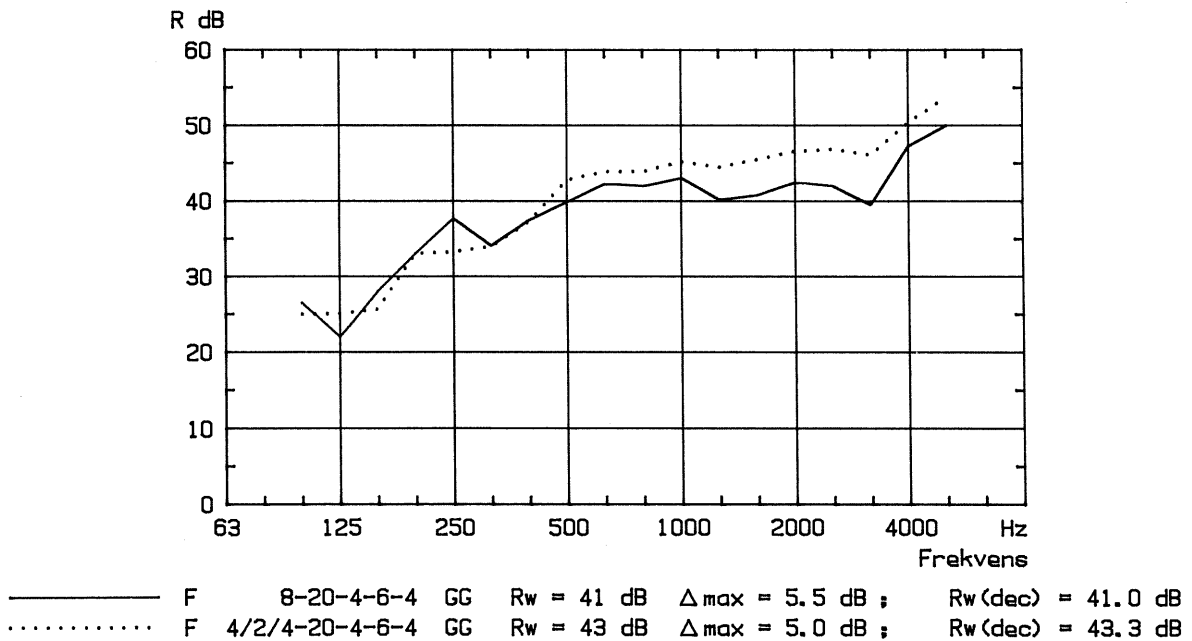
Figur 5.5 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude med og uden laminering af det ene glas.
Hulrum: 6 + 6 mm med atm. luft.



Figur 5.6 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude med og uden laminering af det ene glas.
Hulrum: 6 + 6 mm med SF₆.



Figur 5.7 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude med og uden laminering af det ene glas.
Hulrum: 20 + 6 mm med atm. luft.



Figur 5.8 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude med og uden laminering af det ene glas.
Hulrum: 20 + 6 mm med SF₆.



5.5 Glasmellemrum (hulrumsdybder)

I forsøgsplanen (tabel 4.2) indgår 3-lags termoruder med følgende kombinationer af hulrumsdybder:

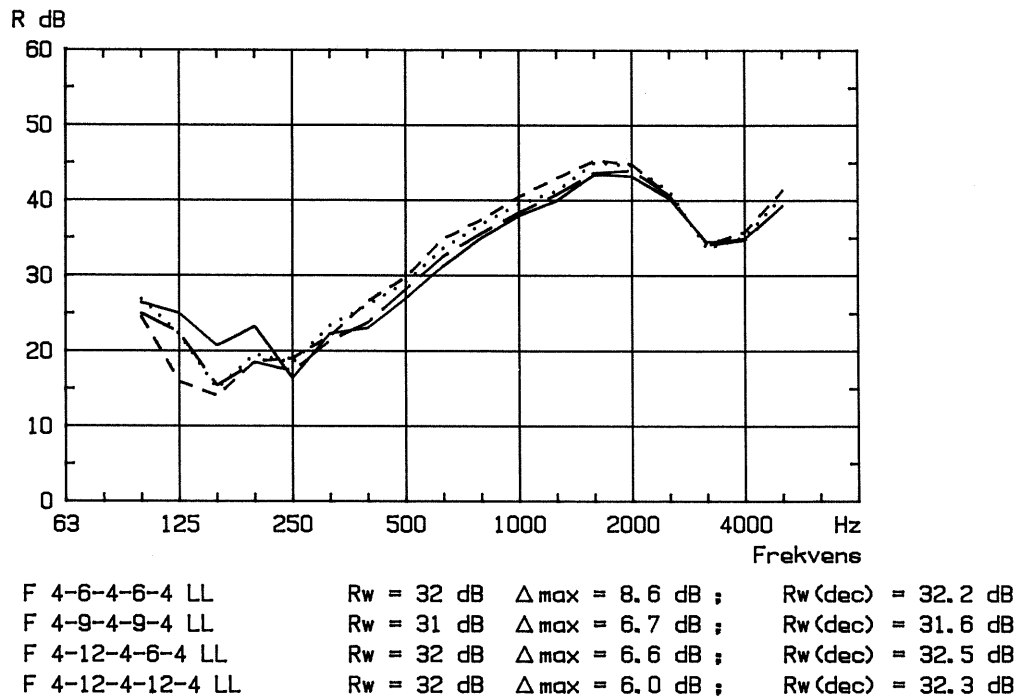
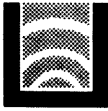
- 6 + 6 mm $\Sigma d = 12$ mm
- 9 + 9 mm $\Sigma d = 18$ mm
- 12 + 6 mm $\Sigma d = 18$ mm
- 12 + 12 mm $\Sigma d = 24$ mm
- 20 + 6 mm $\Sigma d = 26$ mm

De 3 af kombinationerne er symmetriske, og de 2 øvrige er asymmetriske med en samlet dybde, der nogenlunde svarer til en symmetrisk kombination. De nævnte kombinationer af hulrum er ikke afprøvet for alle kombinationerne af glas og hulrumsfyldning.

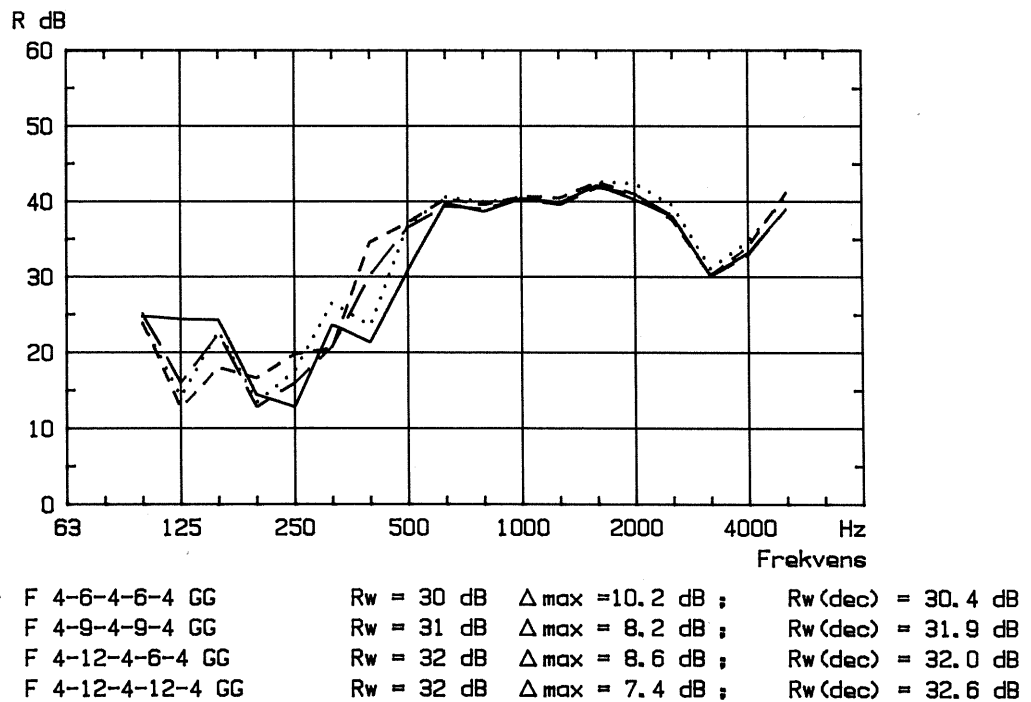
På figur 5.9 og 5.10 er vist sammenligninger af 4 forskellige kombinationer af hulrum i hhv. luft- og gasfyldte termoruder med symmetriske glastykker. For de gasfyldte ruder fås voksende R_w -værdier med voksende hulrumsdybder, men for de luftfyldte ruder er der kun beskedne forskelle. Asymmetri i hulrumsdybderne synes ikke at give en forbedret lydisolations.

Sammenligninger af alle de 5 undersøgte kombinationer af hulrum er vist på figur 5.11 og 5.12. Ruderne har asymmetriske glas og har således forlods bedre muligheder for at nå op på en høj lydisolations. Sammenlignet med ruder af symmetriske glas fås en noget større afhængighed af hulrumsdybderne, men denne afhængighed er dog stadig mest udpræget for de gasfyldte ruder. Spredningen i R_w -værdierne for de 5 ruder med asymmetrisk glas er således 4 dB for de luftfyldte ruder og 7 dB for de gasfyldte ruder. Måleresultaterne viser endvidere, at der for ruder med asymmetriske glas opnås bedst lydisolations, når hulrumsdybderne er asymmetriske.

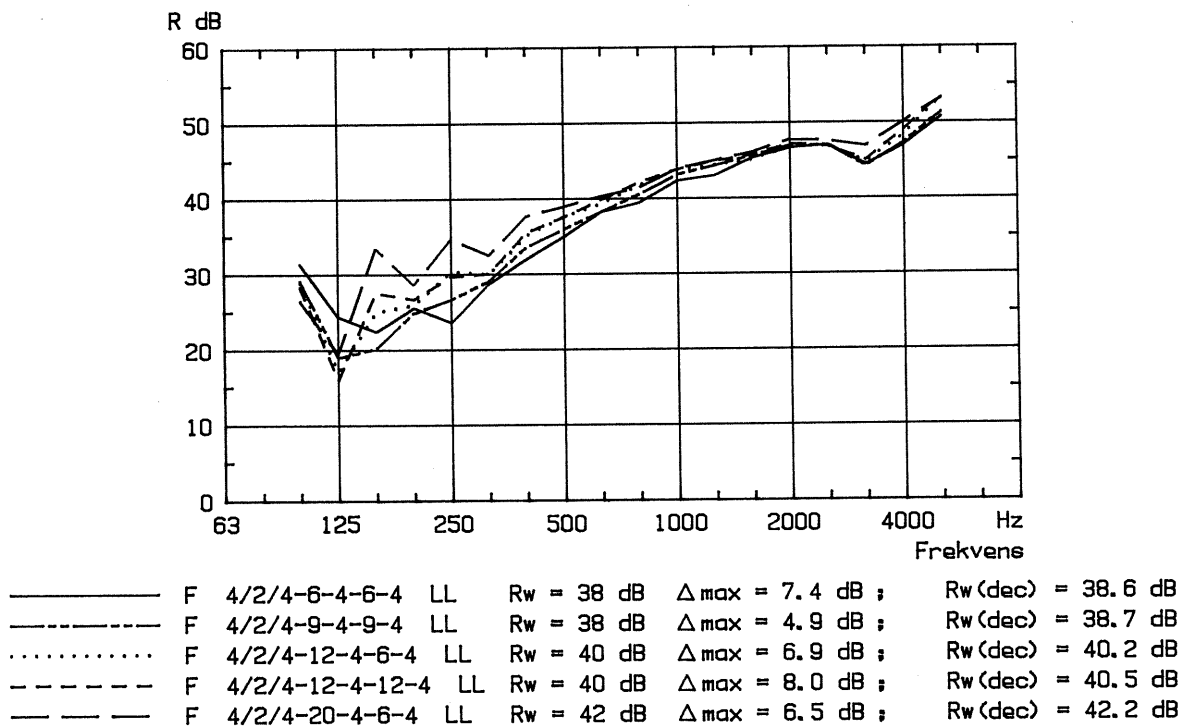
Såfremt der anvendes forskellige fyldninger i termorudens to hulrum fås også stigende lydisolations med stigende hulrumsdybder, især når det gasfyldte hulrum øges. Asymmetri i hulrumsdybder er fordelagtig, hvis den opnås ved at øge det gasfyldte hulrum og mindske det luftfyldte.



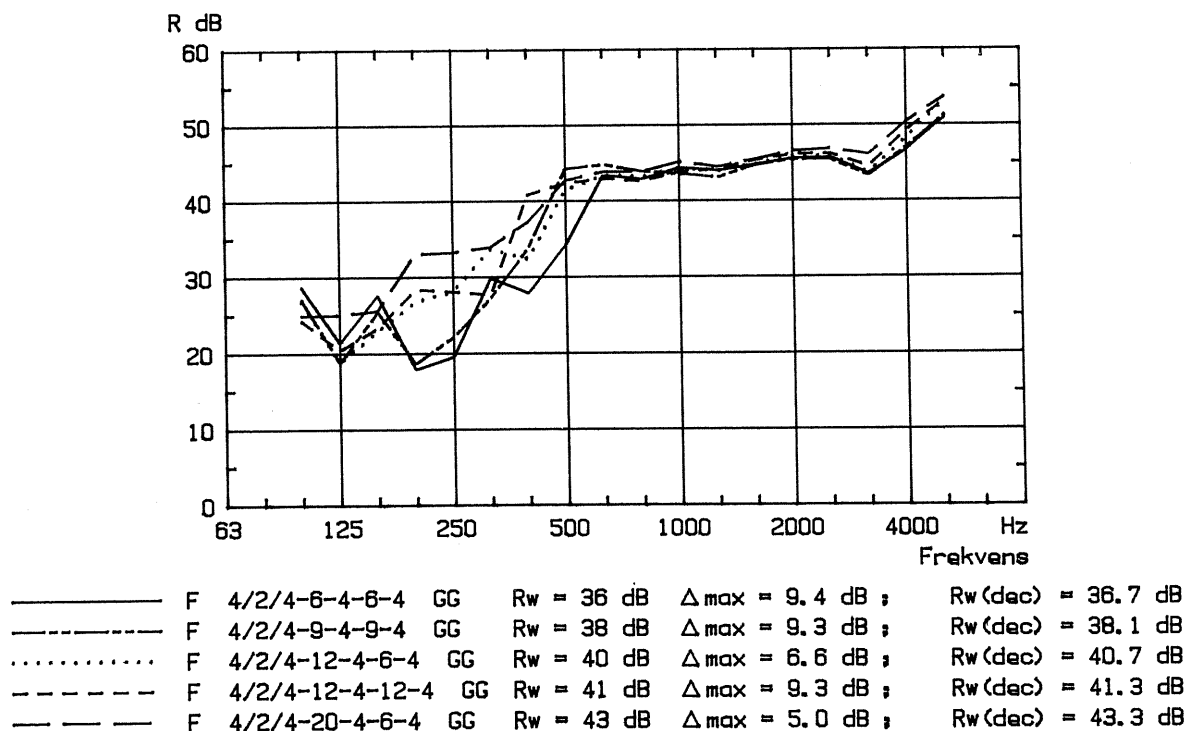
Figur 5.9 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for luftfyldte, 3-lags termoruder af 4 mm glas med forskellige kombinationer af hulrumdybder.



Figur 5.10 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for gasfyldte, 3-lags termoruder af 4 mm glas med forskellige kombinationer af hulrumdybder.



Figur 5.11 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for luftfyldte, 3-lags termoruder, alle med samme asymmetriske glaskombination, men med forskellige kombinationer af hulrumdybder.



Figur 5.12 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for gasfyldte, 3-lags termoruder, alle med samme asymmetriske glaskombination, men med forskellige kombinationer af hulrumdybder.



Generelt viser måleresultaterne en systematisk, men kompliceret sammenhæng mellem hulrumdybder og kurveforløb. For alle rude typer optræder de væsentlige forskelle ved frekvenser under ca. 500 Hz. På grund af vekselvirkningen med bl.a. hulrumfyldningen kan hulrumdybdernes betydning desværre ikke udtrykkes helt enkelt. I afsnit 5.6 er der vist eksempler på gasfyldningens betydning for ruder med forskellige hulrumdybder.

5.6 Gasfyldning

En termorude har forseglede hulrum, som almindeligvis indeholder atm. luft. Med henblik på at opnå en forbedret varme- eller lydisolation kan den indeholde en anden luftart ("gasfyldning"), der i så fald er påfyldt under den sidste del af produktionsprocessen. I 3-lags termoruder anvendes normalt samme type fyldning i begge hulrum. Gasfyldningens egenskaber er nærmere omtalt i rapport 113 ([1], afsnit 4.9, 6.8 og 6.9).

Ved undersøgelsen af 3-lags termoruder er der udført målinger på ruder med SF₆ og/eller atm. luft i de to hulrum, jvf. afsnit 4.2, men der er ikke undersøgt gasblandinger. I det følgende benyttes "gas" som synonym for SF₆.

Hulrumfyldningens indflydelse på lydisolationen er illustreret på figur 5.13-5.20. På hvert diagram er vist 3 eller 4 reduktionstalskurver for "samme" rude med forskellige kombinationer af fyldninger: GG, GL, LL og evt. LG. Såfremt LG er målt, er rudetyper leveret i 2 eksemplarer, og GG + GL-målingerne er udført på det ene eksemplar, mens LG + LL-målingerne er udført på det andet eksemplar. I disse tilfælde kan der forekomme produktforskelle, jvf. afsnit 4.7. Hvor der kun er vist resultater for GG, GL og LL, er alle 3 målinger udført på den samme rude.

De afbildede måleresultater viser, at gasfyldning primært har betydning for reduktionstallet i frekvensområdet under 1000 Hz.

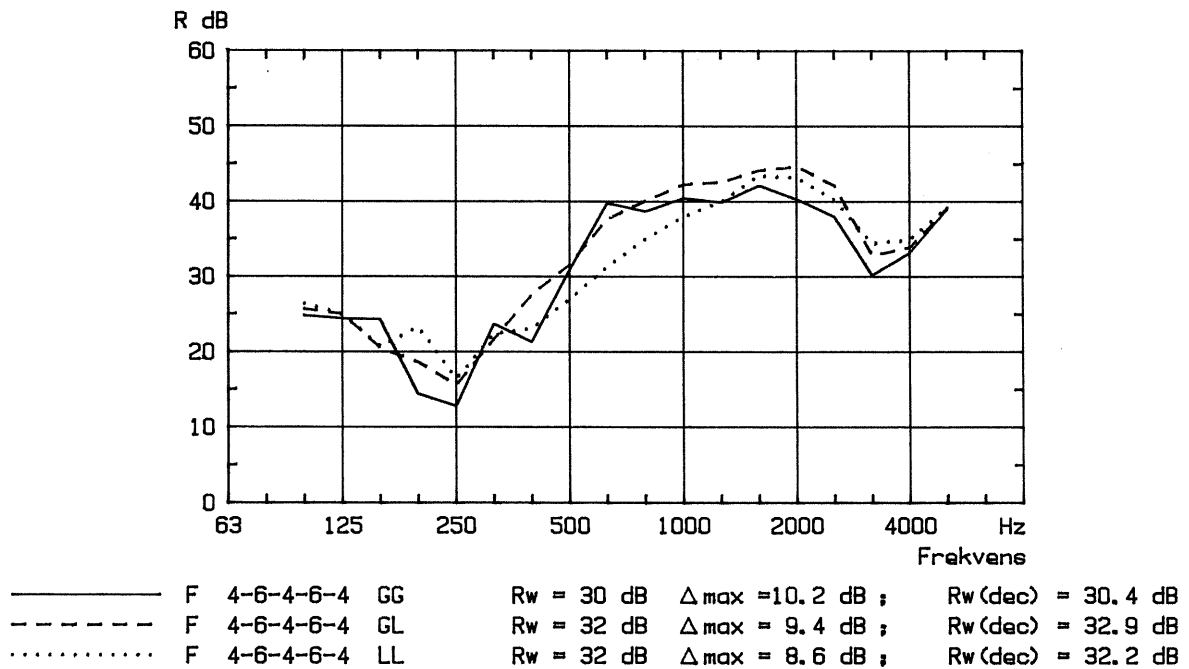


På figur 5.13 og 5.14 er vist resultater for 3-lags ruder, hvor både glastykkelser og hulrumsdybder er symmetriske. Alle glas er 4 mm tykke, og hulrumsdybderne er hhv. 6 + 6 mm og 12 + 12 mm. Det skal bemærkes, at LG er identisk med GL for disse ruder pga. symmetrien i rudernes opbygning. På figur 5.15 og 5.16 er vist tilsvarende måleresultater, blot for ruder af 8 + 4 + 4 mm glas. Ved betragtning af måleresultaterne på de 4 figurer 5.13-5.16 ses, at der ikke fås en forbedret R_w -værdi ved gasfyldning i begge hulrum, og når hulrummene er små, fås endog en forringelse. Derimod er der for alle ruderne en gevinst ved at benytte gasfyldning i ét hulrum.

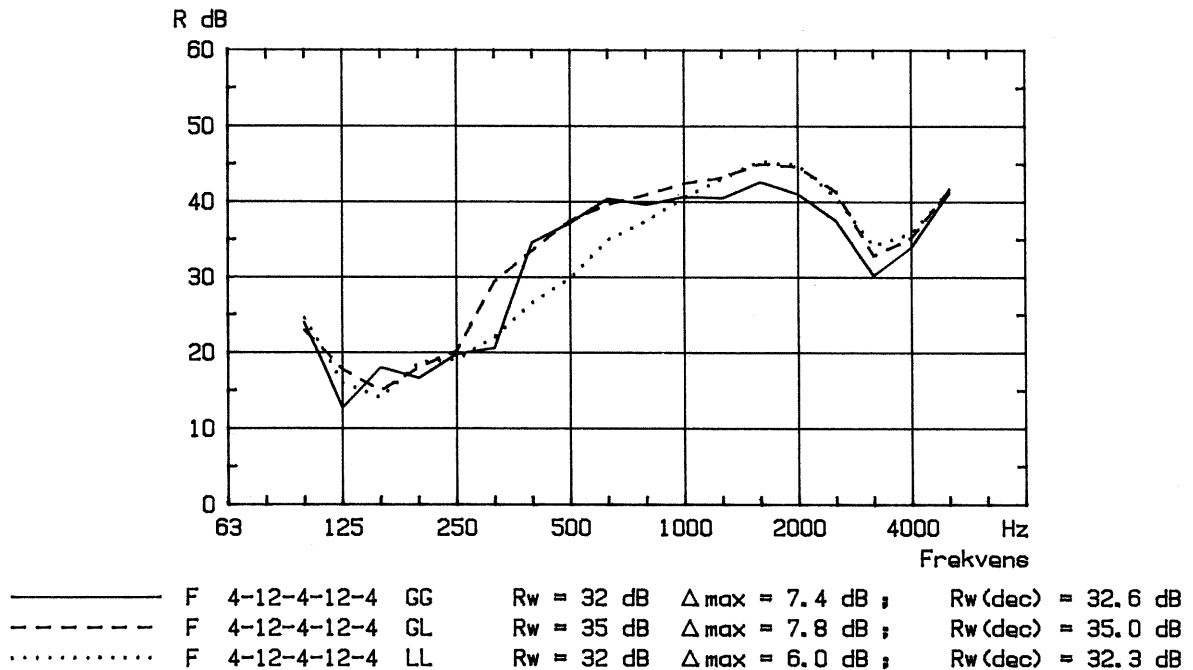
Måleresultater for 3-lags ruder med asymmetriske hulrumsdybder er vist på figur 5.17 og 5.18 for termoruder af hhv. 4 + 4 + 4 mm glas og 8 + 4 + 4 mm glas. Som før fås bedst lydisolations med gasfyldning i ét hulrum, og det skal bemærkes, at "rækkefølgen" af fyldninger ikke er ligegyldig. Gasfyldning i det store hulrum giver bedst lydisolations.

På figur 5.19 og 5.20 er afbildet måleresultater for laminerede ruder med hhv. 6 + 6 mm hulrum og 20 + 6 mm hulrum. Med små gasfyldte hulrum, se figur 5.19, fås dybe resonansdyk i analogi med resultaterne afbildet på figur 5.13 og 5.15. Der kan faktisk fås en 4 dB højere R_w -værdi ved kun at benytte gasfyldning i ét hulrum. På figur 5.20 er vist reduktionstalskurver for ruder med en totaltykkelse på 44 mm. For disse ruder opnås en høj lydisolations uanset valget af hulrumsfyldninger.

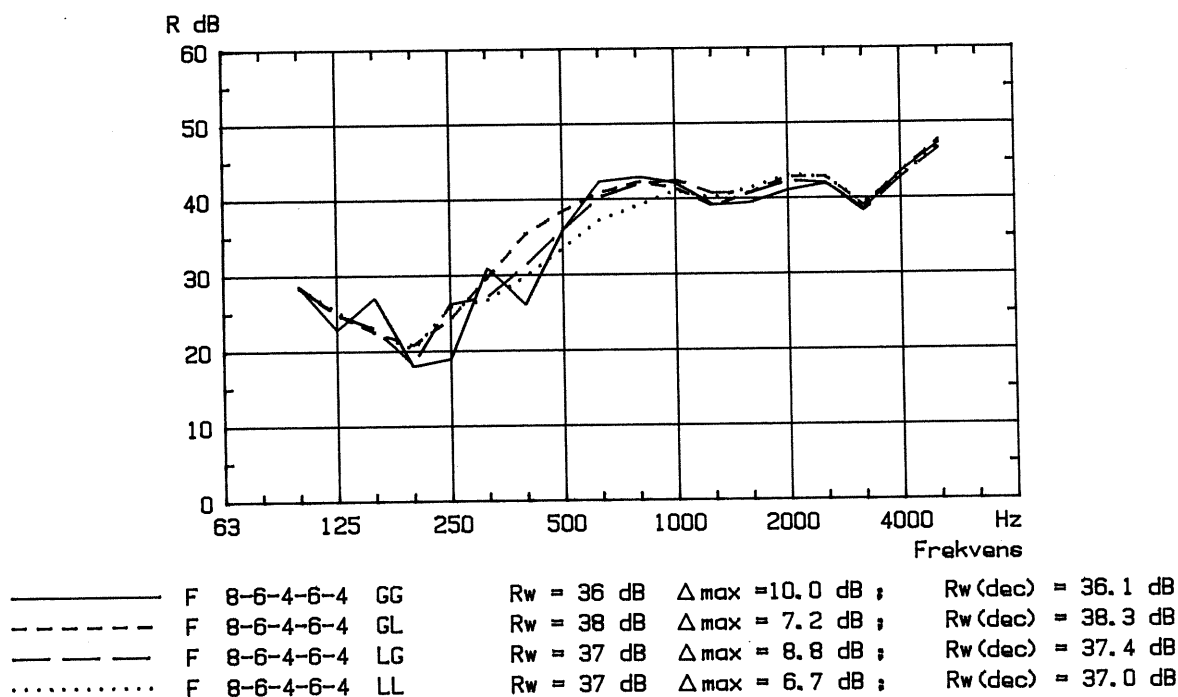
En samlet vurdering af R_w -værdier for alle målinger viser, at gasfyldning i begge hulrum kun i ganske enkelte tilfælde medfører en forbedring af lydisolations, f.eks. når ruden har mindst et stort hulrum (over 12 mm). Når termorudens hulrum er små, fås endda en forringelse af lydisolations ved gasfyldning. Dette er uheldigt eftersom gasfyldning især benyttes i små hulrum aht. varmeisolations.



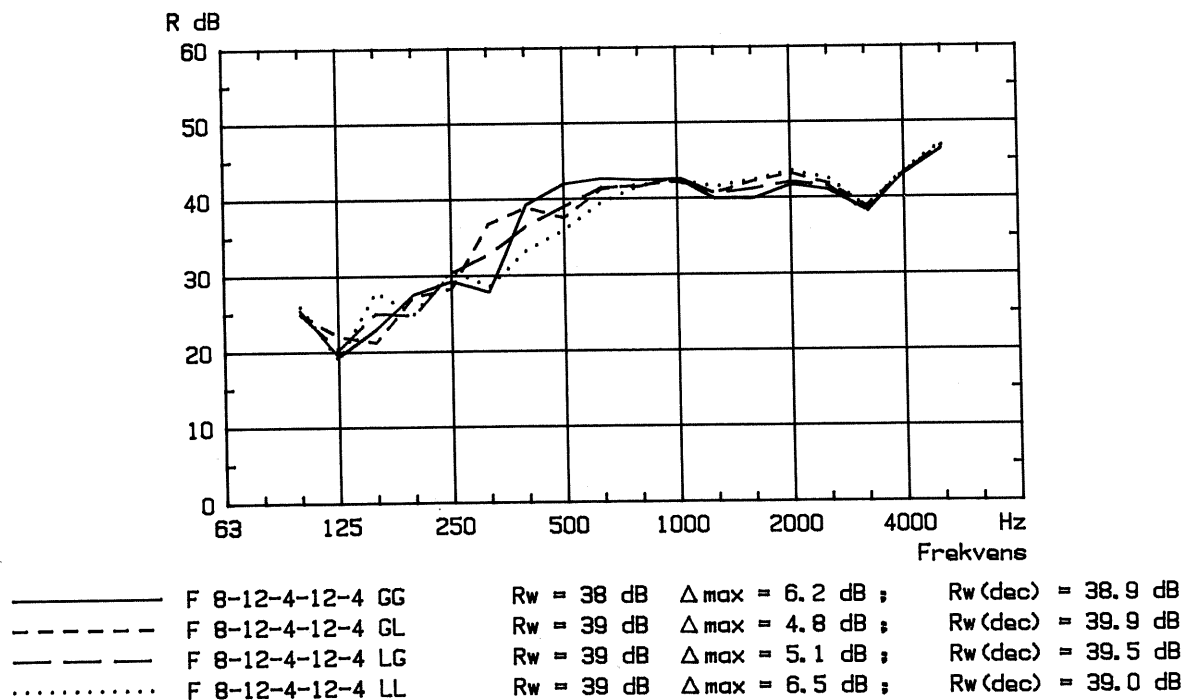
Figur 5.13 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 4-6-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



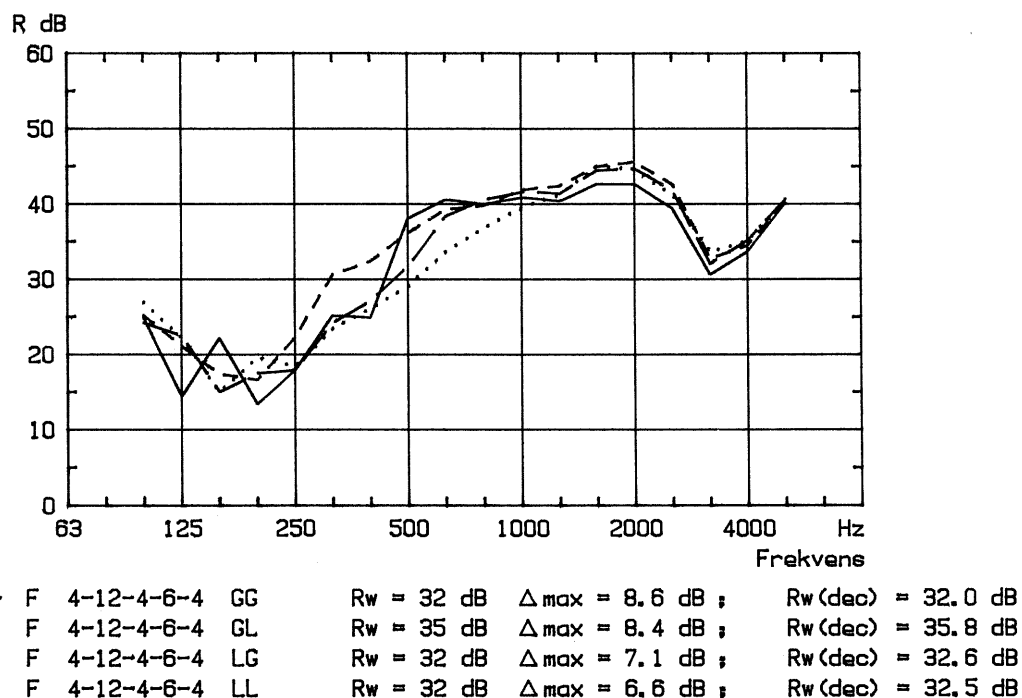
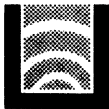
Figur 5.14 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 4-12-4-12-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



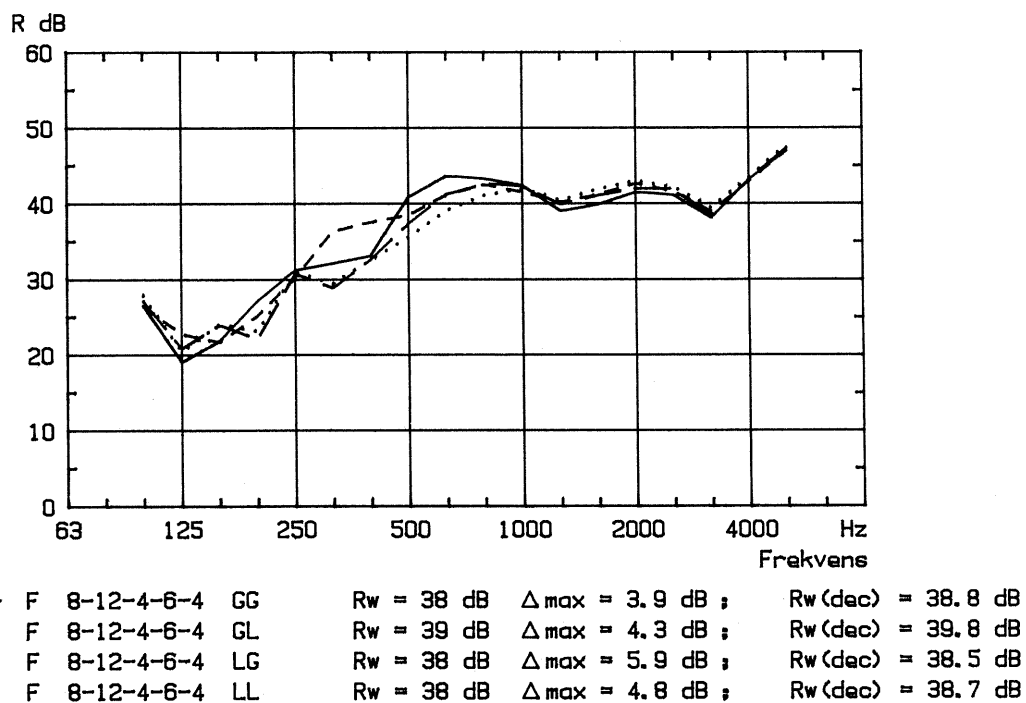
Figur 5.15 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 8-6-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



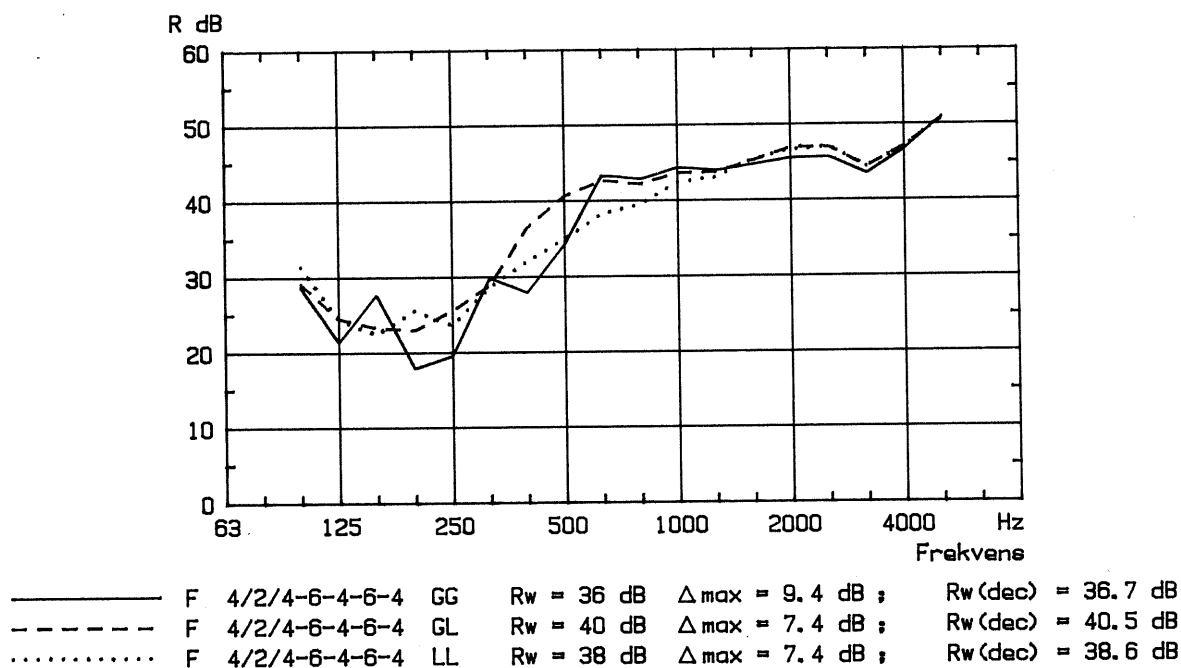
Figur 5.16 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 8-12-4-12-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



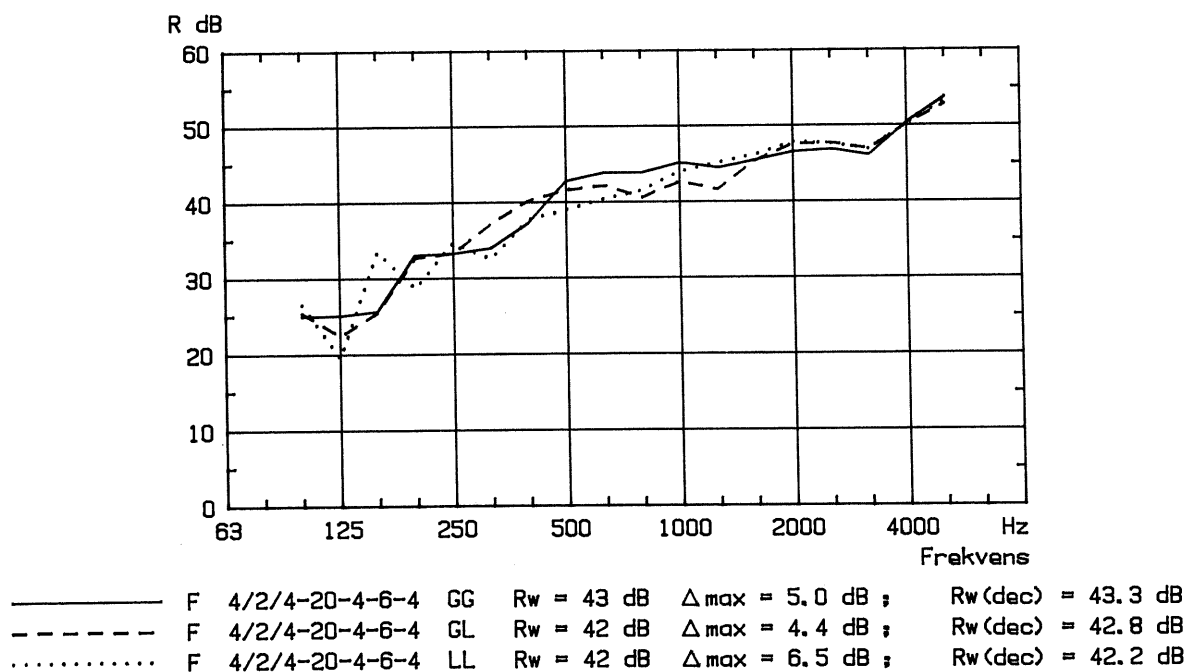
Figur 5.17 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 4-12-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumsfyldninger.



Figur 5.18 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 8-12-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumsfyldninger.



Figur 5.19 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude 4/2/4-6-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



Figur 5.20 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termorude 4/2/4-20-4-6-4 med forskellige kombinationer af hulrumfyldninger.



Et vigtigt resultat af undersøgelsen er, at gasfyldning i ét hulrum og atm. luft i det andet hulrum medfører højere lydisolering end med ens fyldninger i de to hulrum. Der er konstateret forskelle på indtil 4 dB, men forbedringer i lydisoleringen afhænger i høj grad af rudetypen.

For termoruder med typiske hulrumsdybder bør hulrumsfyldningerne vælges med omhu. Til tider ses gasfyldning anbefalet som et middel til at forhøje lydisoleringen, men resultatet kan i nogle tilfælde være modsat. For 3-lags termoruder skal man være opmærksom på, at rækkefølgen af glastykker, hulrumsdybder og hulrumsfyldninger ikke er ligegyldig.

Den eksperimentelle undersøgelse af 3-lags termoruder har ikke omfattet målinger på ruder med gasblandinger eller på ruder, hvor fyldningerne i de to hulrum var mindre forskellige end SF₆ og atm. luft. Det kan naturligvis godt tænkes, at der opnås gode resultater for andre fyldninger/blandinger end de undersøgte. Men både forsøgsteknisk og produktionsteknisk kan det være vanskeligt at opnå "sikre" resultater, hvis hulrumsfyldningernes egenskaber ikke er veldefinerede. En producent's valg af fyldninger må derfor også foretages under hensyntagen til den benyttede produktionsteknik. Det er ikke muligt at måle den faktiske fyldningsgrad i en termorude uden at ødelægge ruden. Derfor er fyldningsgraden for prøveemnerne til undersøgelsen heller ikke kendt ud over, at producenten angiver den til 95%. Med erfaringer vedr. gasfyldningens betydning for reduktionstalskurvens forløb vil forkerte eller manglende fyldninger kunne afsløres i en del, men ikke i alle tilfælde. I afsnit 4.7 er prøveemners nøjagtighed summarisk omtalt.

Ud fra undersøgelsesresultaterne og erfaringer fra andre målinger vurderes det, at hovedårsagen til, at der opnås bedst lydisolering med forskellige fyldninger i hulrummene er forskellige egensvingningsfrekvenser i termorudens to hulrum jvf. afsnit 3.5. Den kvantitative virkning er dog sandsynligvis influeret af rudens faktiske størrelse og af resonansfrekvensernes beliggenhed i frekvensområdet.



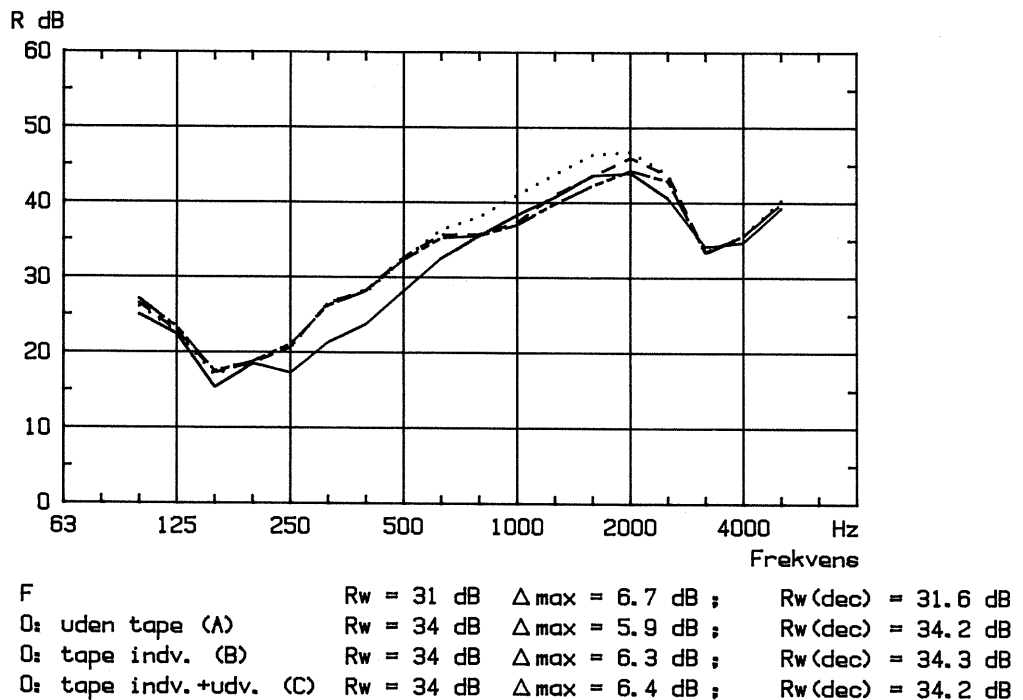
5.7 Fast karm / oplukkeligt vindue

Af forsøgsplanen i afsnit 4.3 fremgår, at en række rudetyper er målt både i en fast karm og i et oplukkeligt vindue med ét tætningsplan. På figur 5.21-5.24 er vist nogle sammenligninger af måleresultater. Det ses, at indbygningens betydning afhænger af rudetypen.

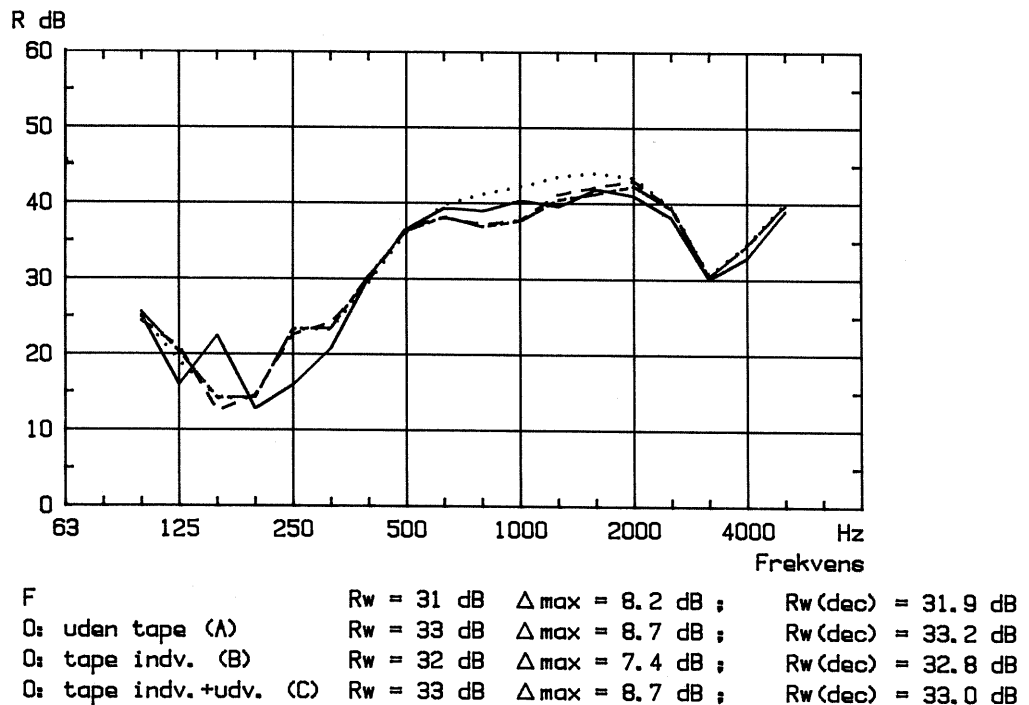
Figur 5.21-5.23 viser reduktionstalskurver for 4-9-4-9-4 termoruder med hhv. LL-, GG- og GL-fyldning. For den luftfyldte rude, figur 5.21, betyder indbygning i det oplukkelige vindue ca. 5 dB højere reduktionstal i frekvensområdet 250-630 Hz, og R_w -værdien stiger 3 dB (2,6 dB). For den gasfyldte rude, figur 5.22, fås usystematiske ændringer i frekvensområdet 125-250 Hz, og R_w -værdien stiger 2 dB (1,3 dB). For ruden med gasfyldning i det ene hulrum fås kun små ændringer, og R_w -værdien stiger 0 dB (0,8 dB). De viste tendenser er typiske for andre ruder med tilsvarende hulrumsfyldninger.

Med tape-tætning af karm/ramme-fugen indvendigt, dvs. ved tætningslisten, fås der ikke yderligere forbedringer. Det viser, at vinduets tætningsliste er effektiv. Når der tillige tættes med tape udvendigt, fås derimod en forøgelse af reduktionstallet i frekvensområdet 630-2000 Hz. Der opnås dog ikke forbedrede R_w -værdier, fordi disse er bestemt af kurveforløbene ved lavere og højere frekvenser.

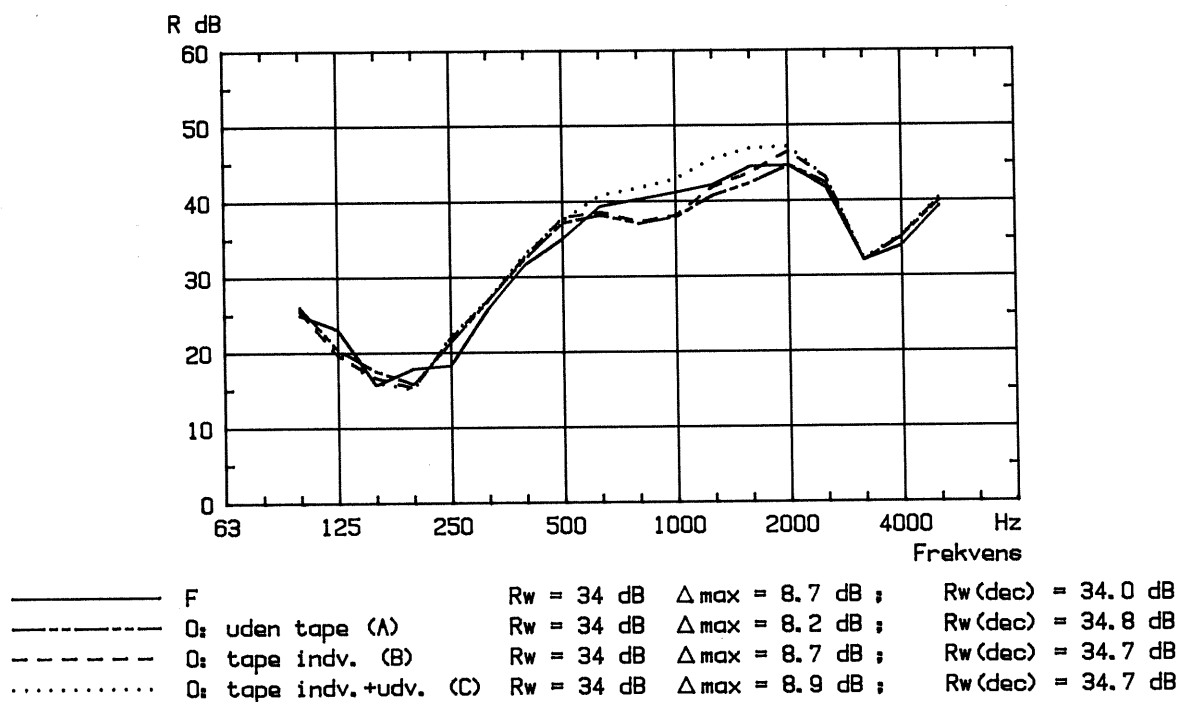
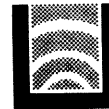
På figur 5.24 findes måleresultater for en rude med en væsentligt højere lydisolation. Det indebærer, at karm/ramme-fugens udformning og tætning er væsentlig mere kritisk. Ved indbygning af ruden i det oplukkelige vindue fås en forringet lydisolation i frekvensområdet 500-5000 Hz, og R_w -værdien forringes med 2 dB (1,6 dB) til 40 dB. Tape-tætning af fugen indvendigt medfører kun små forbedringer, mens der med tape-tætning både indvendigt og udvendigt fås $R_w = 43$ dB.



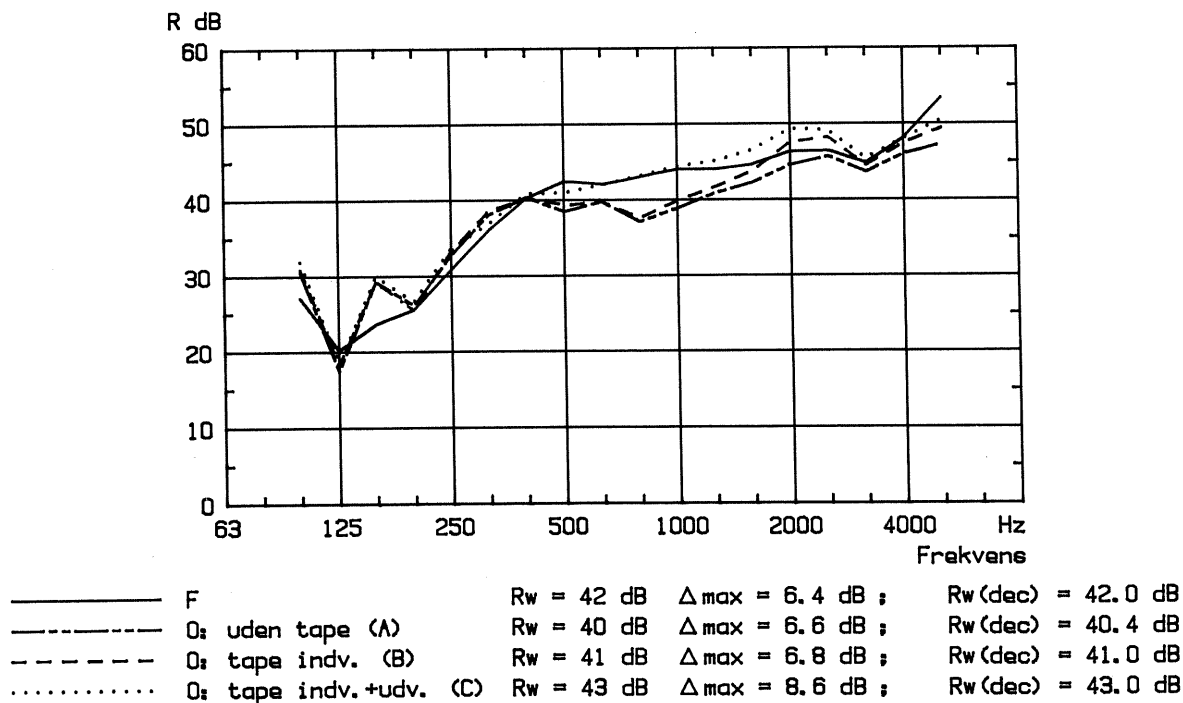
Figur 5.21 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termo-
rude 4-9-4-9-4 LL monteret i fast karm (F) hhv.
i oplukkeligt vindue (O) med og uden ekstra
tætning af karm/ramme-fuge (se figur 4.3).



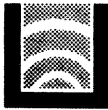
Figur 5.22 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 3-lags termo-
rude 4-9-4-9-4 GG monteret i fast karm (F) hhv.
i oplukkeligt vindue (O) med og uden ekstra
tætning af karm/ramme-fuge (se figur 4.3).



Figur 5.23 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 4-9-4-9-4 GL monteret i fast karm (F) hhv. i oplukkeligt vindue (O) med og uden ekstra tætning af karm/ramme-fuge (se figur 4.3).



Figur 5.24 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for 3-lags termorude 4/2/4-12-4-6-4 GL monteret i fast karm (F) hhv. i oplukkeligt vindue (O) med og uden ekstra tætning af karm/ramme-fuge (se figur 4.3).



Sammenfattende viser resultaterne, at karm/ramme-typens indflydelse på lydisoleringen kan skyldes karm/ramme-bredde, -materiale og -tætninger. Betydningen af karm/ramme-bredden afhænger stærkt af rudetypen. For ruder med en moderat lydisolering er karm/ramme-materialet ikke kritisk og det er tilstrækkeligt med ét effektivt tætningsplan. For ruder med en høj lydisolering er karm/ramme-profiler og -materiale samt antallet af tætningsplaner derimod af betydning for den lydisolering, der kan opnås for den samlede vindueskonstruktion. Betydningen af karm/rammekonstruktion og tætninger er beskrevet mere detaljeret i rapport 113 ([1], afsnit 4.11-4.12 og 6.10-6.11).

5.8 Sammenligning af lydisolering for 2- og 3-lags ruder

På de efterfølgende sider findes en række sammenligninger af reduktionstalskurver for 2-lags og 3-lags termoruder. Desuden er der vist nogle få resultater for enkeltglas.

Der er ingen overordnet systematik i de viste sammenligninger, men det er forsøgt at vise "lidt af hvert". Kun i konkrete situationer kan det afgøres, om udgangspunktet for en sammenligning af lydisoleringen skal være samme vægt, tykkelse, pris eller varmeisolation. Også andre forhold kan spille ind. For ruderproducenterne kunne udgangspunktet f.eks. også være ønsket om ens glastykkelser og/eller ens afstandsprofiler.

En systematisk sammenligning af måleresultaterne for 3-lags termoruder med måleresultaterne fra undersøgelsen af 2-lags termoruder [1] er uden for projektets rammer, men vil blive udført i et efterfølgende projekt, jvf. afsnit 1.

Med baggrund i litteraturundersøgelsen refereret i afsnit 3.6 er det relevant at vurdere, om det er rigtigt, at det midterste lag glas i en 3-lags rude ikke har nogen særlig betydning for reduktionstalskurven og at den øvre resonansfrekvens ikke medfører et egentligt resonansdyk. Med henblik på anvendelsen af måleresultaterne i praksis er det dog også interessant at få be-

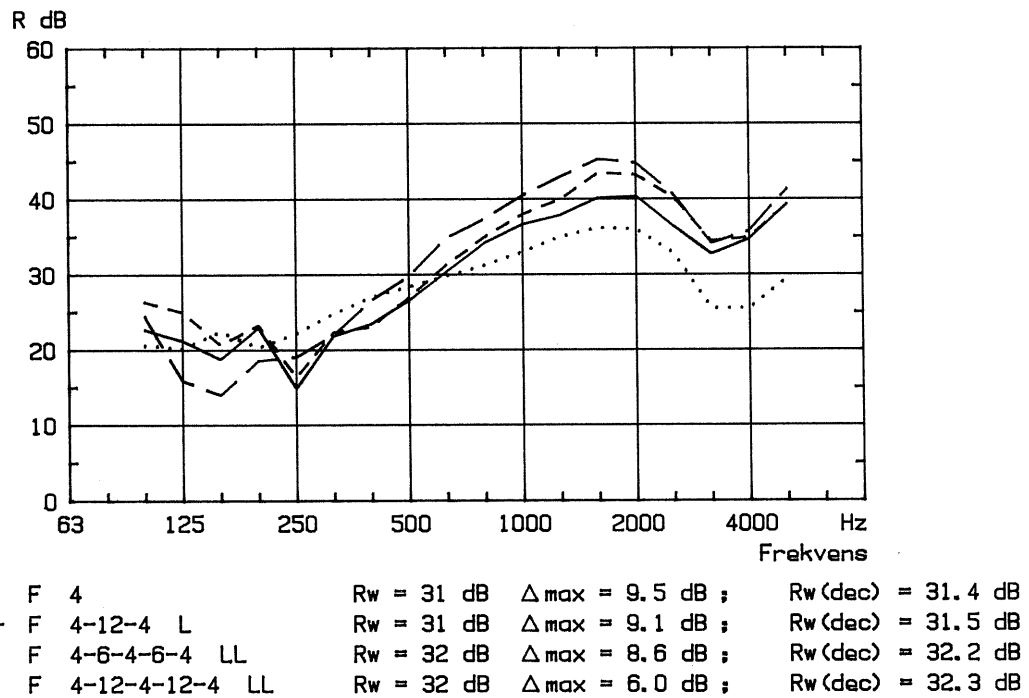
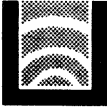


svaret andre spørgsmål, bl.a. om forskellen på lydisoleringen for 2- og 3-lags termoruder med samme totaltykkelse og/eller vægt.

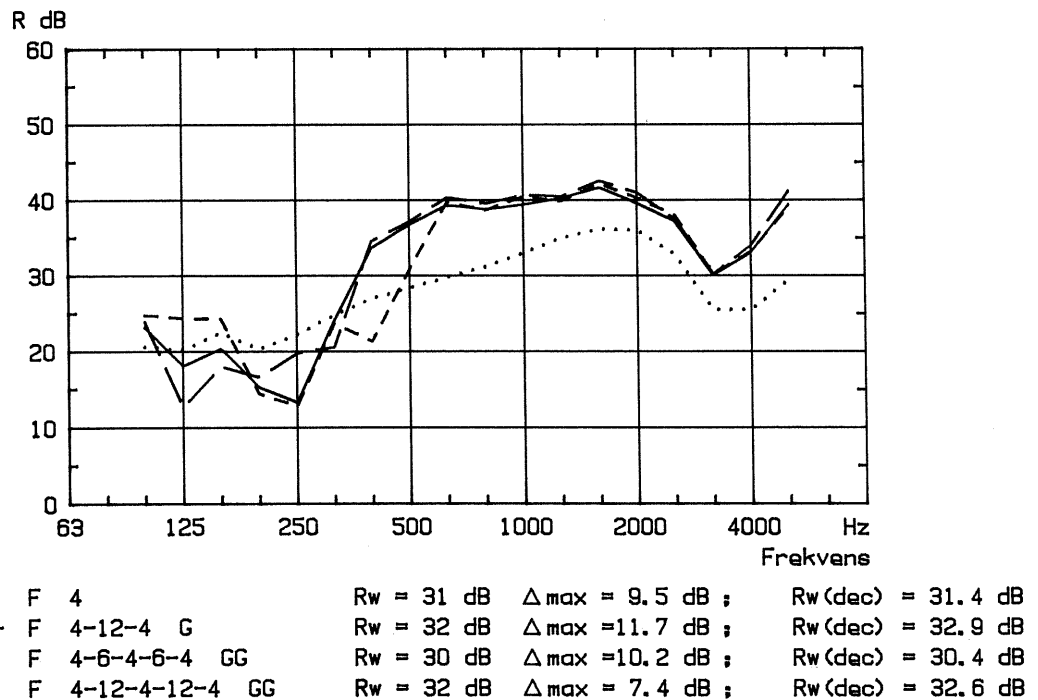
På figur 5.25 og 5.26 er vist sammenligninger af måleresultater for 1-, 2- og 3-lags ruder, alle opbygget symmetrisk af 4 mm glas. Rudernes totalvægt er 10-30 kg/m² og totaltykkelsen er 4-36 mm. På figur 5.25 findes resultater for luftfyldte termoruder, og på figur 5.26 for de samme ruder med gasfyldning. Kurveforløbene er meget forskellige, men på trods heraf er samtlige R_w -værdier 30-32 dB. Alene disse resultater illustrerer tydeligt, at der ikke er en simpel sammenhæng mellem en rudes lydisolering og vægt eller tykkelse.

Ved sammenligning af de luftfyldte termoruder 4-12-4 og 4-6-4-6-4 på figur 5.25 ses, at ændringerne ved tilføjelsen af det midterste glaslag er små, men dog positive, og at R_w -værdien vokser 1 dB. Ved forøgelse af hulrummene til 12 mm som i 2-lags ruden fås noget større totaltykkelse og et ændret kurveforløb, men samme R_w -værdi. For de gasfyldte termoruder fås andre tendenser, se figur 5.26. Sammenligningen af termoruderne 4-12-4 og 4-6-4-6-4 viser nu, at tilføjelsen af det midterste glaslag medfører et tydeligt resonansdyk ved 400 Hz, og R_w -værdien mindskes 2 dB. For den pågældende rude er det midterste glaslag altså skadeligt - hvad angår lydisolering - og en 2-lags termorude må foretrækkes. Forøgelse af hulrummene til 12 mm medfører et noget jævner kurveforløb og R_w -værdien vokser igen til 32 dB som for 2-lags ruden.

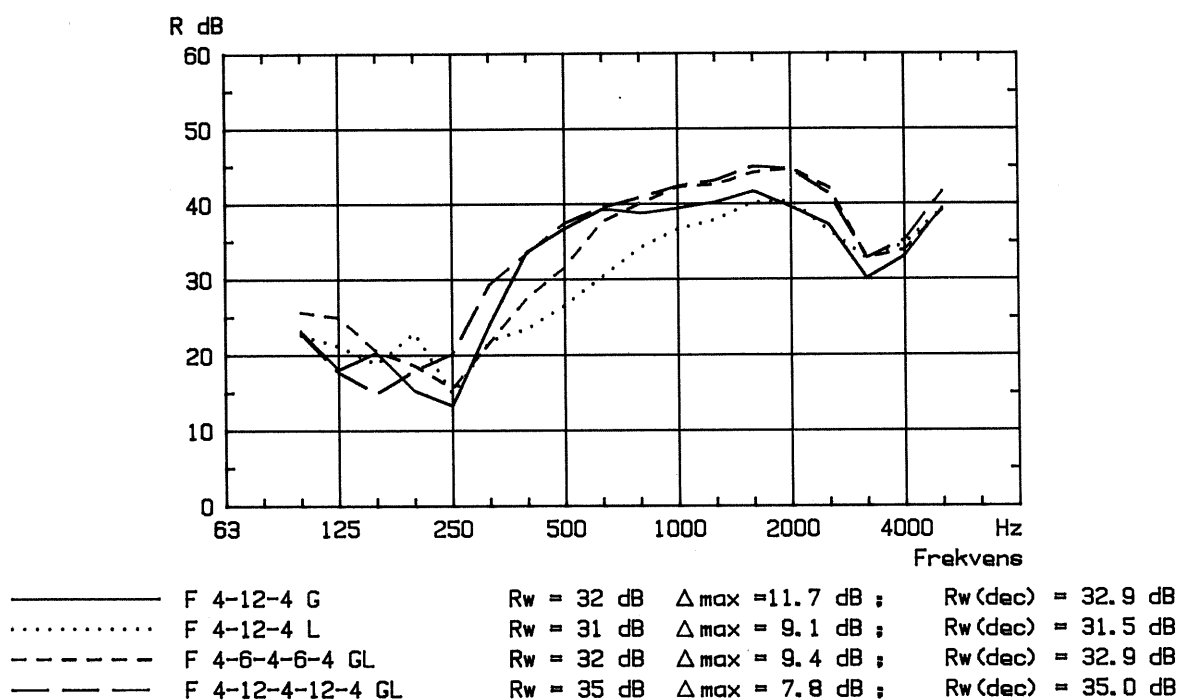
Figur 5.27 viser en sammenligning af 2-lags og 3-lags termoruderne fra figur 5.25 og 5.26, men 3-lags termoruderne har nu kun gasfyldning i ét hulrum, og der opnås herved højere lydisolering end før. 3-lags ruden 4-6-4-6-4 GL har samme R_w -værdi, 32 dB, som 2-lags ruden 4-12-4 G, og med 12 mm hulrum i 3-lags ruden fås en 3 dB højere R_w -værdi. Sidstnævnte rude er dog relativt tyk, men der kan opnås et lige så godt resultat med en 3-lags termorude 4-12-4-6-4 GL, som kan monteres i de fleste standardvinduer.



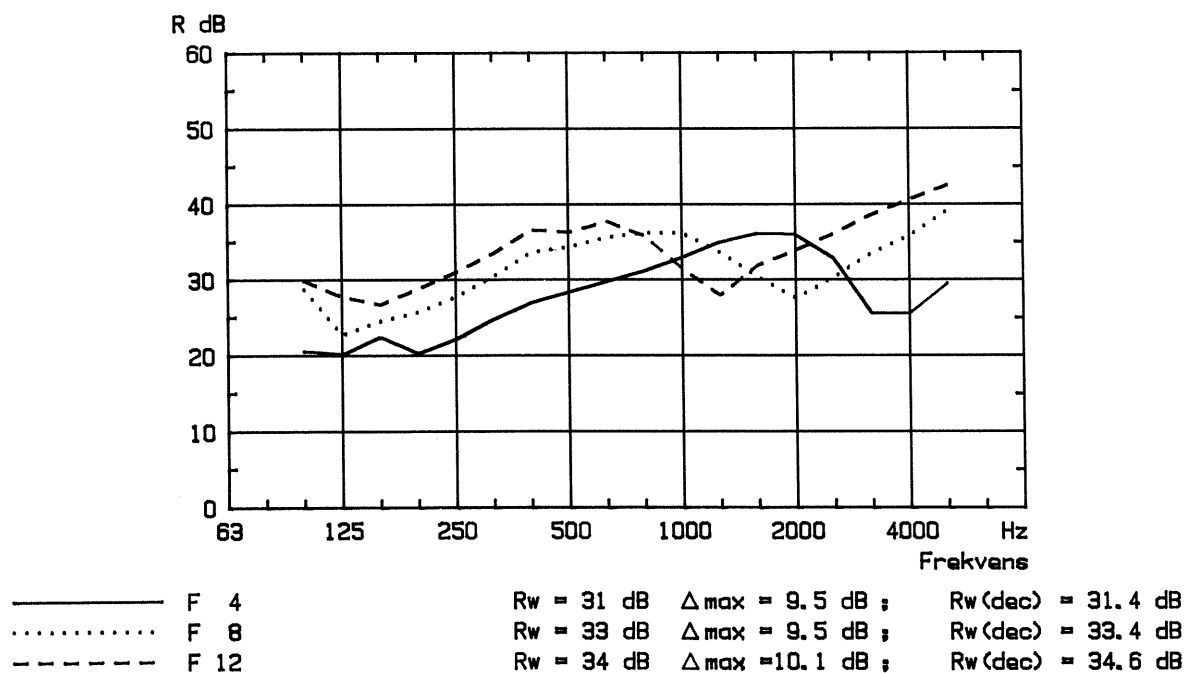
Figur 5.25 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 4 forskellige 1-, 2- og 3-lags ruder opbygget af 4 mm glas. Termoruderne er luftfyldte.



Figur 5.26 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 4 forskellige 1-, 2- og 3-lags ruder opbygget af 4 mm glas. Termoruderne er gasfyldte.



Figur 5.27 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for to 2-lags og to 3-lags termoruder, alle opbygget af 4 mm glas. 3-lags ruderne har forskellige fyldninger i de 2 hulrum, ellers er termorudernes opbygning som i figur 5.25 og 5.26.



Figur 5.28 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for 4, 8 og 12 mm enkeltglas.



På figur 5.28 er til orientering vist reduktionstalskurver for massive glas i tykkelserne 4, 8 og 12 mm. Vægten af glassene svarer altså til totalvægten af hhv. en 1-, 2- og 3-lags rude af 4 mm glas.

På figur 5.29-5.34 findes sammenligninger af 2-lags termoruder med 3-lags termoruder, der enten har samme totaltykkelse og -vægt eller har samme udvendige glastykkelser og samme totale hulrumsdybde.

Ved de viste sammenligninger af 2- og 3-lags ruder med samme vægt og tykkelse ses det klart, at 2-lags ruderne har væsentligt bedre lydisolering end 3-lags ruderne. R_w -værdierne er 3-6 dB højere. Det er dog vigtigt at bemærke, at 2-lags ruden er asymmetrisk og 3-lags ruden symmetrisk. Ved sammenligning af en symmetrisk 2-lags rude med en optimalt opbygget 3-lags rude kan der fås modsatte resultater.

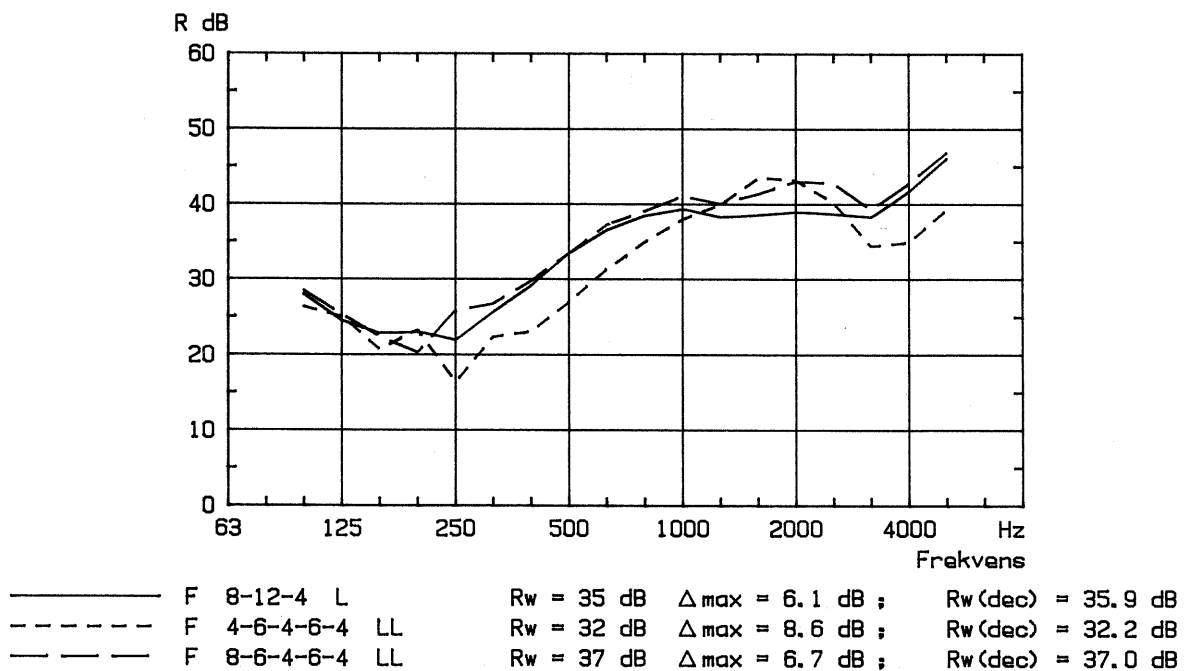
Sammenligningerne af 2-lags termoruder med 3-lags ruder, der har samme udvendige glastykkelser og samme totale hulrumsdybde, viser forskellige tendenser afhængigt af hulrumsfyldningerne. For de luftfyldte ruder (figur 5.29 og 5.31) ses, at 3-lags ruderne har 1-2 dB højere R_w -værdi end 2-lags ruderne. For de gasfyldte 3-lags ruder (figur 5.30 og 5.32) fås et noget lavere reduktionstal omkring den øvre resonansfrekvens, men R_w -værdien er i det ene tilfælde uændret og i det andet tilfælde kun 1 dB lavere. Når 3-lags ruderne har forskellige fyldninger i de to hulrum, opnås der i de fleste tilfælde relativt bedre resultater. Termoruden 8-6-4-6-4 GL er således tydeligt bedre end både 8-12-4 G og 8-12-4 L, se figur 5.33. For termoruden 8-12-4-12-4 GL fås ikke en tilsvarende effekt, se figur 5.34. Resultaterne vil dog her kunne forbedres ved at "flytte" det midterste glas, således at glasmellemrummene er asymmetriske.



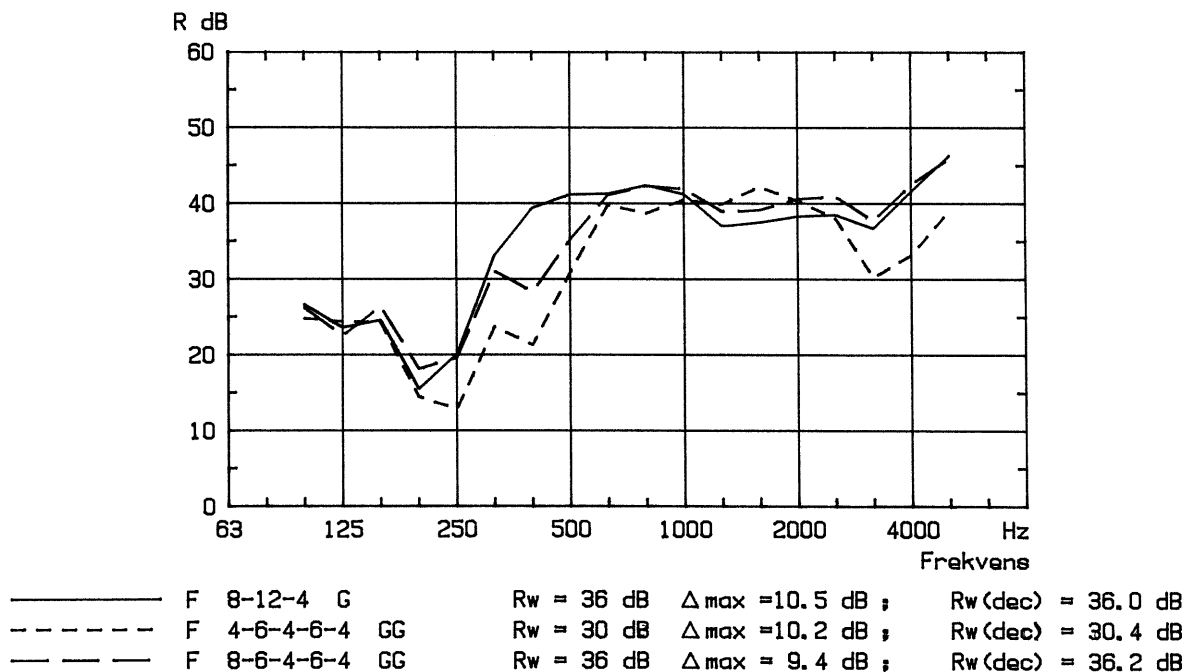
Gennemgående er der en positiv effekt af et tredje glaslag i iøvrigt ens ruder, når ruden er luftfyldt, og en negativ effekt, når ruden er gasfyldt. Opdelingen i 2 hulrum kan udnyttes bedst ved at anvende forskellige fyldninger i de to hulrum. For nogle rudetyper er det en fordel med asymmetriske mellemrum, se afsnit 5.5.

Generelt betragtet ser det ud til, at 3-lags termoruder er tungere end 2-lags termoruder med samme lydisolation. Hvad angår total rudetykkelse kan 3-lags termoruder godt konkurrere med 2-lags termoruder, undtagen ved helt små tykkelser.

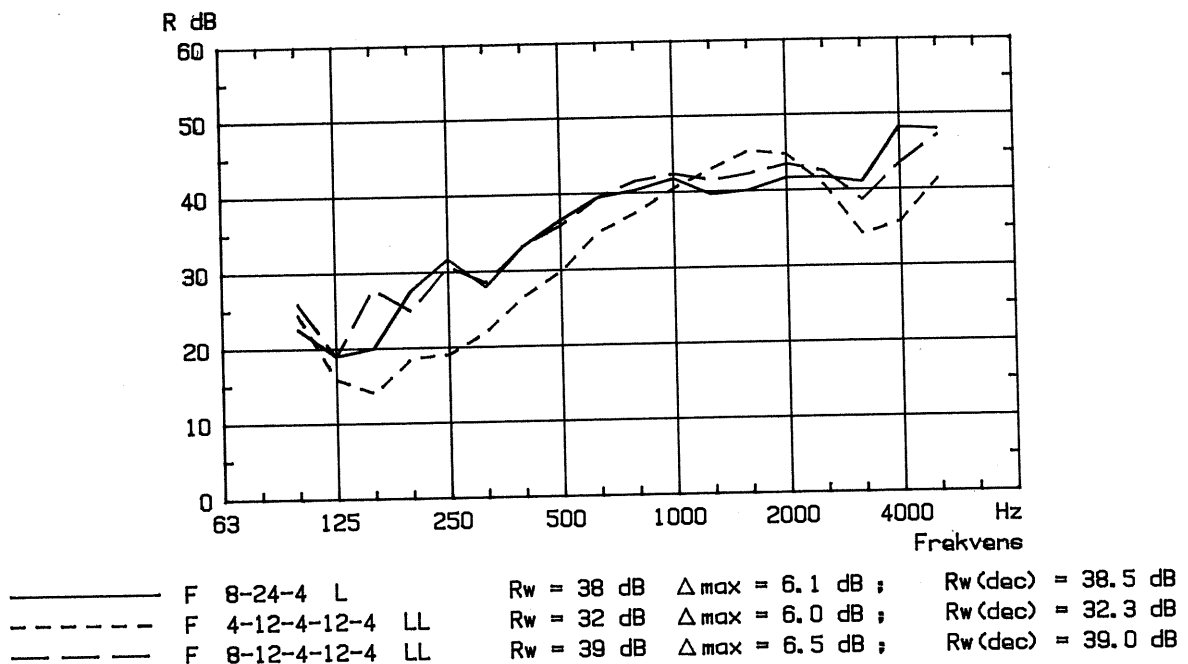
Skal der opnås en meget høj lydisolation for en rude, tyder resultaterne på, at kravet lettest opfyldes med en 3-lags termorude. Dette gælder især, hvis der af produktionstekniske grunde anvendes almindelige afstandsprofiler, dvs. op til tykkelser på 16 eller evt. 20 mm.



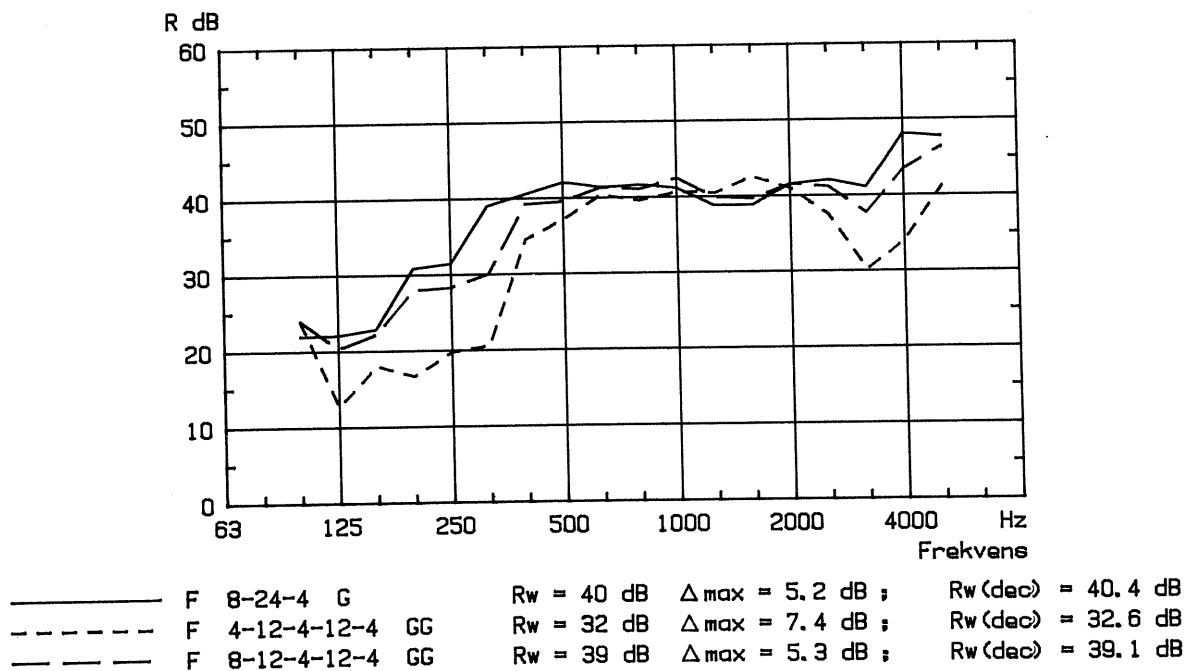
Figur 5.29 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for én 2-lags og to 3-lags termoruder, alle luftfyldte. Termoruden 4-6-4-6-4 har samme totaltykkelse og -vægt som 8-12-4. Termoruden 8-6-4-6-4 har et ekstra 4 mm glas i midten, men ellers samme totale hulrumsdybde og udvendige glastykkelser som 8-12-4.



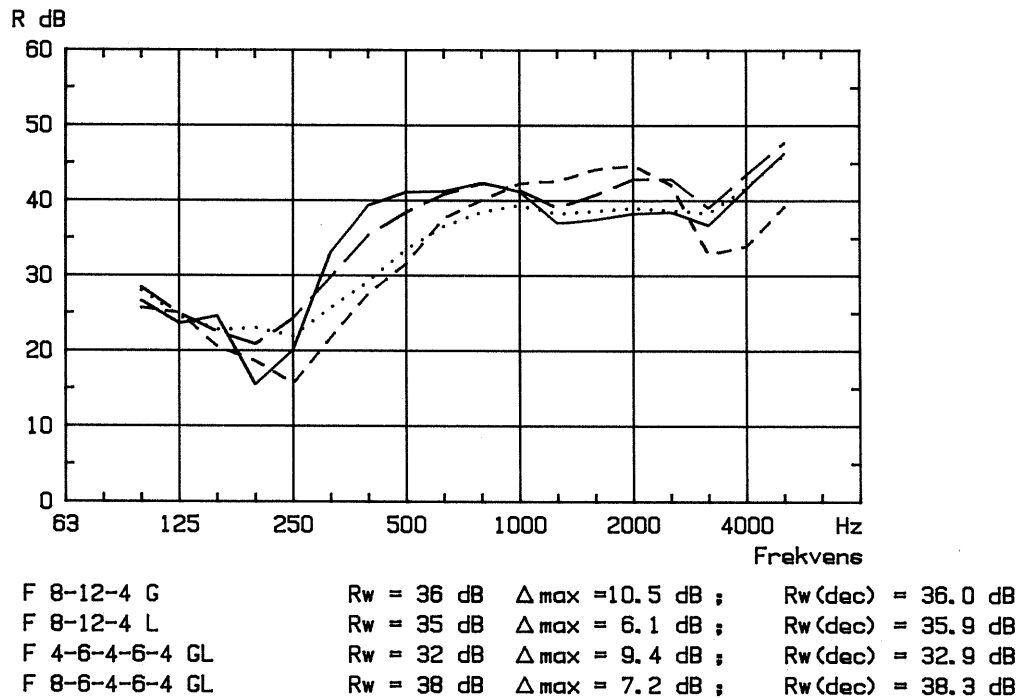
Figur 5.30 Reduktionstal pr. 1/3 oktavn for én 2-lags og to 3-lags termoruder, alle gasfyldte. Sammenligning i øvrigt som beskrevet på figur 5.29.



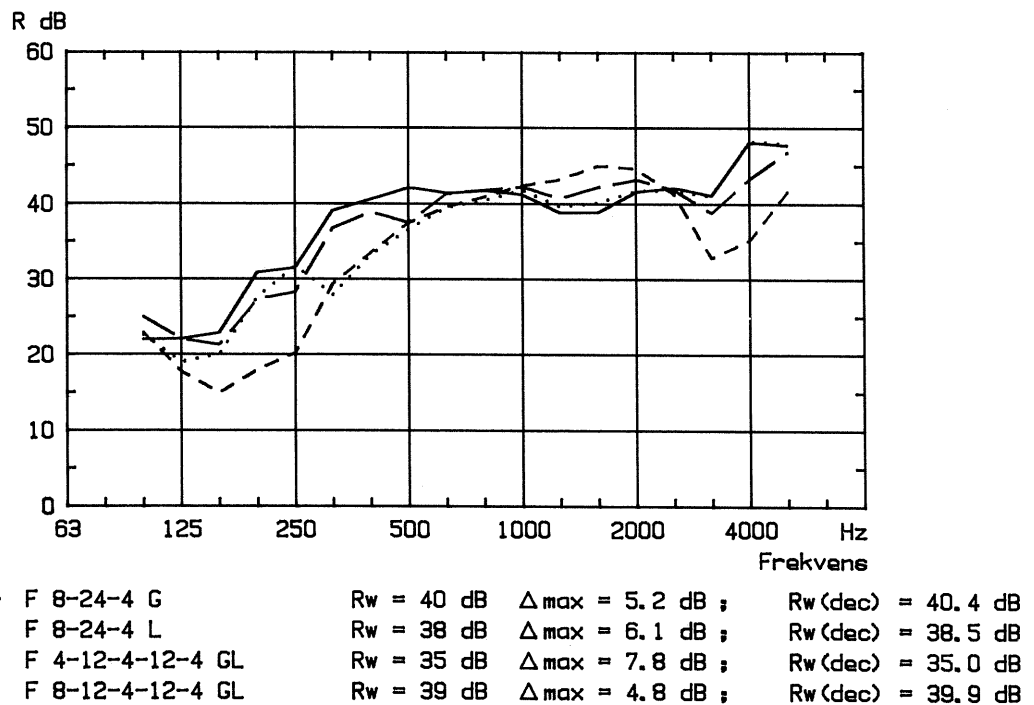
Figur 5.31 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for én 2-lags og to 3-lags termoruder, alle luftfyldte. Termoruden 4-12-4-12-4 har samme totaltykkelse og -vægt som 8-24-4. Termoruden 8-12-4-12-4 har et ekstra 4 mm glas i midten, men ellers samme totale hulrumsdybde og udvendige glastykkelser som 8-24-4.



Figur 5.32 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for én 2-lags og to 3-lags termoruder, alle gasfyldte. Sammenligning i øvrigt som beskrevet på figur 5.31.



Figur 5.33 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for to 2-lags termoruder med hhv. gas og luft og to 3-lags termoruder med forskellige fyldninger i de to hulrum. Termorudernes opbygning i øvrigt som i figur 5.29 og 5.30.



Figur 5.34 Reduktionstal pr. 1/3 oktav for to 2-lags termoruder med hhv. gas og luft og to 3-lags termoruder med forskellige fyldninger i de to hulrum. Termorudernes opbygning i øvrigt som i figur 5.31 og 5.32.



6. OPTIMERING AF LYDISOLATION

6.1 Fremgangsmåde ved optimering af lydisolation

At optimere er at finde den bedste løsning under de givne forudsætninger.

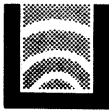
Ved valg af en termorude til et vindue er der en række egenskaber, der har betydning. En egentlig optimering kræver, at betydningen af disse egenskaber kan omsættes eller omregnes til en fælles værdiskala (f.eks. kr.) og derefter summeres. Denne "omsætning" vil blive delvist subjektiv, og det er vanskeligt at give en generel opskrift på optimering af en termorudes opbygning.

Enkelt beskrevet kan optimeringen foregå efter to forskellige principper:

- (1) Der ønskes en konstruktion med en given lydisolation: Blandt konstruktioner, der lige netop opfylder kravet, vælges konstruktionen med den laveste "pris" (i direkte og/eller overført betydning).
- (2) Der ønskes den bedst mulige lydisolation under nogle givne forudsætninger: Blandt konstruktioner, hvis øvrige egenskaber er acceptable, vælges konstruktionen med den bedste lydisolation.

Førstnævnte fremgangsmåde benyttes f.eks., når et myndighedskrav til lydisolationen skal opfyldes. Den anden fremgangsmåde benyttes f.eks., når en bygherre ønsker en vindueskonstruktion uden forsatsvindue og så høj en lydisolation, der kan opnås på disse betingelser.

En forudsætning for, at en optimeringsproces kan foretages er, at der er defineret et mål for vinduets lydisolation. I de efterfølgende afsnit med afbildninger og eksempler er R_w -værdien benyttet som mål for lydisolationen.



6.2 Optimering af lydisolations i forhold til rudens vægt og/eller tykkelse

En termorudes vægt og tykkelse har i de fleste tilfælde en vis betydning for valget af rudetype, se rapport 113, ([1], afsnit 7.3 og 7.4). Det er derfor relevant at afbilde lydisolationsen som funktion af disse egenskaber for at se, om der er en sammenhæng. Ved sammenligninger med diagrammer i [1] skal bemærkes, at akserne er forskudt.

På figur 6.1 og 6.2 er de målte R_w -værdier afbildet som funktion af rudernes vægt hhv. tykkelse. Der er benyttet R_w -værdier for 52 målinger på ruder i fast karm (jvf. tabel 5.1). Det skal bemærkes, at der egentlig burde vises resultater fra flere rudetyper, idet nogle ikke-optimale prøveemner er fra valgt allerede inden målingerne. Eksempelvis mangler tunge, symmetriske ruder, der formodes at skille sig ud med lave R_w -værdier som det var tilfældet med 2-lags termoruder.

De viste resultater repræsenterer altså forskellige ruder, men ikke alle relevante ruder.

Som forventet er der ikke nogen klar sammenhæng mellem rudens lydisolations og rudens totale vægt eller tykkelse. I gennemsnit fås dog voksende lydisolations med voksende vægt eller tykkelse, men der er stor spredning af enkeltresultaterne.

En væsentlig bedre information om sammenhængen fås, såfremt resultaterne optegnes i et "kombineret" diagram, hvor både vægt og tykkelse indgår i en fælles parameter. I figur 6.3 og 6.4 er benyttet en lignende, men mere illustrativ afbildningsform, idet der i stedet for den totale vægt og tykkelse er angivet den faktiske kombination af glas og hulrum svarende til de enkelte måleresultater.

På figur 6.3 er der opdelt i grupper af ruder, der har samme kombination af hulrumdybder. Grupperne er ordnet efter stigende total hulrumdybde, og inden for hver gruppe er ruderne angivet efter stigende total glastykkelse, dvs. stigende vægt.

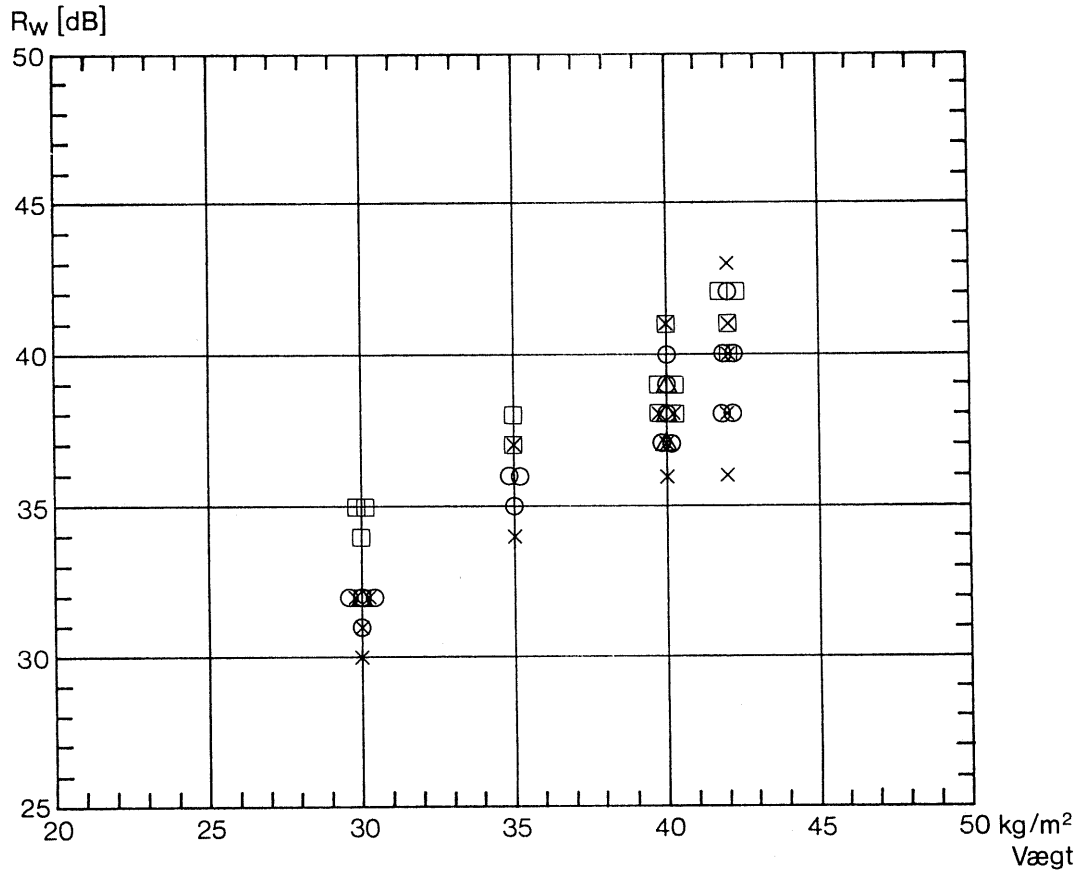
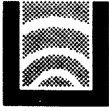


Den totale hulrumsdybde er altså den primære parameter, og den samlede glastykkelse eller vægt er den sekundære parameter. Parameteren i afbildningen kan kaldes en hulrum-glas-parameter eller en hulrum-vægt-parameter.

Af figur 6.3 ses, at der inden for hver enkelt gruppe, dvs. for en given kombination af hulrum, fås en lydisolationsværdi, der afhænger stærkt af kombinationen af glas. Bortset fra den sidste gruppe (hulrum 20+6 mm), hvor der er få måleresultater til en samlet vurdering, ses det, at der er ens tendenser i alle grupper. For en almindelig 3-lags rude af 4+4+4 mm glas, dvs. med symmetriske glastykkelser, fås $R_w \sim 31$ dB - uanset hulrumsdybderne. Med en øget vægt af det ene glas stiger lydisolationsværdien stærkt. For en given kombination af glas og hulrum fås der generelt den bedste lydisolationsværdi, når hulrumsfyldningerne er asymmetriske. Den højeste lydisolationsværdi fås med lamineret glas, asymmetriske hulrumsdybder og asymmetriske hulrumsfyldninger (gasfyldning i det store hulrum). Den benyttede afbildningsform illustrerer tydeligt at man - uafhængigt af hulrumskombinationen - begynder "forfra" i ydeevne, når der vælges 4+4+4 mm glas.

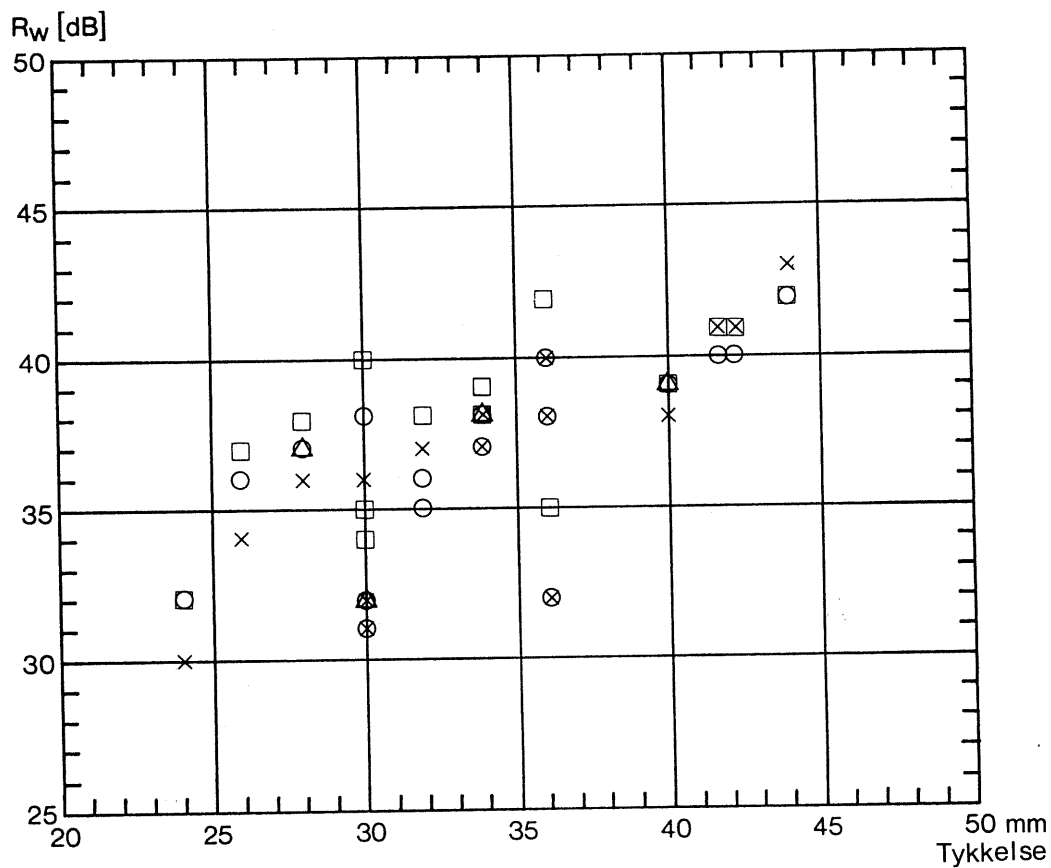
På figur 6.4 er de samme måleresultater afbildet med glaskombinationen som primær parameter og hulrumskombinationen som sekundær parameter. Der er nu en tydeligt klarere sammenhæng end ved de forudgående afbildninger. Det er desuden lettere at sammenligne virkningen af ændringer i hulrumsdybderne. Generelt betragtet viser resultaterne, at 12+6 mm hulrum er bedre end 9+9 mm og 20+6 mm bedre end 12+12 mm. Asymmetri er altså fordelagtig. Dette kan også konstateres ved at sammenligne 12+12 mm med 12+6 mm, der trods mindre samlet hulrumsdybde giver cirka samme resultater.

De viste afbildninger illustrerer, at der ved optimering af ruddens opbygning fås højere lydisolationsværdier eller lavere vægt/tykkelse. I afsnit 6.4 er vist et par optimeringseksempler.



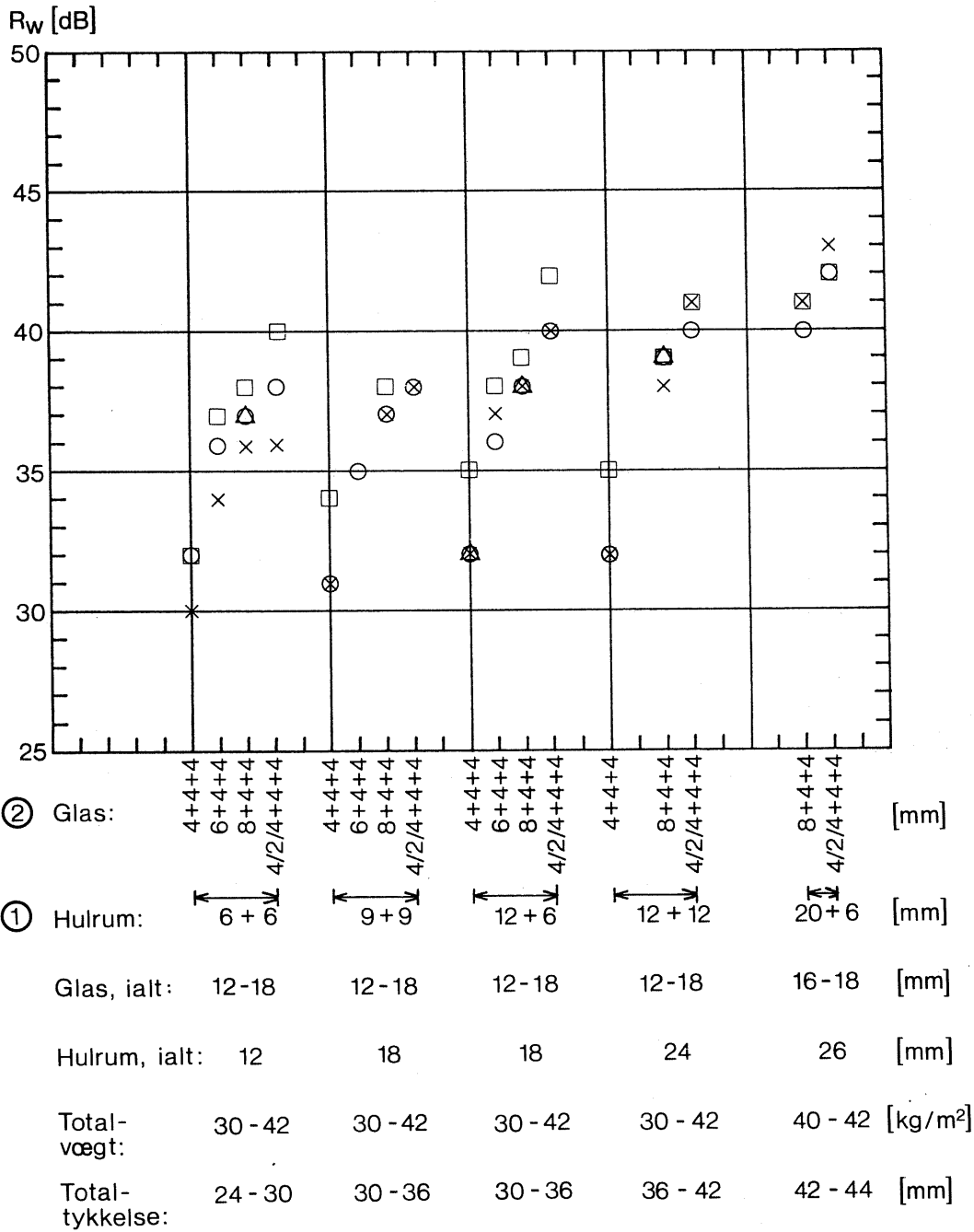
Figur 6.1 Lydisolation R_w for 3-lags termoruder afbildet som funktion af rudevægten. Data fra 52 målinger, jvf. tabel 5.1.

- LL
- × GG
- GL
- △ LG



Figur 6.2 Lydisolation R_w for 3-lags termoruder afbildet som funktion af rudetykkelsen. Data fra 52 målinger, jvf. tabel 5.1.

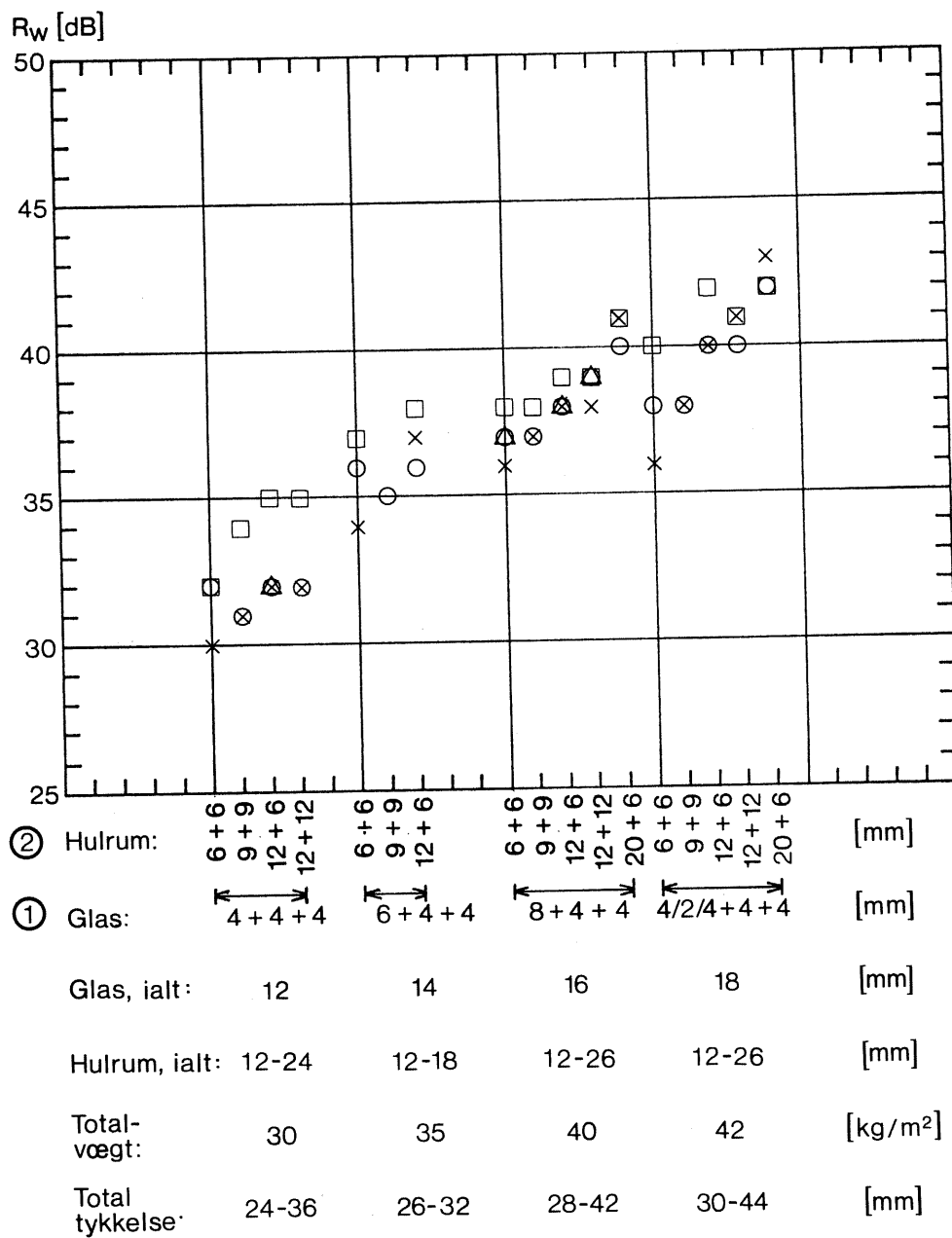
- LL
- × GG
- GL
- △ LG



Figur 6.3 Lydisolation R_w for 3-lags termoruder afbildet som funktion af en kombineret hulrum-vægt-parameter.

- ① Primær parameter: Hulrum
 - ② Sekundær parameter: Vægt (glastykkelser)
- Data fra 52 målinger, jvf. tabel 5.1.

○ LL
 × GG
 □ GL
 △ LG



Figur 6.4 Lydisolation R_w for 3-lags termoruder afbildet som funktion af en kombineret vægt-hulrum-parameter.

① Primær parameter: Vægt (glastykkelser)

② Sekundær parameter: Hulrum

Data fra 52 målinger, jvf. tabel 5.1.

- LL
- × GG
- GL
- △ LG



6.3 Optimering af lydisolation i forhold til rudens pris

Prisen for en termorude er i praksis væsentlig for valget af rudetype. Hvis ønsket om en høj lydisolation medfører en meget høj pris, vil der ofte blive valgt en rude med en lidt mindre lydisolation.

I relation til konklusionen af den eksperimentelle undersøgelse er det naturligvis relevant at sammenligne omkostningerne ved forskellige ændringer af ruden. I tabel 6.1 er angivet prisindex for 3-lags termoruder anvendt til undersøgelsen. De angivne tal er beregnet som middeltal for 3 producenter. Som reference for prisindex er anvendt index 100 for en alm. luftfyldt 2-lags termorude af 4+4 mm glas, størrelse ca. 1 m² (ekstreme størrelser kan ændre prisforhold). De angivne tal skal betragtes som vejledende tal, da f.eks antallet af ruder ved en leverance kan ændre forholdene.

Ved at sammenligne indextallene i tabel 6.1 med resultaterne afbildet i figur 6.4 kan fås en forenklet vejledning i en omkostningsbevidst forøgelse af lydisolationen. Med udgangspunkt i en almindelig, luftfyldt 3-lags termorude fås følgende trin:

- | | |
|--|---|
| (1) En lille forøgelse af tykkelsen af det ene udvendige glas. | } NB:
Rækkefølgen af (2) og (3) kan ombyttes |
| (2) Gasfyldning i ét hulrum. | |
| (3) En yderligere forøgelse af glastykkelsen, jvf. (1). | |
| (4) Ændring af hulrumsdybder. | |
| (5) Laminering. | |

I et konkret tilfælde afhænger rækkefølgen af økonomisk optimale ændringer naturligvis af hvilken rudetype, der vælges som udgangspunkt. Ændring af hulrumsdybder er gratis i direkte omkostninger, men i en del situationer er der ikke frie muligheder pga. rammeprofilets begrænsninger.



TERMORUDE [mm]	VÆGT [kg/m ²]	TYK- KELSE [mm]	PRISINDEX (se tabeltekst)			
			HULRUMSFYLDNINGER I RUDE			
			GG	GL	LG	LL
4-6-4-6-4	30	24				
4-9-4-9-4	-	30	208	200	200	170
4-12-4-6-4	-	-				
4-12-4-12-4	-	36				
6-6-4-6-4	35	26				
6-9-4-9-4	-	32	252	243	243	199
6-12-4-6-4	-	-				
8-6-4-6-4	40	28				
8-9-4-9-4	-	34				
8-12-4-6-4	-	-	284	272	272	229
8-12-4-12-4	-	40				
8-20-4-6-4	-	42				
4/2/4-6-4-6-4	42	30				
4/2/4-9-4-9-4	-	36				
4/2/4-12-4-6-4	-	-	589	572	572	536
4/2/4-12-4-12-4	-	42				
4/2/4-20-4-6-4	-	44				

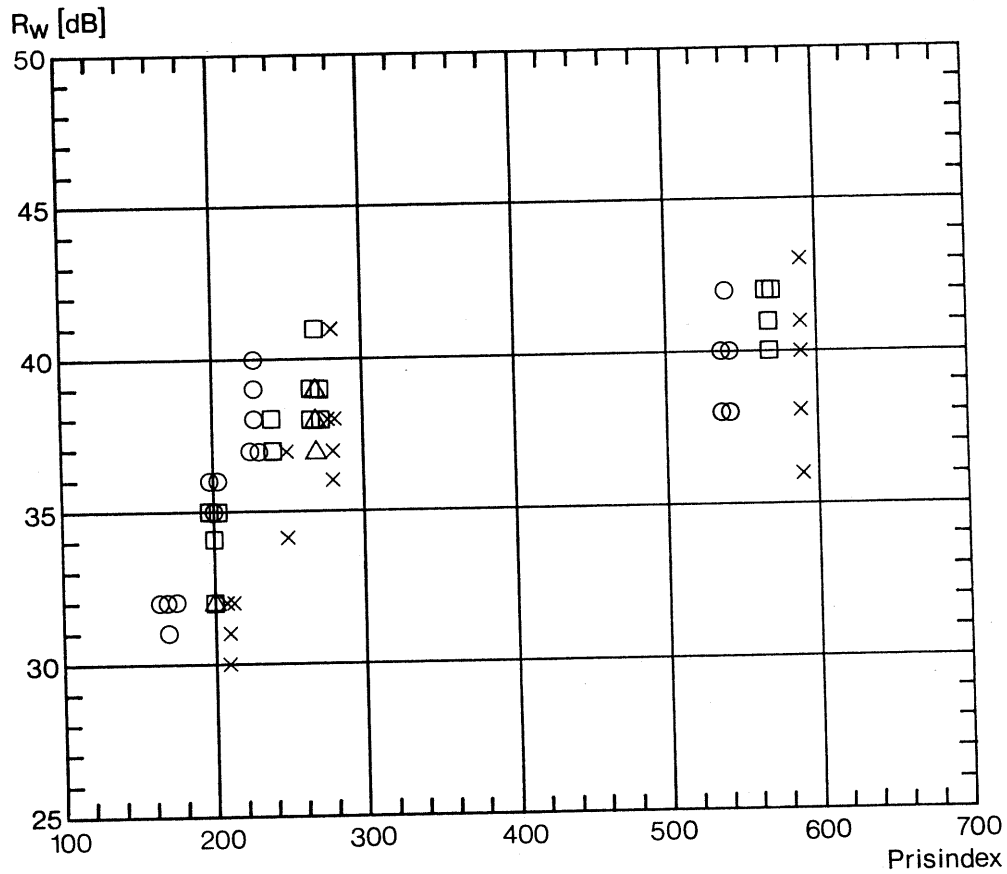
Tabel 6.1 Prisindex for 3-lags termoruder anvendt til den eksperimentelle undersøgelse. Middeltal for 3 procudenter.
Prisindex 100: 2-lags termorude af 4+4 mm glas (atm. luft i hulrum).



På figur 6.5 er R_w -værdier for 52 ruder i fast karm (se tabel 5.1) afbildet som funktion af prisindex (tabel 6.1). Ligesom ved afbildning af lydisolation som funktion af vægt eller tykkelse fås en stor spredning. Hvad angår priser ligger de laminerede ruder langt fra de øvrige ruder. Til gengæld må det konstateres, at laminering i nogle tilfælde er nødvendig, hvis der skal opnås en meget høj lydisolation eller hvis den tilladelige rudetykkelse er begrænset.

Til orientering kan det tilføjes, at prisen for en alm. 3-lags termorude af 4 mm glas typisk udgør ca. 25% af prisen for et færdigmonteret, oplukkeligt vindue (12M × 12M).

I optimeringseksemplerne i afsnit 6.4 er prisindex angivet, men der er ikke vist egentlige eksempler på optimering i forhold til prisen alene, da det sjældent er relevant.



Figur 6.5 Lydisolation R_w for 3-lags termoruder afbildet som funktion af rudernes prisindex (mid-deltal for 3 producenter).
 R_w -værdier fra 52 målinger, jvf. tabel 5.1.
Prisindex 100: Alm. 2-lags termorude af 4+4 mm glas.

○ LL
× GG
□ GL
△ LG



6.4 Eksempler på optimering af lydisolation

På de følgende sider vises nogle eksempler på en egentlig optimering eller sammenligning/vurdering af valgmuligheder.

Der benyttes følgende forkortelser:

m = masse

t = tykkelse

p = prisindex (se afsnit 6.3)

I alle eksempler er der benyttet R_w -værdier fra tabel 5.1, der indeholder måleresultater for ruder i en fast karm. Dette grundlag er benyttet, dels fordi der fås flest valgmuligheder, dels fordi det er disse resultater, der er afbildet i diagrammerne på figurene 6.1-6.5.

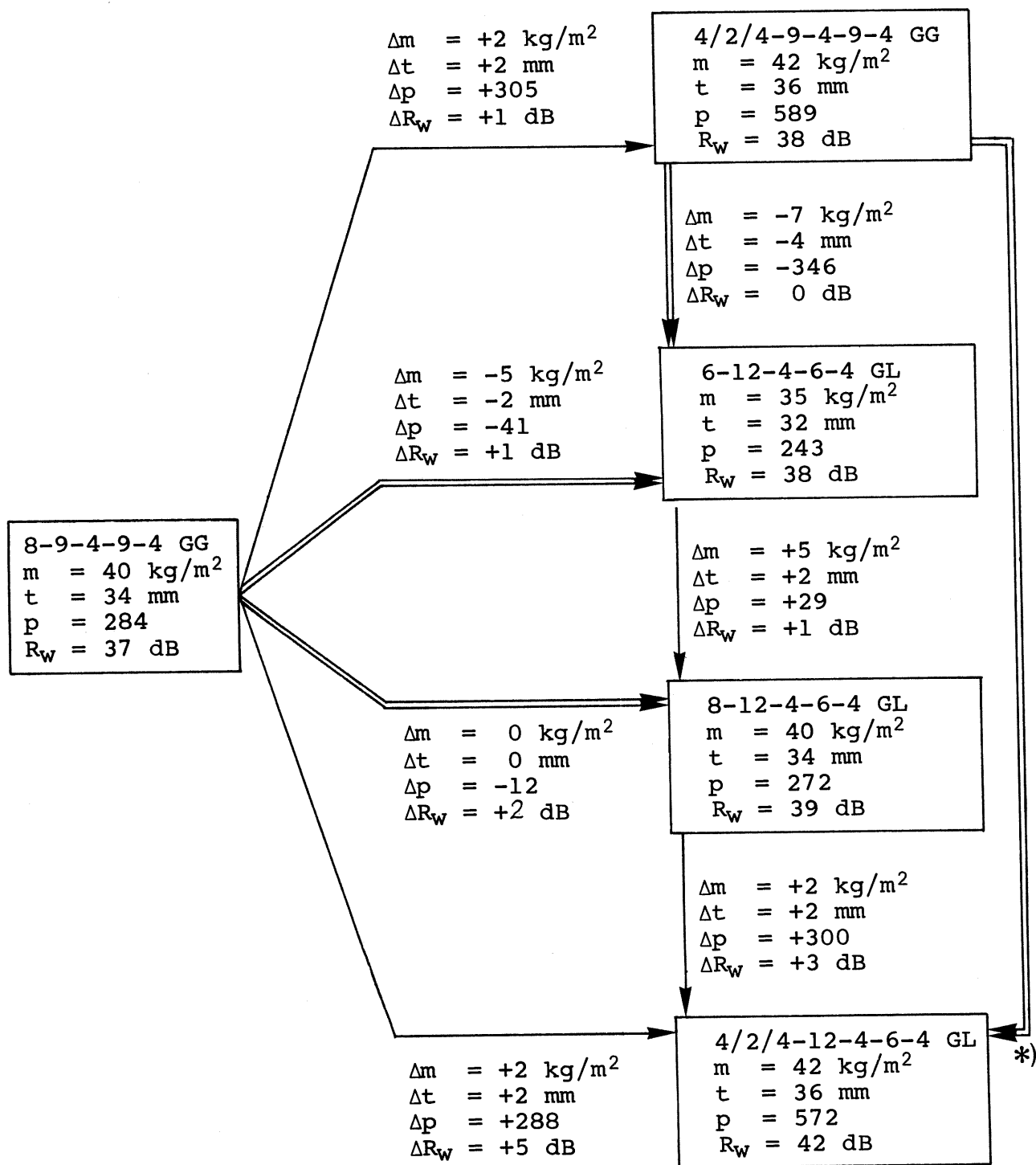
Eksempel 1

På næste side er angivet fem 3-lags termoruder, heraf to med laminat.

Rudespecifikationer: m = 35-42 kg/m²
t = 32-36 mm
p = 243-589 (se afsnit 6.3)
 R_w = 37-42 dB

Tilfælde A: Der ønskes $R_w > 37$ dB og mindst mulig vægt. Termoruden 6-12-4-6-4 GL er den bedst egnede, da den har $R_w = 38$ dB og samtidigt er den letteste og billigste.

Tilfælde B: Der ønskes $R_w > 41$ dB, men der er ingen andre krav. Termoruden 4/2/4-12-4-6-4 GL har $R_w = 42$ dB og er den eneste af de viste ruder, opfylder kravet. Hvis $R_w = 39$ dB havde været tilstrækkeligt, kunne 8-12-4-6-4 GL anvendes. Denne rude er tyndere, lettere og væsentligt billigere, men opfylder altså ikke kravet til lydisolation.



⇒ Markerer særligt fordelagtig ændring af røde, dvs. der opnås en af følgende fordele:

- (1) Mindst samme lydisolation med en lettere, tyndere, billigere røde
- (2) Bedre lydisolation med samme vægt og tykkelse og ca. samme pris

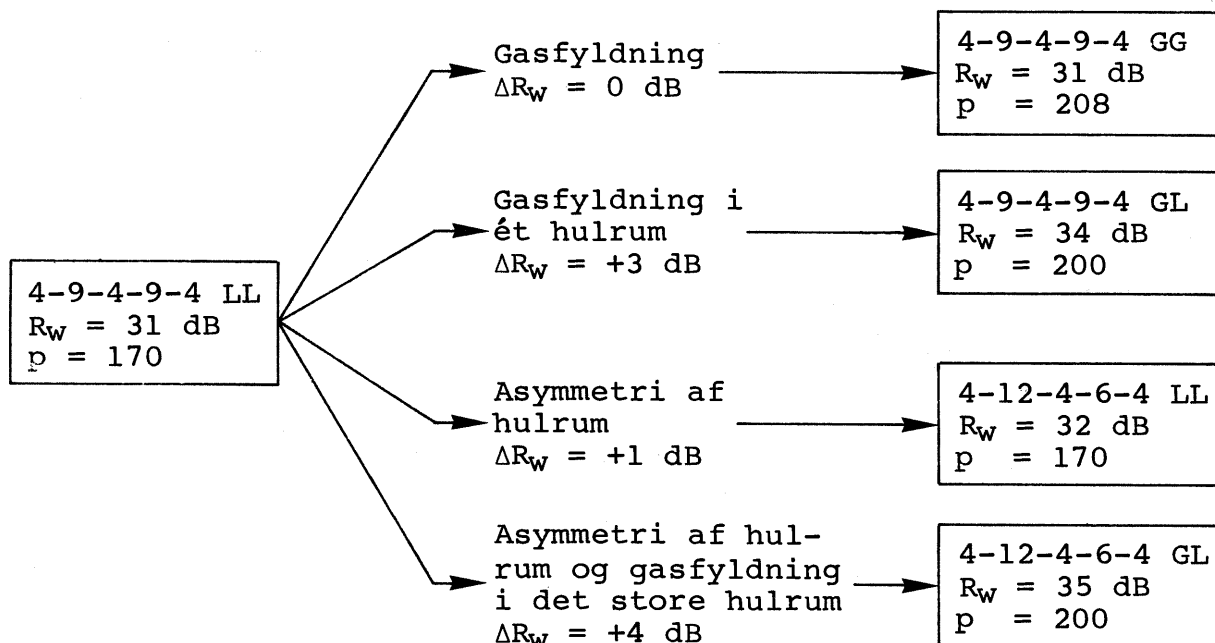
*) $\Delta m = 0 \text{ kg/m}^2$
 $\Delta t = 0 \text{ mm}$
 $\Delta p = -17$
 $\Delta R_w = +4 \text{ dB}$



Eksempel 2

Der ønskes en 3-lags termorude opbygget af 4 mm glas. Aht. vinduets profilsystem skal rudes totaltykkelse være 30 mm. Lydisolationen skal være så god som mulig.

Nedenstående er angivet fem 3-lags termoruder, alle af 4 mm glas og med samme totale vægt og tykkelse ($m = 30 \text{ kg/m}^2$, $t = 30 \text{ mm}$), men med forskellig kombination af hulrum og fyldninger. Som udgangspunkt er benyttet en almindelig, symmetrisk rude med atm. luft i hulrummene.



Resultat af optimering (uden prishensyn): $\Delta R_w = +4 \text{ dB}$.
 Prisforøgelse: Ca. 20%, hvilket typisk svarer til ca. 5%
 forøgelse af prisen for den samlede vindueskonstruktion.

Det skal bemærkes, at den laveste lydisolation, $R_w = 31 \text{ dB}$, fås for både den billigste og dyreste rude.

NB: Med en lille forøgelse af det ene glas til 6 mm kan fås yderligere +3 dB i R_w -værdi, se tabel 5.1. Prisen for termoruden øges i så fald yderligere ca. 20%.



Eksempel 3

Der ønskes en 3-lags termorude med en tykkelse på 30 mm og så høj en lydisolations og varmeisolation som muligt. Af sikkerhedsmæssige grunde ønskes ruden lamineret. I tabel 5.1 (afsnit 5.2) findes følgende muligheder:

- (1) 4/2/4-6-4-6-4 LL $R_w = 38$ dB
- (2) 4/2/4-6-4-6-4 GL $R_w = 40$ dB
- (3) 4/2/4-6-4-6-4 GG $R_w = 36$ dB

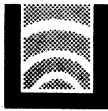
Sidstnævnte rude har bedst varmeisolation på grund af gasfyldningen, men lydisolations er ikke særligt høj i betragtning af, at ruden er lamineret. Med rude (2) fås en lidt ringere varmeisolation, men en væsentligt bedre lydisolations, og denne rude må anses for at være den bedst egnede.

Reduktionstalskurverne for de 3 ruder er iøvrigt vist på figur 5.19 (afsnit 5.6).

Bemærkning: For 3-lags termoruden 4/2/4-6-4-6-4 GG har lamineringen ikke betydning for R_w -værdien. Dette skyldes, at lamineringen kun forbedrer reduktionstallet ved de høje frekvenser, se figur 5.6 (afsnit 5.4), og at R_w -værdien er bestemt af reduktionstallet omkring resonansdykkene, som er dybe på grund af gasfyldningen. Det skal tilføjes, at for alle de øvrige undersøgte ruder gav laminering en forbedring af R_w -værdien.

Eksemplerne illustrerer, at der ved optimering af en rudes opbygning kan opnås en forbedret lydisolations, alternativt en lavere/bedre vægt, tykkelse eller pris.

Det skal bemærkes, at ikke blot glastykkelser, hulrumdybder og hulrumsfyldninger har betydning, men også den valgte rækkefølge, dvs. kombinationen af glas, hulrum og fyldninger.



7. KONKLUSION

Ved den eksperimentelle undersøgelse af lydisoleringen for 3-lags termoruder er betydningen af glastykkelser, laminering, hulrumsdybder og hulrumsfyldning undersøgt. I undersøgelsen indgik ruder med hulrumsfyldning af atmosfærisk luft eller af ren SF₆, men ikke andre luftarter eller blandinger. Nedenstående er anført hovedresultaterne fra undersøgelsen. Resultaterne skal vurderes på baggrund af, at almindelige 3-lags termoruder er symmetriske, dvs. opbygget af tre lag glas i samme tykkelse (normalt 3-4 mm) og med to ens hulrum (normalt 6 eller 9 mm dybe).

Baseret på anvendelse af R_w [6] som mål for et vindues lydisolierende evne fås følgende hovedresultater fra undersøgelsen af 3-lags termoruder (gasfyldningen består af SF₆):

- Asymmetriske glastykkelser medfører en væsentligt forbedret lydisolering. Blot en lille forøgelse af tykkelsen af det ene, udvendige glas har stor betydning, mens en yderligere tykkelsesændring har mindre effekt.
- Laminering af glas forbedrer lydisoleringen.
- Forøgede hulrumsdybder giver højere lydisolering, især for gasfyldte hulrum. Asymmetri i glasafstande er fordelagtig for nogle rudetyper.
- Gasfyldning i begge termorudens hulrum medfører kun i enkelte tilfælde en forøget lydisolering. Når termorudens hulrum er små (6-9 mm), forringes lydisoleringen ved gasfyldning.
- Med gasfyldning i ét af hulrummene fås for næsten samtlige undersøgte rudetyper en højere lydisolering, end når begge hulrum er luft- eller gasfyldte.

Det sidstnævnte resultat er specielt bemærkelsesværdigt, fordi det er en relativt nem foranstaltning. Resultatet gælder også, selv om begge hulrum er små. Såfremt hulrumsdybderne er forskellige, opnås bedst lydisolering med gasfyldning i det store hulrum. Forsøgene er gennemført med SF₆, som er den mest almindelige type gasfyldning. Forsøgsresultaterne er ikke umiddelbart gældende for gasfyldninger med væsentligt anderledes lydtekniske egenskaber.



Den nøjagtige virkning af en enkelt konstruktionsændring kan ikke forudsiges generelt. Betydningen af en detalje afhænger - desværre - af rudens opbygning iøvrigt. Der er heller ingen simpel sammenhæng mellem lydisolationen og termorudens totaltykkelse eller -vægt.

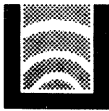
Undersøgelsen viste, at en optimering af termorudens opbygning ofte kan medføre en 3-5 dB højere R_w -værdi, alternativt en lavere vægt, tykkelse eller pris. Generelt betragtet fås bedst lydisolation for termoruder, der er asymmetriske m.h.t. glas-tykkelser, hulrumdybder og hulrumfyldninger. Angivet kvalitativt fås et godt og økonomisk "design" af en 3-lags termorude med nedennævnte rækkefølge af glas og hulrum:

- Tykt glas, evt. lamineret glas
- Stort hulrum med gasfyldning
- Tyndt glas
- Lille hulrum med atm. luft
- Tyndt glas

Ved gasfyldning forstås her ren SF_6 eller en gasblanding med SF_6 som hovedbestanddel.

Ved undersøgelsen er der benyttet vinduer i størrelsen 12M × 12M, jvf. [10] og [20]. Der er udført målinger på termoruder monteret dels i en fast karm, dels i et oplukkeligt vindue. Ruder monteret i et tæt, oplukkeligt vindue havde i mange tilfælde en højere lydisolation end de samme rudetyper i en fast karm. Hvis et oplukkeligt vindue er utæt, fås naturligvis en forringet lydisolation.

Et givet krav til et vindues lydisolation kan ofte kun opfyldes ved at ændre flere konstruktionsdetaljer. Der er dog en øvre grænse for den opnåelige lydisolation. Denne grænse afhænger ikke alene af termoruden, men også af karm/ramme-type og tætninger. Såfremt der for et oplukkeligt vindue ønskes en R_w -værdi på mere end ca. 38 dB, vil det som regel være nødvendigt med to effektive tætningsplaner i fugen mellem karm og ramme.



Betydningen af de enkelte konstruktionsdetaljer i termorude og karm/ramme-konstruktion er knyttet til forskellige frekvensområder. I praksis er betydningen af glastykkelser primært knyttet til frekvenser under 1000 Hz og over 2000 Hz, men tunge symmetriske glas vil dog også påvirke reduktionstallet i frekvensområdet 1000-2000 Hz. Effekten af laminering er primært knyttet til frekvensområdet over 1000 Hz, hulrumsdybder til frekvensområdet under 800 Hz og gasfyldning til frekvenser under 1000 Hz. Betydningen af karm/ramme-konstruktion afhænger af en række faktorer, som endnu ikke er fuldstændigt belyst. Det er dog erkendt, at både karm/ramme-bredde, -materiale og -tætninger kan påvirke lydisolationen, og at virkningen kan være positiv i ét frekvensområde og negativ i et andet. En termorudes indbygning i et oplukkeligt vindue medfører som regel en større karm/ramme-bredde. Effekten af denne detalje afhænger stærkt af rudetypen, men er overvejende positiv og knyttet til frekvensområdet under ca. 1000 Hz. Når der anvendes en termorude med en høj lydisolation, kan et vindues lydisolation dog forringes af lydtransmission gennem karm/ramme-materiale, primært i frekvensområdet 500-2000 Hz, eller gennem utætheder, som især har betydning ved frekvenser over ca. 500 Hz.

Der er således en nøje sammenhæng mellem vurderingsmetoden og de vinduesdetaljer, der skal "angribes" for at opfylde bestemte krav/ønsker til lydisolationen.

En vurderingsværdi beregnet efter én vurderingsmetode kan normalt ikke umiddelbart omregnes til en anden type vurderingsværdi, da der ikke er konstante forskelle. Den tidligere anvendte vurderingsværdi I_a [24] kan således kun omregnes til R_w [6], når måleresultaterne pr. 1/3 oktav kendes. Ved undersøgelsen af 3-lags termoruder var differencen $R_w - I_a$ mellem 0 og 3 dB. Ved undersøgelsen af 2-lags termoruder [1] blev der konstateret forskelle på mellem 0 og 7 dB. Dette viser, at et skift i vurderingsmetode kan have forskellig betydning for forskellige konstruktionstyper.



I Danmark benyttes R_w -værdien [6] som grundlag for klassifikation af vinduer [10]. Vurderingsværdien R_w er internationalt standardiseret [7]. Det bliver jævnligt fremført - både herhjemme og i udlandet - at R_w -værdien ikke er særligt velegnet til vurdering af vinduer og andre facadekomponenter. I nogle lande anvendes andre metoder til vurdering af facadekomponenter. Et alternativ til R_w bliver dog ikke internationalt standardiseret, før der opnås en rimelig høj sikkerhed for, at en sådan ny metode er bedre end den nuværende. Vanskelighederne ligger kort fortalt i, at frekvensindholdet af trafikstøj afhænger både af kildens art (vejtrafik, tog eller fly) og af afstanden til støjkilden.

Erfaringerne fra de eksperimentelle undersøgelser af termoruder viser, at de ubesvarede spørgsmål vedrørende vinduers lydisolation specielt er knyttet til betydningen af karm/ramme-konstruktion og af vurderingsmetode. Disse problemer vil blive nøjere undersøgt i et projekt, der afsluttes i 1986.



8. REFERENCER

- [1] Birgit Rasmussen: "Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder". Lydteknisk Institut, Lyngby. Rapport nr. 113, 1984.
- [2] "Redegørelse om bekæmpelse af støj fra veje og jernbaner". Miljøstyrelsen, juni 1980.
- [3] "Bygningsreglement for småhuse 85" (BR-S 85). Byggestyrelsen, København, 1985.
- [4] "Bygningsreglement 1982" (BR 82). Byggestyrelsen, København, 1982.
- [5] DS/ISO 140-1978. "Akustik. Lydisolationsmålinger i bygninger og af bygningselementer".
Del 1: "Krav til laboratorier".
Del 2: "Fastlæggelse af præcisionskrav".
Del 3: "Måling af bygningselementers luftlydisolation i laboratorium".
Dansk Standardiseringsråd, 1979.
- [6] DS 2186.3-1982. "Akustik. Vurdering af lydisolation. Del 3: Luftlydisolation af facader og dele af facader".
Dansk Standardiseringsråd, 1982.
- [7] ISO 717/3-1982(E). "Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Airborne sound insulation of facade elements and facades".
ISO, 1982.
- [8] Nic Michelsen og Birgit Rasmussen: "Vinduesformatets betydning for det målte reduktionstal". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 22, 1981.
- [9] "Cirkulære om udbygning af Københavns lufthavn, Kastrup, samt bygge- og anvendelsesregulerende bestemmelser for områder, der er berørt af miljømæssige gener fra lufthavnen". Miljøministeriet, 12. juni 1981.
- [10] DS 1084-1982. "Vinduer - Lydisolation - Klassifikation".
Dansk Standardiseringsråd, 1982.



- [11] J.H. Rindel: "Bygningers lydisolation overfor ekstern støj". Laboratoriet for Akustik, Danmarks tekniske Højskole. Publikation nr. 12, 1980.
- [12] DIN 52210 Teil 4, Ausgabe August 1984. "Bauakustische Prüfungen. Luft- und Trittschalldämmung. Ermittlung von Einzahl-Angaben".
- [13] J.D. Quirt: "Sound transmission through windows I. Single and double glazing". J. Acoust. Soc. Am. 72(3) p. 834-844 (1982).
- [14] Jacqueline A. Marsh: "The Airborne Sound Insulation of Glass". Part-3. Applied Acoustics, Volume 4 p. 55-70, 131-154 og 175-192, 1971.
- [15] Stéphane Auzou et Marc Rehfeld: "Les fenêtres - quelques aspects acoustiques". CSTB, juin 1983.
- [16] Dan Hoffmeyer: "Trelagsvinduers lydisolation". Eksamenarbejde ved Laboratoriet for Akustik, 1978.
- [17] J.D. Quirt: "Sound transmission through windows I. Single and double glazing". J. Acoust. Soc. Am. 74(2) p. 534-544 (1983).
- [18] Arild Brekke: "Beregningsmetoder for reduksjonstall til enkelt-, dobbelt- og trippelkonstruksjoner". Akustisk Laboratorium, Trondheim. ELAB-rapport STF44 A80021, 1980.
- [19] Arild Brekke: "Vinduers Lydisolering". Akustisk Laboratorium, Trondheim. ELAB-rapport STF44 A80025, 1980.
- [20] NT ACOU 013-1979. "Doors and Windows: Sound Reduction Index". Nordtest, 1979.
- [21] Nic Michelsen: "Repeatability of Sound Insulation Measurements". Lydteknisk Laboratorium, Lyngby. Rapport nr. 36, 1982.
- [22] Søren Damgaard Kristensen og Birgit Rasmussen: "Repeatability and Reproducibility of Sound Insulation Measurements" (Nordtest-project NT 235-80). Lydteknisk Institut, Lyngby. Rapport nr. 118, 1984.



- [23] Birgit Rasmussen: "Measurement of Sound Reduction Index for Glazings in a Staggered Test Opening" (Nordtest-project NT 360-82). Lydteknisk Institut, Lyngby. Rapport nr. 119, 1984.
- [24] ISO/R 717-1968(E). "Rating of Sound Insulation for Dwellings". ISO, 1968.



OVERSIGT OVER
LYDTEKNISK INSTITUTS
PUBLIKATIONER

FORTEGNELSE OVER LYDTEKNISK
LABORATORIUMS PUBLIKATIONER

- Rapport nr. 1, 1975: *Frits Ingerslev og Ulrik Danneskjold-Samsøe*
Måling af byggepladsstøj.
- Rapport nr. 2, 1975: *Poul Hansen*
Et datamaskineprogram til beregning af støjbelastningen omkring en flyvesektor.
- Rapport nr. 3, 1975: *Nic Michelsen*
Transmissionsrummenes indflydelse på det laboratoriemålte reduktionstal. Delprojekt I: Opbygning af modelrum.
- Rapport nr. 4, 1976: *Nic Michelsen*
Sammenlignende reduktionstalsmålinger for døre målt i laboratorium.
- Rapport nr. 5, 1977: *Jørgen Kragh*
Analyse af sammenhængen mellem reaktioner på vejtrafikstøj og fysiske mål for støjen.
- Rapport nr. 6, 1976: *Torben Astrup*
Måling af hørbart toneindhold i ekstern virksomhedsstøj.
- Rapport nr. 7, 1977: *Poul Hansen*
Rapport vedrørende digitalt databehandlingsudstyr til Lydteknisk Laboratorium.
- Rapport nr. 8, 1977: *Jørgen Kragh*
Støj i byområder. En undersøgelse af støjforhold og forbedringsmuligheder i et eksisterende byområde.
- Rapport nr. 9, 1977: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdæmpning. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for støj fra jernbanetrafik.
- Rapport nr. 10, 1978: *Torben Astrup*
Måling af ekstern støj fra virksomheder. Prototypemålinger.
- Rapport nr. 11, 1978: *Jørgen Kragh*
Jordvoldes støjdæmpning. En undersøgelse af meteorologiske forholds indflydelse på jordvoldes støjdæmpende egenskaber.
- Rapport nr. 12, 1978: *Poul Hansen*
Rapport vedrørende parallelanalysator og logaritme/antilogaritmeenhed i tilknytning til Lydteknisk Laboratoriums digitale databehandlingsudstyr.
- Rapport nr. 13, 1978: *Poul Hansen*
Et datamaskineprogram til generel behandling af store datamængder med henblik på regressionsanalyse.
- Rapport nr. 14, 1979: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdæmpning. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for støj fra vejtrafik.
- Rapport nr. 15, 1978: *Nic Michelsen*
Måling af bafalers absorption.
- Rapport nr. 16, 1978: *Nic Michelsen*
Karakterisering af gulvbelægningers trinlyddæmpende egenskaber ved en enkelt talværdi.
- Rapport nr. 17, 1979: *Nic Michelsen*
Måling i laboratorium af strålingsfaktor for skibsskod.
- Rapport nr. 18, 1979: *Nic Michelsen*
The Effects of Laboratory Design on the Measured Sound Reduction Index.
- Rapport nr. 19, 1980: *John Klinkby Olsen og Nic Michelsen*
En simpel målemetode til bestemmelse af lydisolationen i boligbyggeri.
- Rapport nr. 20, 1980: *Nic Michelsen*
Måling af ækvivalent absorption ved brug af en referencelydkilde.
- Rapport nr. 21, 1980: *Torben Astrup*
Støj fra tunge køretøjer. Måling af tunge køretøjers støjemission.
- Rapport nr. 22, 1981: *Nic Michelsen og Birgit Rasmussen*
Vinduesformatets betydning for det målte reduktionstal.
- Rapport nr. 23, 1981: *Jørgen Kragh og Bent Andersen*
Trafikstøj i bebyggelse. Måling og beregning af lydtrykkniveauet af vejtrafikstøj i åben villabebyggelse.

- Rapport nr. 24, 1981: *Jan Gybel*
Lydudstrålingen fra værktøjsmaskiner ved forskellige driftsparametre.
- Rapport nr. 25, 1981: *Jørgen Jakobsen*
Prediction of Noise Emission from Facades of Industrial Buildings.
- Rapport nr. 26, 1981: *Poul Hansen*
A Digital Airport Noise Computation Program.
- Rapport nr. 27, 1981: *Nic Michélsen*
Måling af bafalers absorption - II.
- Rapport nr. 28, 1982: *Poul Hansen*
Real Time 1/3 Octave Analyzer Computer Program.
- Rapport nr. 29, 1982: *Birger Flovsing and Christian Svane*
Aircraft Noise Exposure Prediction Model. Guidelines for the Methodology of a Danish Computer Program.
- Rapport nr. 30, 1982: *Jørgen Kragh*
Bevoksningers støjdemping III. Måling af bevoksningers dæmpende virkning over for vejtrafikstøj. Supplerende måleresultater og sammenfatning.
- Rapport nr. 31, 1982: *Jørgen Kragh*
Road Traffic Noise Attenuation by Belts of Trees and Bushes. Results of a Supplementary Series of Measurements.
- Rapport nr. 32, 1982: *Jørgen Kragh, Bent Andersen & Jørgen Jakobsen*
Environmental Noise from Industrial Plants. General Prediction Method.
- Rapport nr. 33, 1982: *Torben Holm Pedersen*
Round Robin Test af lydtrykmålere, mikrofoner og kalibratorer.
- Rapport nr. 34, 1982: *Nic Michélsen & Birgit Rasmussen*
Laboratory Effects on the Measured Sound Reduction Index of Windows and Glazings.
- Rapport nr. 35, 1982: *Karsten Bo Rasmussen*
Sound Propagation over Non-Flat Terrain.
- Rapport nr. 36, 1982: *Nic Michélsen*
Repeatability of Sound Insulation Measurements.
- Rapport nr. 37, 1982: *Bent Andersen*
Facades Lydisolation over for vejtrafikstøj.
- FORTEGNELSE OVER PUBLIKATIONER FRA
AFDELINGEN FOR LYDTEKNIK, TEKNOLOGISK INSTITUT
- Lærebog
- 1982 *Jan Voetmann (red.) m.fl.*
Akustik for bygningsteknikere. Lærebog + opgavehæfte. 2. udgave.
- Rapporter
- 1978 *Jens Viggo Larsen*
Rapport til Hovedstadsrådet om støj ved motorsportsanlæg.
- 1978 *Jens Viggo Larsen*
Rapport til Roskilde Amtskommune om køreteknisk anlæg i Hedeland.
- 1978 *Jens Viggo Larsen*
Undersøgelse af mulighederne for at anvende modelforsøg i forbindelse med støjplanlægning.
- 1979 *Palle Voss, Niels Olsen og Steen Levén Nielsen*
Vibrationskader fra håndværktøjer. 3 bind: Hovedrapport, Bilag til hovedrapport samt Måletekniske laboratorieforsøg.
- 1979 *Palle Voss (red.) m.fl.*
Maskinvibrationer og vibrationsbaseret tilstands-kontrol. Indlæg ved temadag.
- 1981 *Bent Emstrup og Knud Gravlund*
Forsøg med multiplansbalancering af fleksibel rotor.
- 1981 *John Klitnky*
Lydborsbenter i levnedsmiddelindustrien. 2 bind.
- 1981 *Palle Voss*
Arbejdshandskers vibrationsisolerende virkning.

FORTEGNELSE OVER REDEGØRELSE FRA MILJØSTYRELSENS
REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER - LYDTEKNISK INSTITUT

- Redegørelse no. 1, 1980: *Torben Astrup, Ole Carlsen og Torben Holm Pedersen*
1. sammenlignende støjmåling.
- Redegørelse no. 2, 1980: *Ole Carlsen*
Båndoptageren og dens anvendelse ved støjmålinger.
- Redegørelse no. 3, 1981: *Jørgen Jakobsen*
Vindmåling i forbindelse med uden-
dørs støjmåling.
- Redegørelse no. 4, 1983: *Ole Carlsen*
Anden sammenlignende støjmåling.

FORTEGNELSE OVER LYDTEKNISK
INSTITUTS PUBLIKATIONER

- Rapport nr. 101, 1983: *Birger Plovsing and Christian Svane*
Aircraft Noise Exposure Prediction Model. Guidelines for the Methodology of a Danish Computer Program.
- Rapport nr. 102, 1983: *Poul Hansen*
Lydteknisk Instituts PDP8A databehandlingsudstyr.
- Rapport nr. 103, 1983: *Anders C. Nilsson*
A Method for the Prediction of Noise and Velocity Levels in Ship Constructions.
- Rapport nr. 104, 1983: *Anders C. Nilsson and Birgit Rasmussen*
Absorption Properties of a Perforated Plate and Membrane Construction.
- Rapport nr. 105, 1983: *Jørgen Jakobsen and Bent Andersen*
Noise Immission from Industry. Measurement and Prediction of Environmental Noise from Industrial Plants.
- Rapport nr. 106, 1983: *Knud Skovgård Nielsen*
Støjsvage maskinkonstruktioner. En statusrapport.
- Rapport nr. 107, 1983: *Jørgen Kragh*
Måling og beregning af ekstern støj fra virksomheder. En statusrapport.
- Rapport nr. 108, 1983: *Jørgen Jakobsen and Bent Andersen*
Wind Noise. Measurements of Wind-Generated Noise from Vegetation and Microphone system.
- Rapport nr. 109, 1983: *Bent Andersen and Jørgen Jakobsen*
Noise Emission from Wind Turbine Generators.
- Rapport nr. 110, 1984: *Karsten Bo Rasmussen og Bent Andersen*
Beregning af vejtrafikstøj i tæt bymæssig bebyggelse.
- Rapport nr. 111, 1984: *Karsten Bo Rasmussen*
The Effect of Terrain Profile on Sound Propagation Outdoors.

- Rapport nr. 112, 1984: *John Klinkby*
Støjdeklaration af varmepumper.
- Rapport nr. 113, 1984: *Birgit Rasmussen*
Optimering af lydisolation for 2-lags termoruder.
- Rapport nr. 114, 1984: *Birger Jessen og Ib Brinchmann*
Måling og vurdering af støjdæmpende rørisolering.
- Rapport nr. 115, 1984: *Palle Voss*
Helkropsvibrationer som arbejdsmiljøfaktor.
- Rapport nr. 116, 1984: *Torben Holm Pedersen et al.*
Akustisk varslings. Baggrund og principper.
- Rapport nr. 117, 1984: *Bent Andersen, Anders C. Gade, Birgit Rasmussen og Christian Svane*
Forbedring af lydisolation mod flystøj i boliger omkring Kastrup Lufthavn.
- Rapport nr. 118, 1984: *Søren Damgaard Kristensen & Birgit Rasmussen*
Repeatability and Reproducibility of Sound Insulation Measurements.
- Rapport nr. 119, 1984: *Birgit Rasmussen*
Measurement of Sound Reduction Index for Glazings in a Staggered Test Opening.
- Rapport nr. 120, 1984: *Birger Plovsing & Christian Svane*
Methodology for Calculation of Noise Exposure around General Aviation Airfields.
- Rapport nr. 121, 1984: *Birger Jessen*
Lydintensitetsmåling. Delrapport 2: Støjdæmpning.
- Rapport nr. 122, 1984: *Anders Christian Gade*
Lydintensitetsmåling. Delrapport 3: Mikrofon-accelerometermetoden.
- Rapport nr. 123, 1984: *Bent Andersen & Karsten Bo Rasmussen*
Vejtrafikstøj i boligkarreers gårde. Måling og beregning.

- Rapport nr. 124, 1985: *Karsten Bo Rasmussen*
The Effect of Wind and Temperature Gradients on Sound Propagation Outdoors.
- Rapport nr. 125, 1985: *Björn A.T. Petersson*
An Introductory Study of Acoustic Consequences of Technical Installations in Buildings, in particular Elevator Installations.
- Rapport nr. 126, 1985: *Per Rønnedal og Palle Voss*
Multiplansbalancering.
- Rapport nr. 127, 1985: *Per Rønnedal og Palle Voss*
Modalanalyse.
- Rapport nr. 128, 1985: *Birgit Rasmussen*
Optimering af lydisolation for 3-lags termoruder.

Assistance ved
montage af vinduer: Robert Mortensen og Birgitte Mann
Assistance ved
målinger: Robert Mortensen
Tegninger: Birgitte Mann
Maskinskrivning: Birgitte Mann
Trykning: Tekst & Tryk A/S
Indbinding: Hans Meyers Bogbinderi

© Lydteknisk Institut, 1985.