



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

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



Rapport

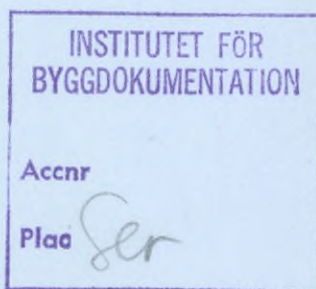
R57:1987

**Strukturdämpning i
tunnplåtsbjälklag**

Några undersökningar

Jürgen König

R
AW



Byggeforskningsrådet

R57:1987

STRUKTURDÄMPNING I TUNNPLATSBJÄLKLÄG

Några undersökningar

Jürgen König

Denna rapport hänförs till forskningsanslag 821286-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Kungl.
tekniska högskolan, Avd för stålbyggnad, Stockholm.

REFERAT

Vid dimensionering av lätta bjälklag bestående av trä eller tunnplåtsprofiler i samverkan med skivmaterial är oftast det viktigaste dimensionskriteriet bjälklagets dynamiska egenskaper, d v s dess egenskaper m.a.p. vibrationer och svikt. Då tunnplåtsbjälklag har en mycket låg dämpning kan åtgärder som ökar dämpningen vara en lämplig metod att förbättra bjälklagets dynamiska egenskaper. Artificiell dämpning har länge använts exempelvis i flygplansindustrin. I föreliggande rapport presenteras några av metoderna för att förbättra strukturdämpningen medelst utnyttjande av viskoelastiska materials förmåga att omvandla mekanisk energi i värme.

Provningsarna genomfördes huvudsakligen med plattstrimlor i styva och veka riktningen samt även med en hel bjälklagsplatta bestående av trapetsprofilerad plåt och golvipsskivor. Valet av dämpningsmetod, som baseras på viskoelastiska ytbeläggningar med styvt motskikt, styrdes främst av byggpraktiska- och ekonomiska krav. Resultaten visar att metoderna för artificiell strukturdämpning med framgång även kan tillämpas i byggsektorn.

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

R57:1987

ISBN 91-540-4725-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Svenskt Tryck Stockholm 1987

INNEHÅLL

	sid
FÖRORD	5
SAMMANFATTNING	7
1. INLEDNING	9
2. DÄMPNINGSMEKANISMER	12
.1 Materialdämpning	12
.2 Systemdämpning	12
.1 System "dymlad balk"	12
.2 Dämpande ytbeläggningar	13
.1 Fri beläggning	13
.2 Ytbeläggning med styvt kontinuerligt motskikt	13
.3 Ytbeläggning med brutet styvt motskikt	14
3. FÖRSÖK	18
.1 Val av viskoelastiska material	18
.2 Bestämning av dynamiska mekaniska egenskaper för några material	18
.3 Provning av plattstrimlor	19
.1 Allmänt	19
.2 Material och provkroppar	20
.3 Provningsgenomföring och resultat	27
.4 Provning av hel bjälklagsplatta	28
.1 Material och uppbyggnad av provkroppar	28
.2 Provningsgenomföring och resultat	31
.3 Kontrollförsök med plattstrimla	31
4. JÄMFÖRELSE AV TEORETISKA OCH EXPERIMENTELLA RESULTAT	42
5. SLUTSATSER	49
REFERENSER	50

FÖRORD

Inom ramen för forskningsprojektet "Sammansatta konstruktioner - lättbyggnadssystem" genomfördes vid KTH, Avd. för Stålbyggnad, under ledning av docent Per-Olof Thomasson experimentella och teoretiska undersökningar rörande lätta bjälklags dynamiska egenskaper. Arbetet genomfördes med ekonomiskt stöd av Byggeforskningsrådet (BFR-projekt nr 821286-5). Material till provningen har vänligen ställts till förfogande av följande företag:

DOBEL AB, Borlänge,
Gyproc AB, Malmö,
Icopal AB, Malmö,
W.R. Grace AB, Helsingborg.

Valet av bjälklagssystem och utförandet av provkroppar vid provningen har i stor utsträckning påverkats av ett BFR-stött projekt med målsättning att uppföra ett experimenthus i lättbyggnadsteknik (BFR-projekt nr 831495-9 "Lätthus"). Flera av undersökningarna genomfördes i avsikt att ge vägledning för projektering av experimentbygget.

Tillverkning av provkroppar och mätning genomfördes av institutionens laboratoriepersonal under ledning av civ.ing. Åke Jahlenius. Mätningarna vid bjälklagsplattan enligt avsnitt 3.4 och tillhörande utvärderingar av tekn.dr Abdul Mohd Mannan, Institutionen för mekanisk teknologi, KTH. Mätningarna av materialdata enligt avsnitt 3.2 genomfördes av författaren med hjälp av en provningsutrustning som ställdes till förfogande av Institutionen för polymerteknologi, KTH.

Med föreliggande rapport skall arbetet med de berörda frågorna ej betraktas som avslutade. Denna rapport är en redogörelse för de hittills erhållna resultaten. Flera frågor är fortfarande öppna och kräver ytterligare kompletterande undersökningar. Det är min förhoppning att dessa kan genomföras i en snar framtid.

Stockholm i december 1985

Jürgen König

SAMMANFATTNING

Lätta bjälklag, bestående av trä eller tunnplåtsprofiler i samverkan med skivmaterial, dimensioneras i första hand med avseende på styvhetskriterier. I regel är det inte svårt att uppfylla kraven på bärförmåga i brottgränstillståndet. I bruksgränstillståndet är främst bjälklagets dynamiska egenskaper, dvs vibrationer och svikt (dynamisk eftergivlighet) av intresse. De i de flesta byggnormerna införda begränsningarna för den statiska nedböjningen är i själva verket ställföreträdande kriterier för de dynamiska egenskaperna.

Av föreliggande möjligheter att förbättra de dynamiska egenskaperna är de viktigaste att öka böjstyvheten och därmed öka bjälklagets egenfrekvenser och att öka dämpningen. Den sistnämnda åtgärden kan vara framgångsrik särskilt hos bjälklag bestående av tunnplåtsprofiler och skivmaterial, eftersom dessa bjälklag uppvisar en avsevärt sämre dämpning än träbjälklag. Olika möjligheter att åstadkomma en god dämpning i tunnplåtsbjälklag behandlas i denna rapport. Särskild tonvikt läggs därvid på att finna metoder som kan få användning med hänsyn till byggpraktiska krav och god ekonomi.

De metoder på artificiell dämpning som studeras här bygger på viskoelastiska materials förmåga att omvandla mekanisk energi till värme (dissipation) när de utsätts för axial- eller skjvuspänningar.

I kapitel 2 redogörs kortfattat för några metoder av systemdämpning som hittills främst har tillämpats på flygplans- och maskinkonstruktioner. Dessa metoder går ut på att den vibrerande konstruktionsdelen förses med en viskoelastisk beläggning. För att åstadkomma största möjliga skjvuspänningar i beläggningen appliceras ytterligare ett styvt motskikt (t ex damping tapes). Av särskilt intresse är metoden med brutet motskikt enligt Plunkett & Lee (1970), eftersom metoden tillåter skivskarvar vid tillämpning i bjälklag.

Vid de i kapitel 3 redovisade experimentella undersökningarna var det nödvändigt att bestämma de dynamiska egenskaperna hos några viskoelastiska material. För de tre undersökta materialen fanns dels inga uppgifter om materialets dämpning (förlustfaktor) alls, dels endast för frekvenser över 100 Hz. Då dämpningen är frekvensberoende, bestämdes förlustfaktorn vid 10 Hz.

Två av materialen användes sedan vid tillverkning av provkroppar:

1. Dempison (asfalt-polymerblandning, Icopal AB) med stor förlustfaktor och stor skjvmodul
2. Terostat 81 (butylgummi, Teroson) med stor förlustfaktor och mycket liten skjvmodul.

Provkropparna representerade balkstrimlor huvudsakligen i bjälklagets styva och i två fall i den veka riktningen. Den bärande konstruktionen bestod av trapetsprofilerad plåt, kompletterad med gipsskivor av normal och hög densitet i olika utföranden, se TABELL 3:1 och 3:2.

Balkstrimlorna var upplagda på två stöd med spännvidden 4 m. Dämpningen bestämdes genom mätning av balkböjsvängningens loga-

ritmiska dekrement. Resultaten visar att en betydande systemdämpning kan åstadkommas genom val av lämplig metod, se TABELL 3:3.

Det genomfördes även ett fullskaleförsök med en hel bjälklagsplatta 4 x 4 m. Dess egenskaper, både de uppmätta och de subjektivt uppfattbara, var dock sämre än förväntat vid jämförelse med motsvarande plattstrimlas egenskaper. Ytterligare undersökningar är således nödvändiga för att ta reda på hur de hos plattstrimlor erhållna resultaten kan överföras till en hel bjälklagsplatta.

I kapitel 4 genomförs en jämförelse av experimentella och teoretiska resultat. En parameterstudie genomfördes för att undersöka felkänsligheten vid beräkningarna och belysa dämpningsmekanismen.

1. INLEDNING

En typisk egenskap hos lätta konstruktioner, och då särskilt hos lätta bjälklag, är att deras bärförmåga är mycket stor i förhållande till deras styvhet. Vid praktisk tillämpning är det inom husbyggnadsområdet således oftast styvhetskriterierna som är dimensionerande. Med lätta konstruktioner menas här sådana som är uppbyggda av lätta byggmaterial som trä, träbaserade och andra skivor, tunnplåtprofiler och material såsom t ex mineralull, som förutom sin primära uppgift även kan ha en förstyvande verkan.

Lätta bjälklag har i form av träbjälklag traditionellt använts inom husbyggnad i Sverige och är i småhus dominerande i dag. I och med lättbyggnadsteknikens expansion uppstod önskemålet att kunna tillämpa den även i flervåningshus. Ett annat önskemål var att kunna öka spännvidden hos bjälklagen för att slippa bärande mellanväggar. Bjälklagens styvhetsgenskaper, statiska och dynamiska, blev således en bestämmande faktor i vilken utsträckning lätta byggsystem skulle kunna användas.

Den dynamiska styvheten är av avgörande betydelse för ett bjälklags svikt, dvs dess dynamiska eftergivlighet, och dess vibrationsegenskaper. Vid övergång från trä till tunnplåt i den bärande konstruktionen har betydelsen av vibrationsegenskaperna snarast ökat. Orsakerna till detta belyses i det följande.

Vibrationsegenskaperna hos ett bjälklag är huvudsakligen beroende av dess lägsta egenfrekvens, dess dämpning och lastfördelande förmåga i riktningen tvärs huvudbärriktningen. Som ställföreträdande kriterium kan användas nedböjningen under en punktlast med ogynnsammaste placering, se exempelvis den svenska byggnormen SBN 1980. Genom val av tillåten nedböjning sker en anpassning till olika konstruktioners och byggmaterials dämpning.

Genom arbetet av Ohlsson (1982 och 1984) har svikt- och vibrationsgenskaper hos lätta bjälklag blivit ytterligare belysta. I den första av skrifterna presenteras forskningsresultat, medan den andra är en handledning om dimensionering för lätta bjälklag med hänsyn till dess dynamiska egenskaper. För bjälklag med spännvidder upp till 4 m föreslår Ohlsson (1984) som kriterium bjälklagets impulshastighetsrespons h' som funktion av dämpningskoefficienten σ_0 , se FIG 1:1.

Impulshastighetsresponsen är bjälklagets respons på stötartad belastning och huvudsakligen beroende av egenfrekvenserna under 40 Hz och massan. Dämpningskoefficienten är produkten av den relativa dämpningen ζ och den lägsta egenfrekvensen f_1 . Ett bjälklags egenskaper med hänsyn till respons på impulslast kan således förbättras genom att minska värdet för impulshastighetsresponsen h' , främst genom ökning av böjstyvheten i den svaga riktningen, eller genom ökning av dämpningskoefficienten σ_0 . Denna påverkas i tämligen ringa grad av ökning av böjstyvheten i den starka riktningen. Alternativet är att förbättra bjälklagets dämpning avsevärt genom konstruktiva åtgärder. Eftersom dämpningen i tunnplåtsbjälklag är avsevärt sämre än i träbjälklag, kan en förbättrad dämpning vara ett lämpligt sätt att erhålla goda vibrationsegenskaper. Olika möjligheter att åstadkomma högre dämpning undersöks i föreliggande rapport.

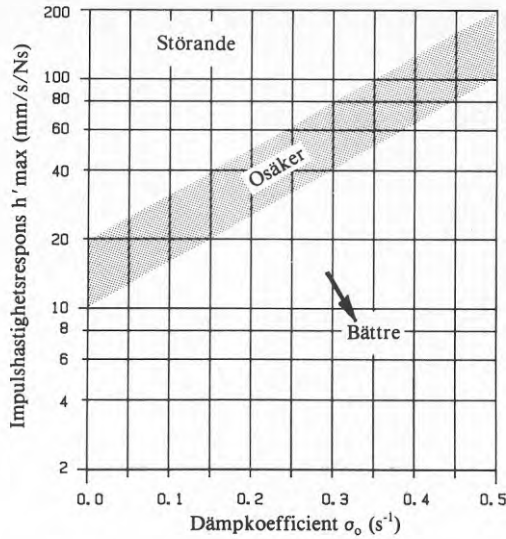


FIG 1:1 Förslag enligt Ohlsson (1984) till kriterium för lätta bjälklag med spännvidder < 4 m

Med dämpning betecknas ett materials eller en konstruktions egenskap att vid en periodisk belastning omvandla en del av formändrings- och kinetiska energin till värme. Denna energiomvandling gör att en fri svängning avtar och slutligen upphör. Dämpning i en konstruktion kan dels förekomma i ett material som materialdämpning, och dels i förbindningarna, t ex genom friktion eller i limförband. Dessa former av dämpning finns i alla konstruktioner, i regel som en oavsiktlig gratis egenskap, som har en önskvärd inverkan på en konstruktions vibrationsegenskaper. Sedan några decennier har tekniker utvecklats att planmässigt förbättra dämpningen i konstruktioner. Man talar därvid om systemdämpning eller strukturdämpning, se Harris & Crede (1976), Chapter 37. Syftet var oftast en ljuddämpning (t ex i bilkarosser eller fartyg) eller minskning av spänningsamplituderna vid resonanssvängningar i maskiner eller flygplan. Dessa åtgärder går ut på att dels förse konstruktionen eller delar därav med viskoelastiska ytbeläggningar eller mellanliggande skikt, dels att utforma konstruktionen så att friktion mellan olika delar uppstår och därigenom en energiomvandling uppnås.

Hos byggnadskonstruktioner har dynamisk dämpning tillämpats för att minska svängningsamplituderna vid resonans. Vid denna form av dämpning omvandlas inte någon rörelse- och formändringsenergi till värme utan energi "flyttas" till andra frekvenser. Denna form av dämpning kräver noggrann avstämning och förekommer därför huvudsakligen hos tunga konstruktioner som till exempel broar, torn m m. Lätta bjälklag torde vara svåra att avstämna, då massan ej längre domineras av egenvikten och resonansfrekvensen därför starkt påverkas av den nyttiga lasten.

Att förse en konstruktion inom lättbyggnadsområdet med optimal systemdämpning möter speciella problem. Medan man hos maskin- och

flygplanskonstruktioner kan dimensionera tämligen fritt på grund av att konstruktionen lättare kan anpassas och speciella åtgärder ej har samma inverkan på kostnaderna, möter man begränsningar inom lättbyggnadsområdet, där storleken av ingående komponenter oftast är modulanpassade och långtgående styrs av hanterings- och transportkrav. Då byggmetoderna allmänt är mycket "primitiva", jämfört med tillverkning av maskiner och flygplan, innebär speciella konstruktiva åtgärder ofta stora kostnadsökningar. Det är därför viktigt att systemdämpning uppnås i konstruktioner byggda med i dag använda byggnadsmaterial som har visat sig beprövade och konkurrenskraftiga. I föreliggande rapport beskrivs därför metoder som kan vara lämpliga med hänsyn till byggpraktiska krav.

2. DÄMPNINGSMEKANISMER

2.1 Materialdämpning

Den i detta sammanhang viktigaste formen av materialdämpning är den viskoelastiska dämpningen. Fenomenet är utförligt beskrivet i t ex Harris & Crede (1976), Chapter 36, Flügge (1967) och Lazan (1966). Nedan redogörs för de viktigaste begreppen.

När ett viskoelastiskt material utsätts för en periodisk sinusformad belastning med cirkelfrekvensen ω , uppträder en eftersläpning med fasvinkeln φ mellan spänning och töjning. Denna egenskap hos viskoelastiska material kan matematiskt beskrivas med hjälp av den komplexa talteorin.

Spänningen kan delas upp i två komponenter och uttryckas enligt följande linjära viskoelastiska spännings-töjningssamband

$$\sigma(t) = E' \varepsilon_0 \sin \omega t + E'' \varepsilon_0 \cos \omega t \quad (2.1)$$

Den komplexa elasticitetsmodulen beskrivs som

$$E^* = E' + i E''$$

där * markerar att det är en komplex storhet och består av lagringsmodulen E' och förlustmodulen E'' . Den första svarar för materialets styvhet, medan den andra svarar för dess dämpningsförmåga. Som materialets förlustfaktor betecknas

$$\eta = \frac{E''}{E'}$$

Mellan fasvinkeln eller förlustvinkeln φ och förlustfaktorn η gäller sambandet

$$\eta = \tan \varphi$$

Samma förhållanden gäller även för skjuvbelastning. Den komplexa skjuvmodulen är således

$$G^* = G' + i G''$$

Både E' och E'' respektive G' och G'' är beroende av temperatur och frekvens, se exempelvis Harris & Crede (1976), Chapter 36, och Lundin (1982). Av detta skäl är vissa viskoelastiska material som används för ljuddämpning mindre lämpliga för vibrationsdämpning av bjälklag, där huvudsakligen låga frekvenser är mest besvärande.

2.2 Systemdämpning

2.2.1 System dymlad balk

Av en balks olika svängningsformer - transversal-, longitudinal- och torsionssvängningar - är hos bjälklag endast transversal-svängningar av intresse. En svängande balk på två stöd kan

föreses med strukturdämpning genom att den genom delning föreses med en skjuvvek fog där skjuvspänningar är stora. Limförbandet mellan de två balkdelarna utförs då med ett viskoelastiskt lim, se FIG 2:1.

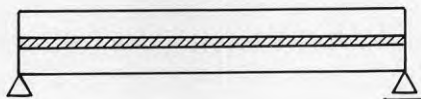


FIG 2:1 "Dymlad" balk med viskoelastiskt skjuvförband

Vid böjsvängningar skjuvdeformeras det viskoelastiska skiktet, och energiförlusten i detta förorsakar dämpningen. Eftersom samverkan av de båda balkdelarna är ofullständig, erhålls strukturdämpningen på bekostnad av en del av böjstyvheten. Detta kan ha en oönskad effekt, då dämpningskoefficienten σ_0 härvid påverkas negativt till följd av att balkens egenfrekvens sjunker.

Metoden för optimal dimensionering av det viskoelastiska skiktet är utvecklad av Sylwan (1978) och formlerna angivna även av Ohlsson (1982). Metoden är lämpad att finna användning hos lätta bjälklag.

2.2.2 Dämpande ytbeläggningar

2.2.2.1 Fri beläggning

Metoden att dämpa böjsvängningar i tunn plåt genom ytbeläggning med viskoelastiska material utvecklades av Oberst (1952). När plåten böjdeformeras, aktiveras normalspänningar i beläggningen. Deras storlek är mycket beroende av beläggningens elasticitetsmodul, varför endast viskoelastiska material med stor styvhet används, t ex asfaltbeläggningar. Metoden är bäst lämpad för ljud- och vibrationsdämpning av tunnplåt, t ex i bilkarosser.

2.2.2.2 Ytbeläggning med styvt kontinuerligt motskikt

Den viskoelastiska ytbeläggningen kan ytterligare föreses med ett tunt styvt skikt. Detta ger upphov till skjuvspänningar i det viskoelastiska skiktet när grundkonstruktionen böjdeformeras, se FIG 2:2. Dämpningen äger rum endast i det viskoelastiska skiktet, och motskiktets enda uppgift är att skapa förutsättningar för skjuvspänningar i mellanskiktet. Styvhetsökningen av hela konstruktionen förutsätts vara försumbart liten. Vid obrutet motskikt är dämpningens storlek starkt beroende av våglängden, se Kerwin (1959). Metoden tillämpas genom användning av "damping tapes", vilka är självhäftande metallfolier med viskoelastiska limskikt, främst hos flygplan och maskinkonstruktioner.

Metoden med obrutet motskikt är förmodligen mindre lämpad för stora konstruktioner som bjälklag på grund av att tillverkningen försvåras avsevärt. Det har inom ramen för detta arbete inte undersökts om motskikt av metall kan vara lämpliga.

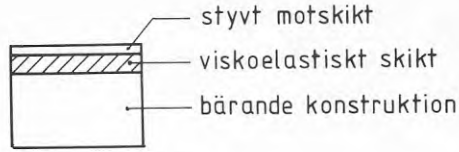


FIG 2:2 Balktvärsnitt med dämpande beläggning och styvt motskikt

2.2.2.3 Ytbeläggning med brutet styvt motskikt

Ett typiskt lättbjälklag av tunnplåt är sammansatt av t ex profiler i huvudbärriktning och kompletterande regler och skivor av mindre format för att åstadkomma styvhet även i tvärriktning och bilda undertak och undergolv. Det är möjligt att utnyttja de konstruktiva nackdelarna som skivskarvar innebär för att erhålla en optimal strukturdämpning genom att använda metoden med ytbeläggningar och brutet styvt toppskikt. Metoden utvecklades av Plunkett & Lee (1970) och behandlar utföranden med både ett och flera lager, se FIG 2:3. Formlerna i publikationen avser balkstrimlor, där balkens tvärsnitt är rektangulärt och den dämpande beläggningen och toppskiktet har samma bredd som balken. För att metoden skall kunna användas för andra fall som t ex tunnplåtsp profiler eller trapezprofilerad plåt som bärande konstruktion har formlerna anpassats till dessa förhållanden. För härledningen hänvisas till Plunketts & Lees publikation.

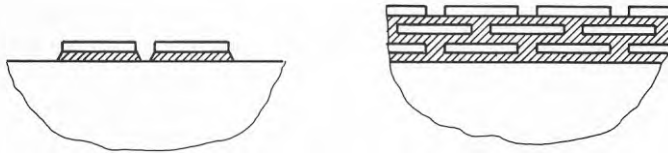


FIG 2:3 Diskontinuerligt styvt motskikt - utförande med ett resp. flera lager

Följande förutsättningar antas gälla:

1. I det styva motskiktet (constraining layer) förekommer endast axialspänningar, i det viskoelastiska skiktet (constrained layer) endast skjuvspänningar.
2. Linjärt viskoelastiskt samband enligt ekv (2.1) gäller.
3. Energiförlusten uppträder endast i det viskoelastiska skiktet.
4. Effekter av tvärkontraktionen (Poissons tal) försummas.
5. Konstant axialtöjning i den bärande konstruktionen vid gränsytan till det viskoelastiska skiktet.

6. Konstant skjuvdeformation i det viskoelastiska lagret i tjockleksriktning.

Skjuvspänningstillståndet i en konstruktion enligt FIG 2:4 och 2:5 är beroende av styvhetsförhållandena. En karakteristisk storhet beskrivs därvid av det komplexa uttrycket

$$B_0^* = \sqrt{\frac{E_2 t_1 t_2 b_2}{G_1^* b_1}} \quad (2.2)$$

som har dimensionen av en längd. Med hjälp av denna beräknas beläggningens effektiva förlustfaktor η_1 för ett element av längden L_1 för fallet att hela motskiktet har samma töjning inom hela längden L_1 . Denna förlustfaktor har storleken

$$\eta_1 = \frac{4\pi}{w} \left[\frac{\sinh A \sin \frac{\varphi}{2} - \sin B \cos \frac{\varphi}{2}}{\cos A + \cos B} \right] \quad (2.3)$$

där $w = \frac{L_1}{B_0}$ den relativa elementlängden

$$A = w \cos \frac{\varphi}{2}$$

$$B = w \sin \frac{\varphi}{2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \eta_G$$

B_0 är därvid det absoluta beloppet av den komplexa storheten B_0^* som erhålls genom insättning av den komplexa skjuvmodulens absoluta belopp G_1 i ekv (2.2). Sambandet mellan förlustfaktorn η_1 , den relativa elementlängden och det viskoelastiska skiktets förlustfaktor η_G visas i FIG 2:6. Förlustfaktorn har sitt största värde för

$w = \frac{L_1}{B_0} \approx 3,2$, dvs den optimala elementlängden är

$$L_1 \approx 3,2 B_0$$

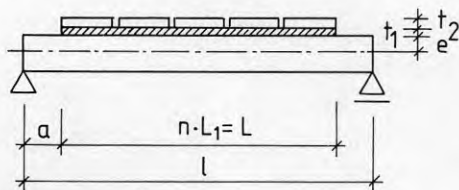


FIG 2:4 Balk på två stöd som bärande konstruktion försedd med dämpande beläggning med styvt brutet motskikt

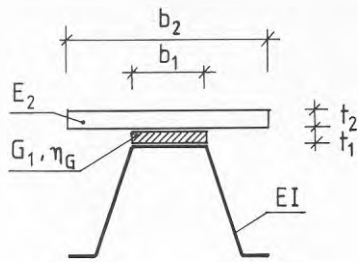


FIG 2:5 Profilerad plåt som bärande konstruktion försedd med dämpande beläggning och styvt motskikt

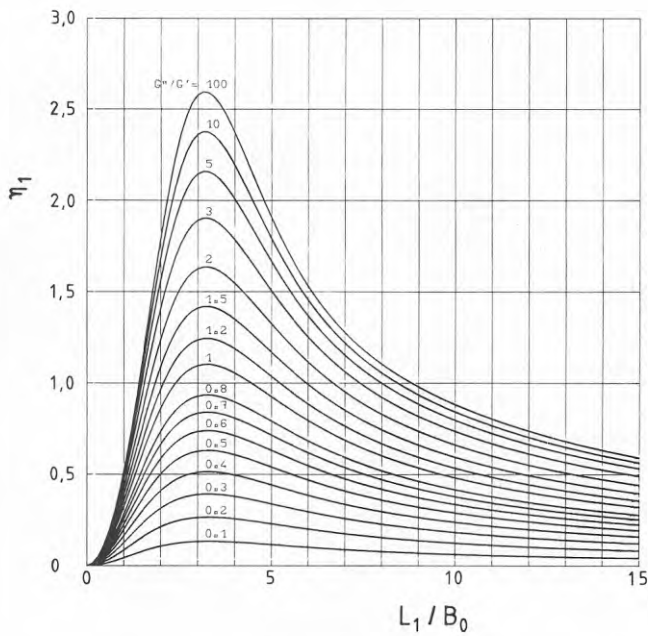


FIG 2:6 Samband mellan den effektiva förlustfaktorn och relativa elementlängden enligt ekv (2.3) enligt Plunkett & Lee (1970)

I den verkliga konstruktionen är förlustfaktorn beroende av den verkliga spänningsfördelningen och beläggnings fördelning. Konstruktionens förlustfaktor beräknas som

$$\eta_L = \eta_1 \frac{E_2 e^2 b_2 t_2}{2 \pi EI} \frac{\int_a^{a+L} \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)^2 dx}{\int_0^L \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)^2 dx} \quad (2.4)$$

där $y(x)$ betecknar balkens elastiska linje.

Vid beläggning inom hela spännvidden blir kvoten av integralerna lika med 1, och uttrycket förenklas till

$$\eta_L = \eta_1 \frac{E_2 e^2 b_2 t_2}{2 \pi EI} \quad (2.5)$$

Vid rektangulärt tvärsnitt för den bärande konstruktionen, dvs $I = b h^3/12$ och $b = b_1 = b_2$ erhålles formlerna angivna av Plunkett och Lee (1970).

Med hjälp av förlustfaktorn kan andra storheter för beskrivning av dämpningen beräknas, se t ex Harris & Crede (1976), Chapter 2 och 36. Det logaritmiska dekrementet Δ och den relativa dämpningen

$\zeta = \frac{c}{c_{cr}}$ beräknas som

$$\Delta = \eta_L \pi \quad (2.6)$$

$$\zeta \approx \frac{\Delta}{2\pi} = \frac{\eta_L}{2} \quad (2.7)$$

3. FÖRSÖK

3.1 Val av viskoelastiska material

På marknaden existerar ett stort antal viskoelastiska material som används för dämpningsändamål. Många av dessa material är dock mindre lämpliga för byggnadskonstruktioner på grund av deras höga pris. Tre material valdes för närmare studium:

1. Dempison A2 och A5, tillverkas av Icopal AB. Används som fri ytbeläggning (se 2.2.2.1) och är en blandning av asfalt och polymerer. Mattorna är självhäftande på ena sidan genom pålagt limskikt. Tjockleken är 2 respektive 5 mm, över andra tjocklekar tillverkas.
2. Terostat 81, tillverkas av Teroson i Tyskland (BRD). Leverantör i Sverige är Grace AB, Helsingborg. Materialet är butylgummi och används som självhäftande tätningband i olika bredder och tjockleken 2 mm.
3. Dämpfolie VS-15, svensk leverantör Swedac AB, Göteborg. Folien består av polymerer och skall limmas fast. Dess tjocklek är 15 mm.

För materialen (1) och (2) var inga värden om deras dynamiska egenskaper kända, medan det finns redovisade värden för materialet (3) endast för frekvenser mellan 100 och 2000 Hz.

3.2 Bestämning av dynamiska mekaniska egenskaper för några material

De dynamiska mekaniska egenskaperna för de tre nämnda materialen bestämdes med hjälp av provningsutrustningen vid Institutionen för polymerteknologi, KTH. Utrustningen bestod av en vibrator (Brüel & Kjaer, System S) som styrs av en kraftförstärkare (Brüel & Kjaer 2208), ett system för optisk registrering av rörelsen (Selspot), en lastcell Bofors typ KRG-4, en mätbrygga (HBM) samt en frekvensanalysator (Schlumberger Solartron 1170). Provnings genomfördes genom att placera cylinderformade provkroppar med diametern 20 mm och höjden 20 mm mellan två styva upplagsplattor och utsätta dem för varierande tryckbelastningar. Frekvensen var därvid 10 Hz. Som mätresultat erhöles elasticitetsmodulen E och förlustvinkeln φ .

Provningsens syfte var att endast få en tämligen grov uppfattning av materialens egenskaper, varför endast en provkropp av varje material undersöktes. Provkropparnas temperatur var 20°. Då rumstemperaturen i provningslokalen var ca 25°, torde provkropparnas temperatur ha stigit något under provningen.

Provningsanläggningen är bäst lämpad för provning av material med god återfjädring. Provkroppen belastas med en förspänning som ger en ihoptryckning av ca 10 %. Den därpå påförda vibrerande belastningen skall vara så liten att provkroppen hela tiden utsätts för tryckbelastning. Detta kan vara svårt, när materialets återfjädring är liten som hos material (1) och (2). Hos material (2) var vidhäftningen mot upplagsplattorna mycket god, vilket gjorde att

provkroppen även kunde utsättas för dragning. Provkropparna uppvisade linjärt beteende, dvs svängningsamplitudens storlek hade försumbar inverkan på resultaten.

Provkropparna tillverkades genom att sätta ihop ett tillräckligt stort antal utstansade runda bricker (material 1 och 3) eller genom formning (material 2).

Materiallets skjuvmodul beräknas som

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

där $\nu = 0,5$, vilket gäller approximativt för de flesta polymerer.

De vid provningen erhållna resultaten redovisas i TABELL 3:1.

TABELL 3:1 Provningsresultat om dynamiska mekaniska egenskaper hos några material för $f = 10$ Hz och temperatur $\approx 20^{\circ}$

Material	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	φ [^o]	$\eta = \tan \varphi$
Dempison A2 (1)	125	42	24,1	0,45
Terostat 81 (2)	0,60	0,20	34,0	0,67
VS-15 (3)	9,5	3,2	14,7	0,26

För de flesta polymerer gäller att förlustfaktorn är ungefär lika stor vid skjuvbelastning som vid dragning och tryck (Cremer & Heckel, 1967).

Provningsresultaten för material (3) ger en god överensstämmelse med resultaten enligt tillverkarens datablad om de där angivna kurvorna extrapoleras.

3.3 Provning av plattstrimlor

3.3.1 Allmänt

Vid planeringen av provningen antogs att ett bjälklags dämpning och egenfrekvenser approximativt kan bestämmas genom att undersöka plattstrimlor i styva och veka riktningen. Med kännedom om böjstyvheten kan sedan de olika egenfrekvenserna beräknas. Provningen av plattstrimlor har fördelen att inverkan av olika åtgärder för förbättrad systemdämpning lätt kan studeras utan att för den skull hela bjälklag behöver byggas.

Syftet med provningarna var undersökningen av systemdämpningen. I första hand skulle inverkan av viskoelastiska material studeras,

men även frågan om sand som fyllnadsmaterial kunde åstadkomma någon dämpning på grund av dess inre friktion.

Föremål för provning var ett bjälklag (se FIG 3:1) bestående av trapetsprofilerad plåt som bärande komponent i huvudbärriktningen. Två lager golvgipsskivor på ovasidan av den profilerade plåten bildar undergolvet och fungerar som lastfördelnde komponent. Bjälklaget kan dessutom kompletteras med ett flytande golv för förbättrad stegljudsisolering. Ett sådant flytande golv kan exempelvis bestå av golvspånskivor upplagda på ett mellanskikt av cellplast och därmed förbättra lastfördelningen vid koncentrerad belastning. Taket består av gipsskivor fastskruvade på fjädrande tunnplåtsreglar som skruvats i trapetsplåtens underflansar. Undertaket är således elastiskt upphängt och förbättrar därmed bjälklagets luftljudsisolering avsevärt.

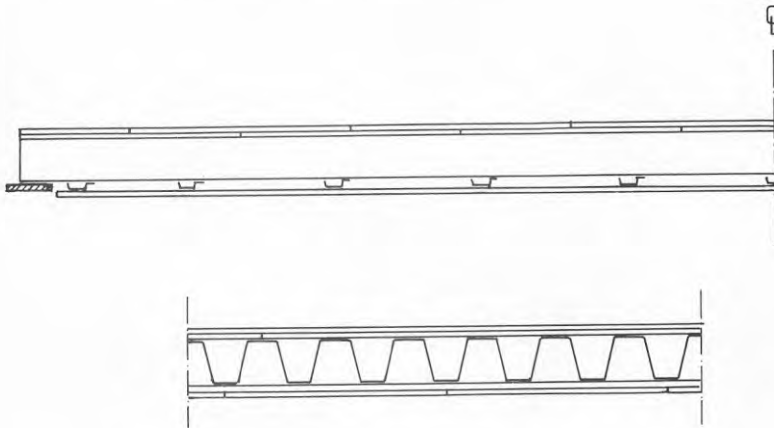


FIG 3:1 Principiell uppbyggnad av tunnplåtsbjälklag bestående av två lager golvgipsskivor, trapetsprofilerad plåt, tunnplåtsreglar och gipsskivor i undertak

3.3.2 Material och provkroppar

Provkropparnas sammansättning beskrivs i TABELL 3:1 och 3:2. Den bärande trapetsprofilerade plåten var profilen TP 120 med nominell plåttjocklek 1 mm (DOBEL). Profilen har följande nominella mått: Flänsbredder 81 resp. 64 mm, höjd 121,5 mm och profildelning 200 mm. En plåt har bredden $3 \times 200 = 600$ mm.

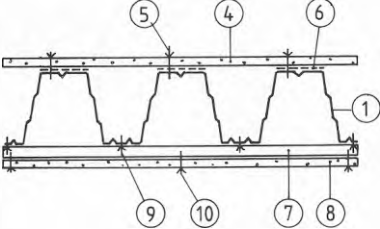
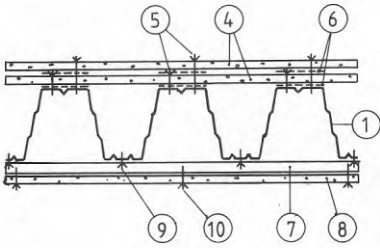
Som regler i undertaket användes isolerregel IR av Gyproc med plåttjocklek 0,56 mm.

Undertaket bildades av gipsplank GP 13 med måtten $600 \times 2400 \times 13$ mm (Gyproc) och undergolvet av golvskira GG med samma mått (Gyproc). Vikten av de två skivtyperna är 20 kg/m^2 (GP) respektive 14 kg/m^2 (GG).

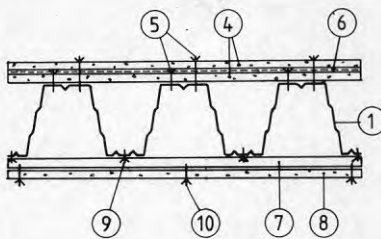
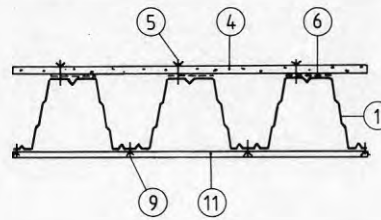
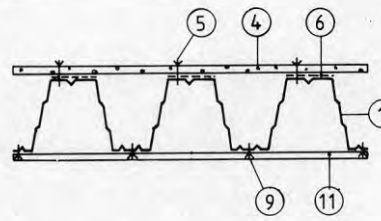
TABELL 3:1 Provkroppar avseende plattstrimlor i styva riktningen

Prov	Beskrivning	
S 1		<p>1 TP 120/1,0 2 Sand 3 Tvärförstyvningar fastsatta med tvingar. I mitten UNP 100, vid ändupp- lag och i fjärdedelspunkterna U-profiler 40x10x1</p>
S 2		<p>1 TP 120/1,0 3 Lika prov 1</p>
S 3		<p>1 TP 120/1,0</p>
S 4		<p>1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, se FIG 3:2a 5 Gipsskiveskruv GG, 9 st/skiva, se FIG 3:3 11 Tvärförstyvningar 40x10x1 i mitten och i fjärdedelspunk- terna fastsatta med tvingar</p>
S 5		<p>1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, se FIG 3:2a 5 Gipsskiveskruv GG, 9 st/skiva 7 Ljudregel IR c 400 8 Gipsplank GN, längs, se FIG 3:4 9 Plåtskruv 10 Gipsskiveskruv d = 3,8 mm</p>
S 6		<p>Material lika prov 5. Skarvarna i (4) är förskjutna med 300 mm, se FIG 3:2b.</p>

Forts. TABELL 3:1

Prov	Beskrivning
S 7	 <p> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, se FIG 3:2a 6 Terostat 81, $t_1 = 2$ mm 7 Ljudregel IR 8 Gipsplank GN, längs, se FIG 3:4 9 Plåtskruv 10 Gipskiveskruv $d = 3,8$ mm </p>
S 8	<p> Samma material som prov 7, dessutom: 5 Gipskiveskruv GG, 3 st/skiva, se FIG 3:3 </p>
S 9	<p> Samma material som prov 7, dessutom: 5 Gipskiveskruv GG, 9 st/skiva, se FIG 3:3 </p>
S 10	 <p> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, skarvarna är förskjutna med 300 mm, se FIG 3:2b 5 Gipskiveskruv GG, underst 9 st/skiva, överst inga 6 Terostat 81, $t_1 = 2$ mm, strimlor 80 mm breda 7 Ljudregel IR 8 Gipsplank GN, längs, se FIG 3:4 9 Plåtskruv 10 Gipskiveskruv $d = 3,8$ mm </p>
S 11	<p> Samma material som prov 10, dessutom: 5 Gipskiveskruv GG, överst 3 st/skiva, se FIG 3:3 </p>
S 12	<p> Samma material som prov 10, dessutom: 5 Gipskiveskruv GG, överst 9 st/skiva, se FIG 3:3 </p>

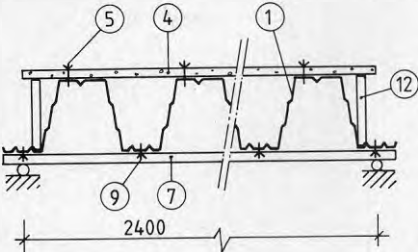
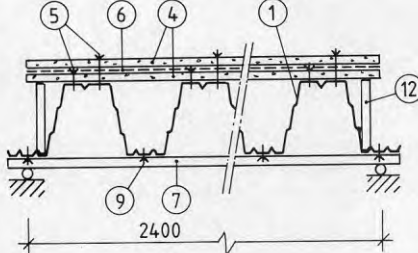
Forts. TABELL 3:1

Prov	Beskrivning
S 13	 <ul style="list-style-type: none"> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, skarvarna är inbördes förskjutna med 300 mm, se FIG 3:2b 5 Gipsskiveskruv GG, underst 9 st/skiva överst 9 st/skiva 6 Dempison A5, $t_1 = 5$ mm 7 Ljudregel IR 8 Gipsplank GN, längs, se FIG 3:4 9 Plåtskruv 10 Gipsskiveskruv $d = 3,8$ mm
S 14	<p>Material som i prov 13, dock:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5 Gipsskiveskruv GG, underst 9 st/skiva överst 3 st/skiva
S 15	<p>Material som i prov 13, dock:</p> <ul style="list-style-type: none"> 5 Gipsskiveskruv GG, underst 9 st/skiva överst inga skruv
S 16	 <ul style="list-style-type: none"> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, längs, se FIG 3:2c 5 Gipsskiveskruv GG, c 200 6 Terostat 81, $t_1 = 2$ mm 9 Plåtskruv 11 Tvärförstyvningar c 400
S 17	<p>Material som i prov 16, dock utan skruv (5)</p>
S 18	 <ul style="list-style-type: none"> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG, tvärs, se FIG 3:2a 5 Gipsskiveskruv GG, 9 st/skiva, se FIG 3:3 6 Dempison A5, $t = 5$ mm 9 Plåtskruv 11 Tvärförstyvningar c 400

Forts. TABELL 3:1

Prov	Beskrivning
S 19	Beteckningar se prov 18
S 20	<p>10 Gipsskiveskruv $d = 3,8$ mm</p> <p>Övriga beteckningar se prov 18. Gipsskiveskarvarna är inbördes förskjutna med 300 mm, se FIG 3:2b</p>
S 21	<p>12 Limfog</p> <p>Övriga beteckn. se prov 18. Gipsskiveskarvarna är inbördes förskjutna med 100 mm, se FIG 3:2d. Gipsskivorna ej limmade i överlappet.</p>

TABELL 3:2 Provkroppar avseende plattstrimlor i vecka riktningen

Prov	Beskrivning
S 22	 <p data-bbox="740 310 1097 519"> 1 TP 120/1,0 4 Gipsskiva GG 5 Gipsskiveskruv GG, 3 st per skivans bredd i varje överfläns 7 Ljudregel IR, 3 st c 400 9 Plåtskruv 12 Bräda Provkroppsbredd 1,2 m </p>
S 23	 <p data-bbox="740 639 1160 768"> Samma material som i prov 22, dessutom: 6 Dempison A5 Provkroppens bredd 1,2 m </p>

Vid infästningen av plåtreglarna i den trapetsprofilerade plåten användes självborrande skruv typ P 14-Gy (Gyproc). För infästning av golvgipsskivorna användes gipsskiveskruv typ GG med diameter 4,2 mm, för infästning av gipsplank i undertaket gipsskiveskruv med diameter 3,8 mm. Två olika viskoelastiska material användes, dels material (1) Dempison A5 med tjocklek 5 mm, dels material (2) Terostat 81 med tjocklek 2 mm, se 3.1.

Vid ihoplimning av gipsskivorna i prov S 21 användes golvlimet Casco 3442 som fördelades över ytan med tandad spatel.

Hos alla provkroppar med Dempison som mellanskikt avlägsnades den tunna plastfilmen på materialets ovansida. Hos prov S 13 limmades den övre gipsskivan mot asfaltskiktet med hjälp av kallasfalt. Då en stor mängd lösningsmedel (lacknafta) skulle avdunsta vid limfogens härdning, väntades 24 dygn innan provningen genomfördes. För att undvika långa väntetider hos övriga prover med Dempison ströks hos dessa undersidan av gipsskivorna med kallasfalt. Efter ca en timme hade kallasfalten torkat, och gipsskivorna monterades. Vidhäftningen mot Dempison var god med avseende på skjuvning, dock kunde gipsskivorna lätt avlägsnas igen, då inga större dragkrafter kunde överföras i limförbandet.

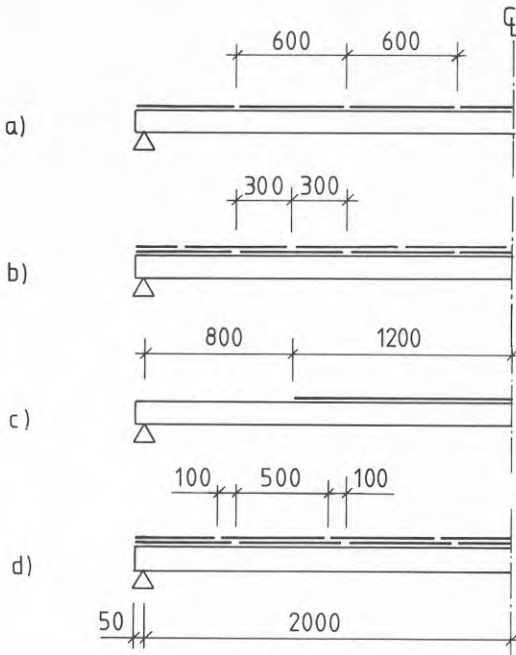


FIG 3:2 Placering av gipsskivorna i över- och undergolv

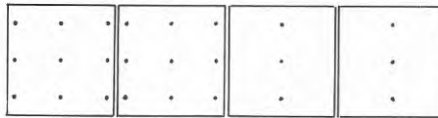


FIG 3:3 Skruvplacering vid montage av gipsskivorna i undergolv vid 9 resp. 3 st per skiva 600 x 600

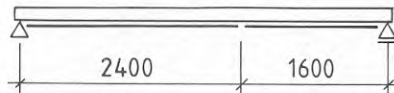


FIG 3:4 Skarvläge för gipsplank i undertak

Samma bärande trapetsprofilerade plåt kunde användas i flera provkroppar. Vid tillverkningen av provkropparna avseende plattstrimlor i styva riktningen stod 3 stycken plåtar till förfogande. Plåt (1) användes vid prov S 1 till S 15, plåt (2) vid prov S 16 och S 17 och plåt (3) vid prov S 18 till S 21.

Hos provkropparna avseende plattstrimlor i veka riktningen sammanfogades 4 st plåtar med längden 1,2 m i underflänsarna med självborrande byggskruv $d = 6,3$ mm och skruvavstånd 500 mm. Provkropparnas spännvidd var således 2,4 m och deras bredd 1,2 m. Övriga materialuppgifter redovisas i TABELL 3:2. Provkropp S 23 erhöles genom att komplettera provkropp S 22 med ytterligare material.

3.3.3 Provningsgenomföring och resultat

Provkropparna var upplagda på två stöd med spännvidden 4 m. Med hjälp av en gummiklubba påfördes en impulslast i provkroppens mitt. Provkroppens respons registrerades med hjälp av en accelerometer (Brüel & Kjaer, typ 4370), en laddningsförstärkare (Brüel & Kjaer, typ 2635) samt ett minnesoscilloskop (Nicolet, typ 2090-3). Accelerometern placerades i mitten, hos prov S 1 till S 13 även nära ena kanten. För att säkerställa god kontakt mellan accelerometer och provkropp limmades i mätpunkten en plåtbit som bildade underlag för accelerometers magnetfäste. Responsens förlopp, dvs den vertikala förskjutningen i mätpunkten, registrerades under ca 4 sekunder. I FIG 3:5 visas ett typiskt förlopp för responsen, i detta fall för provkropp S 20 som uppvisade den största relativa dämpningen av samtliga provkroppar.

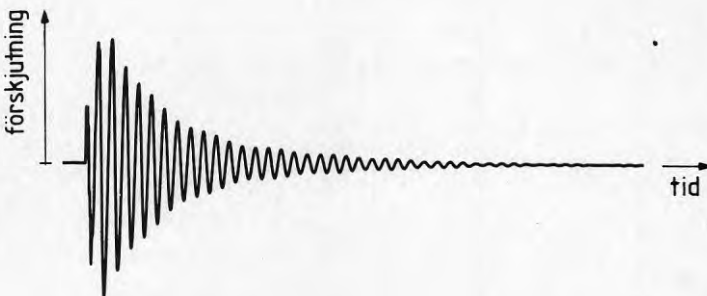


FIG 3:5 Respons för provkropp S 20. Kurvan avser vertikal förskjutning.

Genom att placera accelerometern i provkroppens mitt skulle endast inverkan av de symmetriska moderna registreras, eftersom mätpunkten skulle ligga i noden för de antimetriska moderna. Detta lyckades ej helt då den lägsta böjsvängningsmoden överlagrades av den lägsta torsionssvängningsmoden, vilket förorsakade svagt synliga interferenser, se FIG 3:5. En utvärdering med hjälp av en spektrumanalysator (Hewlett Packard 3582A) visade att inga andra högre moder påverkade responsen i provkroppens mitt nämnvärt.

Provkropparnas statiska böjstyvhet bestämdes genom belastning med vikter i balkmitt med tre laststeg 0,2, 0,4 och 0,6 kN och mätning av mittnedböjningen. Böjstyvheten bestämdes som

$$EI = \frac{P \ell^3}{48 v}$$

där P = punktlast
 v = mittnedböjning

För att erhålla den relativa dämpningen $\zeta = c/c_{cr}$ bestämdes först det logaritmiska dekrementet

$$\Delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_i}{a_{i+n}}$$

där a_i och a_{i+n} är två amplitudvärden och n antalet cykler mellan dessa två värden.

Provningsresultaten är redovisade i TABELL 3:3 och 3:4. Värdena för dämpningen avser ett medelvärde för de första 10 till 15 svängningscyklerna. Hos alla proven visade dämpningsfaktorn en tendens att avta med antalet cykler. Efter ca 35 cykler var dämpningsfaktorns värde oftast endast 70 till 80 % av de angivna tabellvärdena. Resultaten innehåller således en betydande osäkerhet beträffande deras absoluta storlek. I syfte att kunna jämföra olika provkroppars dämpningsegenskaper är detta dock av mindre betydelse.

3.4 Provning av hel bjälklagsplatta

3.4.1 Material och uppbyggnad av provkroppar

För att undersöka om resultaten för plattstrimlorna med avseende på dämpning är representativa för ett helt bjälklag provades även en hel bjälklagsplatta.

Provningsresultaten visade att prov S 20 och S 21 hade de bästa dämpningsegenskaperna. Då utformningen enligt prov S 21 är enklare att tillverka, valdes denna vid tillverkning av ett helt provbjälklag. Bjälklaget monterades på en ram bestående av HE 200A och HE 100A, se FIG 3:6. Det fria avståndet mellan upplagen i huvudbärriktning var 4000 mm och upplagslängden något varierande mellan 40 och 50 mm. Den trapetsprofilerade plåten fästes i varje bottenfläns med en självgående byggskruv $d = 6,3$ mm, vars avstånd från plåtkanten var 20 mm. Plåtens infästning i upplagen längs profileringen gjordes med vardera 9 st skruv $d = 6,3$ mm, dvs delningen var ungefär 500 mm. Sidöverlappen av de sju plåtarna fogades ihop med hjälp av självborrande byggskruv $d = 4,8$ mm med delningen ungefär 500 mm.

Placering av gipsskivorna på plåtens ovansida och principen för skruvplaceringen framgår av FIG 3:6.

TABELL 3:3 Provningsresultat - plattstrimlor i styva riktningen

Prov	m kg/m	$EI/10^{11}$ Nmm^2/m	f Hz	$\zeta = c/c_{cr}$ %
S 1	56,1	-	8,6	0,08
S 2	11,0 ^{a)}	6,76	16,0	0,43
S 3	8,9	6,47	16,6	-
S 4	17,4	6,76	14,6	0,16
S 5	23,3	7,98	12,8	0,18
S 6	31,3	9,71	13,0	0,33
S 7	23,8	7,24	12,2	0,50
S 8	23,8	7,62	13,0	0,40
S 9	23,8	8,02	13,2	0,48
S 10	32,3	8,11	11,6	0,58
S 11	32,3	8,11	11,8	0,81
S 12	32,3	8,31	12,0	1,00
S 13	36,5	8,67	12,3	1,63
S 14	36,6	-	12,2	1,66
S 15	36,6	-	12,1	1,70
S 16	-	-	15,4	0,9
S 17	-	-	15,3	1,2
S 18	19,8	7,80	14,6	1,4
S 19	25,3	-	13,3	2,0
S 20	33,3	8,47	13,2	2,4
S 21	27,7	7,29	12,9	2,2

a) ej jämnt fördelad p g a olika tvärförstyvningar

TABELL 3:4 Provningsresultat - plattstrimlor i veka riktningen

Prov	m kg/m	$EI/10^{11}$ Nmm^2/m	f Hz	$\zeta = c/c_{cr}$
S 22	36,2	0,162	6,5	0,46
S 23	63,2	0,252	6,5	0,87

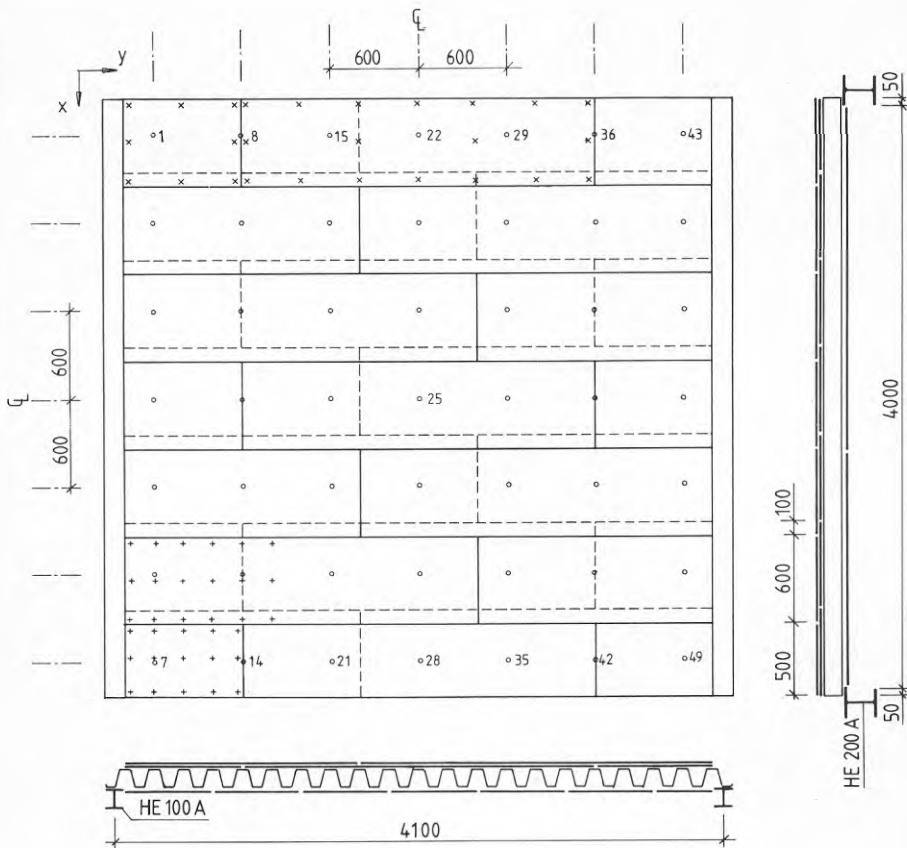


FIG 3:6 Utförande av provkropp P-1 och P-2 med placering av mät-punkter (markerade med o). + markerar principen för skruv-placering av undre lager och x för övre lager gipsskivor. Hos prov P-2 är alla skruvar för övre gipslager i de 100 mm breda överlappen borttagna.

Undersidan av det undre lagret gipsskivor ströks med kallasfalt på samma sätt som vid prov S 21. Skivorna skruvades sedan mot de med asfaltbeläggnings Dempson A5 försedda överflänsarna med gipsskiveskruv typ GG, $d = 4,2$ mm. Där det var möjligt placerades skruvarna så att de hammade i flänsrillans botten, dvs på alla ställen utom närmast skivornas kortändar.

Vid limning av de övre mot de undre gipsskivorna användes limmet Casco 3887, vilket är ett vattenbaserat sättlim. Limmet applicerades i strängar med diameter 4 till 5 mm och strängavstånd 100 mm. På samma sätt som vid prov 21 limmades inte det 100 mm breda överlappet. Det övre lagret gipsskivor skruvades endast för att åstadkomma presstryck för limningen.

Två provkroppsutföranden undersöktes. Provkropp P-1 hade utformningen som beskrivs ovan. Efter provningen avlägsnades alla skruvar inom de 100 mm breda överlappen av golvgipsskivorna, och provkroppen betecknas som P-2.

3.4.2 Provningsgenomföring och resultat

Vid provningen användes följande utrustning:

Modalanalysator HP 5423
 Plotter HP 9872B
 Mät hammare Brüel & Kjaer
 Laddningsförstärkare Brüel & Kjaer 2635
 Accelerometer Brüel & Kjaer 4370

Vid provningen påfördes provkroppen i mät punkt 9 en impuls med hjälp av mät hammaren. Genom att efterhand flytta accelerometern till de olika med fastlimmade plåtbitar försedda mätpunkterna registrerades både belastningens och responsens signaler. Vid varje mätpunkt registrerades responsen av 5 st impulslaster. Modalanalysen genomfördes sedan via FFT-metoden (Fast Fourier Transform).

Ett exempel på frekvensspektrum för accelerationen per kraft i punkt 25 (plattans mitt) visas i FIG 3:7 för prov P-1. En sammanställning av de 4 till 5 lägsta egenfrekvenserna samt tillhörande modal dämpning återfinns i TABELL 3:5. Modalformerna visas i FIG 3:8 och 3:9. För den lägsta egenmoden visas två extremlägen, se FIG 3:8a och 3:9a. Det framgår tydligt att provkroppens kanter längs upplagen utförde stora vertikala rörelser trots att plåtens underflansar var skruvade mot underlaget.

Den lägsta egenfrekvensen och modal dämpningen var betydligt lägre än som kunde förväntats vid jämförelse med resultaten för prov S 21. Enligt försöksledarens subjektiva bedömning var vid gående och springande (hoppande) rörelse på golvet bjälklagets dynamiska egenskaper klart sämre än som kunde förväntas vid jämförelse med balkstrimlan S-21. Därför ändrades provkroppens uppläggnings sätt genom att låsa även provkroppens ovansida i vertikal led vid upplagen i huvudbärriktningen. Därvid passades träbitar in mellan den bärande plåtens överflansar och underlaget. Sedan spändes gipsskivorna och plåten mot träbitarna med hjälp av en stål balk och fyra stycken tvingar längs båda upplagsbalkarna. Försöksledarens subjektiva intryck förändrades inte nämnvärt genom åtgärden. Mätningarna upprepades på samma sätt som förut. Provet betecknas som P-3. De registrerade signalerna tillät dock ingen fullständig modalanalys. För några av mätpunkterna redovisas de två lägsta egenfrekvenserna och tillhörande modal dämpning, se TABELL 3:6. Ett frekvensspektrum visas för punkt 25 i plattans mitt i FIG 3:13.

3.4.3 Kontrollförsök med plattstrimla

För att kunna jämföra resultaten som erhöles med de två olika mätmetoderna, dvs bestämning av dämpningen med hjälp av logaritmiska dekrementet respektive med hjälp av en modalanalys genomfördes även en modalanalys av provkropp S 21. Provet betecknas då som S-21 M-1.

Placeringen av mätpunkterna framgår ur FIG 3:10. Frekvensspektrum av förskjutning i punkt 11 per kraft visas i FIG 3:11 och de två lägsta egenmoderna i FIG 3:12. Den lägsta svängningsmoden har frekvensen 13,28 Hz och 1,87 % relativ dämpning.

Även med denna provkropp genomfördes mätningar efter att provkroppens ändar spänts mot underlaget med hjälp av tvingar och träbitar. Provet betecknas som S-21 M-2.

Utseendet av den lägsta egensvängningsmoden skiljer sig avsevärt från den för prov S-21 M-1, se FIG 3:14. Den lägsta egenfrekvensen är 14,45 Hz och den tillhörande relativa dämpningen 2,10 %. Dessa värden ligger nära värdena för prov S-21 M-1 trots den stora skillnaden av modalformerna.

TABELL 3:5 Egenfrekvenser och modaldämpning för provkroppar P-1 och P-2

Prov	Egenmod nr					
		1	2	3	4	5
P-1	f [Hz]	10,16	13,28	20,70	46,09	58,59
	ζ [%]	0,84	2,51	0,69	2,42	2,39
P-2	f [Hz]	10,16	13,28	15,23	19,92	
	ζ [%]	0,92	3,81	1,76	1,23	

TABELL 3:6 Egenfrekvenser och modaldämpning för några mätpunkter vid prov P-3

Mät punkt	f	
	Hz	ζ %
18	12,8	1,5
	14,7	2,5
24	12,9	1,5
	15,0	2,0
25	12,9	1,2
	15,0	2,0
19	12,9	1,2
	14,9	2,0

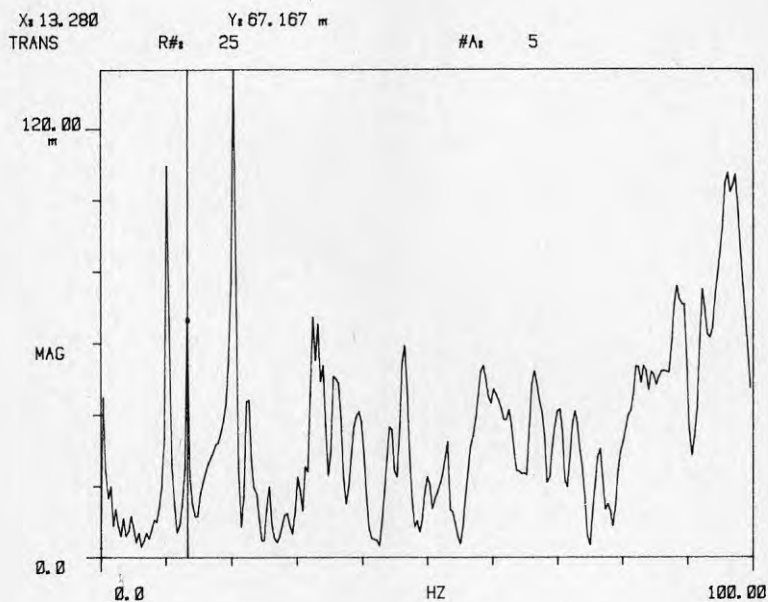


FIG 3:7 Frekvensspektrum för accelerationen per kraft i punkt 25 för prov P-1

Fig 3:8 Modalformer för provkropp P-1

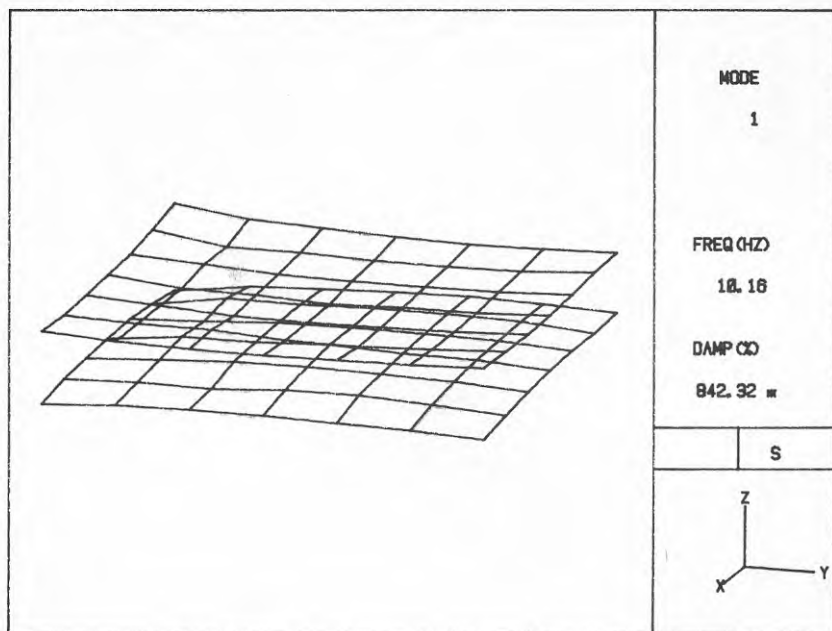


FIG 3:8a

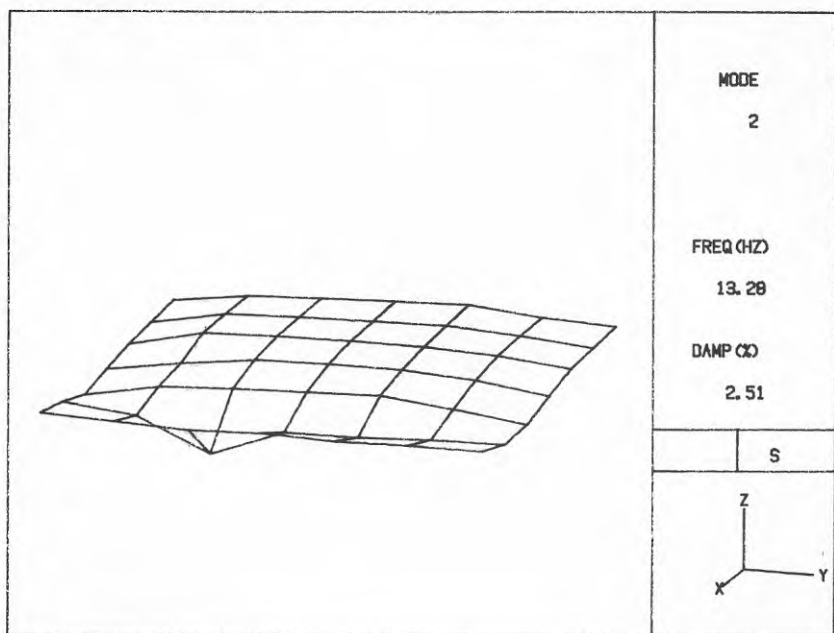


FIG 3:8b

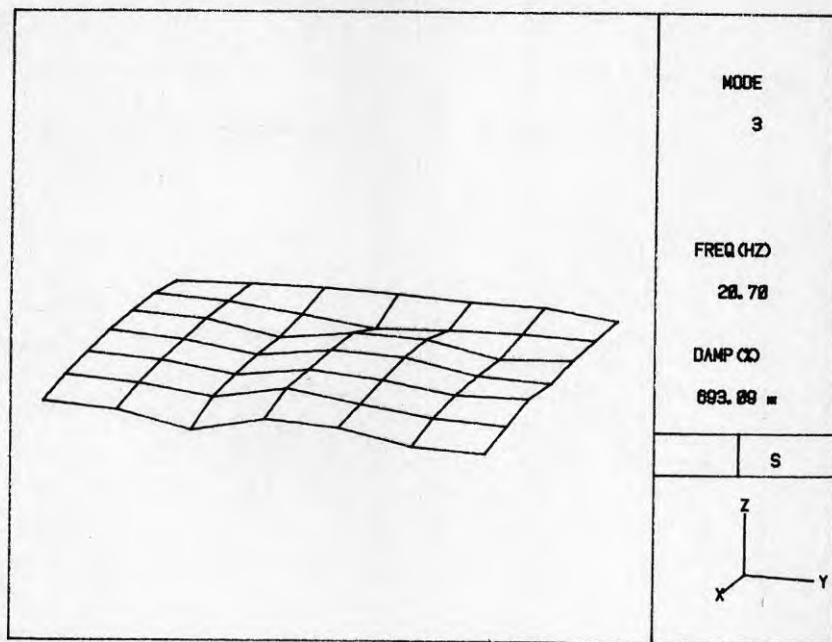


FIG 3:8c

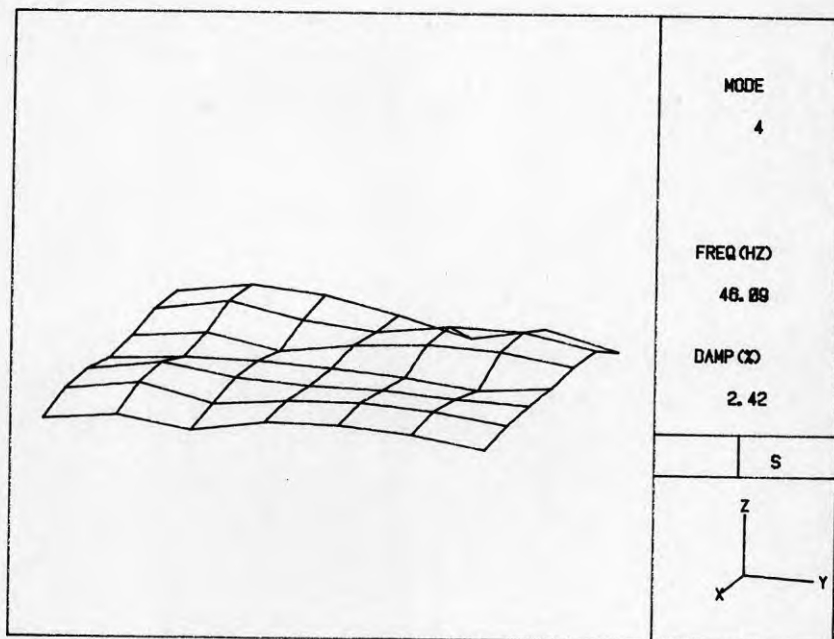


FIG 3:8d

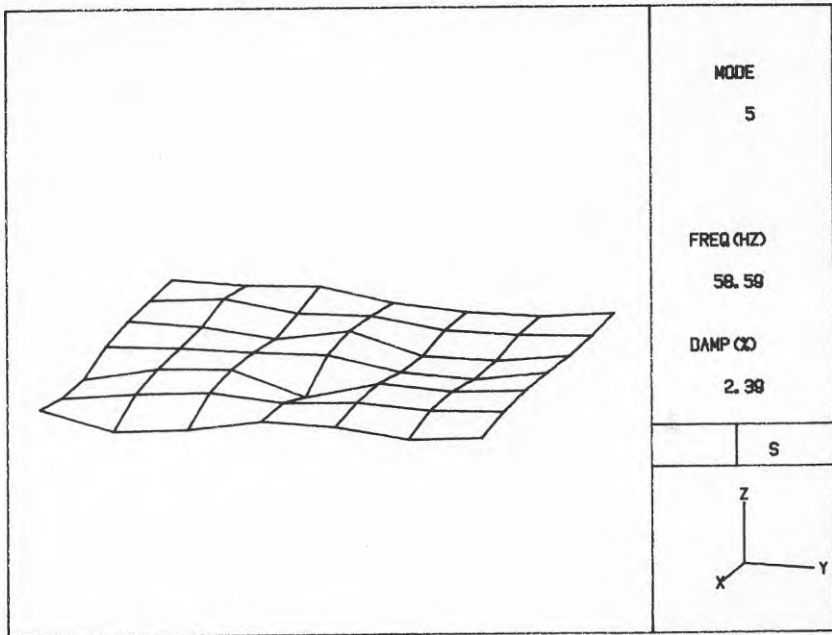


FIG 3:8e

FIG 3:9 Modalformer för provkropp P-2

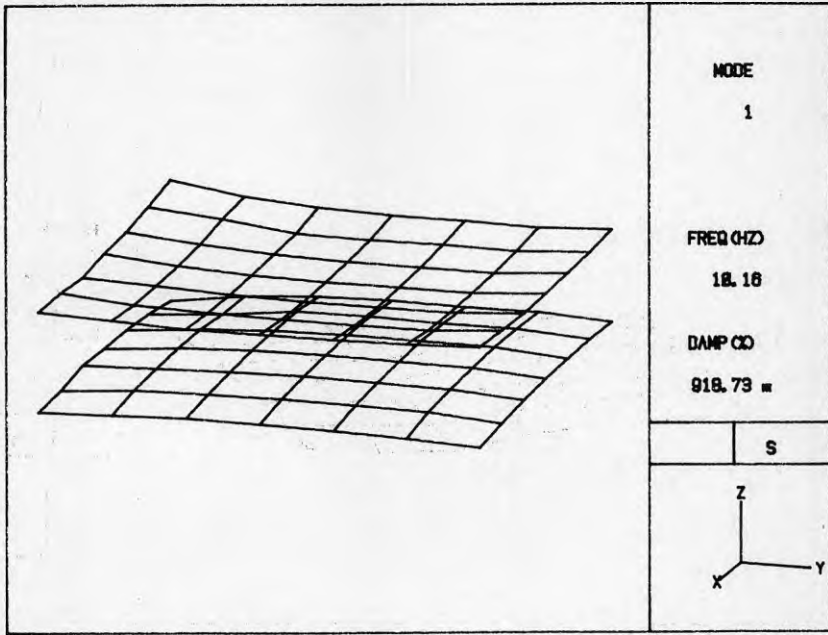


FIG 3:9a

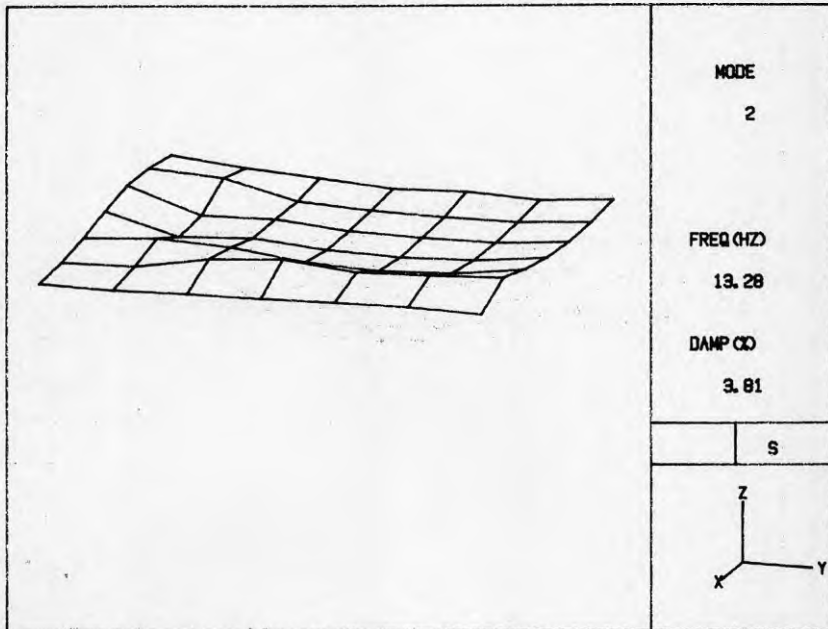


FIG 3:9b

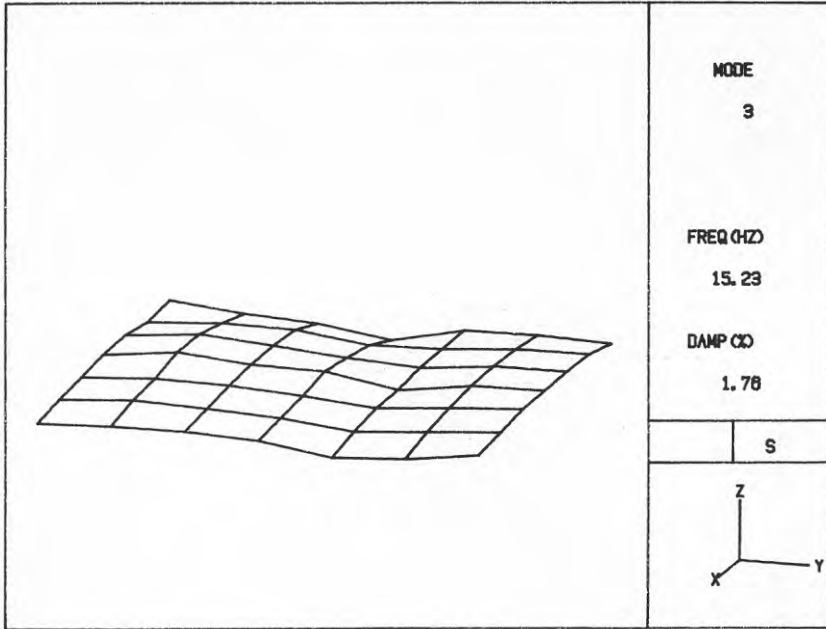


FIG 3:9c

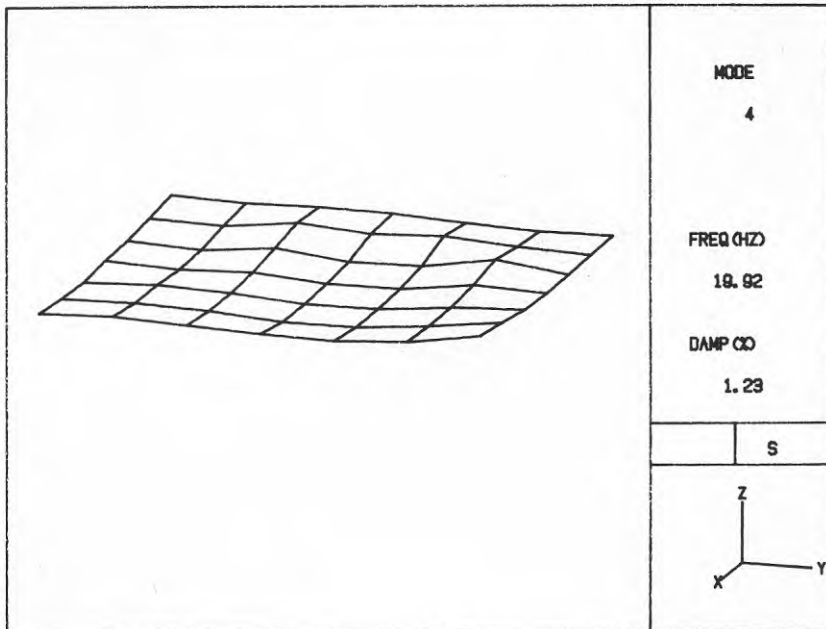


FIG 3:9d

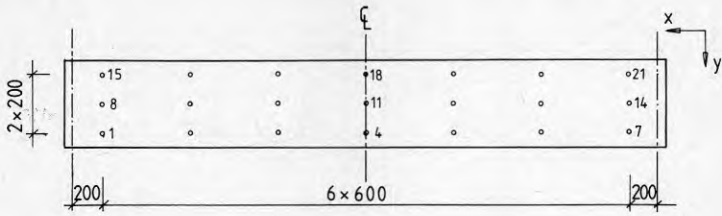


FIG 3:10 Placering av mätpunkter vid prov S-21 M-1

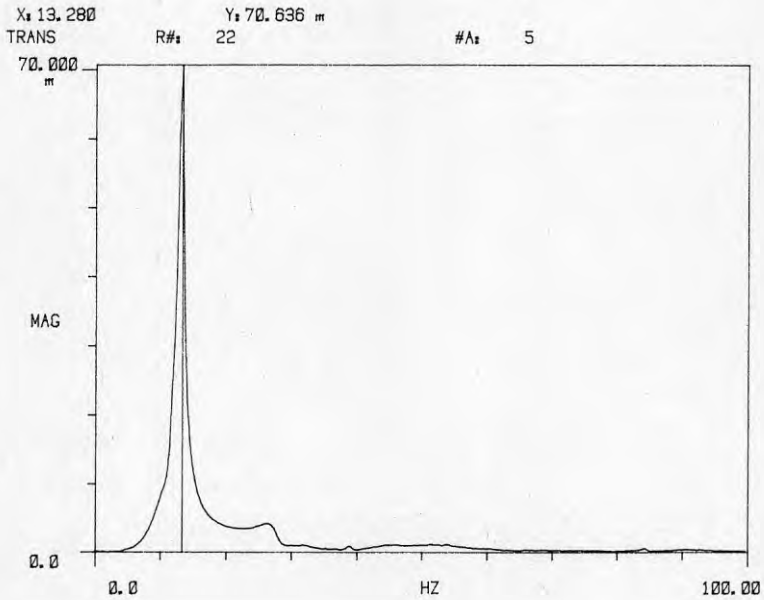


FIG 3:11 Frekvensspektrum för accelerationen per kraft i punkt 11, prov S-21 M-1

FIG 3:12 Modalformer för prov S-21 M-1

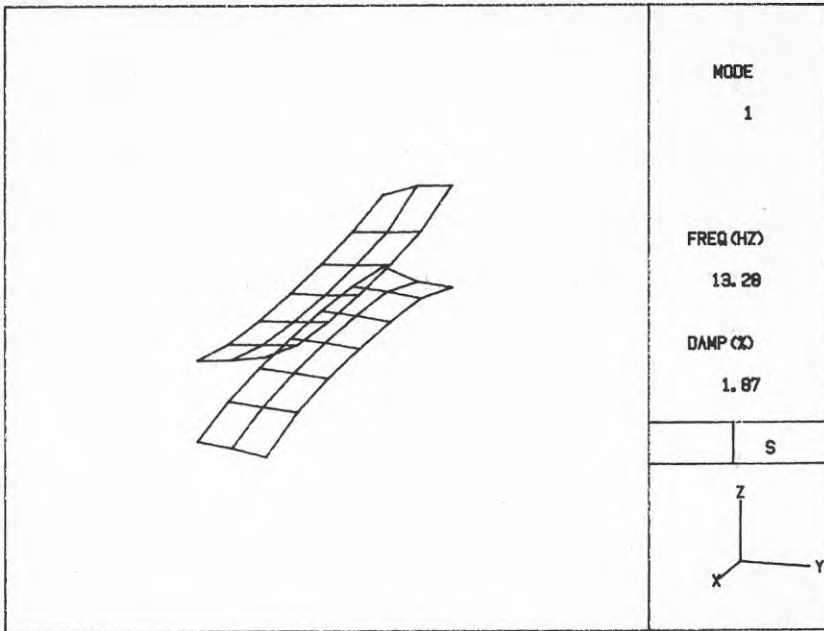


FIG 3:12a

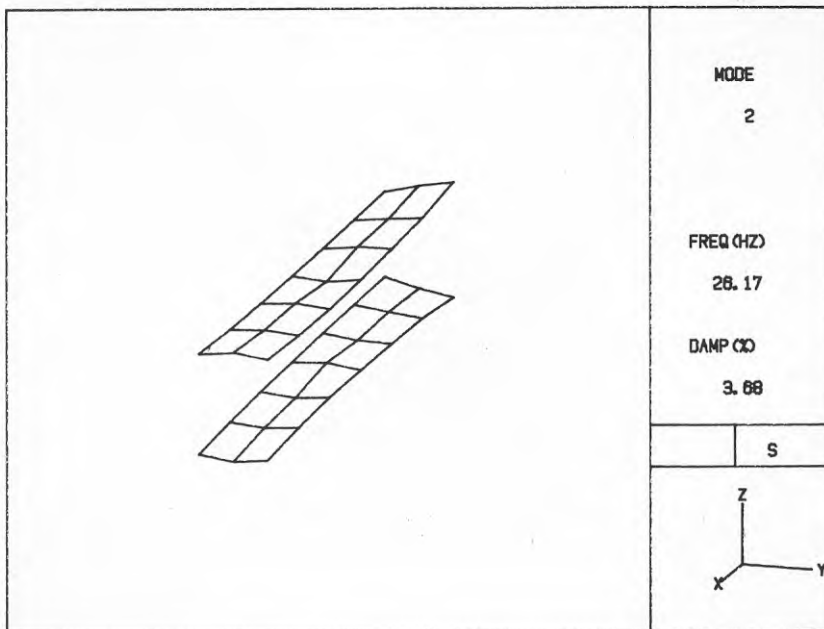


FIG 3:12b

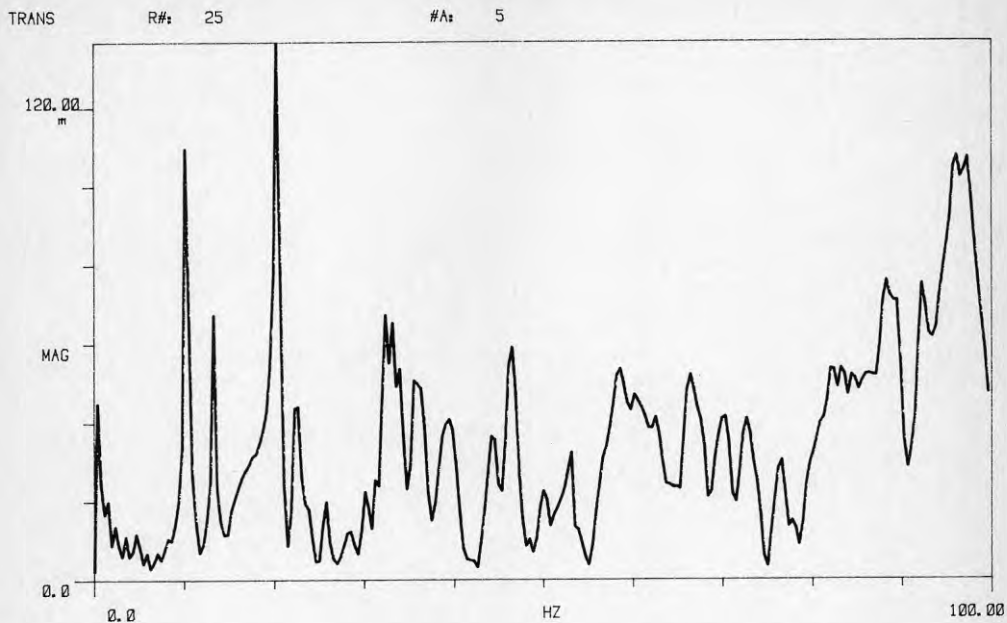


FIG 3:13 Frekvensspektrum för accelerationen per kraft för punkt 25 hos prov P-3

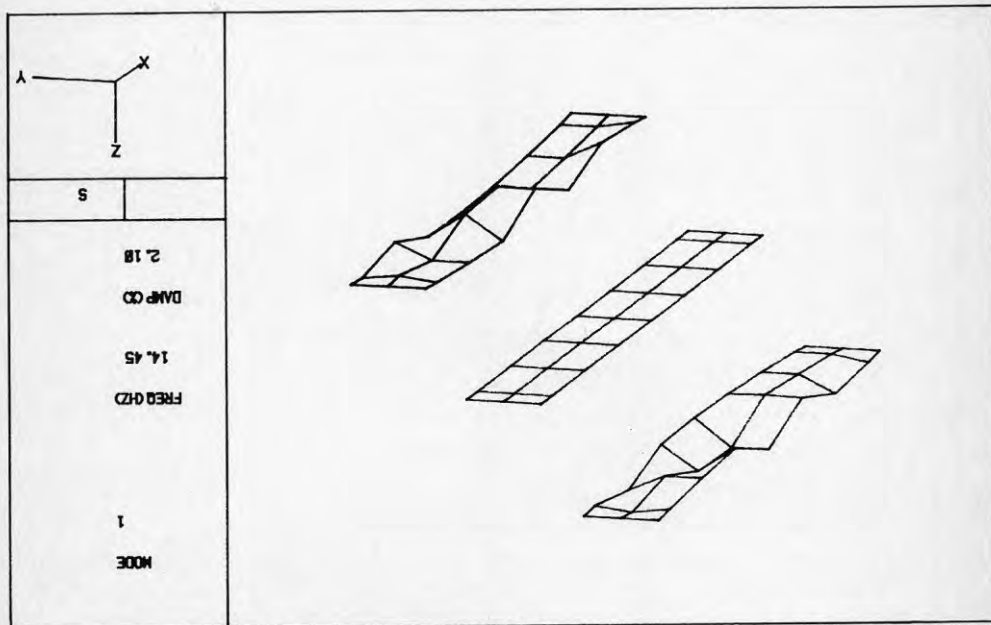


FIG 3:14 Modalform för den lägsta egensvängningsmoden för prov S-21 M-2

4. JÄMFÖRELSE AV TEORETISKA OCH EXPERIMENTELLA RESULTAT

Den lägsta egenfrekvensen för en balk på två stöd beräknas som

$$f = \frac{\pi}{2 l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

En jämförelse av den teoretiska och experimentella uppmätta lägsta egenfrekvensen redovisas i TABELL 4:1. Jämförelsen genomfördes inte för de provkroppar som uppvisade ojämn massbeläggning.

TABELL 4:1 Jämförelse av teoretiska och experimentella värden för den lägsta egenfrekvensen f och relativa dämpningen $\zeta = c/c_{cr}$

Prov	f_{teor} Hz	f_{exp} Hz	$\frac{f_{\text{exp}}}{f_{\text{teor}}}$	ζ_{teor}	ζ_{exp}
S 1	8,18	8,6	1,051		
5	14,06	12,8	0,910		
6	13,39	13,0	0,971		
7	13,26	12,2	0,920	0,11	0,50
8	13,60	13,0	0,956		
9	13,95	13,2	0,946		
10	12,04	11,6	0,963		
11	12,04	11,8	0,980		
12	12,19	12,0	0,984		
13	11,71	12,3	1,050		
14					
15					
16				1,23	0,9
17					
18	15,08	14,6	0,968	1,21	1,4
19					
20	12,12	13,2	1,089		
21	12,33	12,9	1,046	2,36	2,2
		medelvärde	0,987		
		standardavvikelse	0,055		

Den relativa dämpningen beräknades endast för de provkroppar där förutsättningarna för teorins giltighet enligt 2.2.2.3 var uppfyllda. Hos prov S 16, där endast en del av balken var försedd med en dämpande ytbeläggning, beräknades kvoten av de två integraluttrycken i ekv (2.4) till 0,9. Även dessa resultat är redovisade i TABELL 4:1.

För att lättare kunna bedöma noggrannheten hos resultaten för den relativa dämpningen genomfördes parameterstudier. Vid beräkningarna utgicks från parametervärden för provkropparna S 18/S 21 respektive för S 7. Som böjstyvhets EI för plåtprofilen valdes $4,4 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$. Värdena för $t_2 = 22,9$ respektive $33,3$ mm motsvarar dubbla respektive tredubbla gipsskivor med 100 mm inbördes förskjutning. Resultaten för beräkningarna redovisas i FIG 4:1 och 4:2.

Medan överensstämmelsen av teoretiska och experimentella värden är god med avseende på de lägsta egenfrekvenserna, är den varierande med avseende på den relativa dämpningen.

Hos prov S 18 och S 21 har variationen av de undersökta parametrarna endast liten eller försumbar inverkan. Mest påverkas noggrannheten av det beräknade värdet för den relativa dämpningen av ett eventuellt felaktigt värde för gipsskivornas elasticitetsmodul E_2 . Detta värde har inom ramen för dessa provningar ej verifierats, dock visar tidigare mätningar att $E_2 = 5000 \text{ N/mm}^2$ är ett godtagbart värde. Hos prov S 7 där avvikelsen mellan teori och provning är större kan denna skillnad huvudsakligen förklaras med att det mycket låga värdet för det viskoelastiska skiktets skjuvmodul G_2 är tämligen osäkert, jfr FIG 4:2b.

Parameterstudierna visar att en stor relativ dämpning främst åstadkoms genom val av ett mycket styvt motskikt (med styvhets avses axialstyvhets), dvs genom val av ett material med stor elasticitetsmodul E_2 eller en mycket stor skivtjocklek t_2 . Mycket lämpliga material som motskikt är således golvgipsskivor och plywood som har en jämförelsevis hög elasticitetsmodul.

Det i dag mest använda skivmaterialet i trägolv är spånskivor. Elasticitetsmodulen för golvspånskivor är vid låg och korttidsbelastning ungefär 3500 N/mm^2 . Kurvor för beräknad relativ dämpning som kan erhållas för enkelt utförande med 12 respektive 19 mm tjocka skivor visas i FIG 4:1a. Med en skivbredd på 600 mm är det möjligt att uppnå en relativ dämpning på ungefär 1,4 %. För ytterligare förbättrad dämpning krävs utförande med en- eller flerdubbla skivor.

Av avgörande betydelse för möjligheten att kunna utnyttja ett viskoelastiskt materials dämpningsegenskaper i en dylik konstruktion är dess skjuvmodul G_2 , eftersom skivbredden L_1 är begränsad. Som dämpande beläggning med brutet motskikt krävs således ett viskoelastiskt material med stor skjuvstyvhets. Material med liten skjuvstyvhets används med fördel då motskiktet är obrutet eller som viskoelastiskt lim i "dymlade balkar" enligt 2.2.1 och 2.2.2.2.

Inverkan av skruvförbandet mellan golvgipsskivorna och den bärande plåten är något osäker. Dels är variationerna mycket små (jämför prov S 13 till S 15), dels är variationerna stora (jämför prov S 10 till S 12) och dels är de osäkra (prov S 7 till S 9).

I teorin enligt Plunkett & Lee förutsätts att samtliga skjuvkrafter mellan den bärande konstruktionen och motskiktet överförs av

det viskoelastiska skiktet. Då förbandet kompletteras med mekaniska fästelement, tas en del av skruvkrafterna av dessa. Försöksresultaten kan tolkas så att mekaniska fästelement ger upphov till en ökning av den relativa dämpningen, då de används tillsammans med ett mycket skjuvvekt viskoelastiskt skikt (prov S 10 till S 12), medan de ger upphov till en något mindre relativ dämpning då de används tillsammans med ett skjuvstyvt viskoelastiskt skikt (prov S 13 till S 15). Om man antar att skruvarnas primära effekt är en skenbar ökning av G_2 , kan en bekräftelse på detta skönjas i FIG 4:1d och FIG 4:2b, även om provkropparna ej helt motsvarar kurvorna.

Skjuvprovningar genomförda av Andrén & Rehnström (1982) visar att förskjutningsmodulen för en golvgips-tunnplåtsinfästning med gipsskivor $d = 4,2$ mm är 8 kN/mm vid små deformationer. Med ett viskoelastiskt mellanlägg borde förskjutningsmodulen vara något lägre. Om man placerar en skruv per yta 200×200 mm, dvs 9 st per skiva (FIG 3:3), ger skjuvbelastningen 8 kN, dvs 2 N/mm^2 , följande förskjutningar s mellan plåt och gipsskiva:

Material (1) med $G_2 = 42 \text{ N/mm}^2$ och $t_1 = 5$ mm ger $s = 0,24$ mm

Material (2) med $G_2 = 0,2 \text{ N/mm}^2$ och $t_1 = 2$ mm ger $s = 20$ mm

Detta innebär att inverkan av skruvarna åtminstone vid material (2) hos prov S 7 till S 12 kan vara betydande. Det återstår dock en betydande osäkerhet, och ytterligare analys av problemet är nödvändig för en säker bedömning. Av praktiska skäl är det dock sällan möjligt att kunna montera bjälklag av denna typ helt utan mekaniska fästelement.

FIG 4:1 a-d Inverkan av olika parametrar på den relativa dämpningen $\zeta = c/c_{cr}$. Vid beräkningarna användes följande värden:
 $t_1 = 5 \text{ mm}$, $b_1 = 180 \text{ mm}$, $b_2 = 600 \text{ mm}$, $L_1 = 600 \text{ mm}$,
 $E_2 = 5000 \text{ N/mm}^2$, $G_1 = 42 \text{ N/mm}^2$, $\eta_G = 0,45$, $EI = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ N/mm}^2$, $e = 58 \text{ mm}$. Beräknade värden för prov S 18 och S 21 är markerade med en ring.

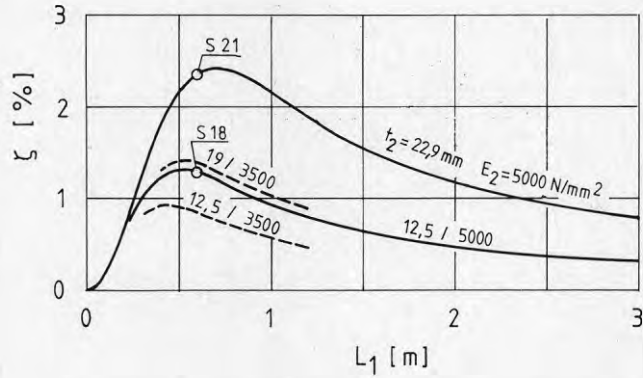


FIG 4:1a

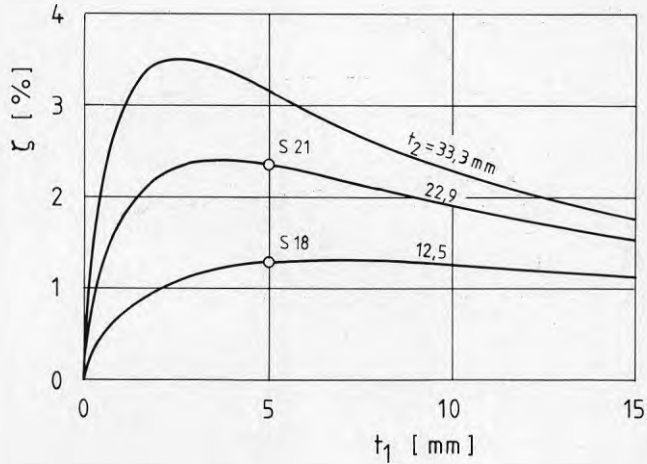


FIG 4:1b

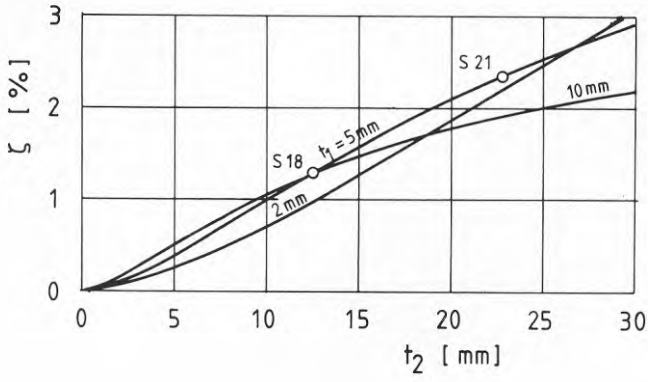


FIG 4:1c

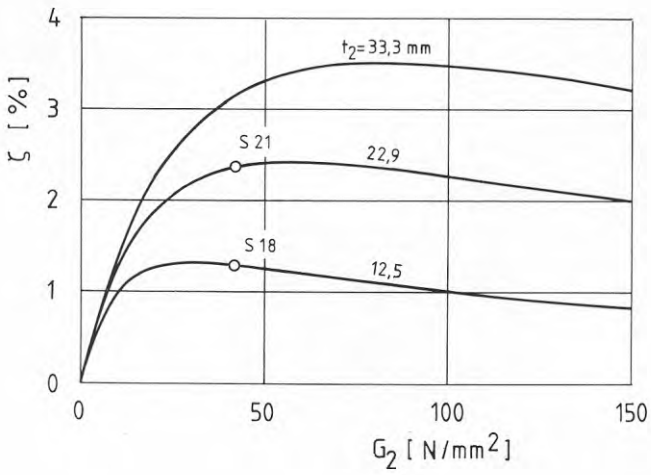


FIG 4:1d

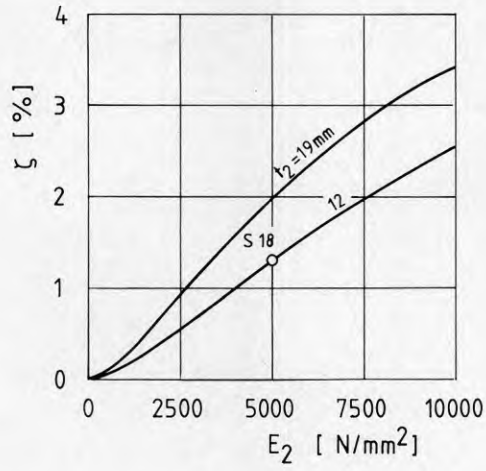


FIG 4:1e

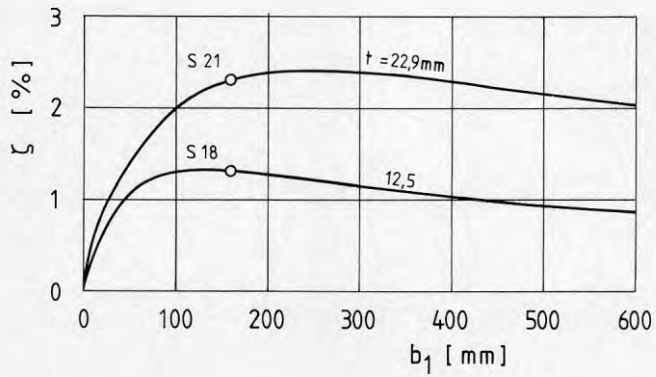


FIG 4:1f

FIG 4:2 a-b Inverkan av olika parametrar på den relativa dämpningen $\zeta = c/c_{cr}$. Vid beräkningen användes följande värden:

$t_1 = 2 \text{ mm}$, $b_1 = 180 \text{ mm}$, $b_2 = 600 \text{ mm}$, $L_1 = 600 \text{ mm}$,
 $E_2 = 5000 \text{ N/mm}^2$, $G_1 = 0,2 \text{ N/mm}^2$, $\eta_G = 0,67$, $EI = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ N/mm}^2$, $e = 58 \text{ mm}$. Beräknade värden för prov S 7 är markerade med en ring.

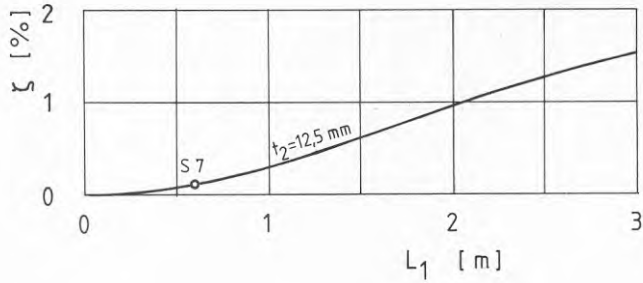


FIG 4:2a

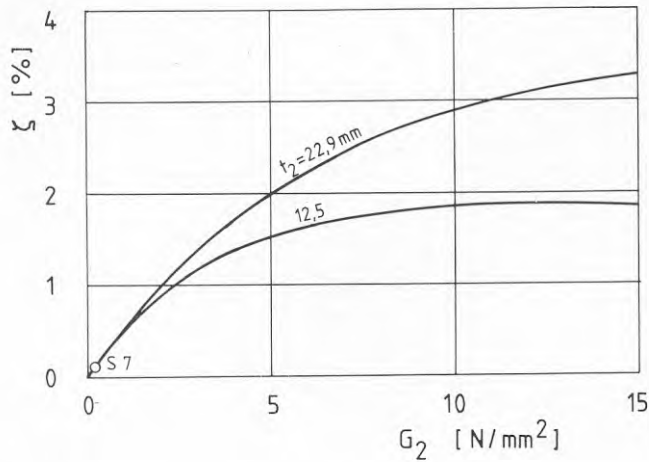


FIG 4:2b

5. SLUTSATSER

De med plattstrimlor genomförda provningarna visar att modaldämpningen kan förbättras avsevärt genom tillämpning av metoden med viskoelastiska ytbeläggningar. Särskilt fördelaktiga är därvid metoder med styvt brutet motskikt. För optimalt materialutnyttjande kan det vara lämpligt att utnyttja skivmaterialet i undergolvet samtidigt som motskikt för den dämpande ytbeläggningen. Provningarna visar vidare att dämpningen i plattstrimlorna i den svaga riktningen är betydligt lägre. Då även böjstyvheten är avsevärt lägre, kan inte några nämnvärda bidrag till dämpningen på grund av böjdeformationer i tvärriktning påräknas.

Provningen visar att en sandfyllning i den trapetsprofilerade plåten inte har någon gynnsam effekt på dämpning av böjsvängningar av hela provkroppen. Sandfyllningen ökar däremot massan och förorsakar därigenom att egenfrekvensen blir lägre.

Undersökningarna med den hela bjälklagsplattan ger inget entydigt svar om hur resultaten, erhållna vid provningen av plattstrimlor, kan överföras till en hel bjälklagsplatta. Det är dock tydligt att randvillkoren kan ha en betydande inverkan. Det är därför nödvändigt att dessa problem studeras ytterligare samt att bättre provningsmetoder används.

REFERENSER

- Andrén, H, & Rehnström, U, 1982, Teoretiska och experimentella studier på kompositbalkar uppbyggda av plåtprofilen TRP 200 och skivmaterial. Examensarbete vid Avd. för Stålbyggnad, KTH.
- Cremer, L, & Heckel, M, 1967, Körperschall. Berlin.
- Flügge, W, 1967, Viscoelasticity. Waltham, Mass.
- Harris, C M, & Crede, C E, 1976, Shock and vibration handbook. New York.
- Kerwin, M K, 1959, Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol 31, No 7.
- Lazan, B J, 1966, Damping properties of materials, members and composites. Appl. Mech. Surveys, Washington.
- Lundin, K, 1982, Dynamic mechanical data of non-reinforced plastics. Dep. of Technical Acoustics, Royal Inst. of Technology, Stockholm.
- Oberst, H, 1952, Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge. Akustische Beihefte, Acustica, H. 4.
- Ohlsson, S, 1982, Floor vibrations and human discomfort. Division of Steel and Timber Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Ohlsson, S, 1984, Svikt, svängningar och styvhet hos bjälklag. Byggforskningsrådet, T20:1984, Stockholm.
- Plunkett, R, & Lee, C T, 1970, Length optimization for constrained viscoelastic damping. Journal of the Acoustical Society of America, 48 (1).
- SBN 1980, Svensk Byggnorm. Statens planverks författningssamling 1980:1.
- Sylwan, O, 1978, Calculation of partially covering damping layers of sandwich structures with some practical results. Internoise 78 (ed. W Lang), Noise Control Foundation, New York.



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 821286-5
från Statens råd för byggnadsforskning till Kungl. tekniska
högskolan, Avd för stålbyggnad, Stockholm.**

R57: 1987

ISBN 91-540-4725-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6707057

**Abonnemangsgrupp:
Ingår ej i abonnemang**

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

Cirkapris: 36 kr exkl moms