



# Förbättrad ljudisolering i modulbyggda konstruktioner Del 4,

inklusive

## Ljudisolering AkuLite

*Slutrapport*

Fredrik Ljunggren  
Luleå tekniska universitet

## Sammanfattning

Lättbyggnadsteknik – inte minst träbyggnader - har under senare påvisat ett ökat intresse såväl nationellt som internationellt. Akustiskt är byggnadstekniken utmanande då den lättare vikten jämfört med t.ex. betongkonstruktioner gör att vissa (låga) frekvenser har lättare att sprida sig i byggnaden vilket kan resultera i sämre ljudisolering.

Rapporterat projekt är dels 1) en direkt fortsättning på föregående ”*Förbättrad ljudisolering i modulbyggda konstruktioner, del 3*” men utgör även 2) en integrering med det nationella forskningsprojektet AkuLite. LTU, avdelning för Drift, underhåll och akustik, har varit ledande i projektet medan Lindbäcks Bygg, Martinsons och Plusshus har medverkat som industriella TCN-representanter. Därtill har Thyréns deltagit som diskussionspartner (konsult via företagen).

Genom huvudsakligen ett experimentellt arbets sätt, inkluderande omfattande mätserier i fält, har kunskapen ökat kring hur de ingående företagens produkter beter sig vibrationsmässigt och akustiskt. Utvecklingen har lett till att Lindbäcks i dag levererar ett byggsystem som uppfyller ljudklass B med avseende på steg- och luftljudsisolering. För Martinsons del är den aktuella prestandan kartlagd och problemen, som för närvarande hindrar bättre ljudisolering, är delvis identifierade.



Organisation: TräCentrum Norr	Författare: Fredrik Ljunggren	Utgåva: 1
Dokumenttyp: Rapport	Filnamn: Kappa.doc	Datum 2013-02-15
		Sida: 3 (9)

## Förord

Denna rapport avser rapportering av projekten *Förbättrad ljudisolering av modulbyggda konstruktioner, del 4* och *Ljudisolering AkuLite*. Arbetet har bedrivits av avdelningen för Drift, underhåll och akustik, Luleå tekniska universitet i samverkan med medlemsföretag inom TräCentrum Norr respektive akademiska- och industriella parter verksamma inom AkuLite under tiden januari 2011 – december 2012

Luleå 2013-02-15

Fredrik Ljunggren

## Innehåll

Inledning	5
Ljudisolering – aktuella krav	5
Syfte och mål	5
Översiktliga resultat	6
Slutsatser och fortsatt arbete	7
Publikationer och akademisk meritering	7
Bilagor	
Arbetsrapporter:	
16. Martinsons – Sammanställning ljudmätningar	
17. Ljud- och vibrationsmätningar, Kv. Brynet, Örebro, Martinsons	
18. Limtester 3	
Konferensbidrag:	
Investigation of the vibration transmission through a lightweight junction with elastic layer using the finite element method	

## Inledning

Aktuellt projekt är i stora delar en fortsättning på projekten *Förbättrad ljudisolering i modulbyggda konstruktioner, del 1-3*. Fokus ligger i att förbättra kännedomen om hur modulbaserade träkonstruktioner fungerar akustiskt.

Lättbyggnadsteknik i trä lämpar sig väl för industriell produktion med givna fördelar såsom minimerad risk för fuktproblem under byggandet, bättre arbetsmiljö, hög måttnoggrannhet samt förkortad produktionstid ute på byggarbetsplatsen. Byggsystemen som länge hade svårt att uppfylla krav beträffande god ljudmiljö klarar numera i flera fall ljudklass B även om marginalerna fortfarande är små. Därför lever ljudisoleringen ibland inte alltid upp till ställda krav varvid dyra förbättringsåtgärder måste vidtas i efterhand. Erfarenheterna pekar på att de hus som klarar moderna krav på ljudklass B, där hänsyn tas till låga frekvenser, överlag ger nöjda hyresgäster.

I projektet har forskning och utveckling skett huvudsakligen med utgångspunkt från två byggnadssystem, Lindbäcks och Martinsons. Lindbäcks använder ett traditionellt regelsystem med kompletterande skivmaterial och producerar färdiga byggnadsvolymer i fabrik. Martinsons levererar korslaminerade väggar och bjälklag, såsom massivträ, för montering på byggarbetsplatsen.

AkuLite är ett flerårigt (december 2009 – april 2013) nationellt forskningsprojekt som involverar svenska universitet, forskningsinstitut, konsulter och tillverkningsindustri. Genom AkuLite, där LTU deltar, har viktiga samarbeteffekter med aktuellt projekt uppkommit. Dels via allmän kunskapsöverföring projekten emellan men även mer precist via modellering av knutpunkter som genomförts i samarbete med LTH (Lunds tekniska högskola).

## Ljudisolering – aktuella krav

I Boverkets Byggregler BBR hänvisas till svensk standard SS 25267:3 för högsta tillåten normaliserad stegljudsnivå och lägsta tillåtna luftljudsisolering i olika klasser. Klass A har det högsta kravet följt av klass B, C och D. Klass C anger den miniminivå som uppfyller Boverkets föreskrifter och ger ”*tillfredställande ljudförhållanden för en majoritet av de boende*”. Klass A och B kan väljas om särskilt goda ljudförhållanden önskas där klass B motsvarar ”*betydligt bättre ljudförhållanden än ljudklass C*” medan klass A motsvarar ”*mycket goda ljudförhållanden*”. Klass D avser bl.a. äldre byggnader.

## Syfte och mål

Projektets huvudsakliga målsättningar, på lång sikt är, och har varit:

- a) *Industritillämpning* – att modifiera befintliga och/eller ta fram nya innovativa kostnadseffektiva konstruktionslösningar som ska möjliggöra en garanterad ljudisolering enligt både klass B och C för samtliga plan i ett flervåningshus, även med de nya ljudkraven, eventuellt även klass A

- b) *Kunskapsbyggnad* (för att uppnå ovanstående) – att utifrån hittills uppmätta data, litteraturstudie, nya mätningar och beräkningar uppnå en fördjupad kunskapsnivå över hur modulsystemet fungerar akustiskt och vibrationsmässigt.

Projektets kortsiktiga målsättning för delprojekt 4:

- Att kartlägga massivträsystemets akustiska egenskaper - förtjänster och brister.
- Detaljstudie och FE-modellering av stomljudsisolering elastomerer.
- Fördjupade analyser av lågfrekvent ljud och vibrationer i modulbyggda konstruktioner
- Att skapa ett samlärande mellan olika byggsystem om ljudisolering i träkonstruktioner.

## Översiktliga resultat

Resultat från utfört arbete redovisas här kortfattat och översiktligt. Utförlig dokumentation finns i de bilagda arbetsrapporterna och konferensbidrag.

### *Martinson – Sammanställning ljudmätningar (Arbetsrapport Nr 16)*

Syftet var att kartlägga hur ett ”typiskt” Martinson-objekt, baserat på det s.k. kassett-bjälklaget, beter sig ljudmässigt. Fem objekt från åren 2008 till 2012 ingick.

Resultaten visade att såväl steg- som luftljudsisoleringen ligger på gränsen mellan ljudklass B och ljudklass C, där ungefär hälften av mätningarna uppnår klass B. För frekvensområdet 125-630 Hz uppvisar konstruktionen en svaghet jämt emot ISO's referenskurva varför detta frekvensområde blir dimensionerande. Förbättringsmöjligheterna bedöms som påtagliga om ljudisoleringen inom detta frekvensområde kan förbättras.

### *Ljud- och vibrationsmätningar, Kv. Brynet, Örebro, Martinsons (Arbetsrapport Nr 17)*

Vibrationsmätningar står i fokus för att få indikationer på hur dessa sprids över knutpunkter i den berörda konstruktionen. Hur stor del av det transmitterade ljudet går direkt genom bjälklaget och hur stor del går via flankerna?

Resultaten tyder på att ljudbidraget från flanktransmissionen (väggar) är av samma storleksordning som det från direktljudet (tak) mellan de två uppmätta lägenheterna i vertikalled. För två frekvensintervall (ett kring 63 Hz och ett kring 400 Hz) överstiger väggarnas sammanlagda vibrationsenergi den från taket. Dessa frekvensområden matchas delvis av de frekvensområden där steg- och luftljudsisoleringen visar negativ avvikelse mot ISO's referenskurvan.

### *Långtidstest av elastiska limmer(3) (Arbetsrapport Nr 18)*

Sex olika limmers dämpande egenskaper har, med start i juni 2009 följt av kontinuerliga uppdateringar fram till december 2012, testats genom att limma ihop provbitar bestående av golvgips och spånskiva. Syftet är att studera hur egenskaperna förändras under lång tid.

Resultaten visar att det finns tydliga skillnader i de olika limmens dämpförmåga och att i flertalet fall avtar dämpförmågan snabbt. Från 6 månader efter applicering och framåt uppvisar fem av de testade limmerna endast marginella förändringar. Ett lim sticker ut med att efter 3½ år erhålla en dämpkvot om ca 6% medan övriga ligger inom intervallet ½-2%.

### *Finita element modellering av knutpunkter* (Konferensbidrag)

Projektet har initierat FE- modellering av vibrationstranmission över knutpunkter med målsättning att kunna optimera egenskaperna hos vibrationsisoleringen mellan volymer. Arbetet har bedrivits operativt av LTH med styrning av LTU. Modellerandet utgår från Lindbäcks konstruktion där golv- och takelementen är inhängda mellan bärande väggar med vibrationsisolering mellan volymer i vertikal riktning. Som alternativ görs bl.a. modeller för 1) *ej* inhängt golv, d.v.s. väggarna står *på* golvet och för 2) dessutom *ej* inhängt tak, dvs taket ligger *på* väggarna. Arbetet har varit mödosamt, inte minst med att finna korrekta materialparametrar. För det ändamålet har materialprover utförts i Spanien med ett samarbetsuniversitet till LTH. I nuläget finns en fungerande modell men fler valideringar mot mätningar, med påföljande modelluppdateringar, krävs för pålitlighet och en reell nytta för industrin.

## Slutstatus och fortsatt arbete

Projektet har arbetat vidare med Lindbäcks (volymelement) och Martinsons (Massivträsektioner) konstruktioner med målsättningen att kunna uppfylla ljudklass B med avseende på steg- och luftljudsisolering. På grund av den spridning som generellt finns i resultat från mätningar i fält måste en viss marginal finnas för att kunna garantera ljudklassen.

Status för de medverkande industriella parterna vid tidpunkt för projektets avslut:

1. *Lindbäcks*: Efter att ha infört ljudförbättrande åtgärder – framtagna inom tidigare TCN delprojekt – i form av effektivare vibrationsisolering och elastiskt skivlim kan det konstateras att konstruktionen uppfyller ljudklass B med nödvändig marginal.
2. *Martinsons*: Konstruktionen uppvisar en balansgång mellan ljudklass B och C. Kartläggning över typiska ljudprestanda har utförts. Problematiska frekvensområden liksom karakteristiska spridningsvägar (med avseende på vibrationer) har identifierats.

Kartläggning av behov av kommande forskning för medverkande industripartners:

1. *Lindbäcks*: Företaget känner sig nöjt med aktuell ljudprestanda. Framöver kan det bli aktuellt med att se över hur vibrationer uppkomma från installationer kan minskas.
2. *Martinsons*: Det finns ett klart önskemål om förbättrade ljustegenskaper – mot ljudklass B – för att öka konkurrenskraften. Det inledande arbetet har påbörjats inom ramen för rapporterat projekt. Nästkommande steg blir att konkret titta på vilka konstruktionsförändringar som kan införas i produktionen för att uppnå ställt krav.
3. *Plusshus*: Har flaggat för en kommande satsning av systemutveckling för flerbostadshus. I det läget är utveckling av goda akustiska lösningar en viktig del.

## Publikationer och akademisk meritering

Inom ramen för projekten – TCN och AkuLite – har LTU publicerat/kommer att publicera konferensbidrag och publikationer i vetenskapliga tidskrifter enligt nedan.

### *Konferenser*

1. F. Ljunggren. Long term effects of elastic glue in lightweight timber constructions, Forum Acusticum, Ålborg, juni 2011
2. F. Ljunggren, A. Ågren. How to match building acoustic measurements with subjective judgements?, InterNoise, New York, augusti 2012.
3. A. Ågren, F. Ljunggren, Flanking transmission in light weight timber houses with elastic flanking isolators, InterNoise, New York, augusti 2012.
4. F. Ljunggren, C. Simmons, K. Hagberg. Findings from the AkuLite project: Correlation between measured (vibro-acoustic) parameters and subjective perception in lightweight buildings, InterNoise, Innsbruck, September 2013.  
(Status: Avser preliminär titel)

### *Vetenskapliga artiklar*

1. F. Ljunggren, A. Ågren, Elastic layers to reduce sound transmission in lightweight buildings, Building Acoustics
2. F. Ljunggren, C. Simmons, A. Ågren, Correlation between measured (vibro-acoustic) parameters and subjective perception in lightweight buildings.  
(Staus: Planerad till våren 2013, preliminär titel avses.)

## Bilagor

- Arbetsrapport Nr 16: Martinsons – Sammanställning ljudmätningar
- Arbetsrapport Nr 17: Ljud- och vibrationsmätningar, Kv. Brynet, Örebro, Martinsons
- Arbetsrapport Nr 18: Limtester 3
- Konferensbidrag: Investigation of the vibration transmission through a lightweight junction with elastic layer using the finite element method



### **Om TräCentrum Norr**

TräCentrum Norr finansieras av de deltagande parterna tillsammans med medel från Europeiska Regionala Utvecklingsfonden (Mål 2), Länsstyrelsen i Norrbottens län samt Region Västerbotten.

Deltagande parter i TräCentrum Norr är: Lindbäcks Bygg AB, Holmen Timber, Martinsons Trä AB, SCA Forrest Products AB, Norra Skogsägarna, Setra Group AB, Sågverken Mellansverige, SÅGAB, Sveaskog AB, Luleå tekniska universitet, Skellefteå kommun och Piteå kommun.

*En investering för framtiden*



EUROPEISKA  
UNIONEN  
Europeiska  
regionala  
utvecklingsfonden



## **ARBETSRAPPORT Nr 16**

**Martinsons – Sammanställning ljudmätningar**

Ingår i TräCetrum Norr:s projekt:  
*Förbättrad ljudisolering i  
modulbyggda konstruktioner*

2012-10-24  
Fredrik Ljunggren  
Avd. för ljud och vibrationer  
Luleå tekniska universitet  
971 87 Luleå  
Tel: 0920-491286  
E-post: fredrik.ljunggren@ltu.se

## **Sammanfattning**

Rapporten omfattar en sammanställning av ljudmätningar över byggnader med Martinsons s k kassett-bjälklag. Fem objekt från mellan åren 2008-2012 ingår.

Mätningarna visar att luft- och stegljudsisoleringen ligger på gränsen mellan ljudklass B och C. Inom frekvensområdet, 125-630 Hz, uppvisar konstruktionen en svaghet genom negativ avvikelse mot ISO:s referenskurvor, vilket gör att detta frekvensområde blir dimensionerande. Klara förbättringsmöjligheter finns om ljudisoleringen vid dessa mellanfrekvenser kan ökas.

## Förutsättningar

Rapporten utgör en sammanställning över ljudmätningar genomförda för Martinsons konstruktion under senare år. Totalt fem olika objekt från 2008-2012 involveras. Både stora (vardagsrum) och små (sovrum) är representerade.

## Syfte

Sammanställningens syfte är att undersöka hur ett ”typiskt” Martinsons-objekt av idag, baserat på det s k kassett-bjälklaget, beter sig ljudmässigt. Då inkluderas att kunna identifiera speciella särdrag och frekvensområden för vidare utveckling mot bättre ljudprestanda.

## Genomförande

Fem objekt har bidragit med data enligt nedan.

Objekt	År	Ort	Antal stegljudsmätningar	Antal luftljudsmätningar
Limnologen	2008	Växjö	4	2
Ejdern	2009	Örkelljunga	2	2
Portvakten	2009	Växjö	10	10
Torghörnet	2010	Östervåla	5	5
Brynet	2012	Örebro	2	1
Totalt			23	20

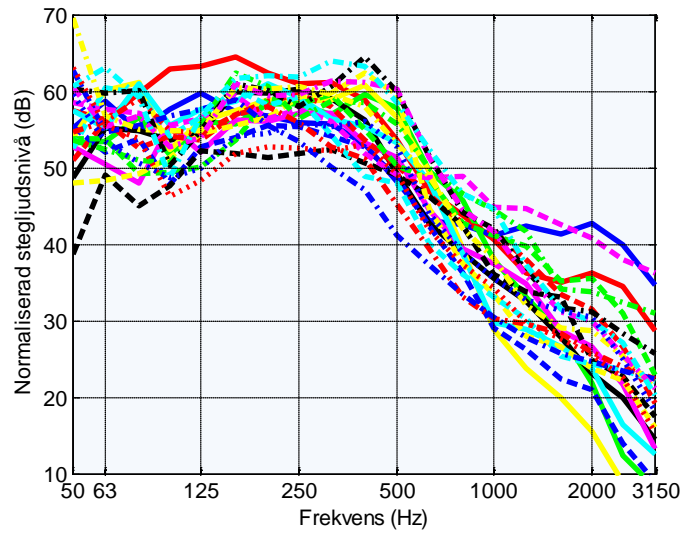
## Resultat

### Stegljud

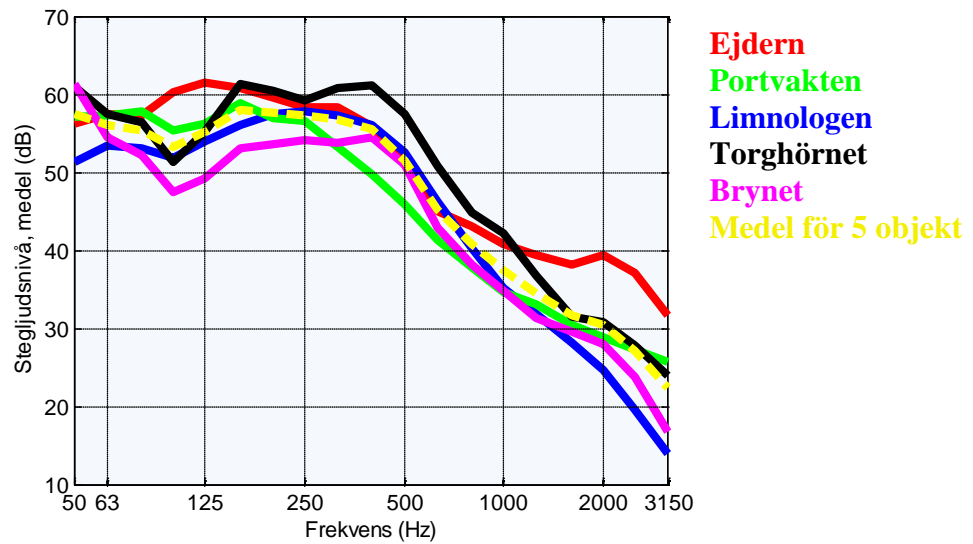
Samtliga stegljudskurvor återfinns i Figur 1. Nivån varierar inom ca  $\pm 8$  dB, något mer för de lägsta frekvenserna (50 Hz) och för de högsta ( $\geq 1250$  Hz).

I Figur 2 visas medelkurvor för respektive objekt och i Figur 3 totala medelvärden baserade på individuella mätningar och baserade per objekt. I den senare kan det ses en svagt fallande nivå för frekvenser 50-100 Hz. I frekvensområdet 125-500 Hz överskrider uppmätta stegljudsnivåer referenskurvan.

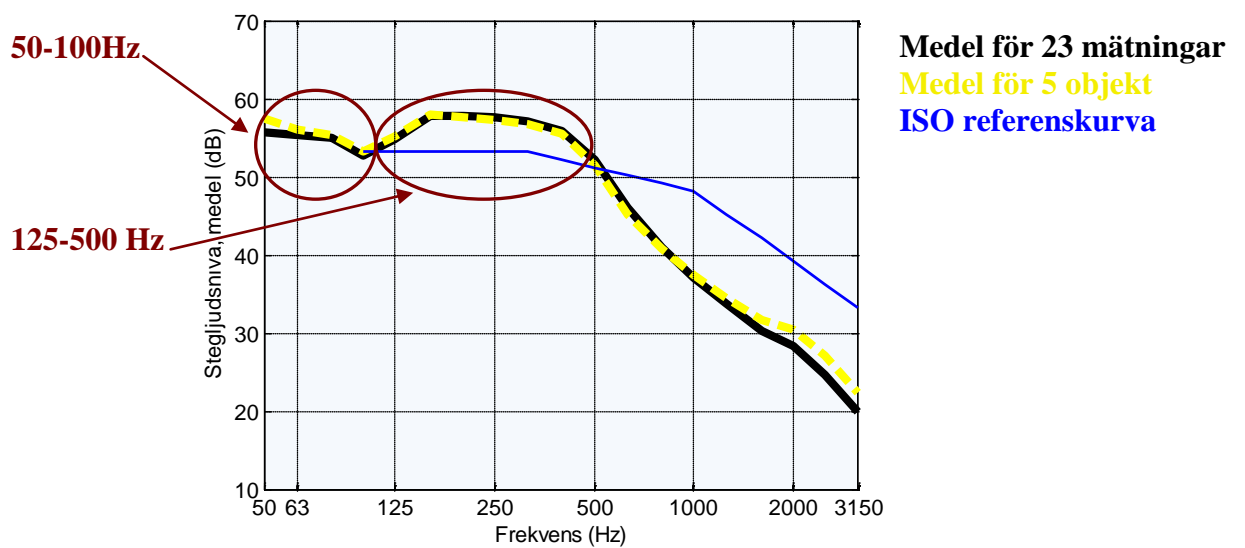
I Figur 4 återfinns sammanfattningsvärdena  $L_{n,w}$ ,  $C_{L,50-2500}$ , och  $L_{n,w}+C_{L,50-2500}$ . I medeltal uppnås 51, 1 respektive 52 dB (avrundat till heltal). Motsvarande standardavvikelse är 2.7, 1.5 och 2.4 dB. Mellan högsta och lägsta uppmätta värden skiljer 10, 5 respektive 11 dB. Det framgår också att av de 23 mätningarna så klarar 1 st ljudklass A, 12 st klass B, 9 st klass C medan 1 st överskrider grundkravet.



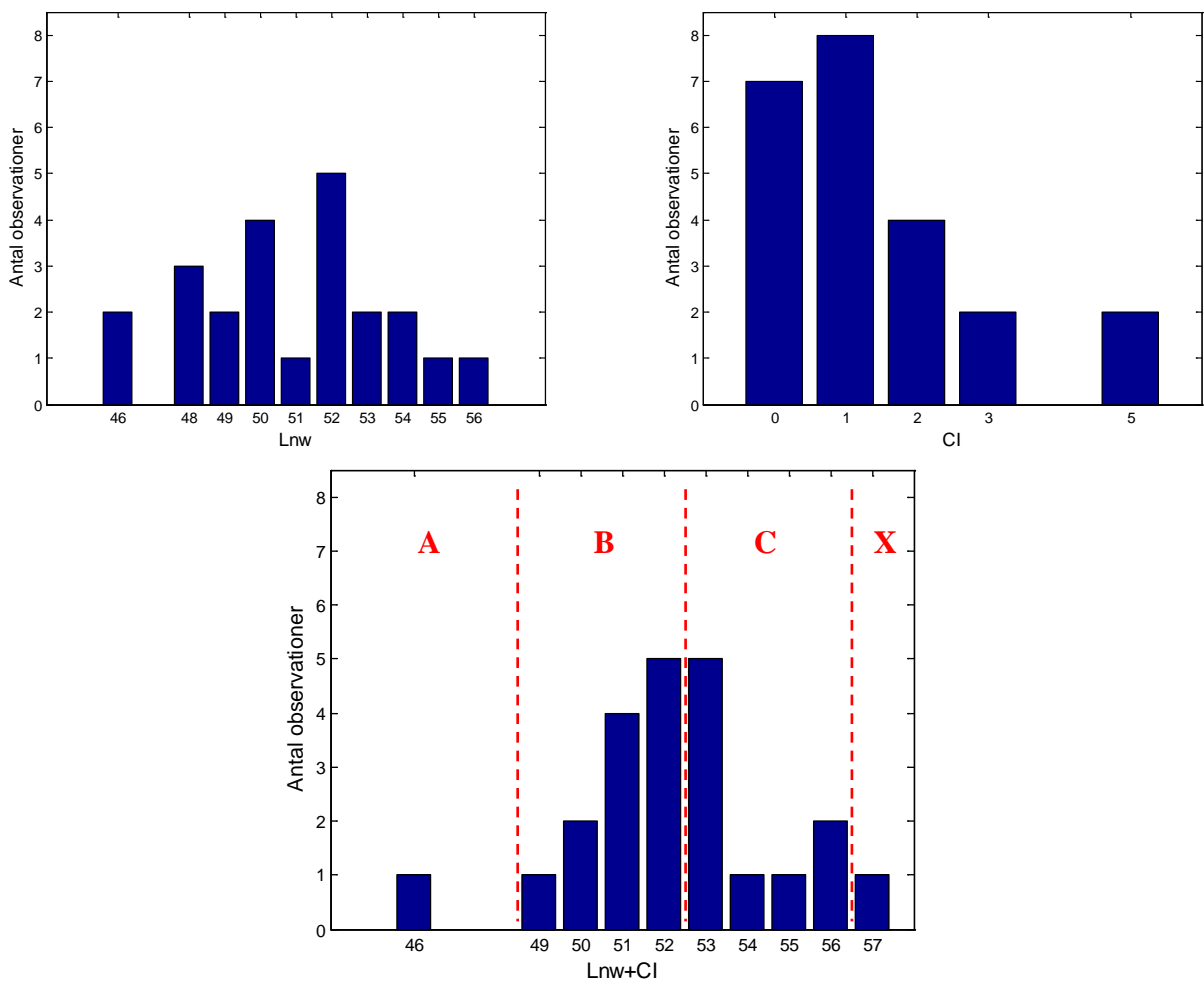
Figur 1. Samtliga stegljudsmätningar, 23 st.



Figur 2. Medelvärden för respektive objekt, stegljud.



Figur 3. Totala medelvärden, stegljud.



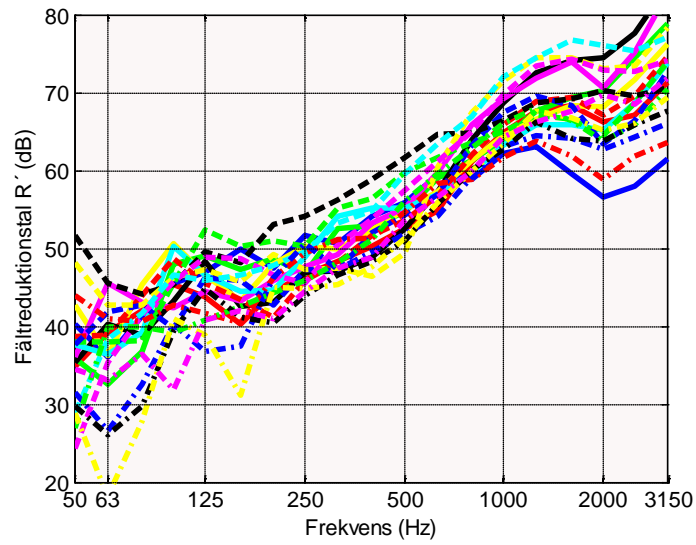
Figur 3. Histogram över  $L_{n,w}$ ,  $C_{1,50-2500}$ , och  $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$ , den senare med gränser för ljudklassning enligt SS 25267.

## Luftljud

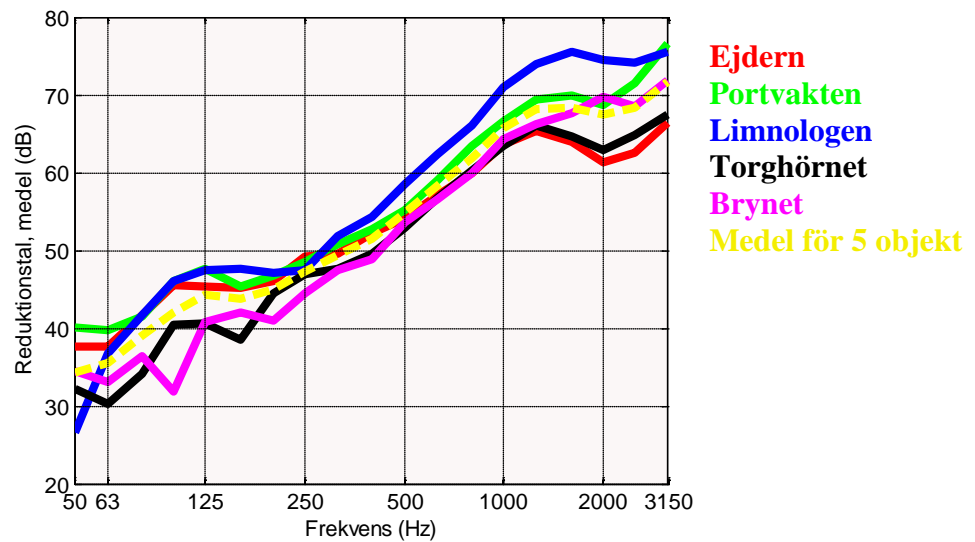
Samtliga luftljudskurvor återfinns i Figur 5. Nivån varierar inom ca  $\pm 10$  dB för de lägsta frekvenserna ( $\leq 160$  Hz) och för de högsta ( $\geq 1600$  Hz). Där emellan är variationen något mindre, ca  $\pm 6$  dB.

I Figur 6 visas medelkurvor för respektive objekt och i Figur 7 totala medelvärden baserade på individuella mätningar och baserade per objekt. I den senare kan det ses ett med frekvens ökande reduktionstal inom 50-125 Hz. I frekvensområdet 160-630 Hz underskrider uppmätta luftljudsnivåer referenskurvan.

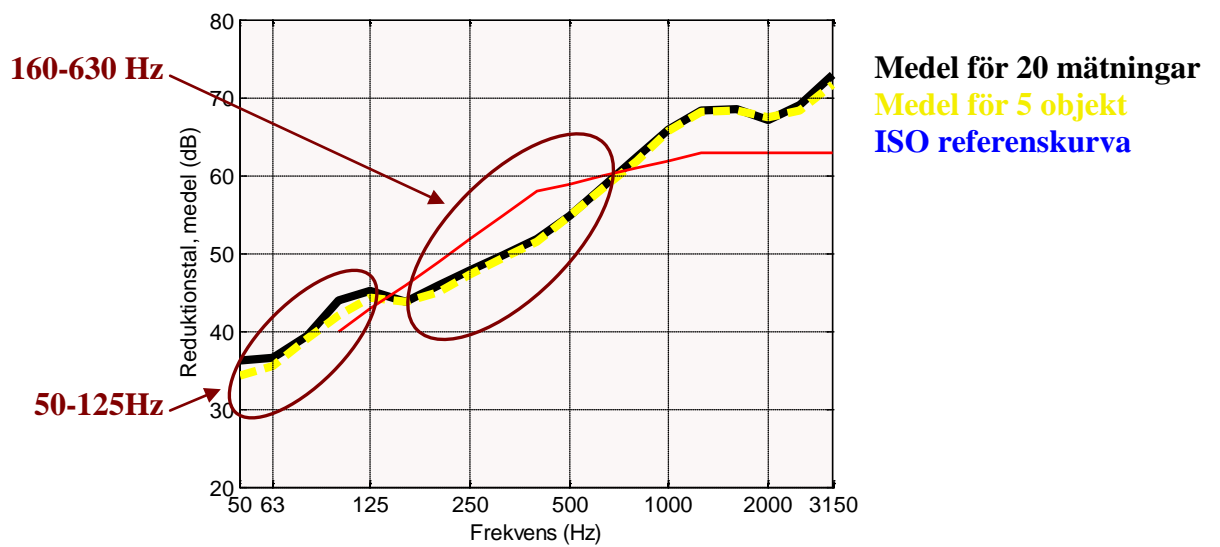
I Figur 8 återfinns sammanfattningsvärdena  $R_w$ ,  $C_{50-3150}$ , och  $R_w + C_{50-3150}$ . I medeltal uppnås 59, -2 respektive 57 dB (avrundat till heltal). Motsvarande standardavvikelse är 2,6, 1,1 och 3,0 dB. Mellan högsta och lägsta uppmätta värden skiljer 10, 5 respektive 14 dB. Det framgår också att av de 20 mätningarna så klarar 2 st ljudklass A, 8 st klass B, 9 st klass C medan 1 st överskrider grundkravet.



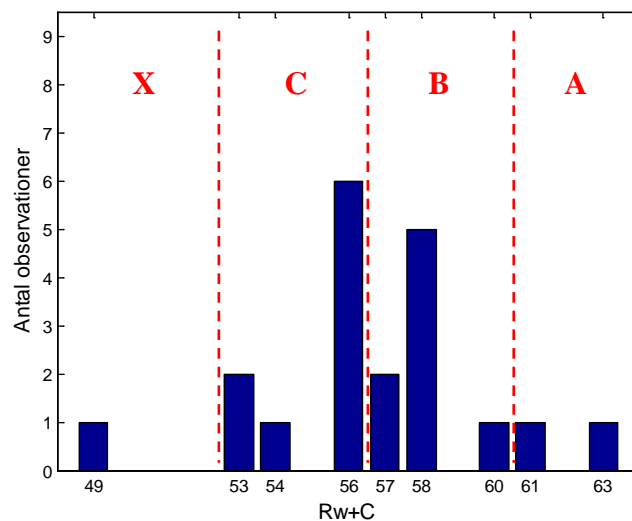
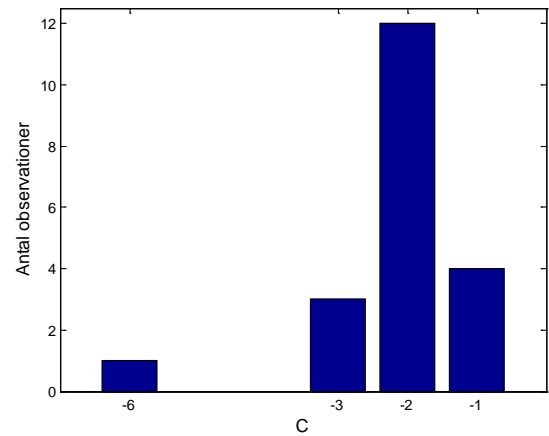
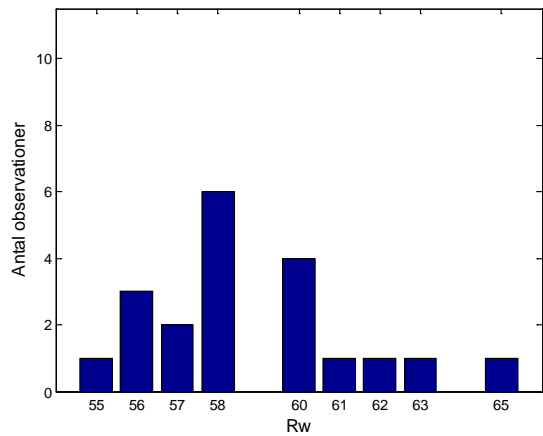
Figur 5. Samtliga luftljudsmätningar, 20 st.



Figur 6. Medelvärden för respektive objekt, luftljud.



Figur7. Totala medelvärden, luftljud.



## Diskussion och slutsatser

Såväl steg- som luftljudsisolering balanserar på gränsen mellan ljudklass B och C. Cirka hälften av mätningarna uppnår klass B medan lika stor mängd inte gör det.

Mellanfrekvenserna, 125-630Hz, uppvisar en negativ avvikelse mot referenskurvorna, i vissa fall  $\geq 5$  dB. Stor förbättring kan alltså uppnås om denna ”puckel”/dipp i frekvensspektrumen kan neutraliseras.

Lågfrekvenstermerna  $C_{1,50-2500}$  och  $C_{50-3150}$  uppvisar i allmänhet relativt låga värden, +/- 1-2 dB. Steg- och luftljudskurvorna pekar generellt inte heller på att lågfrekvensegenskaperna 50-100 Hz skulle vara anmärkningsvärt bristfälliga. En anmärkning är dock att ett objekt (Brynet) ger klart brantare stegljudskurva och ett objekt (Limnologen) ger klart brantare luftljudskurva än övriga objekt för frekvenser 50-100 Hz.





## **ARBETSRAPPORT Nr 17**

Ljud- och vibrationsmätningar  
Kv. Brynet, Örebro, Martinsons

Ingår i TräCetrum Norr:s projekt:  
*Förbättrad ljudisolering i  
modulbyggda konstruktioner*

2012-10-31  
Fredrik Ljunggren  
Avd. för ljud och vibrationer  
Luleå tekniska universitet  
971 87 Luleå  
Tel: 0920-491286  
E-post: fredrik.ljunggren@ltu.se

## **Sammanfattning**

Rapporten omfattar ljud- och vibrationsmätningar i Martinsons objekt Kv. Brynet, Örebro, augusti 2012.

Uppmätt stegljudsnivå klarar ljudklass B och luftljudsisolering klass C.

Heltäckande vibrationsmätningar över ett rums alla golv- tak-, och väggytor indikerar att ljudtransmission via flankerna ner till väggarna är av samma storleksordning som direktljudet via taket. För vissa frekvenser är den totala vibrationsenergin större i väggarna än i taket, frekvenser som delvis sammanfaller med dimensionerande oktavband för steg- och luftljudsisolering.

Vibrationsmätningar över hela ytor har jämförts med en förenklade linjebaserad metod som används inom AkuLite. Vissa likheter finns och med tillgång till mer mätdata över hela ytor kan det vara möjligt att utveckla en approximativ omräkningsfaktor metoderna emellan.

## Förutsättningar

Rapporten presenterar vibrationsmätningar mellan två rum i vertikal riktning. Vibrationer har mätts på golv-, tak- och väggytor. Steg- och luftljudsisolering har uppmätts som komplettering.

Mätningarna har utförts på Martinsons objekt Kv. Brynet i Örebro. Bygganden är ett flerfamiljshus om sex våningar med tre lägenheter per plan. Bjälklagen är av sk kassett-typ. Vid mättillfället var berörda lägenheter fullt färdiga.

## Syfte

Syftet med vibrationsmätningarna är två.

1. Att få indikationer på hur vibrationer – och därmed även ljud – sprids över knutpunkter i den aktuella konstruktionen. Hur stor del av det transmitterade ljudet går direkt genom bjälklaget och hur stor del går via flankerna?
2. Att jämföra vibrationsmätningar över hela ytor med den förenklade metod om fem mätpunkter utmed en linje för respektive yta som används inom AkuLite.

## Genomförande

Vardagsrum-matplats i lägenhet 403 har använts som mottagarom för vibrationer. Som källa har en stegljudsapparat placerad centrisk i rummet ovanför använts. Se planritning Figur 1.

## Ytmätningar

För mätningar på golv- och takyta har en mätgrid om  $0.7 \cdot 0.7 \text{m}^2$  använts. Fem punkter i bredd över rummets bredare del och tre punkter över den smalare delen (matplats). Totalt 57 mätpunkter vardera för golv och tak.

För mätningar på väggytor har en mätgrid om  $0.7 \cdot 0.62 \text{m}^2$  (bredd·höjd) använts. Fyra punkter i rummets höjddel. Totalt 124 mätpunkter på vägg fördelad enligt: Vägg 1: 12 st., Vägg 2: 16 st., Vägg 3: 8 st., Vägg 4: 36 st., Vägg 5: 20 st., Vägg 6: 24 st. och Vägg 7: 8 st.

Accelerometrar har placerats med exakta måttangivelser, ett antal av dem har hamnat, förutom på själva väggkonstruktionen, på fönsterglas och i vissa fall fönsterkarmar. Bilder på samtliga väggar där givarplacering framgår finns i Bilaga 1.

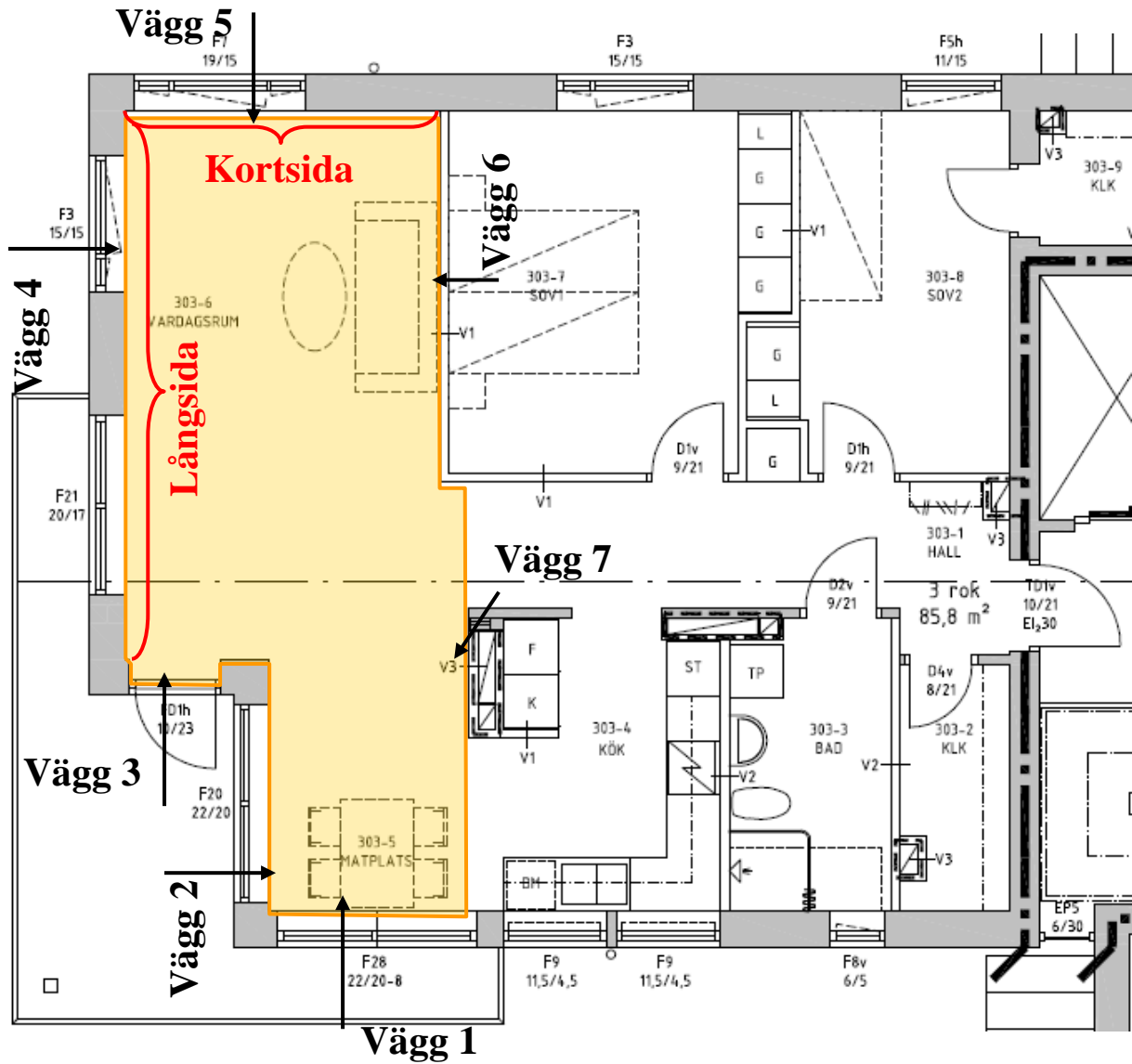
Sammanlagt antal mätpunkter för golv, tak och väggar: 238 st.

## Linjemätningar

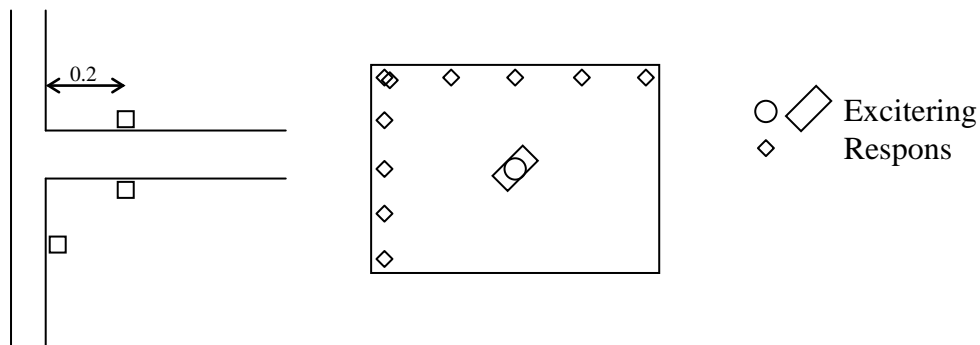
Mätningar har utförts utmed två väggar (Långsida och Kortsida enligt Figur 1) med accelerometrar placerade 20 cm från aktuella ränder i tak, golv och vägg enligt Figur 2, fem accelerometrar per vägg och linje.

## Ljudmätningar

Luft- och stegljudsmätningar har gjorts i vertikalled, i enlighet med SS-EN ISO 140-4 resp. 140-7. Resultaten har utvärderats enligt SS-EN ISO 717-1 resp. 717-2. Resultaten har bedömts enligt gällande krav i SS 02 52 67 (3).



Figur 1. Planritning av Lgh 403 med markerat rum för mätning.



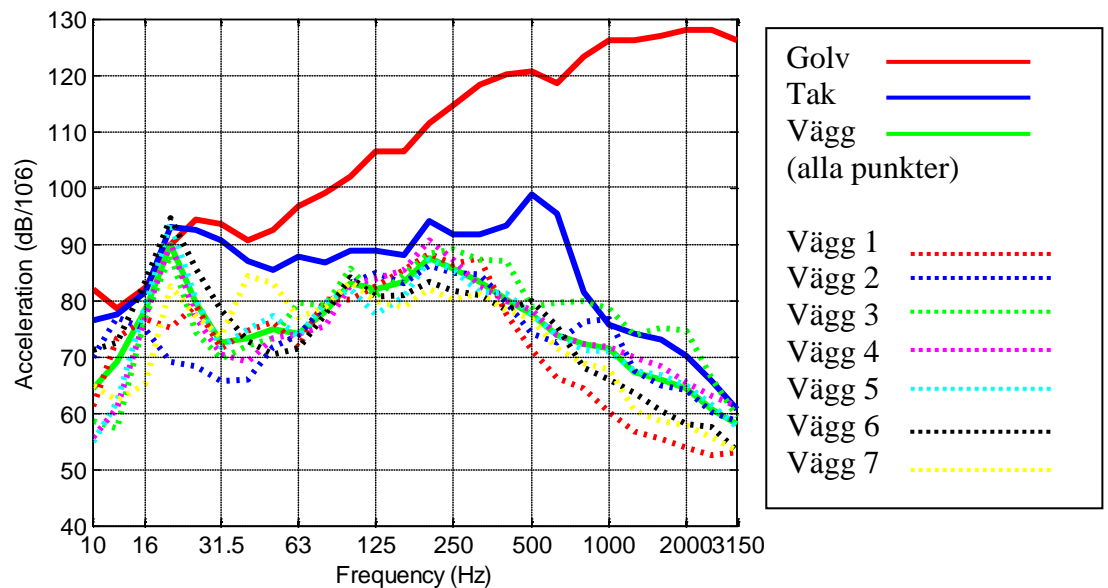
Figur 2. Positionering av excitations- och responspunkter för mätning av flankvibrationer enligt AkuLite:s mätmall.

## Resultat

### Vibrationer

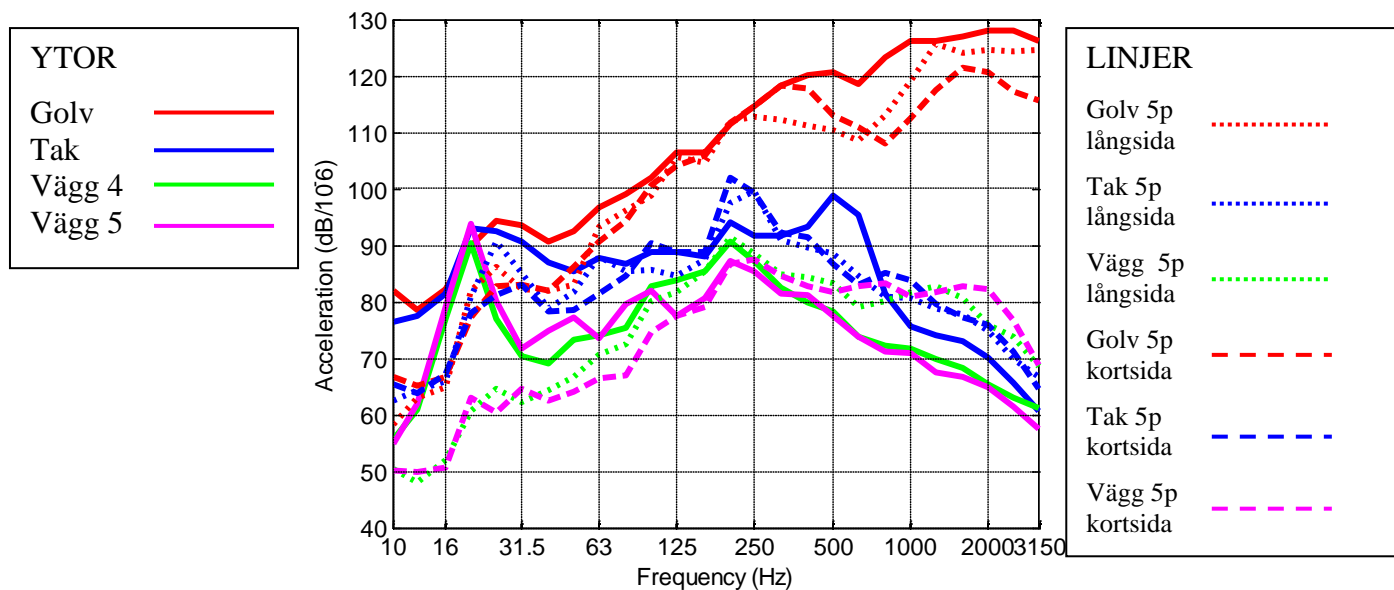
Vibrationsmätningar för alla punkter återfinns i Bilaga 1 medan medelvärden för respektive delyta presenteras i Figur 3. Golvets nivåer kan approximeras till en rät linje med stigande acceleration m a p frekvens. Takets nivåer är för de allra lägsta frekvenserna, 10-20 Hz stigande för att därefter vara ungefär konstant till 500 Hz. För de högsta frekvenserna ses en fallande trend i acceleration.

Väggarnas acceleration liknar den för taket men har generellt en något lägre nivå. För vissa väggar kan en uttalad topp ses vid 20 Hz som (delvis) kan förklaras av att mätpunkter direkt på fönsterglasen här visade mycket höga vibrationsnivåer.



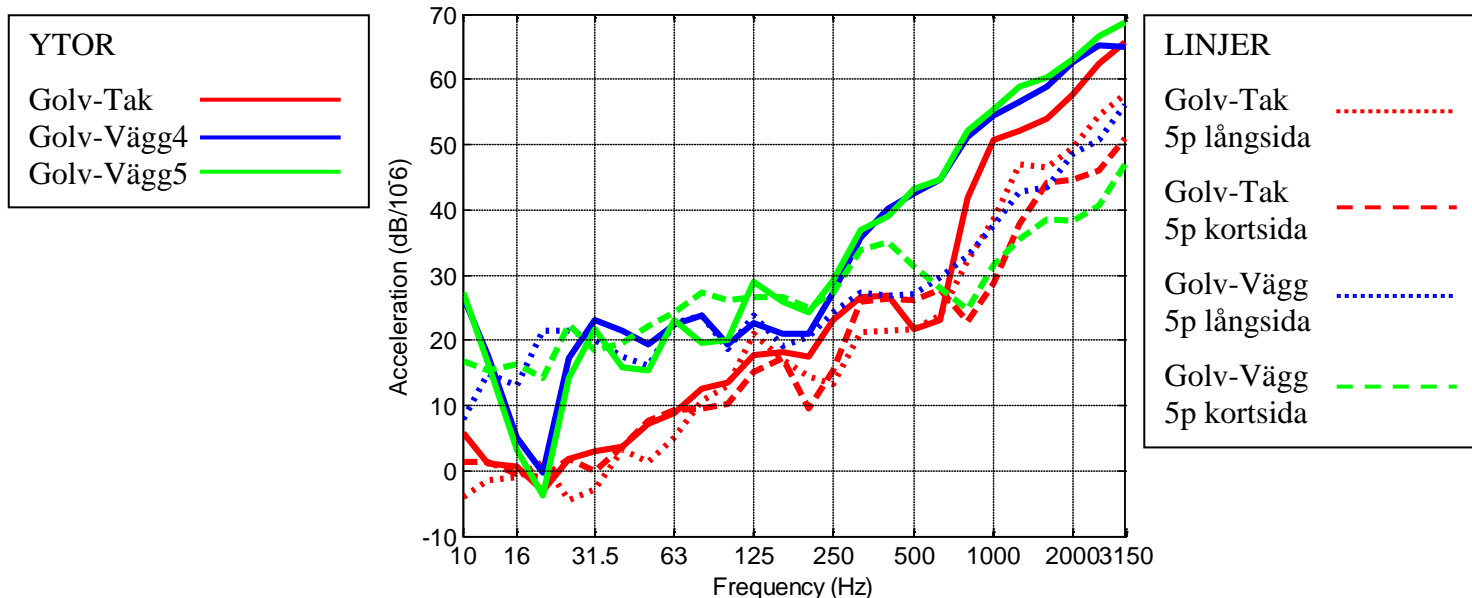
Figur 3. Vibrationsmedelvärden för de olika ytorna.

I Figur 4 kan jämförelse mellan yt- och linjemätningar ses. För golvet ger linjemätningar en liknande kurva som för yt-dito men med en lägre nivå. Naturligt eftersom linjen befinner sig längst från källan. Taknivåerna är mer jämna förutom för frekvenser  $\leq 50$  Hz där ytvibrationerna är högre. Väggnivåerna är med undantag för 20-Hz-puckeln ganska lika varandra upp till 500 Hz. Däröver är linjemätningarna högre, vilket kan förklaras med att dessa frekvenser dämpas ut längre ner i väggen.



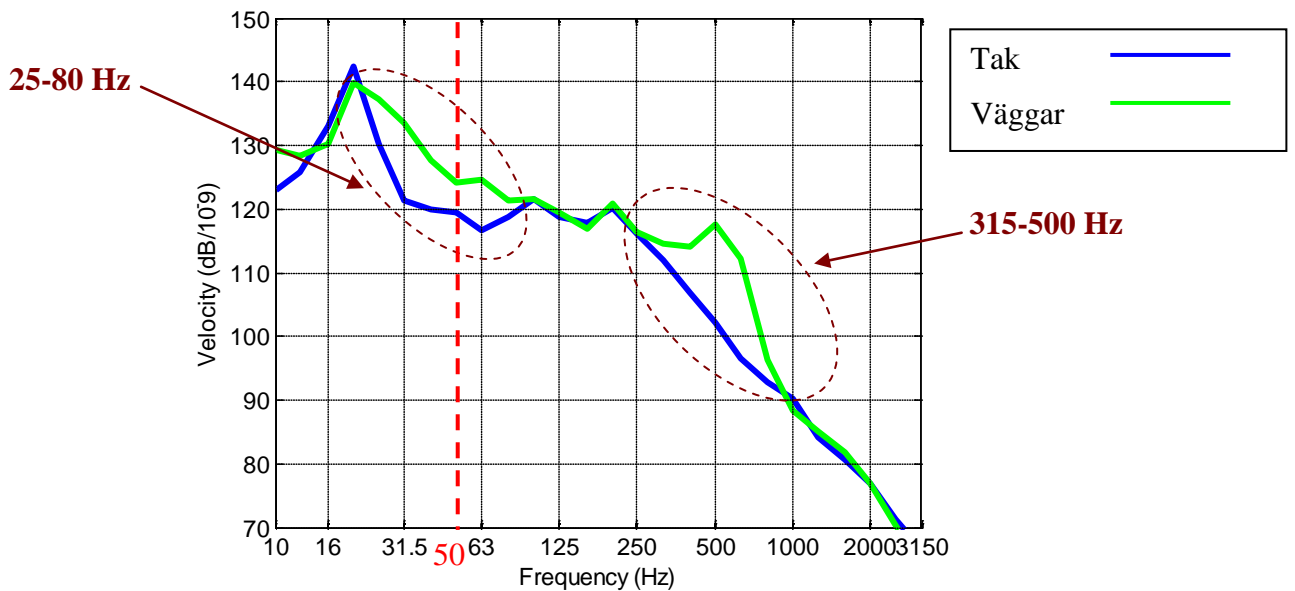
Figur 4. Vibrationsnivåer vid mätningar av ytor respektive linjer.

Nivåskillnader mellan olika ytor, d v s transmission från golv till tak/vagg, visas i Figur 5, för bägge mätfallen hel yta och linje. Skillnaden golv-tak ser väldigt ut för bägge mätfallen upp till 630 Hz, däröver ger ytmätningen större skillnad än linjemätningarna. Skillnaden golv-vagg ger likvärdiga resultat upp till ca 250-315 Hz (återigen bortsett från 20-Hz-fenomenet) vartefter ytmätningen visar betydligt högre nivåer än linjemätningarna. Förklaringen ligger förmodligen i att golvet har fler punkter som ligger nära stegljudsapparaten vilket genererar högre medelnivåer för höga frekvenser över ytan jämfört med en linje nära vägg. I tak eller vägg däremot varierar inte medelvärdet över ytan lika mycket i förhållande till linjerna. Men att skillnaderna blir större för höga frekvenser i vägg än i tak förklaras igen med att vibrationerna till stor del dämpas ut innan de når nedre delen av väggen.



Figur 5. Vibrationsnivåskillnader vid mätningar av ytor respektive linjer.

I Figur 6 kan den sammanlagda vibrationshastigheten för tak- och väggytor ses. Medelvibrationsnivån har här multiplicerats med totala ytan för tak respektive alla väggar. Kurvorna indikerar då hur mycket ljud som ytorna utstrålar. Ingen hänsyn har dock tagits till trålningsfaktorn, enbart vibrationshastighet avses. Generellt kan det ses att det totala bidraget från väggarna är likvärdigt det från taket men att väggarnas bidrag är större än takets för två frekvensområden: 25-80 Hz och 315-800 Hz.



Figur 6. Sammanlagda hastighetsnivåer av vibrationer i rummets tak och väggar.

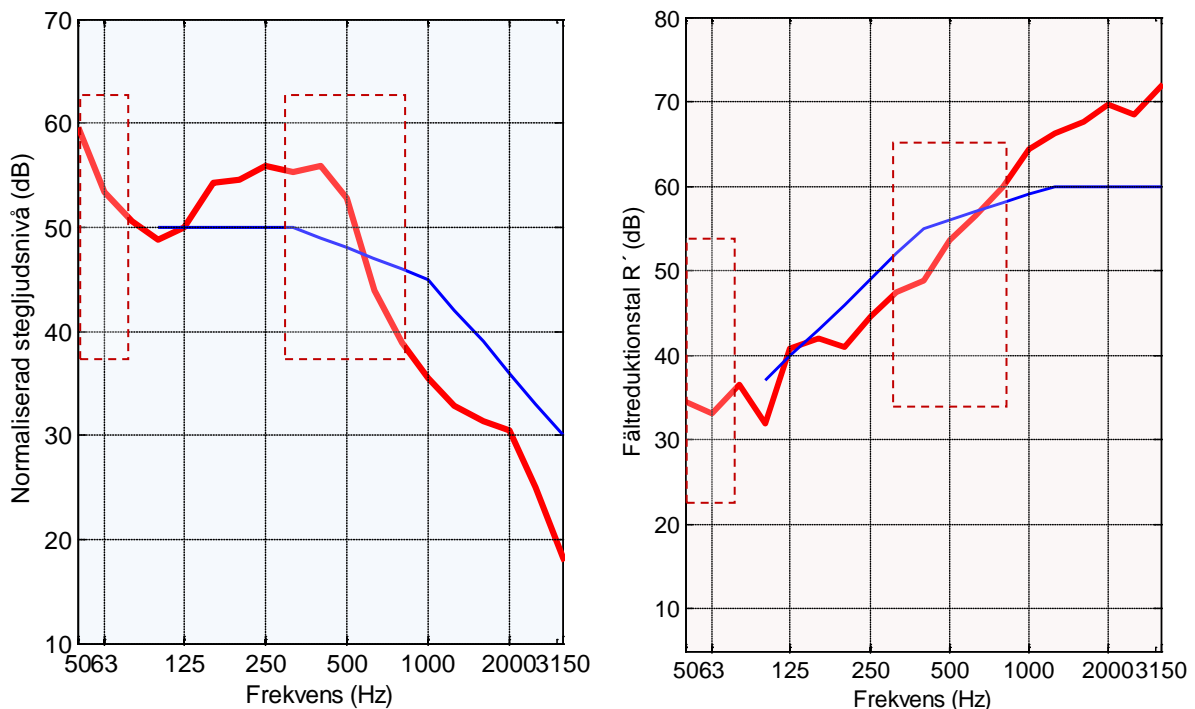
## Ljud

Resultat från ljudmätningarna visas i Tabell 1, två stegljudsmätningar och en luftljudsmätning. Stegljudsnivån klarar ljudklass B medan luftljudsisoleringen hamnar i klass C. Kompletta mätprotokoll finns i Bilaga 2.

Tabell 1. Stegljudsnivåer ( $L$ ) och reduktionstal ( $R$ ), ljudklass inom parantes.

Från Lgh	Till Lgh	$L'_{n,w}$ dB	$L'_{n,w+}$ $C_{1,50-2500}$ dB	Ljudklass stegljud	$R'_w + C_{50-3150}$ dB	Ljudklass luftljud
303	403				54	C
503	403	46	51	B		
403	303	48	50	B		

I Figur 7 har de två frekvensområdena, där väggarnas sammanlagda vibrationsenergi överskred densamma från taket enligt Figur 6, markerats. Det kan se att det övre av dessa områden, 315-500 Hz, till cirka hälften sammanfaller med de områdena där såväl steg- som luftljudsisolering uppvisar en negativ avvikelse jämfört med referenskurvan. Det lägre frekvensområdet, 25-80, sammanfaller med höga stegljudsnivåer medan det inte finns motsvarande koppling i luftljudsisoleringen.



Figur 7. Steg- och luftljudsdiagram med markerade områden där sammanlagd vibrationshastighet i väggarna överskrider takets.

## Diskussion och slutsatser

Uppmätt stegljudsnivå uppfyller klass B medan luftljudsisoleringen hamnar i klass C. Stegljudsnivån är här något bättre än medelvärdet för ett antal tidigare redovisade Martinsons-objekt (Arbetsrapport Nr 16, Martinsons - sammanställning ljudmätningar). En förklaring är att det för aktuellt objekt enbart är mätt i stora rum ( $68\text{m}^3$ ) vilket ger gynnsammare mätresultat.

Vibrationsmätningarna tyder på att ljudbidraget från flanktransmissionen (väggar) är av samma storleksordning som det från direktljudet (tak). Åtminstone för det uppmätta rektangulära rummet som har större andel väggyta i förhållande till taket än ett mer kvadratisk format rum.

Inom vissa frekvensintervall överstiger väggarnas sammanlagda vibrationsenergi den från taket. Dessa frekvenser omfattas delvis av de oktavband i steg- och luftljudsisoleringen som har en negativ avvikelse mot referenskurvan. Resultatet antyder att en minskad flanktransmission för dessa frekvenser skulle förbättra sammanfattningsvärdena för ljudisolering,  $L'_{nw}$  och  $R'_w$ .

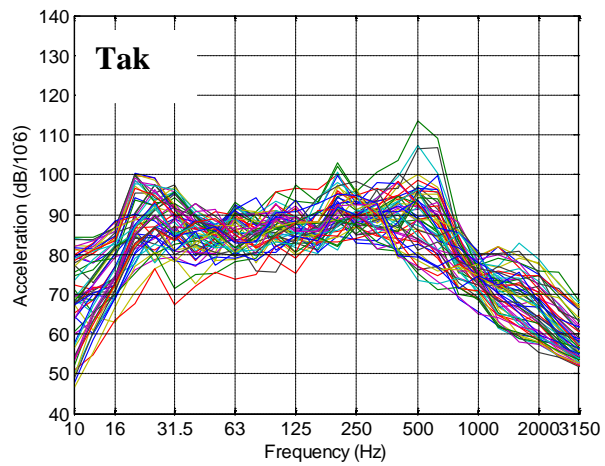
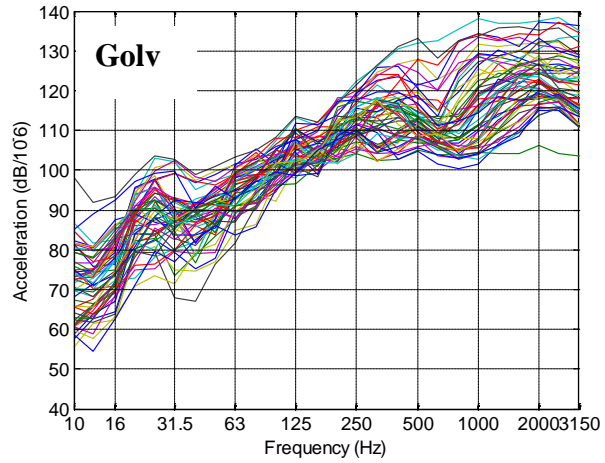
Jämförelsen av vibrationsnivåskillnader mellan olika ytor mätt antingen jämt fördelat över hela ytan kontra utmed en linje närmast knutpunkten uppvisar både likheter och olikheter beroende på frekvens. Ett mönster kan emellertid anas i att vibrationskillnaderna är tämligen lika för de två metoderna vid låga frekvenser för att vid högre frekvenser uppvisa en ungefärlig konstant skillnad som dock varierar beroende om transmission från golv-tak eller golv-vägg betraktas. Med tillgång till mer empiriska data kan det vara möjligt att ta fram en korrektionsfaktor som då approximativt kan översätta en linjemätning med en ytmätning.

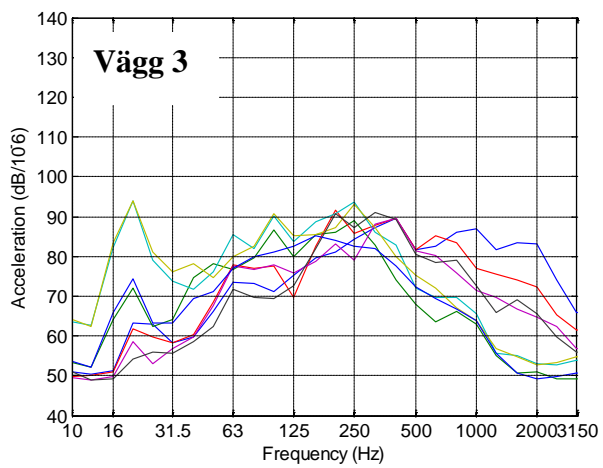
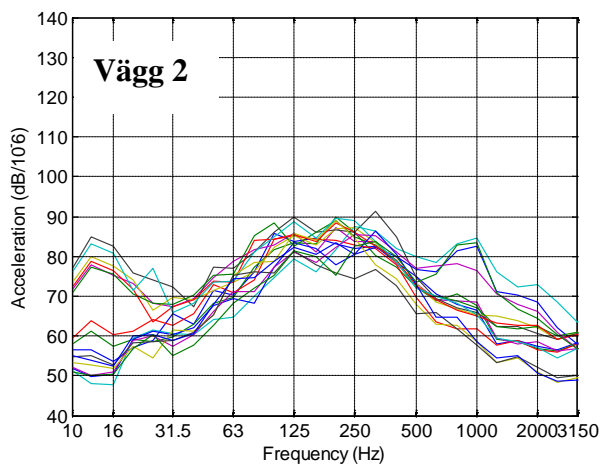
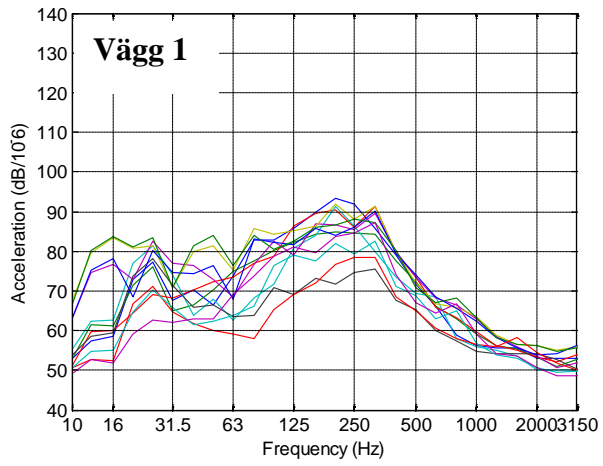


## Bilagor

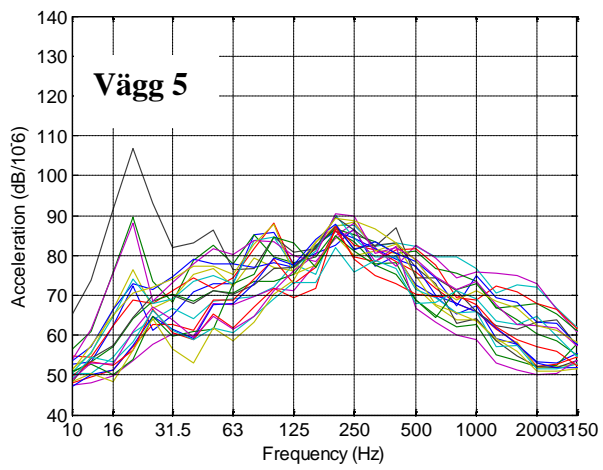
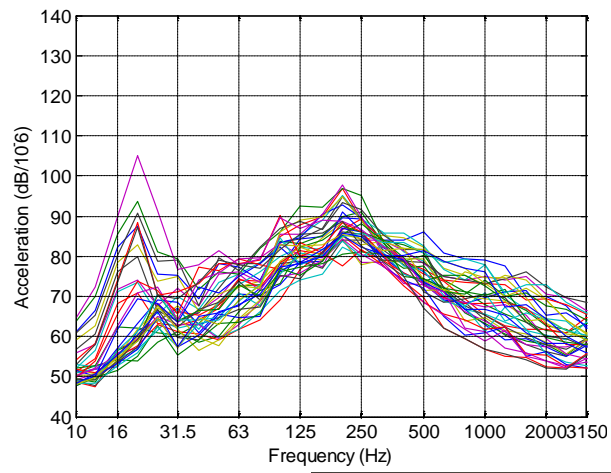
1. Uppmätta vibrationsnivåer i samtliga mätpunkter.
2. Mätprotokoll, steg- och luftljud

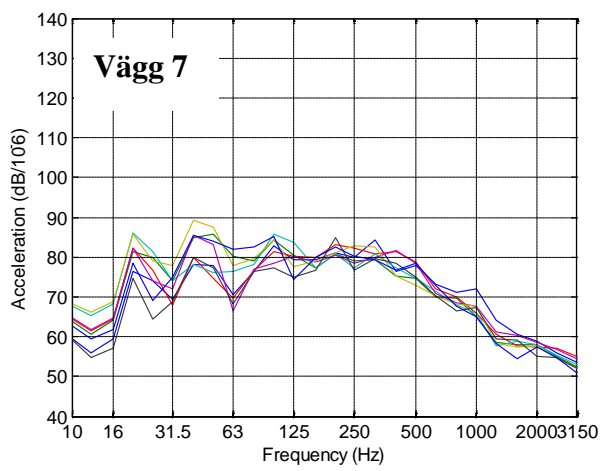
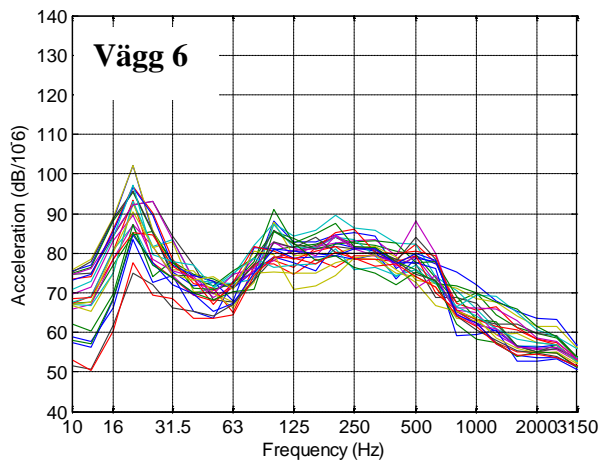
### 1. Uppmätta vibrationsnivåer i samtliga mätpunkter.





**Vägg 4**





## 2. Mätprotokoll, steg- och luftljud.

# Normaliserad stegljudsnivå enligt ISO 140-7

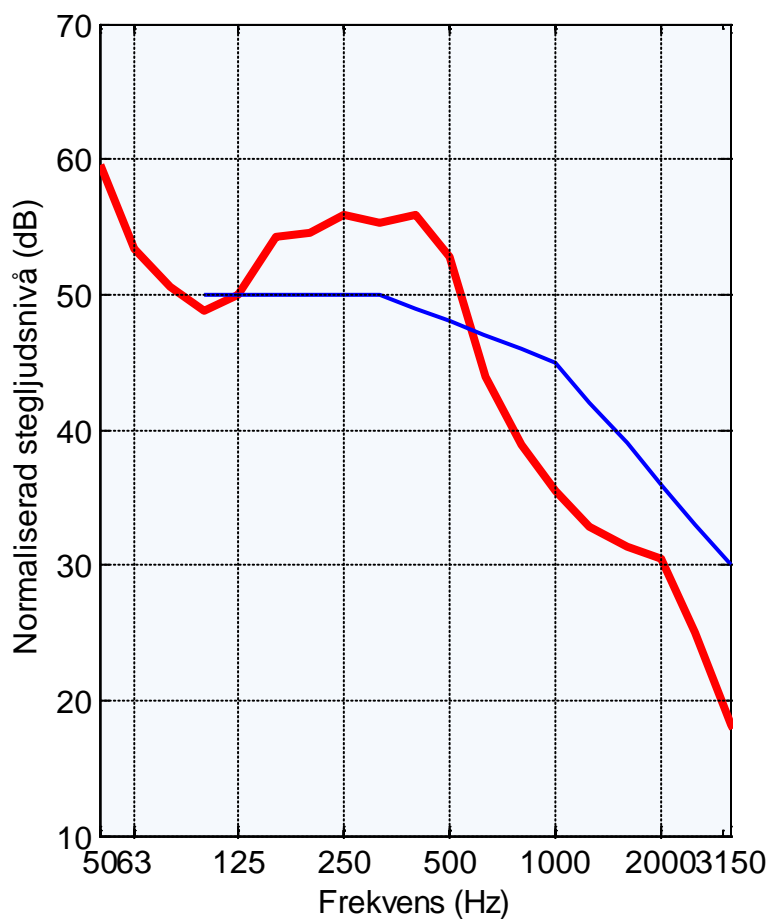
## Mätning av stegljudsisolering

---

Objekt: Kv. Brynet 17  
Datum: 2012-08-30  
Operatör: Fredrik Ljunggren  
Volym, mottagarum: 31 (68) m<sup>3</sup>  
Anm: Lgh 303 vån 3

---

F (Hz)	L'n (dB)
50	59,6
63	53,4
80	50,6
100	48,7
125	50,0
160	54,2
200	54,5
250	55,9
315	55,3
400	56,0
500	52,8
630	43,9
800	38,9
1000	35,5
1250	32,8
1600	31,4
2000	30,5
2500	25,0
3150	18,2



---

Utvärdering enligt SS-EN ISO 717-2 och SS 25267

$L_{n,w} = 48 \text{ dB}$                        $C_{i,50-2500} = 2$

$L_{n,w} + C_{i,50-2500} = 50 \text{ dB}$

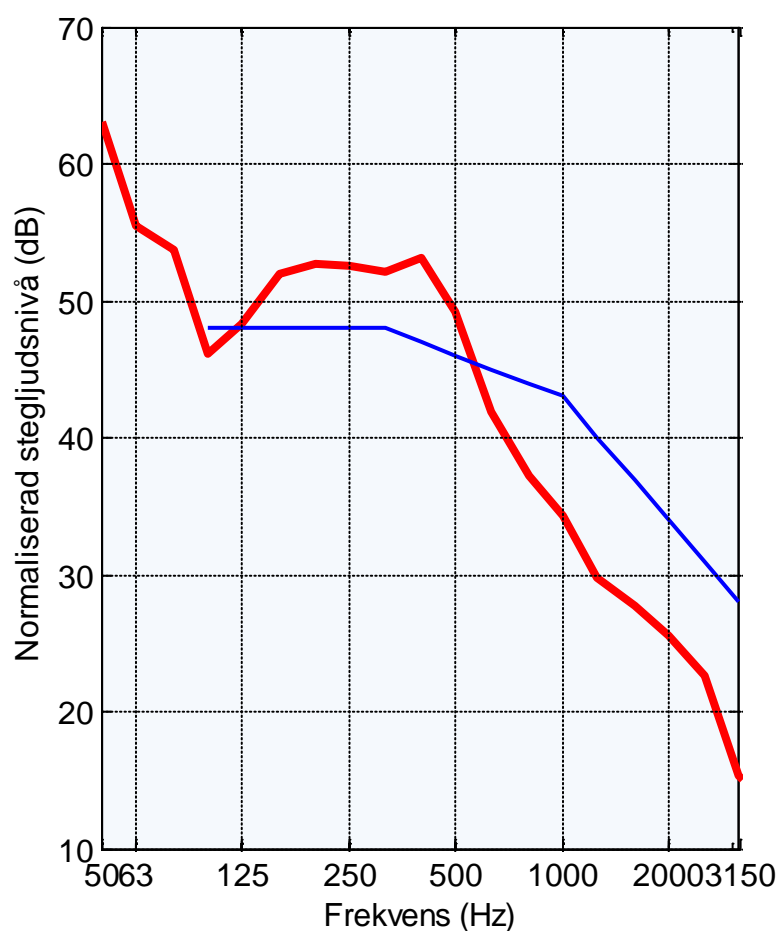
---

# Normaliserad stegljudsnivå enligt ISO 140-7

## Mätning av stegljudsisolering

Objekt: Kv. Brynet 17  
Datum: 2012-08-30  
Operatör: Fredrik Ljunggren  
Volym, mottagarum: 31 (68) m<sup>3</sup>  
Anm: Lgh 403, vån 4

F (Hz)	L'n (dB)
50	63,1
63	55,5
80	53,7
100	46,2
125	48,3
160	51,9
200	52,7
250	52,5
315	52,2
400	53,1
500	49,2
630	41,8
800	37,3
1000	34,3
1250	29,8
1600	27,7
2000	25,5
2500	22,6
3150	15,3



Utvärdering enligt SS-EN ISO 717-2 och SS 25267

$L_{n,w} = 46 \text{ dB}$                        $C_{i,50-2500} = 5$

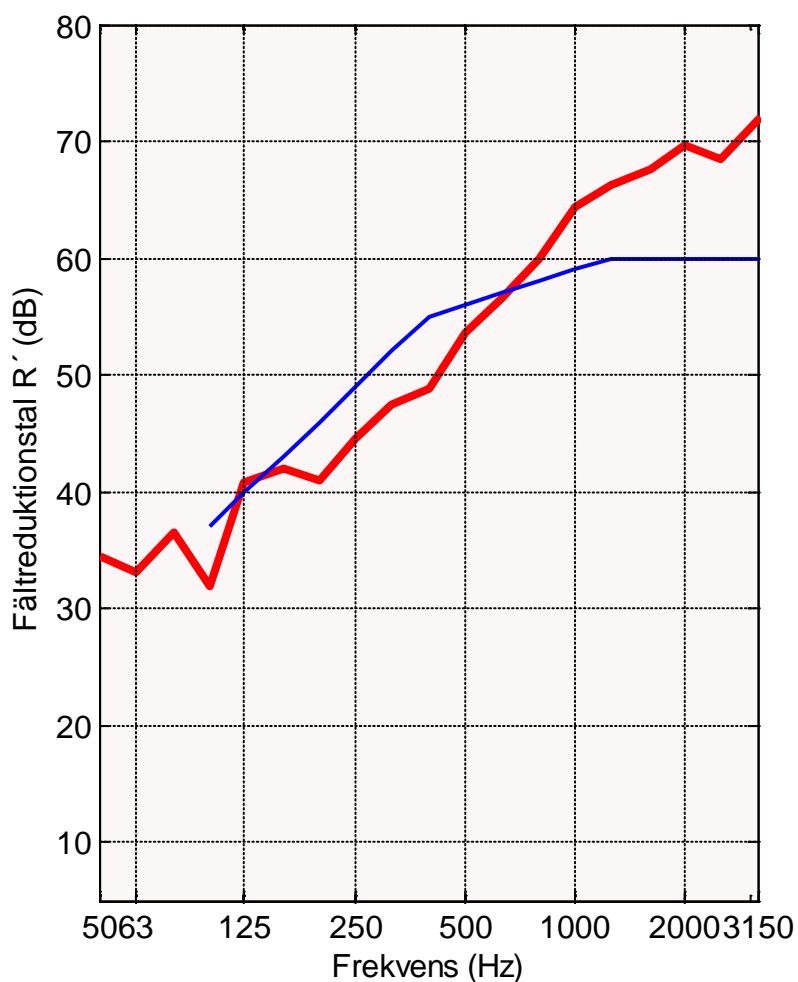
$L_{n,w} + C_{i,50-2500} = 51 \text{ dB}$

# Reduktionstal enligt ISO 140-4

## Fältmätning av luftjudsisolering

Mätobjekt: Kv. Brynet 17  
Mätoperatör: Fredrik Ljunggren  
Datum för mätning: 2012-08-30  
Volym, mottagarum: 68 m<sup>3</sup>  
Skiljearea: 27.5 m<sup>2</sup>  
Anm: Lgh 403, v4

F (Hz)	R' (dB)
50	34,5
63	33,1
80	36,4
100	31,8
125	40,8
160	42,0
200	40,9
250	44,5
315	47,5
400	48,9
500	53,6
630	56,5
800	59,9
1000	64,3
1250	66,2
1600	67,6
2000	69,7
2500	68,5
3150	71,9



Utvärdering enligt SS-EN ISO 717-1 och SS 25267

$R'_w = 56 \text{ dB}$                        $C_{50-3150} = -2$

$R'_w + C_{50-3150} = 4 \text{ dB}$



## **ARBETSRAPPORT Nr 18**

(Forts. från arb.rapport Nr 9 och 15)

### Långtidstest av elastiska limmer (3)

Ingår i TräCetrum Norr:s projekt:

*Förbättrad ljudisolering i  
modulbyggda konstruktioner*

2013-01-11  
Fredrik Ljunggren  
Avd. för drift, underhåll och akustik  
Luleå tekniska universitet  
971 87 Luleå  
Tel: 0920-491286  
E-post: fredrik.ljunggren@ltu.se



## Sammanfattning

Rapporten omfattar vibrationsmätningar utförda i laboratorium på Luleå tekniska universitet under 3½ års tid. Sex olika limmers dämpande egenskaper har testats genom att limma ihop provbitar, 50x60 cm bestående av ett lager 13mm golvgips och ett lager 22mm spånskiva.

Mätningarna visar att det finns stora skillnader i de olika limmens dämpförmåga vilken dessutom i de flesta fall initialt avtar snabbt. Räknat från det att 6 månader förflutit från applicering, har däremot egenskaperna efter totalt 3½ år endast marginellt förändrats för fem av limmerna medan ett av limmen alltjämt uppvisar successivt minskande dämpning. Fyra av de testade limmerna uppnådde vid testperiodens slut dämpkvoter om ca 0.5-1%. Ett lim uppnådde ca 1-2% dämpning medan det bästa nådde ca 6%.

## Förutsättningar

Rapporten behandlar tester av olika skivlimmer att använda för montering av golvgipsskiva på spånskiva. Limmets egenskaper är en ingående parameter för isolering mot stegljud.

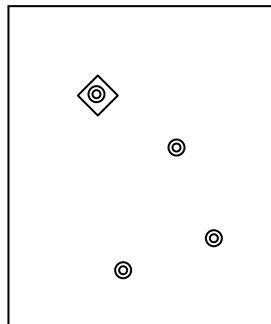
## Syfte

Mätningarnas syfte är att undersöka hur dämpningen varierar mellan olika limmer samt hur dämpningen påverkas över tid.

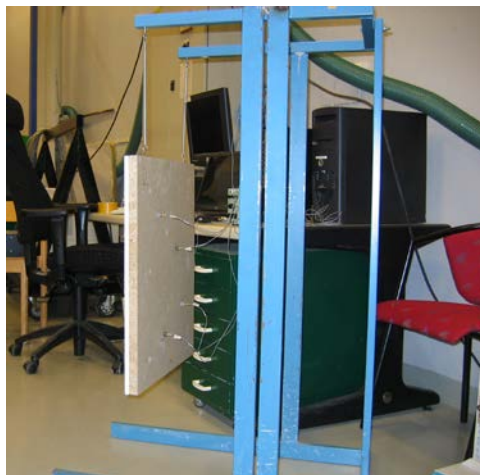
## Genomförande

En skiva golvgips (13mm) och en spånskiva (22mm), bågge i storlek 50x60 cm, limmades ihop. En tandad spackel (2mm) användes för att fördela limmet på ytan. Ett antal skruvar användes för fixering av skivorna under det att limmet härdade, de togs bort efter 1 dygn. Vid mätning hängs provexemplaret upp i ett stativ med två fjädrar. En krafthammare (Brüel & Kjær 8202) tillsammans med fyra accelerometrar (Brüel & Kjær 4508) används för att generera frekvensresponzfunktioner (FRF, Frequency Response Function). Kraften anslås mot gipsytan medan accelerationen mäts på spånskivan. Mätpositioner enligt Figur 1 och bild på försöksuppställning i Figur 2.

De första mätningarna utfördes efter tre dygn följt av en andra mätning efter ytterligare 8 dygn. Därefter har mätningar utförts med sex månaders intervall, totalt nio mättillfällen under 3½ år.



Figur 1. Mätpositioner;  $\diamond$  Hammare,  $\odot$  Accelerometer. Plattans storlek: 50x60 cm.



Figur 2. Försöksuppställning. Fjäderupphängd limmad gips-/spånskiveplatta med adapterade accelerometrar.

## Testvarianter

Totalt sex olika limmer, enligt Tabell 1, har testats. Samtliga, förutom Gyproc G46, saluförs som att vara elastiska med hög dämpning.

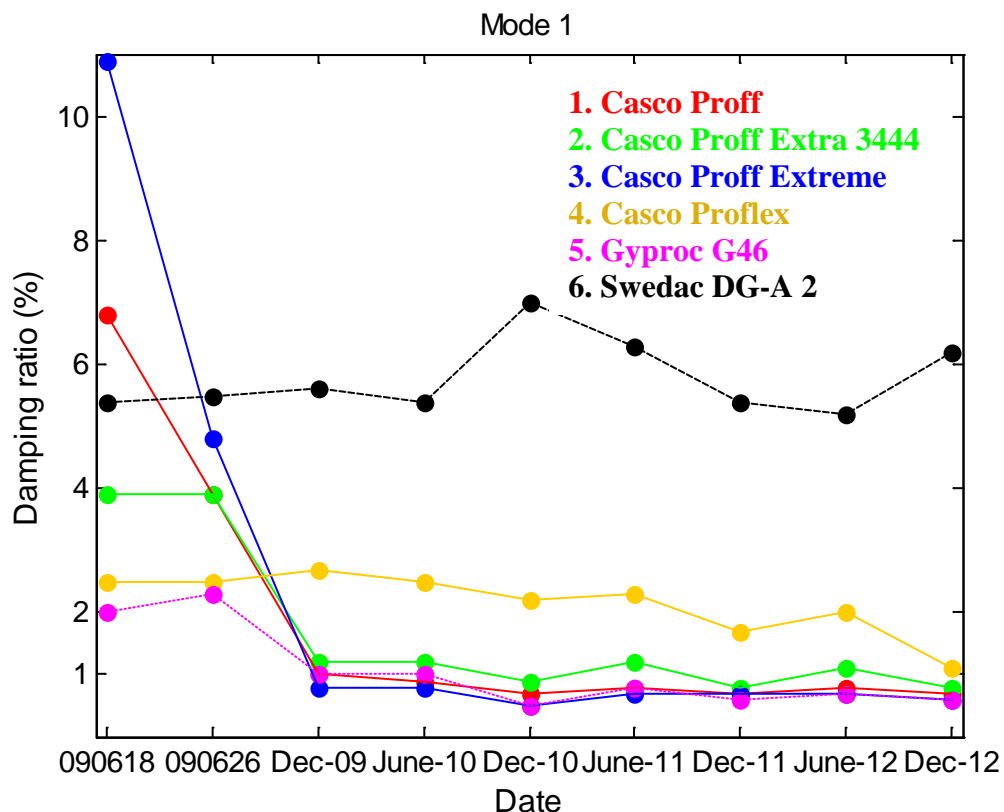
Tabell 1. Testade limmer.

Nr	Beskrivning
1	Casco Proff
2	Casco Proff Extra 3444
3	Casco Proff Extreme
4	Casco Proflex
5	Gyproc G46
6	Swedac DG-A 2

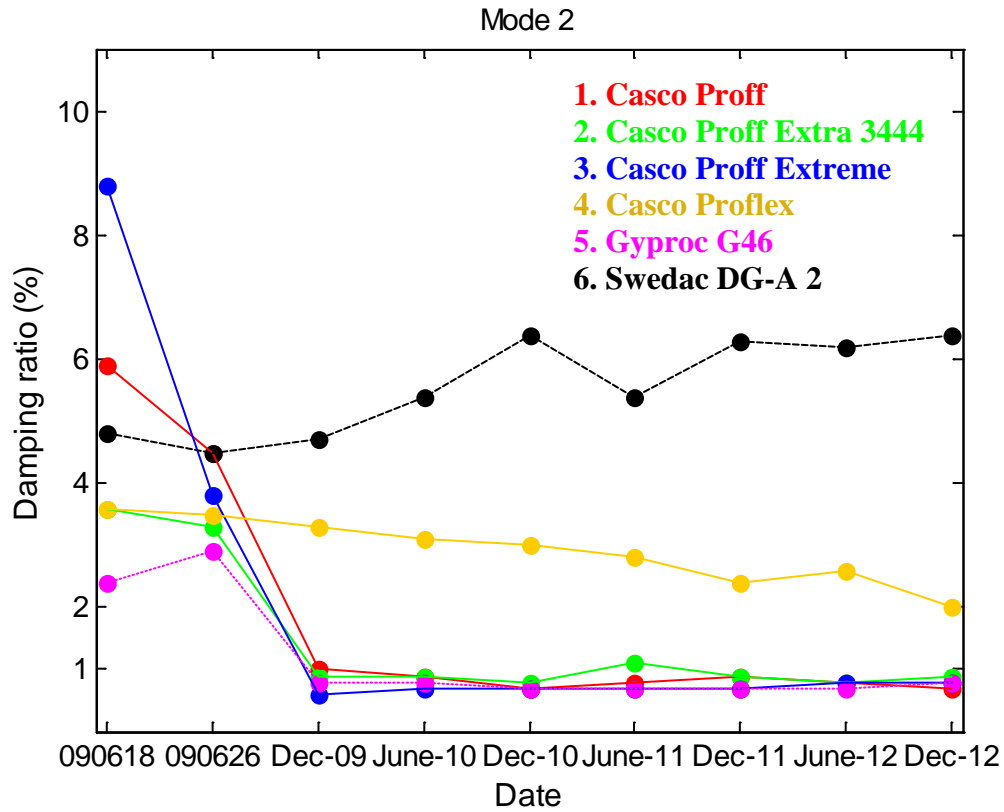
## Resultat

Uppmätta egenfrekvenser med tillhörande dämpkvoter visas i Figur 3-4, för två stycken moder. Exakta värden återfinns i bilaga.

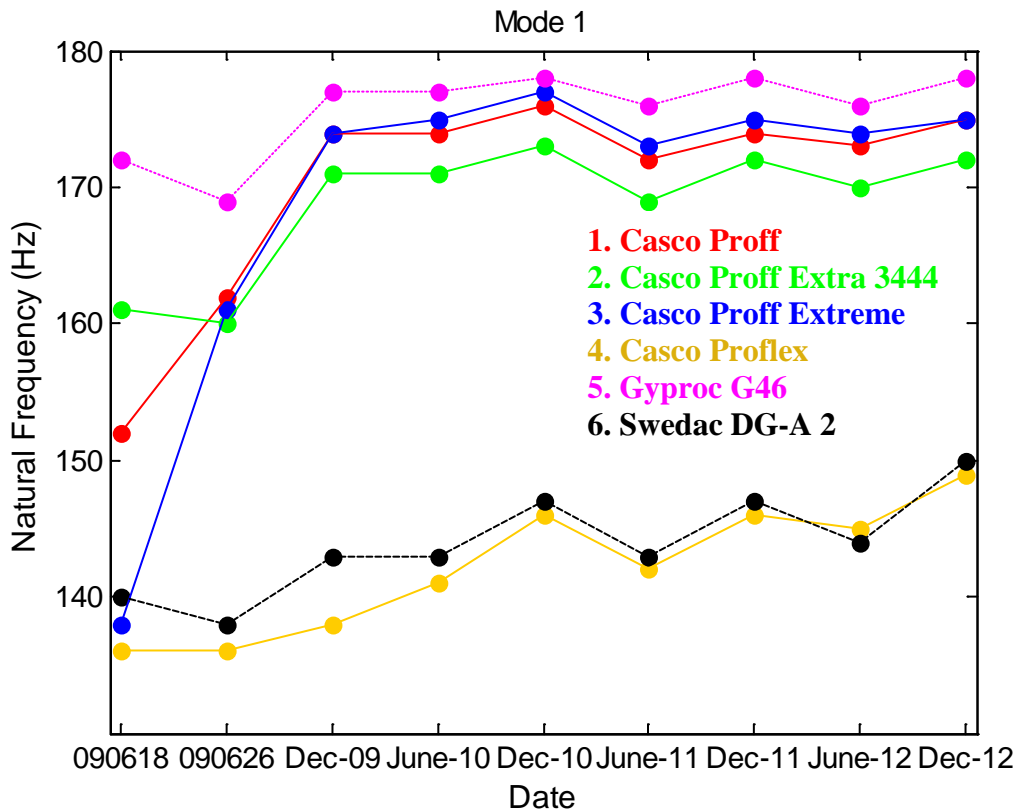
Mod 1 representerar den lägsta egenfrekvensen medan mod 3 är kopplad till den näst lägsta egenfrekvensen som kunde detekteras för samtliga testade plattor. För några av de testade fallen fanns en FRF-topp av lägre amplitud mellan mod 1 och mod 3, se Figur 5 för frekvensresponsfunktioner från första mätningen.



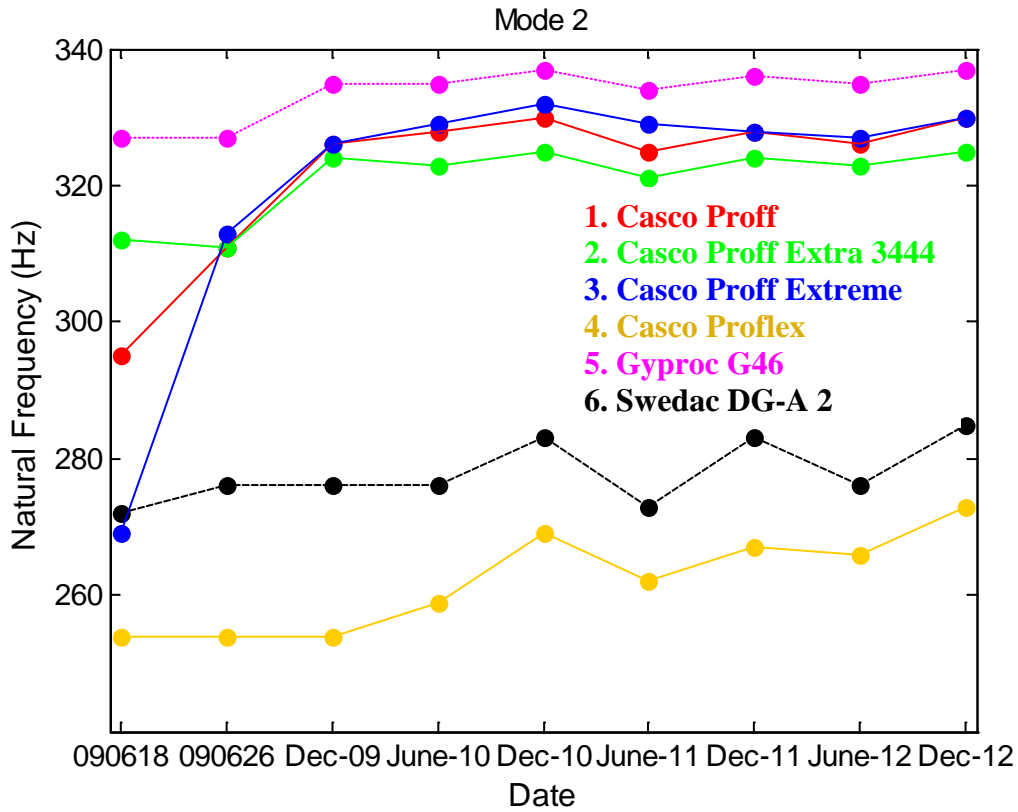
Figur 3a. Utveckling av dämpkvoter för de olika mättillfällena, mod 1.



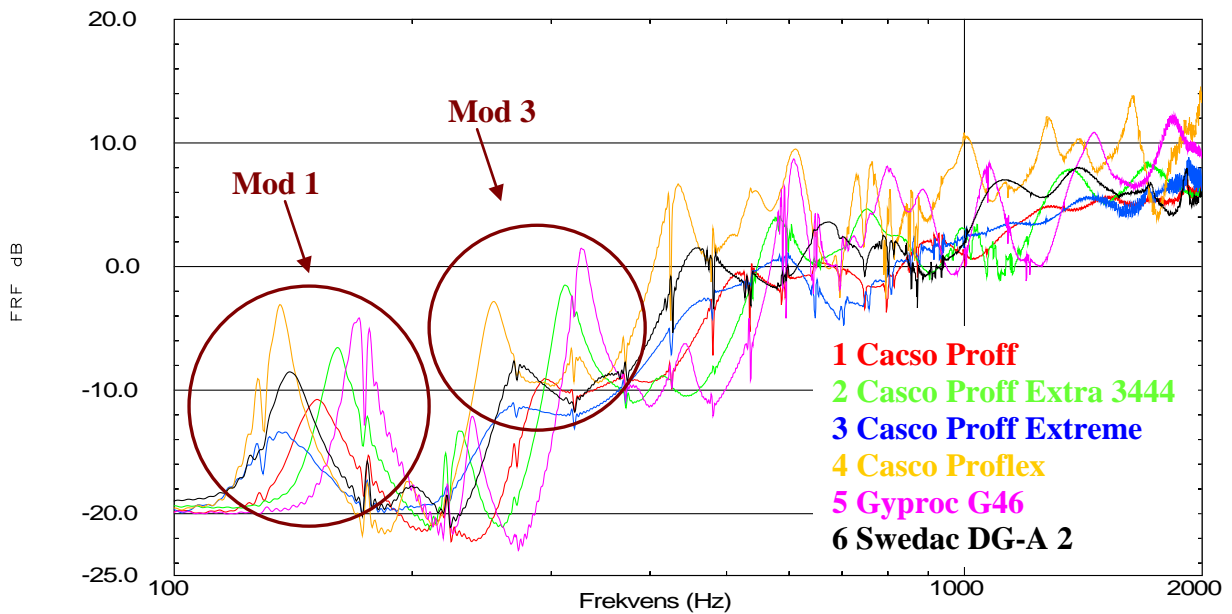
Figur 3b. Utveckling av dämpkvoter för de olika mättillfällena, mod 2.



Figur 4a. Utveckling av egenfrekvenser för de olika mättillfällena, mod 1.



Figur 4b. Utveckling av egenfrekvenser för de olika mätpunkterna, mod 2.



Figur 5. Frekvensresponsfunktioner, medelvärden av fyra mätpunkter vid första mätpunkterna.

## Slutsatser

Det kan konstateras att de testade limmerna uppvisar variation både gällande styvhet och dämpningsförmåga. Skillnaden i dämpning för de lägsta moderna är stor. Initialt hade det bäst dämpade limmet en dämpkvot om ca 10% medan det minst dämpade limmet hade ca 2%. Efter ett år är motsvarande siffror ca 6% respektive ca 0.5% - dock inte för samma limmer. Liknande resultat nås efter tre och ett halvt år. I huvudsak små förändringar kan ses från sex månader och framåt.

Swedac DG-A 2 särskiljer sig med markant högre dämpning än övriga vid mätningar efter lång tid. 3½ år efter applicering uppmättes 6% dämpkvot. Casco Proflex uppvisade relativt hög dämpning efter 1½ år, ca 2-3%, men efter 3½ år har dämpningen successivt minskat till 1-2% och närmar sig resultaten från majoriteten av de andra limmerna.

Övriga limmer uppvisar sinsemellan likvärdiga dämpkvoter, ca 0.5-1.0% efter 3½ år, en dämpning som kunde avläsas redan efter sex månader.

Tidigare fältmätningar (Arb.rapport Nr 8) har visat på en skillnad om ca 2 dB bättre stegljudsisolering då Swedacs lim används i stället för Gyproc G46, i Lindbäcks konstruktion.

## Bilaga

Beskrivning av moder i termer av frekvens (Hz) och dämpkvot (%), motsvarande Figur 3-4.

			Casco Proff	Casco Proff Extra 3444	Casco Proff Extreme	Casco Proflex	Gyproc G46	Swedac DG-A 2
18 juni 2009	Mod 1	Hz	152	161	138	136	172	140
		%	6,8	3,9	10,9	2,5	2,0	5,4
	Mod 3	Hz	295	312	269	254	327	272
		%	5,9	3,6	8,8	3,6	2,4	4,8
26 juni 2009	Mod 1	Hz	162	160	161	136	169	138
		%	3,9	3,9	4,8	2,5	2,3	5,5
	Mod 3	Hz	311	311	313	254	327	26
		%	4,5	3,3	3,8	3,5	2,9	4,5
dec. 2009	Mod 1	Hz	174	171	174	138	177	143
		%	1,0	1,2	0,8	2,7	1,0	5,6
	Mod 3	Hz	326	324	326	254	335	276
		%	1,0	0,9	0,6	3,3	0,8	4,7
juni 2010	Mod 1	Hz	174	171	175	141	177	143
		%	0,9	1,2	0,8	2,5	1,0	5,4
	Mod 3	Hz	328	323	329	259	335	276
		%	0,9	0,9	0,7	3,1	0,8	5,4
dec. 2010	Mod 1	Hz	176	173	177	146	178	147
		%	0,7	0,9	0,5	2,2	0,5	7,0
	Mod 3	Hz	330	325	332	269	337	283
		%	0,7	0,8	0,7	3,0	0,7	6,4
juni 2011	Mod 1	Hz	172	169	173	142	176	143
		%	0,8	1,2	0,7	2,3	0,8	6,3
	Mod 3	Hz	325	321	329	262	334	273
		%	0,8	1,1	0,7	2,8	0,7	5,4
dec. 2011	Mod 1	Hz	174	172	175	146	178	147
		%	0,7	0,8	0,7	1,7	0,6	5,4
	Mod 3	Hz	328	324	328	267	336	283
		%	0,9	0,9	0,7	2,4	0,7	6,3
juni 2012	Mod 1	Hz	173	170	174	145	176	144
		%	0,8	1,1	0,7	2,0	0,7	5,2
	Mod 3	Hz	326	323	327	266	335	276
		%	0,8	0,8	0,8	2,6	0,7	6,2
dec. 2012	Mod 1	Hz	175	172	175	149	178	150
		%	0,7	0,8	0,6	1,1	0,6	6,2
	Mod 3	Hz	330	325	330	273	337	285
		%	0,7	0,9	0,8	2,0	0,8	6,4



## **Investigation of the vibration transmission through a lightweight junction with elastic layer using the finite element method**

Juan Negreira Montero<sup>a)</sup>

Anders Sjöström<sup>b)</sup>

Delphine Bard<sup>c)</sup>

Department of Constuction Sciences – Division of Engineering Acoustics

Lund Tekniska Högskola, BOX 118, 22100 Lund, Sweden

**When the Swedish construction code in 1994 allowed wooden multi-storey buildings, this type of lightweight structures became popular due to low cost and ease of construction<sup>1</sup>. A drawback in those buildings is disturbing vibrations and noise propagating in the construction, especially through the junctions - for example between floor and wall. These structures should not just meet the demands of structural integrity but also the dynamic requirements. Therefore, gaining knowledge about their dynamic behaviour is of crucial importance. To reduce noise and vibration through the junctions, rubber foam materials may be introduced between the walls and the floors and ceilings<sup>1</sup>. Hence, finite element simulations are useful as a prediction tool during the design phase. In this study, the properties of a junction when introducing a rubber foam material - Sylodyn<sup>®</sup> - in between were investigated by means of the finite element method using the commercial software Abaqus. The flanking transmission was specifically analysed.**

### **1 INTRODUCTION**

Lightweight structures made of timber material have a number of advantages; they may become cost effective in the future and they demand relatively short production time. However, one of the main drawbacks is related to the sound transmission, as it is becoming an increasing nuisance. The differences in weight, stiffness, density and repartition compared to traditional materials have repercussions on how the sound propagates throughout the structures. Due to this, problems with sound insulation at low frequencies through the junctions may arise. In order to avoid such problems, the weight of the construction could be increased, but this would go counter the main advantage of these constructions, i.e. being light. Another solution, which has been proved to be effective via measurements<sup>1</sup> but not yet accurately modelled using the finite element method (FEM), is to introduce a rubber foam material within the junction. The main

---

<sup>a)</sup> email: [juan.negreira\\_montero@construction.lth.se](mailto:juan.negreira_montero@construction.lth.se)

<sup>b)</sup> email: [anders.sjostrom@construction.lth.se](mailto:anders.sjostrom@construction.lth.se)

<sup>c)</sup> email: [delphine.bard@construction.lth.se](mailto:delphine.bard@construction.lth.se)



purpose is to reduce noise and vibration in the low frequency range (i.e. 20 Hz – 200 Hz). In this investigation, the influence of *Sylodyn* when placed in junctions between floor, walls and ceilings is studied. Several types of floors and ceilings as well as different placements and properties of the *Sylodyn* have been analysed.

## 1.1 Problem Description

In this investigation, a standard volume of a room was considered. Its inner dimensions are 3.6 m width and 6 m long, whilst the height is 3 m. In Figure 1 and 2, the drawings from *Lindbäcks Bygg*'s project Brunnby Park in Upplands Väsby are shown. This lightweight structure using volume modules was chosen in order to carry out this flanking transmission investigation. The reason for this choice was its widespread use in Sweden and also because of a feasible future comparison between finite element simulations and in-situ measurements which have already been performed.

Two different placements of the *Sylodyn* were analysed as shown in Figure 3. One hereafter denoted as *case A*, where the *Sylodyn* is placed in between the top and the bottom part of the walls and the floor and ceiling on the side of the vertical partitions. The second, *case B*, where the *Sylodyn* is positioned underneath the floor and on top of the wall below. In this case, the upper wall is resting on the floor whereas the ceiling is fitted into the cavity left by the walls.

In both *case A* and *B*, the beams comprising the floor and the ceiling were considered to be placed along the shorter dimension, i.e. widthwise. Furthermore, for *case A*, the variation on the flanking transmission was also investigated when considering the beams along the lengthwise direction. A parameter study varying the material properties for the *Sylodyn* was also carried out. Finally, an analysis of the same junction without *Sylodyn* was performed.

## 2 FINITE ELEMENT MODEL

### 2.1 Introduction

Modelling a junction to represent all the phenomena involved and thus its real behaviour is a very complicated task<sup>2</sup>. The objective is to find a finite element model that is able to capture the phenomena that are occurring in reality. As previously mentioned, the main objective of this investigation is to study the effects of different placements of the *Sylodyn* on the flanking transmission. Hence, the relative differences between the modelled results are of greater importance than the absolute correlation between the model and the existent measurements. By doing so, one gains knowledge on the behaviour of the structure by investigating the parameters influencing the response and therefore enabling to eventually create a more refined model. With the latter model, one could try to correlate both experimental and simulation results.

As seen in Figures 1 and 2, the construction elements are composed by different materials, i.e. plasterboards, parquet, massive wood, etc. However, for this first investigation, wood was considered all over the whole model with exception of the *Sylodyn*. This simplification will not disrupt the relative differences between the different cases studied. Furthermore, only negligible vibrations are transmitted through the insulation existent in the partitions<sup>3</sup> and since modelling it would drastically increase the computational time, the insulation was excluded and taken into account by slightly increasing the damping of the other materials.

## 2.2 Materials

The structure will only be exposed to loads and displacements with low magnitude. Therefore, all non-linear behaviour was neglected and the materials may be modelled as linear elastic.

The elastomer introduced in the model to reduce the noise and vibration transmission was *Sylodyn NE*, a mixed cellular polyurethane dampening material developed by *Getzner Werkstoffe GmbH*. These viscoelastic construction elements are aligned in the path of propagation of the vibrations. Compared to existing dampening rubber, *Sylodyn* is more durable, more stable and is able to be made thinner in order to fit into small spaces<sup>4</sup>. *Sylodyn* can be used in many different ways, e.g., covering the whole surface, in stripes or in block shapes. In this study, it was modelled as squared blocks with dimensions 100 mm x 100 mm x 25 mm. The distance *c/c* (centre-to-centre) between two blocks in the junction was set to 400 mm.

In Figure 4, the load-deflection curve under compression loads for a block of *Sylodyn* is shown<sup>4</sup>. This curve, as all the material properties, is dependent on a parameter called shape factor; a geometric measure for the shape of an elastomeric bearing. It is defined as the ratio of the loaded area and the sum of the area of the perimeter surfaces. It has an influence in the deflection and the static load limit respectively. It can be observed that in the lower load ranges, there is a linear relationship between compression and deformation. After the linear load range, the curve moves on a degressive path, i.e. the material reacts to additional static and dynamic loads in a particularly soft manner, thus allowing for highly effective vibration isolation. For loads and deformation exceeding the degressive range, the deflection curve is progressive. The material becomes stiffer and therefore the vibration isolation is reduced. This material is not affected by overload as it recovers almost completely after load removal<sup>4</sup>. Furthermore, as all elastomers, *Sylodyn* reacts to dynamic loads more stiffly than to static loads.

Poisson's ratio can only be stated with adequate precision for materials that are loaded in the linear range. It was set to 0.44, whilst the loss factor considered was 0.20<sup>4</sup>. Due to this assumption (Hooke's law applies), the preload on the *Sylodyn* due to the walls resting on top of the blocks will not have an influence on the results. The material properties are listed in Table 1, where  $E$  [MPa] is the modulus of elasticity,  $\nu$  [-] the Poisson's ratio,  $\eta$  [-] the loss factor,  $d$  [-] the damping ratio,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] the mass density and  $G$  [MPa] the shear modulus.

The other material used in the model was wood. It is an anisotropic material, implying different material properties in different directions. It was modelled in *Abaqus* with the engineering constants shown in Table 1<sup>5</sup>. Direction 3 was considered to be along the fibre direction whilst direction 1 and 2 are perpendicular to the fibre direction. Damping prevents the structure from oscillating infinitely. It is always present in real structures and thus considered also here. It was modelled as Rayleigh damping<sup>6</sup> and the damping ratio was set to 3%.

## 2.3 Mesh

Initial calculations, i.e. convergence analyses, were carried out on single beams with different lengths and on plates with different dimensions in order to establish an appropriate mesh size that provides adequate results with low computational cost. Consequently, one ensures

that all the beams and plates assembled to create the entire model are correctly meshed and thus providing reliable results. Note the importance of this fact since we are dealing with a large model; the FE-model contains approximately 2 millions of degrees of freedom. A too fine mesh will most certainly cause an unacceptable long computation time. Only 8-nodes brick elements (C3D8R) were tried, because quadratic 20-node brick elements (C3D20R) have a tendency to create a model stiffer than reality<sup>2</sup>. Besides, they also cause long computation times and are therefore disregarded as element type for the complete structure.

When performing the convergence analyses, it was noticed that the biggest differences between the results of the reference mesh and the chosen FE solution are in the torsional modes; but the fact that the structure will mainly be excited by vertical loads makes the mode shapes with movement in vertical direction more important in this investigation. The vertical oscillations are also assumed to create most of the disturbing vibrations and noises that can occur in lightweight structures<sup>2</sup>.

The most difficult challenge when creating a model of an assembled structure is to model the connections between the parts accurately. The connections determine most of the torsional rigidity and influence the behaviour of the whole structure<sup>2</sup>. In this study, the interactions between parts were modelled with tie constraints (full coupling). This creates stiff connections, as it happens to be the case in the real structure, where the elements are rigidly constructed using glue and screws.

The load considered was a 5 N harmonic concentrated force located at the middle of the room. A frequency sweep from 10 to 100 Hz in steps of 1 Hz was carried out. Fixed boundary conditions were applied at the free end of the walls. The different models for all studied cases can be seen in Figures 5-7. The blocks of *Sylodyn* are shown in grey colour, the floor in blue, the ceiling in red, the inner walls in yellow and the outer walls in green. Apartment separating walls (inner walls) were considered along the long edge of the room, whereas facade walls (outer walls) along the shorter sides. The height of each room was set to 1.5 m.

### **3 RESULTS**

The following results show the performance of the junctions regarding the flanking transmission by means of plots “acceleration versus frequency”. Furthermore, the transmission from the source, located on the middle of the floor, to the ceiling underneath through the inner wall junction was investigated, i.e. the vertical transmission from the floor to the ceiling through the long side of the room. The frequency dependent acceleration was evaluated at 6 nodes along the floor, walls and ceiling, all placed 0.2 m from the junction. Likewise, the acceleration magnitudes were also evaluated on top and bottom of the *Sylodyn* blocks. An average acceleration for the 6 nodes was carried out and plotted for the different elements composing the junction. In Figure 3 the evaluation points are shown.

#### **3.1 Case A with beams oriented widthwise**

In Figure 5, one can observe that the *Sylodyn* blocks (grey) are placed between the partitions whereas the floor and the ceiling are fitted into the space created by the walls, see Figure 3. The beams are oriented widthwise.

As shown in Figure 8, the maximum acceleration magnitudes occur between 35 and 60 Hz. One can also identify that *Sylodyn* dissipates nearly all vibrations, i.e. dampens vibrations (see Figure 13), as the acceleration levels evaluated on the ceiling and the wall underneath are very low.

### **3.2 Case A with beams oriented lengthwise**

This case is comparable with the previous case, although the beams in the floor and ceiling are now placed lengthwise, see Figure 6. The peak acceleration magnitudes existent on the floor are higher than in the previous case, probably due to the change of the orientation in the load bearing beams of the horizontal partitions. Likewise, the shape of the plots is also changed as seen in Figure 9. In this case, the acceleration peaks occur between 25 and 50 Hz as well as between 80 and 95 Hz approximately. However, the acceleration magnitudes on the ceiling and wall underneath are still very low, depicting the efficiency of the *Sylodyn* when dissipating the energy of the vibrations.

### **3.3 Case B with beams oriented widthwise**

In Figure 7 the changed placement for the *Sylodyn* is shown. The walls on the upper floor now rest on the floor itself, being the *Sylodyn* in contact with the floor and the walls in the floor underneath. The ceiling is, as in the other cases, fitted into the cavity left by the vertical partitions. The shape of the plots resembles the ones in *case A* widthwise but with smaller acceleration magnitudes almost over all the frequency range as shown in Figure 10. This shows *a priori* a better performance of the junction regarding flanking transmission, although a more extensive study is needed to confirm this. As in the other cases, the *Sylodyn* performs very well when reducing the transmitted vibrations.

### **3.4 Parameter study**

The modulus of the elasticity of the *Sylodyn* was varied in order to investigate its influence on the response of the structure. The *case A* with the beams of the floor and the ceiling along the widthwise direction was considered for this purpose. The initial value of the modulus of elasticity, i.e. 3 MPa was varied and set to 6 MPa and 9 MPa respectively. In Figure 11, the results are shown. It can be observed that the variation on the acceleration magnitude when increasing the value of the modulus of elasticity is not as large as it could be expected beforehand.

### **3.5 Junction without Sylodyn**

The performance of the junction without *Sylodyn* was also investigated. Thus, all contacts were wood-wood connections. The performance of *case A* with beams placed widthwise was compared in both cases. The results are shown in Figure 12. It is apparent that the acceleration magnitudes evaluated at the bottom room without the *Sylodyn* are much higher, which indicates the advantages of using the *Sylodyn* as a vibration insulator in the junction.

## 4 CONCLUSIONS

An extensive investigation regarding the flanking transmission when introducing *Sylodyn* in a lightweight junction was carried out. It was shown that regardless of the orientation of the load bearing beams in the floor and ceiling or the placement of the *Sylodyn*, the reduction of acceleration magnitudes within the blocks of *Sylodyn* is very effective. In Figure 13 one is able to perceive how the vibrations, i.e. acceleration magnitudes, are reduced inside the block.

It was also portrayed by a parameter study that a variation in the modulus of elasticity of the *Sylodyn* does not greatly influence the vibration transmission through the junction. Likewise, it was seen that *case B* for the placement of the *Sylodyn* may perform better than *case A*, although a more extensive study is needed in order to confirm this fact.

In addition, the performance of a junction with *Sylodyn* was compared to the same junction without *Sylodyn*, i.e. wood-wood connections all over. It was observed that the vibrations transmitted are much higher in the latter than in the former case. Hence, the advantages of using *Sylodyn* for this type of junction were proved.

An extensive insight into the performance of the junction regarding flanking transmission has been gained. Ultimately, this will eventually allow the creation of more refined models in order to correlate both experimental and simulation results, which could be used as a prediction tool during the design phase of the structures. In these advanced models, more realistic boundary conditions as well as the real materials for the partitions may be considered.

Note that the conclusions drawn in this investigation correspond to this specific type of junction, although many junctions found in real lightweight structures have similar features.

## 5 ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Silent Spaces project, a part of the EU program Interreg IV.

## 6 REFERENCES

1. J. Forssén et al. "Acoustics in wooden buildings. State of the art 2008. Vinnova Project 2007-01653". *SP Technical Research Institute of Sweden Report 2008:16*. Stockholm (2008).
2. J. Negreira Montero, O. Flodén and D. Bard, "Reflection and transmission properties of a wall-floor building element: comparison between finite element model and experimental data", *Acoustics 2012 Hong Kong* (conference proceedings), Hong Kong (May 2012).
3. L. Holterman and A. Peterson. *Vibrations in a seven-storey wood building*. Master thesis. Division of Structural Mechanics, Lund University, Sweden (2008).
4. Getzner Werkstoffe GmbH (2004). *Data sheet of the Sylodyn NE*.

5. F. Morianon, S. Fortino and T. Toratti, “A method to model wood by using Abaqus finite element software. Part 1: Constitutive model and computational details”, *VTT Technical Research Center of Finland -Report 687-*, VTT Publications, Helsinki (2008).
6. A. K. Chopra, *Dynamics of structures*, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice Hall, New Jersey, USA (2007)
7. L. Cremer, M. Heckl, B. A. T. Petersson. *Structure borne-sound*. 3<sup>rd</sup> Edition. Springer-Verlag. Berlin (2005).
8. K.J. Bathe, *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, New York, United States (1996).
9. C. Hopkins, *Sound Insulation*, Elsevier, Oxford, UK (2007).
- 10.L. Galbrun, “Vibration transmission through plate/beam structures typical of lightweight buildings: Applicability and limitations of fundamental theories”, *Applied Acoustics*; 71:587-596 (2010).

Table 1 – Material Properties

Wood		Sylodyn	
$E_1$ [MPa]	900	$E$ [MPa]	3 (varied)
$E_2$ [MPa]	500	$\nu$ [-]	0.44
$E_3$ [MPa]	12500	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	750
$G_{12}$ [MPa]	40	$\eta$ [-]	0.1
$G_{13}$ [MPa]	700		
$G_{23}$ [MPa]	700		
$\nu_{12}$ [-]	0.558		
$\nu_{13}$ [-]	0.038		
$\nu_{23}$ [-]	0.015		
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	550		
$d$ [-]	0.03		

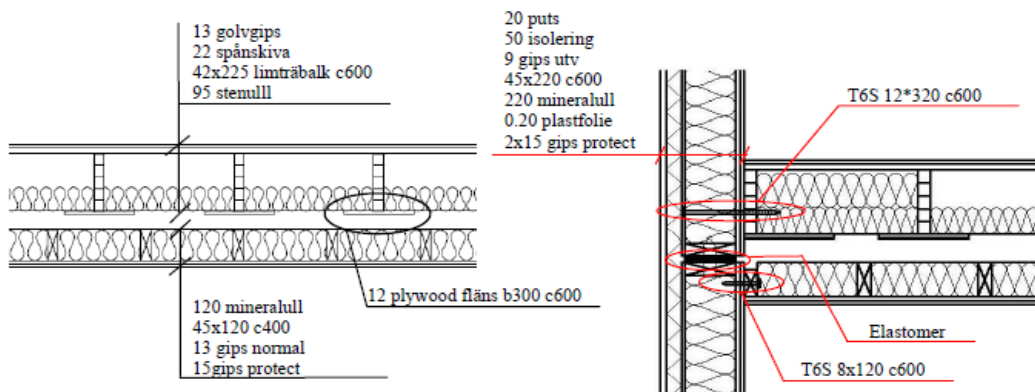


Fig. 1 - Floor/Ceiling drawings (left) and assemblage with the façade element, the so-called outer-wall (right).

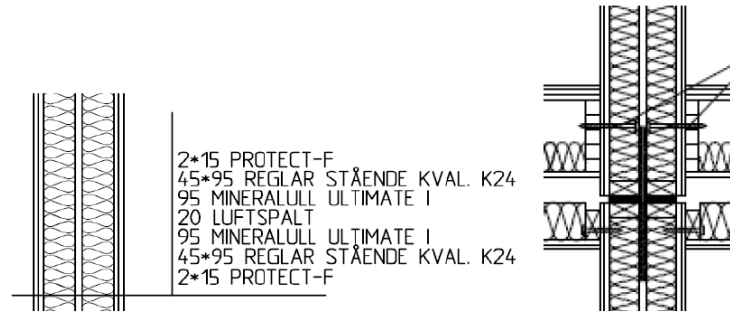


Fig. 2 - Drawings of the separating walls, i.e. inner walls (left) and the assemblage with the floor/ceiling (right).

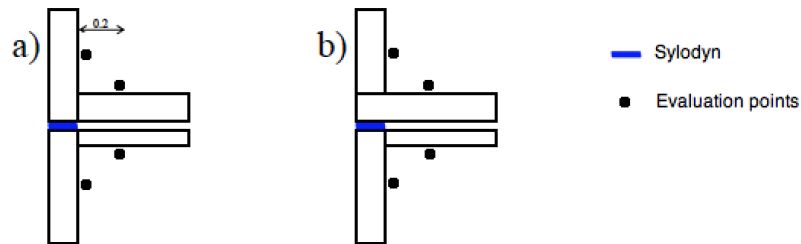


Fig. 3 - Different Sylodyn positions: (a) floor and ceiling installed between the walls and (b) floor installed upon walls. The evaluation points are dots in the figure (6 evaluation points along each line are considered).

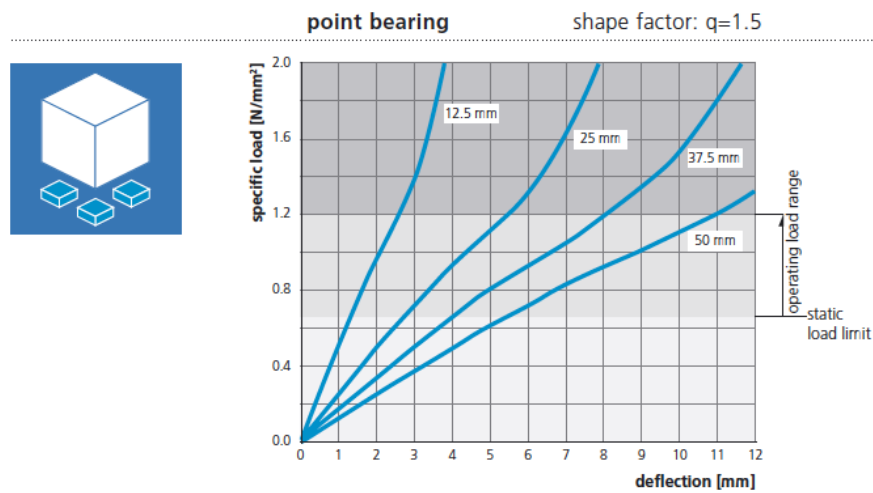
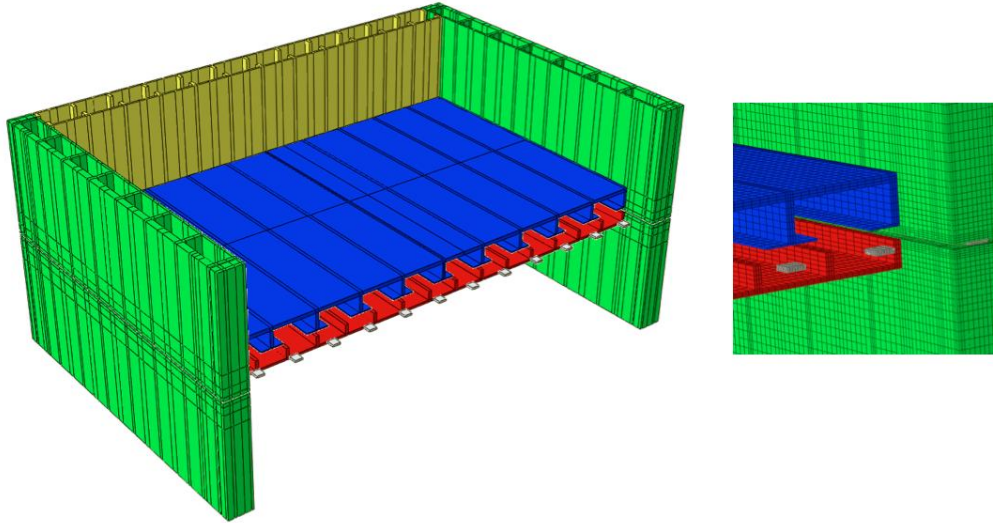
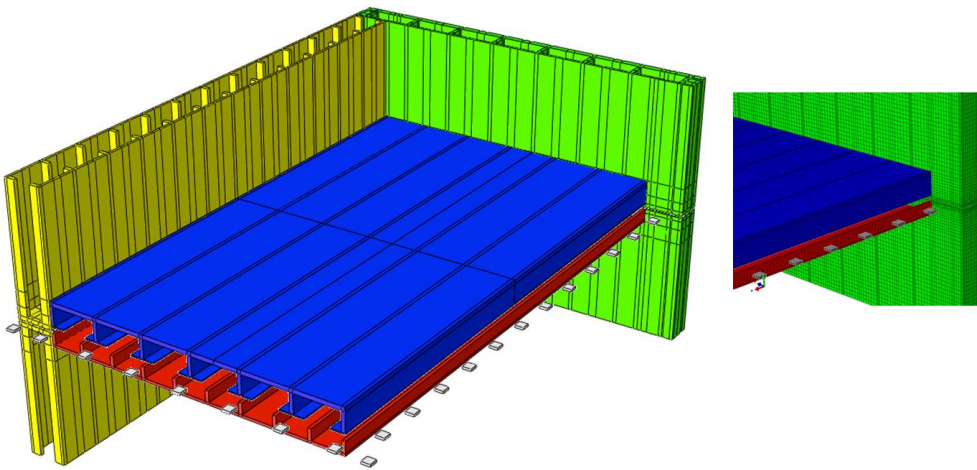


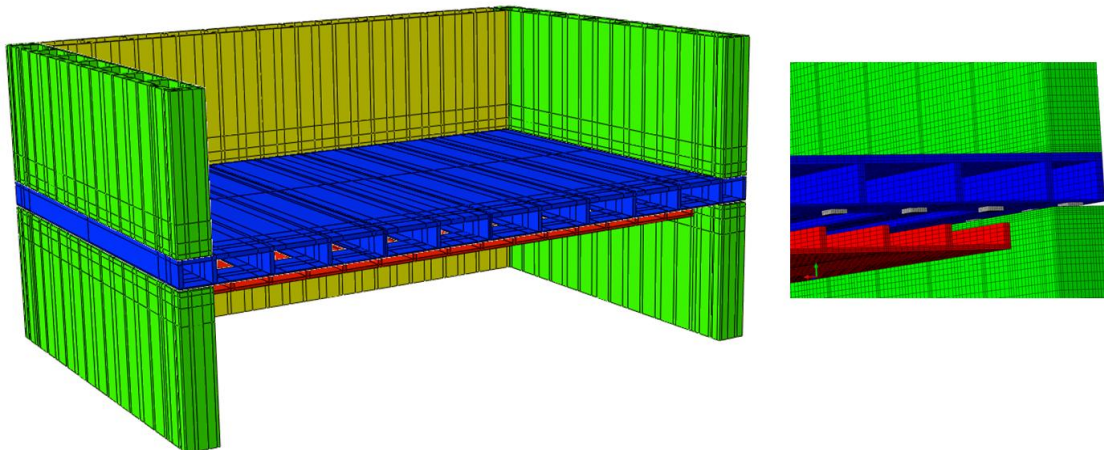
Fig. 4 - Quasi-static load-deflection curve for the Sylodyn under compression load<sup>4</sup>.



*Fig. 5 - Case A with beams oriented widthwise.*



*Fig. 6 - Case A with beams oriented lengthwise.*



*Fig. 7 - Case B with beams oriented widthwise.*



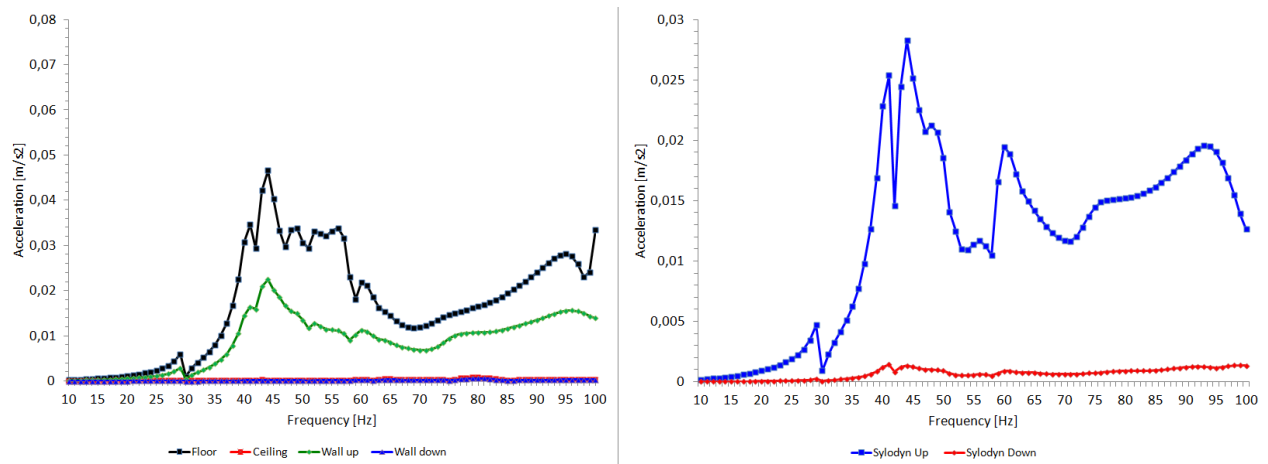


Fig. 8 - Case A widthwise. Acceleration magnitudes evaluated on the floor, ceiling, upper and bottom walls (left) and acceleration magnitudes evaluated on top and bottom of the Sylodyn (right).

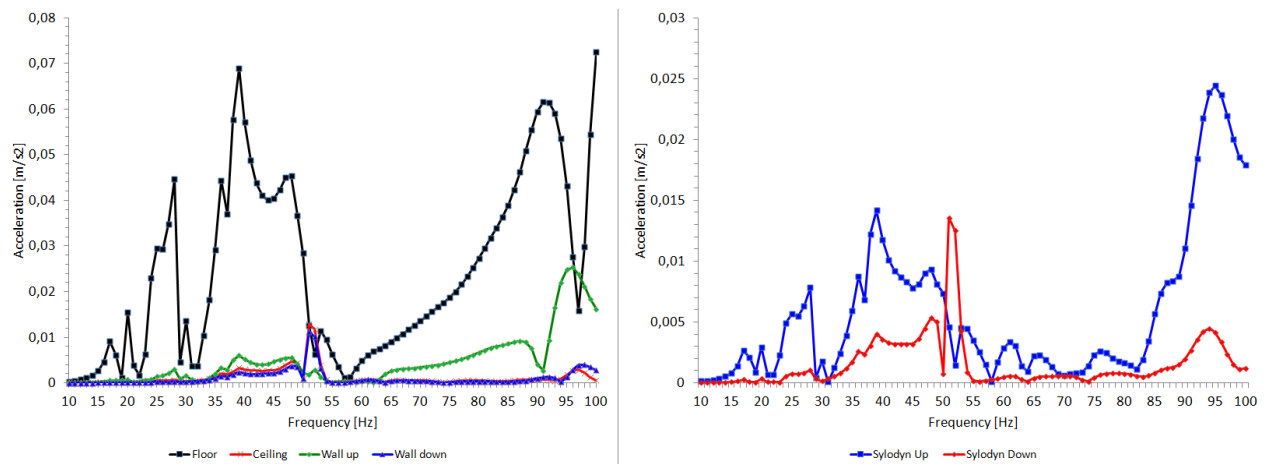


Fig. 9 - Case A lengthwise. Acceleration magnitudes evaluated on the floor, ceiling, upper and bottom walls (left) and acceleration magnitudes evaluated on top and bottom of the Sylodyn (right).

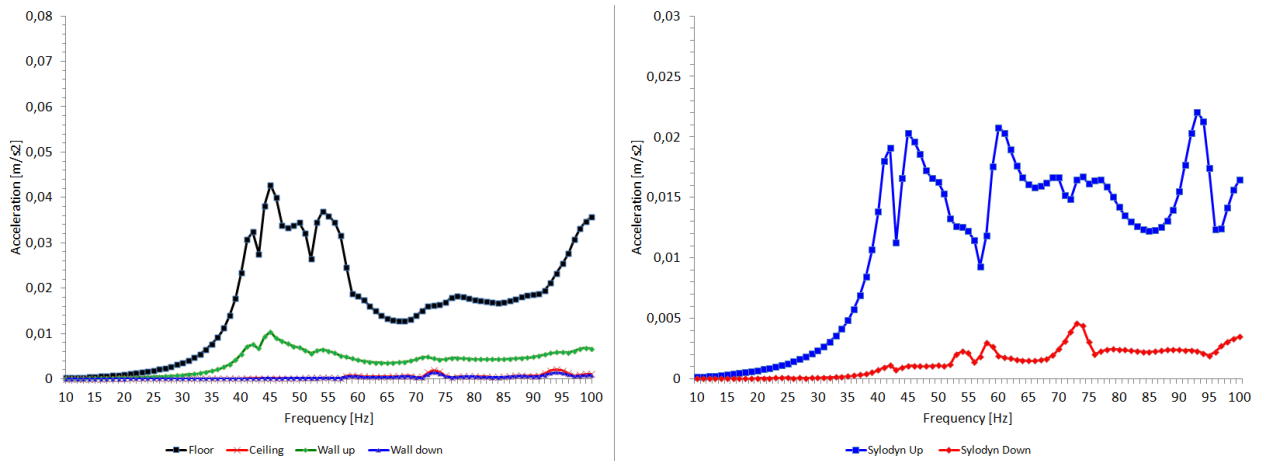


Fig. 10 - Case B widwise. Acceleration magnitudes evaluated on the floor, ceiling, upper and bottom walls (left) and acceleration magnitudes evaluated on top and bottom of the Sylodyn (right).

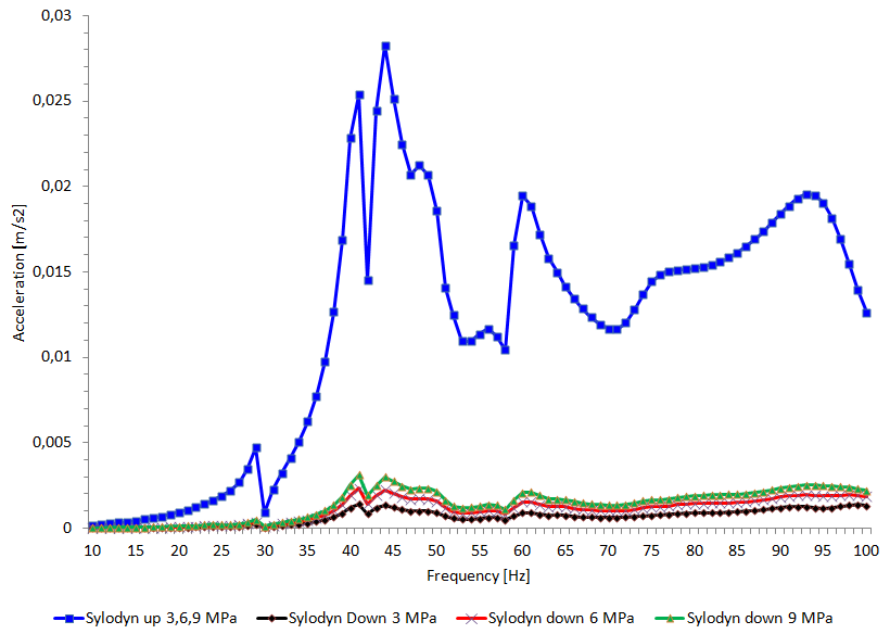
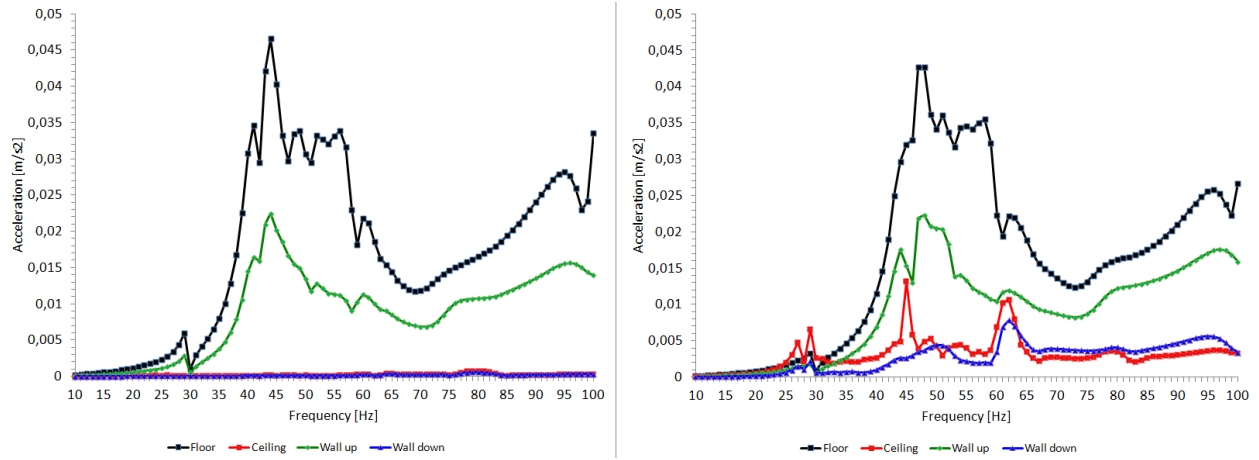
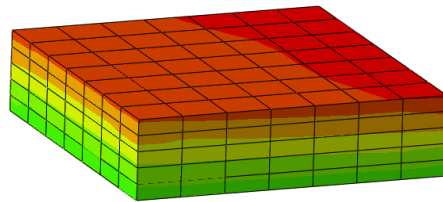


Fig. 11 - Parameter study. Comparison between the acceleration magnitudes evaluated on top and bottom of the Sylodyn blocks when varying their modulus of elasticity.



*Fig. 12 - Comparison between the acceleration magnitudes for the junction using Sylodyn (left) and without Sylodyn (right). Case A widthwise was considered. The acceleration was evaluated on the floor, the ceiling and the both wall in the upper and lower floor.*



*Fig. 13 -Example of reduction of the acceleration magnitudse in a block of Sylodyn for a given frequency (44 Hz) in case A widthwise. Red indicates high acceleration magnitudes whereas green shows low magnitudes.*