

## Massivtreelement med akustisk dempning

*Solid wood element with acoustic attenuation*

*Saksbehandler:* Kristine Nore, Jarle Aarstad, Audun Øvrum, Geir Glasø  
og Jan Arne Austnes  
*Prosjektnr.* 310191  
*Prosjekteier:* Norsk Treteknisk Institutt  
*Finansiering:* Innovasjon Norge  
*Dato:* November 2012

### Sammendrag

Å kombinere flere ønskede egenskaper i et bygningselement er fordelaktig. Ut ifra krysslimt massivtre er det mulig å lage et lyddempende element med ganske enkle midler. En Helmholtz-resonator, også kalt "flaskeresonator", oppstår når luftmassen i "flaskehalsen" svinger i resonans mot det fjærende, avstengte luftrommet i flasken. Også i et massivtreelement kan luftrom dannes ved å fjerne lameller i midtsjiktet, og "flaskehalsen" blir slissen som sages inn fra eksponert side. Hulrommet dempes med en fiberduk under slissen eller, mer praktisk, fylles med et lydabsorberende materiale.

Akustikkelementets absorpsjonsfaktor ble optimalisert mot lydfrekvenser i talens grunntoneområde for å kompensere for massive materialoverflaters avtakende lydabsorpsjon mot lavere lydfrekvenser. Øvrig innredning og møblering bidrar i praksis i sterkere grad med dempning mot høyere frekvenser. Veid absorpsjonsfaktor ble bestemt til maksimalt  $\alpha_w = 0,25$  for akustikkelementet målt i klangrom. Dette prinsippet kan brukes med andre utslissinger og hulromsvolum, for dermed å optimalisere den maksimale absorpsjonsfaktoren mot andre frekvensområder.

Massivtreelementer har i utgangspunktet gode egenskaper mht. styrke og stivhet. I forbindelse med utviklingen av et modifisert massivtreelement med sikte på å oppnå gode akustiske egenskaper mht. reduksjon av etterklangstid i rom, var det behov for å se nærmere på hvordan en slik modifisering påvirket styrke- og stivhetsegenskapene. Et slik modifisert element skal ha gode akustiske egenskaper og samtidig ivareta egenskapen som avstivende skive i bygg.

Det ble gjennomført forsøk hvor bruddkapasiteten til både standardelementer og modifiserte akustikkelementer ble testet. I testen ble elementenes bruddkapasitet testet og i tillegg ble kapasiteten til sammenføyningen mellom naboelementer testet.

---

*Stikkord:* Romakustikk, tre, massivtre, Helmholtz resonator, skjærkapasitet  
*Keywords:* Acoustics, wood, CLT, Helmholtz resonator, shear capacity

---

Resultatene viser at bruddkapasiteten til modifiserte akustikkelementer er en del lavere enn for standard elementer, men kapasiteten til de modifiserte elementene er ikke i seg selv en begrensning med elementet brukt som avstivende skive i bygg. Ikke uventet er det kapasiteten til forbindelsen mellom to naboelementer som begrenser den totale kapasiteten til en modifisert massivtreskive.

Begrensningen til forbindelsen mellom modifiserte massivtreelementer ligger i antall bindere det er "plass" til i forbindelsen. Dette er i stor grad bestemt av antall tverrlameller i elementet og bredden på hver enkelt tverrlamell. For modifiserte akustikkelementer bør det benyttes kryssfinerbord som skjøtebord mellom nabo-elementer og i tillegg bør det sikres at det alltid er tverrlameller ved kraftinnføring og mothold. Alternativt kan det benyttes en utenpåliggende lask, i stedet for tradisjonell not og fjær i forbindelsen, for å øke arealet for innfesting og dermed antall bindere i en slik løsning.

Den reduserte bærekapasiteten er minimal fordi slissene i yttersjiktet ikke har en større perforeringsgrad enn 7 % og slissene ikke går helt ut til opplegg.

Elementene ble brukt i biblioteket på nye Hadeland vgs. Det ble levert 1440 m<sup>2</sup> akustikkelementer.

Disse overflatene bidro med ca. 2/3 av absorpsjonsmengden for reduksjon av etterklangstiden mindre enn ett sekund, som er beregnet etter måling i ferdig rom med møblering som ble gjort 7. september 2012.

Dessverre ble bedriften som utviklet produktet, Moelven Massivtre (MMT), avvirket slik at dette nye akustikkelementet ikke ble solgt til flere enn prøveprosjektet som beskrives i rapporten, men med denne beskrivelsen bør det være mulig å bestille massivtreelement med tilsvarende egenskaper hos andre leverandører.

## Summary

Combining several desirable properties in a building element is advantageous. With CLT elements, it is possible to create a sound absorbing element with fairly simple means. A Helmholtz resonator, also called "bottle resonator", occurs when the air mass in the "bottleneck" oscillation in resonance against the resilient, a closed airspace in the bottle. An airspace can also be formed in a CLT element by removing lamellas in the middle layer, and the "bottleneck" is made by creating slots from the exposed side. The cavity is attenuated by a geotextile or filled with a sound absorbing material.

Absorption factor for the acoustics CLT elements was optimized to sound frequencies in speech tonal range to compensate for CLT elements decreasing sound absorption surface properties for lower sound frequencies. Other fixtures and furnishings contribute in practice to a greater extent with attenuation at higher frequencies. Weighted absorption factor was determined to be maximum  $\alpha_w = 0.25$  for acoustic CLT element. The same principle can be used with other cavity volumes and "bottleneck" design, thereby optimizing the maximum absorption factor at other frequency ranges.

CLT elements has basically good properties with respect to strength and stiffness. During the development of modified CLT elements to achieve good acoustic properties with respect to reduction of reverberation in the room, an examination of how such modifications affect the strength and stiffness properties was needed. Modified CLT elements must have good acoustic properties, while at the same time maintaining the best possible stiffness and strength properties, when being used as stabilizer discs in a building.

We conducted experiments where fracture capacity of both standard CLT elements and modified acoustic CLT elements were tested. In the experiments, both ultimate failure loads for the two different elements and ultimate failure load capacity of the joint between adjacent elements were tested.

The results show that the ultimate failure load capacity of modified acoustic elements are lower than those of standard items, but the capacity of the modified items is not in itself a restriction when used as a stabilizer disc in buildings. Not surprisingly, the capacity of the connection between two adjacent elements limits the total capacity of a modified CLT elements.

The limitation of the capacity to the connection between the modified solid elements is the number of fasteners used in the connection. For modified CLT elements there is not enough space to install as many fasteners compared to standard CLT element. The number of fasteners to be used in modified CLT elements is largely determined by the number of transversal lamellas in the element and the width of each transversal lamella.

For modified acoustic CLT elements we recommend that plywood should be used in the connection, and in addition there should always be transversal lamellas at the point of force introduction a counter hold when modified CLT elements are being used. Alternatively, the use of a surface-mounted plywood, instead of the traditional tongue and groove connection should be used to increase the area and number of fasteners.

The reduced load bearing capacity is minimal for the modified CLT elements, because the slots in the outer layer do not have a greater perforation degree than 7% and the slots do not go all the way to the point of load introduction.

The modified CLT elements were used in the library of a new building, Hadeland Secondary school. A total of 1440 m<sup>2</sup> modified CLT elements where used in this building.

These surfaces contributed approx. 2/3 of total absorption amount for reducing the reverberation time to less than one second, which is calculated by measuring the finished room with furniture on September 7, 2012.

Unfortunately, the company that developed this product phased out, Moelven solid wood (MMT), i.e. this new acoustic element is not applicable for purchase and only sold as samples to the project described in this report. But with this description it should be possible to order solid elements with similar properties from other suppliers.

## Forord

Å kombinere flere egenskaper i ett og samme bygningselement er fordelaktig. Med massivtreelementer kan elementenes bærende og statiske egenskaper kombineres med visuelle treoverflater. I tillegg vil massivtreelementer bidra til godt inn klima gjennom sine fukt- og varmevekslende egenskaper.

I dette prosjektet var det et ønske om å videreutvikle massivtreelementenes gode egenskaper til også å ivareta god romakustikk (liten etterklangstid), det vil si integrert akustisk dempning i elementene. Dette skulle gjøres uten å redusere de gode styrke- og stivhetsegenskapene til elementene vesentlig.

Prosjektet var delt inn i tre deler:

1. Utvikling av akustiske egenskaper basert på Helmholtz-resonator.
2. Testing av de akustisk modifiserte massivtreelementene mht. styrke- og stivhet.
3. Implementere del 1 og del 2 i det nye biblioteket på Hadeland videregående skole, hvor det ble foretatt måling av de akustiske egenskapene in situ.

Prosjektet ble initiert av Moelven Massivtre AS sammen med Norsk Treteknisk Institutt ved Jarle Aarstad, våren 2010.

Prosjektet har vært finansiert av Innovasjon Norge og industrideltagere. Prosjektleder har vært Kristine Nore (MMT/Treteknisk). Prosjektdeltagere: Moelven Massivtre AS (MMT), Treteknisk, Sweco, SINTEF Byggforsk, Arkitektfirmaet LilleFrøen og Opplandbygg ANS.

Prosjektet vil takke Innovasjon Norge for økonomisk støtte til prosjektet. I tillegg vil vi rette en stor takk til Jan Arne Austnes (Sweco) for meget stort engasjement og uvurderlig hjelp ved utvikling og verifisering av de modifiserte massivtreelementene.

Massivtreelementene med statiske egenskaper, visuelle overflater og integrert akustisk dempning ble første gang benyttet i nye Hadeland Videregående skole på Gran i biblioteksdelen (1.200 m<sup>2</sup>). Resultatet i ettertid ble meget godt både estetisk og funksjonelt.



## Innhold

Sammendrag.....	3
Summary .....	5
Forord .....	7
1 Innledning.....	10
2 Teori – krysslimt massivtreelement og akustisk dempning.....	11
2.1 Krysslimt massivtre .....	11
2.2 Behov for akustisk dempning .....	12
2.3 Helmholtz-resonator.....	12
2.4 Akustikkegenskaper – målinger i klangrom.....	13
3 Utviklingsprosessen av akustikkelementet .....	14
3.1 Produksjon .....	14
3.2 Forsøksoppsett .....	16
3.3 Resultater av målinger i klangrom .....	18
4 Skjærtesting av standard krysslimtre massivtreelementer, akustikkelementer og begge med skjøl .....	20
5 Prøveuttak og lagring.....	20
6 Oppsett for testing .....	21
6.1 Testserier og konfigurasjoner .....	23
7 Resultater .....	25
7.1 Resultat – bruddformer .....	29
7.1.1 Testserie 1.....	29
7.1.2 Testserie 2.....	32
7.1.3 Testserie 3a.....	33
7.1.4 Testserie 3b .....	33
8 Diskusjon skjærtesting .....	36
9 Biblioteket i Hadeland vgs. ....	37
9.1 Dimensjonering opptak av seismisk last .....	41
10 Oversikt over tilsvarende produkter .....	41
11 Referanser .....	42
Vedlegg: Utnyttelse i opptak av seismisk last .....	43

## 1 Innledning

Moelven massivtre (MMT) var nær ved å miste en stor leveranse fordi mye av den synlige massivtreoverflaten i himlingen ville bli dekket av akustiske absorberer. Siden prinsippet om å konstruere en Helmholtz-resonator ut ifra et massivtre-element hadde vært diskutert, tok MMT og Treteknisk kontakt med Innovasjon Norges (IN) tredriver i Buskerud. IN var positive. MMT, Jan Arne Austnes (Sweco Norge) og Treteknisk fikk raskt skissert et forsøksoppsett med kostnadsramme. Det ble gjort noen teoretiske betraktninger rundt et mulig resultat. Prosjektet ble umiddelbart igangsatt.

Det ble produsert testelementer i tre omganger med oppnådde forbedringer, både akustisk og produksjonsteknisk. Det foregikk også kontinuerlig oppfølging i fabrikk. Utviklingsprosessen varte fra april til september 2010. Resultatene ble som forventet ut ifra beregninger, et solid og "intelligent" krysslåst massivtre-element. Produksjon av akustikkelementer til biblioteket på nye Hadeland vgs. startet i oktober 2010.

En referansegruppe ble satt ned for å følge utviklingen av elementet.

Deltakerne var:

Ole Arnt Tabuk, Prosjektsjef, Oppland Entreprenør

Stein Sole, arkitekt, Lille Frøen arkitekter

Per Kristian Lindahl, Byggherre, Oppland fylkeskommune

Jan Arne Austnes, rådgiver akustikk, Sweco

Kristine Nore, prosjektleder, Moelven Massivtre

Denne rapporten beskriver prinsippet for en Helmholtz-resonator, utviklingsprosessen og produksjonen av massivtre. Dette inkluderer akustisk demping, graden av akustisk demping, styrkemessige tester og analyser, samt prosjektet Hadeland vgs. Der er det over 1440 m<sup>2</sup> slike elementer i øvre del av vegg og i himling. Massivtreveggen opptar også horisontale seismiske laster. Takelementene i massivtre er selvbærende mellom limtre gitterdragere med største spenn på 8,1 m. De fleste takelementer spenner med kontinuitet over to felt.

I "Videre arbeid" til slutt i rapporten oppsummeres områdene som har størst mulighet for videre optimalisering av elementet.





*Figur 1. Biblioteket i nye Hadeland videregående skole under bygging med akustikkelementer med slisser i øvre del av vegg og i himling.*

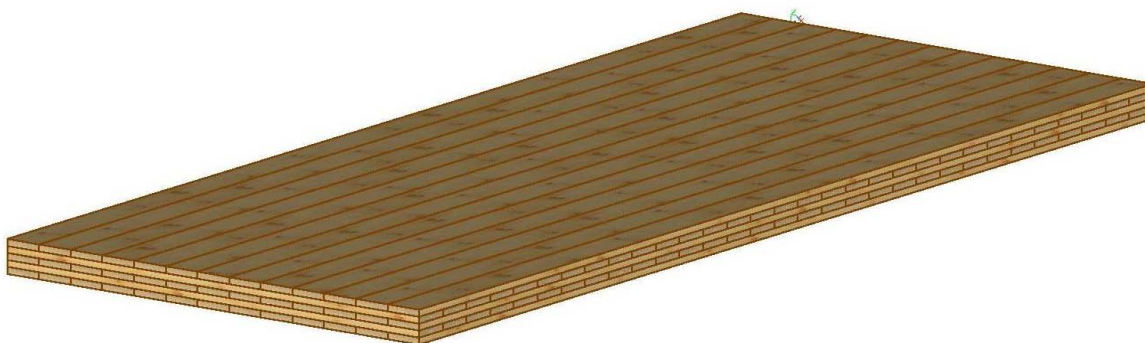
## **2 Teori**

### **- krysslimt massivtreelement og akustisk dempning**

Det å utforme massivtre som en Helmholtz-resonator er beskrevet i de videre kapitlene.

#### **2.1 Krysslimt massivtre**

Krysslimt massivtre er blitt et standardisert produkt etter flere tiår på markedet. Nå foreligger utkast til standarden pr. EN 16351 "Timber structures - Cross Laminated Timber - Requirements". Massivtre brukes hovedsakelig som bærende element, men for å få det kostnadseffektivt brukes også ofte treoverflaten, som synlig overflate innvendig. Lamellene, som plankene i elementet kalles, krysslegges i 90° og limes sammen, se Figur 1. Teknikken for liming kan variere, noe en kan lese mer om i Limtreboken (Limtreforeningen, 2000). På MMT ble det benyttet en høyfrekvenspresse som ga rask herding. Tykkelsen på selve massivtreelementet varierte i denne produksjonen mellom 60 mm og 240 mm, fra 3 til 7 sjikt. Ytterlamellene går i elementets lengderetning og midtlamellene på tvers av disse, se Figur 2.



Figur 2. Oppbygning av et femsjikts massivtreelement.

## 2.2 Behov for akustisk dempning

I rom der det samles mennesker og det arbeides konsentrert, må det brukes absorberende materialer for å dempe lyd som sendes ut ifra aktiviteter i rommet.

I lokaler der lyd som kommuniseres fra et område som i et teater eller i en kirke, er det ønskelig med lengre etterklangstid.

De mest vanlige og rimeligste absorbentene som ofte benyttes, er basert på mineralull. Det lages lydplater med ulike overflater som kan monteres i himling med installasjonshulrom, festes direkte på vegg, eller under etasjeskilleren. Når vi benyttet Helmholtz-prinsippet for lyddempning, kan det legges materiale med tilpasset strømningsmotstand i slissen som ikke trenger å være mer enn en tynn duk.

## 2.3 Helmholtz-resonator

En Helmholtz-resonator er en resonansabsorbent der luftmassen i en slisse eller "flaskehals", og stivheten i luften til et tilstøtende hulrom danner en resonator. Denne resonatoren er et svingesystem som gir dempning ved omvandling til varme. Innfallende lydbølge setter resonatoren i svingning og lydbølgeenergien omvandles til varme i resonatorens friksjonsgivende dempemateriale. Maksimal lydabsorpsjon oppnås ved resonansfrekvensen. I bygningsakustikken anvendes dette prinsippet for å oppnå ønsket akustisk dempning –spesielt for lave lydfrekvenser der andre materialoverflater gir utilstrekkelig lydabsorpsjon.

Resonansfrekvensen for en Helmholtz-resonator bestemmes ved sylindriske og rektangulære slisser ved hjelp av formelen:

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0 L}} \quad (1)$$

Hvor:

$f_H$	resonansfrekvensen (Hz)
$v$	lydhastighet (m/s)
$A$	tverrsnittsareal av slisse (m <sup>2</sup> )
$V_0$	statisk volum av tilhørende hulrom (m <sup>3</sup> )
$L$	effektiv dybde av slisse (m)

I dette prosjektet ønsket vi å legge denne resonansfrekvensen innenfor grunntoneområdet for tale. I et bibliotek vil disse lydfrekvensene være hørbart fremtredende og mest viktig å dempe. Talens grunntoneområde til unge voksne går fra 100 til 400 Hz, litt høyere enn for voksne som har noe lavere stemmeleie.

Vanligvis bidrar inventar til økende dempning mot høyere frekvenser.

## 2.4 Akustikkegenskaper - målinger i klangrom

For å dokumentere egenskapene som lydabsorbent ble det utført målinger i klangrommet hos SINTEF Byggforsk i Oslo.

Klangrommet til SINTEF Byggforsk ble benyttet til å gjøre alle målinger i dette prosjektet, se Figur 3. Målingene er standardisert etter NS-EN ISO 345:2010. Dimensjonen på rommet er 8×6,65 m<sup>2</sup> og tilfredsstillende alle bygningsmessige krav til klangrom i standarden. Måleutstyret som benyttes kalibreres jevnlig. Akustisk absorpsjonsfaktor bestemmes i 1/3 oktavbånd fra 50 Hz til 5000 Hz, litt større område enn angitt i NS-EN ISO 354:2003.

Testelementet ble lagt på gulvet og absorpsjonen blir differansen mellom målt mengde i tomt klangrom og i klangrom med testelement.



*Figur 3. Klangrommet med testelementene lagt ut. Kanten rundt er forseglet for kun å måle dempningen fra elementets overside.*

### 3 Utviklingsprosessen av akustikelementet

Her beskrives alle deler som måtte inngå i prosessen mot å kunne levere massivtreelement med tilfredsstillende dempning til nye Hadeland vgs. Siden det var liten tid før levering, ble den største begrensningen å tilpasse elementet mot effektivitet i produksjonsanlegget.

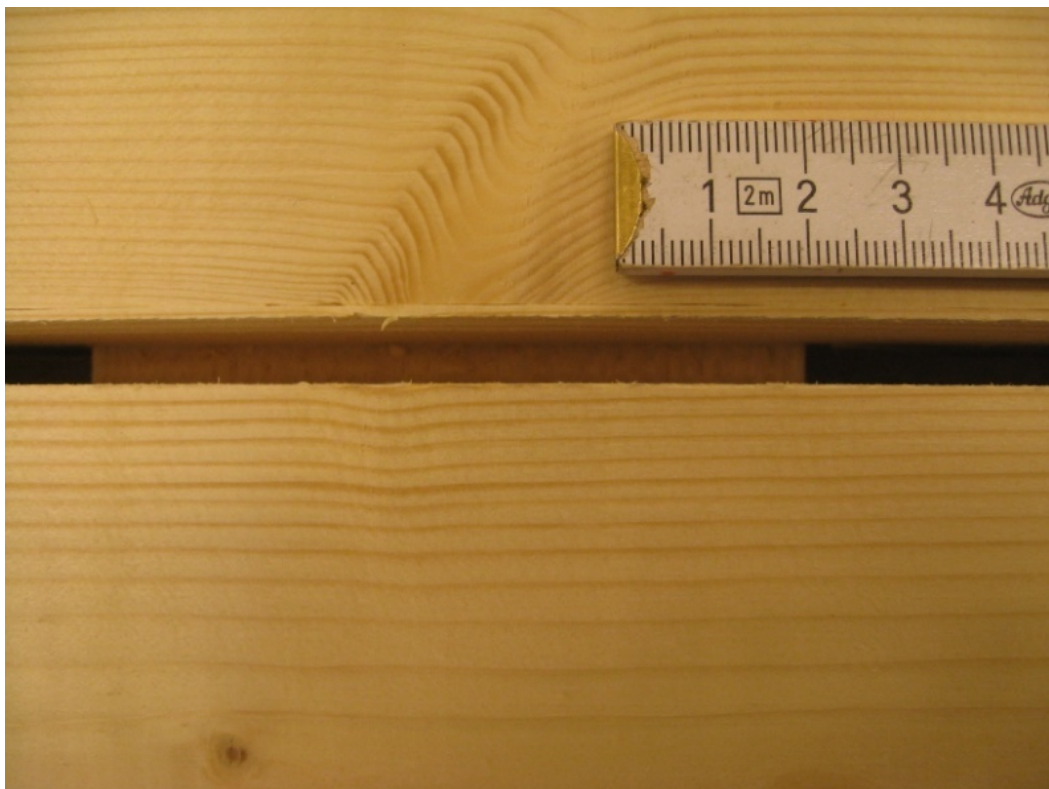
#### 3.1 Produksjon

Flere fremgangsmåter å produsere Helmholtz-resonator i massivtre ble diskutert. Hulrom i midtsjiktet skulle etableres. Siden stod valget mellom å bruke en såkalt akustikkduk, også kalt akuduk, som svingedemper eller den mer tradisjonelle tilnærmingen med lydabsorberende mineralull i hulrommet.

Elementet som skulle leveres til Hadeland vgs. skulle settes sammen til fullisolerte takelementer. Tverrsnittet ble bygd opp med massivtre i bunn, ribber og kryssfinér på toppen, et statisk kassetverrsnitt. Massivtreelementet skulle være 100 mm og i 3 sjikt. Elementet ble produsert med lamelltykkelse 34 mm og ble høvlet ned til 100 mm totaltykkelse etter liming.

I utgangspunktet går påføring av lim og legging av lamellene helautomatisk. Når midtlamellene skal legges ut med avstand i mellom for å etablere hulrom kunne dette gjøres ved å stille inn inndragningshastigheten til båndet som drar frem disse. Dette var delvis mulig ved å blokkere fotocellen som passet på at lamellene passerte, men det ble ikke det mest effektive metoden siden innstillingen var krevende. Det som ble gjort var å merke opp hvor lamellene skulle, så ble riktig antall lameller påført lim og sent ut på elementet og de kortlamellene som lå feil ble flyttet for hånd til riktig plass. Siden det tar noe tid å få lim på ytterlamellene var det tid til å gjøre denne flyttingen uten å bruke mer tid enn vanlig på å legge opp elementet.

Den CNC-styrte maskinen som formatterer elementet (kapper i riktig form), skar slisser med sirkelsag igjennom ytterlamellene ned til hulrommet, se Figur 4. Slissens hadde en bredde tilsvarende sagbladet, på 7,2 mm.



*Figur 4. Spalten med åpning ned til hulrommet.*

For å optimalisere dempningen ble det lagt inn absorbent i hulrommet. I dette prosjektet endte vi med å bruke mineralull i hulrommet som ble lagt inn samtidig som midtlamellene ble lagt på rett plass. Sirkelsagen snittet ned i dette sjiktet. Alternativet, som f.eks. lime inn en akustikkduk, ville ikke fungert med dette produksjonsprinsippet.

### 3.2 Forsøksoppsett

Testmatrisen i Tabell 1 viser elementene som ble produsert og hvordan forbedringer ga økt akustisk dempning. De ulike oppsettene gjør at en kan se hvilken betydning selve hulrommet og innvirkningen til en absorbent i hulrommet.

*Tabell 1. Testmatrise som viser utforming og veid absorpsjonstall mot element 6 som ble brukt i biblioteket til Hadeland vgs.*

Element		1	2	3	4	5	6
Slisser (7,2 mm bred)	#	8	8	13	12	12	12
Perforeringsgrad	%	3	3	5	7	7	7
Hulromsvolum	%	50	50	50	66	66	66
Fyll hulrom		-	MA	MA	-	MA	M
Fyll hals					Filt		

M - mineralull

A - akustikkduk

Element 1 var basisen for teorien om å lage en Helmholtz-resonator av et massiv-trelement. Med annenhver midtlamell fjernet og åtte sagspor fordelt utover elementet med jevne mellomrom ned til hulrommet. Etter testing i klangrom ble det vist at det ville være fornuftig med mer hulrom, mer demping, eller større perforeringsgrad.

Element 2 var å inkludere mineralull med akuduk i hulrommet. Mineralullplaten ( $h \times b \times l = 25 \times 100 \times 1200 \text{ mm}^3$ ) ble tredd inn fra siden av elementet før kantene ble forseglede før testing.

Element 3 var fortsatt en modifisering av Element 1. Mineralullplatene ble tatt ut og det ble skjært inn fem nye spor, slik at det totalt var 13 spor ned til hulrommet. Perforeringsgraden ble dermed økt fra 3 % til 5 %. Mineralullplatene ble puttet tilbake i hulrommene.

Element 4 var ny produksjon der to av tre midtlameller ble fjernet, slik at hulrommet ble 66 %. Det ble skåret 12 sagsnitt med like mellomrom. Perforeringsgraden ble da økt til 7 %. Denne gangen ble det forsøkt med demping i "halsen" av resonatoren, i sagsporet. Det ble klippet opp filtstrimler som ble plassert mot midtlamellene i sagsporet, se Figur 5. Løsningen fungerte godt, og materialene er billige, men vi fant ingen enkel fremgangsmåte for dette i den endelige produksjonen.



*Figur 5. Sliser med filt som motstand i "halsen".*

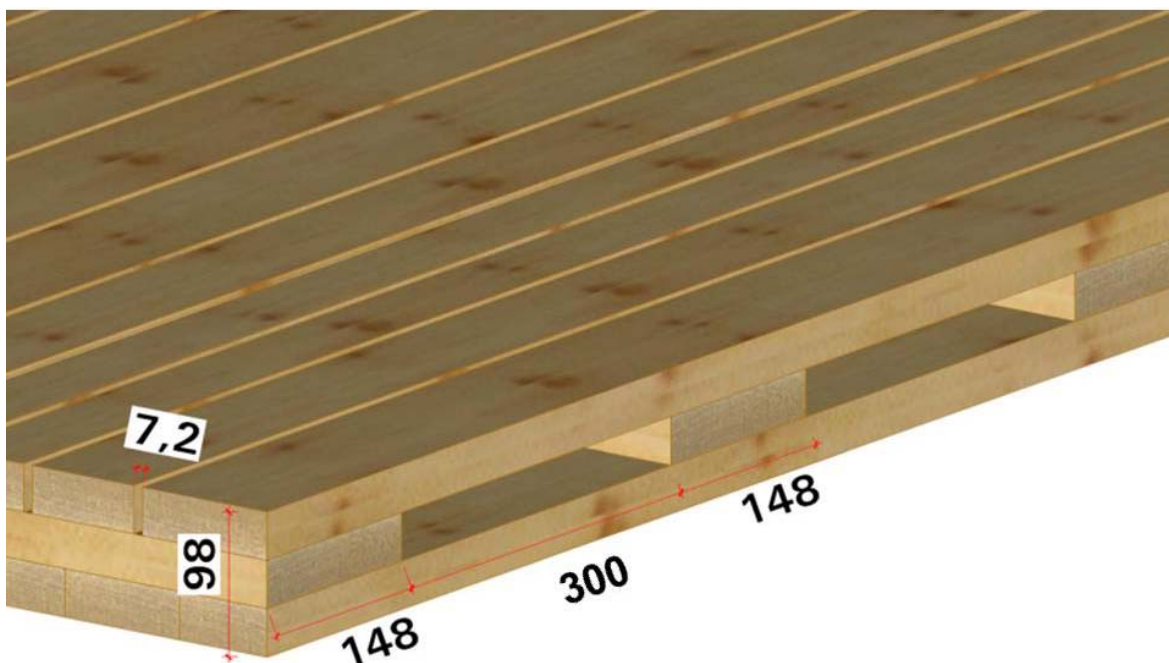
Element 5 var en modifisering av Element 4, der mineralull med akuduk ble tredd inn fra siden. Denne fikk testens høyeste poeng. Denne løsingen ble heller ikke funnet optimal i produksjonen, det var verken enkelt eller raskt å tre inn mineralullplatene i elementet.

Element 6 ble laget tilsvarende det vi ønsket å bruke i produksjonen. Lydplater av mineralull uten akuduk ble delt opp i riktige bredder (300 mm) og lagt på, samtidig som midtflamellene ble kjørt ut på stablebåndet. Siden færre midtflammer skulle på ble det heller ikke nå brukt lengre tid på oppstabling enn ved vanlige massivtreelementer. Etterpå ble det skåret sagspor ned til hulrommet. Ekstra tidsbruk var rundt 20 min. per element for å lage spor og gå over elementet (som var opptil 6 m lang).

Sagsporene var ikke lenger med jevne mellomrom, men varierte tilsvarende et mønster arkitektene var med å definere. Ulik bredde mellom slissene gir et større variasjonsområde for resonansfrekvenser.

Forbedringer som ble gjort mellom versjon 1 og 6 inkluderer:

- Større hulrom.
- Flere sagspor med ulik bredde i mellomrommene.
- Innlagt absorbent i hulrommet, mineralull.
- Ikke akuduk, fordi dette ikke lot seg gjøre effektivt i produksjonen.



Figur 6. Prinsipiell oppbygging av et akustikkelement. Det nederste sjiktet består av bord som ligger tett inntil hverandre. I tørrsjiktet er det avstand på 300 mm mellom hvert tørrbord hvor det legges inn isolasjon. Det øverste sjiktet (mot varm side i konstruksjonen) har en liten spalteåpning lik sagbladets tykkelse på 7,2 mm mellom hvert bord.

### 3.3 Resultater av målinger i klangrom

Som vist underveis i utviklingsprosessen fungerte det godt å bruke massivtre-elementet som en dempende Helmholtz-resonator. Tabell 2 viser økende verdier av den veide absorpsjonsfaktoren,  $\alpha_w$ , fra 0,1 til 0,25. Forbedringen er som følge at tiltakene med økt hulromsvolum, perforeringsgrad og dempemateriale.



Tabell 2 Resultater fra klangrom.

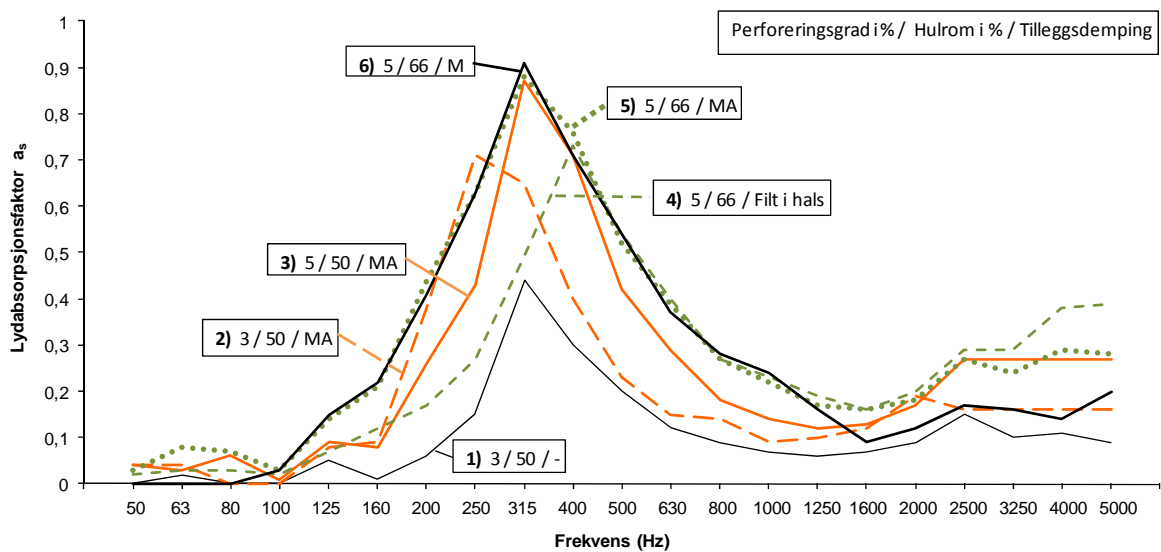
Element		1	2	3	4	5	6
Perforeringsgrad	%	3	3	5	7	7	7
Hulromsvolum	%	50	50	50	66	66	66
Dempemateriale		-	MA	MA	Filt	MA	M
Absorpsjonstall	$\alpha_w$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25	0,2

M - mineralull

A - akustikkduk

Grafen i Figur 7 viser utviklingen av testresultatene mer i detalj. Det er tydelig at ønsket om å legge en maksimal dempning i talens grunntoneområdet var vellykket. I et stort lokale vil det være stort areal tilgjengelig for slike elementer, og god akustikk blir mulig å oppnå. Prosjektgruppen godkjente resultatene med en foreløpig beregning av dempningen i rommet, slik at produksjonen for leveransen til biblioteket på Hadeland vgs. kunne gå i gang.

Elementene fikk endelig slissing som vist i Figur 8.



Figur 7. Resultater fra målinger i klangrom. Element 6 var endelig utførelse som ble tatt med til bruk i Hadeland vgs.



Figur 8. Veggoverflate med akustikkelement og furu som synlig overflate.

#### **4 Skjærtesting av standard krysslimtre massivtreelementer, akustikkelementer og begge med skjøl**

Som en del av prosjekt "Akustisk dempning" var det ønske om å teste skjærkapasiteten til modifiserte massivtreelementer med innebygd akustisk dempning. Tanken er å kombinere akustiske egenskaper til massivtreelementer samtidig som det kan fungere som avstivende skive i en veggkonstruksjon. Massivtreelementer har i utgangspunktet meget gode egenskaper i forhold til stivhet og bæreevne. Normalt sett er det forbindelsen mellom massivtreelementer som begrenser bæreevnen til en massivtreskive i en veggkonstruksjon. Det ble derfor også testet noen elementer med skjøl.

#### **5 Prøveuttak og lagring**

Elementene som ble brukt for testing var basert på 100 mm element bygd opp av 3 sjikt, dvs. de to yttersjiktene er orientert i lengderetning til elementet, mens midtsjiktet er orientert 90° på lengderetning.

Prøveelementene til den første testserien med akustikkelementer ble tillaget fra større moderelementer, og som først var testet i lydlabben til SINTEF Byggforsk. De øvrige ble ferdig formatert hos Moelven Massivtre AS før de ble sendt til SINTEF Byggforsk i Oslo for testing.

Elementene ble lagret hos SINTEF Byggforsk før testing. Prøvehallen er ikke klimatisert.

## 6 Oppsett for testing

På grunn av massivtreelementenes gode egenskaper mht. styrke og stivhet, ble det foreslått av SINTEF Byggforsk å lage et eget testoppsett for bestemmelse av skjærstyrken til massivtreelementene.

Ved tradisjonell skjærtesting av veggskiver (bindingsverk med trebaserte skiver) er det en utfordring med løftekrefter og mothold. Ved testing av massivtreelementer etter denne metoden må det påføres store krefter som kan medføre at det oppstår lokal knusing før skivens kapasitet er utnyttet.

Det ble derfor bestemt å teste elementene liggende horisontalt på gulvet og lage til et eget prøveoppsett. Det ble laget til et fastholdningspunkt og et lastinnføringspunkt. Lastene ble ført inn diagonalt ift. skivens lengderetning. Figur 9 viser oppsettet for testing av elementene.

Det ble brukt et vinkelstål med dimensjon 100x100 mm<sup>2</sup> både ved lastinnføring og mothold, se Figur 10. Ved lastinnføring er det et leddet lager, så man unngår tvangsmomenter ved lastinnføring. Ved mothold er det stivt ledd (momentstivt) som vist i Figur 11. Ved lastinnføring ble det laget til et rullelager på undersiden av elementet, se Figur 12 og 13.

Pålastingshastigheten ved testing ble satt til 10 kN/min. for alle prøvene.

I og med at denne type testing ikke tidligere har vært utført ble det behov for noen endringer med oppsett av deformasjonsmåling underveis.

I første testserie ble det satt opp deformasjonsgivere ved lastinnføring og ved mothold, diagonalt på prøvestykket som vist i Figur 9. Bortsett fra prøve nr. 1 ble det satt på deformasjonsgivere på både oversiden og undersiden av prøveelementene. Dette ble gjort siden akustikkelementene ikke er symmetrisk oppbygd og det kan medføre ulik deformasjon på den ene og andre siden av elementet.

I testserie 2, ble det montert deformasjonsgivere på kun oversiden av elementet, en i hver ytterkant av bredden til elementet, se Figur 13. I de to siste testseriene (hvor vi testet sammenføyningen mellom elementene) ble det montert en deformasjonsgiver midt over skjøtebord og ett inne på element, se Figur 14. Disse ble kun montert på oversiden av elementet.



Figur 9. Oppsett for skjærtesting av massiotre elementer på gulv. Med deformasjonsgivere for testserie 1.



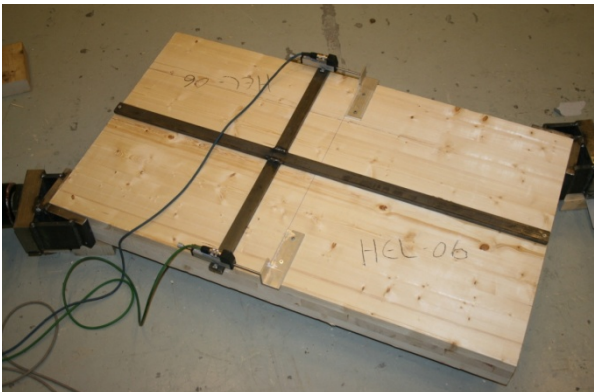
Figur 10. Lastinnføring med stålvinke med dimensjon 100x100 mm.



Figur 11. Mothold (fastpunkt) med stålvinke i dimensjon 100x100 mm.



Figur 12. Ved lastinnføring er det laget til et rullelager på undersiden av elementet.



Figur 13. Oppstilling av deformasjonsgivere ved testserie 2.



Figur 14. Oppstilling av deformasjonsgivere ved testserie 3 a og b. Testoppsett ved skjærtesting av testserie 3. Det er montert på et stålkruss hvor deformasjonsmålere er plassert henholdsvis midt over skjøtebord og litt ut på siden av skjøtebord, med ønske om å måle vinkelendringer.

## 6.1 Testserier og konfigurasjoner

Det ble benyttet to ulike massivtreelementer i forsøket, og totalt tre forskjellige konfigurasjoner.

De to ulike massivtre elementene som ble benyttet var:

- MMT 100 mm 3-sjikts element ("standard element").
- Modifisert MMT 100 mm 3-sjikts element, kalt "akustikkelement".

Det ble gjennomført to ulike forsøk på hver av elementtypene. Først ble hver av de to elementtypene testet og kjørt til brudd. Deretter ble det gjennomført testing for hver av de to ulike massivtreelementene, men hvor det var lagt inn skjøl og skjøtebord som var sammenføyd med treskruer. Disse ble kjørt helt til brudd. Skjøtebordene var standard skjøtebord av heltre som Moelven Massivtre AS benytter. Det ble også til slutt gjennomført to ekstra tester hvor heltre skjøtebord ble byttet ut med kryssfinerbord.

Totalt ble det gjennomført fire testserier. De ulike testkonfigurasjonene er vist i Tabell 1.

*Tabell 1. Testserier og ulike konfigurasjonen for testingen som ble gjennomført.*

Testserie	Element type	Antall i testserie
1	Modifisert MMT 100 mm 3-sjikts element, akustikkelement.	12
2	Standard MMT 100 mm 3-sjikts element.	12
3a	Standard MMT 100 mm 3-sjikts element med heltre skjøtebord.	6
3b	MMT 100 mm 3-sjikts akustikkelement med skjøtebord, fire i heltre og to i kryssfinér.	6

I første testserie (Testserie 1) ble det benyttet akustiske massivtreelementer som hadde vært brukt til lydforsøk hos SINTEF Byggforsk. Disse elementene ble delt opp i mindre enheter før testing av styrke. Resten av elementene som ble brukt til testing av styrke, ble laget, tilpasset og delt opp hos Moelven Massivtre AS før de ble sendt til testing.

Elementene er modifiserte standardelementer spesielt tilpasset for å gi god akustisk demping i rom. Elementene har innfrest en not i overflaten til å forbinde elementene sammen med et skjøtebord, se Figur 14. Disse innslissede sporene går helt gjennom det ytterste sjiktet og ned til midtsjiktet. I midtsjiktet er det tatt ut noen tverrlameller, slik at det dannes en åpen spalte inn i elementet. Disse spaltene er fylt med isolasjon, se Figur 6.

Et standard massivtreelement fra MMT består av sammenlimte krysslagte sjikt. Alle lamellene i hvert sjikt ligger tett inntil hverandre og det er ingen hulrom eller åpninger i elementet. Et standard massivtreelement er vist i Figur 2.

Testoppsett ved skjærtesting av testserie 1 med deformasjonsgivere er vist i Figur 9. Det er montert deformasjonsmålere diagonalt på elementet (i linje med lastpåføring) på begge sider av elementet.

Testserie 2 bestod av standard massivtre elementer fra MMT. I disse elementene ligger alle bord både i lengderetning og tverretning helt inntil hverandre. Prøveserie 2 vil også fungere som referanse ift. evt. reduksjon i styrke for et modifisert element. Testoppsett ved skjærtesting av testserie 2 er vist i Figur 10 med deformasjonsgivere.

Oppsett for deformasjonsmåling er satt opp annerledes enn ved testserie 1. Det er montert på et stålkryss hvor deformasjonsmålere er plassert i hver ende slik at disse måler deformasjonen i randsonen på elementet.

Testserie 3a bestod av standard massivtreelementer, men hvor det er lagt inn en skjot mellom to elementer. Det ble brukt treskruer av fra Christinia Spigerverk type *Nordisk Treskrue 5,0×90 mm* som feste mellom skjøtebord og elementer. Det ble skrudd inn en skrue på hver side av skjøtebord. Det ble brukt en senteravstand mellom skruen på rekke lik 15 cm. Oppsett av testing av testserie 3 med plassering av deformasjonsgivere er vist i Figur 14.

Testserie 3b bestod av modifiserte akustikk massivtreelementer (samme elementer som i testserie 1), men hvor vi har lagt inn en skjot mellom to elementer. Det ble brukt treskruer tilsvarende testserie 3. Det ble skrudd inn en skrue på hver side av skjøtebord. Siden disse elementene er modifisert og en del av tverrbordene er tatt bort, er det begrenset med mulighet for innfestning av skjøtebord. Det ble valgt å bruke to skruer på hver side av skjøten i hvert tverrbord. På noen av elementene er det bare to tverrbord å feste skruen i per testelement, mens i andre var det tre tverrbord å feste skruer i, se Figur 15.



*Figur 15. Testoppsett ved skjærtesting av testserie 3b (seks av prøvene ble testet med heltre skjøtebord og to av prøvene ble testet med skjøtebord av kryssfiner). Det er montert på et stålkryss hvor deformasjonsmålere er plassert hhv. midt over skjøtebord og litt ut på siden av skjøtebord, slik at vinkelendringer kan måles. På bildet er det kun to tverrbord i elementet for innfesting av treskruene. Det er benyttet to skruer pr. tverrbord på hver side av skjøten.*

## 7 Resultater

Tabell 3-6 viser resultater av bruddlast og bruddtyper på testserie 1, 2, 3a og 3b. Tabell 7 oppsummerer og sammenligner testseriene. Ved å ta utgangspunkt i bruddstyrken til et standard element (som tilsvarende 100 %) kan de andre ulike konfigurasjonene uttrykkes som prosentvis bruddstyrke av denne. Dette er vist i Tabell 7.

Tabell 3. Resultater av skjærtesting fra Testserie 1 (Akustikkelement).

Prøve nr.	Bruddlast kN	Brudd type
1	74,5*	Skjærbrudd fuge
2	112,3	Skjærbrudd
3	111,2	Skjærbrudd
4	89,6	Lameller løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
5	95,7	Knusning ved opplegg
6	96,6	Lamell løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
7	105,4	Lamell løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
8	117,8	Lamell løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
9	140,5	Skjærbrudd
10	98,7	Trykkbrudd i platen
11	98,4	Lamell løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
12	144,1**	Lamell løsnet/slått av + trykkbrudd i platen
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>107,1</b>	
<b>Standardavvik</b>	<b>20,0</b>	

\* Dårlig liming mellom 2 sjikt medførte av ca. 50 % av limfugen var åpen før testing (se Figur 20).

\*\* Trykkbrudd ved 116 kN, men toppen av element var uskadet. Prøven ble avlastet og angrepspunkt for lasten ble flyttet nærmere senter. Ny pålastning ga høyere brudd verdi.



Tabell 4. Resultater av skjærtesting fra Testserie 2 (standard MMTelement).

Prøve nr.	Brudd- last kN	Brudd type
1	169,5	Skjærbrudd øvre lamell på en side. Angrepspunkt for kraften for høyt (eksentrisk pålastning).
2	224,4	Avskjæring av øvre og nedre lamell.
3	226,7	Avskjæring av øvre lamell på den ene siden.
4	235,9	Avskjæring av øvre lamell på den ene siden + trykkbrud av lamell (øvre og nedre) ved opplegg.
5	252,8	Avskjæring av øvre lamell på den ene siden.
6	209,6	Avskjæring av øvre og nedre lamell på den ene siden.
7	251,6	Avskjæring av øvre lamell på den ene siden.
8	244,0	Avskjæring av øvre og nedre lamell på den ene siden.
9	225,3	Trykkbrudd av lamell øvre og nedre mot opplegg.
10	245,3	Avskjæring av øvre og nedre lamell på den ene siden.
11	238,2	Avskjæring av øvre og nedre lamell på den ene siden.
12	192,9	Avskjæring av øvre og nedre lamell på den ene siden.
<b>Gjennom- snitt</b>	<b>226,4</b>	
<b>Standard- avvik</b>	<b>25,0</b>	

Tabell 5. Resultater av skjærtesting fra Testserie 3a (Standard MMTelement med skjøt).

Prøve nr.	Bruddlast kN	Brudd type
1	22,2	Gjennomtrekking av skruehode.
2	14,6	Gjennomtrekking av skruehode.
3	25,2	Gjennomtrekking av skruehode.
4	24,0	Gjennomtrekking av skruehode.
5	19,9	Gjennomtrekking av skruehode.
6	19,0	Gjennomtrekking av skruehode.
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>20,8</b>	
<b>Standardavvik</b>	<b>3,8</b>	

Tabell 6. Resultater av skjærtesting fra Testserie 3b (Akustikkelement med skjøt).

Prøve nr.	Maks last kN	Brudd type
1	16,3	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
2	15,0	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
3	15,3	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
4	14,0	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
5	16,1	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
6	13,7	Gjennomtrekking av skruehode + langsgående sprekk i skjøtebord.
7*	36,3	NB! Kryssfinerbord. Gjennomtrekking av skruehode.
8*	34,2	NB! Kryssfinerbord Gjennomtrekking av skruehode.
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>15,1</b>	Uten kryssfinerbord (prøve nr. 7 og 8).
<b>Gjennomsnitt</b>	<b>35,2</b>	<b>For prøve nr. 7 og 8 med kryssfinerbord.</b>
<b>Standardavvik</b>	<b>1,1</b>	<b>Gjelder for prøve nr. 1-6 (dvs. skjøtebord av heltre).</b>

Tabell 7. Sammenstilling av testserier med %-vis bruddstyrke i siste rad.

	<b>Prøveserie 1 Akustikk- element</b>	<b>Prøveserie 2 Standard- element</b>	<b>Prøveserie 3 Standard- element med skjõt</b>	<b>Prøveserie 4 Akustikk- element med skjõt (heltre bord)</b>	<b>Prøveserie 4 Akustikk- element med skjõt (kryssfinér- bord)</b>
Gjennomsnittlig bruddstyrke	107,1	226,4	20,8	15,1	35,2
Standard avvik	20,0	25,0	3,8	1,1	2,0
Gjennomsnittlig bruddstyrke	47,3 %	100 %	9,2 %	6,7 %	15,5 %

Akustikkelementet beholder god styrke til tross for slisser. Det er skjõtene som er sårbare og reduserer kapasiteten vesentlig. I skjõten holdes elementet sammen med en enkelt planke. En måte å forbedre kapasiteten på kan være og legge skjõt-bordet utenpå elementet, og ikke frese not får å få baksiden til å flukte. Da kan antakelig bruddkapasiteten i skjõten dobles.

## 7.1 Resultat - bruddformer

Figurene 16-30 viser de ulike bruddformene definert i Tabell 3-6.

### 7.1.1 Testserie 1

Alle prøvene i testserie 1 består av akustikkelementer. Disse har redusert antall lameller i tverrsjikt midt i elementet. Men det er forskjell på hvor mange tverrlameller hvert av de testede elementene hadde. Det ble ikke notert hvor mange tverrlameller de ulike prøvene hadde.

I tillegg var det litt tilfeldig på prøveelementene hvor tverrlamellene var plassert ift. lastinnføring og mothold. På noen elementer var det en tverrlamell i midtsjiktet rett ved lastinnføring og ved mothold, mens i andre elementer var det ikke noen tverrlamell ved lastinnføring. Den tilfeldige plasseringen av tverrlameller skyldes nok først og fremst at disse elementene ble delt opp fra et moderelement ut ifra den dimensjonen vi skulle ha for testing, og dermed havnet tverrlamellene litt tilfeldig i prøveelementene.

Det ble observert tre ulike bruddformer ved testingen:

- Rent skjærbrudd.
- Lameller løsnet/slått av.
- Trykkbrudd ved lastinnføring.

I prøve nr. 1 ble det observert at limfugen mellom to lameller i yttersjikt var ca. 50 % åpen. Dette medførte også at vi fikk skjærbrudd pga. denne feilproduksjonen, se Figur 16. Det ble også funnet tverrlameller med råte, se Figur 17. Eksempel på skjærbrudd i tverrlamell er vist i Figur 18, og rulleskjær i Figur 19. Figur 20 viser delaminering av øverste lamellag. Det var også problemer med for liten oppleggsflate, slik at det ble trykkbrudd i opplegg, se Figur 21.



*Figur 16. Prøve nr. 1: Åpning i limfuge (ca. 50 % av lengden) mellom to ytterlameller medførte skjærbrudd i dette sjiktet. Dette skyldes en produksjonsfeil.*



*Figur 17. Prøve nr. 1: Det ble også observert råte i en tverrlamell.*



*Figur 18. Prøve nr. 2: Skjærbrudd i tverrlamell.*



*Figur 19. Prøve nr. 2: Skjærbrudd (rulleskjær) i flere toerlameller.*



*Figur 20. Prøve nr. 4: Lameller på overside løsnet under testing (skjærebrudd).*



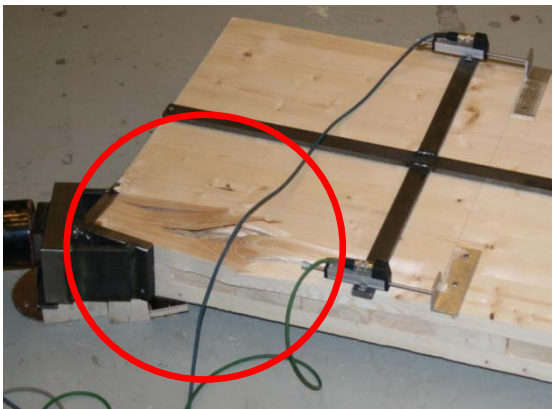
*Figur 21. Ved lastinnføring ble det observert en del inntrykning av prøveelementene. I eksempelet er det ikke noe tverrsjikt ved lastinnføring, slik at yttersjiktene må ta opp all lastinnføring.*

### 7.1.2 Testserie 2

Alle prøvene i testserie 2 består av standard MMT element. Disse elementene har lameller som ligger tett i tett i alle sjikt. Disse elementene har de beste forutsetninger for å kunne ta opp de største kreftene sammenlignet med de andre prøvekonfigurasjonene. Fordi at disse elementene kan ta opp store krefter, kan det i testsammenheng fort bli en utfordring å ta opp og fordele lasten fra lastinnføring. Det ble derfor en del lokale brudd ved kjøring av disse elementene.

Det er i hovedsak to bruddformer som fremkommer:

- Lokalt trykkbrudd, se Figur 22 og 23.
- Lokalt trykkbrudd med lokalt skjærbrudd, se Figur 24.
- Lokalt skjærbrudd, se Figur 25.



Figur 22. Prøve nr. 9: Lokal knusing ved lastinnføring.



Figur 23. Prøve nr. 9: Nærbilde av lokal knusing ved lastinnføring.



Figur 24. Prøve nr. 2: Lastinnføring medfører lokalt stor belastning på en eller noen få lameller som medfører lokalt skjærbrudd.



Figur 25. Prøve nr. 4: Samme situasjon som i Figur 24.

### 7.1.3 Testserie 3a

I testserie 3a ble det testet standard elementer med not og fjær. I en slik konfigurasjon vil kapasiteten til skjøten være begrensende lastopptak.

Ved standardelementer er det kontinuerlig med tverrlameller og mulighet for innfestning av skruer i skjøten. Det er kun avstand mellom skruene på rekke og tvers på disse som bestemmer antall skruer i forbindelsen. I testserie 3 ble det benyttet en skrueravstand lik 15 cm mellom hver skrue.

Den dominerende bruddformer ved testing var at skruene oppnådde flytning og skruhodene ble trukket gjennom skjøtebord, se Figur 26.



*Figur 26. Prøve nr. 2: Element kjørt til brudd. Skruene har oppnådd flytning og skruhodene er delvis eller helt trukket gjennom skjøtebord.*

### 7.1.4 Testserie 3b

I testserie 3b ble det testet akustikkelementer med not og fjær. I disse elementene er det noe begrenset mulighet for innfesting av skruer siden det ikke er kontinuerlig festesjikt for skruene. Tverrbordene har en bredde på 148 mm og det ble prøvd å benytte to skruer i hver tverrlamell.

I denne testserien ble det først testet fire prøver med heltre skjøtebord. I tillegg ble det testet to elementer med skjøtebord i kryssfiner.

Det ble observert to typer bruddformer for disse prøvene:

- Skjærbrudd i forbindelsen mellom elementene.
- Oppsprekking pga. avstand mellom skruer og skjærbrudd.



*Figur 27. Prøve nr. 1: Oppsprekking mellom skruer og til kant samt skjærbrudd i forbindelsen mellom elementene.*



*Figur 28. Prøve nr. 1: Nærbilde av oppsprekking mellom skruer på rekke og helt ut til kant.*



*Figur 29. Prøve nr. 2: Skjærbrudd og delvis oppsprekking mellom skruer på rekke.*





Figur 30. Prøve nr. 6: Skjøtebord fjernet etter at element er kjørt til brudd. Skruene har blitt belastet til flytning.



Figur 311. Prøve nr. 7: Skjærbrudd i forbindelsen mellom elementene ved bruk av kryssfinér skjøtebord. Det ble ikke observert oppsprekking mellom skruene ved bruk av kryssfinerbord skjøtebord.

## 8 Diskusjon skjærtesting

Massivtreelementer har i utgangspunktet meget gode styrke- og stivhetsegenskaper. Nettopp av den grunn er det vanskelig å få testet skiveegenskapene på samme måte som for platebeslåtte bindingsverksvegger.

Det ble laget til et eget testopplegg for gjennomføring av skjærkapasitet for massivtreelementer, modifiserte akustikkelementer. Den største utfordringen med forsøket var å planlegge hvordan deformasjonsgiver skulle plasseres på elementene for å gi et best mulig grunnlag for beregning av skjærstyrke og skjærstivhet i ettertid. Underveis i testingen av de ulike testseriene ble oppsett for plassering av deformasjonsgivere endret og dette medførte en del utfordringer mht. å beregne og sammenlignes resultatene i ettertid.

For eksempel ble deformasjonen i testserie 1 målt diagonalt ift. kraftpåføring. Dette medfører at vi kun får beregnet deformasjonen om en akse, som kun måler sammentrykning av elementene. I testserie 2 er deformasjonsmålerne satt opp i randsonen på elementene, og dette gir heller ingen god måling av skjærdeformasjonen til elementet. I prøvene med skjøtebord måles i utgangspunktet glidningen mellom forbindelsen og elementet og gir et uttrykk for skjærstivheten til forbindelsen.

I ettertid ser vi at deformasjonsgiverne burde vært lagt opp på en annen måte. Det burde vært satt opp kryss med fire deformasjonsgivere som måler deformasjonen henholdsvis  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  og  $315^\circ$  ift. elementets lengderetning.

Med den gjennomførte testingen slik disse ble gjennomført, er det derfor vanskelig å sammenligne prøveresultatene mellom seriene mht. skjærkapasitet og skjærstivhet. Sammenligning mellom bruddkapasitet til elementene og mellom de ulike testseriene er derimot sammenlignbare.

Ifølge bruddkapasitet for de gjennomførte testseriene var det i utgangspunktet ventet at et standardelement gir høyest kapasitet og at akustikkelementet ville gi en del lavere kapasitet. Resultatene fra testingen viser også at dette er tilfelle. I tillegg var det forventet at elementer med skjøtebord ville gi enda lavere kapasitet enn elementene uten skjøtebord. Resultatene viser også dette.

Lavest bruddkapasitet gir en kombinasjon av akustikkelement med skjøtebord. En av hovedgrunnen til at disse elementene har lavest bruddkapasitet i testen er at det er begrenset med tverrlameller, slik at innfestningsarealet blir mye lavere enn for et standardelement. I noen av disse elementene var det kun to tverrlameller for innfesting av skjøtebord, og disse kom dårligere ut enn i de elementene hvor der var tre tverrlameller for innfesting av skjøtebord. Dette er ganske opplagt når vi vet at kapasiteten til en tverrbelastet forbindelse er proporsjonal med antall forbindere i forbindelsen.

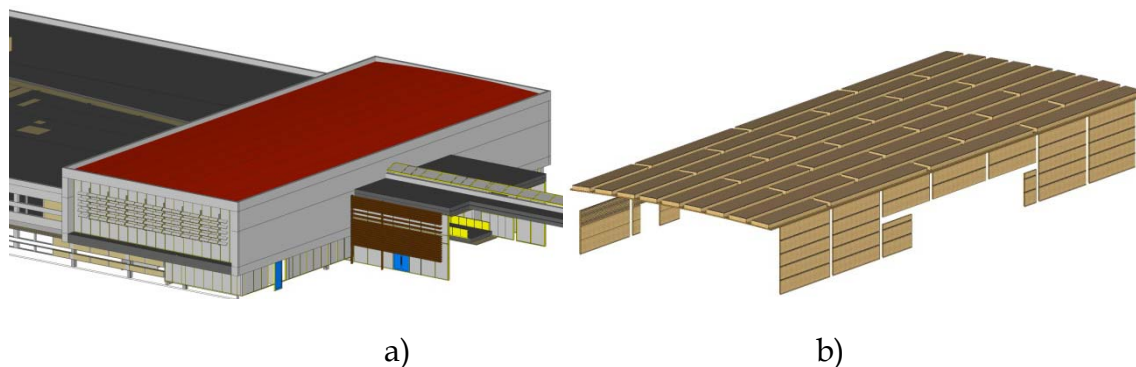
Det var også en utfordring med å benytte to forbindere pr. tverrlamell pga. bredden på tverrlamell ift. krav til avstand mellom forbindere og avstand til belastet ende. I flere av forsøkene ble det oppsprekking mellom bindere og i tverrbord siden disse avstanden ble vel små.

En annen utfordring med akustikkelementene er at ikke alle de testede elementene hadde tverrlameller ved lastinnføring og mothold. Dette medførte lokale bruddeffekter og lavere bruddlast.

Forsøket viser at ved bruk av akustikkelementer bør det sikres at det alltid er tverrlameller ved lastinnføring og mothold. I tillegg bør det alltid benyttes kryssfinér skjøtebord både for å oppnå høyere skjærkapasitet til forbindelsen og for at bredden på tverrlameller, slik det var i testen, medfører at kryssfinér er bedre egnet for å få inn to forbindere pr. tverrlamell i en forbindelse ift. fare for oppsprekking og avstand mellom forbindere. Som et alternativ, kan det i stedet for å benytte not og fjær løsning i sammenføyning mellom elementene, legges på en utvendig lask slik at arealet på innfestningen kan økes og dermed vesentlig økning på den totale kapasiteten.

## 9 Biblioteket i Hadeland vgs.

Biblioteket på Gran skal også fungere som fylkesbibliotek for Oppland kommune. Derav den store grunnflaten på 1200 m<sup>2</sup>.



Figur 32. Modell av bibliotekdelen (a) til Nye Hadeland vgs. med utsnitt (b) av massiotredelen.

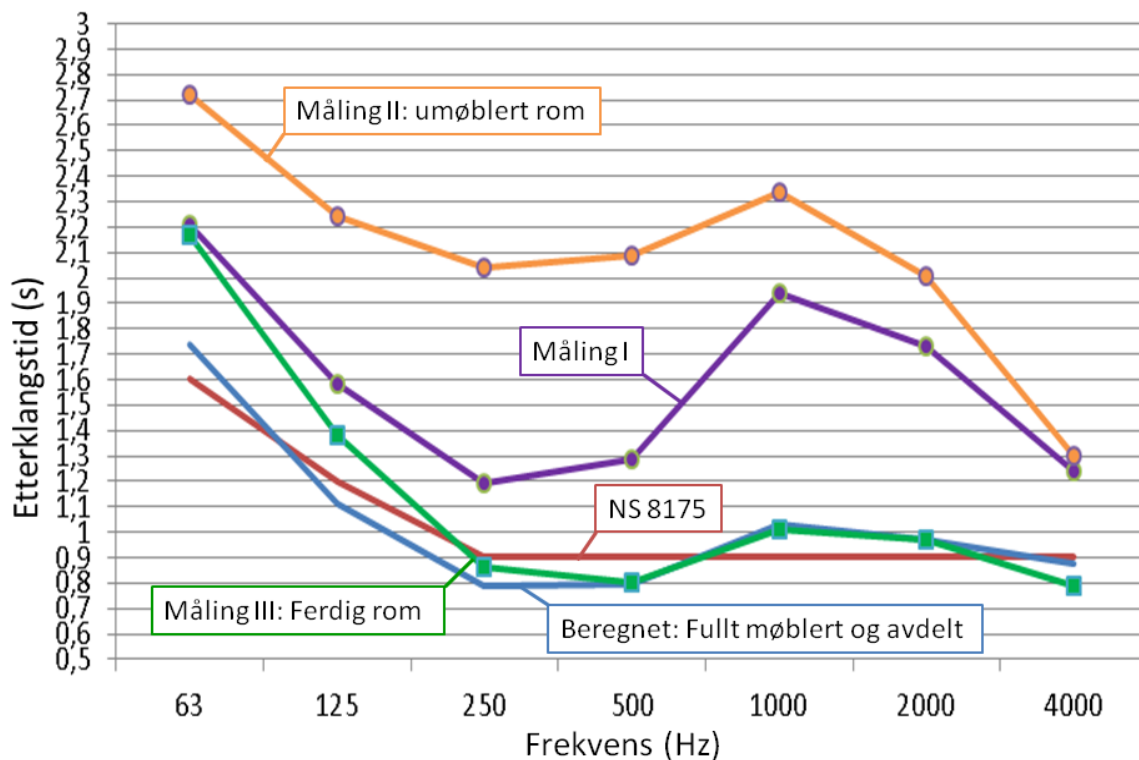
Arkitektene deltok i prosessen og kom med innspill på akseptabelt utseende. Det ble valgt furu som toppsjikt. Et sammendrag at arkitektonisk uttrykk på veggen er vist i bildene i Figur 33.

Intensjonen om eksponering av treoverflater er i møtekommet samtidig som disse flatene bidrar vesentlig til rommets ekvivalente lydabsorpsjonsareal. Andre lydabsorberende materialer inngår som en del av innredningen og møbleringen.

Bruk av mineralull i bygningselementer reiser ofte spørsmål om fiberavløsning. I disse massivtreelementene er mineralulloverflaten i produksjonen limbundet til treplanken. Fiber kan kun avløses fra de smale sagspaltene der fibermaterialet også er limbundet. Ettersom mineralullplatene også er innebygget i hulrom uten mulighet for luftstrømning, anses problem med fiberavløsning som neglisjerbart.



*Figur 33 viser utsnitt av endelig utforming av bibliotek interiør og eksteriør med massivtreelementer med integrert akustisk dempning i øvre del av vegg og i himling.*



Figur 34. Viser beregnede og målte verdier av etterklangstiden i biblioteket, med møblingen på plass og uten ordinær møblering i lokalet. Etterklangstiden er oppgitt i sekund på vertikal akse og senterfrekvensen for oktaobåndsfiltre er gitt i Hertz på horisontal akse. I ferdig rom skal etterklangstiden ligge under kravet i NS 8175.

Det ble foretatt to målinger av etterklangstiden i *umøblert bibliotek*. Den første målingen er lagt til grunn for beregning av etterklangstiden i *møblert bibliotek*: (se Figur 34)

- Norsk standard NS 8175 er benyttet som kriteriegrunnlag for valg av ønskelig maksimal etterklangstid i dette store, oppdelte lokalet med felles volum på ca. 6000 m<sup>3</sup>. Disse kriterieverdiene er vist i **rød kurve**.
- Etterklangskurven vist i **blå strek** i diagrammet er beregnet etterklangstid i fullt møblert og avdelt, bruksferdig bibliotek. *Etterklangsmåling I* i tomt lokale er lagt til grunn for bestemmelse av bygningsmessig lydabsorpsjon innenfor et volum på ca. 6000 m<sup>3</sup>. I tillegg er lydabsorpsjonsmengden fra følgende innredningselementer tatt med i beregningen:
  1. 350 kvm gulvflate m/bokreoler
  2. 400 kvm gulvflate m/lett innredning
  3. 30 kvm åpninger mellom rom (over skjervegger)
  4. 28 stk kontorarbeidsplasser

Beregningen anses som tilnærmet og konservativ, dvs. at lydabsorpsjonsvirkning fra skillevegger og annen bygningsmessig innredning er ikke tatt med. Heller ikke er foretatt fratrekk for overdekte gulvflater. Her har det viktigste vært å illustrere at oppnådd etterklangstid vil være tilstrekkelig lav for å oppnå stor støydemning fra tale i stort rom. Videre vil en etterklangstid i underkant av 1 sek. bety at rommet kan benyttes til formidling både av tale og musikk uten at rommet virker overdempet.

- Etterklangskurven vist i **lilla strek** i diagrammet er *måling I* som ble utført 2011-11-07 i *umøblert rom*, men med ellers bygningsmessig ferdig lokale. En del emballerte innredningsmaterialer samt trebjelker var lagret i rommet. Disse materialene var stablet i en slik form at lyddiffuserende virkning ville bli oppnådd under målingen. Dette er fordelaktig rent måleteknisk ettersom det gjenspeiler i noen grad virkningen av møbleringen som vil være på plass i brukstilstanden. Følgelig ble dette måleresultatet ansett som mest korrekt som grunnlag for etterklingsberegningen i møblert lokale.
- Etterklangskurven vist i **oransje strek** i diagrammet er *måling II* som ble utført 2011-11-28 i *umøblert rom*, men med bygningsmessig ferdig lokale som var ryddet og helt tomt. Da finnes ingen lyddiffuserende elementer i et stringent rektangulært lokale. Dette vil bidra til at fremtredende aksielle og tangentsielle svingeformer får fritt "spillerom" -noe som bidrar til vesentlig økning av etterklangstiden slik det fremgår av måleresultatet. I møblert, bruksferdig lokale vil ikke denne selektive klangvirkningen kunne oppstå så lenge hele gulvflaten og også veggflater har møbleringsdekning.
- Etterklangskurven vist i **grønn strek** i diagrammet er *måling III* som ble utført 07.09.2012 i *innredet, møblert og bruksferdig rom*. Måleverdiene er middelveier av 6 etterklingsmålinger utført i den åpne delen av biblioteket. Dette resultatet viser at målsetningen for rommets etterklangstid er imøtekommet. På grunnlag av disse måleverdiene kan også rommets totale ekvivalente lydabsorpsjonsareal bestemmes fra Sabines formel. Her bidrar alle lydabsorberende flater hvor de hengende lydabsorpsjonsbaflene og møbleringen gir utfyllende effektivt absorpsjonsareal mot høyere frekvenser mens massivtre-elementenes integrerte spalteabsorbent hovedsakelig bidrar ved lavere frekvenser. Måleresultatene stemmer bra med beregningene (i blå kurve) unntatt ved de to laveste oktavbåndene som forøvrig er av mindre betydning for taleoverhøring.

## 9.1 Dimensjonering opptak av seismisk last

Siden vi tidlig fikk avdekket at skjøtene var de utfordrende elementene i en lastberegning måtte seismisk last sikres i forbindelsene. Seismisk last er en horisontal last. På Hadeland er det betongsøyler som bærer limtregitterdragere som er primærbæringen til taket. Horisontal avstiving av betongsøylene ble tatt av liggende massivtreelementer mellom disse. Ytterligere beskrivelse finnes i Vedlegg 1.

## 10 Oversikt over tilsvarende produkter

Trysil interiørtre produserer rene akustikkelementer med 50 % perforering og akuduk. <http://www.trysil-interiortre.no>

SINTEF Byggforsk detaljblad 543.414 viser ulike løsninger for å redusere romakustikken.

Lignotrend i Tyskland produserer hovedsakelig akustikkpaneler i massivtre og også andre treelementer til bæring. I akustikkpanelene inkluderer de som regel tilleggsdempning av trefiberisolasjon, og kombineres vanligvis ikke med bæring. Overflaten børstes for å øke ruheten og dermed også spre lydbølgene ytterligere. Utførelsen er delvis patentert. Veid absorpsjonstall,  $\alpha_w$ , er opp til 0,75. Se [www.lignotrend.com](http://www.lignotrend.com) og raumakustik-rechner på samme webside.

Lauvtreforeingen har i forbindelse med trebruk i Regjeringsbygg R6 sjekket ulike utførelse av askepaneler med spalter og mineralulldemping og utforing. Se [www.lauvtreforeningen.no](http://www.lauvtreforeningen.no). LignoTrend og Lingatur produserer elementer med lignende kvaliteter i Tyskland.

## 11 Referanser

Austnes, J. A., Nore, K. & Aarstad, J (2011). Cross laminated timber absorbent. The Acoustics of Ancient Theatres Conference Patras, Greece. September 18-21, 2011.

EN ISO 11654 Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption (ISO 11654:1997).

EN ISO 354 (2003) Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room.

Homb A. 1996. Detaljblad 543.414 Lydabsorberende egenskaper til materialer og konstruksjoner SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer. 2012. Oslo, Norge.

<http://www.trysil-interiortre.no>, 20. april 2012.

Hveem, S. 2010. Lydålinger i laboratorium av massivtreelement med integrert lysabsorberende himling. Versjon 1, 2 and 3. Rapport 3D060010. SINTEF Byggforsk, Oslo, Norge.

Johansen K.A. (2001) Limtrehåndboken. Norske limtreprodusenters forening.

Nore, K & Glasø, G. (2012). Shear strength of Cross Laminated Timber with integrated acoustic properties. World Conference on Timber Engineering. 16-19. July. Auckland, New Zealand.

prEN 16351 "Timber structures - Cross Laminated Timber - Requirements".

Ellefsen, J. (2009) Måleresultater - Labmåling av trepaneler og heltregulv. Powerpointpresentasjon. Lauvtreforeningen. 1. september 2009.

SINTEF Byggdetaljer.



## Vedlegg: Utnyttelse i opptak av seismisk last

Det var fem elementer i hver høyde på veggen, to standardelementer og tre akustikkelementer. Disse ble forenklet til fire standardelementer i prosjekteringsfasen. Etter testing kjenner vi til skjærkapasitet på hvert element i en mer belastet situasjon, der bruddlast på over 100 kN ble oppnådd for akustikkelementene. Opptak av horisontal seismisk last er derfor ansett som tilfredsstillende.

En større utfordring var forbindelsene. Elementene ble festet på betongsøylene med vinkeljern 70×7 mm. Skruer som ble benyttet var *SFS WFD-T-H12 8x80*, med karakteristisk kapasitet på  $f_k 4,32$  kN fra SFS tekniske verdier. Seismisk last er øyeblikkslast med  $k_{mod} 1,1$ , og vi får då dimensjonerende kapasitet  $f_d 3,93$  kN.

Seismisk last i akse 14 var beregnet til 299 kN. Denne ble fordelt over 4 fakk med hele massivtrevegger 75 kN på hver. Minimum antall skruer ble da 20 stk. for å overføre denne lasten. Vi økte antall skruer til 25 stk. med senteravstand 250 mm. Avstand til kant, trykk,  $a_{3,c} 180^\circ$ , skulle være  $4D = 32$  mm iht. Mekaniske treforbindelser, Treteknisk s. 77. Utnyttelse jordskjelvlaster ble da 76,4 %.