BREKKE STRAND

Lydisolasjon i bygninger med bæresystem i krysslaminert tre
Målinger utført i testrigg i Askim

Prosjektrapport



Brekke & Strand Akustikk• AS info@brekkestrand.no • www.brekkestrand.no

Sammendrag:

Rapporten oppsummerer resultater fra et stort antall målinger av lydisolasjon og knutepunktdemping i et testbygg med mulighet for å endre innfesting, opplagring og på-/nedforing på vegger og i himling. I tillegg er det tatt med et utvalg feltmålinger i boliger/omsorgsboliger/studentboliger for å se om resultater fra testriggen underbygger målinger i oppførte bygninger eller ikke. Dette er ikke en fullstendig rapport av alle målinger utført i prosjektet, men utvalgte målinger representerer hovedfunnene.

Studien viser at krysslaminert tre (KLT) godt kan anvendes i alle bygningstyper, inkludert boliger. Dette underbygges både av selve studien og erfaringer fra feltmålinger. Flere alternative løsninger oppfyller lydkrav i boliger, og ivaretar også anbefalt lydkrav i NS 8175: 2012 inkludert korreksjonsledd for lavfrekvent lydisolering.

Tre er et lett og fornybart bygningsmateriale som gir kort byggetid. Materialer med lav egenvekt har generelt svakere lydisolering, spesielt ved lave frekvenser. Dette gjelder for slanke betong- og hulldekker så vel som trebjelkelag og etasjeskillere i KLT. Denne type etasjeskillere krever riktige tilleggskonstruksjoner for å ivareta gode lydforhold.

Basert på testmålinger og erfaringsdata fra feltmålinger er det pekt på grep som gir økt trygghet for å ivareta lydkrav til og med boliger, og situasjoner/feil som bør unngås.

Studien viser at bruk av tyngde direkte på KLT-elementer i etasjeskiller gir forbedret lavfrekvent lydisolering, gunstige flankelydforhold, og større trygghet for å oppnå grenseverdier i boliger med synlige trekonstruksjoner.Tilført tyngde reduserer også behovet for spesialprodukter i knutepunkter.

Eksponert tre i etasjeskillere kan benyttes i boliger, men krever tiltak f.eks. i form av tilført vekt og/eller lydsplitter i elementene, noe som setter særskilte premisser for bæresystemet. Tidlig koordinering mellom bygningsingeniør og akustiker er essensielt for å finne fram til robuste og rasjonelle løsninger. Bygninger med lavere lydkrav, som skoler, barnehager og kontorer, er enklere å gjennomføre med eksponert tre i etasjeskiller.

Målinger av knutepunktdemping tyder på at standard innfesting med skruer og vinkler langt på vei eliminerer effekten av de elastiske lagrene. Dette er interessant da de elastiske bidrar vesentlig til både økt kostnad og ressurser i prosjektene. Behovet for denne type tiltak må vurderes ut fra blant annet masseforhold i knutepunkt, og arealer med synlig tre. Ved å dimensjonere disse tiltakene riktig kan prosjektene spare både tid, penger og klimagassutslipp.

Lette overgulv med vibrasjonsdempende klosser viste lovende resultater. Lette overgulv på KLT-etasjeskiller benyttes i liten grad i Norge i dag, men bør vurderes som et alternativ i flere prosjekter.

Treelementer og selve måleriggen ble levert av Splitkon. Målinger og prosjektrapport er utført av Brekke & Strand Akustikk. Prosjektet har også andre samarbeidspartnere og støttespillere. Prosjektet ble initiert og planlagt av Lars Strand, senioringeniør i Akustikk, i samarbeid med Splitkon.

Rev. Nr:	Utarbeidet Navn:	Dato (Egenkontroll)	Kontrollert Navn	Dato	Kommentar
0	Eli Toftemo	24.09.2024	Anders Løvstad	24.09.2024	Til gjennomsyn
1	Eli Toftemo	16.06.2025			Revidert etter gjennomsyn av Splitkon
2	Eli Toftemo	21.05.2026	Anders Løvstad	26.05.2026	Tatt med resultater fra vertikale trinnlydmålinger. Bearbeiding av sammendrag og konklusjon.

IT arkiv: Testprosjekt_KLT_ Prosjektrapport

Innhold:

1 Om prosjektet 5
1.1 Bakgrunn 5
1.2 Omfang og leseveiledning 5
1.3 Anvendelse av resultater 6
2 Testrigg og måleutstyr 7
3 Måleresultater knutepunktdemping 10
3.1 Vertikal knutepunktdemping 10
3.1.1 Sammenlikning av ulike kategorier for innfesting 11
3.1.2 Elastiske mellomlegg uten innfesting mellom etasjer 12
3.1.3 Elastiske mellomlegg med skrueinnfesting mellom etasjer 13
3.1.4 Variasjoner av skrueinnfesting 14
3.1.5 Punktopplagring 15
3.1.6 Vinkelinnfesting 15
3.1.7 Effekt av tungt overgulv 17
3.2 Horisontal knutepunktdemping 19
3.2.1 Kontinuerlig og splittet dekke samt innfesting med skjøtebord 22
3.2.2 Splittet dekke, punktinnfesting med hullplate av stål 23
3.2.3 Splittet dekke, punktinnfesting med og uten ekstra vekt 24
3.2.4 Variasjoner av skrueinnfesting horisontalt 24
3.3 Oppsummering resultater for knutepunktdemping 26
4 Måleresultater lydisolering 28
4.1 Måling av luftlydisolering og trinnlydnivå på råkonstruksjon i KLT 28
4.2 Trinnlyd vertikalt på råkonstruksjon med ulike elastiske lagre og innfesting 32
4.3 Trinnlydnivå målt vertikalt med lette flytende gulv 34
4.4 Målinger med lette overgulv med og uten tilført vekt 35
4.5 Målinger på ulike flytende gulv uten himling 37
4.6 Ulik eksponering av tre i bærekonstruksjon 38
4.7 Horisontal lydisolering med og uten lydsplitt i KLT-element 39

4.8 Oppsummering resultater for luftlydisolering og trinnlydnivå 40
5 Erfaringer fra boligprosjekter, feltmålt vertikalt trinnlydnivå 41
5.1 Etasjeskiller i KLT med pukk/betong og lydisolerende himling 41
5.2 Etasjeskiller i KLT med pukk/betong og eksponert tre i himling 42
5.3 Etasjeskiller i KLT med tungt flytende gulv og lydisolerende himling 43
5.4 Etasjeskiller i KLT typisk for studentboliger med lydisolerende himling 44
6 Konklusjoner og hovedfunn 45
6.1 Lydisolering i boliger 45
6.2 Knutepunktdemping 45
6.3 Betydning av tilført vekt 45
6.4 Lette overgulv 46
6.5 Sammenlikning med feltmålt trinnlyd 46
6.6 Videre arbeid 46
7 Rapporter og publikasjoner 46
8 Vedlegg - Oversikt over målinger av knutepunktsdemping 47
8.1 Vertikal hastighetsendring 47
8.2 Horisontal hastighetsendring 48
9 Vedlegg A – Oversikt over målinger av luftlydisolasjon og trinnlydnivå 50
10 Vedlegg B – Relevante grenseverdier 56
11 Vedlegg C – Målemetode 57
12 Vedlegg D – Referanser 58

1 Om prosjektet

Hensikten med studien har vært å finne robuste og rasjonelle løsninger i bygninger med krysslaminert tre (KLT) bærekonstruksjon.

Prosjektet er initiert og planlagt av Lars Strand, senioringeniør hos Brekke & Strand Akustikk (BSA), sammen med Splitkon. Prosjektdeltakere har vært BSA, Splitkon, Green Advicers, Ny Struktur, Byggimpuls. Andre bidragsytere har vært Skogtiltakfondet, Innovasjon Norge, Byggimpuls, Christian Berner, Rothoblaas og flere. Prosjektering, montering og tilpasninger av målerigg er utført av Splitkon. Testriggen ble levert og montert av Splitkon AS, med trelast som er klassifisert som T15 i senter av elementene, og T22 som yttersjikt. Målinger og analyse er utført av flere akustikere i Brekke & Strand Akustikk AS, og flere har bistått med innspill rundt måleprosedyrer og analyser.

1.1 Bakgrunn

Bruk av krysslaminert tre i bærekonstruksjoner har økt i omfang de siste tiårene, og benyttes også i større grad i komplekse bygninger. Økt omfang av trekonstruksjoner er også ønskelig for å redusere klimagassavtrykket fra byggebransjen, da tre er et miljøvennlig, fornybart og ofte kortreist materiale. I tillegg er monteringsprosessen på byggeplassen svært effektiv.

Lydisolering er sett på som en utfordring ved bygging med massivtre, spesielt gjelder dette bygningstyper med høye krav til lydisolering, som boliger. Tre er et lett konstruksjonsmateriale som gir mer lavfrekvent og flankeoverført lyd sammenliknet med tyngre konstruksjoner. Myndighetskrav sammen med dagens byggemåte kan føre til utstrakt bruk av tilleggskonstruksjoner som flytende gulv, lydisolerende himling og påforingsvegger i tillegg til elastisk mellomlegg mellom treelementer.

Utfordringer med lavfrekvent lydisolering og flankelyd finnes i stor grad også i boliger oppført med slanke hulldekker eller betongdekker, boliger med tynne trinnlyddempende dempesjikt og andre lette prefabrikerte bygningselementer, så problemstillingen er ikke unik for bygging med etasjeskillere i trebjelkelag og massivtre/KLT.

Konstruksjoner og løsninger med massivtre bærekonstruksjon varierer i stor grad fra prosjekt til prosjekt. Dette sammen med mangel på tilstrekkelig gode beregningsverktøy, kan føre til overdimensjonerte løsninger. Det er et stort behov for å finne fram til preaksepterte løsninger.

Det er ofte et uttalt ønske fra kunder og brukere om at treverket skal være eksponert. For å kunne holde treet synlig kreves god kontroll og robuste løsninger for å sikre god lyddemping mellom elementer og rom med lydkrav. Bæresystemet må tilpasses tiltakene, noe som krever god samhandling mellom bygningsingeniør, akustiker, branningeniør og arkitekt. Et hovedfokus i testprosjektet har derfor vært å se betydningen av utførelse av knutepunkt og innfesting, og betydningen av disse.

Det er utført flere studier på bruk av krysslaminert tre i bygninger tidligere. Resultater fra laboratoriemålinger er ikke alltid direkte overførbare til situasjoner vi finner på byggeplass. Denne studien tar for seg noen typiske prinsipper og løsninger som benyttes i Norge i dag, og søker å være praktisk anvendbar.

1.2 Omfang og leseveiledning

Studien er omfattende og rapporten inneholder resultater fra 34 målinger fra knutepunktdemping, 26 målinger av luftlydisolasjon og 40 målinger av trinnlydnivå. Det er målt både på lette og tunge konstruksjoner. Rapporten viser ikke alle målinger utført i prosjektet, men utvalgte målinger representerer hovedfunnene. Målestudien på testriggen er gjennomgått i to kapitler:

- Måling av knutepunktdemping/flankelyd, kap. 3
- Måling av luftlydisolering og trinnlydnivå, kap. 4

Beskrivelse og resultater fra målinger er oppsummert i vedlegg (kap. 8 og kap. 9).

I tillegg til resultater fra testriggen er det inkludert resultater fra relevante feltmålinger av vertikale målinger av trinnlyd på etasjeskillere i massivtre. Det er valgt ut målinger fra boliger, studentboliger og omsorgsboliger som alle har relativt høye krav til lydisolering. Det er fokusert på vertikale målinger av trinnlyd da dette erfaringsmessig er krevende å innfri, og kan være årsak til støyklager.

Resultater fra utvalgte feltmålinger på vertikalt trinnlydnivå er oppsummert i kap. 5.

Konklusjoner og hovedfunn er oppsummert i kap. 6.

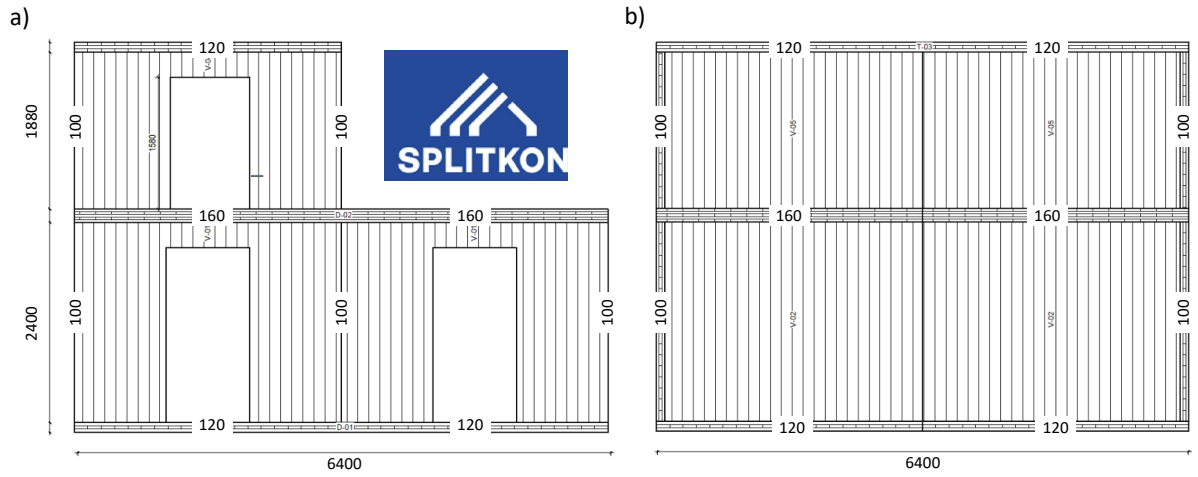
I rapporten benyttes begrepene krysslaminert tre, massivtre og KLT, disse viser til ett og samme bygningsmateriale.

1.3 Anvendelse av resultater

Rapporten viser til ulike løsninger for oppbygging og innfesting i bygninger med massivtre/KLT bærekonstruksjon. Oppnådd lydisolering i et ferdig bygg er sammensatt og vil påvirkes av faktorer som bæresystem, planløsning, flankelydforhold og utførelse på byggeplass. Brekke & Strand Akustikk tar ikke ansvar for bruk av løsninger vist i rapporten hvor vi ikke er spesifikt involvert. Det presiseres at lydforhold må detaljprosjekteres tverrfaglig i alle prosjekter før utførelse.

2 Testrigg og måleutstyr

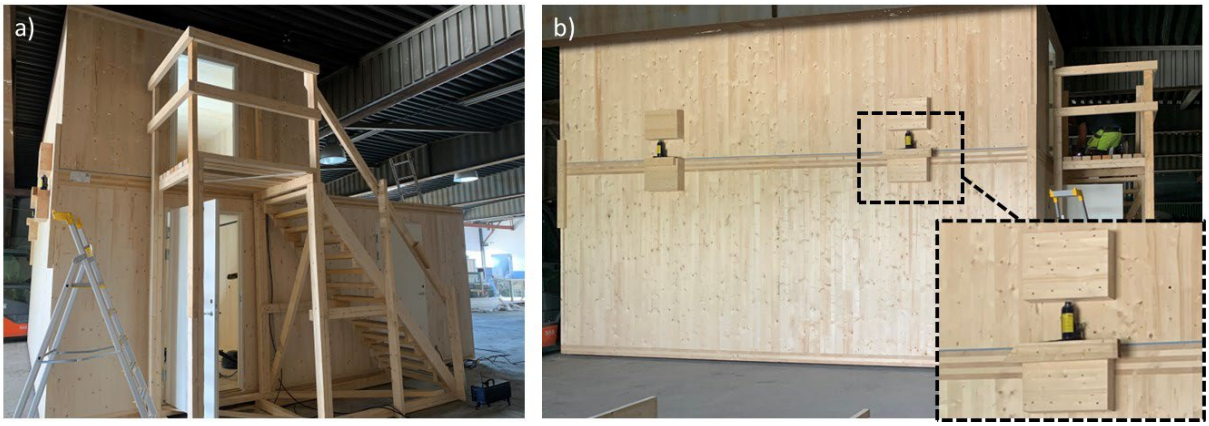
Testriggen ble satt opp som en egen, separat konstruksjon i en verkstedhall i Askim. Riggen bestod av bærende vegger og dekker i krysslaminert tre med to rom på grunnplanet og ett rom i plan 2, som vist i figur 1.



Figur 1 – Vertikalsnitt av testrigg; a) lengderetning b) bredderetning. Alle dimensjoner er i mm.

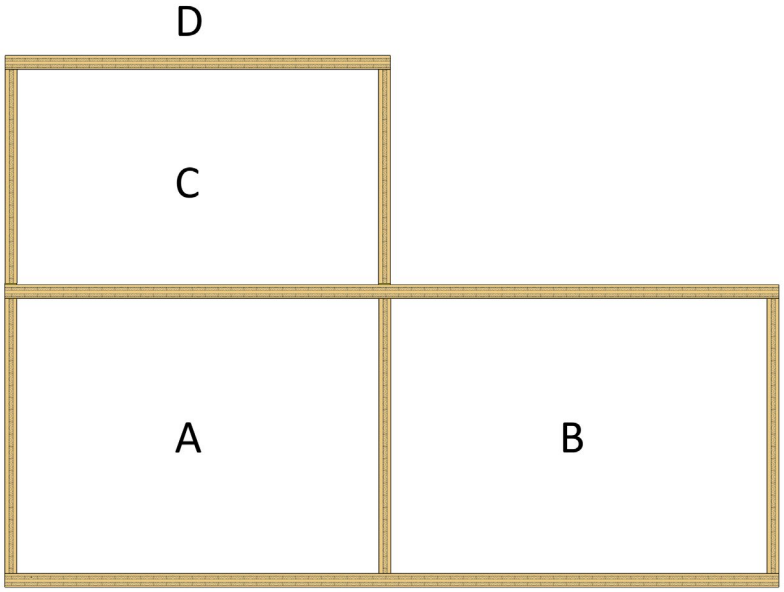
Dekkeelementene i bunn og topp var 3-sjikts 120 mm, mens dekkeelementet/etasjeskiller mellom etasjene bestod av 5-sjikts 160 mm massivtreelementer. Alle vertikale elementer bestod av 3-sjikts 100 mm KLT-elementer. Testriggen ble levert og montert av Splitkon AS, med trelast som er klassifisert som T15 i senter av elementene, og T22 som yttersjikt. Densiteten til treet er oppgitt fra Splitkon å være 460 kg/m^3.

Romdimensjoner og tykkelse på KLT-elementene er vist i figur 1. Utvendige lengde- og breddemål var 6400x6400 mm på grunnplanet, og 6400x3200 mm i toppetasjen. Toppetasjen kunne løftes fra grunnplanet med hydrauliske jekker som vist i figur 2. Dette gir mulighet for å legge inn ulike mellomlegg som elastiske lagre i tillegg til å benytte ulik innfesting mellom etasjene. På denne måten ble det gjennomført repeterbare tester med ulike mellomlegg, og med ulik innfesting i knutepunktet mellom etasjene. Påforingsvegger og himlingskonstruksjoner ble montert og demontert både for å evaluere effekten av dette, og for å kontrollere flankelyd.



Figur 2 – Testrigg vist i a) og b) korresponderer med a) og b) vist i figur 1. Elastisk lager og hydrauliske jekker er vist i både a) og b), hvor utsnittet i b) viser en hydraulisk jekk.

De ulike rommene/boksene i testriggen er benevnt med bokstavene «A»- «C». I tillegg fikk takflate over øverste rom, som ble benyttet som kildeplassering, benevnelsen «D», se snitt i figur 3.



Figur 3 – Snitt- tegning av målerigg med benevnelse på de ulike rommene.

Målinger av knutepunktdemping og lydisolering ble utført parallelt for å kartlegge effekten av flankeoverført lyd. Figur 4 viser bilder av et utvalg elastiske lagre og midler for innfesting som ble benyttet.



Figur 4 – Bilde av ulike elastiske lagre og innfestinger a) elastisk lager under veggskive b) vibrasjonsisolert vinkel c) kryssfinerkloss d) elastisk lager e) elastisk mellom treelementer sett fra utsiden f) stålvinkel g) kryssfinerkloss under veggskive h) skruer.

Målinger av luftlydisolasjon og trinnlydnivå ble utført i henhold til ISO 16283-1 og 2 [1, 2]. Målinger av hastighetsdifferanse, $D_{v,ij}$, ble benyttet for å vurdere knutepunktdemping[1]. Hastighetsdifferanse er beskrevet i ISO 10848-1 [3], og gir et mål på hvor mye flankeoverført lyd dempes på tvers av bygningselementer.

[1] Det ble målt gjennomsnittlig akselerasjonsnivå i sensorposisjoner.

Alle verdier for vertikale målinger av knutepunktdemping i denne rapporten er midlet differanse målt med lydkilde plassert i nedre boks. Resultater fra horisontal knutepunktdemping er målt med kilde plassert i venstre boks (boks A). Det ble målt i flere retninger, men ikke alle resultater er inkludert i denne rapporten.

For vertikale målinger ble det montert sensorer på minimum 2 av 4 vegger, og målte data er midlede verdier hentet fra sensorer på overliggende/underliggende veggflater, med unntak av målinger utført på tungt flytende gulv, hvor kun ett sett målinger på én veggside er utført. Eksempel på plassering av sensorer på vegg kan sees i figur 6.

I horisontale målinger ble det benyttet 4 sensorposisjoner på hver side av lydsplitt, 8 sensorer totalt. Viste resultater er gjennomsnitt av to måleserier med ulike plassering av eksitasjonskilde.



Figur 5 – Eksitasjonskilder. Høyttaler, bankemaskin og hammer.

Tre eksitasjonskilder ble benyttet; rosa støy fra halvkulehøyttaler, bankemaskin, og banking med hammer direkte på bygningselementer. Resultater fra hammereksitasjon er ikke inkludert i rapporten grunnet at det viste seg å være vanskelig å kontrollere eksitasjonsnivået. I kapitlene nedenfor er det rapportert resultater fra målinger med høyttaler som eksitasjonskilde i nedre boks, dersom ikke annet er spesifisert.



Figur 6 – Bilde av sensoroppsett på innsiden av testrom. Hvite piler indikerer sensorposisjoner.

3 Måleresultater knutepunktdemping

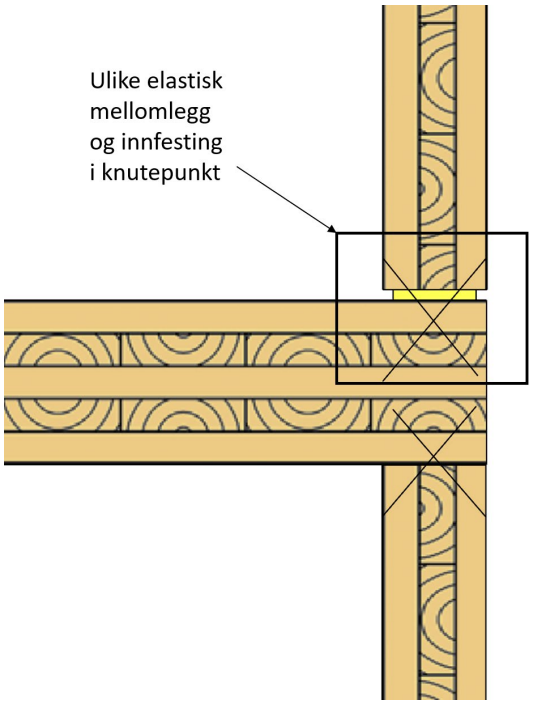
Måleresultater for knutepunktdemping er oppsummert i delkapitlene nedenfor. Målinger ble gjort både vertikalt og horisontalt, se detaljer i kapittel 2.

Generelt gjelder at målinger ved de laveste frekvensene under 100 Hz har spesielt stor usikkerhet. Flere vertikale målinger viser en kraftig dip i kurven ved 80 Hz. Dette skyldes moder i KLT-veggskivene i testriggen.

3.1 Vertikal knutepunktdemping

Målinger ble utført med ulike type mellomlegg og ulike typer innfesting mellom etasjene.

Figur 7 viser prinsippskisse for vertikalt knutepunkt mellom etasjene i testriggen representativt for måledata vist i rapporten. Akselerometre ble plassert på veggskiver over og under etasjeskiller. Det ble målt med ulike elastiske mellomlegg og innfesting mellom etasjeskiller og de overliggende veggskivene i 2. etasje av testriggen.

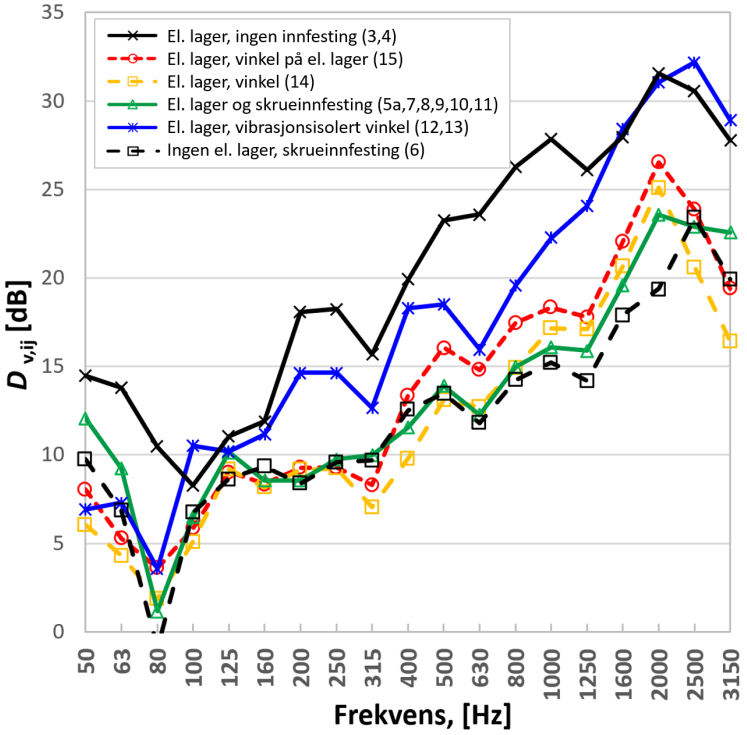


Figur 7 – Prinsippskisse for vertikalt knutepunkt. I figuren er det skissert elastisk lager med gul farge og indikert kryss-skrueinnfesting mellom dekke og veggskiver.

Fullstendig oversikt over målinger er listet i tabell 1 i vedlegg 8.1 . Konfigurasjonsnumrene i tabellen er benyttet som referanser i de påfølgende kapitlene. Hver måling i tabellen er midlet resultat av flere kildeposisjoner, og med sensorer plassert på to veggskiver hhv. over og under etasjeskiller.

3.1.1 Sammenlikning av ulike kategorier for innfesting

Resultater for knutepunktdemping mellom etasjene med elastisk mellomlegg og innfesting er vist i figur 8, der stiplet sort linje viser knutepunktdemping med skrueinnfesting uten elastisk mellomlegg for sammenlikning. Kurvene representerer aritmetisk middel av flere målinger utført på en type/kategori for innfesting. Senteravstand mellom innfesting mellom dekke/vegg går fram av tabell 1 i kap. 8.1.



Figur 8 – Målt vertikal knutepunktdemping med elastisk lager i knutepunkt og ulike typer innfesting. Blå linje viser demping med vibrasjonsisolert/frakoplet vinkelinnfesting, rød linje vinkelinnfesting med elastisk lager mellom vinkel og dekke, oransje linje standard vinkelinnfesting, grønn linje skrueinnfesting, og svart linje uten noen form for innfesting.

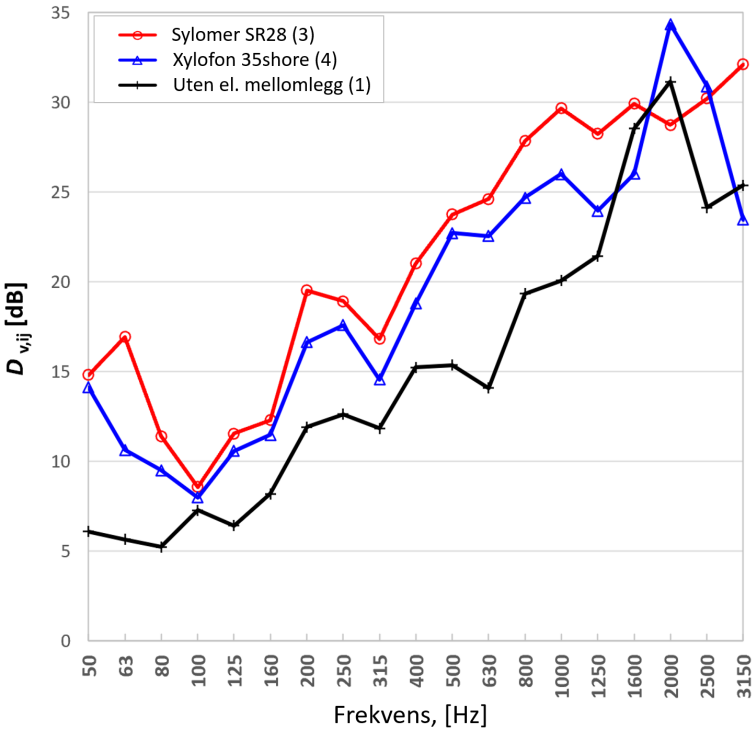
Målingene viser at type innfesting som benyttes har stor betydning for oppnådd demping. Bruk av skrueinnfesting og standard vinkelinnfesting gir sammenliknbar demping på rundt 10 dB i mellomfrekvensområdet. Bruk av vinkelinnfesting på elastisk mellomlegg gir en marginal forbedring fra 400 Hz og oppover. Vesentlig forbedring oppnås med vibrasjonsisolert/frakoplet vinkelinnfesting med dempeverdier på ca. 15 dB i mellomfrekvensområdet. Måling med elastisk lager uten innfesting gir som forventet minst strukturell kopling og best resultat i hele frekvensområdet.

Stiplet sort linje viser målt knutepunktdemping uten elastisk mellomlegg og skrueinnfesting mellom etasjer. Denne skiller seg ikke nevneverdig fra målinger utført med elastisk lager og skrueinnfesting eller elastisk lager og innfesting med standard vikler. Dette er også omtalt i avsnitt 3.1.4.

3.1.2 Elastiske mellomlegg uten innfesting mellom etasjer

Måleresultatene vist i figur 9 nedenfor viser knutepunktdemping vertikalt uten noen form for innfesting mellom boksene. Effekt av to ulike elastiske lagre er sammenliknet med situasjon uten elastisk lager.

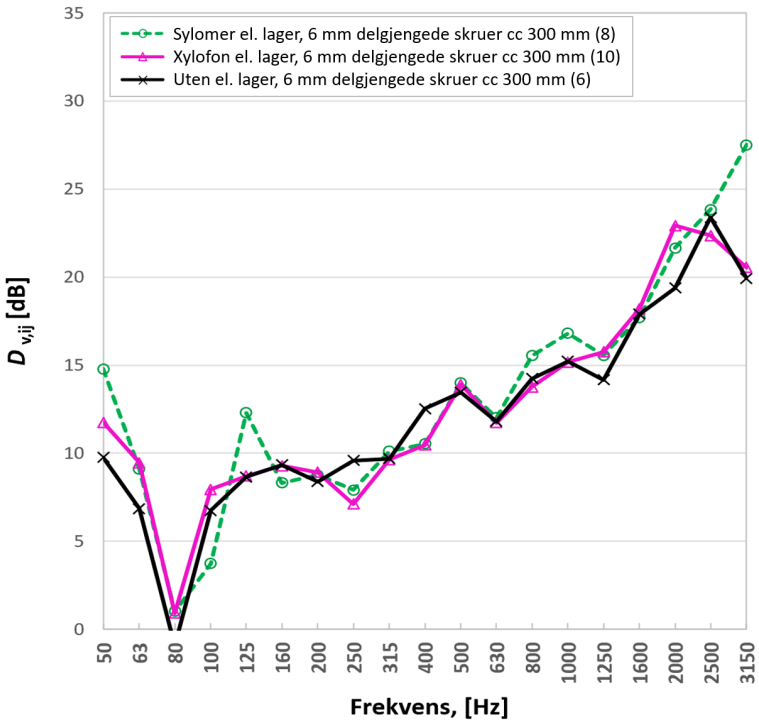
Resultatene med elastiske lagre viser tydelig forbedret knutepunktdemping sammenliknet med situasjon uten elastisk lager. Bruk av 12 mm sylomer gir noe bedre demping enn Xylofon 35 med 6 mm tykkelse over omtrent hele frekvensspekteret.



Figur 9 – Målt vertikal hastighetsendring, $D_{v,ij}$, uten innfesting med to ulike elastiske lagre, hhv. Sylomer SR28 (rød linje), Xylofon 35 shore (blå linje), og uten elastisk mellomlegg (sort linje).

3.1.3 Elastiske mellomlegg med skrueinnfesting mellom etasjer

Måleresultater i figur 10 er utført med 6 mm skruer montert parvis diagonalt gjennom dekke og overliggende vegg med senteravstand cc. 300 mm mellom skrueparene.

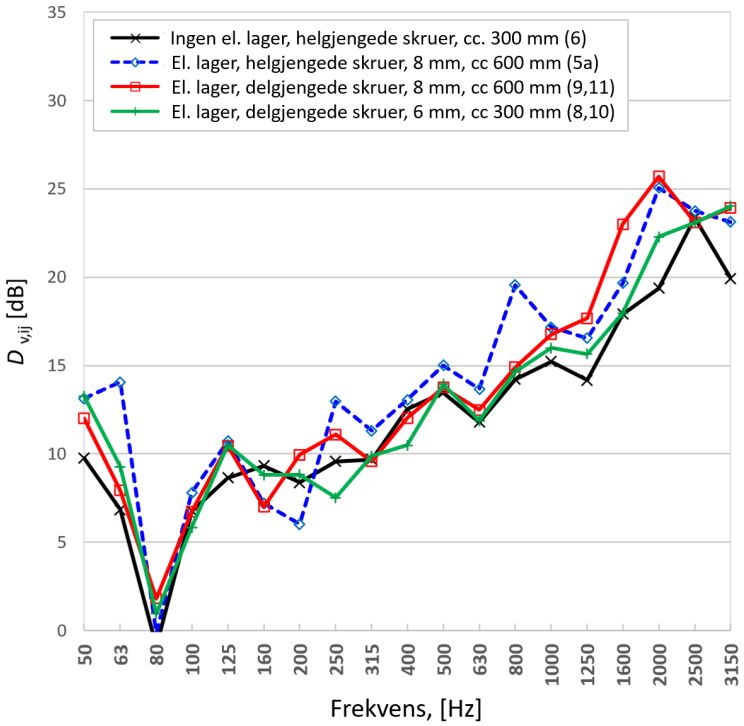


Figur 10 – Målt vertikal knutepunktdemping, skrueinnfesting med og uten elastisk mellomlegg.

Med skrueinnfesting vises ingen tydelig effekt av å innføre elastisk lager, eller som følge av variasjon i type elastisk lager som benyttes. Knutepunktdemping ligger på ca. 10 dB i mellomfrekvensområdet for alle målinger, og det er generelt godt sammenfall mellom målingene over hele frekvensområdet. Resultatene indikerer at skrueinnfesting kopler KLT-elementene tett, gir en fast strukturell kopling, og samtidig svekker virkningen av de elastiske lagrene betydelig.

3.1.4 Variasjoner av skrueinnfesting

Knutepunktdemping ble målt med ulike variasjoner av skrueinnfesting for å undersøke om senteravstand, tykkelse på skruene o.l. har betydning for lyddemping. Delgjengede skruer og helgjengede skruer ble testet. Alle skruer ble festet parvis diagonalt i knutepunktet mellom dekke og overliggende vegg. Resultater er vist i figur 11.



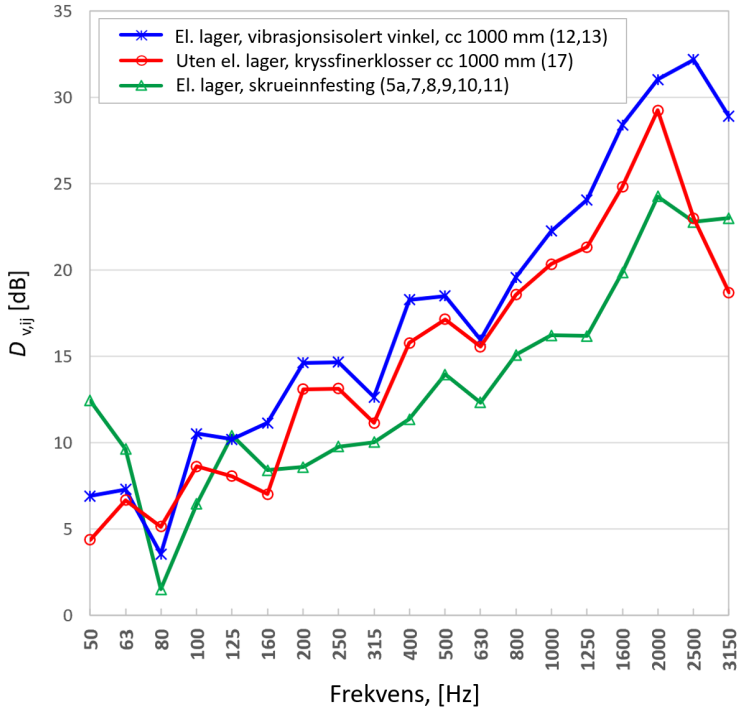
Figur 11 – Målt vertikal hastighetsendring, $D_{v,ij}$, med ulik skrueinnfesting. Blå stiplet linje viser demping med helgjengede skruer cc 600 mm, rød linje delgjengede skruer med cc 600 mm, grønn linje delgjengede skruer med cc 300 mm og svart linje delgjengede skruer med cc 300 mm, og ingen elastisk mellomlegg mellom dekke og vegg.

Målingene viste at tykkelse på skruer og senteravstand har begrenset effekt på dempeverdiene. Alle målinger viser demping på ca. 10 dB i mellomfrekvensområdet. Helgjengede skruer vist med blå stiplet linje viser en svak tendens til forbedret demping over 200 Hz. Dette kan skyldes at elementene i knutepunktet ikke strammes til like tett ved bruk av helgjengede skruer som ved bruk av delgjengede skruer, og at det dermed ikke oppnås like fast strukturell kontakt mellom elementene, men betydningen av dette er uansett liten.

Alle målinger, med unntak av sort linje, har elastisk mellomlegg mellom dekke og vegg. Det bemerkes at måling uten elastisk mellomlegg ikke skiller seg ut fra målinger utført på elastisk mellomlegg. Kun en svak tendens til forbedring med elastisk mellomlegg i frekvenser fra 1000 Hz kan ses. Dette tyder på at skrueinnfesting langt på vei eliminerer effekten av de elastiske lagrene.

3.1.5 Punktopplagring

Det ble foretatt test med øverste boks punktopplagret på kryssfinerklosser med cc 1000 mm. For å redusere lydlekkasje ut av boksen ble etafoam benyttet for å tette luftspaltene mellom kryssfinerklossene. Resultater er vist med rød linje i figur 12, sammenliknet med bruk av elastisk lager og skruer, og elastiske lager og innfesting med vibrasjonsisolert vinkel. Opplagring på kryssfinerklosser gir demping tett opptil innfesting med elastisk lager og vibrasjonsisolert vinkelinnfesting. Dette antas at høy knutepunktdemping skyldes at begrenset kontaktflate mellom boksene gir mindre grad av strukturell overføring av lyd.



Figur 12 – Målt vertikal hastighetsendring, $D_{v,ij}$, uten elastisk lager mellom etasjene og opplagring på kryssfinerklosser (rød linje) sammenliknet med bruk av elastisk lager mellom etasjene opp innfesting hhv. med vibrasjonsisolert vinkel (blå linje) og skrueinnfesting (grønn linje)

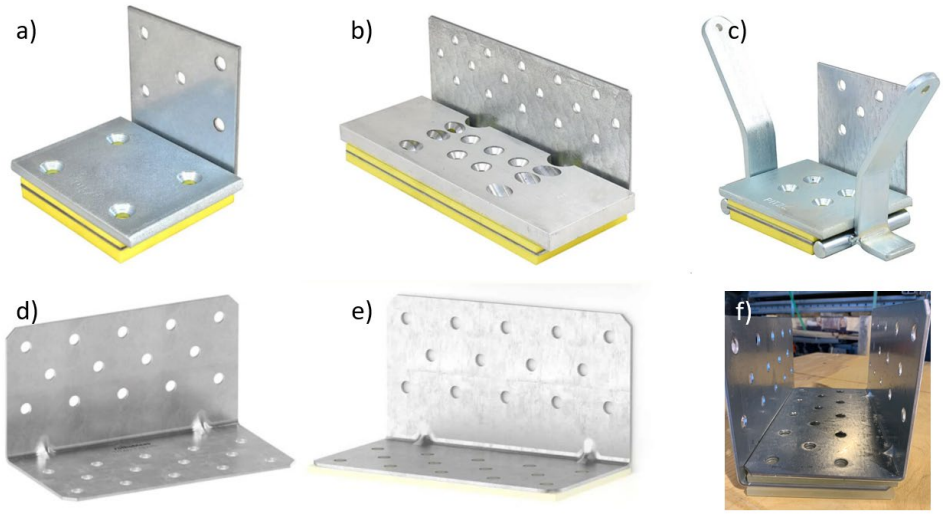
3.1.6 Vinkelinnfesting

Figur 14 viser resultater fra målinger med vinkelinnfesting med ulike akustiske tiltak. Benyttede vinkler er vist i figur 13 og forklart nedenfor.

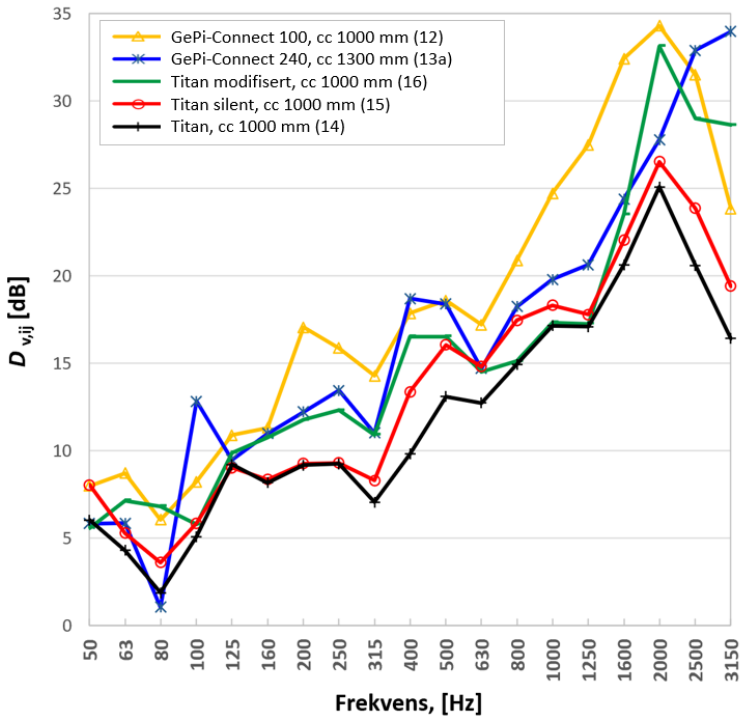
a) Gepi-connect 100. 5 horisontale og 4 vertikale skruehull tilpasset for skruer Ø 8 mm. Elastisk lager av sylodyn både under stålvinkel og mellom horisontal del av vinkel og beslag. Det er overdimensjonerte skruehull i horisontal vinkelplate for å unngå kontakt mellom vinkel og treelement.
b) Gepi-connect 240. 16 horisontale og 11 vertikale skruehull tilpasset for skruer Ø 8 mm. 6 av de vertikale skruene er diagonale. Elastisk lager av sylodyn både under stålvinkel og mellom horisontal del av vinkel og beslag. Det er overdimensjonerte skruehull i horisontal vinkelplate for å unngå kontakt mellom vinkel og treelement.
c) Gepi-Connect 100 og spesialverktøy momentskruetrekker som regulerer hvor stramt skruene festes, og dermed hvor stramt elementene festes sammen. Momentskruetrekker er benyttet ved montering av GePi-Connect vinkler i prosjektet.
d) Titan TTS240 stålvinkel. 14 horisontale og 14 vertikale skruehull tilpasset for skruer Ø 8 mm.
e) Titan silent TTS240 stålvinkel på 6 mm elastisk lager XYL35.

f) Titan modifisert. TTS240 stålvinkel tilpasset med elastisk lager under vinkel og mellom vinkel og beslag. Det er ikke gjort tilpasninger av størrelse på skruehull for å hindre stiv forbindelse mellom beslag og vinkel.

Det vil være variasjoner i kapasitet for å ivareta krefter/påkjenninger mellom de ulike vinklene. I et faktisk bygg vil dette få konsekvenser for hvor tett vinklene må plasseres. Dette er forsøkt hensyntatt ved valg av senteravstand, med det er ikke utført konkrete beregninger mhp. kapasitet og senteravstand.



Figur 13 **– Bilde av ulike vinkler benyttet i testing. a) GePi-Connect 100, b) GePi-Connect 240, c) GePi-Connect med momentskruetrekker, d) Titan TTS240 e) Titan TTS240 på XYL35 f) Titan Modifisert.**



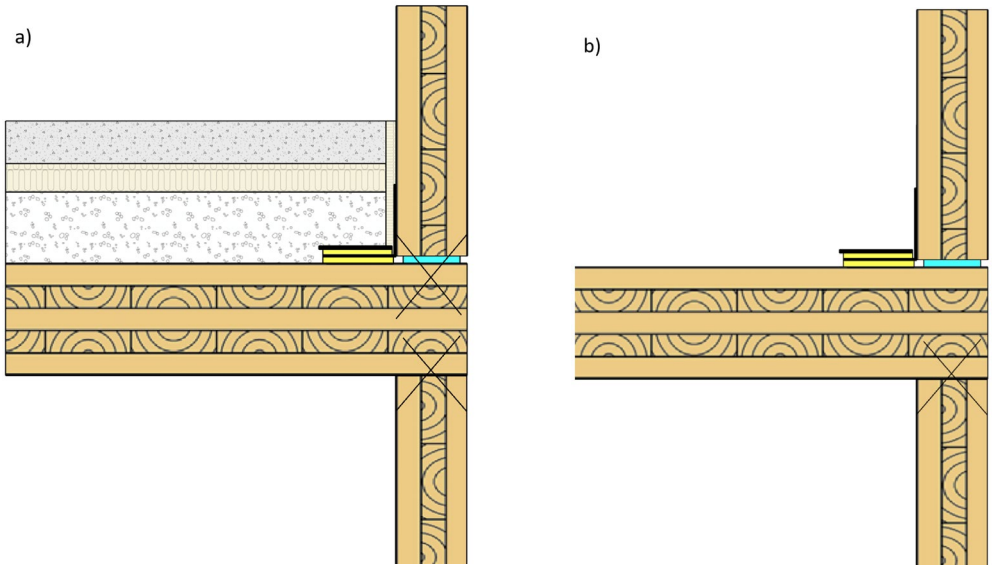
Figur 14 – Målt vertikal hastighetsendring, $D_{v,ij}$, med ulik vibrasjonsisolert vinkelinnfesting. Orange, blå og grønn linje viser innfesting med dobbelt elastisk mellomlegg. Rød linje viser innfesting med enkelt elastisk mellomlegg. Sort linje viser måling med stålvinkel uten akustiske tiltak.

Spesialvinklene GePi connect 100 (oransje linje) gir best demping av de testede innfestingsvinklene. Gepi-Connect 240 (blå linje) gir marginalt høyere demping enn Titan silent modifisert (grønn linje). Titan silent (rød linje) gir en forbedring på 2-3 dB for frekvenser fra 315 Hz sammenliknet med standard stålvinkel (sort linje).

3.1.7 Effekt av tungt overgulv

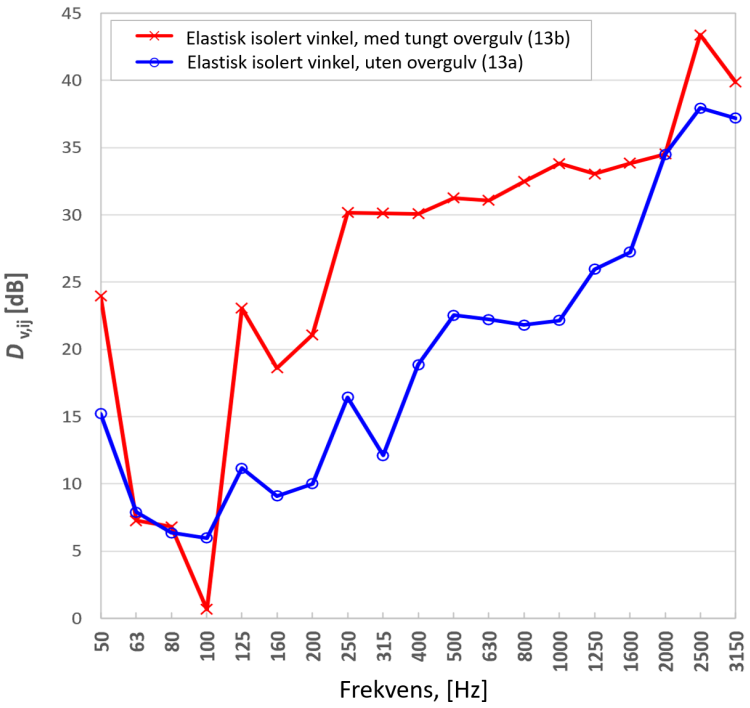
Ekstra tyngde i form av 100 mm pukk ble lagt direkte på KLT-dekket, og flytende overgulv av 40 mm trinnlydmatte i mineralull og 70 mm avretting over dette igjen. Målt hastighetsendring over vertikalt knutepunkt ble sammenliknet med situasjon uten ekstra vekt, overgulv eller annen tilført tyngde. Til forskjell fra andre målinger av knutepunktdemping er disse målingene ikke midlet over to vegger, men målt med sensorer på kun én veggside i hver etasje.

I begge situasjoner ble det benyttet elastiske lagre av type Sylomer SR 28 og GePi 240 elastisk vinkelinnfesting mellom dekke og vegg over dekke. Prinsipptegning av knutepunkt for dekke/vegg med tilført vekt er vist til venstre i figur 15, mens knutepunkt uten tilført vekt er vist til høyre.



Figur 15 – Skisse/snitt av knutepunkt mellom etasjer med a) tilført vekt i form av tungt overgulv og avisolert vinkel mellom dekke og vegg (til venstre), og b) elastisk avisolert vinkel, uten tungt overgulv (til høyre).

Måling av knutepunktdemping viste en forbedring på ≥ 15 dB i frekvensområdet fra 125-1000 Hz som følge av det tunge overgulvet, se figur 16. Det antas at tyngde fra overgulvet er dimensjonerende for økt knutepunktdemping i måling 13b, da økt demping er betydelig sammenliknet med variasjoner i innfesting.

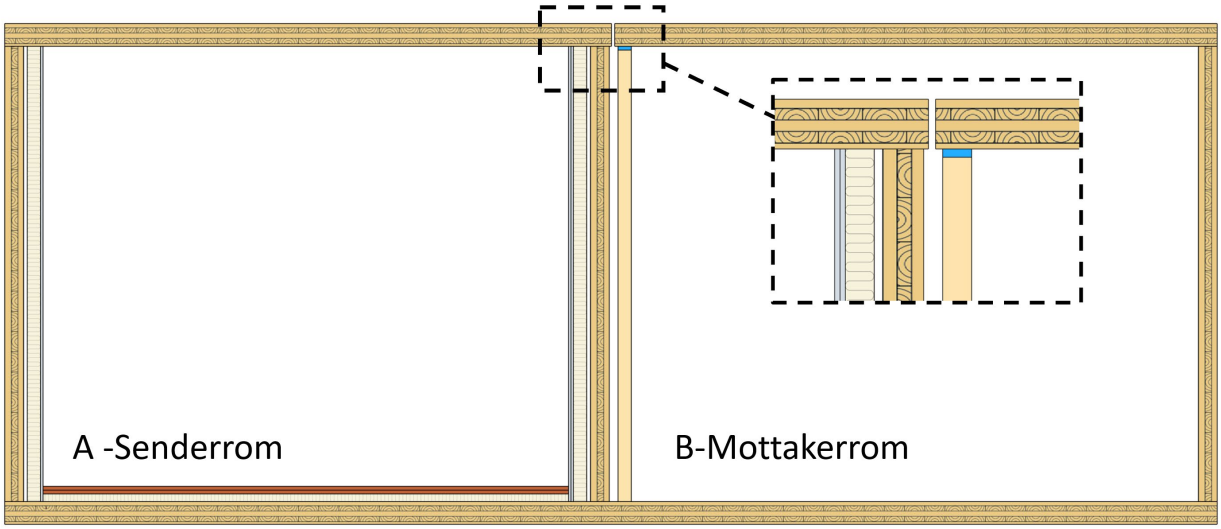


Figur 16 – Målt vertikal hastighetsendring, $D_{v,ij}$, med tilført vekt (rød linje) og uten tilført vekt (blå linje)

3.2 Horisontal knutepunktdemping

Det ble målt horisontal knutepunktdemping mellom de to boksene på plan 1. Innfesting mellom horisontale elementer er relevant da dette ofte er nødvendig for å ivareta horisontalkrefter i bygninger.

Før disse målingene ble toppetasjen til måleriggen fjernet. Underveis ble dekke samt vegger mellom de to horisontale rommene (boks A og boks B) kuttet i to, som skissert i vertikalsnitt i figur 17.



Figur 17 – Vertikalt snitt av plan 1, der utsnittet viser knutepunktet via himling mellom rommene, påforing på venstre side, og limtresøyle på høyre side. Toppetasjen er fjernet for disse måleseriene.

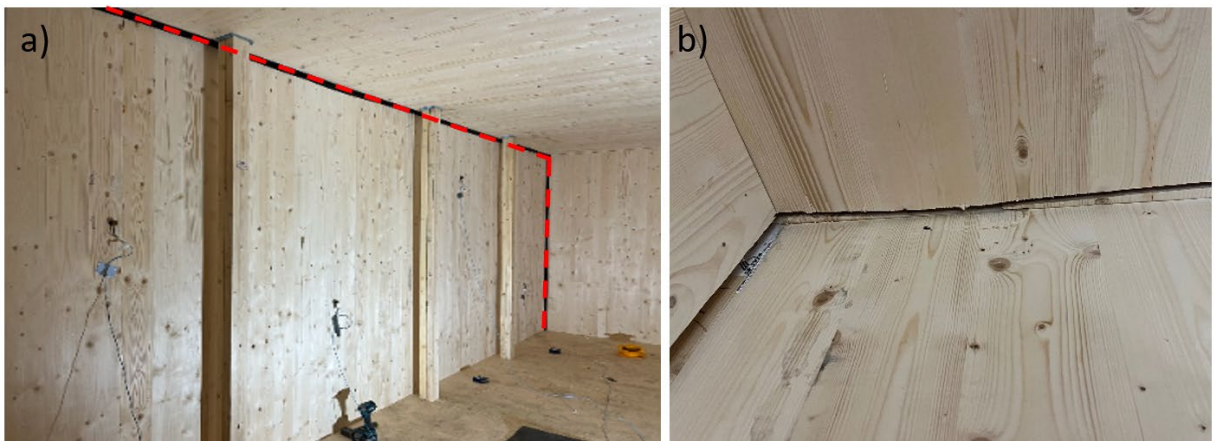
For å begrense flankelydoverføring mellom de to rommene ble det bygget flytende gulv bestående av 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydmatte i mineralull, og frittstående påforingsvegger med 13 mm gips og isolert hulrom på alle vegger i senderommet. Kun takelement hadde synlig tre på senderomsiden. Skilleveggen mellom de to rommene ble forsterket med 2x13 mm gips på 100 mm frittstående, isolert stålstenderverk i senderrommet.

Akselerometre ble montert på takelementet på begge sider av skilleveggen, bilde fra senderrom A er vist i figur 18.



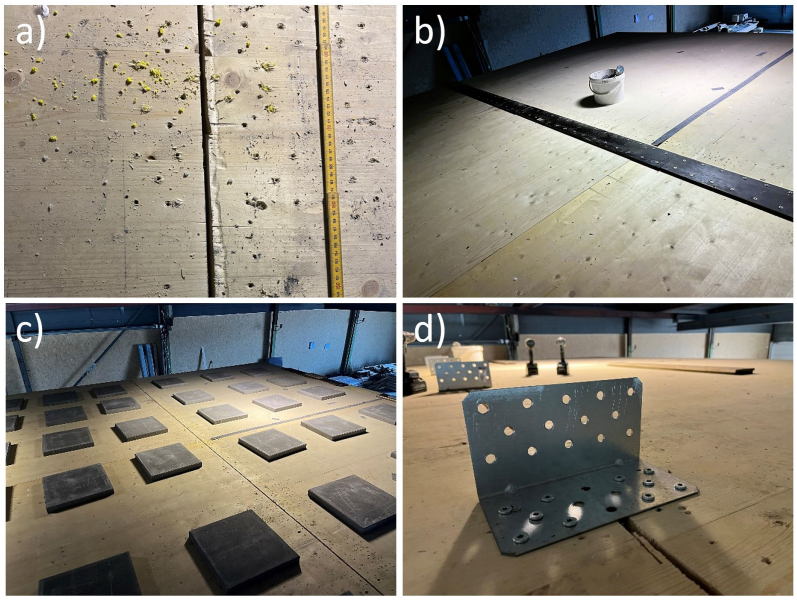
Figur 18 – Sensorposisjoner for horisontale målinger av knutepunktdemping (kun 3 av 4 sensorer er synlig i bildet). Sensorposisjoner er markert med piler.

Målinger ble utført før og etter etablering av lydsplitt mellom rommene. Etter at dekkeelementet ble splittet ved lydskillevegg, ble dekket i mottakerrom holdt oppe av tre limtresøyler med elastiske lagre, se figur 17. Både dekke og vegger ble splittet, som indikert med rød stiplet linje i figur 19a). Selve lydsplitten er avbildet i figur 19b).



Figur 19 – a) Mottakerside hvor lydsplitt er skissert med rød stiplet linje b) Nærbilde av lydsplitt.

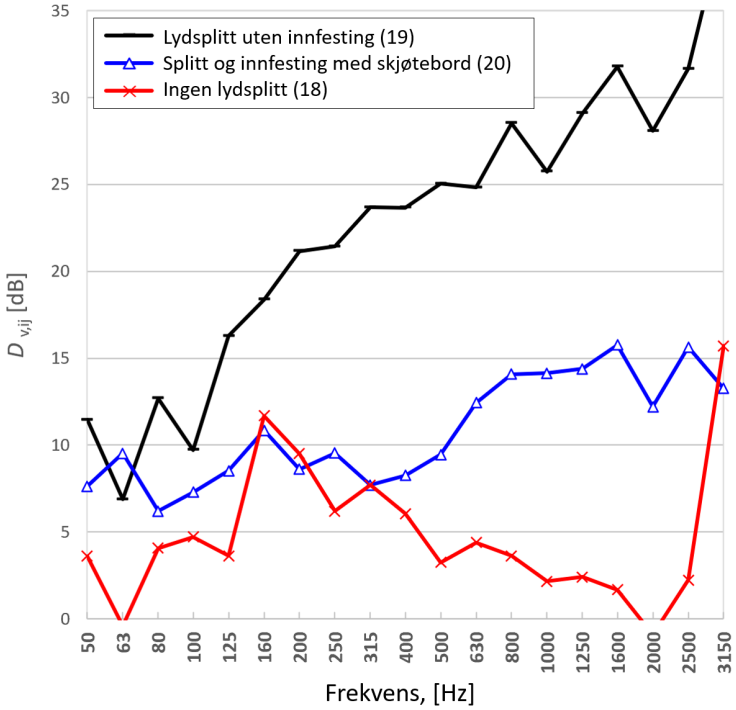
Ulik innfesting på tvers av lydsplitten ble testet, se eksempler i figur 20. Oversikt over målinger er listet i vedlegg 8.2. Konfigurasjonsnummeret i første kolonne i tabellen benyttes som referanse på figurer i de påfølgende kapitlene.



Figur 20 – Bilde fra testing av knutepunktdemping horisontalt sett fra tak. a) lydsplitt med skrueinnfesting b) skjøtebord som innfesting på tvers av lydsplitt b) betongheller fordelt på takflaten d) innfesting med hullplate på tvers av dekkesplitt.

3.2.1 Kontinuerlig og splittet dekke samt innfesting med skjøtebord

Ulike innfestinger på tvers av lydsplitt ble testet. Sort linje i figur 21 ble målt med fullstendig splitt og ingen innfesting på tvers av dekkeelementene, og kan anses som høyeste mulige knutepunktdemping.



Figur 21 – Målt horisontal knutepunktdemping, med kontinuerlig KLT-element (rød linje), full splitt (sort linje) og innfesting med skjøtebord med 120 skruer (blå linje).

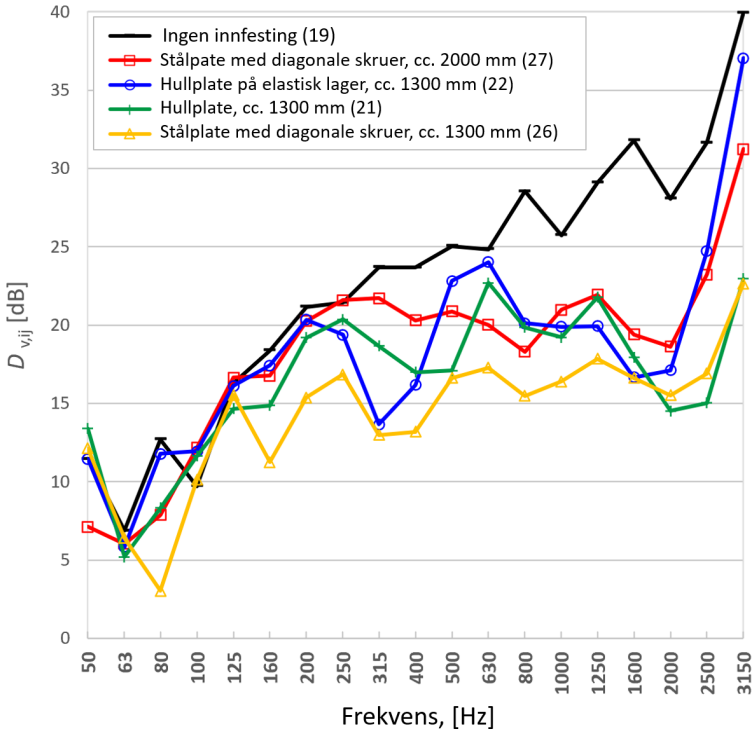
Rød linje ble målt før splitting av tak- og veggelementer, og representerer således forventet laveste knutepunktdemping, med kun energiavledning og avstandsdemping med kontinuerlig dekke- og veggelementer mellom rommene, og er ca. 5 dB i et bredt frekvensområde med unntak av 160-400 Hz hvor dempeverdiene når en topp på 6-12 dB rundt 160 Hz. Forskjellen mellom rød og sort linje er ca. 10 dB opp til 160 Hz, men øker raskt mot høyere frekvenser.

Ved å innføre et kontinuerlig skjøtebord av spon på tvers av lydsplitten i hele takets lengde ble dempeverdiene betydelig redusert, som det går fram av blå linje i figur 21. Skjøtebordet var festet til dekkeelementene med totalt 120 skruer. Oppnådd knutepunktdemping med skjøtebord er sammenliknbar med kontinuerlig dekkeelement opp til 400 Hz, men gir 10-15 dB forbedring ved høyere frekvenser.

3.2.2 Splittet dekke, punktinnfesting med hullplate av stål

Figur 22 viser resultater med perforerte stålplater montert «punktvis» med cc 1300 mm på tvers av lydsplitt i tak, som vist i figur 20 d. «Punktinnfesting» (rød, blå, oransje og grønn linje) gir omtrent tilsvarende knutepunktdemping sammenliknet med situasjon uten innfesting (svart linje) opptil ca. 250 Hz, og deretter demping på mellom 15-25 dB reduksjon i mellomfrekvensområdet og høyere.

Elastisk lager under stålplatene hadde minimal effekt på dempingen, som kan ses ved at blå linje ikke gir bedre demping enn de øvrige. Dette skyldes trolig at skruer montert gjennom hullplatene gir betydelig strukturell kontakt på tvers av splitten. Ingen av innfestingene hadde dobbel avisolering da en og samme stålplate var festet tett til begge sider av lydsplitt med skruer. Ved å sammenlikne rød og oransje linje ser vi at økt senteravstand mellom innfestingene gir forbedret knutepunktdemping fra 125 Hz.

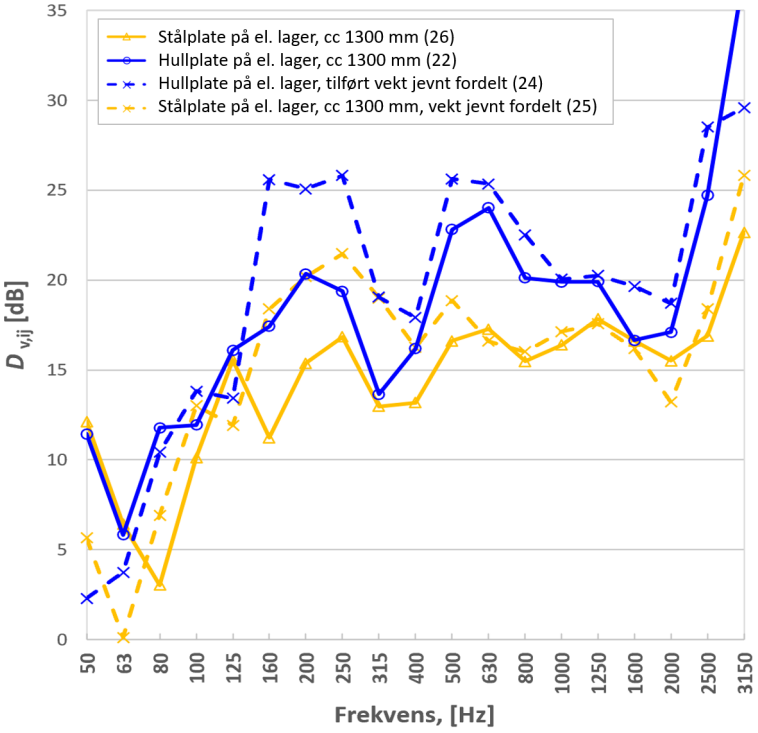


Figur 22 - Målt horisontal knutepunktdemping, med full splitt i dekkeelement og innfesting med hullplate, skrueinnfesting.

3.2.3 Splittet dekke, punktinnfesting med og uten ekstra vekt

Ved å legge til vekt på dekkeelementet økte dempingen, som figur 23 viser, der stiplete og heltrukne linjer viser resultater hhv. med og uten ekstra tilført vekt. Tilført vekt bestod av 36 betongplater med totalvekt ca. 950 kg, som ble fordelt jevnt utover dekkeelementene som vist i figur 20.

Forbedringen er begrenset til området 160-800 Hz med topper rundt 160-250 Hz og 500-630 Hz, der dempingen delvis var høyere enn situasjon uten innfesting (se svart linje i figur 21).

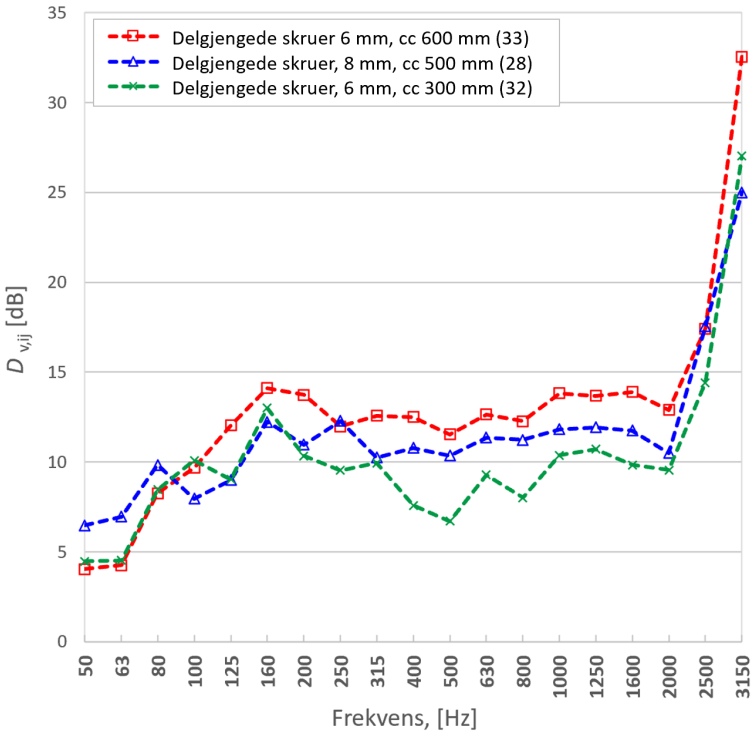


Figur 23 **– Målt horisontal knutepunktdemping, med full splitt i dekkeelement og innfesting med to ulike hullplater. Stiplede kuver representerer målinger med tilført vekt på takflaten.**

3.2.4 Variasjoner av skrueinnfesting horisontalt

Figur 24 viser resultater med skrueinnfesting på tvers av horisontalt knutepunkt med delgjengede skruer og ulik senteravstand mellom skruepar. I likhet med resultater målt vertikalt over knutepunkt vist i figur 11, oppnås dempeverdier rundt 10 dB i mellomfrekvensområdet. Målinger vertikalt viser noe bedre verdier i lavfrekvensområdet og stiger raskere ved høyere frekvensområde.

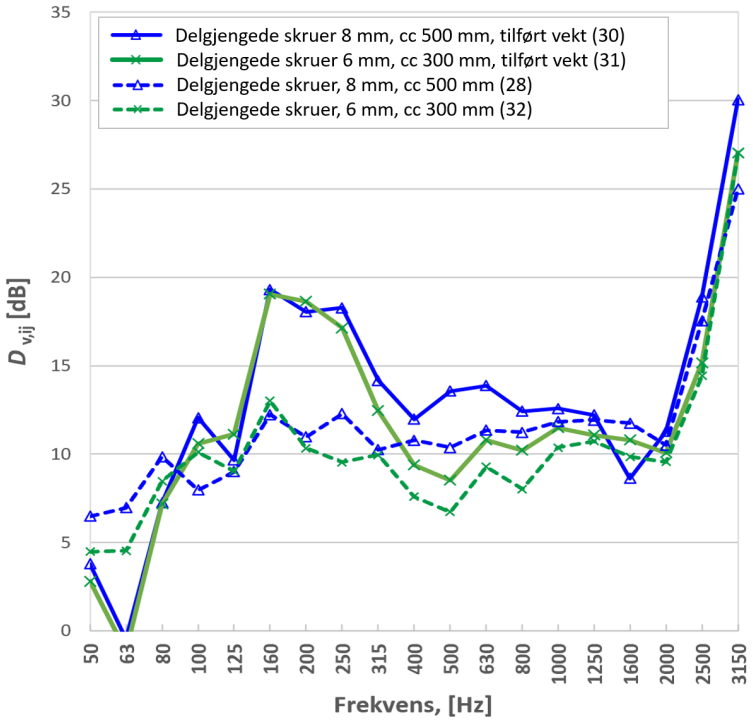
Figuren indikerer forbedret demping når senteravstanden mellom skrueparene øker som følge av at flere skruer gir økt kontakt gjennom knutepunktet. Rød linje som har størst avstand mellom skruepar, gir også best demping. Disse målingene står i kontrast til vertikale målinger vist i figur 11 hvor bruk av tettere konfigurasjon av skruepar ikke ga merkbar endring i knutepunktdemping.



Figur 24 **– Målt horisontal knutepunktdemping med skrueinnfesting med ulik senteravstand. Alle målinger er utført med delgjengede skruer. Rød linje viser skruer med tykkelse 6 mm og senteravstand 600 mm, blå linje skruer med tykkelse 8 mm og senteravstand 500 mm, grønn linje skruer med tykkelse 6 mm og senteravstand 300 mm.**

Figur 25 viser resultater fra målinger på skrueinnfesting med og uten ekstra vekt i form av 36 betongheller[2] jevnt fordelt på dekkeelementene. I likhet med resultater fra punktinnfesting med hullplate vist i figur 23, gir tilført vekt en forbedring i et begrenset frekvensområde. Heltrukne linjer viser dempeverdier etter tilføring av vekt, noe som forbedret lydisolasjonen fra 125-1250 Hz, og særlig i området 160-315 Hz, sammenliknet med målinger uten tilført vekt. Økt vekt viser seg dominerende for dempeverdiene sammenliknet med senteravstand mellom skruer.

[3] Tilsvarer en flatevekt på ca. 58 kg/m²



Figur 25 – Målt horisontal knutepunktdemping med skrueinnfesting med ulik senteravstand. Alle målinger er utført med delgjengede skruer. Blå linjer er med skruer med tykkelse 8 mm og senteravstand 500 mm, grønne linjer skruer med tykkelse 6 mm og senteravstand 300 mm. Målinger med og uten ekstra vekt på takelementene er vist med hhv. heltrukne og stiplede linjer.

3.3 Oppsummering resultater for knutepunktdemping

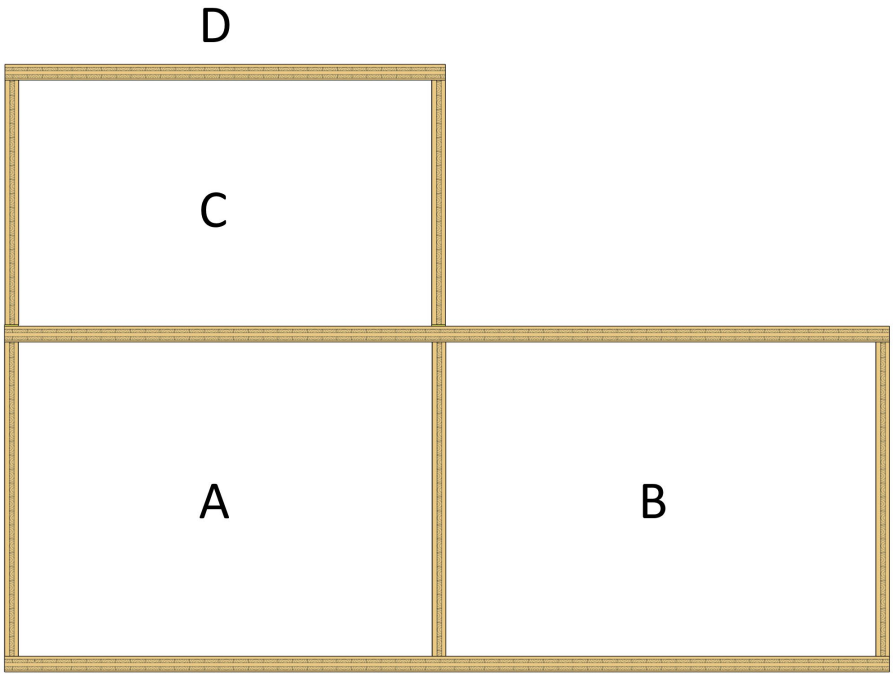
- Valg av innfesting har stor betydning for knutepunktdemping.
- Elastisk avisolerte vinkler ga best demping i vertikal retning.
- Generelt tyder testene på at bruk av skrueinnfesting og standard vinkelinnfesting langt på vei eliminerer effekten av de elastiske lagrene.
- Tilført vekt på etasjeskiller ga betydelig høyere knutepunktdemping vertikalt, og antas å være dimensjonerende faktor over type innfesting.
- Punktopplagring på treklosser uten elastisk mellomlegg ga forbedret lydisolering vertikalt sammenliknet med skrueinnfesting. Dette antas å skyldes lavere grad av strukturell kontakt mellom etasjene.
- Testing av ulike skruetyper, tykkelse og senteravstand ga liten variasjon i dempeverdier vertikalt.
- Bruk av skrueinnfesting ga moderat knutepunktdemping på tvers av lydsplitt i horisontal retning. Dempeverdier er på linje med vertikal situasjon med skrueinnfesting ved mellomfrekvenser, men til forskjell fra vertikal situasjon er det mulig å se en effekt av økt avstand mellom skrueparene. Dette kan skyldes at lastene i vertikal situasjon gir en økt kopling mellom elementene.
- Kontinuerlig innfesting av skjøtebord ga sammenliknbare resultater som kontinuerlige gjennomgående dekkelement i horisontal retning. Bruk av skrueinnfesting ser ut til å redusere effekten av de elastiske lagrene betydelig. Dette antas å skyldes at skruene gir en stiv kopling mellom elementene, og kortslutter konstruksjonen.

- Punktinnfesting med hullplate horisontalt på tvers av lydsplitt ga vesentlig forbedring i knutepunktdemping sammenliknet med kontinuerlig skjøtebord, dette antas å skyldes at punktinnfesting gir mindre grad av kopling.
- Ekstra vekt på dekke/tak ga bedre knutepunktdemping i horisontal retning, men forbedringen var begrenset til 125-800 Hz med topper ved 160-250 Hz og 500-630 Hz, hvor dempingen var høyere enn for situasjon med kontinuerlig takelement.

4 Måleresultater lydisolering

Målinger av luftlydisolering ble gjort på en rekke ulike konfigurasjoner. Konstruksjonsbeskrivelse og måleresultater er oppsummert i kapittel 9, hvor hver måling er gitt et målenummer som benyttes som referanse i kapitlene nedenfor.

Ulike rom/måleposisjoner i testriggen er gitt benevning "A", "B", "C" og "D" for referanse, se figur 26.



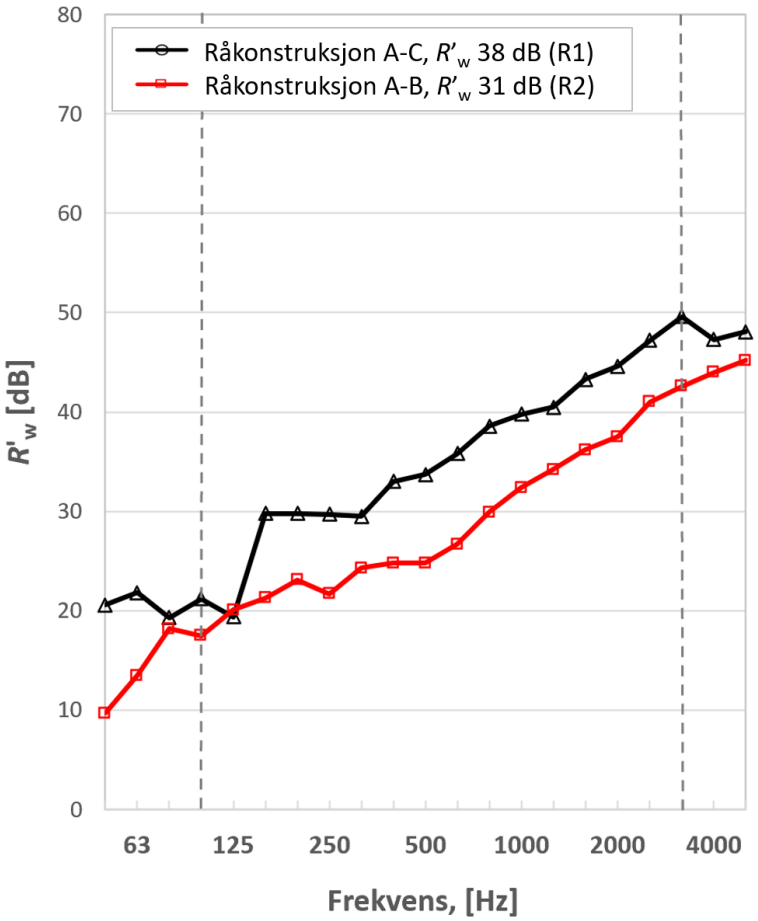
Figur 26 – Vertikalsnitt av testrigg med benevning av rom/måleposisjoner A, B, C og D for referanse.

4.1 Måling av luftlydisolering og trinnlydnivå på råkonstruksjon i KLT

Målinger av luftlydisolering og trinnlydnivå på råkonstruksjon ble gjort uten på-/nedforinger eller overgulv. Det var montert stålskruer i form av kryss-skrueinnfesting i alle tilstlutninger mellom KLT - elementer, med skruetykkelse 6 mm og cc. 300 mm mellom skruepar. Det ble ikke benyttet elastisk mellomlegg mellom boksene.

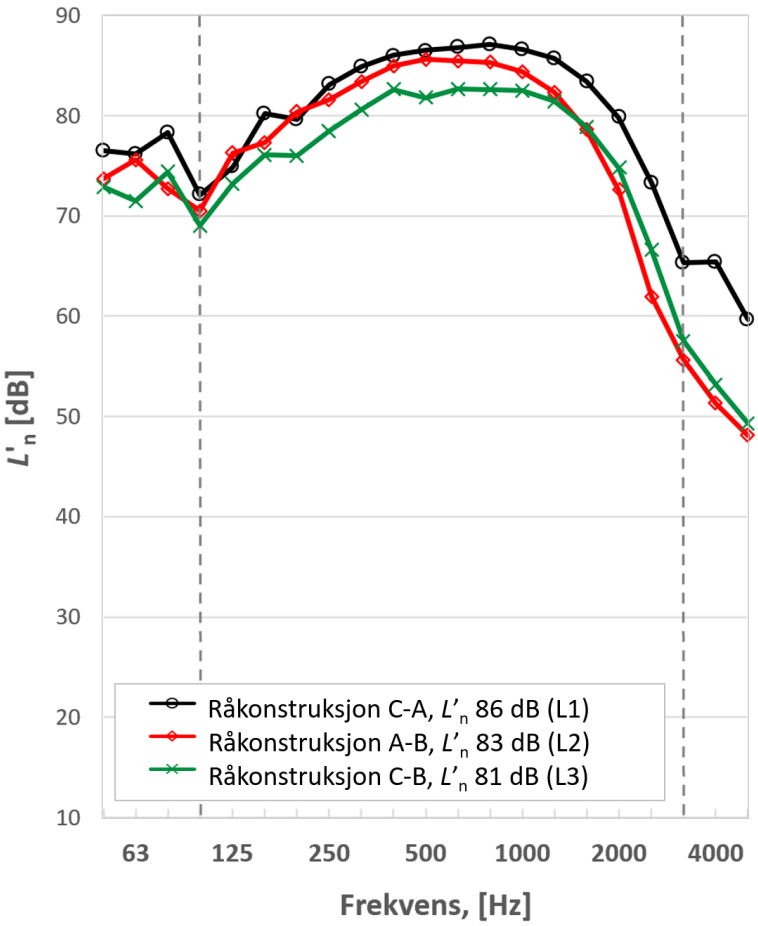
Luftlydisolasjon mellom boksene på grunnplan horisontalt (A-B) ble målt til R'_w = 31 dB (R2) med 100 mm KLT-element som skillevegg og gjennomgående flankerende vegg- og dekkeelementer i 120 mm KLT.

Vertikalt fra underliggende boks opp til 2. etasje (A-C) gjennom dekkeelement av 160 mm KLT og med 120 mm flankerende veggelementer, ble luftlydisoleringen målt til R'_w = 38 dB (R1). Målekurver er vist i figur 27.



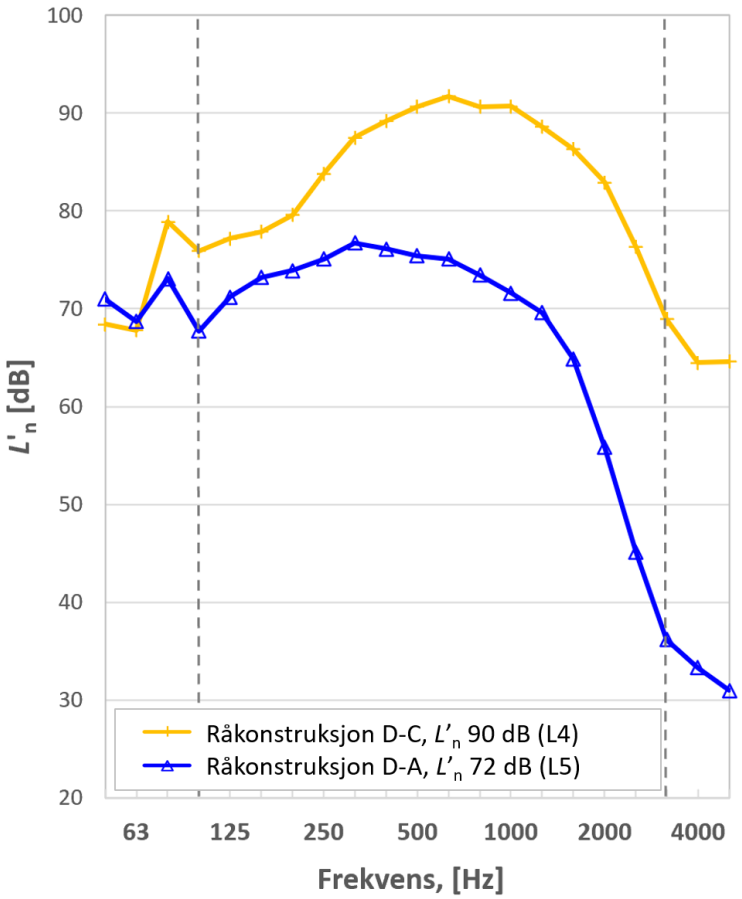
Figur 27 – Målt luftlydisolering på råkonstruksjon, uten elastisk lager mellom boksene og med skrueinnfesting.

Trinnlydnivå horisontalt (måleretning A-B) ble målt til L'_{nw} = 83 dB (L2), mens trinnlydnivå vertikalt (C-A) ble målt til L'_{nw} = 86 dB (L1). Diagonalt fra øverste etasje til nederste etasje (C-B) ble det målt et trinnlydnivå på L'_{nw} = 81 dB (L3), se målekurver i figur 28.



Figur 28 – Målt trinnlydnivå på råkonstruksjon, uten elastisk lager mellom boksene og med skrueinnfesting

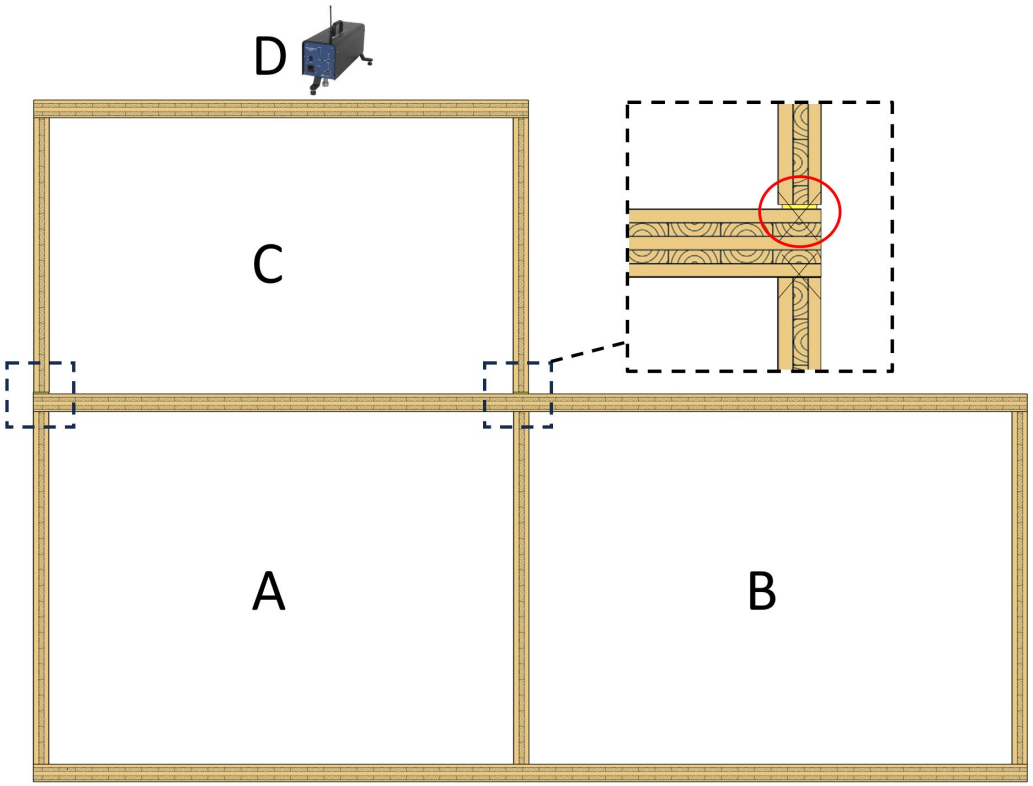
Det ble gjort forsøk med plassering av bankemaskinen på taket av testriggen (posisjon D i Figur 29. Målt trinnlydnivå i øverste etasje (D-C) var L'_{nw} =90 dB (L4) og 72 dB (L5) i nederste etasje (D-A). Følgelig ga avstandsdemping i strukturen en reduksjon på 18 dB mellom 2. etasje og 1. Etasje.



Figur 29 – Målt trinnlydnivå i hhv. 1. og 2. etasje med bankemaskin plassert på tak i posisjon D.

4.2 Trinnlyd vertikalt på råkonstruksjon med ulike elastiske lagre og innfesting

Trinnlydnivå ble målt i nedre boks med bankemaskin plassert på tak (måleretning D - A) for ulike konfigurasjoner med elastiske lagre og innfestinger. Det ble ikke gjort konstruksjonsmessige endringer utover dette i måledata vist i dette delkapitlet. Forplantning av strukturlyd fra det eksiterte takelementet passerer knutepunkt mellom boksene, se figur 30.



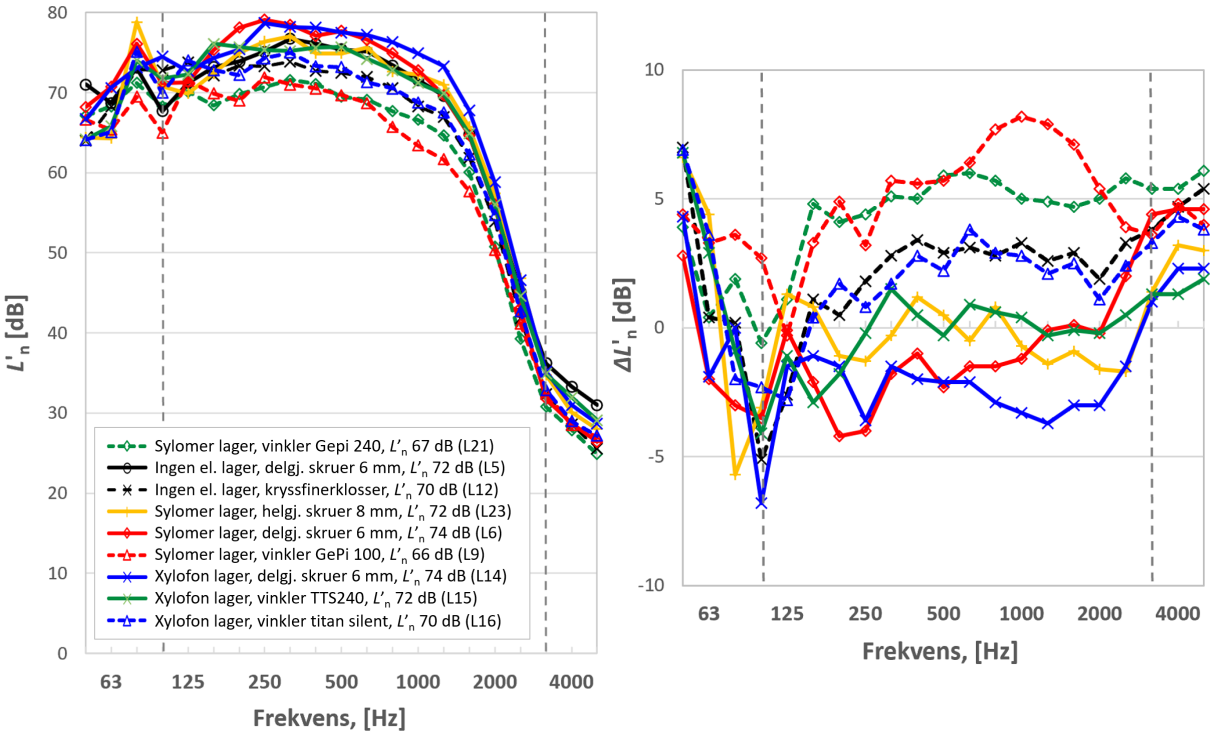
Figur 30 – Vertikalsnitt av testrigg. Plassering av bankemaskin og knutepunkt mellom rommene er indikert.

Et utvalg av målingene er vist i figur 31. Målt trinnlydnivå er vist i a), der måling uten elastisk lager og innfesting med tynne skruer er inkludert for referanse (svart heltrukken linje), og b) viser avvik fra referansemålingen. Positive verdier representerer en forbedring, dvs. lavere trinnlydnivå. Resultater fra alle utførte målinger er gitt i kapittel 9, sammen med konstruksjonsbeskrivelse og referanse til målenummer.

Trinnlydnivå i boks A uten elastisk lager og innfesting med tynne skruer ble målt til $L'_{n,w}$ = 72 dB (L5). Med elastisk lager og skrue- eller standard vinkelinnfesting forble trinnlydnivået omtrent det samme. Det er ingen markant forskjell på skrueinnfesting med og uten bruk av elastisk mellomlegg, som samsvarer med funn fra målinger av knutepunktdemping rapportert i punkt 3.1.4. Med innføring av elastisk lager og delgjengede skruer snarere øker trinnlydnivå 2 dB (L6, L14) sammenliknet med referansemålingen uten elastiske lager og innfesting med delgjengede skruer (L5).

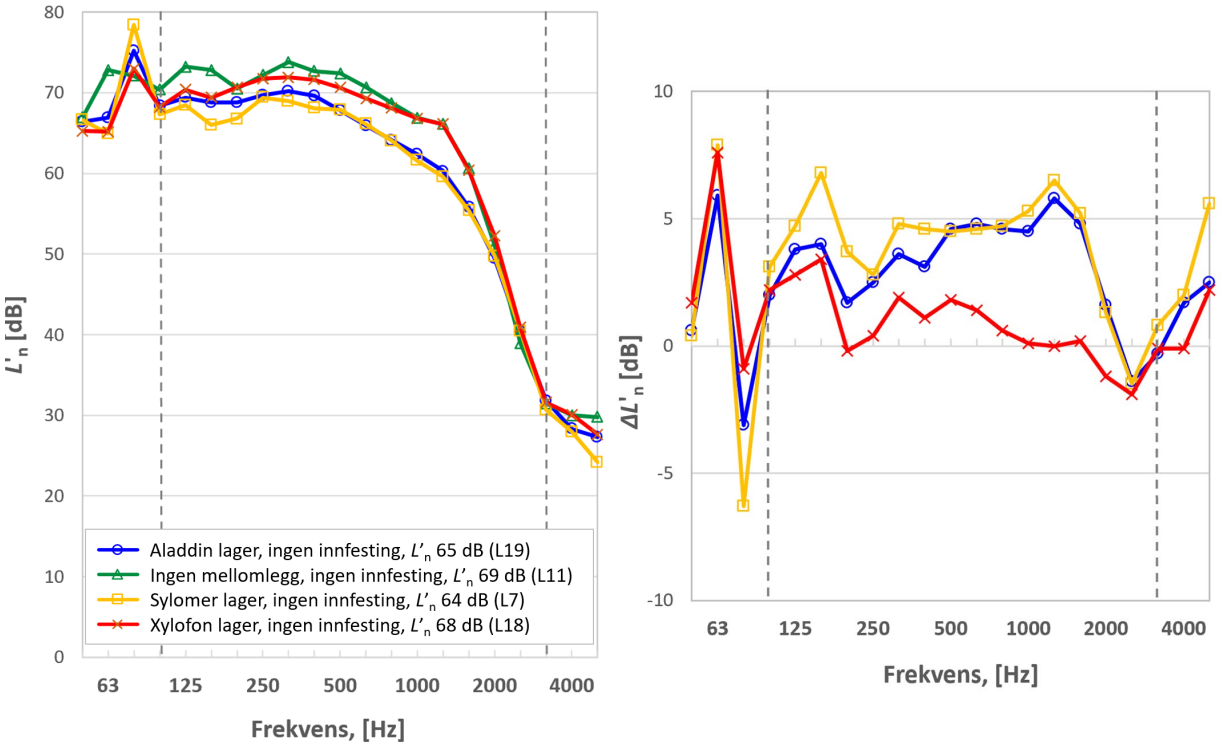
For frekvenser over 2000 Hz er det mindre variasjon mellom de ulike målingene, der KLT-elementene også gir økt strukturell demping. Data fra 100 Hz og lavere virker å større grad være styrt av egenskaper av hovedkonstruksjonen enn type innfesting og opplagring.

Elastisk lager og spesialvinkler (GePi connect) ga 6 dB lavere trinnlydnivå enn referansenivået (L5), og ble målt til $L'_{n,w}$ = 66 dB (L9). Bruk av punktinnfesting med kryssfinerklosser og vinkler montert på elastisk lager (L12) og vinkelinnfesting med Titan Silent (L16) ga 2-3 dB redusert trinnlydnivå i mellomfrekvensområdet sammenliknet med referansemåling.



Figur 31 – Til venstre: Målt trinnlydnivå i rom A med bankemaskin plassert på tak av testhuset (D-A). Ulike elastisk lager og innfesting. Til høyre: Målt endring i trinnlydnivå fra situasjon uten elastisk mellomlegg og skrueinnfesting cc 300 mm (L5). Positive verdier representerer et redusert trinnlydnivå.

Målinger av trinnlydnivå i boks A med bankemaskin plassert på tak (D-A), uten innfesting mellom etasjene og med ulike elastiske lagre (L11), er vist i til venstre i figur 32. Målt endring i trinnlydnivå fra situasjon uten elastisk mellomlegg og uten innfesting mellom boksene er vist til høyre i figur 32, i der positive verdier representerer redusert trinnlydnivå. Resultatene viser at trinnlydnivået ble redusert med inntil 5 dB i mellomfrekvensområdet med Sylomer og Aladdin lagre (hhv. L7 og L19). Med Xylofonlagre er forbedringen mindre, som ikke samsvarer med målinger på knutepunktdemping vist i figur **9**, der lagre av Xylofon og Sylomer ga liknende resultater. Overordnet samsvarer resultatene med målinger av knutepunktdemping vertikalt da måleoppsett med elastiske spesialvinkler gir best resultat og målinger med skrueinnfesting gir svakest resultat/minst demping.



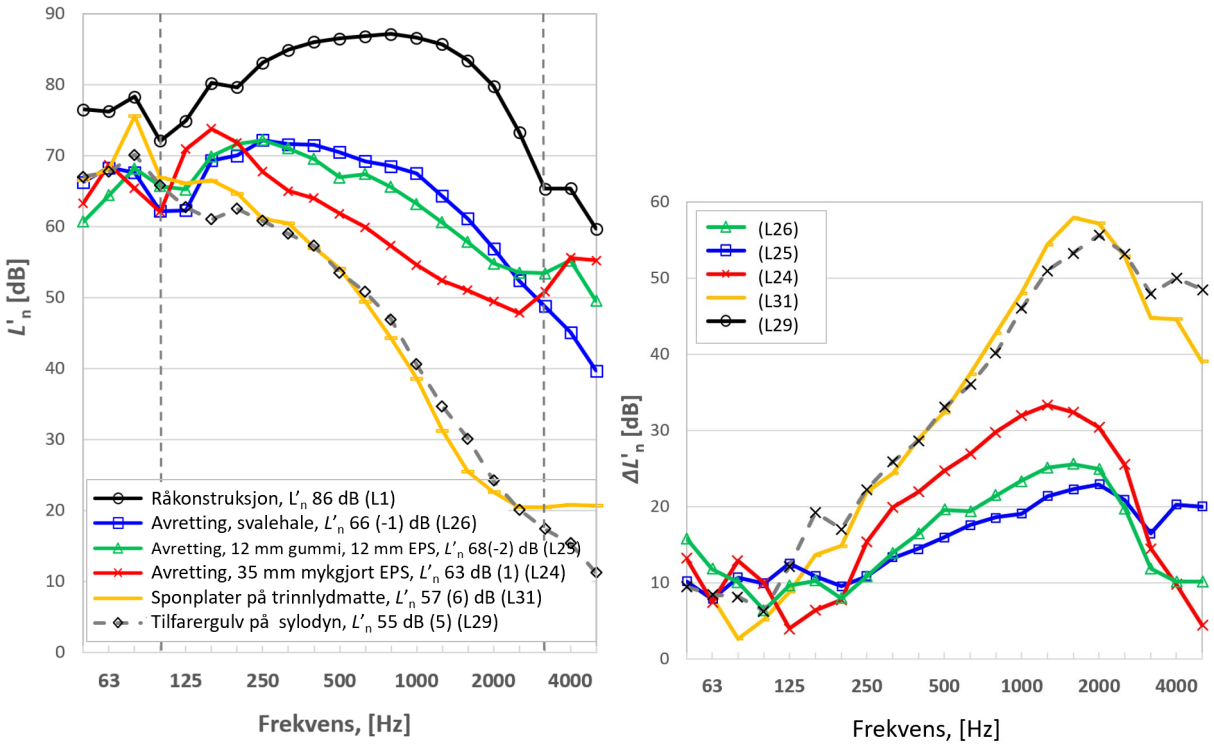
Figur 32 – Til venstre: Målt trinnlydnivå i rom A med bankemaskin plassert på tak av testhuset (D-A). Situasjoner uten innfesting mellom boksene og med ulike elastiske lagre. Til høyre: Endring i trinnlydnivå fra situasjon uten elastisk innfesting og uten lagre mellom boksene (L11). Positive verdier representerer reduksjon i trinnlydnivå.

4.3 Trinnlydnivå målt vertikalt med lette flytende gulv

Figur 33 viser trinnlydmålinger fra boks C til boks A med lette flytende gulv uten himling, men med påforingsvegger i boks A for å redusere flankelydoverføring via veggskiver. Ved måleserie L29 og L31 var det i tillegg montert påforingsvegger i boks C da dette viste seg å være nødvendig for å unngå at flankelydoverføring ble dominerende for trinnlydnivået.

Målingene med trinnlydmatte av 35 mm mykgjort EPS (L24), 12 mm gummimatte over 12 mm trinnlydmatte av mykgjort EPS (L25) og svalehale forskaling og avretting (L26), er overgulv med avretting med samlet byggehøyde 75 mm -100 mm over KLT-dekke. Tilfaregulv (L29) bygger til sammenlikning 219 mm, og lydgulv med trinnlydmatte under 2x22 mm sponplate (L31)bygger 84 mm over KLT-dekket. Beskrivelse av konstruksjoner finnes i kapittel 9.

Det ble også målt luftlydisolering vertikalt for de samme overgulvene, disse er ikke framstilt her da måling av luftlydisolering for overgulv Svalehale og mykgjort EPS viste seg å være dominert av flankelydoverføring via veggskiver.



Figur 33 – Til venstre: Målinger av trinnlydnivå på lette flytende gulv uten himling. Til høyre: Målt endring i trinnlydnivå fra råkonstruksjon uten elastisk mellomlegg og innfesting med tynne skruer (L1). Positive verdier representerer reduksjon i trinnlydnivå.

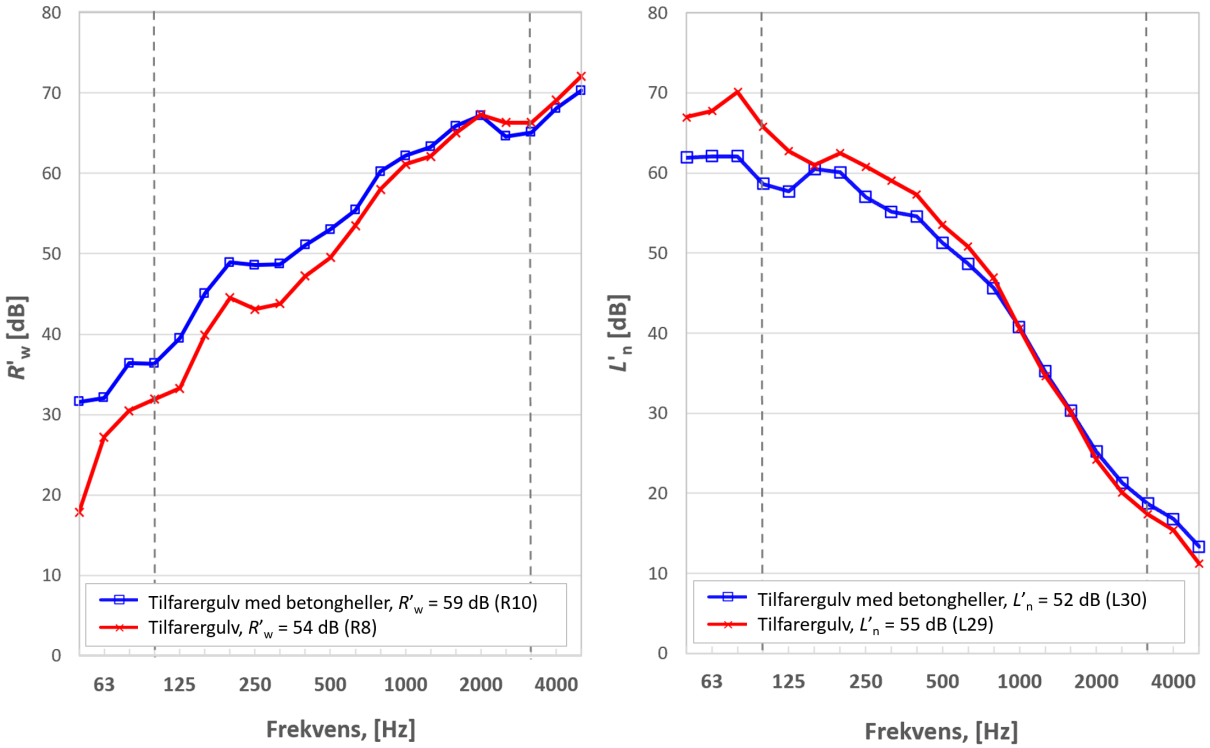
4.4 Målinger med lette overgulv med og uten tilført vekt

Luftlydisolering og trinnlydnivå ble målt vertikalt med og uten tilført vekt i form av betongheller på etasjeskiller. Alle målinger ble utført uten himling under dekker. For å unngå at flankelydoverføring ble dimensjonerende var det montert påforingsvegger både i boks A og boks C.

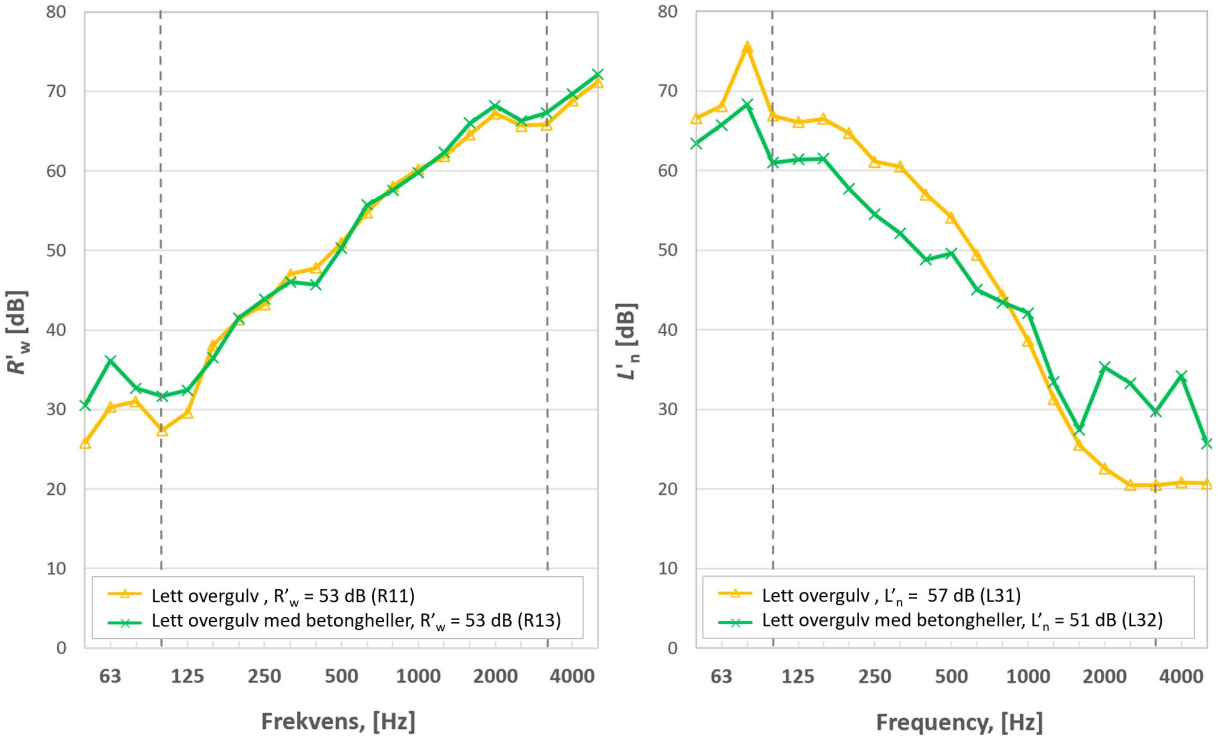
I etasjeskiller med tilfarergulv ble 40 betongheller[3] plassert mellom fakk i hulrommet i gulvet. Effekt av tilført vekt er vist i figur 34. Målingene viser forbedring av lydisoleringen under 800 Hz. Måleresultater for luftlydisolering gikk fra R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)= 54 (-3) dB (R8) til R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)= 59 (-2) dB (R10) med tilført vekt. For trinnlyd var resultatet $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)= 55 (5) dB (L29) før tilført vekt, og $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 52 (3) dB (L30) etter tilført vekt.

På etasjeskiller med 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydmatte ble de 24 betonghellene av praktiske hensyn plassert løst på toppen av sponplatene. Måleresultater er vist i Figur 35. Endring i målt luftlydisolering er minimal, mens målt trinnlydnivå går fra L'_n ($C_{I,50\text{-}2500}$)= 57 (6) dB (L31) til L'_n ($C_{I,50\text{-}2500}$)= = 51 (7) dB (L32). Forbedring i trinnlydnivå vises for frekvenser under 800 Hz.

[3] Tilsvarer en flatevekt på ca. 58 kg/m²



Figur 34- Vertikal luftlydisolering (t.v.) og trinnlydnivå (t.h.) på etasjeskiller med tilfarergulv, med og uten ekstra vekt i form av betongheller inne i hulrommet.



Figur 35- Vertikal luftlydisolering (t.v.) og trinnlydnivå (t.h.) på etasjeskiller med lett overgulv, med og uten ekstra vekt i form av betongheller på toppen av overgulv.

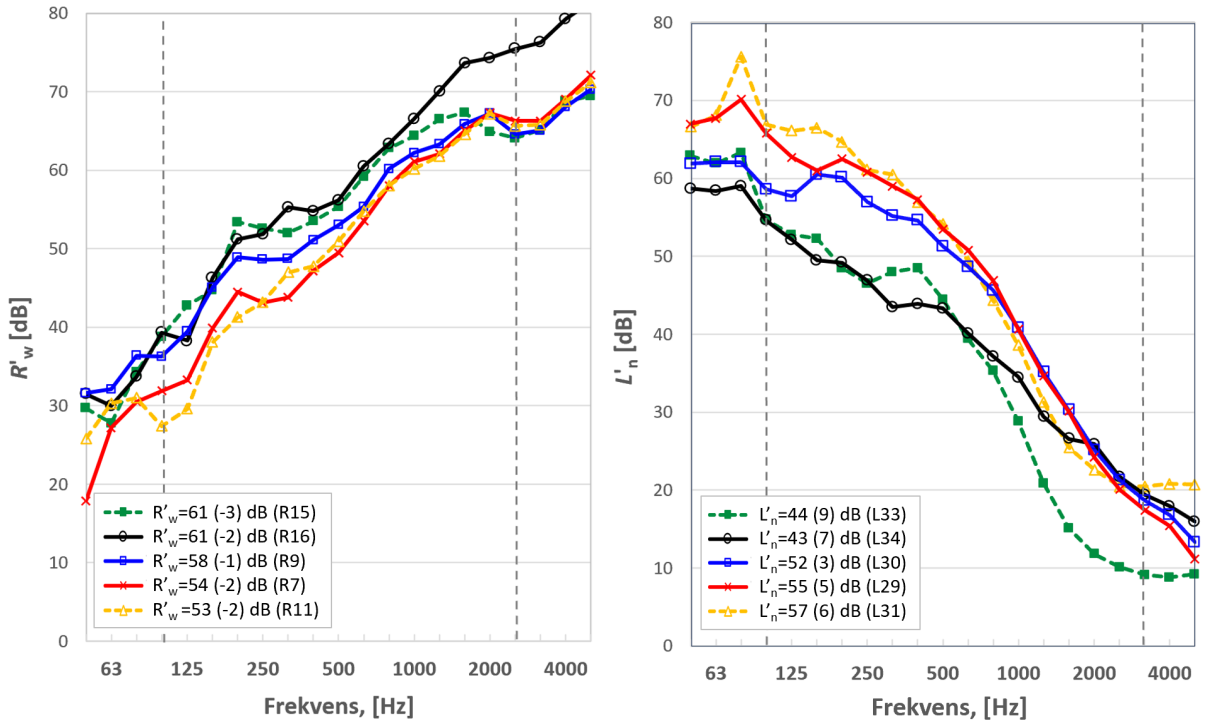
4.5 Målinger på ulike flytende gulv uten himling

Vertikale målinger av luftlydisolasjon og trinnlydnivå for ulike flytende gulv som er aktuelle i leilighetsbygg er vist i figur 36. Målingene er utført uten lydisolerende himling under etasjeskiller, men med påforingsvegger i mottakerrom for å redusere flankelydoverføring. Konstruksjonoppbygging og testresultater er listet i kapittel 9.

Vekt tilført direkte på KLT-easjeskiller i form av pukk (R15/L33 og R16/L34) ga vesentlig forbedring over hele frekvensområdet. Resultatene indikerer også at type flytende gulv ikke har vesentlig betydning når det legges vekt direkte på etasjeskiller, da målinger med overgulv av trinnlydplate av mineralull og 2x22 mm spon (grønn stiplet linje R'_w ($C_{50\text{-}5000}$) =52 (3) / $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) =44 (9)) gir sammenliknbare resultater med tungt flytende overgulv (sort stiplet linje).

Måling med 2x22 mm sponplate, 40 mm mineralull trinnlydmatte og 100 mm pukk ga en luftlydisolering R'_w ($C_{50\text{-}5000}$) =61 (-3), og trinnlydnivå $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) =44(9). Til sammenlikning ga 70 mm betong på 40 mm mineralull trinnlydmatte og 100 mm pukk en luftlydisolering R'_w ($C_{50\text{-}5000}$) =61 (-2), og trinnlydnivå $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) =43(7).

Resultater med pukk direkte på KLT-etasjeskiller (grønn stiplet og sort linje), og måling på tilfaregulv med tilført vekt i form av betongheller[4] (blå linje), er innenfor forskriftskrav til luftlydisolering iht. Byggeforskriften, NS 8175:2012 og 2019. Målinger med pukk tilfredsstiller krav i NS 8175:2012/2019, mens målinger med tilfaregulv tilfredsstiller NS 8175:2012, men overholder ikke kriterium om lavfrekvent korreksjonsledd gitt i NS 8175:2019.



Figur 36- Vertikal luftlydisolering (t.v.) og trinnlydnivå (t.h.) på etasjeskiller med ulike overgulv og uten himling.

[4] Flatevekt av betongheller tilsvarte ca. 60 kg/m²

4.6 Ulik eksponering av tre i bærekonstruksjon

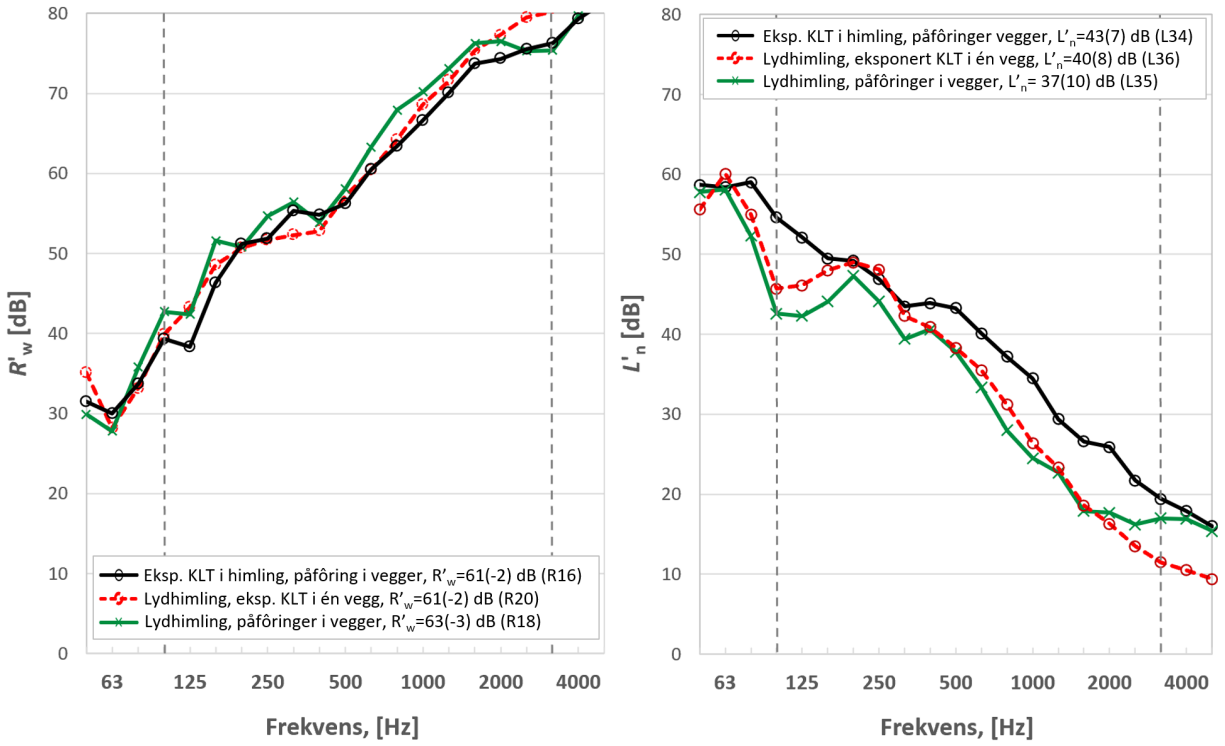
Resultater fra vertikale målinger på etasjeskiller med pukk og tungt flytende gulv ble utført for se på effekten av ulik grad av synlig tre for vegg- og takelementer er vist i figur 15a). Alle målinger omtalt i dette delkapitlet er utført med elastiske lagre under veggskiver og vibrasjonsisolerte vinkler som innfesting mellom etasjeskiller og veggelementer i øvre boks. Testresultater og konstruksjonoppbygging er listet i kapittel 9.

Testene viser at trekonstruksjonen kan være eksponert over og under etasjeskiller, og samtidig overholde minstekrav til lydisolering i leilighetsbygg NS 8175:2012 og NS 8175:2019. Målinger med eksponert KLT i himling og påforinger på alle vegger resulterte i luftlydisolering R'_w ($C_{50\text{-}5000}$) = 61(-2) dB (R16), og trinnlydnivå $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 43(7) dB (L34), se sorte linjer i figur 37.

Trinnlydnivå ble forbedret med 6 dB, $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) =37(10) dB (L35) med etablering av lydisolerende himling med to lag gips elastisk montert mot etasjeskiller og 100 mm isolert hulrom i nederste boks (rød stiplet linje). Luftlydisoleringen ble forbedret med 2 dB til R'_w ($C_{50\text{-}5000}$) = 63 (-3) dB (R18). Merk forbedringen ved 80-200 Hz for trinnlyd og luftlyd med innføring av den lydisolerende himlingen, som er viktig for subjektiv opplevelse av lydisoleringen. Økes nedforing eller vekt i himlingen kan det forventes virkning også lengre ned i frekvens.

Måleresultatene viser at luftlydisoleringen ble redusert med 2 dB dersom treverk eksponeres i én veggside på begge sider av etasjeskiller, eller med eksponert himling i mottakerrom, sammenliknet med tildekket massivtrekonstruksjon.

Alle tre konstruksjoner, inkludert variantene med eksponert tre, tilfredsstiller grenseverdier for luftlydisolering og trinnlydnivå mellom boliger gitt i NS 8175: 2012/2019 klasse C, inkludert C-korreksjon for lavfrekvent lydisolering.



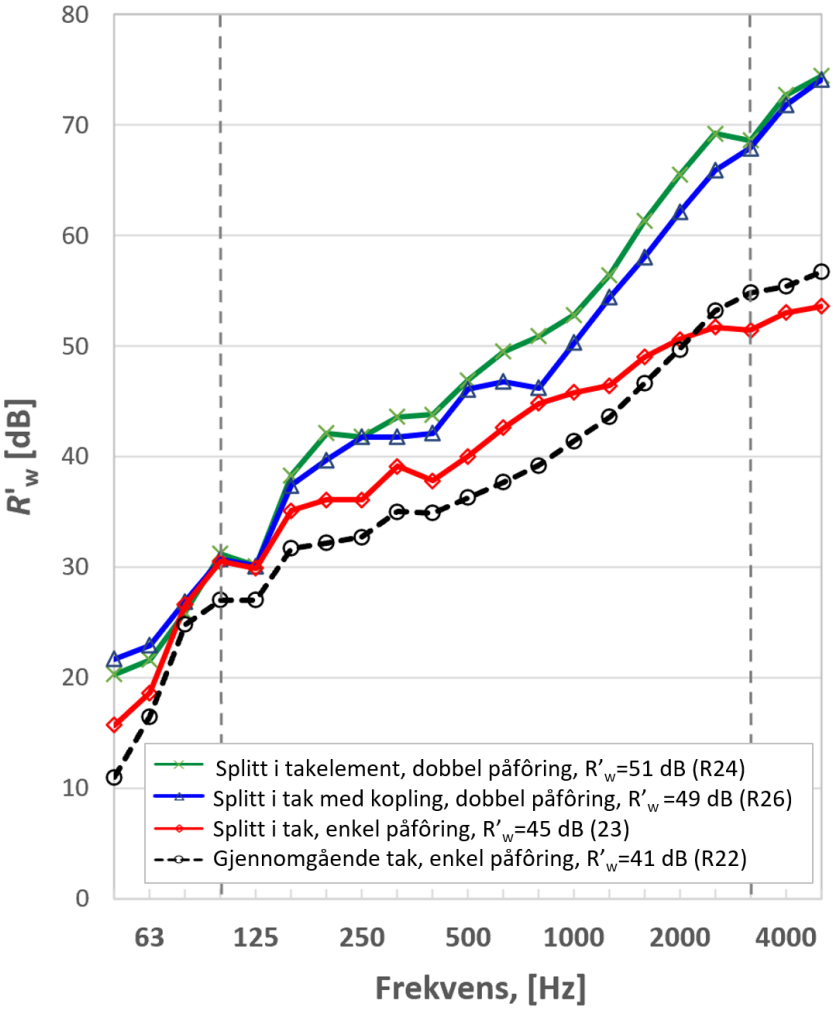
Figur 37 – Vertikal luftlydisolering (venstre) og trinnlydnivå (høyre) for etasjeskiller med tungt flytende gulv. Målingene viser effekten av ulik grad av synlig tre i vegg- og takelementer.

4.7 Horisontal lydisolering med og uten lydsplitt i KLT-element

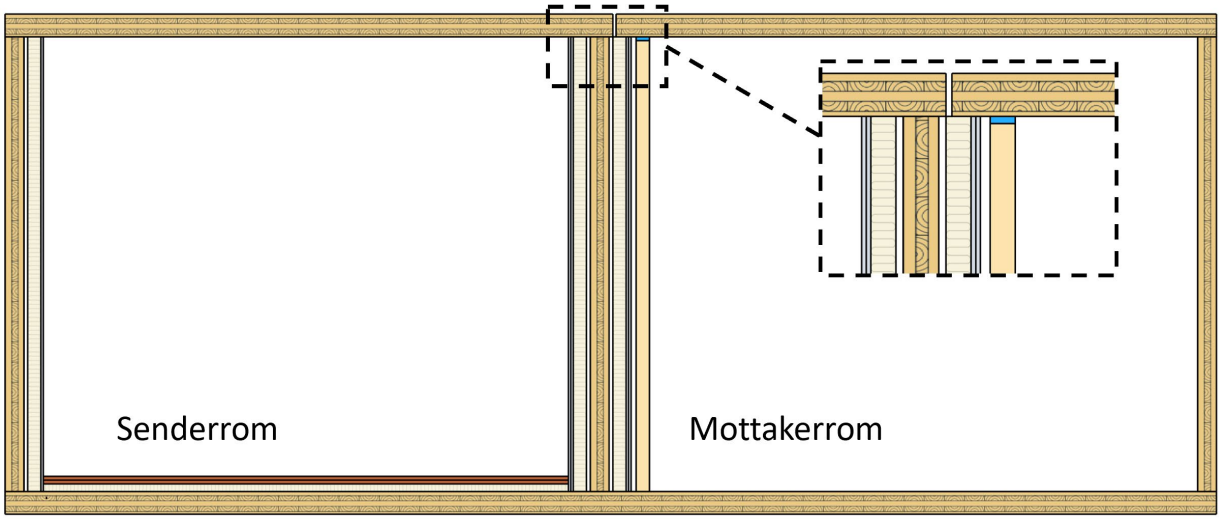
Horisontal luftlydisolering med og uten lydsplitt i vegg- og takelement er vist i figur 38. Målinger med heltrukne linjer representerer målinger med lydsplitt mellom rommene, mens stiplet linje viser lydisolering med gjennomgående vegg- og takelementer.

Etablering av lydsplitt i takelementet førte alene til en forbedring på 4 dB fra R'_w = 41 dB (svart, stiplet linje) til R'_w = 45 dB (rød linje). Det ble imidlertid tydelig at dominerende lydvei var gjennom eksponert takelement på sendersiden til KLT-veggen som var synlig i mottakerrommet. Ved å etablere påføring også i mottakerrommet, som vist i figur 39, ble lydisoleringen forbedret ytterligere 6 dB, til R'_w = 51 dB (grønn linje).

Ved å tilføre tre punktinnfestinger i form av stålplater på tvers av lydsplitten i takelementet ble lydisolasjonen redusert med 2 dB, som vist med blå linje. Det ble benyttet tre stålplater som innfesting, hver med 10 skruer totalt hvorav 6 diagonale. Det ble festet 5 skruer inn i hvert element på tvers av lydsplitten.



Figur 38 – Målt luftlydisolering horisontalt. Heltrukne linjer viser resultater med full lydsplitt i vegg- og takelementer. Grønn og blå linje viser målinger med påforingsvegg på i både mottakerrom og senderrom, mens rød linje viser resultat med påføring kun i senderrom.



Figur 39 – Skjematisk snitt av testrom for horisontal lydisolering. Lydsplitt og limtrestøyler er fremhevet i utsnittet

4.8 Oppsummering resultater for luftlydisolering og trinnlydnivå

- Valg av innfesting i knutepunkt påvirker strukturell lydoverføring, trinnlydnivå og luftlydisolasjon.
- Krav til lydisolering i bolig ble tilfredsstilt for vertikal måling med lett tilfarergulv og betongheller lagt i fakk mellom tilfarere, og eksponert KLT i etasjeskiller. Dette viser at lydkrav i bolig kan ivaretas med lett overgulv og eksponert KLT i etasjeskiller, men merk at marginene til grenseverdien, særlig for trinnlyd, er lav.
- Det ble målt vesentlig forbedring i flankelydisolasjon mellom vertikale rom i testriggen med tilført vekt på etasjeskiller og montering av vibrasjonsisolerte vinkler. Tilført vekt antas å være dimensjonerende for måleresultatene.
- Krav til lydisolering mellom etasjer i boliger kan tilfredsstilles med delvis eksponert tre i vegger og himling på begges sider av etasjeskiller. Målinger ble utført på etasjeskiller med pukk og tungt flytende gulv. Veggskiver var satt på elastiske lagre med vibrasjonsisolert innfesting mellom etasjeskiller og vegg. Grenseverdi som inkluderer korreksjonsledd for lavfrekvent lyd ble også innfridd i disse målingene.
- Flere av målingene viser at tilført vekt i etasjeskiller (med pukk, betongheller o.l.) gir fleksibilitet mhp. bruk av (lett) overgulv, eksponert tre og valgfrihet mhp. type innfesting.

5 Erfaringer fra boligprosjekter, feltmålt vertikalt trinnlydnivå

Eksempler på feltmålt trinnlydnivå med ulike konstruksjonsløsninger i individuelle bygninger er vist nedenfor. Måling av trinnlydnivå vertikalt er fokusert på fordi vi erfarer at dette kan være spesielt krevende å innfri med lette etasjeskillere, og svak ytelse kan gi opphav til klager. Det er forsøkt å finne ut av om målingene i testriggen underbygger feltmålingene eller ikke.

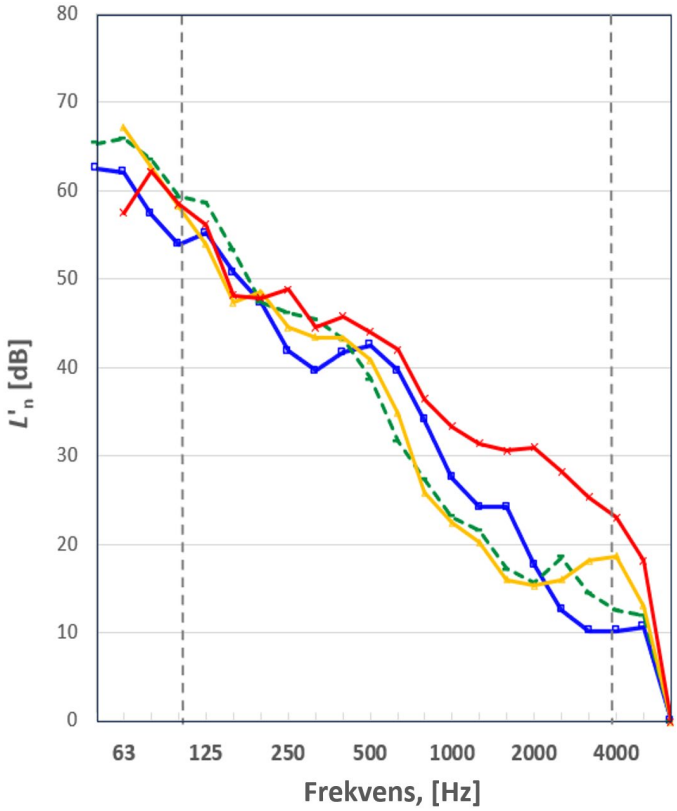
Det er hentet data fra boliger, omsorgsboliger og studentboliger da disse har liknende grenseverdier, se kapittel 0. Grenseverdi for trinnlydnivå i boliger iht. NS 8175:2012 klasse C er $L'_{n,w} \leq 53$ dB, og anbefalt krav som hensyntar lavfrekvent lyd er $L'_{n,w} + C_{50\text{-}2500} \leq 53$ dB.

Generelt gjelder at det måles stor variasjon i resultater på sammenliknbare prosjekter med samme løsninger. Δ5 dB er ikke uvanlig, i noen tilfeller opptil 10 dB. Dette antas å skyldes variasjoner i bæresystem, planløsninger, løsninger i knutepunkt og utførelse. Særlig gunstige målinger (f.eks. som følge av spesielt gunstige måleforhold, og målinger med tydelig feil i utførelse, er ikke tatt med.

5.1 Etasjeskiller i KLT med pukk/betong og lydisolerende himling

Målinger av trinnlyd vertikalt mellom boliger med pukk/betong på KLT etasjeskiller, tungt flytende gulv og lydisolerende himling er vist i figur 40. Resultatene er gode og ligger i området $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 40(14) - 45(11) dB. Målingene L(35) og L(36) fra testriggen vist i figur 37 er utført på tilsvarende konstruksjonsløsning som feltmålinger i figur 40, og viser samsvarende kurveform og resultater. Målinger utført i testriggen viser bedre ytelse ved lave frekvenser <200 Hz enn målinger utført i felt.

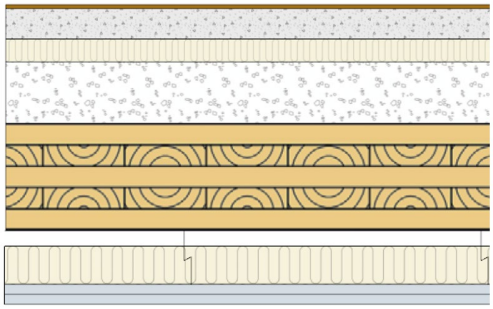
Alle målingene innfrir grenseverdi for trinnlyd i boliger, og alle utenom én klarer også grenseverdi med lavfrekvent korreksjonsledd (C-korreksjon). Trinnlydnivå er stigende under 100 Hz, slik at beboere kan reagere på lavfrekvent trinnlyd da frekvenser under 100 Hz ikke er hensyntatt i dagens forskrift.



Resultat: $L'_{n,w}$ ($C_{50\text{-}2500}$) = 40 (14) - 45(11) dB

Konstruksjon:

Parkett på parkettunderlag
40-70 mm avretting/påstøp
30-40 mm mineralull trinnlydmatte
90-100 mm pukk/betong
160-200 mm KLT
Ca. 100 mm isolert hulrom
2x13 mm gips elastisk innfestet eller frittbærende



Figur 40 – Målt trinnlydnivå vertikalt med KLT etasjeskiller med tungt flytende gulv og lydisolerende himling. Linjene viser feltmålte trinnlydnivåer fra individuelle bygninger.

5.2 Etasjeskiller i KLT med pukk/betong og eksponert tre i himling

Nedenfor er det vist eksempler på feltmålinger av trinnlyd vertikalt på etasjeskiller i boliger med pukk/betong på KLT etasjeskiller, tungt flytende gulv og eksponert tre i himling. Resultatene er i området $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 48(6) - 58(-1) dB. Tre av målingene innfrir grenseverdi i boliger, én oppfyller også anbefalt grenseverdi inkludert lavfrekvent korreksjonsledd (C-korreksjon) iht. NS 8175:2019.

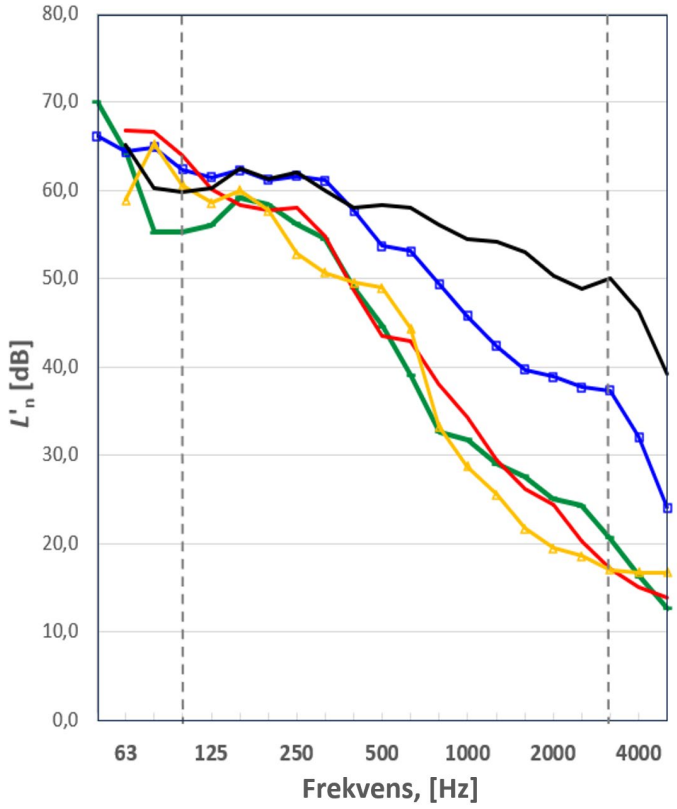
Målingene viser større variasjon enn målinger med lydisolerende himling da etasjeskillere med eksponert tre er mer sårbar for variasjoner og byggefeil. Ved å sammenlikne med målinger med lydisolerende himling i figur 40 ser vi at gipshimlingen gir en effektiv demping av trinnlyd, spesielt fra 100 Hz og oppover. Gipshimling gir også en viss buffer mot feil og lekkasjer.

Det er tilsynelatende ikke sammenheng mellom tyngde på overgulv og måleresultater, dvs. at de aller tyngste løsningene ikke nødvendigvis gir best resultat, som indikerer at det er andre forhold som dominerer. Dempesjikt i overgulv som parkettunderlag og gulvbelegg vil ha betydning for trinnlydnivå.

Måling med høyest trinnlydnivå ved høye frekvenser antas å skyldes kortslutning mellom gulv og bærekonstruksjon som gir høye nivåer av høyfrekvent trinnlyd. Slike feil i utførelse reduserer lydisoleringen og er vanskelig å rette opp i ettertid.

I én av målingene (blå linje) er det benyttet elastiske spesialvinkler tilsvarende det som er omtalt i kapittel 3, men effekten av dette ser ikke ut til å påvirke måledataene nevneverdig.

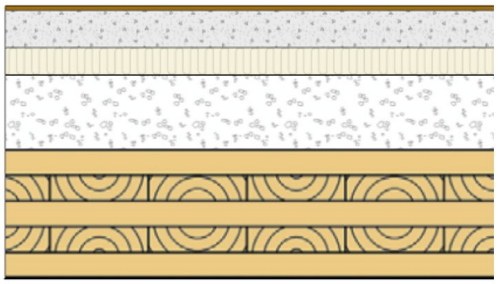
Måling på tilsvarende konstruksjon utført på testrigg, (L34) vist i figur 37, viser lavere trinnlydnivåer (dvs. bedre ytelse) ved lave frekvenser og i mellomfrekvensområdet enn feltmålinger vist i figur 41. Feltmålinger kan i større grad være preger at av flankelyd enn målinger i testriggen.



Resultat: $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 48(6) - 58(-1) dB

Konstruksjon:

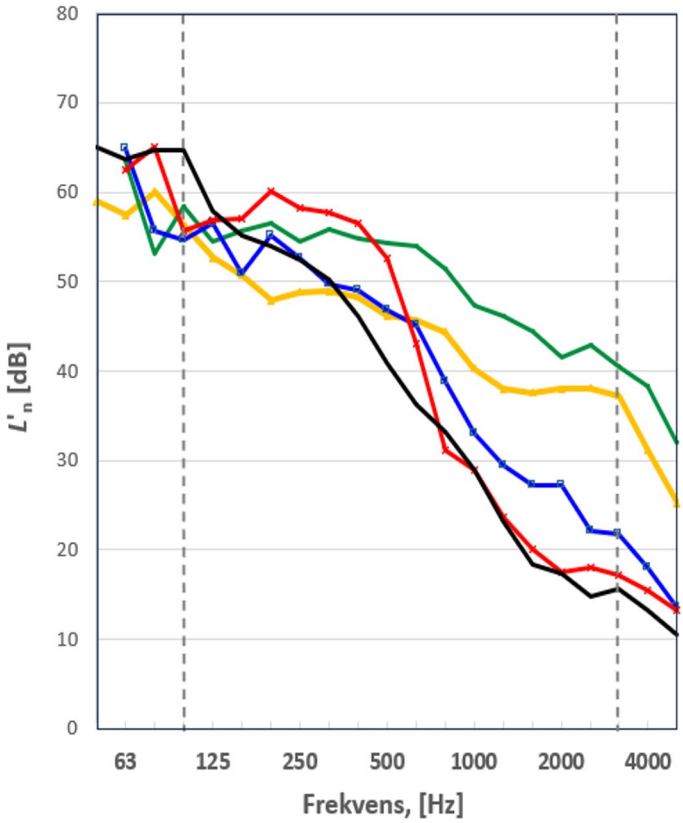
Parkett/gulvbelegg
40-70 mm avretting
30-50 mm trinnlydmatte av mineralull
80-100 mm pukk/betong
180-200 mm KLT



Figur 41 – Målt trinnlydnivå vertikalt med KLT etasjeskiller med tungt flytende gulv og eksponert tre i himling. Linjene viser feltmålte trinnlydnivåer fra individuelle bygninger.

5.3 Etasjeskiller i KLT med tungt flytende gulv og lydisolerende himling

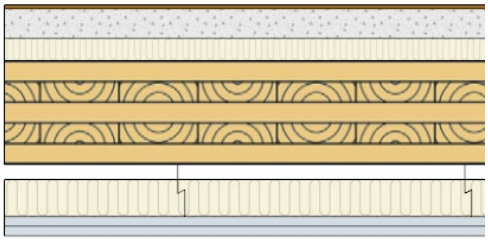
Nedenfor er det vist eksempler på målinger av trinnlyd vertikalt på etasjeskiller i boliger med tungt flytende gulv og lydisolerende himling. Resultatene er i området $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 46(4) - 51(4) dB. Alle målingene tilfredsstiller grenseverdier iht. TEK, tre av målingene klarer også anbefalt grenseverdi inkludert lavfrekvent korreksjonsledd.



Resultat: $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 46(4) -51(4) dB

Konstruksjon:

Parkett/gulvbelegg
70-80 mm påstøp/avretting
30-50 mm trinnlydmatte av mineralull
120-180 mm KLT
100-200 mm isolert hulrom
2x13 mm gips i lydisolerende himling

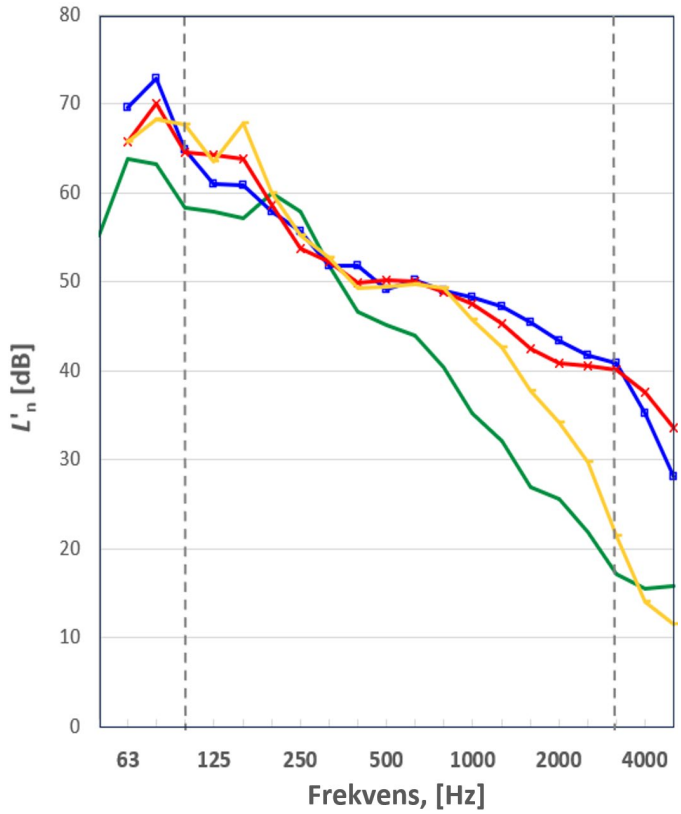


Figur 42 – Målt trinnlydnivå vertikalt med tungt flytende gulv og lydisolerende himling. Linjene viser feltmålte trinnlydnivåer fra individuelle bygninger.

5.4 Etasjeskiller i KLT typisk for studentboliger med lydisolerende himling

Nedenfor er det vist eksempler på målinger av trinnlyd vertikalt på etasjeskiller i KLT, trinnlydmatte og tungt flytende gulv, samt lydisolerende himling med ett gipslag. Resultater viser at trinnlydnivå i området $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 50(4) - 53(6) dB. En av målingene (grønn linje) har overgulv med 2x13 mm gips og 22 mm spon i stedet for avretting. Måleresultat for denne er $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 50 (4) dB. Dette viser at lett overgulv kan være et alternativ til avrettingsmasse også i en bolig.

Studenthybler bygges gjerne med slankere elementer av KLT, mindre avretting i overgulv og ett gipslag i lydhimling. Resultatene innfrir grenseverdier i boliger, men ikke anbefalt grenseverdi inkludert lavfrekvent korreksjonsledd. Til sammenlikning med konstruksjonsløsninger typisk for bolig med to gipslag i lydhimlingen og tyngre overgulv, er trinnlydnivået noe høyere, særlig ved lave frekvenser.



Resultat: $L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 50(4) - 53(6) dB

Konstruksjon:

Parkett/gulvbelegg

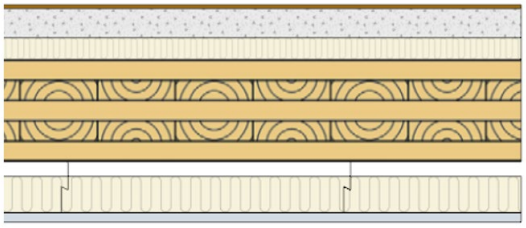
40 mm avretting eller 3 platelag (2x13 mm gips + 22 mm spon)

20-50 mm trinnlydmatte av mineralull

140-180 mm KLT

ca. 100 mm isolert hulrom

1x13 mm gips i lydisolerende himling



Figur 43 – Målt trinnlydnivå vertikalt med etasjeskiller typisk for studentbolig. Linjene viser feltmålte trinnlydnivåer fra individuelle bygninger.

6 Konklusjoner og hovedfunn

Det er utført omfattende arbeid med målinger og analyse i prosjektet. Det er også sett på relevante feltmålinger av vertikalt trinnlydnivå i boliger. Hovedfunn er oppsummert i delkapitlene nedenfor.

6.1 Lydisolering i boliger

Studien viser at lydkrav for boliger og andre bygninger med høye lydkrav kan oppfylles med bærekonstruksjon i massivtre. Dette underbygges både av selve studien og erfaringer fra feltmålinger i bygninger med bærekonstruksjon i massivtre. Rapporten peker på flere mulige konstruksjoner som klarer lydkravene, både med lette og tyngre tilleggskonstruksjoner.

Det er viktig å understreke at høyere lydkrav krever mer omfattende løsninger enn bygninger med lave til moderate lydkrav, men at omfanget tiltak utover hovedkonstruksjonene kan begrenses ved korrekt prosjektering og utførelse.

Studien angir noen forhold som man må være oppmerksom på i prosjektering og utførelse. For eksempel vil eksponert tre i etasjeskiller innebære tilført vekt og/eller etablering av lydsplitter. Disse løsningene setter særskilte premisser for bæresystemet og krever tidlig koordinering mellom bygningsingeniør og akustiker. Løsninger med mye eksponert tre er mer sårbare for variasjon og byggefeil, for eksempel kortslutning mellom overgulv og bærende konstruksjoner eller vegger.

6.2 Knutepunktdemping

Målingene viser at innfestingsmetode og -produkt i knutepunkter har betydning for strukturell flankelydoverføring mellom etasjer og rom i en bygning. Resultatene indikerer at skrueinnfesting i knutepunkter langt på vei eliminerer effekten av elastiske lagre som benyttes til å redusere flankelydoverføring. Dette antas å skyldes at innfestingen ødelegger lagrenes effekt og reduserer vibrasjonsdempingen, i tillegg til at skruene i seg selv overfører lydenergi. Bruk av vinkelinnfesting reduserte også effekten av de elastiske lagrene betydelig, mens vibrasjonsisolerte spesialvinkler viser bedre resultater. Dette er interessant da elastiske lagre, skrue- og vinkelinnfesting ofte benyttes i prosjekter med KLT.

Tester av knutepunktdemping i horisontal retning på tvers av en lydsplitt viste at punktinnfesting på tvers av splitten ga vesentlig høyere dempeverdier enn linjeinnfesting. Færre innfestinger gir økt demping.

Måleresultatene fra testriggen indikerer at type innfesting kan ha større betydning enn hvilken type elastisk lager som benyttes. Betydningen av elastiske lagre og type innfesting forventes å være størst i bygninger med høye lydkrav (som boliger) i kombinasjon med lette konstruksjoner og høy grad av eksponert tre.

Riktig dimensjonering av elastiske lagre og løsninger for innfesting kan spare prosjektene for både tid, kostnader, og klimagassutslipp.

6.3 Betydning av tilført vekt

Målinger på etasjeskillere med tilført vekt i form av pukk, betongheller eller tungt flytende gulv viser økt ytelse både ved redusert flankelydoverføring, økt luftlydisolering og lavere trinnlydnivå. Tilført tyngde øker både knutepunktdempingen og lydisoleringen i selve etasjeskilleren.

Tilført vekt på KLT- etasjeskiller medfører større fleksibilitet med hensyn på valg av type overgulv, og legger til rette for at større deler av trekonstruksjonen kan eksponeres. Dette begrunnes blant annet ved at lette flytende gulv presterer tilsvarende som tunge flytende gulv på KLT etasjeskiller tilført sjikt med pukk.

Tilført vekt til etasjeskiller antas å ha større betydning enn valg av festemidler. Dette begrunnes med betydelig målt knutepunktdemping i testriggen med tilført vekt på etasjeskiller, og at feltmålinger av trinnlyd hvor det ble ble benyttet spesialvinkler ikke viser forbedret lydisolering med tilført vekt på etasjeskiller.

6.4 Lette overgulv

Måling med lett overgulv av tilfarere på dempeklosser og eksponert tre i himling innfridde grenseverdien for boliger med betongheller plassert mellom tilfarere. Lette overgulv benyttes i liten grad i Norge i dag, men bør undersøkes videre da målinger på lette overgulv viser lovende resultater.

Merk at i boliger med lette overgulv på KLT etasjeskiller må flankelydoverføring håndteres med lydsplitter eller med himling.

6.5 Sammenlikning med feltmålt trinnlyd

Feltmålinger viser sammenliknbare verdier for vertikale trinnlydnivåer som målinger på testriggen. Generelt er det målt lavere trinnlydnivå ved lave frekvenser på testriggen. Dette kan ha flere årsaker, knyttet til selve bærekonstruksjonen eller bedre kontroll på flankelydoverføring på testriggen.

6.6 Videre arbeid

Lydkrav i boliger med KLT kan oppnås på flere måter. I dag benyttes ulike bærekonstruksjoner og lydtiltak, og det må søkes å utvikle standardiserte løsninger som gir bedre forutsigbarhet for god og tilstrekkelig måloppnåelse.

Det er viktig med tidlig flerfaglig koordinering, og bæresystemet må legge til rette for nødvendige tiltak. Spesielt gjelder dette ved eksponert tre i etasjeskiller, som setter tydelige premisser for bærekonstruksjonen.

Behov for av elastiske lagre og vibrasjonsisolert innfesting avhenger blant annet av lydkrav, tyngde på etasjeskillere, og i hvilken grad treverket er eksponert. Det kan gjøres supplerende målinger for å ha bedre kontroll og sikkerhet i dimensjoneringen av elastiske lagre og innfestinger.

Lette overgulv f.eks. i form av tilfarergulv på dempeklosser viser lovende resultater for lydisolering, og kan med fordel testes i større omfang videre.

7 Rapporter og publikasjoner

Tidligere publikasjoner tilknyttet prosjektet er ICA 2022 [4], WCTE 2023 [5], og Forum Acusticum 2023 [6]. Resultater er også presentert på Moderne Trekonstruksjoner (Tekna, Treteknisk institutt) 2022 og 2021 og Norsk Akustisk selskap (NAS) 2023.

8 Vedlegg - Oversikt over målinger av knutepunktsdemping

8.1 Vertikal hastighetsendring

Tabell 1 – Oversikt over utførte målinger av hastighetsendring vertikalt. Eksitasjonskilde i form av høyttaler var plassert i boks A. Resultater er midlede hastighetsendring fra akselerometer plassert på to tilliggende vegger hhv. over og under etasjeskiller i testriggen.

Målenr.	Innfesting	Mellomlegg	Skrue-tykkelse	Senter-avstand cc.	Vinkel	D_{vij} gj.snitt 120-1250 Hz
1	Ingen	Ingen				14,2
2	Ingen	Aladdin				-[5]
3	Ingen	Sylomer SR 28				21,3
4	Ingen	Xylofon 35 shore				19,0
5a	Skruer, helgjengede Skruepar festet fra to sider	Sylomer SR 28	8 mm	600 mm		13,0
5b	Skruer, helgjengede Én skrue festet fra utsiden	Sylomer SR 28	8 mm	600 mm		12,7
6	Skruer delgjengede Skruepar	Ingen	6 mm	300 mm		11,5
7	Skruer delgjengede skruepar	Aladdin	8 mm	600 mm		11,2
8	Skruer delgjengede skruepar	Sylomer SR 28	6 mm	300 mm		12,0
9	Skruer delgjengede skruepar	Sylomer SR 28	8 mm	600 mm		13,0
10	Skruer delgjengede skruepar	Xylofon 35 shore	6 mm	300 mm		11,3
11	Skruer delgjengede skruepar	Xylofon 35 shore	8 mm	600 mm		11,6
12a	Vinkelinnfesting Vinkel festet i gulv, så vegg	Sylomer SR 28		1000 mm	GePi-Connect 100	17,8
12b	Vinkelinnfesting Vinkel festet i vegg, så gulv	Sylomer SR 28		1000 mm	GePi-Connect 100	
13 a	Vinkelinnfesting	Sylomer SR 28		1300 mm	GePi-Connect 240	15,2

[5] Resultat finnes ikke for måleretning rapportert i denne rapporten

Målenr.	Innfesting	Mellomlegg	Skrue-tykkelse	Senter-avstand cc.	Vinkel	D_{vij} gj.snitt 120-1250 Hz
13 b	Vinkelinnfesting	Sylomer SR 28		1300 mm	GePi-Connect 240 Tungt overgulv	28,6
14	Vinkelinnfesting	Xylofon 35 shore		1000 mm	Titan TTS240	11,6
15	Vinkelinnfesting	Xylofon 35 shore		1000 mm	Titan Silent på XYL35	12,9
16	Vinkelinnfesting	Xylofon 35 shore		1000 mm	Titan Silent modifisert[6]	13,9
17	Punktopplagring på kryssfinerklosser	Ingen	6 mm	1000 mm		14,7

8.2 Horisontal hastighetsendring

Tabell 2 – Oversikt over utførte målinger av hastighetsendring horisontalt. Eksitasjonskilde i form av høyttaler var plassert i boks A. Resultater er midlede hastighetsendring fra akselerometer plassert på etasjeskiller/tak over de tilliggende rommene i 1. etasje.

Målenr.	Lyd-splitt	Innfesting	Skrue-tykkelse	Senter-avstand cc.	Tilført vekt	Kommentar	D_{vij} gj.snitt 120-1250 Hz
18	Nei	-					5,5
19	Ja	Ingen					24,7
20	Ja	Skjøtebord av kryssfiner	8 mm			120 skruer totalt cc. 100 mm	10,7
21	Ja	Hullplate	8 mm	1300 mm		Titan vinkel	18,7
22	Ja	Hullplate på elastisk lager	8 mm	1300 mm		Titan silent	19,1
23	Ja	Hullplate på elastisk lager	8 mm	1300 mm	36 betongheller plasser på hver side av lydsplitt	Titan silent	21,5
24	Ja	Hullplate på elastisk lager	8 mm	1300 mm	36 betongheller jevnt fordelt på hele taket	Titan silent	21,9
25	Ja	Stålplate med diagonale skruer	8 mm	1300 mm	36 betongheller jevnt fordelt på hele taket	Gepi 240	17,6
26	Ja	Stålplate med diagonale skruer	8 mm	1300 mm		Gepi 240	15,3

[6] Titan Silent vinkel ble modifisert med et ekstra innvendig elastisk lager for å vibrasjonsisolere KLT-elementene.

Målenr.	Lyd-splitt	Innfesting	Skrue-tykkelse	Senter-avstand cc.	Tilført vekt	Kommentar	D_{vij} gj.snitt 120-1250 Hz
27	Ja	Stålplate med diagonale skruer	8 mm	2000 mm		Gepi 240	19,9
28	Ja	Krysskrue-innfesting	8 mm	500 mm			11,1
29	Ja	Krysskrue-innfesting	8 mm	500 mm	36 betongheller plasser på hver side av lydsplitt		14,6
30	Ja	Krysskrue-innfesting	8 mm	500 mm	36 betongheller jevnt fordelt på hele taket		14,2
31	Ja	Krysskrue-innfesting	6 mm	300 mm	36 betongheller jevnt fordelt på hele taket		12,7
32	Ja	Krysskrue-innfesting	6 mm	300 mm			9,5
33	Ja	Krysskrue-innfesting	6 mm	600 mm			12,8
34	Ja	Ingen				Som nr. 19	23,4

9 Vedlegg A – Oversikt over målinger av luftlydisolasjon og trinnlydnivå

Tabell 3 – Oversikt over målinger av luftlydisolasjon og trinnlydnivå.

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)
R1		A-C	Råkonstruksjon. 160 mm KLT.	Ingen elastisk lager. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.	38 (-1) dB	
	L1	C-A	Råkonstruksjon.160 mm KLT.	Ingen elastisk lager. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		86 (-5) dB
R2	L2	A-B	Råkonstruksjon. 160 mm KLT. Gjennomgående KLT-elementer i gulv og etasjeskiller, 120 mm og 160 mm.	Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm gjennom etasjeskiller/vegger.	31 (-1) dB	83 (-4) dB
	L3	C-B	Råkonstruksjon, 160 mm KLT, diagonal måling.	Diagonalt Ingen elastisk mellomlegg. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		81 (-4) dB
	L4	D-C	Råkonstruksjon. 120 mm KLT.	Ingen elastisk mellomlegg. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		90 (-6) dB
	L5	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Ingen elastisk mellomlegg. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		72 (-2) dB
	L6	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		74 (-2) dB
	L7	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Ingen innfesting.		64 (2) dB
	L8	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med 8 mm delgjengede skruer parvis cc. 600 mm.		73 (-2) dB

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50-5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50-2500}$)
	L9	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med vinkel GePi 100 cc. 1000 mm. Vinkler først montert i etasjeskiller, deretter i vegg.		66 (0) dB
	L10	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med vinkel GePi 100 cc. 1000 mm. Vinkler først montert i vegg, deretter i etasjeskiller.		66 (0) dB
	L11	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Ingen elastisk mellomlegg. Ingen innfesting.		69 (-1) dB
	L12	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Ingen elastisk mellomlegg. Innfesting med 6 mm skruer parvis gjennom kryssfinérklosser cc. 1000 mm.		70 (-1) dB
	L13	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. innfesting med 8 mm delgjengede skruer parvis cc. 600 mm.		72 (-1) dB
	L14	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. 6 mm delgjengede skruer parvis cc. 300 mm.		74 (-2) dB
	L15	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. Innfesting med vinkler TTS240 cc. 1000 mm.		72 (-2) dB
	L16	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. Innfesting med vinkler Titan silent cc. 1000 mm.		70 (-1) dB
	L17	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. Innfesting med vinkler Titan vinkel modifisert med dobbelt elastisk lager, cc. 1000 mm		68 (-1) dB
	L18	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Xylofon lager XYL35. Ingen innfesting.		68 (-1) dB
	L19	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Aladdin lager. Ingen innfesting.		65 (1) dB
	L20	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Aladdin lager. Innfesting med 8 mm delgjengede skruer parvis cc. 600 mm.		72 (-1) dB

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)
	L21	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med vinkel GePi 240 cc. 1300 mm.		67 (-1) dB
	L22	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med 8 mm helgjengede skruer enkeltvis montert diagonalt fra yttervegg cc. 600 mm.		70 (-1) dB
	L23	D-A	Råkonstruksjon. Målt fra tak til 1. etasje.	Sylomer lager SR28. Innfesting med 8 mm helgjengede skruer parvis cc. 600 mm.		72 (-1) dB
R3 R4	L24	C-A A-C	Overgulv: 40 mm avretting på 35 mm trinnlydmatte av mykgjort EPS. Ingen himling. Påføring på veggskiver i boks A.	Ingen elastisk mellomlegg, innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	49 (0) dB[7] 49 (-1) dB[7]	63 (1) dB
R5 R6	L25	C-A A-C	Overgulv: 75 mm avretting på 12 mm gummimatte og 12 mm trinnlydplate av mykgjort EPS. Ingen himling. Påføring på veggskiver i boks A.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 30 mm skruer parvis, cc 300 mm.	49 (0) dB[7] 50 (1) dB[7]	68 (-2) dB
R7 R8	L26	C-A A-C	Overgulv: avretting på Svalehale. Ingen himling. Påføring på veggskiver i boks A.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene, innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	49 (-1) dB[7] 49 (-1) dB[7]	66 (-1) dB
	L27	C-A	Overgulv: Trinnlyddempende gulvbelegg på avretting på Svalehale. Ingen himling. Påføring på veggskiver i boks A.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.		65 (0) dB

[7] Målingen er begrenset av flankelydoverføring i veggskiver.

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)
R6	L28	C-A	Overgulv: 2x22 mm spon på tilfarere med høyde 148 mm på 25 mm sylodynklosser. 100 mm isolasjon i hulrom. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	48 (0) dB[7]	58 (2) dB[7]
R7 R8	L29	C-A A-C	Overgulv: 2x22 mm spon på tilfarere med høyde 148 mm på 25 mm sylodynklosser. 100 mm isolasjon i hulrom. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A og C.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	54 (-2) dB 54 (-3) dB	55 (5) dB
R9 R10	L30	C-A A-C	Overgulv: 2x22 mm spon på tilfarere med høyde 148 mm på 25 mm sylodynklosser. 100 mm isolasjon i hulrom. 40 betongheller i hulrom, storparten av gulvarealet Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A og C.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	58 (-1) dB 59 (-2) dB	52 (3) dB
R11 R12	L31	C-A A-C	Overgulv: 2x22 mm sponplater på 40 mm trinnlydplate i mineralull. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A og C.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	53 (-2) dB 54 (-4) dB	57 (6) dB
R13 R14	L32	C-A A-C	Overgulv: 2x22 mm sponplater på 40 mm trinnlydplate i mineralull. 24 betongheller lagt løst oppå sponplatene. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A og C.	Ingen elastisk mellomlegg mellom etasjene og innfesting med 6 mm skruer parvis, cc. 300 mm.	53 (-1) dB 54 (-1) dB	51 (7) dB

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)
R15	L33	C-A	Overgulv: 2x22 mm sponplater på 40 mm mineralull trinnlydplate over 100 mm pukk. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A.	Sylomer SR 28 mellom etasjene og innfesting med vinkler GePi 240 cc. 1300 mm.	61 (-3) dB	44 (9) dB
R16 R17	L34	C-A A-C	Overgulv: 70 mm betong på 40 mm mineralull trinnlydplate og 100 mm pukk. Ingen himling. Påforing på veggskiver i boks A.	Sylomer SR 28 mellom etasjene og innfesting med vinkler GePi 240 cc. 1300 mm.	61 (-2) dB 57 (-2) dB[8]	43 (7) dB
R18 R19	L35	C-A A-C	Overgulv: 70 mm betong på 40 mm mineralull trinnlydplate og 100 mm pukk. Lydisolerende elastisk montert himling med 2x13 mm gips. Påforing på veggskiver i boks A.	Sylomer SR 28 mellom etasjene og innfesting med vinkler GePi 240 cc. 1300 mm.	63 (-3) dB 63 (-4) dB	37 (10) dB
R20 R21	L36	C-A A-C	Overgulv: 70 mm betong på 40 mm mineralull trinnlydplate og 100 mm pukk. Lydisolerende elastisk montert himling med 2x13 mm gips. Påforing på veggskiver i boks A. Én eksponert vegg på begge sider av lydskillet.	Sylomer SR 28 mellom etasjene og innfesting med vinkler GePi 240 cc 1300 mm.	61 (-2) dB 59 (-3) dB	40 (8) dB
R22	L37	A-B	100 mm KLT Påforing 2x13 mm gips frittstående mot boks A, 100 mm isolert hulrom. Flytende gulv i boks A med 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydplate Gjennomgående eksponert 160 mm KLT takelement	Gjennomgående takelement, ingen lydsplitt	41 (0) dB	57 (7) dB

[8] Målingen kan være preget av støy i mottakerrom

Målenr R'_w	Målenr L'_n	Retning	Beskrivelse av skille konstruksjon og flankeveier	Elastisk mellomlegg og innfesting skillekonstruksjon	R'_w ($C_{50\text{-}5000}$)	$L'_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$)
R23	L38	A-B	100 mm KLT Påforing 2x13 mm gips frittstående mot boks A, 100 mm isolert hulrom. Flytende gulv i boks A med 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydplate Gjennomgående eksponert 160 mm KLT takelement	Full lydsplitt i takelement, ingen innfesting på tvers av lydsplitt	45 (-1) dB	56 (5) dB
R24 R25	L39 L40	A-B B-A	100 mm KLT Påforing 2x13 mm gips frittstående mot boks A og boks B, 100 mm isolert hulrom i påforinger. Flytende gulv i boks A med 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydplate. Eksponert KLT-gulv i boks B. Gjennomgående eksponert 160 mm KLT takelement	Full lydsplitt i takelement, ingen innfesting på tvers av lydsplitt	51 (-2) dB 51 (-2) dB	54 (3) dB 68 (-4) dB
R26		A-B	100 mm KLT Påforing 2x13 mm gips frittstående mot boks A og boks B, 100 mm isolert hulrom i påforinger. Flytende gulv i boks A med 2x22 mm spon på 40 mm trinnlydplate Gjennomgående eksponert 160 mm KLT takelement	Full lydsplitt i takelement, 3 stk. stålplater montert på tvers av lydsplitt.	49 (-1) dB	

10 Vedlegg B – Relevante grenseverdier

Tabellen nedenfor viser preaksepterte grenseverdier for lydkrav i boliger/omsorgsboliger, sykehjem og studentboliger gitt i utgaven fra 2012 og 2019. TEK 17 viser til lydklasse C i 2012-utgaven for preaksepterte grenseverdier for lydforhold, men standarden er tilbaketrukket fra Standard Norge og erstattet med 2019-utgaven.

2019-utgaven kan benyttes i prosjektering. Endringen mellom utgavene mhp. lydisolasjon i boliger er at omgjøringstall for spektrum for luft- og trinnlydisolasjon er inkludert i grenseverdien i 2019-utgaven. Lydisolering ved lave frekvenser kan ha betydning for opplevd kvalitet[9].

Tabell 4 – Grenseverdier NS 8175 utgave 2012 og 2019, lydklasse C.

Lydforhold	Type brukerområde	NS 8175:2012 Klasse C	NS 8175:2019 Klasse C
Luftlyd-isolasjon	Mellom enhet i bolig/omsorgsboliger/studentbolig innbyrdes, og mellom en boenhet og fellesareal/ kommunikasjonsvei*.	$R'_w \geq 55$ dB Anbefalt tilleggskrav: $R'_w + C_{50\text{-}5000} \geq 55$ dB	$R'_w + C_{50\text{-}5000} \geq 54$ dB
	Mellom senge- eller beboerrom i pleieinstitusjon	$R'_w \geq 52$ dB	$R'_w \geq 52$ dB
Trinnlyd	Mellom boenheter I en boenhet fra fellesareal/ kommunikasjonsvei, som fellesgang, svalgang, trapperom, trapp o.l.	$L'_{n,w} \leq 53$ dB Anbefalt tilleggskrav: $L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} + C_{I,50\text{-}2500} \leq 54$ dB
	Mellom senge- eller beboerrom i pleieinstitusjon	$L'_{n,w} \leq 58$ dB	$L'_{n,w} \leq 58$ dB

**Veiledning til TEK17 angir at for studentboliger er det tilstrekkelig at luftlydisolasjon mellom rom for varig opphold i boenhet og fellesareal eller kommunikasjonsvei at lydreduksjonstall R'_w er minimum 45 desibel.*

[9] En større undersøkelse av lydforhold i boliger bestilt av DiBK [ref] viste at frekvenser ned til 50 Hz må inkluderes ved evaluering av lydforhold mellom boenheter, som var grunnlag for 5. revisjon av NS 8175 fra 2019 [ref],

11 Vedlegg C – Målemetode

Målinger av hastighetsdifferanse, $D_{v,ij}$, ble benyttet for å vurdere knutepunktdemping[10]. Hastighetsdifferanse er beskrevet i ISO 10848-1 [3], og gir et mål på hvor mye flankeoverført lyd dempes på tvers av bygningselementer.

ISO 10848-3 angir dimensjoner og forhold mellom elementer i måleoppsettet. På grunn av begrenset høyde i verkstedhallen er høyden i den øverste etasjen i måleriggen noe kortere enn det standarden angir. De to rommene på grunnplanet har samme dimensjoner, det er ikke i henhold til standarden.

Ifølge standarden skal andre flankeveier enn den som måles være undertrykt/eliminert ved målinger av $D_{v,ij}$ og K_{ij}. Dette er ikke tilfelle i testriggen som har mange tett koplede elementer og strukturlyd vil spres i alle retninger. Studien er derfor bedre egnet til å sammenlikne knutepunktdemping for ulike løsninger enn å sammenlikne på tvers av studier.

Hastighetsdifferanse ble målt i to retninger i flere måleoppsett, og er ikke symmetrisk/resiprok med høyttaler som lydkilde. I målerapporten er hastighetsdifferanse i en og samme retning sammenliknet for flere måleoppsett/situasjoner.

Det ble målt strukturell etterklangstid i veggelementene for en del av måleoppsettene. Strukturell etterklangstid i veggelementene er rundt 0,7-1,0 sekund ved 50-80 Hz, og synkende mot høyere frekvenser.

Målte etterklangstider i målerommene varierte over testperioden ut fra testoppsett, men ligger generelt mellom 1,0-3,0 sek. Det ble satt opp lydspredende elementer i form av paller og møbler for å redusere rommoder.

[10] Det ble målt gjennomsnittlig akselerasjonsnivå i sensorposisjoner.

12 Vedlegg D – Referanser

[1] ISO 16283-1: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, 2014.

[2] ISO 16283-1: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 2: Impact sound insulation, 2020.

[3] NS-EN ISO 10848-1: Acoustic – Laboratory and field measurements of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms. Part 1: Frame document, 2017.

[4] E. Toftemo and A. Løvstad, "Sound insulation in cross laminated timber buildings and the effect of junction damping", in *Proc. 24th International Congress on Acoustics*, (Gyeongju, Korea), 2022.

[5] E. Toftemo and A. Løvstad, "Sound insulation in cross laminated timber buildings and the effect of junctions and fasteners", World Conference on Timber Engineering, (Oslo, Norway), 2023.

[6] A. Løvstad and E. Toftemo, «*The effect of junctions and mounting on sound insulation of horizontally adjacent rooms in a CLT building*», (Torino, Italy), 2023