



BUILD RAPPORT

2023:07

Principper for konstruktions- løsninger til etagebolig- byggeri i træ med fokus på lydisolation

Pilotprojekt

Birgit Rasmussen & Jørgen Munch-Andersen

Principper for konstruktionsløsninger til etageboligbyggeri i træ med fokus på lydisolation – Pilotprojekt

Birgit Rasmussen, BUILD, Aalborg Universitet
Jørgen Munch-Andersen, BUILD, Aalborg Universitet

BUILD 2023:07
BUILD Aalborg Universitet, 2023

TITEL	Principper for konstruktionsløsninger til etageboligbyggeri i træ med fokus på lydisolations – Pilotprojekt
SERIETITEL	BUILD Rapport 2023:07
UDGIVELSEÅR	2023
UDGIVET DIGITALT	Juni
FORFATTER	Birgit Rasmussen & Jørgen Munch-Andersen
KVALITETSSIKRING	Ernst Jan de Place Hansen
SPROG	Dansk
SIDETAL	55
LITTERATURHENVISNINGER	53
EMNEORD	Etageboliger, træbyggeri, lydisolations, trinlyd, luftlyd, konstruktionsløsninger, massivtræ, træskeletbyggeri, rumstore træmoduler
ISBN	978-87-563-2101-3
ISSN	2597-3118
TEGNINGER	Fig. 2.1 og 2.2: Ljunggren og Simmons Kap. 5: Oliver Zillo Jensen Kap. 6: Jørgen Munch-Andersen Kap. 7: Camilla Lydersen Øvrige illustrationer er udarbejdet af BUILD.
OMSLAGSFOTO	Arkitekt Michael Delin, Tegnestuen Vandkunsten
UDGIVER	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post build@build.aau.dk www.build.aau.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

Indhold

Forord.....	5
1 Indledning.....	6
2 Træbyggeri – Projektering – Udfordringer	8
3 Dansk etageboligbyggeri / historik: Lydkrav, typiske konstruktioner, lydklasser	12
4 Træbyggeri – Oversigt konstruktionsprincipper i nyt dansk etageboligbyggeri	15
5 Konstruktionstype 1: Massivtræbyggeri	18
6 Konstruktionstype 2: Træskeletelementer	26
7 Konstruktionstype 3: Rumstore træmoduler (præfabrikerede)	32
8 Resumé, konklusioner og projektforslag.....	36
9 Litteratur	38
Appendiks A – Lydklasser for boliger i Norden	42
Appendiks B – ISO-standarder for måling og beregning af lydisolering i bygninger..	44
Appendiks C – Lydisolering for træbyggeri – Erfaringer fra udlandet (eksempler publikationer).....	45
Appendiks D – Måleresultater træskeletbyggeri	46
Appendiks E – Projektets følgegruppe.....	54

Forord

Med baggrund i klimaloven fra 2020 blev der i 2021 udgivet en national strategi for bæredygtigt byggeri med en række indsatsområder og initiativer, herunder fremme af træbyggeri gennem udarbejdelse af generiske konstruktionsløsninger med fokus på lydisolations.

Der blev igangsat et myndighedsprojekt og etableret en følgegruppe med repræsentanter fra byggebranchens parter med formålet at indsamle eksisterende viden og på dette grundlag at etablere en samling af bredt anvendelige konstruktionsløsninger for etageboligbyggeri af træ. Tre mindre grupper blev dannet til håndtering af løsninger for byggeri med henholdsvis massivtræ, træskelelementer og rumstore, præfabrikerede moduler, og der blev også indsamlet viden fra udlandet. Der blev i projektperioden afholdt et antal møder og et seminar med udenlandske foredragsholdere.

Samlet set viste det sig, at løsningsdetaljer og den lydtekniske dokumentation for træbyggeri var utilstrækkelig til en bred anvendelse, især for massivtræbyggeri, hvor det blev klart, at akustisk kvalitetssikring i planlægning og byggeproces er afgørende for ydeevnen i det færdige byggeri. Derfor betragtes projektet som et pilotprojekt, og rapporten indeholder en række principløsninger, som i de kommende år kan danne grundlag for videre lydteknisk udvikling af træbyggeri. Rapportens slutkapitel indeholder en række forslag til projekter, der kan bidrage til øget videnopbygning

Rapporten er udarbejdet af seniorforsker, civilingeniør Birgit Rasmussen og seniorrådgiver, PhD Jørgen Munch-Andersen, begge fra BUILD, Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet København, med input fra følgegruppen, se appendiks E. Oplægget til projektrapport blev i et par omgange udsendt til følgegruppemedlemmerne til kommentering, og i sidste del af processen blev rapporten kommenteret af civ. ing. Claus Møller Petersen, fagchef hos Acoustica, Sweco Danmark A/S.

Projektet er støttet af Social- og Boligstyrelsen (SBST), og BUILD takker SBST og alle, der har været med i projektarbejdet og bidraget med kommentarer.

BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet,
Sektionen for Byggeteknik, Processer & Indeklima
København, maj 2023

Ruut Peuhkuri
Forskningschef

1 Indledning

Projektets baggrund og formål

I juni 2020 vedtog den danske regering en ambitiøs klimalov, som lovfæster et mål om, at Danmark skal reducere sin CO₂-udledning med 70 % i 2030 sammenlignet med 1990. Med klimahandlingsplanen satte regeringen skub på den grønne omstilling af de største sektorer. En rapport med den nationale strategi for bæredygtigt byggeri blev udgivet i april 2021 [1] og udgør regeringens sektorhandlingsplan for bygge- og anlægssektoren, der igennem et forarbejde havde præsenteret en række anbefalinger og forslag til reduktion af CO₂-udledninger.

Den nationale strategi [1] beskriver fem indsatsområder med i alt 21 initiativer. Nærværende rapport vedrører Indsatsområde 2 *Holdbare bygninger af høj kvalitet*, Initiativ 11 *Fremme af klimavenlige byggematerialer*, som består af flere delinitiativer, herunder følgende, som er emnet for denne rapport: *"For træbyggeri kan det være en udfordring at efterleve bygningsreglementets krav til støj og akustik. Derfor defineres generiske konstruktionsløsninger for etagebyggeri med bærende konstruktioner i træ med fokus på støj og akustik."*

Formålet med projektet er, at projekterende, der ikke er specialister i lydisolering kan projektere etageboligbyggeri af træ, og at eksempler og generiske konstruktionsløsninger skal kunne anvendes til at projektere og udføre træbyggeri korrekt med henblik på lydforhold, hvor lydkravene kan overholdes. Som grundlag for en videreudvikling af træbyggeriet kan der eventuelt være løsninger i flere kvalitetsniveauer.

De danske lydisolationskrav findes i BR18 [2] og den tilhørende lydvejledning [3], som med hensyn til lydkrav for boliger henviser til DS 490 [4], lydklasse C. I 2008 blev der på baggrund af erfaringer med let byggeri indført en supplerende anbefaling med anvendelse af lydkrav ned til 50 Hz. I rapporten her kaldes de to niveauer hhv. BR18_{krav} og BR18_{anbef.} Som et højere kvalitetsniveau benyttes [4], lydklasse B.

Projektaktiviteter og forløb

På baggrund af en forventet stor interesse for løsninger til etageboligbyggeri af træ, anses det for vigtigt med en større ekstern inddragelse af interessenter. Der blev i begyndelsen af projektet oprettet en følgegruppe med medlemmer fra rådgivende ingeniører og arkitekter, producenter, entreprenører, bygherrer og institutter. Senere blev der oprettet nogle mindre grupper til at håndtere beskrivelser af løsninger for tre forskellige konstruktionstyper. Der blev i perioden dec. 2021 til marts 2023 afholdt fire møder for den samlede følgegruppe samt en række møder i de mindre grupper.

I juni 2022 blev der afholdt et seminar [5] med fire udenlandske foredragsholdere for at få indblik i erfaringer fra andre lande (Norge, Sverige, Storbritannien og Tyskland).

I diskussionerne både på møder og uden for møder var der mange spørgsmål om de danske lydkrav. I den bredere byggebranche er der hos mange en opfattelse af, at de danske lydkrav er skarpere end lydkravene i andre lande. Denne opfattelse baserer sig formodentligt på, at det har været en uventet overraskelse, at der for træbyggeri har været udfordringer med overholdelse af de danske lydisolationskrav. Igennem 60 år har dansk etageboligbyggeri primært været bygget af betonelementer, og der

er benyttet konstruktionsløsninger, som rigtigt udført giver gode lydforhold med opfyldelse af lydkravene, der inkluderer frekvensområdet 100-3150 Hz.

For træbyggeri (og andet let byggeri) er det imidlertid en udfordring at efterleve bygningsreglementets lydkrav. For at forebygge gener hos beboerne i lette byggerier pga. utilfredsstillende lydforhold findes der tillige supplerende anbefalinger med grænseværdier ned til 50 Hz, idet frekvensområdet ned til 100 Hz er utilstrækkeligt. Anbefalingerne er baseret på danske analyser udført for By- og Boligministeriet (publiceret 1997-1999). I Norge og Sverige er der inden for det seneste årti gennemført store projekter med feltmålinger og undersøgelser af beboertilfredshed i tunge og lette boligbebyggelser. Referencer og nationale lydkrav findes i kap. 2.

Det viste sig i projektførelsen, at der i Danmark er meget få etageboligbyggerier af træ og yderst få målinger tilgængelige. Desuden udtrykte de deltagende lydekspertes i følgegruppen meget klart, at der er store usikkerheder i projektering og også udførelse af træbyggeri.

Derfor blev det et faktum, at hensigten med at udarbejde generiske løsninger ikke lige nu kunne gennemføres i Danmark baseret på danske erfaringer. De samme principielle problemstillinger findes i bl.a. Norge og Sverige, hvor der i begge lande har været udført forskningsprojekter gennem årtier og er opnået erfaringer hos rådgivere og udførende. Men uanset dette er der en klar bevidsthed om, at det er nødvendigt med en detaljeret projektering samt årvågenhed og kontrol i byggeprocessen.

Samlet set viser erfaringerne fra projektet, at der er en bred erkendelse (ikke accept) af, at det fortsat vil være en udfordring at få gode lydforhold i træbyggeri, og at der er brug for videnopbygning, flere undersøgelser og kvalitetssikring i byggeprocessen.

Rapportens indhold og struktur

Rapporten indledes med kapitel 2 om træbyggeri og udfordringerne mht. lydisolation. De danske lydkrav beskrives, og der gives et overblik over lydisolationskravene i udvalgte lande i Europa samt baggrund for den stigende anvendelse af lave frekvenser i krav og anbefalinger. I det følgende kapitel 3 beskrives kort dansk boligbyggeris historie for konstruktioner og lydkrav. I kap. 4 er givet en oversigt over konstruktionsprincipper i nyt dansk etageboligbyggeri af træ og derefter separate kapitler 5-7 med principløsninger for de mest anvendte konstruktionstyper.

I kapitel 8 findes konklusioner og forslag til handlingspunkter. Kapitel 9 indeholder en litteraturliste med referencer samt en liste over websites og databaser.

I appendikser A-D er der supplerende oplysninger om lydklasser i de nordiske lande, en oversigt over ISO-metoder til måling og beregning af lydisolation i bygninger samt en litteraturliste med eksempler på udenlandske publikationer om lydisolation i træbyggeri. Baggrunden for, at appendikserne er med, er de mange diskussioner og spørgsmål i projektførelsen om bl.a. udenlandske lydisolationskrav og erfaringer. I appendiks D findes for træskeletbyggeri måleresultater, som er grundlaget for kap. 6 om træskeletbyggeri. I Appendiks E er vist en oversigt over projektets følgegruppe-medlemmer og de tre konstruktionsgrupper, som har udarbejdet kapitlerne 5-7.

Bemærk: Appendikserne er ikke nødvendige for at læse/forstå hoveddelen af rapporten, men kan være nyttige i diskussioner i kommende projekter om lydisolation i træbyggeri.

2 Træbyggeri – Projektering – Udfordringer

Etageboligbyggeri af træ er relativt nyt i Danmark. Først i 1999 blev bygningsreglementets brandkrav ændret (tillæg 1 til BR 1995), så det blev muligt at bygge i 4 etager uden behov for dispensation. Derfor har vi – sammenlignet med en række andre lande, bl.a. Sverige, Norge, Tyskland – kun begrænsede erfaringer, og overholdelse af lydkravene kan opleves som en væsentlig barriere for styrkelse af træbyggeriet [1].

Lydisolationskrav og anbefalinger i Bygningsreglement 2018

Bygningsreglementets grænseværdier for luftlydisolation og trinlydniveau mellem boliger, se [2] og [3], refererer til feltmålinger udført efter hhv. DS/EN ISO 16283-1 [6] og DS/EN ISO 16283-2 [7] og vurderinger efter DS/EN ISO 717-1 [8] og DS/EN ISO 717-2 [9]. En oversigt over ISO 717 lydisolationsbegreber findes i Appendiks A.

Lydisolationsbegreberne for luftlyd og trinlyd er foklaret i [3]. I Danmark er lydisolationskravene mellem etageboliger defineret i DS 490 [4], lydklasse C:

$R'_w \geq 55$ dB og $L'_{n,w} \leq 53$ dB, som begge har været gældende siden 2008.

Der har samtidigt siden 2008 været supplerende anbefalinger for lette konstruktioner, se BR18 lydvejledning [3]. Uddrag herfra er gengivet Tabel 2.1. Anbefalingerne er baseret på undersøgelserne beskrevet i [10], [11] og [12]. Konklusionerne er beskrevet i [12], hvoraf det fremgår, at vægtgrænserne er kompromiser baseret på forskellige overvejelser og forventede anvendelser. Det skal derfor pointeres, at anbefalingerne også kan være væsentlige ved lette konstruktioner med højere fladevægte end angivet.

Tabel 2.1. Anbefalinger for lydisolation af lette konstruktioner i lejlighedsskel. Uddrag fra BR18 lydvejledning [3].

a) for lette ¹⁾ konstruktioner i lejlighedsskel: Luftlydisolation, $R'_w + C_{50-3150} \geq 53$ dB
b) for lette ¹⁾ konstruktioner i lejlighedsskel: Trinlydniveau, $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 53$ dB
1) Lette konstruktioner i lejlighedsskel, dvs. skillevægge med en vægt pr. arealenhed under 100 kg/m ² og etageadskillelser med en vægt pr. arealenhed under 250 kg/m ² , kan give problemer med utilstrækkelig lydisolation ved lave frekvenser, selv om kravene til lydisolation i lydklasse C er opfyldt.

I rapportens konstruktionskapitler 5-7 vil der blive benyttet kvalitetsniveauer som angivet i Tabel 2.2 herunder. Der lægges vægt på at angive muligheder for løsninger, der kan forventes at opfylde BR18_{anbef}, altså med korrektion for lave frekvenser.

Tabel 2.2. Rapportens anvendte kvalitetsniveauer for boligadskillende konstruktioners lydisolation. Note: Mod rum med støjende aktiviteter har DS 490 grænseværdier øget med 5 dB.

Lydisolationskriterier i BR18 og DS 490	Lydklasse B i DS 490:2018	BR18 _{anbef} BR18's anbefaling for lette konstruktioner	BR18 _{krav} BR18 krav = Lydklasse C
Luftlyd	$R'_{w,50} \geq 58$ dB	$R'_w \geq 55$ dB $R'_{w,50} \geq 53$ dB	$R'_w \geq 55$ dB
Trinlyd	$L'_{n,w,50} \leq 48$ dB $L'_{n,w} \leq 48$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB $L'_{n,w,50} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB
Der benyttes følgende forkortelser for lydisolationsbegreberne: $R'_w + C_{50-3150} = R'_{w,50}$ og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = L'_{n,w,50}$			

Lydisolationskrav etageboligbyggeri i Europa – Udvalgte lande

I Tabel 2.3 og Tabel 2.4 findes bygningsreglementskrav fra otte udvalgte lande i Europa. Lydkrav gælder for den færdige bygning. Det er dog vigtigt at påpege, at der ikke er viden om, i hvilket omfang der fra myndighedernes side er håndhævelse af grænseværdierne eller om disse har karakter af anbefalinger. Landene er opstillet i

alfabetisk rækkefølge efter deres navn på engelsk. Referencerne er [3] og [13]-[19]. Lydisolationskrav for 35 lande findes i [20], dog er ikke alle opdateret til 2022.

Som det fremgår af bygningsreglementskravene fra otte lande, se Tabel 2.3 og 2.4, har en del lande ret ens krav. Lydisolationskravene er – i et europæisk perspektiv – meget ensartede i de nordiske lande, men Sverige og Finland har inkluderet spektrale korrektioner ned til 50 Hz, og det betyder skrapper krav end talværdierne umiddelbart antyder. Flere lande har eller er på vej med korrektioner for lave frekvenser, se noterne i tabellerne. Let byggeri, fx byggeri i træ, er medvirkende årsag til dette. I langt de fleste af de angivne lande bliver der gjort en indsats for at fremme træbyggeri kvalitativt og kvantitativt.

Tabel 2.3. Luftlydisolation mellem etageboliger. Bygningsreglementskrav i 8 udvalgte lande.

Lydkrav ⁽¹⁾ Status marts 2023		Etageboliger	Kommentarer
Land	Begreb ⁽²⁾	Krav [dB]	Se noter under tabel
Østrig (AT)	$D_{nT,w}$	≥ 55	(3)
Belgien (BE)	$D_{nT,w} + C$	≥ 54	(3),(8)
Danmark (DK)	R'_w	≥ 55	(6)
Finland (FI)	$D_{nT,w}$	≥ 55	
Tyskland (DE)	R'_w	≥ 53	(3),(5)
Island (IS)	R'_w	≥ 55	(4)
Norge (NO)	R'_w	≥ 55	(4),(7)
Sverige (SE)	$D_{nT,w} + C_{50-3150}$	≥ 52	

Noter

- (1) Kun oversigtsoplysninger. Detaljerede krav og betingelser findes i bygningsreglementerne og tilknyttede dokumenter.
- (2) Der findes ingen generelt anvendelig konverteringsmetode mellem de forskellige begreber, da sammenhængen afhænger af karakteristika for rum og konstruktioner. Præcis konvertering kan kun foretages i de konkrete tilfælde.
- (3) I AT, BE, DE gælder strengere grænseværdier for rækkehuse.
- (4) Brug af $R'_w + C_{50-5000}$ anbefales i Norge og $R'_w + C_{50-3150}$ i Island. Hvis anvendt, kan grænseværdien reduceres, se nærmere i kravdokumenterne.
- (5) Vandret, kravet til lodret er 1 dB højere.
- (6) For lette konstruktioner (vægge $\leq 100 \text{ kg/m}^2$ og gulve $\leq 250 \text{ kg/m}^2$) anbefales $R'_w + C_{50-3150} \geq 53 \text{ dB}$.
- (7) Bygningsreglementet refererer til NS 8175:2012. Der kan forventes opgradering til NS 8175:2019, svarende til $R'_w + C_{50-5000} \geq 54 \text{ dB}$.
- (8) Der er desuden et krav om, at en laboratorietest eller prediktering af konstruktionens lydisolation skal give $R_{A,50} (= R_w + C_{50-3150}) \geq 51 \text{ dB}$.

Tabel 2.4 Trinlydniveau mellem etageboliger. Bygningsreglementskrav i 8 udvalgte lande.

Lydkrav ⁽¹⁾ Status marts 2023		Etageboliger	Kommentarer
Land	Begreb ⁽²⁾	Krav [dB]	Se noter under tabel
Østrig (AT)	$L'_{nT,w}$	≤ 48	(3)
Belgien (BE)	$L'_{nT,w}$	≤ 52	(3),(8)
Danmark (DK)	$L'_{n,w}$	≤ 53	(6)
Finland (FI)	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	≤ 53	
Tyskland (DE)	$L'_{n,w}$	≤ 50	(3)
Island (IS)	$L'_{n,w}$	≤ 53	(4)
Norge (NO)	$L'_{n,w}$	≤ 53	(4),(7)
Sverige (SE)	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500}$	≤ 56	(5)

Noter

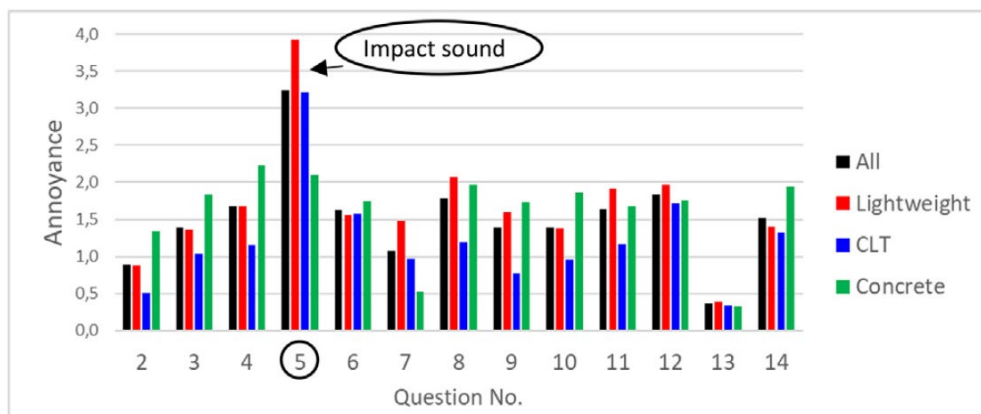
- (1) Kun oversigtsoplysninger. Detaljerede krav og betingelser findes i bygningsreglementerne og tilknyttede dokumenter.
- (2) Der findes ingen generelt anvendelig konverteringsmetode mellem de forskellige begreber, da sammenhængen afhænger af karakteristika for rum og konstruktioner. Præcis konvertering kan kun foretages i de konkrete tilfælde.
- (3) I AT, BE, DE gælder strengere grænseværdier for rækkehuse.
- (4) Det anbefales, at samme kriterium opfyldes for $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$.
- (5) Det samme kriterium skal også opfyldes af $L'_{nT,w}$.
- (6) For lette konstruktioner (gulve $\leq 250 \text{ kg/m}^2$) anbefales $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 53 \text{ dB}$.
- (7) Bygningsreglementet refererer til NS 8175:2012. Der kan forventes opgradering til NS 8175:2019, svarende til $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 54 \text{ dB}$.
- (8) Der er desuden et krav om, at en laboratorietest eller prediktering af konstruktionens lydisolation skal give $L_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 56 \text{ dB}$.

Af Tabel 2.4 ses, at Tyskland og Østrig for etageboliger har skrapper krav til trinlyd end de øvrige lande. For rækkehuse er lydkravene i disse to lande mange dB skrapper end for etageboligbyggeri.

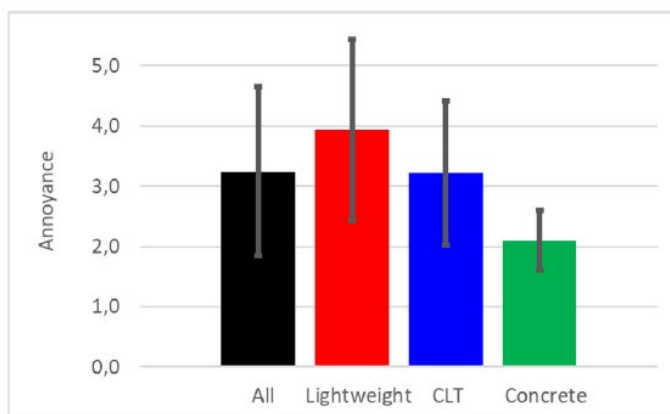
Tilfredshedsundersøgelser for lydisolation i etageboligbyggeri

I Sverige har der i mere end 40 år været gennemført undersøgelser af lydisolation i etageboligbyggeri, og der har været lydkrav med korrektioner ned til 50 Hz i ca. 20 år. Gennem det seneste årti er der gennemført en større undersøgelse med lydisolationsmålinger og spørgeskemaer i 38 boligbebyggelser med forskellige konstruktionstyper (letvægt, CLT, beton). Trinlyd er den mest generende støjkilde, og generne er størst i let byggeri og mindst i betonbyggeri, se fx [21], hvorfra nedenstående Figur 2.1 og 2.2 er gengivet. I undersøgelserne konkluderes også, at mens trinlydkrav ned til 50 Hz er anvendelige for bygningsreglementets lydkrav, der gælder alle slags konstruktioner, ville en vurdering ned til 25 Hz (ikke inkluderet i ISO 717-2) for let byggeri give en betydeligt bedre sammenhæng med beboernes subjektive vurdering.

En undersøgelse i Norge, se [22] og [23], hvor spørgsmål om forskellige slags nabostøj er inkluderet, viser også, at trinlyd er den mest generende lydkilde i boligbyggeri og at det er vigtigt i trinlydkrav at inkludere frekvenser ned til 50 Hz.



Figur 2.1. Sammenligning af genevirkning fra trinlyd (Nr. 5) med andre støjkilder i boligbyggeri med forskellige konstruktionstyper. Geneskala er fra 0 til 10. Kilde: [21], gengivet med tilladelse fra forfatterne.

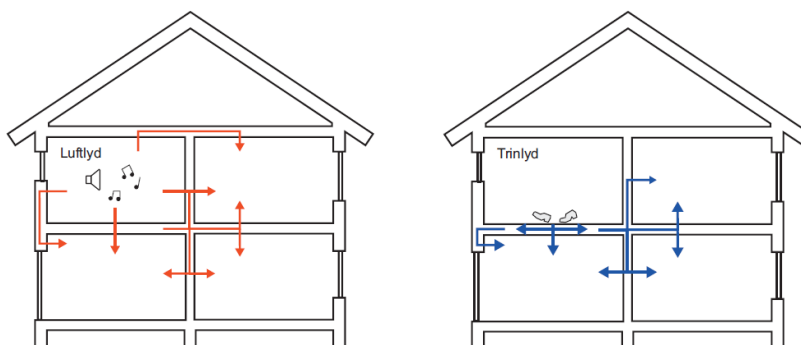


Figur 2.2. Sammenligning af gene fra trinlyd (Nr. 5 i Figur 2.1) i boligbyggeri med forskellige konstruktionstyper og med angivelse af usikkerhed (standardafvigelse). Kilde: [21], gengivet med tilladelse fra forfatterne.

I Danmark er der ikke gennemført tilsvarende undersøgelser med spørgeskemaer og feltmålinger, men trinlyd er også her den mest generende nabostøj, se [24]. En oversigt over danske og udenlandske beboerundersøgelser 1974-1993 findes i [25].

Projektering og kontrol/granskning/tilsyn i byggeprocessen

Ved projektering og kontrolmåling skal man være opmærksom på lydtransmissionsvejene i en bygning. Luftlyd og trinlyd forplanter sig primært til naborum, men også til rum længere væk. Luftlyd opstår, når en lyd giver, fx en højttaler, sætter luften i svingninger. Trinlyd opstår ved almindelig gang og løbende/legende børn på gulve og forekommer i alle direkte omliggende rum, men også i rum længere væk. Transmissionsvejene er illustreret i Figur 2.3.



Figur 2.3. Transmissionsveje for hhv. luftlyd og trinlyd vist med hhv. røde og blå pile på figurerne herover.

Der findes internationalt standardiserede metoder EN ISO 12354 [26] til beregning af luft- og trinlydisolation mellem rum baseret på input data fra bl.a. [27] og [28]. Metoderne har igennem en længere årrække været benyttet for betonbyggeri, men de er ikke uden videre velegnede til træbyggeri, bl.a. fordi akustiske data for træ mangler eller er mere usikre end for beton. Konstruktionerne i træbyggeri er også mere komplekse. Gulve og vægge er bygget op af flere lag, og samlingerne mellem gulv og vægge bliver komplicerede. Konstruktionerne bliver derfor følsomme over for variationer i udførelse. Der arbejdes i internationalt regi med udvikling af metoderne og erfaringsopbygning, bl.a. for at gøre dem mere anvendelige til CLT-trækonstruktioner. Dette arbejde omfatter også praktiske forsøg med forskellige konstruktioner for at fremskaffe mere sikre inputdata til beregning. Der må dog påregnes en noget større usikkerheder for træbyggeri end for betonbyggeri, se fx [29].

I en af projektets konstruktionsgrupper (massivtræ) blev betydningen af en akustisk kvalitetssikring diskuteret intenst, og det blev konkluderet, at en sådan kvalitetssikring er nødvendig i den samlede byggeproces i lighed med praksis for visse andre fagdiscipliner, fx konstruktioner eller VVS. En kvalitetssikring kunne fx inkludere en akustisk udbudskontrolplan, projektgranskning, akustisk tilsyn og kontrol af det færdige byggeri, hvilket er beskrevet nærmere i kap. 4.

Nedbøjninger og vibrationer

Etageadskillelser skal sikres mod generende nedbøjninger, vibrationer og svingninger, som fremkommer ved f.eks. personbevægelser. Vibrationskomforten øges ved at øge dækkonstruktionens stivhed og masse.

Etagedæk dimensioneres for både bæreevne, stivhed og vibrationer. Stivheden skal forhindre uacceptable nedbøjninger, og vibrationsforholdene hindre gener ved færdsel på gulvet (som fx at gulvet gynger, når man går på det). I praksis er det vibrationsforholdene, der er afgørende for dimensioneringen af træbaserede etagedæk.

Der er udarbejdet en række beregningsmetoder, se bl.a. de norske publikationer [30] og [31]. Bygningsreglement 2018 [2] stiller i kapitel 15 indirekte krav til vibrationer, idet der henvises til DS/EN 1995-1-1 [32] og det tilhørende nationale annekse for Danmark.

Beregningsmetoderne i [30], [31] og [32] er empiriske udtryk, som blev udarbejdet på baggrund af data fra lette træbjælkelag med lav egenvægt og mindre spændvidder, og egner sig derfor kun hertil.

I forbindelse med den igangværende opdatering af Eurocodes [33] er der udarbejdet en mere velegnet metode baseret på generel svingningsteori, som også omfatter dæk af CLT. Med metoden kan der foretages beregninger af dækkets stivhed og svingningers egenfrekvens, hastighed og acceleration. På basis af disse parametre er der defineret seks kvalitetsklasser. Det er hensigten, at der nationalt vælges tre klasser svarende til 'god', 'normal' og 'acceptabel' baseret på nationale forventninger, der er meget forskellige.

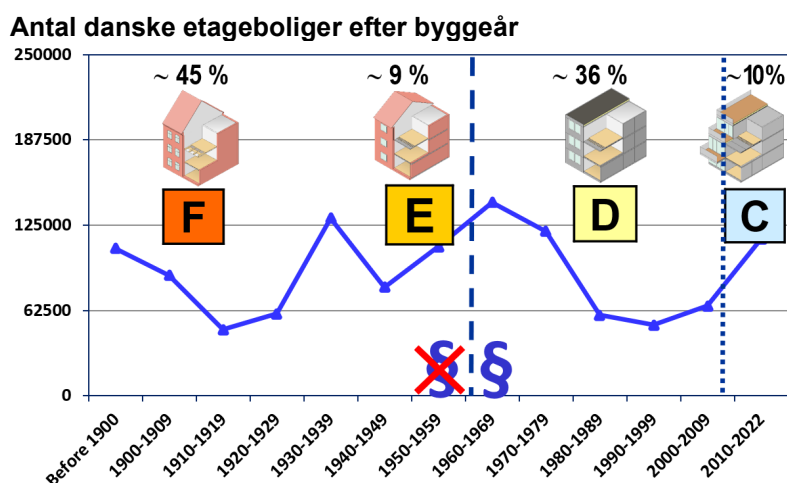
En foreløbig udgave af reglerne i den kommende Eurocode er angivet i [34], der også kan anvendes for bjælkelagsløsninger.

For dækkonstruktioner i etageboliger er en høj stivhed essentiel for overholdelse af lydkrav. En detaljeret beskrivelse af processen og grænseværdier for stivhed og de øvrige parametre vil kunne udarbejdes i et fremtidigt projekt.

3 Dansk etageboligbyggeri / historik: Lydkrav, typiske konstruktioner, lydklasser

Når der opstår nye konstruktionstyper i boligbyggeri, er der risiko for, at ydeevnen ikke følger med på alle områder. Dette synes der at være en reel fare for vedrørende bl.a. lydisolations i træbyggeri. Det kan derfor være nyttigt at orientere sig i historikken i dansk etageboligbyggeri, hvad angår konstruktioner og lovkrav.

Der er i Danmark i alt ca. 2,8 mio. boliger. Af disse er godt 1,1 mio. etageboliger, hvoraf over halvdelen er bygget, før der var nationale krav til lydisolationen. I Figur 3.1 er vist antal etageboliger i henhold til byggeår. Bygninger fra forskellige perioder har forskellige konstruktionskarakteristika og derfor forskellige egenskaber mht. lydisolations. I Figur 3.2 er givet et overblik, og detaljerede oplysninger findes i [35], [36] og [37].



Figur 3.1. Danske boliger i etageboligbyggeri 1900-2022 med indikation af konstruktionstyper og forventede lydklasser F, E, D, C efter DS 490:2018 [4]. Den stiplede linje ved år 1961 viser året for det første nationale bygningsreglement. Lydkravene blev skærpet i 2008, vist som prikket linje i diagrammet.

Kilde antal boliger og byggeår: Danmarks Statistik, 2023 [38].

Lydisolationskrav i bygningsreglementet

I bygningsreglementet har der været krav til lydisolations for boligadskillende konstruktioner i nybyggeri siden 1961. Lydkravene for etageboligbyggeri har i store træk været de samme fra 1961 og frem til Bygningsreglement 2008, hvor kravene blev skærpet og ikke ændret siden da.

Bygningsreglementets lydkrav gælder ved anvendelsesændringer (fra fx hospital eller kontorer til boliger), nye boliger i fx tagetager eller ændringer i planløsninger, men gælder ikke ved almindelig renovering.

De nugældende lydkrav og adgang til tidligere lydkrav findes i [2] og [3], hvor der henvises til måle- og vurderingsmetoder [6]-[9] og i øvrigt til målebetingelser i [39]. Lydkilderne, der benyttes til feltmålinger, er de samme som for laboratoriemålinger og beskrevet i [27].

Bygningsreglementets krav til luftlydisolation og trinlydniveau i etageboligbyggeri for perioderne 1961-2008 og fra 2008 findes i Tabel 3.1.

For rækkehusbyggeri har der fra 1966 indtil 2008 været skærpede lydisolationskrav sammenlignet med kravene for etageboliger, se [35], Tabel 2, men fra 2008 har bygningsreglementets krav til lydisolationen mellem boliger været de samme for etageboliger og rækkehuse.

Tabel 3.1. Lydtekniske hovedkrav i bygningsreglementet for boligadskillende konstruktioner i etageboliger i perioden fra 1961 og frem til nu. Kilde: Gengivet/opdateret fra SBI-anvisning 243 [36], Tabel 1.

Periode	Boligtype	Luftlydisolation	Trinlydniveau
1961-2008	Etageboliger	$R'_w \geq 52$ dB (horisontalt) $R'_w \geq 53$ dB (vertikalt)	$L'_{n,w} \leq 58$ dB
Siden 2008	Etageboliger	$R'_w \geq 55$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB

Note: Værdier frem til 1982 er tilnærmet ved omregning til begreber for luftlydisolation, R'_w , og trinlydniveau, $L'_{n,w}$, som benyttes i det nugældende bygningsreglement.

Note: Før 1961 var der ikke landsdækkende, generelle lydkrav.

Fra 2008 sætter Bygningsreglementet krav til, at nye boliger overholder lydklasse C, jf. standarden DS 490. Denne standard blev i 2018 udvidet med to lydklasser E og F og har nu seks lydklasser A-F, hvor A er den højeste/skrappeste og F den laveste. Lydklasserne E og F blev indført i 2018 for at kunne lydklassificere ældre boliger bygget før ca. 1960 og dermed give mulighed for lydmærkning af boliger i lighed med energimærkning, så der kan blive mere opmærksomhed om den lave lyd kvalitet i ældre boliger.

Klasserne er defineret ud fra de to førnævnte akustiske kriterier for luftlyd og trinlyd samt trafikstøj indendørs, støj fra tekniske installationer og efterklangstid. I Tabel 3.2 beskrives lydklassestandardens seks lydklasser, og det er angivet, hvor stor en andel af beboerne, der forventes at vurdere lydforholdene som gode henholdsvis dårlige. Bemærk, at selv i lydklasse C svarende til bygningsreglementets lydisolationskrav forventes op til 20 % af beboerne at vurdere lydforholdene som dårlige. Lave frekvenser ned til 50 Hz blev ikke inkluderet i lovkrav i 2008, men der kom en supplerende anbefaling, se Tabel 2.1, og [3].

Tabel 3.2. Lydklasser A-F i henhold til DS 490, Lydklassifikation af boliger [4].

Lydisolation mellem boliger Hovedkriterier i DS 490:2018			Lydklassebeskrivelser og forventet beboervurdering af lydforhold		
Lyd- klasse	Luftlydisolation	Trinlydniveau	Lydklassebeskrivelser	Gode eller meget gode	Dårlige
A	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$ dB	$L'_{n,w} \leq 43$ dB og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 43$ dB	Specielt gode lydforhold	> 90 %	
B	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$ dB	$L'_{n,w} \leq 48$ dB og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 48$ dB	Tydeligt bedre lydforhold end bygge Lovgivningens minimumskrav	70-85 %	< 10 %
C	$R'_w \geq 55$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB	Svarer til bygge Lovgivningens minimumskrav	50-65 %	< 20 %
D	$R'_w \geq 50$ dB	$L'_{n,w} \leq 58$ dB	Mindre tilfredsstillende lydforhold, beregnet for ældre bygninger	30-45 %	25-40 %
E	$R'_w \geq 45$ dB	$L'_{n,w} \leq 63$ dB	Lydklasse for ældre bygninger med utilfredsstillende lydforhold	10-25 %	45-60 %
F	$R'_w \geq 40$ dB	$L'_{n,w} \leq 68$ dB	Lydklasse for ældre bygninger med meget utilfredsstillende lydforhold	< 5 %	65-80 %

Note: Inden for den enkelte lydklasse kan procentdelen af beboere, som er tilfredse eller utilfredse, variere lidt fra det ene akustiske kriterium til det andet. Grupperingen er fortrinsvis baseret på den subjektive vurdering af luftlydisolation mellem boliger og trinlydniveau fra omliggende boliger.

Danske etageboligers lyd mæssige tilstand og renoveringsbehov

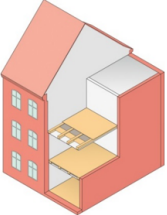
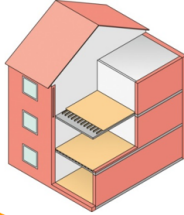
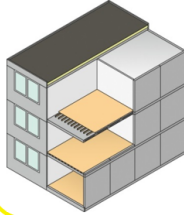
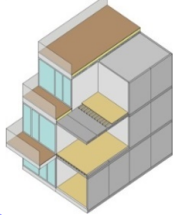
Figur 3.2 viser hovedkarakteristika for danske etageboliger bygget i forskellige tidsperioder med principskitser af bygningstyperne, simplificerede oplysninger om konstruktioner, tidsperioder, antal boliger og med angivelse af boligernes forventede lyd isolation. Bygningstyperne i Figur 3.2 betegnes E1, E2, E3 og Nybyggeri som i SBI-anvisning 243 [36]. Figur 3.1 og 3.2 viser også de forventede lyd klasser F, E, D, C i henhold

til [4]. En kort beskrivelse af lydklasserne ses i Tabel 3.2. Af Figur 3.2 fremgår det, at næsten halvdelen (ca. 500.000) af de danske etageboliger er Bygningstype E1, som har træetageadskillelser og er bygget før ca. 1950. De er altså opført, inden der blev indført lydkrav i bygningsreglementet. Hvad angår lydisolering mod nabostøj, er disse boliger langt under dagens krav. Boligerne forventes at tilhøre lydklasse F. Omkring 100.000 boliger, Bygningstype E2, har støbte etagedæk og er bygget 1930-1960. Grundet små dæktykkelser og gulvkonstruktioner med lav trinlyddæmpning er de også betydeligt under dagens standard og forventes at tilhøre lydklasse E. Af de cirka 400.000 etageboliger, Bygningstype E3, der er opført som betonelementbyggeri efter 1960, vil de fleste også ligge under dagens kravniveau, og den forventede lydklasse er D. Mere detaljerede oplysninger findes i [35], [36], [37].

Fra Figur 3.1 ses, at kun ca. 10 % af alle danske etageboliger med byggeår frem til 2022 er bygget efter at de seneste skærpede krav af bygningsreglementets lydisolationskrav i 2008 har fået effekt. På Figur 3.2 er de betegnet "Nybyggeri". Byggetekniske løsninger for nybyggeri findes i SBI-anvisning 237 [40].

Disse fakta om boligernes lydklasser indikerer, at lydforholdene i langt de fleste danske etageboliger ikke opfylder nugældende lydkrav.

Etageboliger i Danmark, konstruktionstyper, estimeret lydisolering og lydklasse

Bygningstype E1 Ældre muret byggeri med træetageadskillelser Periode: ~ 1850 til 1930/1950 Antal boliger i Danmark: ~ 500.000	Bygningstype E2 Muret byggeri med støbte etageadskillelser Periode: ~ 1930 til 1960 Antal boliger i Danmark: Op til ~ 100.000	Bygningstype E3 Betonelementbyggeri Periode: ~ 1960 til 2009 Antal boliger i Danmark: ~ 400.000	Nybyggeri Betonelementbyggeri Periode: ~ 2010 til (2022) Antal boliger i Danmark: ~ 115.000
			
Lydkrav: Nej	Lydkrav: Nej	Lydkrav: BR1961-BR1995	Lydkrav: BR2008-BR2018
Estimeret lydisolering: $R'_{w} \sim 42-50$ dB $L'_{n,w} \sim 63-75$ dB	Estimeret lydisolering: $R'_{w} \sim 45-53$ dB $L'_{n,w} \sim 58-67$ dB	Estimeret lydisolering: $R'_{w} \geq 52-53$ dB $L'_{n,w} \leq 58$ dB	Estimeret lydisolering: $R'_{w} \geq 55$ dB $L'_{n,w} \leq 53$ dB
DS 490:2018 Lydklasse: F	DS 490:2018 Lydklasse: E	DS 490:2018 Lydklasse: D	DS 490:2018 Lydklasse: C

Figur 3.2. Bygningstyper og hovedkarakteristika for dansk etageboligbyggeri. Bygningstyperne betegnes E1, E2, E3 som i SBI-anvisning 243 [36]. Mht. lydkrav: Se Tabel 3.1. Kilde: Figur opdateret fra [35] og [41].

Note: Ved typen Nybyggeri er der regnet med, at den faktiske implementering af de skærpede krav i Bygningsreglement 2008 i praksis først er sket fra cirka 2010, idet tidspunktet for byggetilladelsen er afgørende for lydkravene.

4 Træbyggeri – Oversigt konstruktionsprincipper i nyt dansk etageboligbyggeri

Træbyggesystemer i dansk etageboligbyggeri

Der anvendes i dag i Danmark tre hovedtyper af træbyggesystemer til boligbyggeri:

- (1) Massivtrækonstruktioner, hvor massive træelementer af limtræ eller CLT anvendes til hovedkonstruktionerne, omtrent som betonelementer. Ikke-bærende vægge, herunder facader, udføres typisk med træelementer. Massivtrækonstruktioner kan anvendes til "høje" byggerier pga. den store stivhed.
- (2) Træskeletkonstruktioner, typisk præfabrikerede træelementer bestående af planker, isolering og pladebeklædninger, som hurtigt og sikkert kan samles på byggepladsen. Træelementer anvendes normalt i op til 4 etager.
- (3) Rumstore moduler, hvor træelementer på fabrik er sammensat til rum og typisk færdigapterede med køkkener og bad. Rumstore moduler anvendes typisk i 2-4 etager, men også op til 5-6 etager.

I praksis anvendes ofte hybridløsninger og kombination med søjler eller søjle-bjælkesystemer, så ikke alle anvendelser er direkte repræsenteret i de følgende afsnit. Som regel vil de boligadskillende komponenter dog overvejende tilhøre én af hovedtyperne. Under alle omstændigheder er det fornuftigt at optimere konstruktionerne, så ressourcerne bruges, hvor de gør mest gavn for en eller flere ydeevner.

Nærværende rapport baserer sig på aktuelle danske erfaringer fra træbyggeri. Fremadrettet må forventes en større anvendelse af biogene byggematerialer, se fx [42] og [43].

Danske erfaringer og udfordringer med forskellige træbyggesystemer

De tre konstruktionstyper har hver deres karakteristika, fordele og ulemper. Generelt er det en fordel i byggeprocessen, at træ er let, men for lydisolation er en stor masse en fordel. Konsekvensen heraf er, at der må kompenseres på andre måder, og derfor er konstruktionstykkelser i etageboligbyggeri af træ betydeligt større end for betonbyggeri.

Af de tre træbyggesystemer nævnt ovenfor, er træskeletbyggeri det ældste og dernæst træbyggeri af rumstore moduler. Det nyeste er massivtræbyggeri, både i Danmark og udlandet, og derfor har denne type byggeri naturligt nok de største udfordringer.

Der har gennem nogle årtier frem til ca. år 2000 været en række nordiske projekter om træskeletbyggeri, se fx [44], [45], og der er opbygget en bred viden om disse typer byggerier.

Projektering af byggeri med rummoduler har som regel fundet sted hos producenterne, hvorved der er opnået en god projekterings erfaring hos disse, hvilket er med til at sikre kvaliteten.

Sammenlignet med træskeletbyggeri og træbyggeri med rummoduler, er byggeri med massivtræ stadig på et tidligt stade, hvilket betyder, at der er mindre projekterings erfaring og færre feltnåleresultater.

I dækkonstruktioner med massivtræ benyttes ofte konstruktioner med et masselag, dvs. et tungt lag, som kan være beton, sand eller andet tungt materiale. Beton kan dog potentielt give fugtproblemer og har negativ indflydelse på CO₂-aftrykket.

I projekteringsprocessen skal der for massivtræbyggeri bruges konstruktionsdata, og det er ofte en udfordring at finde relevante data for elementerne og for samlinger. Der er meget få data fra feltmålinger. Der findes en del data fra laboratoriemålinger, men ydeevnen i byggeriet er forbundet med store usikkerheder, fordi meget små variationer i produkter og samlinger kan have stor indflydelse.

Der er også andre faktorer i spil. Fx ønsker nogle bygherrer eller arkitekter af æstetiske grunde, at CLT-træoverfladen forbliver synlig, men nogle konstruktioner har gipsplader monteret på overfladen. Økonomien har selvfølgelig også en væsentlig betydning. Ressourceforbruget har betydning for økonomien, men også for bæredygtigheden.

I projektforløbet blev det klart, at der især for massivtræbyggeri ikke er danske erfaringer, som muliggør fremskaffelse af konstruktionsløsninger og tilhørende måleresultater, der kan indgå som baggrund for de ønskede generiske konstruktionsløsninger. Det er ligeledes blevet tydeligt ud fra akustikrådgivernes erfaringer, at det i byggeprocessen er nødvendigt, at en person med erfaring i konstruktionsdetaljernes betydning fører jævnlige tilsyn på byggepladsen.

Der har tidligere – frem til ca. år 2000 - været et effektivt, nordisk samarbejde gennem Nordisk Komité for Bygningsbestemmelser, herunder samarbejde om lydkrav og lydklasser, hvilket i en årrække for boliger betød ret ensartede lydkrav og lydklasser i Norden. Efter at dette formelle, nordiske samarbejde ophørte, overgik videre arbejde til nationale komiteer, og såvel lydisolationsbegreber som lydkrav og lydklasser i stigende grad er blevet mere forskellige, se fx [46] og [47]. Det kunne være af stor nytte at genoptage dette samarbejde med henblik på projektsamarbejde og udveksling af erfaringer.

Der er søgt efter udenlandsk litteratur, inkl. publikationer fra træorganisationer og forskningsinstitutter, konferencer og tidsskrifter. Mht. udenlandske erfaringer forekommer norske erfaringer mest relevante, fordi de norske lydkrav er tættest på de danske krav og fordi bl.a. SINTEF har udgivet en række relevante rapporter og Byggedetaljblade, der dog ikke indeholder samlede anvisninger for konstruktionsløsninger. Dette er især en udfordring for massivtræbyggeri, hvor lydisoleringen også er meget følsom over for små ændringer i samlingerne med mellemlæg, søm, skruet, vinkler.

Akustisk kvalitetssikring

Ydeevnen/lydisolationen i det færdige byggeri sikres ved styring af byggeprocessen helt fra planlægningen til kontrol af det færdige byggeri.

Ifølge erfaringer fra akustikerne i følgegruppen er fx visuel kontrol på byggepladsen nødvendig – og somme tider lydmålinger undervejs. Nogle konstruktionsfolk formulerede et forslag om kontroller i den samlede byggeproces i lighed med praksis for visse andre fagdiscipliner, fx konstruktioner og VVS, se oplæg herunder, der vedrører planlægning, kontrol, granskning og inspektion:

1. Akustisk udbudskontrolplan

Akustikeren på sagen udarbejder en "akustisk udbudskontrolplan", med indarbejdelse af særlige fokuspunkter, herunder krav til tilsynsplan med udpegning af kritiske detaljer, særlige og almene kontroller.

2. Akustisk projektgranskning

I tidsplanen afsættes tid til at foretage en "akustisk projektgranskning", hvor konstruktionsfolk i forbindelse med projekteringen af et udbudsprojekt koordinerer de kritiske detaljer med akustikeren.

3. Akustisk tilsyn

Entreprenøren indarbejder/planlægger, at der foretages specifikt tilsyn med fokus på akustik. – Årsagen er, at det for trækonstruktioner er yderst vigtigt, at elastiske mellemlæg, skruestilling, placering og fastgørelse af beslag mv. udføres som anvist for at der ikke skal opstå uforudset flanketransmission. Det akustiske tilsyn vil ofte inkludere orienterende målinger undervejs i byggeprocessen.

4. Akustisk kontrol af færdigt byggeri

Der foretages efter færdiggørelsen af byggeriet kontrolmålinger til sikring af, at lydkravene er overholdt.

Nogle af principperne i ovennævnte svarer til Robust Details, se [48], [49], [50]. Konceptet Robust Details definerer en samlet byggeproces, hvor vægge, etagedæk og samlinger er vurderet og godkendt af Robust Details Limited, baseret på ydeevnen i færdige bebyggelser, og konstruktionsdetaljer, tjeklister og vejledninger fra Robust Details Handbook er anvendt. Det kan bemærkes, at der for nogle konstruktionsopbygninger er vist animationer, se fx <https://www.robustdetails.com/patterns/selecting-your-robust-details/timber-walls/e-wt-1/#2630>. Animationer af udvalgte processer kunne være en stor hjælp for vidensopbygning hos alle parter i byggeprojekter og ikke mindst for håndværkerne, der udfører de pågældende dele af byggeriet.

Det har gennem en årrække været en udfordring for ingeniørrådgivernes akustikafdelinger og forskningsinstitutter at opnå bevidsthed i den brede byggebranche og hos nogle entreprenører om lydkravene og konsekvenserne for bygningskonstruktionerne. Ved et nærstudie af FRI's ydelsesbeskrivelser [51] kan baggrunden for denne manglende indsigt i dele af byggebranchen bedre forstås, idet lyd og akustik er næsten usynligt, hvorved emnet ofte glemmes eller undervurderes.

I Norge har et akustikudvalg (RIA) i Rådgivende Ingeniørers Forening (RIF) udarbejdet et skrift udelukkende om akustikydelser [52]. Den akustiske kvalitetssikring i danske byggerier kunne tydeliggøres i en revideret udgave af FRI's ydelsesbeskrivelser [51], og der kunne som i Norge udarbejdes et egentligt skrift om rådgiveres ydelser, hvad angår opfyldelse af lydkrav og eventuelle supplerende akustiske krav.

Parallelt med en indsats for en opgradering af FRI's ydelsesbeskrivelser, kunne der kommunikeres mere om SBST-vejledningen [53] om dokumentation af bygningsreglementets tekniske bestemmelser i forbindelse med færdigmelding af byggeriet:

"Denne vejledning beskriver omfanget af den nødvendige dokumentation for overholdelse af bygningsreglementets tekniske bestemmelser... Der er således krav om, at der skal foreligge dokumentation for, at bygningsreglementets bestemmelser er overholdt i den færdige bygning... Hensynet bag bygningsreglementets krav om udarbejdelse af dokumentation for at byggeri overholder bygningsreglementets krav er delvist at det dokumenteres, at bygningsreglementet er overholdt og delvist, for at sikre at senere brugere af bygningen har et retvisende dokumentationsgrundlag for denne."

Principløsninger for konstruktioner i træbyggeri

I de følgende tre kapitler er principper for konstruktionsløsninger beskrevet for de tre konstruktionstyper: Massivtræ, træskeletbyggeri, rumstore moduler.

De tre kapitler er udarbejdet af tre forskellige arbejdsgrupper, se appendiks E, og derfor er struktur, materialebetegnelser og tegninger ikke helt ensartede. Tegningerne er ikke målfaste.

Mht. materialeangivelser er der anvendt betegnelser for traditionelt anvendte produkter som fx gipsplader og mineraluld (ordet isolering er undgået, da det typisk forstås som varmeisolering og altså potentielt vildledende), men disse kan erstattes af andre produkter med tilsvarende akustiske egenskaber.

5 Konstruktionstype 1: Massivtræbyggeri

Dette kapitel handler om lydisolations for Massivtræbyggeri. Med hensyn til andre fagområder, bl.a. statik og brand, henvises til andre publikationer.

Formål

Trækonstruktioner af massivtræ, herunder CLT (Cross Laminated Timber) og limtræ, viser sig erfaringsmæssigt egnede til brug i bærende konstruktioner i etageboligbyggeri. CLT-elementer kan benyttes til både lodrette og vandrette lejlighedsskel, mens limtræ benyttes som massive etageadskillelser benævnt limtræsdæk eller efter tysk, brettstapel-elementer. Limtræ bruges også traditionelt i bjælke/søjle-systemer i kombinationer med andre konstruktionstyper, f.eks. træskeletvægge. Etageboligbyggeri af massivtræ kan bygges i større højder end bygninger af træskelelementer eller rummoduler.

Lydisolationskrav

Der lægges i projektet vægt på så vidt muligt at vise løsninger, der kan forventes at opfylde grænseværdierne for BR18_{anbef.}, altså med korrektion for lave frekvenser.

Tabel 5.1. Anvendte kvalitetsniveauer for boligadskillende konstruktioners lydisolations.

Lydisolationskriterier i BR18 og DS 490	Lydklasse B i DS 490:2018	BR18 _{anbef.} BR18's anbefaling for lette konstruktioner	BR18 _{krav} BR18 krav = Lydklasse C
Luftlyd	$R'_{w,50} \geq 58$ dB	$R'_w \geq 55$ dB $R'_{w,50} \geq 53$ dB	$R'_w \geq 55$ dB
Trinlyd	$L'_{n,w,50} \leq 48$ dB $L'_{n,w} \leq 48$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB $L'_{n,w,50} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB

Der benyttes følgende forkortelser for lydisolationsbegreberne: $R'_w + C_{50-3150} = R'_{w,50}$ og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = L'_{n,w,50}$

For CLT-baserede konstruktioner er der mange publikationer med lydisolationsdata, men langt de fleste data er fra laboratoriemålinger udført efter ISO 10140 serien [27] (dvs. uden flanketransmission og med begrænsede spændvidder) eller de er udført i en mockup med simulerede feltbetingelser, men stadig ikke at betragte som felldata. Yderligere er mange data uden lavfrekvenskorrektioner. Derfor skal ydeevnen for en konstruktion vurderes i de konkrete projektilfælde.

Det er ønskeligt at skaffe data fra danske referenceprojekter, gerne kombineret med danske laboratoriemålinger, så der kan opbygges erfaringer med, i hvilken grad laboratoriedata passer med feltmålinger. – Det er vigtigt ved sådanne sammenligninger at være opmærksom på den potentielt ret store svækkelse af lydisolationsen, som beslag, søm og skruer samt manglende elastisk mellemlæg kan have.

Principløsninger

Erfaringen viser, at for at opnå en god lydisolations forudsættes en planlægning med en omhyggelig helhedsvurdering af konstruktionernes sammensætning og samlinger

med tilstødende bygningsdele. Denne planlægning bør foretages af fagfolk med dokumenteret kendskab til bygningsakustik.

I det følgende vises eksempler på boligadskillende CLT-baserede etagedæk og vægge. Masse er meget afgørende for lydisoleringen. Massivtræelementer har en lav rumvægt sammenlignet med beton, og der må generelt regnes med betydelige forøgelse af konstruktionstykkelse sammenlignet med betonkonstruktioner og også ofte med tunge lag indbygget i etagedækkene.

De viste principløsninger bør revurderes og optimeres, så snart der bliver mulighed for at få adgang til feltmåleresultater, fortrinsvis fra danske projekter, men også fra udenlandske projekter. Det forventes, at mange af principløsningerne – med passende justeringer og samlinger – kan opfylde BR18_{krav} og BR18_{anbef}, men eftervisning mangler. Der er ikke fundet feltmåleresultater med opfyldelse af Lydklasse B.

Etagedæk

For at imødekomme gældende lydkrav, anvendes etagedæk i massivtræ typisk i kombination med supplerende masse, trinlyddæmpende gulve, og lydisolerede lofter. Massivtræ-dækket er den bærende del i konstruktionen. CLT-elementer er opbygget med et antal lameller typisk fra 5-9 lameller i dækkonstruktioner og varierer i tykkelse fra 160 mm til 320 mm. Ved massive limtræsdek varierer tykkelserne typisk fra 120 mm til 220 mm og benyttes ofte i træ/beton komposit-dæk, hvor beton og limtræ er mekanisk forbundet og dermed samvirkende, hvilket øger stivheden betragteligt.

Stivhedens indflydelse på dækkets akustiske egenskaber er ikke særligt velbelyst i litteraturen, men dækkets stivhed har stor indflydelse på især lavfrekvent trinlyd, som typisk er det, beboere generes af. Støj fra gangtrafik fra overliggende etager i lette byggerier kommer til udtryk ved frekvenser under 100 Hz.

Huskeliste for etagedæk

- Etablering af høj bøjningsstivhed
- Etablering af supplerende masse.
- Etablering af punkt- eller fladelejrte gulve på trinlyddæmpende underlag:
 - punktlejrte gulve som trægulv på trinlyddæmpende opklodsning (strøgulve)
 - fladelejrte gulve af enten beton eller let pladegulv på trykfast mineraluldsisolering (svømmende gulve).
- Etablering af nedhængte lydisolerede lofter

Gulve og lofter

Tillægskonstruktioner udføres med et af følgende principper:

- Gulve på strøer
- Svømmende gulve.
- Nedhængt lydloft.

Gulve på strøer

Strøer oplægges på trinlyddæmpende brikker. Hulrummet mellem strøerne udfyldes delvist med blød mineraluldsisolering. Ved projekteringen er det vigtigt at vælge hulrumshøjde, strøer og trinlyddæmpende opklodsninger, der i kombination med den øvrige del af etagedækket giver den nødvendige lydisolering.

Da massen af gulvene har indflydelse på gulvenes lydisolering, kan det også være nødvendigt at øge massen på gulvet over strøerne. Eksempelvis kan supplerende krydsfiner og guldgips udlægges på strøerne under den færdige gulvbelægning.

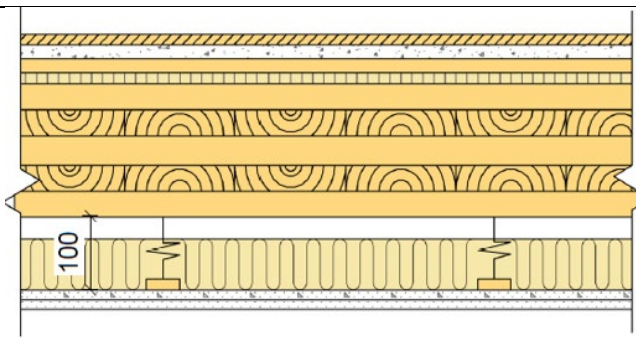
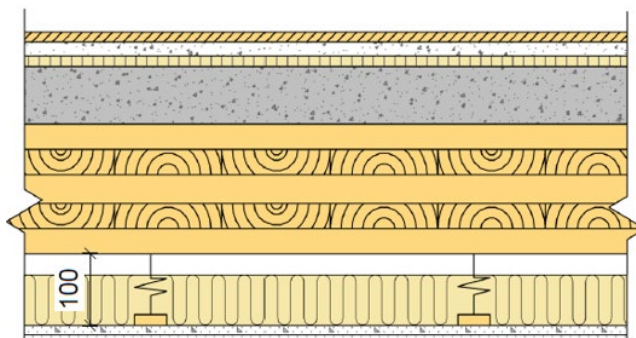
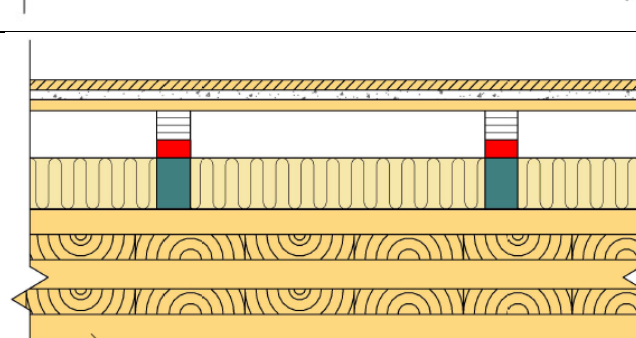
Svømmende gulve

Svømmende gulve udføres med en belægning på et stift underlag med afstemt fladevægt/masse af fx krydsfiner og/eller gulvgips, lagt på et trinlyddæmpende underlag af trædefast mineraluld. Evt. supplerende masse af beton, grus, sand, fliser eller lign. direkte oven på CLT-dæk skal udlægges på en vandtæt membran, især ved vandholdige materialer såsom beton og lign. Anvendelse af beton er lydteknisk begrundet med høj vægt, men ønskes undgået aht. klimaaftryk og risiko for fugtproblemer.

I Tabel 5.2 er vist eksempler på principløsninger for boligadskillende etagedæk med CLT-elementer og tillægskonstruktioner. De viste eksempler har alle gode muligheder for ved en kombination af detailprojektering og akustisk kvalitetssikring i hele byggeprocessen (se kap. 4) at opfylde kriterierne for BR18_{krav} og BR18_{anbef.} Der skønnes også - efter nogen erfaringsopbygning - at være potentiale til at opnå lydklasse B.

Tabel 5.2. Principløsninger for boligadskillende etagedæk med CLT-elementer og tillægskonstruktioner.

* Note: Der forudsættes en akustisk detailprojektering med optimering af materialetykkelser og hulrum.

Etagedæk	Materialer	Tykkelse	Lydisolation Se note*
	14 mm gulvbelægning 19 mm gulvgips 22 mm gulvspån 15 mm trinlyddæmpning CLT-element, min. 180 mm Nedhængt lydloft ca. 125 mm: – 100 mm luftspalte med 70 mm mineraluld – 2 lag 12,5 mm gips på elastisk loftsophæng	Ca. 375 mm	BR18 _{krav} BR18 _{anbef.}
	14 mm gulvbelægning 19 mm gulvgips 20 mm trinlyddæmpning 80 mm grus eller anden ballast CLT- element, min. 180 mm Nedhængt lydloft ca. 125 mm (som ovenfor)	Ca. 440 mm	BR18 _{krav} BR18 _{anbef.}
	14 mm gulvbelægning 19 mm gulvgips 22 mm spånplade 120 mm hulrum med 70 mm mineraluld Strøer pr. 600 mm på elastiske underlagsbrikker pr. 450 mm CLT-element, min. 180 mm Nedhængt lydloft ca. 125 mm (som ovenfor)	Ca. 480 mm	BR18 _{krav} BR18 _{anbef.}

Installationer i etagedæk

Tillægskonstruktioner over og under massivtrædæk skaber gode muligheder for at føre installationer skjult. Føring af installationer mellem delkonstruktionerne skal planlægges og udføres omhyggeligt pga. risikoen for fejl i form af fx lydbroer (mekaniske kortslutninger) og utætheder. Placering af rør, afstand til konstruktionsdele og befæstelse udgør vigtige detaljer.

Ved rørgennemføring i et nedhængt loft fra fx ventilationskanaler kan åbninger give en væsentlig lydmæssig forringelse, og det anbefales derfor, at rørføringer sker gennem rørskakte. Man bør undgå rørgennemføringer i lofter/gulve som adskiller to opholdsrum. Flere retningslinjer findes i SINTEF Byggedetaljer 522.891 [54].

Boligadskillende vægge

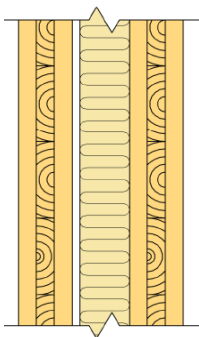
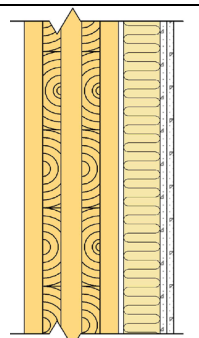
Vægge udføres typisk som dobbeltvægge med flere uafhængige vægelementer med lydabsorberende isoleringsmateriale i mellemliggende hulrum. Isoleringsmaterialet skal have en egnet tykkelse og monteres således, at der med sikkerhed ikke skabes lydbro mellem vægfladerne.

Mineraluld i plader/baner skal have en tykkelse mindre end hulrummet og monteres, så der ikke skabes kontakt mellem vægfladerne. Granulat viser sig i praksis ikke at være egnet, da der er risiko for, at det danner lydbro når det indblæses og dermed forringer lydisolationen.

I Tabel 5.3 er vist to principløsninger for boligadskillende vægge, den ene en dobbeltvæg af CLT-elementer, den anden af et CLT-element med forsatsvæg på den ene side. For begge løsninger er en akustisk detailprojektering nødvendig.

Tabel 5.3. Principløsninger for boligadskillende vægge med CLT-elementer og tillægskonstruktioner.

* Note: Der forudsættes en akustisk detailprojektering med optimering af materialer, tykkelser og hulrum.

Boligadskillende vægge	Materialer	Tykkelse	Lydisolation Se note*
	100 mm CLT-væg 95 mm mineraluld 15 mm luftspalte 100 mm CLT-væg	Ca. 310 mm	BR18 _{krav}
	160 mm CLT-væg 10 mm luftspalte 70 mm mineraluld 2 x 13 mm gipsplade	Ca. 270 mm	BR18 _{anbef}

Den første af de to viste principløsninger er en CLT-dobbeltvæg, hvor en forbedring af lydisoleringen kan ske ved justeringer af materialetykkelser og hulrum og/eller montering af gipsplader på den ene eller begge vægoverflader. En forbedring kan også opnås ved at anvende asymmetriske tykkelser af de to CLT-elementer. Dette princip har ved mockup målinger i Østrig, se [55] Ferk et al. (2022), vist betydelige forbedringer i forhold til symmetriske løsninger med samme eller endda større vægt, fx er 80+100 mm CLT bedre end 2x100 mm. Det synes at være samme effekt som blev opnået ved danske forskningsprojekter i 1980'erne, hvor lydisoleringen for isoleringsruder forbedredes betydeligt ved asymmetriske glastykkelser, se resumé i SBI-anvisning 244, Appendiks D [56].

Den anden løsning vist i Tabel 5.3 er strukturelt simplere, men indebærer montering af forsatsvæg efter montage af CLT-elementerne. Med den viste konstruktion opnås en synlig træoverflade på den ene side af den boligadskillende væg.

Valg af løsning skal ses i sammenhæng med valg af etagedæk, se eksempler i det følgende.

Samlingsdetaljer

Træbygningers lydisolerede forhold afhænger i høj grad af samlingsdetaljerne. Man skal ved planlægning af etageboliger være opmærksom på, at enhver mekanisk forbindelse giver anledning til "lydbroer" (mekaniske kortslutninger) mellem elementerne, og kan derfor være problematisk i forbindelse med sikring af lydisolering mellem boligenheder. Omvendt er de mekaniske forbindelser nødvendige, da der som regel er behov for at overføre statisk last gennem samlingerne. Det er derfor nødvendigt med en nøje tværfaglig koordinering mellem relevante fag (konstruktion og akustik).

Huskeliste for kritiske samlinger (flanketransmission)

- Direkte mekanisk forbindelse ml. 2 emner skal undgås/begrænses.
- Etablering af et elastisk mellemlæg mellem konstruktionsdele
- Etablering af tillægskonstruktioner, hvor de er nødvendige for overholdelse af lydkrav.

Flanketransmission

Som beskrevet ovenfor er det yderst vigtigt at vurdere, hvorledes samlinger med flankerende konstruktioner har indvirkning på konstruktionernes samlede lydisolering. Det er en kompliceret opgave at foretage denne vurdering, da ydeevnen beror på arealer af vægflader, gulvflader og længden/antal af samlinger mv. samt de anvendte beslag, mellemlæg, søm og skruer.

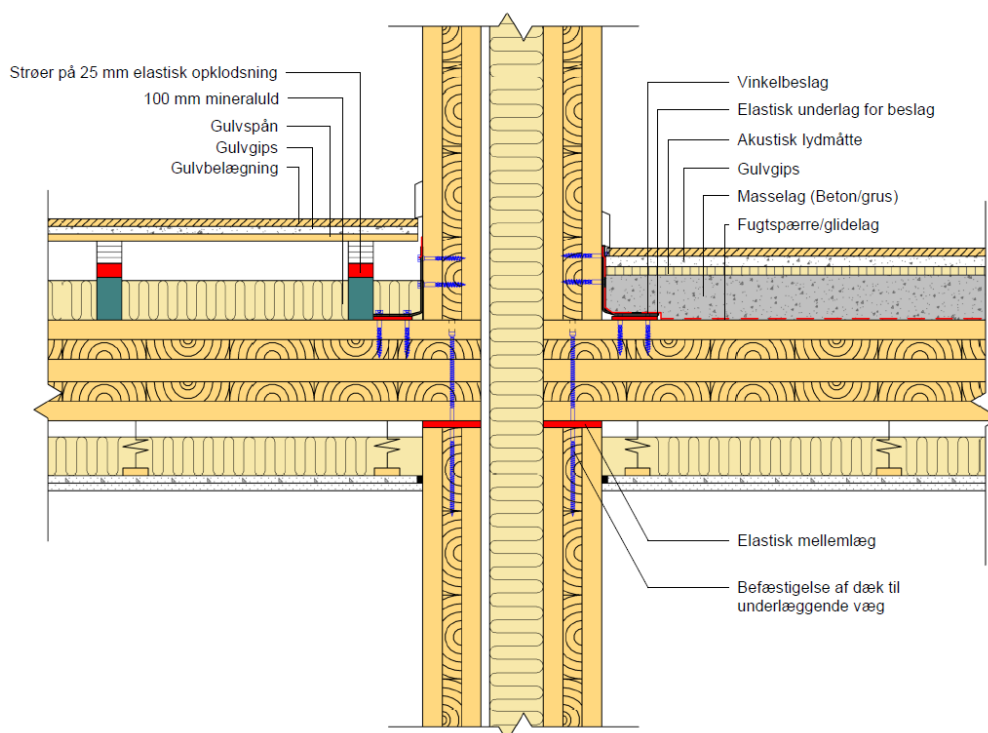
Antal af fastgørelsespunkter afhænger af den statiske last gennem knudepunktet. Typisk har lavt (2-3 etagers) byggeri med et passende antal stabiliserende vægge et moderat fastgørelsesbehov, mens der ved høje slanke bygninger med et lille fodaftryk typisk er behov for mange forbindelsesmidler suppleret med trækforankringer, som dermed bidrager ugunstigt til flanketransmissionen.

Antallet af nødvendige forbindelsesmidler varierer, men beslag med elastisk underlag, og 10-40 skruer/søm pr. emne hvor beslagafstanden varierer fra 0,5 – 1,5 m er ikke unormalt.

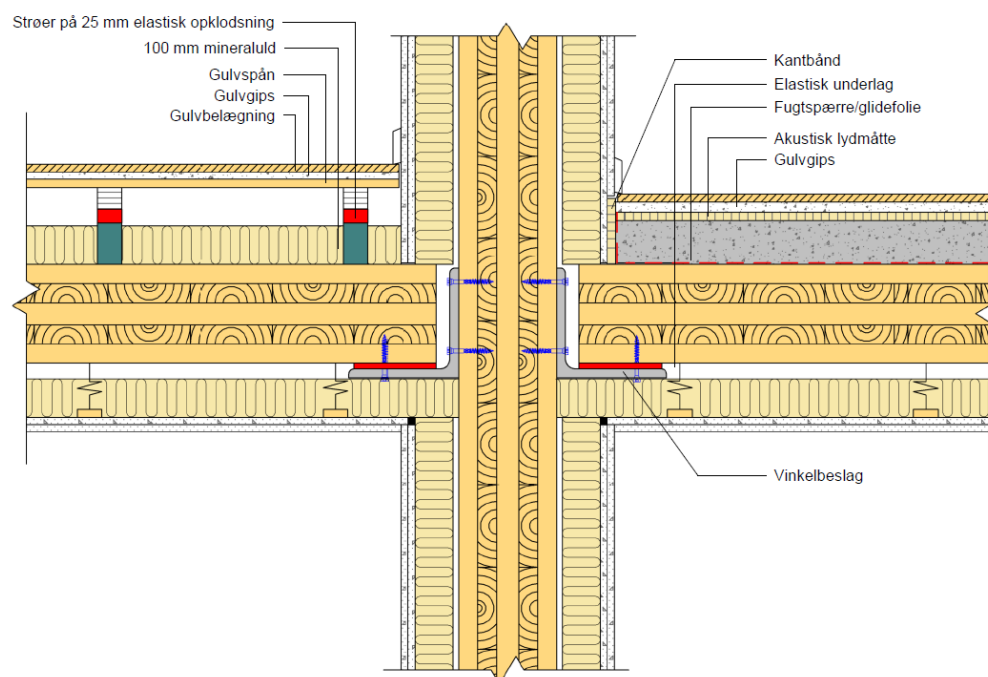
Ifølge SINTEF Byggedetaljer 522.891 [54] må følgende forringelser forventes for felt-data sammenlignet med laboratoriedata for de enkelte konstruktionsdele:

- Luftlydisolering svækkes 3 - 6 dB
- Trinlydisolering svækkes 3 - 5 dB (dvs. trinlydniveau øges)

I det følgende er vist nogle eksempler på principløsninger (lodrette snit) for etagekryds mellem etagedæk og boligadskillende væg.



Figur 5.1. Lodret snit. Etagekryds lejlighedsskel. Samling boligadskillende væg og dæk med nedhængt loft. Til venstre ses gulv på trinlyddæmpende opklodsning, til højre gulv på masselag. CLT-dæk 180 mm, CLT-vægelementer 100 mm.



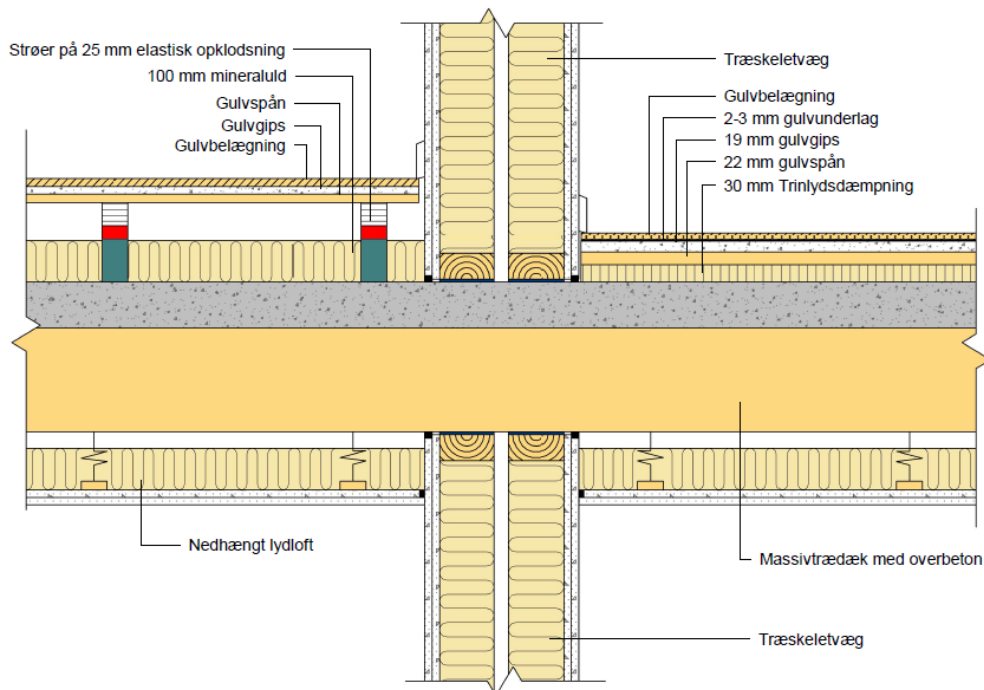
Figur 5.2. Lodret snit. Etagekryds lejlighedsskel med boligadskillende, gennemgående væg og dæk med nedhængt loft. CLT-dæk 180 mm, CLT-vægelement 160 mm. Til venstre ses gulv på trinlyddæmpende opklodsning, til højre gulv på masselag.

Hybridkonstruktioner

Med hybridkonstruktioner menes en kombination af flere byggesystemer, fx søjle-bjælke-systemer af limtræ, kombineret med massivtrædæk, og ikke-bærende udfyldningsvægge af træskelet.

Hybridkonstruktioner vinder større og større indpas, da materialer kan optimeres, med positiv effekt på økonomi, bygbarhed og klimaaftryk.

Der bør fokuseres på beskrivelse af hybridløsninger i efterfølgende projekter. Nedenfor er vist et etagekryds udført som hybridløsning.



Figur 5.3. Lodret snit. (Hybridløsning) Etagekryds lejlighedsskel, boligadskillende, gennemgående massivtrædæk og dæk med nedhængt loft kombineret med dobbeltvægge af træskeletvægge.

Feltnåleresultater

Måleresultater for Lisbjerg bakke, Tilst, viser fin overholdelse af BR18_{anbef.}

Målerapport: JAC/Moe A/S, April 2018. Sagsnr. 1009028-001.

Bemærk: Etagedækkene har masselag af beton, jf. beskrivelse herunder.

Lisbjerg Bakke: <https://vandkunsten.com/projects/et-moderne-dansk-traehus>

Der er fremskaffet en enkelt målerapport fra et dansk byggeri med CLT-dæk og strøgulve. Rapporten indeholder feltnåleresultater af luftlyd og trinlyd, men kun én måling af hver, hvilket er klart utilstrækkeligt, både for en enkelt bebyggelse og som generel dokumentation for konstruktionernes lydisolerende egenskaber. Måleresultaterne overholder med god margin BR18_{krav} og næsten BR18_{anbefal}, men det er nødvendigt med betydeligt flere repræsentative feltnålinger i et antal bebyggelser, før der kan udarbejdes et robust grundlag for en generel vurdering af konstruktionernes lydisolerende egenskaber. Målerapporten er fortrolig.

I bl.a. Norge og Østrig er der p.t. større forskningsprojekter, hvor der er målt i på CLT-konstruktioner i en mockup (se referencer i appendiks C). Der er planlagt feltnålinger, hvor der forventes resultater i 2023-2024.

Sammenfatning

Med massivtræ er der mange muligheder, især med anvendelse af hybridløsninger. Der savnes dog danske feltmåleresultater for massivtræbyggeri for de viste konstruktionsløsninger – for etagedæk både med og uden masselag. Udenlandske resultater er typisk laboratoriemålinger og nogle gange endda baseret på beregninger eller er udført i mockup og kan ikke erstatte egentlige feltmåleresultater i etageboligbyggerier.

Det er en forhindring for øget vidensniveau, at feltmåleresultater – både i Danmark og udlandet – tilhører bygherren og at der i øvrigt meget ofte er utilstrækkelig information om detaljløsningerne.

Feltmåleresultater skal være repræsentative for bebyggelsen, hvad angår udvælgelse af prøveemner samt antal målinger i bygningen, jf. retningslinjer i DS 490 [4].

Det forventes, at mange af de viste principløsninger – med passende justeringer og samlinger – kan opfylde BR18_{krav} og BR18_{anbef}, men eftervisning mangler. Der er ikke fundet feltmåleresultater med opfyldelse af Lydklasse B.

Det skal understreges, at for massivtræbyggeri er erfaringer fra praksis både i Danmark og udlandet begrænset til en kortere årrække. Derfor er akustisk detailprojektering og kvalitetssikring i byggeprocessen – herunder visuel kontrol – afgørende for sikring af lydisoleringen i det færdige byggeri. Desuden er gennemførelse af lydisolationsmålinger i det færdige byggeri og detaljeret rapportering nødvendige elementer i den samlede proces med henblik på vidensopbygning og optimering af konstruktionsløsninger.

Kilder

- Treteknisk (2016). Håndbok. Bygge med massivtreelementer. Hefte 5 lyd. Reference [57]. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-5-Lyd.pdf>
- SINTEF Byggedetaljer 522.891 (2009). Etasjeskillere i massivtre. Reference [54].
- SINTEF Byggedetaljer 520.205 (2023). Planlegging av bygninger med KLT-elementer. Under udarbejdelse, forventes publiceret maj 2023. Reference [58]
- Anders Løvstad, Per Kåre Limmestad (2021). Consequences of revised sound insulation requirements between dwellings in Norway. Proceedings of BNAM2021, Oslo, Norway. Reference [59]. <http://www.norskakustiskselskap.org/bnam-2021/>
- Ferk et al (2022). Sound.Wood.Austria - selected measurement results of building components for multi-storey timber construction in Austria. Proceedings of InterNoise2022, Glasgow. Reference [55].
- Rasmussen, B. & Møller Petersen, C., 2014. Lydisolering af klimaskærmen. 1 ed. SBI forlag. (SBI-anvisning; No. 244). Reference [56].
- Konstruktioner: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/a-bygge-med-tre/byggesystemer-for-massivtre>

6 Konstruktionstype 2: Træskelelementer

Dette kapitel handler om lydisolations for etageboligbyggeri af træskelelementer. Med hensyn til andre fagområder, bl.a. statik og brand, henvises til andre publikationer.

Formål

I dette afsnit vises eksempler på udformning af træskelelementer og knudepunkter, der erfaringsmæssigt vil opfylde kravene til lydisolations i BR18. Løsninger i det følgende for både etagedæk og boligadskillende vægge tager udgangspunkt i knudepunktet vist i Figur 6.1, hvor dæk og boligadskillende væg mødes.

Der lægges vægt på også at vise løsninger, der kan forventes at opfylder kravene betegnet BR18_{anbef}, altså med korrektion for lave frekvenser som det anbefales i BR18.

Den positive og negative indflydelse af forskellige varianter beskrives også.

Baggrunden for løsningerne er gennemgået i Appendiks D – Måleresultater træskeletbyggeri, som også angiver de anvendte kilder.

Lydisolationskrav

Kravene til lydisolations i forskellige klasser anvendt i BR18 samt DS 490:2018 er angivet i nedenstående tabel. Minimumskravet betegnes også BR18_{krav}. For lette bygningsdele anbefaler BR at opfylde BR18_{anbef}, altså med korrektion for lave frekvenser.

Tabel 6.1. Anvendte kvalitetsniveauer for boligadskillende konstruktioners lydisolations.

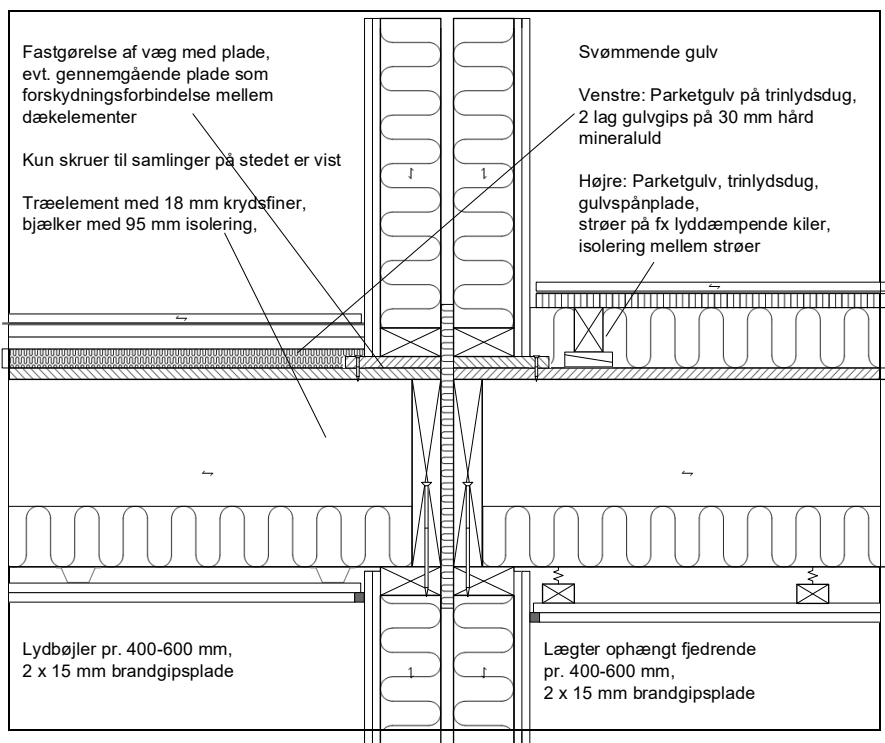
Lydisolationskriterier i BR18 og DS 490	Lydklasse B i DS 490:2018	BR18 _{anbef} BR18's anbefaling for lette konstruktioner	BR18 _{krav} BR18 krav = Lydklasse C
Luftlyd	$R'_{w,50} \geq 58$ dB	$R'_w \geq 55$ dB $R'_{w,50} \geq 53$ dB	$R'_w \geq 55$ dB
Trinlyd	$L'_{n,w,50} \leq 48$ dB $L'_{n,w} \leq 48$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB $L'_{n,w,50} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB

Der benyttes følgende forkortelser for lydisolationsbegreberne: $R'_w + C_{50-3150} = R'_{w,50}$ og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = L'_{n,w,50}$

Etagedæk

Det typiske udgangspunkt for et etagedæk er præfabrikerede dækelementer med fx 45 x 295 mm bjælker pr. 600 mm med beklædning på oversiden af 18 mm krydsfiner eller 22 mm spånplade, min 95 mm mineraluld mellem bjælkerne og et nedhængt loft med lydbøjler og to lag gipsplade på undersiden, se Figur 6.1. Ovenpå dette element lægges et svømmende gulv, der kan udføres på mange forskellige måder, se afsnittet *Svømmende gulv*.

Det bemærkes, at i praksis vil kravet til luftlyd for denne type konstruktion være overholdt når trinlydkravet er opfyldt, så der bør fokuseres på at sikre at trinlydniveauet svarer til det ønskede.



Figur 6.1. Typisk opbygning af knudepunkt mellem boligadskillende dæk og dobbeltvæg med træelementer. Der er vist to eksempler på nedhængt loft og to eksempler på svømmende gulvopbygning. Strøgulve udføres i praksis ofte med større højde end vist og det nedhængte loft til højre med stålprofil i stedet for trælægte. Lodret snit.

Træelement og loft

Stor højde af hulrummet fra underside af træpladen på bjælkerne til overside af gipspladerne i loftet bidrager til lydisoleringen, på samme måde som hulrumdybden i boligadskillende vægge. Stor bjælkehøjde, og dermed stivhed, bidrager også til bedre komfort ift. svingninger ved gang på dækket og dermed bedre trinlydforhold.

Hulrummet mellem bjælkerne kan være mere eller mindre udfyldt med mineraluld, men der forventes kun en lille forskel i lydisoleringen, hvis blot densiteten er over et vist minimumsniveau aht. strømningsmodstanden. Der kan forventes ca. 1 dB forbedring ved at fylde hulrummet (næsten) op, fremfor at anvende 95 mm som normalt.

Lydbøjler, der i nogen grad afkobler gipspladebeklædningen på loftet fra træelementet, findes i forskellige udformninger med forskelligt pladsbehov. Næsten alle tilgængelige måleresultater gælder for 25 mm hat-formede tyndpladeprofiler, der fastgøres til hver bjælke i den ene side. Disse profiler placeres typisk pr 300-400 mm og bærer mineraluldspladerne. Det svarer til mindst 4 fastgørelser pr m². Færre lydbøjler kan være en lydmæssig fordel, men den optimale virkning for en given type opnås kun indenfor et vist interval af masse pr. forbindelse. Større afstand kan desuden give problemer med planheden af loftet.

Undertiden anvendes krydslægning på undersiden af bjælkelaget, som kan give en mindre forbedring af trinlydisolationen, men det er ikke muligt at afgøre, om forbedringen er større end en tilsvarende forhøjelse af bjælkerne, der samtidigt øger stivheden.

En anden type lydbøjler er baseret på, at en lægte af tyndpladestål ophænges i bøjler. Her er det tilstrækkeligt med ca. 2 fastgørelser pr m², men konstruktionshøjden øges

ca. 30 mm. Med denne type må loftet formentlig monteres på stedet og der skal indlægges tråd eller net til at fastholde isoleringen. Der foreligger desværre ikke målinger, hvor de to typer lydbøjler kan sammenlignes direkte, men alt andet lige vil den større højde af hulrummet være fordelagtig. Et tilsvarende system med ophængning af trælægter har også været anvendt.

Af brandhensyn anvendes i praksis en loftbeklædning af 2 x 15 mm brandgipsplade. Tidligere er typisk anvendt 2 x 13 mm almindelig gipsplade. Der kan forventes en lille forbedring af trinlyddæmpningen.

Hvis isoleringen mellem bjælkerne ikke kan bæres af lydbøjlerne, må der indlægges tråd eller et net. Der må ikke anvendes en tæt plade, da det reducerer den frie højde og dermed reducerer virkningen af det nedhængte loft.

Pladen på oversiden af elementet kan være perforeret, da hulrumshøjden så kan regnes til oversiden af isoleringen i det svømmende gulv. Hvor stor effekten er, er svært at bedømme, men i Norge markedsføres spånplader med slidser til formålet.

Svømmende gulv

For at overholde trinlydkravene vil der generelt være behov for, at der mellem selve gulvbelægningen og træpladen på dækelementets overside indlægges trinlyddæmpende materiale samt masse.

I Figur 6.1 vises til venstre et typisk fladelejret gulv, hvor en gulvbelægning, fx et parketgulv på en trinlyddug, lægges på to lag gulvgips, der forøger gulvets fladevægt, og 30 mm trykfast mineraluld som trinlyddæmpende lag. Massen ligger over det trinlyddæmpende lag, hvor den virker bedst. Opbygningen kan forventes at opfylde BR18_{krav}, og det er også muligt at opfylde BR18_{anbef} ved høj stivhed i dækkene og omhyggelighed i udførelsen.

Til højre i Figur 6.1 vises et parketgulv på et trinlyddæmpende lag lagt på gulvspånplade på strøer. Pladerne kan være sporede til gulvvarmeslanger. Strøerne skal understøttes på en trinlyddæmpende opklodsning, fx kiler med en trinlyddæmpende underside. Der udlægges mineraluld mellem lægterne. Opbygningen giver mulighed for føring af mindre installationer under gulvet. De få byggerier, der foreligger målinger fra, viser at der kan opnås god trinlyddæmpning ved omhyggelig udførelse, endda lydklasse B sammen med et lydbøjlesystem med ophængte stålprofiler og få fastholdelser.

Lydisoleringen vil alt andet lige forbedres, hvis der indlægges yderligere masse i gulvet. Målinger på bygninger, hvor der er indlagt 40-50 mm sand eller sten, indikerer dog ikke nogen stor forbedring, men følsomheden for fejl i udførelsen kan måske være lidt mindre. Nogenlunde det samme gælder udstøbning af beton eller lignende i stedet for gulvgips.

En særdeles god trinlyddæmpning, blev opnået i et finsk forsøgsbyggeri, hvor bjælker og krydsfinerplade blev erstattet af et 300 mm tykt "T-T-dæk" af en LVL plade forbundet til LVL bjælker pr. 600 mm (LVL = Laminated Veneer Lumber). Det giver en meget stiv konstruktion, som også teoretisk er en fordel.

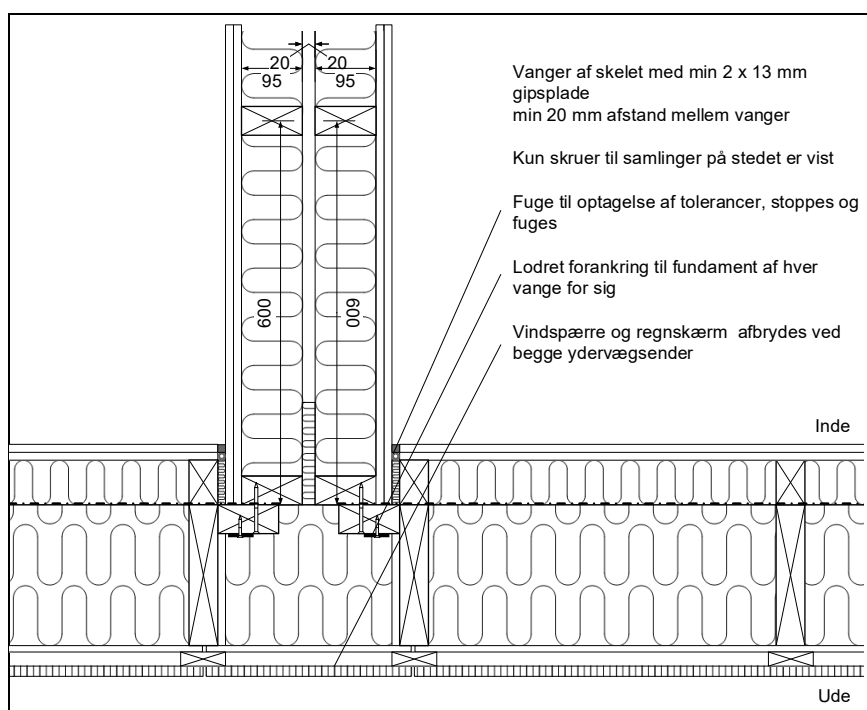
Der vil – for det dominerende lavfrekvente trinlydniveau – ikke være stor forskel på om der anvendes gulvbelægning af parketgulv, vinyl eller tæppe.

Boligadskillende væg

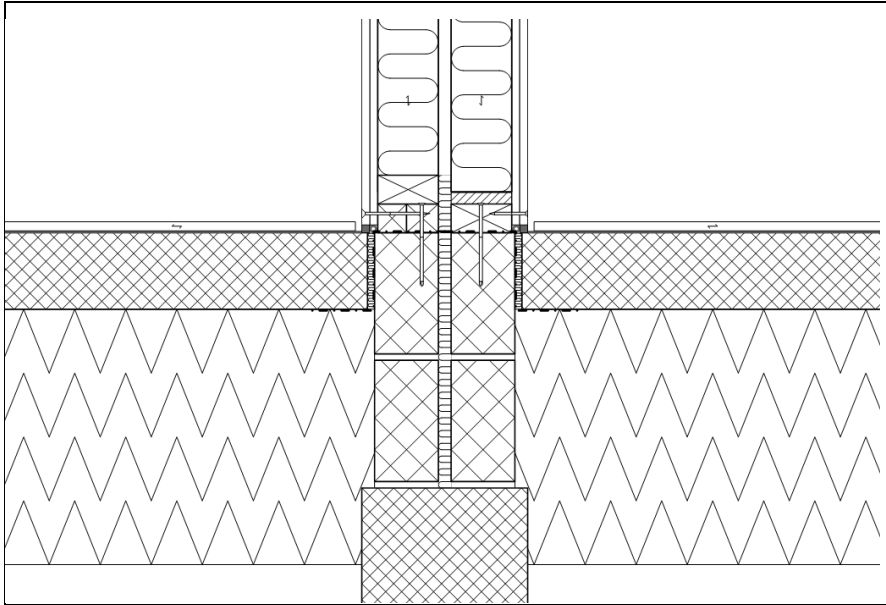
Vægopbygning

I praksis anvendes altid dobbeltvægge med to uafhængige vanger og lyddæmpende isolering mellem stolperne, se Figur 6.2. Som udgangspunkt betragtes en væg, hvor hver vange består af 45 x 95 mm stolper pr 600 mm, beklædning af 2 lag 13 mm gipskartonplade og mindst 20 mm afstand mellem vangerne. Den samlede vægtykkelse bliver i praksis mindst 260 mm og vil med stor sandsynlighed opfylde kravene BR18_{anbef}, altså lydklasse C med korrektion for lave frekvenser. I mange tilfælde opfyldes også kravene til lydklasse B, men om det opnås, er ret følsomt for fejl i udførelsen.

Lydisolationen kan forbedres, hvis der anvendes 3 lag gipsplade fremfor 2, hvilket øger sandsynligheden for at opnå lydklasse B. Der er dog ingen eksperimentel verifikation af bidraget.



Figur 6.2. Typisk opbygning af boligadskillende træskeletvæg med to uafhængige vanger samt tilslutning til ydervæg. Vandret snit (lodret snit vist i Figur 6.1).



Figur 6.3. Boligadskillende væg og dens fundament. Der vises to lidt forskellige løsninger på tilslutningen til fundament. Lodret snit.

Anvendelse af gipsplader med højere fladevægt, fx 2x15 mm brandgips, som ofte anvendes af brandhensyn, vil øge lydisolationen, især ved lave frekvenser.

En større vægtykkelse giver større indvendig afstand mellem beklædningerne og bør forbedre lydisolationen (fordi resonansfrekvensen reduceres), men effekten kan være svær at påvise i målinger. Ved bærende vægge anvendes ofte stolper 45 x 120 mm, hvilket øger afstanden (og vægtykkelsen) med 50 mm. Det kan i bedste fald give en forbedring på 1-2 dB.

En lille gevinst kan opnås, hvis afstanden mellem skeletterne også udfyldes med blød mineraluld, men isoleringen må ikke have overhøjde.

Hvis der også opsættes et pladelag på skelettet på siden mod hulrummet, forringes lydisolationen, da det svarer til at reducere hulrumdybden. Der kan dog godt placeres en membran, fx af hensyn til vejrligssikring under transport og udførelse.

Af hensyn til bygningens overordnede stabilitet er der ofte ønske om en forbindelse mellem dækkene hen over lejlighedsskellet. Det sker ved at placere en strimmel krydsfiner mellem dækkene, som indikeret på Figur 6.1, men ikke uden lydmæssige konsekvenser, selv om den placeres under det svømmende gulv og der udføres en samling på begge sider, så lydbroen brydes bedst muligt. Målinger tyder på en forringelse på typisk 3 dB. For 2-etages boliger vil stabiliteten normalt kunne sikres i endehusene alene, så der ikke er behov for forbindelse hen over lejlighedsskellet.

Tilslutning til ydervæg

Ved tilslutningen til ydervæggen er det afgørende, at der ikke er faste forbindelser mellem vangerne, heller ikke via ydervæggens skelet, se Figur 6.2. Ved ydersiden kan der dog være forbindelse via vindspærre og regnskærm, men de bør udføres som strimler, så lydbroen brydes på begge sider.

Lodret forankring til underliggende konstruktioner skal som vist på Figur 6.2 ske separat for hver vange.

Tilslutning til fundament

Fundamentet under den boligadskillende væg skal være todelt mindst ned til 300 mm under oversiden af terrændækkets betonplade, se Figur 6.3 øverst. Den hule del udføres ofte med letklinkerblokke, hvor hulrummet udfyldes med mineraluld.

Sammenfatning

For løsninger baseret på sædvanlige præfabrikerede træskelelementer er indsamlet en del målerapporter fra både nyere byggerier og forsøgsbyggerier fra begyndelsen af 2000-tallet. Der er rimelig overensstemmelse mellem måleresultaterne for ensartede løsninger, men også forskelle som peger på, at kvaliteten i detaljer og udførelse har stor betydning.

Med rimelig omhyggelighed er det muligt at opfylde BR18_{anbef} for lette bygningsdele, altså med hensyntagen til frekvenser ned til 50 Hz. Det er tillige muligt at opfylde kravene til lydklasse B, men kun ved meget stor omhu i projektering og udførelse.

Det er overraskende, at massen ikke synes at have stor betydning for resultaterne, så det er muligt at opbygge ret enkle dækløsninger med lav miljøbelastning, der opfylder trinlydkravene også med hensyntagen til lave frekvenser. Masse kan dog også bidrage til tilfredsstillende vibrationsforhold. Lette træskelelementer kan være vibrationsfølsomme, hvorfor der skal tages særlige hensyn.

Kilder

- Hveem, S., Homb, A., Hagberg, K., & Rindel, J. H. (1996). *Low-frequency footfall noise in multi-storey timber frame buildings*. (NKB Committee and Work Reports 1996:12E); Nordic Committee on Building Regulations, Helsinki. Reference [44].
 - Nordic Wood (1997). *Flervånings trähus*. Reference [60].
 - Lydmålerapporter fra Hørsholm og Herning. (Seminar: Etagehuse af træ – CASA NOVA, 30. okt 2000).
 - Hveem, S. 2000. *Trehus i flere etasjer. Lydtekisk projektering* (Byggforsk Anvisning 37, 2000) Reference [45].
 - SP (2007). *Ljudisolering i trähus*. SP Rapport 2007:78. Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2007. Reference [61].
 - Munch-Andersen, J. *Træskelethuse* (TRÆ 56). Træinformation, 2008. Reference [62].
 - *Lydisolerende etasjeskillere med trebjelkelag. Målte verdier* (Byggforskserien, Byggdetaljer 522.512). SINTEF, 2016. Reference [63].
 - *Lydisolation for innervegger av bindingsværk* (SINTEF Byggforskserien, Byggdetaljer 524.325). SINTEF, 2020. Reference [64].
 - *Robust Details Part E*. Robust Details, 2022. Reference [48].
 - Lydmålerapporter fra nyere danske træbyggerier 2014-2022 (ikke tilgængelige).
- Se også Appendix D – Måleresultater træskeletbyggeri.

7 Konstruktionstype 3: Rumstore træmoduler (præfabrikerede)

Dette kapitel handler om lydisolationskrav for etageboligbyggeri opbygget af rumstore, præfabrikerede træmoduler. Med hensyn til andre fagområder, bl.a. statik og brand, henvises til andre publikationer.

Formål

Dette afsnit beskriver etageboligbyggeri opbygget på lokationen af rumstore træmoduler, der er præfabrikerede. Modulerne består af gulv-, væg- og loftelementer, i trækonstruktioner udført på fabrik og samlet til ét stort rummodul. Modulerne bygges under kontrollerede forhold i opvarmede fabrikshaller, og man undgår derfor fugt i trækonstruktionerne eller andre skader pga. vejrliget eller monteringsforholdene på en byggeplads. Efter transport til byggepladsen, samles modulerne, der tilsammen danner den kommende bygning, hvor facadebeklædningen til slut monteres. Fordele ved rumstore moduler er bl.a., at byggeperioden kan forkortes, da fundamenter og terrænarbejde kan forgå sideløbende, mens modulerne bliver produceret på fabrikken.

Der bygges typisk med 2-3 etager, men der er mulighed for at bygge i op til 4-6 etager, afhængigt af forholdene. Modulerne har en max højde på 4,1 m grundet transport, hvilket kan give en indvendig rumhøjde fra 2,5 m og op til ca. 3,2 m, afhængigt af projektet.

Der findes flere producenter i Danmark, og der importeres også rummoduler fra udlandet, men omfanget kendes ikke.

Lydisolationskrav

Der lægges i projektet vægt på så vidt muligt at vise løsninger, der kan forventes at opfylde grænseværdierne for BR18_{anbef}, altså med korrektion for lave frekvenser.

Tabel 7.1. Anvendte kvalitetsniveauer for boligadskilende konstruktioners lydisolationskrav.

Lydisolationskriterier i BR18 og DS 490	Lydklasse B i DS 490:2018	BR18 _{anbef} BR18's anbefaling for lette konstruktioner	BR18 _{krav} BR18 krav = Lydklasse C
Luftlyd	$R'_{w,50} \geq 58$ dB	$R'_w \geq 55$ dB $R'_{w,50} \geq 53$ dB	$R'_w \geq 55$ dB
Trinlyd	$L'_{n,w,50} \leq 48$ dB $L'_{n,w} \leq 48$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB $L'_{n,w,50} \leq 53$ dB	$L'_{n,w} \leq 53$ dB

Der benyttes følgende forkortelser for lydisolationsbegreberne: $R'_w + C_{50-3150} = R'_{w,50}$ og $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} = L'_{n,w,50}$

De danske producenter af rummoduler er forespurgt om feltmåleresultater, og der er modtaget flere rapporter, der viser overholdelse af BR18_{krav}, men det har ikke været muligt at få målerapporter med lave frekvenser inkluderet for danske byggerier. Der forestår således en efterlysning af målerapporter, der dokumenterer overholdelse af BR18_{anbef}.

Der er tillige søgt på SINTEF efter tekniske godkendelser for rummoduler til boligbyggeri. Disse indeholder alle udsagn relateret til de norske lydkrav for boligbyggeri i NS 8175:2012, der svarer til de danske lydisolationskrav. Seks af godkendelserne blev gennemgået. Én af disse overholder ikke kravene til boligbyggeri, de fem andre

angiver forventet overholdelse af lydkravene. To af disse godkendelser beskriver også forventet overholdelse af de skærpede krav i NS 8175:2019, hvor frekvenser ned til 50 Hz er medtaget. Disse to producenter blev kontaktet om feltmålerapporter, og der er modtaget i alt syv målerapporter, fire af dem fra norske byggerier, en fra Sverige og to fra Finland, ingen fra Danmark.

Konklusionen mht. overholdelse af lydkrav er, at det for feltmålinger udført i Danmark kun er BR18_{krav}, der er påvist overholdt, mens anbefalingen BR18_{anbef} ikke er påvist overholdt. Ved kommende feltmålinger bør lave frekvenser inkluderes, så det kan vurderes, om BR18_{anbef} kan overholdes.

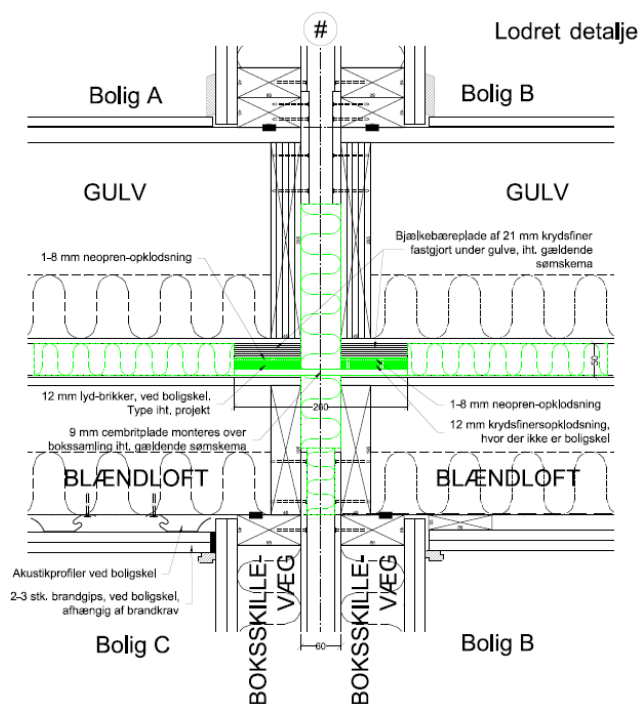
Bygningsdele

Detalløsningerne er udviklet af de enkelte producenter og tilhører disse. Der foregår derfor ikke på samme måde som for etageboligbyggeri af CLT eller træskelelelementer en dybtgående, individuel projektering af alle detaljløsninger hos en rådgiver eller entreprenør.

Eksempler på principløsninger er vist i det følgende på to lodrette snit mellem boliger og et vandret snit med en boligadskillende væg og samling mod facade. I de forklarende tekster og på tegningerne er anvendt "lydbrikker" som en forkortelse for vibrations- og lydæmpende gummi.

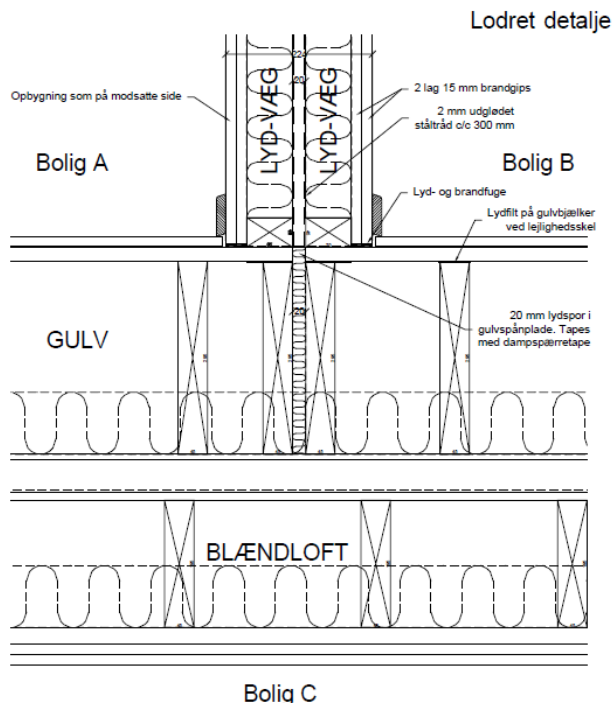
Etagedæk

Figur 7.1 viser opbygning af etagedæk i boligerne og hulrum mellem modulerne (42 mm lodret og 50 mm vandret). Den grønne signatur viser mellemlæg monteret på byggepladsen. Ved vandrette boligskel udlægges "lydbrikker", der er dimensioneret i den korrekte elasticitet/hårdhed til projektet. Loftet i den nederste bolig er forsynet med lydbøjler/akustikprofiler. Gulvet på den overliggende bolig er forsynet med lydfilt. Samlet konstruktionstykkelse er 651 mm (loft 264 mm, hulrum 50 mm og gulv 264 mm).



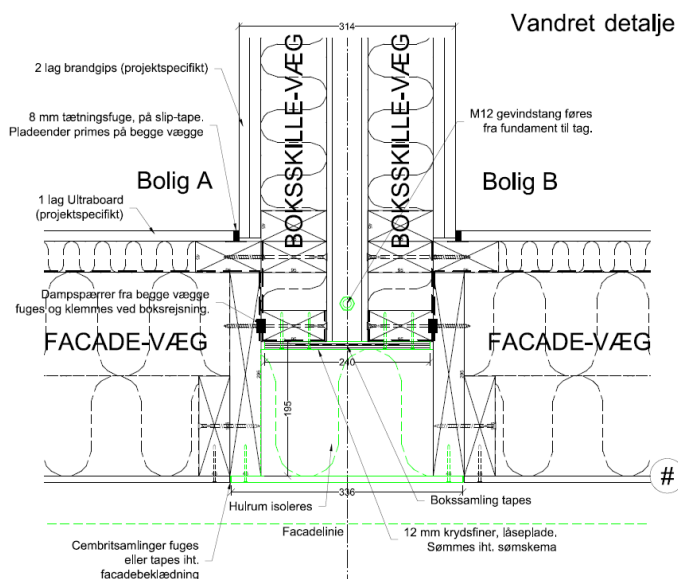
Figur 7.1. Lodret snit af etagekryds mellem fire boliger/rummoduler. Tegning leveret af Scandibyg A/S.

Figur 7.2 viser opbygning af etagedæk og lyd- og brandvæg mellem boligerne. Nederste modul tilhører bolig C og øverste modul er opdelt i to boliger, Bolig A og B. Nederste modul (Bolig C) har lydbøjler og 2 lag brandgips på loftet. Der er 50 mm hulrum mellem nederste og øverste modul, hvori der er udlagt "lydbrikker" dimensioneret i korrekt hårdhed. Øverste modul har yderligere en boligopdeling (Bolig A og B), hvor gulvspånpladen er brudt, med 20 mm lydspor. Boligerne i øverste modul er adskilt med to vægge, der står med 20 mm afstand.



Figur 7.2. Lodret snit mellem rummoduler. Lyd- og brandvæg mod gulv i øverste modul, der er opdelt i to boliger. Tegning leveret af Scandibyg A/S.

Boligadskillende vægge og tilslutning til facade



Figur 7.3. Vandret snit af boligadskillende væg, bokssamling vandret og samling med facade. Den grønne signatur viser mellemlæg monteret på byggepladsen. Tegning leveret af Scandibyg A/S.

Figur 7.3 viser et vandret snit, hvor to moduler, lodret, samles med 12 mm krydsfiner, på byggepladsen. Der er 42 mm hulrum imellem modulerne. Den grønne signal er udførelse på byggepladsen. I hulrummet mellem modulerne er der plads til at føre en lodret gevindstang fra fundament til tag. Samlet bredde af de to boksskillevægge, inkl. hulrum, er 314 mm.

Montage på byggepladsen, eksempel beskrivelse

Detailprojektering af samlinger og montage af rummodulerne udføres som regel af modulproducenterne, hvilket bidrager til at sikre kvaliteten af byggeriet.

Modulerne bliver placeret på stribefundamenter eller punktfundamenter og forankret hertil, fx via en gennemgående forankringsstang, der går fra fundament til tag. Der er 30-60 mm afstand mellem modulerne, vandret og lodret, således at de lydmæssigt er adskilt og eventuelle tolerancer kan optages. Modulerne samles indbyrdes, typisk med krydsfiner eller lign. for at opnå skivevirkning. Hvor der er vandrette boligskel, placeres "lydbrikker" i hulrummene mellem modulerne med en elasticitet/hårdhed, der er dimensioneret til det aktuelle projekt. I øvrigt følges producentens monteringsanvisninger.

Feltmåleresultater

Der er fremskaffet danske feltmåleresultater, hvor $BR18_{krav}$ er overholdt, men målingerne inkluderer ikke lave frekvenser ned til 50 Hz, så det er ikke eftervist, om $BR18_{anbefal}$ kan overholdes.

Der er fremskaffet måleresultater fra udenlandske producenter for feltmålinger i bl.a. Norge, hvor resultaterne viser overholdelse svarende til $BR18_{befal}$, dvs. med lave frekvenser inkluderet.

Sammenfatning

Der findes danske feltmåleresultater, hvor $BR18_{krav}$ er overholdt, men målingerne inkluderer ikke lave frekvenser ned til 50 Hz, så det kan ikke eftervises, om $BR18_{anbefal}$ kan overholdes. Der er fra udenlandske producenter af rummoduler fremskaffet feltmåleresultater fra bl.a. Norge, men det er ønskeligt at få måleresultater for $BR18_{befal}$ verificeret for byggeri i Danmark.

Kilder

- Tegninger fra Scandibyg A/S.
- Feltmålerapporter udført for Scandibyg A/S af Riis akustik A/S.
- Tekniske godkendelser for rummoduler for boligbyggeri: <https://www.sintefcertification.no/Contents/Index/151>
- Feltmålerapporter fra to af producenterne (Kodumaja og Harmet).

8 Resumé, konklusioner og projektforslag

Resumé & Konklusioner

Projektets hovedformål var at etablere en samling generiske konstruktionsløsninger for etageboligbyggeri af træ – anvendelige for rådgivere uden erfaring i bygningsakustik – og ”robuste”, så der ville være rimelig sikkerhed for overholdelse af BR18 lydkrav og anbefalinger. Imidlertid viste det sig i projektførløbet, at der i Danmark er meget få etageboligbyggerier af træ og yderst få målinger tilgængelige. Desuden påpegede lydeksperterne i følgegruppen meget klart de store usikkerheder i projektering og udførelse af træbyggeri, og at bl.a. visuel inspektion og ofte målinger undervejs i byggeprojektet er nødvendige i nogle typer træbyggerier. Der blev også efterlyst viden om sammenhæng mellem vibrationer og lavfrekvent trinlyd.

Igennem 60 år har dansk etageboligbyggeri primært været bygget af betonelementer, og der findes konstruktionsløsninger, som er udviklet gennem en årrække og som rigtigt udført giver acceptable/gode lydforhold med opfyldelse af lydkravene. – For træbyggeri (og andet let byggeri) er det imidlertid en udfordring at efterleve bygningsreglementets lydkrav. Trinlyd medfører de største gener. Selv med overholdelse af bygningsreglementets minimumskrav kan der hos beboerne i lette byggerier konstateres gener fra utilfredsstillende lydforhold, da frekvensområdet ned til 100 Hz er utilstrækkeligt i forhold til de oplevede gener. Der kan også optræde komfortproblemer som følge af svingninger, der opstår ved almindelig gang eller løben på gulvet.

Frem til ca. år 2000 var der flere nordiske forskningsprojekter om lydisolations i etageboligbyggeri af træ, se fx [44] og [45]. Norge og Sverige var foregangslande og har siden dengang gennemført store forskningsprojekter med lydisolations som hovedtema. I Danmark blev der i 1999 udgivet to projektrapporter [11] og [12] vedrørende de danske lydisolationskrav for etageboligbyggeri. Resultaterne fra [11] har dannet grundlag for kravene i Bygningsreglement 2008 med skærpelser for både luftlyd og trinlyd, men stadig kun med frekvensområde ned til 100 Hz. I [12] fokuseres på lydbestemmelser for let byggeri med anbefalinger, der inkluderer frekvensområdet ned til 50 Hz for vægge og etagedæk med fladevægte under hhv. ca. 100 kg/m² og 250 kg/m². I det svenske bygningsreglement har der siden 1999 været krav til lydisolations, der inkluderer frekvenser ned til 50 Hz. Nyere svenske projekter påviser endda for trinlyd en betydeligt større sammenhæng mellem måleresultater og beboergener, hvis der anvendes trinlydresultater ned til 25 Hz.

De standardiserede beregningsmetoder i EN ISO 12354 [26] til beregning af lydisolations i bygninger har igennem en længere årrække været benyttet for betonbyggeri, men de er ikke uden videre velegnede til træbyggeri pga. trækonstruktioners inhomogenitet, træs mindre ensartede materialeegenskaber og de meget komplekse konstruktionsløsninger og samlinger i træbyggeri, hvilket tilsammen betyder store usikkerheder. Der arbejdes dog på at udbygge erfaringsgrundlaget for træbyggeri.

De danske erfaringer med træbyggeri afhænger af konstruktionstyperne. Der er bedst kendskab til træbyggeri med træskeletelementer og rumstore moduler, som har eksisteret på det danske marked i nogle årtier. Sammenlignet hermed er erfaringerne med massivtræbyggeri meget beskeden både i Danmark og i udlandet. Herunder er angivet nogle overordnede erkendelser opnået i projektet.

Massivtræbyggeri

Der er kun meget få danske feltdata til rådighed og ikke nok til at beskrive konstruktionsløsninger. Måleresultater er meget følsomme over for samlingsmetoder og udførelse. Der efterlyses konstruktionsløsninger og feltmåleresultater, inkl. lave frekvenser, for byggerier med og uden tunge masselag. Det er vigtigt at opnå erfaring, så der ved projektering og byggeri af massivtræ opnås resultater, uden at projekterings- og byggeprocessen opleves som et lotteri eller eksperiment.

Træskelelelementer

For løsninger baseret på sædvanlige præfabrikerede træskelelelementer er indsamlet en del målerapporter fra både nyere byggerier og forsøgsbyggerier fra begyndelsen af 2000-tallet. Der er rimelig overensstemmelse mellem måleresultaterne for ensartede løsninger, men også forskelle som peger på, at kvaliteten i detaljer og udførelse har stor betydning. – Med omhyggelighed er det muligt at opfylde det anbefalede niveau i BR18 for lette bygningsdele, altså med hensyntagen til frekvenser ned til 50 Hz.

Rumstore moduler

Detailløsningerne er udviklet af de enkelte producenter og tilhører disse. Der foregår derfor ikke på samme måde som for etageboligbyggeri af massivtræ og delvist træskelelelementer en dybtgående, individuel projektering af alle detailløsninger hos en rådgiver eller entreprenør. For træbyggeri med rumstore moduler udføres detailprojektering af samlinger og montage af rummodulerne på byggepladsen som regel af modulproducenterne, hvilket bidrager til at sikre kvaliteten af byggeriet.

Der er indsamlet feltmåleresultater, som viser overholdelse af BR18_{krav}, men der savnes måleresultater for danske byggerier, hvor lave frekvenser er inkluderet.

Projektforslag

- Igangsætte dataindsamling af feltmåleresultater for lydisolations i træbyggeri, især for massivtræbyggeri med og uden tunge lag. Skal kombineres med oplysninger om konstruktionsløsninger med henblik på senere analyse.
- Undersøge og beskrive samlingsmetoder for massivtræelementer og betydning for knudepunktsdæmpning og lydisolations.
- Forskelle mellem lydisolations målt i laboratorium og felt – Erfaringsopsamling.
- Udarbejde vejledning om danske grænseværdier for nedbøjninger og vibrationer for træbyggeri.
- Feltundersøgelser med målinger af sammenhæng mellem lavfrekvent trinlyd og svingninger.
- Udarbejde forslag til kvalitetssikringsproces for lydkrav. Kunne fx indgå i en opgradering af FRI's ydelsesbeskrivelse samt i en separat ydelsesbeskrivelse for akustik.
- Opfølgning af kontakter til udenlandske institutter med igangværende lydprojekter for etageboligbyggeri af træ. Skaffe oplysninger om feltmåleresultater samt gerne etablere samarbejde.
- Skrive idéoplæg til etageboligbyggeri med forsøg med massivtræ og forskellige konstruktionsløsninger, inkl. et antal hybridløsninger.
- Status for usikkerheder ved brug af ISO-beregningsmetoder til træbyggeri.

Der er et stort potentiale i projektsamarbejde med udenlandske aktører. Det er nyttigt ad hoc at kontakte udenlandske eksperter med lignende problemstillinger. Men dybtgående diskussioner og aktiviteter kan kun få tilstrækkelig fokus i et projektfinansieret samarbejde.

Det overordnede formål med internationalt samarbejde er at få flere kompetencer og erfaringer i spil i bestræbelserne på udvikling af optimerede, robuste konstruktionsløsninger i træbyggeri og dermed løse lydisolations- og vibrationsproblemer bedst muligt.

9 Litteratur

Referencer

- [1] Indenrigs- og Boligministeriet (2021). National strategi for bæredygtigt byggeri. <https://im.dk/Media/637787884257325807/National%20strategi%20for%20b%C3%A6redygtigt%20byggeri-a.pdf>. ISBN 978-87-971298-8-3. Engelsk version, se: [https://im.dk/Media/637602217765946554/National Strategy for Sustainable Konstruktion.pdf](https://im.dk/Media/637602217765946554/National%20Strategy%20for%20Sustainable%20Construction.pdf)
- [2] *Bygningsreglement 2018*. København, Denmark. <http://byggningsreglementet.dk>
<https://byggningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/17/Krav>
Note: Alle tidligere bygningsreglementer findes på:
<https://historisk.byggningsreglementet.dk/tidligerebyggreg/0/40>
- [3] BSST (2023). *Bygningsreglementets vejledning om lydforhold*.
<https://byggningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/17/Vejledninger>
- [4] DS 490:2018, *Lydklassifikation af boliger*. Dansk Standard, København.
- [5] BUILD & BPST & DAS (2022). *Lydisolation i træbyggeri – Erfaringer fra udlandet*. Temamøde 17. juni 2022. Arrangører: BUILD, AAU-CPH, Bolig- og Planstyrelsen, Dansk Akustisk Selskab.
- [6] DS/EN ISO 16283-1 (2014), *Akustik – Feltmåling af lydisolation i bygninger og af bygningselementer – Del 1: Luftlydisolation* (Acoustics -- Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation)
- [7] DS/EN ISO 16283-2 (2020), *Akustik – Feltmåling af lydisolation i bygninger og af bygningselementer – Del 2: Trinlydisolation* (Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation)
- [8] DS/EN ISO 717-1 (2020), *Akustik – Vurdering af lydisolation i bygninger og af bygningsdele – Del 1: Luftlydisolation* (Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation)
- [9] DS/EN ISO 717-2 (2020), *Akustik – Vurdering af lydisolation i bygninger og af bygningsdele – Del 2: Trinlydisolation* (Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation)
- [10] Boligministeriet (1997). *Lydforhold i bygninger - Lette konstruktioner*. Udarbejdet af Dan Brøsted Pedersen, DELTA Akustik & Vibration.
- [11] By- og Boligministeriet (1999). *Ajourføring af kravniveauet for lydforhold i etageboligbyggeri*. Udarbejdet af Dan Hoffmeyer, DELTA Akustik & Vibration.
- [12] By- og Boligministeriet (1999). *Lydkrav for lette konstruktioner*. Udarbejdet af Dan Brøsted Pedersen, DELTA Akustik & Vibration.
- [13] OIB (2019). *OIB-Richtlinie 5 Schallschutz 330.5-002/19*. Österreichisches Institut für Bautechnik, Wien, Austria. <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien/richtlinien/2019/oib-richtlinie-5>
- [14] NBN (2022). NBN S 01-400-1:2022, *Akoestische criteria voor woongebouwen* (Acoustic criteria for residential buildings).
- [15] *Miljöministeriets förordning om ljudmiljön i byggnader, 796/2017* (in Swedish). Miljöministeriet, Helsingfors, 2017. <https://www.finlex.fi/sv/laki/alkup/2017/20170796>
- [16] DIN (2018). DIN 4109-1:2018, *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen* (Sound insulation in buildings - Part 1: Minimum requirements). DIN, Berlin, Germany.
- [17] *Byggingarreglugerd 2012* - nr. 112/2012 med breytingum (Building regulations 2012 - No. 112/2012 with amendments, latest version 1278/2018). Reglugerðasafn, Reykjavík. <https://www.reglugerd.is/reglugerdir/allar/nr/112-2012>
- [18] *Byggteknisk Forskrift (TEK17). Veiledning om tekniske krav til byggverk*. (Regulations on technical requirements for building works). Direktoratet for byggkvalitet (Norwegian Building Authority), Oslo. <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/> Note: The latest version (April 2022) refers to Class C in NS 8175:2012 concerning acoustic requirements. (<https://dibk.no/globalassets/byggereglere/regulation-on-technical-requirements-for-construction-works--technical-regulations.pdf>)
- [19] Boverkets byggeregler, BFS 2011:6 (Building regulations, latest version with amendments BFS 2020:4 – BBR 29). Boverket (Swedish National Board of Housing, Building and Planning), Karlskrona, Sweden. <http://www.boverket.se/sv/lag--ratt/forfattningssamling/gallande/bbr---bfs-20116/>
- [20] Rasmussen B. (2019) *Sound insulation between dwellings – Comparison of national requirements in Europe and interaction with acoustic classification schemes*. Proceedings of ICA

- 2019, 23rd International Congress on Acoustics, Sept. 2019, Aachen, Germany. Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA e.V.). <https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239983>
- [21] Fredrik Ljunggren, Christian Simmons (2022). Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, Part III. *Applied Acoustics*, Volume 197, August 2022, 108955. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108955>
- [22] DIB (2016), "Lydforhold i boliger. Evaluering av byggt tekniske krav til lydforhold". Document code 127762-RIA-RAP-001. Direktoratet for byggkvalitet, Oslo, Norge. https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tek10-til-tek17/rapporter/lydforhold-i-boliger_samlerapport_sintef_toi_multiconsult_mars-2016.pdf
- [23] Løvstad, A. & J.H. Rindel. CO Høsøien, I Milford (2016). *Sound quality in dwellings in Norway – a socio-acoustic investigation*. Proceedings of BNAM 2016, Stockholm, Sweden.
- [24] Rasmussen, B., & Ekholm, O. (2019). *Nabostøj i danske etageboliger – Gener og potentielle helbredseffekter*. Miljø og sundhed, 25(3), 3-14. <http://miljoogsundhed.sst.dk/blad/ms1903.pdf>
- [25] Rasmussen, Birgit; Rindel, Jens Holger (1994). *Lydforhold i boliger - 'State-of-the-art'*. Bygge- og Boligstyrelsen, København.
- [26] EN ISO 12354:2017 Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms – Part 2: Impact sound insulation between rooms. – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.
- [27] DS/EN ISO 10140 (2021), *Akustik - Laboratoriemåling af bygningselementers lydisolering*. ISO 10140 (2021) Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements -- Part 1: Application rules for specific products -- Part 2: Measurement of airborne sound insulation -- Part 3: Measurement of impact sound insulation -- Part 4: Measurement procedures and requirements -- Part 5: Requirements for test facilities and equipment
- [28] DS/EN ISO 10848 *Akustik – Laboratorie- og feltmålinger af flanketransmission for luftlyd, trinlyd og lyd fra byggeteknisk udstyr mellem tilstødende rum*. ISO 10848 Acoustics – Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms. – Part 1 (2017): Frame document. Part 2 (2017): Application to Type B elements when the junction has a small influence. – Part 3 (2017): Application to Type B elements when the junction has a substantial influence. – Part 4 (2017): Application to junctions with at least one Type A element. – Part 5 (2020): Radiation efficiencies of building elements.
- [29] Christian Simmons, Fredrik Ljunggren (2022). *Såker utvärdering av stegljud i alla typer av byggnadsstommar – $L_{nT,w,25}$* Bygg & teknik 3/22, s.28-32. https://www.simmons.se/Files/Bygg-och-Teknik_AkuTimber_Simmons_Ljunggren_3-2022.pdf
- [30] Anders Homb (2007). Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere. SINTEF. Prosjektrapport 8. https://www.sintefbok.no/book/index/94/kriterier_for_opplevde_vibrasjoner_i_etasjeskillere
- [31] Anders Homb (2008). Vibrasjonsegenskaper til dekker av massivtre. SINTEF. Prosjektrapport 24. https://www.sintefbok.no/book/index/78/vibrasjonsegenskaper_til_dekker_av_massivtre
- [32] DS/EN 1995-1-1 DK NA:2019_Nationalt annekst til Eurocode 5: Trækonstruktions – Del 1-1: Generelt – Almindelige regler samt regler for bygningskonstruktions. <https://webshop.ds.dk/standard/M337037/ds-en-1995-1-1-dk-na-2019>
- [33] prEN 1995-1-1:2022: Eurocode 5: Trækonstruktions – Del 1-1: Generelt – Almindelige regler samt regler for bygningskonstruktions
- [34] Ettrup Petersen J (2020), Beregning af CLT-konstruktions, Træinformation.
- [35] Rasmussen, B. & Hoffmeyer, D. (2015). *Lydisolering mellem boliger i etagebyggeri – Kortlægning og forbedringsmuligheder*. SBI Rapport 2015:27. København. Adgang til SBI-rapport og målerapporter: <https://sbi.dk/Pages/Lydisolering-mellem-boliger-i-etagebyggeri-Kortlaegning-og-forbedringsmuligheder.aspx>; www.sbi.dk/sbi2015:27
- [36] Rasmussen, B. & Møller Petersen, C. (2014). *Lydisolering mellem boliger – eksisterende byggeri* (SBI-anvisning 243). SBI forlag, Aalborg Universitet København. www.anvisninger.dk/243
- [37] Rasmussen, B. (2021). *Lydisolering mod nabostøj i etageboligbyggeri - GOD PRAKSIS*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. <https://www.nabostoej.aau.dk>
- [38] Danmarks Statistik (2023). <https://statistikbanken.dk/>
- [39] Rasmussen, B., Hoffmeyer, D., & Olesen, H.S. (2017). *Udførelse af bygningsakustiske målinger* (2. udg.). (SBI-anvisning 217). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København.
- [40] Rasmussen, B., Petersen, C.M. & Hoffmeyer, D. (2011). *Lydisolering mellem boliger - nybyggeri* (SBI-anvisning 237). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet. Lokaliseret på: www.anvisninger.dk/237
- [41] Rasmussen, B. (2018). *Building acoustic regulations in Europe – Brief history and actual situation*. BNAM 2018, Reykjavik. Proceedings of the Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2018.
- [42] Rasmussen, T. V., Thybring, E. E., Munch-Andersen, J., Nord-Larsen, T., Jørgensen, U., Gottlieb, S. C., Bruhn, A., Rasmussen, B., Beim, A., Ramsgaard Thomsen, M., Munch-Petersen, P., Primdahl, M. B., Bentsen, N. S., Frederiksen, N., Koch, M., Auken

- Beck, S., Bretner, M-L., & Wittchen, A. (2022). *Biogene materialers anvendelse i byggeriet*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport 2022:09.
- [43] Buhl, J., Christensen J., & Maagaard, S.(2023). *Fremtidens biobaserede etagedæk - Akustiske tests af 23 biobaserede etagedæk, suppleret med analyser af CO2-aftrykket, økonomi og brandkrav*. Realdania, København. <https://realdania.dk/publikationer/faglige-publikationer/fremtidens-biobaserede-etagedaek>
- [44] Hveem, S., Homb, A., Hagberg, K., & Rindel, J. H. (1996). *Low-frequency footfall noise in multi-storey timber frame buildings*. NKB Committee and Work Reports 1996:12E; Nordic Committee on Building Regulations, Helsinki.
- [45] Hveem, S. (2000): *Trehus i flere etasjer. Lydtekisk projektering*. Byggforsk Anvisning 37, SINTEF, Norge.
- [46] Rasmussen, B. *Acoustic classification of dwellings – A growing diversity of sound insulation descriptors in national schemes in Europe*. ICA 2022 Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, Korea, 24–28 Oct. 2022.
- [47] Rasmussen, B. (2020). *Encouraging acoustic renovation of housing in Denmark by extending acoustic classification with two lower classes E and F for old housing*. In J. Yong Jeon (Ed.), Proceedings of 2020 International Congress on Noise Control Engineering: INTER-NOISE 2020 The Korean Society of Noise and Vibration Engineering.
- [48] Robust Details (2022). PART E ROBUST DETAILS, <http://www.robustdetails.com/>.
- [49] S Smith, D Baker, R Mackenzie, J B Wood, P Dunbavin, D Panter (2006). *The development of robust details for sound insulation in new build attached dwellings*. J Build Appraisal 2006;2 (1):69–85
- [50] NHBC (2014). *Sound progress - A review of homeowner feedback on noise in new homes*. NHBC Foundation. <https://www.nhbcfoundation.org/publication/sound-progress/>; <https://www.nhbcfoundation.org/wp-content/uploads/2016/05/NF56-Sound-progress.pdf>
- [51] Foreningen af Rådgivende Ingeniører og Danske Arkitektvirksomheder (2018). *Ydelsesbeskrivelse for Byggeri og Landskab 2018*. <https://www.frinet.dk/media/2131/ydelsesbeskrivelse-byggeri-og-landskab-2018.pdf>
- [52] RIA (2016). *Rådgivende ingeniør akustikk – Ytelser*. Rådgivende Ingeniørers Forening (RIF), Oslo. <https://rif.no/wp-content/uploads/2018/05/rif-ytelser-akustikk.pdf>; Note: Udarbejdet af <https://rif.no/fag-og-marked/ekspertgrupper/akustikk/>
- [53] Social- og Boligstyrelsen (2023). *Dokumentation af bygningsreglementets tekniske bestemmelser i forbindelse med færdigmelding af byggeriet*. <https://byggningsreglementet.dk/Administrative-bestemmelser/BRV/Dokumentationsvejledning>
- [54] SINTEF Byggedetaljer 522.891 (2009). Etasjeskillere i massivtre.
- [55] Heinz Ferk, Christopher Leh, Markus Mosing, Jan Kasim, Selina Vavrik-Kirchsteiger, Bernd Nusser (2022). *Sound.Wood.Austria - selected measurement results of building components for multi-storey timber construction in Austria*. Proceedings of Inter-Noise2022, Glasgow.
- [56] Rasmussen, B. & Møller Petersen, C., 2014. *Lydisolering af klimaskærmen*. 1 ed. SBI forlag. (SBI-anvisning; No. 244). www.anvisninger.dk/244
- [57] Treteknisk (2016). *Håndbok - bygge med Massivtreelementer. Hefte 5 Lyd*. <https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-5-Lyd.pdf>
- [58] SINTEF Byggedetaljer 520.205 (2023). *Planlegging av bygninger med KLT-elementer*. Under udarbejdelse, forventes publiceret maj 2023.
- [59] Anders Løvstad, Per Kåre Limesand (2021). *Consequences of revised sound insulation requirements between dwellings in Norway*. Proceedings of BNAM2021, Oslo, Norway. <http://www.norskakustiskselskap.org/bnam-2021/>
- [60] *Flervånings trähus*. (Nordic Wood, 1997)
- [61] SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (2007). *Ljudisolering i trähus*, SP Rapport 2007:78.
- [62] Munch-Andersen, J (2008). *Træskelethuse (TRÆ 56)*. Træinformation, Kongens Lyngby, Danmark. <https://www.traeinfo.dk/produkt/trae-56-traeskelethuse/>
- [63] Lydisolerende etasjeskillere med trebjelkelag. Målte verdier (Byggforskserien, Byggedetaljer 522.512). SINTEF, 2016.
- [64] Lydisolation for innervegger av bindingsværk (SINTEF Byggforskserien, Byggedetaljer 524.325). SINTEF, 2020.
- [65] SFS 5907:2022, *Rakennusten Akustinen Luokititus* (Acoustic classification of buildings), Finland.
- [66] SFS 5907:2004, *Rakennusten Akustinen Luokititus*, Finland. (English version 2005: Acoustic classification of spaces in buildings). A revised version was published in Dec. 2022.
- [67] IST 45:2016, *Hljóðvíst - Flokkun íbúðar- og atvinnuhúsnæðis* (Acoustic conditions in buildings - Sound classification of various types of buildings), Icelandic Standards, Iceland. Note: For more information, see Guðmundsson, S (2016). Acoustic Classification and Building Regulations. Nordic/Baltic Harmonization? Proceedings of BNAM2016.
- [68] NS 8175:2019, *Lydforhold i bygninger - Lydklasser for ulike bygningstyper* (Acoustic conditions in buildings - Sound classification of various types of buildings), Standards Norway. English version published March 2020.

- [69] SS 25267:2015, *Byggakustik – Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Bostäder* (Acoustics – Sound classification of spaces in buildings – Dwellings). Swedish Standards Institute, Stockholm, Sweden.
- [70] Rasmussen, B (2010). *Sound insulation between dwellings - Requirements in building regulations in Europe*. *Applied Acoustics*. 71(4):373-385. DOI [10.1016/j.apacoust.2009.08.011](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011)
- [71] Rasmussen, B, Rindel JH (2010). *Sound insulation between dwellings - Descriptors applied in building regulations in Europe*. *Applied Acoustics*. 71(3), 171-180. Available from: [10.1016/j.apacoust.2009.08.011](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2009.08.011)
- [72] Rasmussen, B. (2020). *Encouraging acoustic renovation of housing in Denmark by extending acoustic classification with two lower classes E and F for old housing*. In J. Yong Jeon (Ed.), Proceedings of 2020 International Congress on Noise Control Engineering: INTER-NOISE 2020 The Korean Society of Noise and Vibration Engineering
- [73] Rasmussen, B. *Acoustic classification of dwellings – A growing diversity of sound insulation descriptors in national schemes in Europe*. ICA 2022 Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, Korea, 24–28 Oct. 2022.

Websites & Databaser

I de nordiske lande bruges primært software-programmerne CadnaB, BASTIAN and SONarchitect til beregning af lydisolering efter metoderne i EN ISO 12354 [26]:

- **CadnaB**. DataKustik *CadnaB – The building acoustics planning system* <https://www.datakustik.com/products/cadnab/>
- **BASTIAN**. DataKustik *The Building Acoustics Planning System*
- **SONarchitect**. Sound of Numbers <https://www.soundofnumbers.net/>

Der kan abonneres på nordiske inputdata gennem <https://www.sonusoft.com/home>. Der synes også at være en SW-pakke på vej vedrørende prediktering af luftlyd og trinlyd i træbyggeri, se <https://www.sonusoft.com/acoulatis>

Andre links til programmer, data og information om træ

Acoubat by CYPE. <https://info.cype.com/en/product/acoubat-by-cype/>

Lignumdata Construction products and components. [LIGNUM – Holzwirtschaft Schweiz](https://www.lignumdata.com)

Tysk informationstjeneste træ. [www.informationsdienst-holz](https://www.informationsdienst-holz.de)

Tyskland, Informationsdienst Holz: <https://informationsdienst-holz.de/>

Dataholz.eu. Materiale- og konstruktionsdata <https://www.dataholz.eu/>

Sverige: skogsindustrierna: <https://www.skogsindustrierna.se/>

Svenskt Trä: <https://www.svenskttra.se/>

UK, Wood for good: <https://woodforgood.com/>

Østrig, Proholz: <https://www.proholz.at/>

Træ.dk – Danmarks Træportal: <https://www.trae.dk/>

Træ i Byggeriet <https://traeibyggeriet.dk/>

Træinformation <https://www.traeinfo.dk/>

Treteknisk <https://treeteknisk.no/>

TreFokus AS • Wood Focus Norway www.trefokus.no

Konstruktioner: <http://www.trefokus.no/proff/artikler/a-bygge-med-tre/byggesystemer-for-massivtre>

National Research Council Canada <https://nrc.canada.ca/en>

Appendiks A – Lydklasser for boliger i Norden

Baggrunden for at vise tabellerne i dette Appendiks er en lang række udsagn og diskussioner om andre landes lydisolationsbegreber og grænseværdier.

I Tabel A.1 er vist ISO 717 lydisolationsbegreber for feltmålinger, luftlyd og trinlyd.

I de følgende to tabeller, Tabel A.2 for luftlydisolation og Tabel A.3 for trinlydniveau, er vist de nordiske landes lydklassekriterier for boliger. Lydisolationskrav for etageboliger i de nordiske lande indgår i rapportens Tabel 2.3 og 2.4. Referencer til lydkravene i disse tabeller er [3] og [13]-[19], se kap. 2. Referencer til lydklasserne i de nordiske lande er [4], [65], [67], [68] og [69] som angivet i Tabel A.2 og A.3. De finske lydklasser i [66] gældende indtil december 2022 er angivet i en note i tabellerne, men findes også i [73].

Lydisolationskrav for 35 lande findes i [20], som dog ikke er opdateret til 2023, og information om udviklingen af lydkrav og lydklasser er beskrevet i bl.a. [70], [71], [72] og [73].

Table A.1 - Overview ISO 717 descriptors for evaluation of sound insulation in buildings, [8] og [9].

Note: For laboratory tests, the descriptors are R_w and $L_{n,w}$ for airborne and impact sound insulation, respectively.

ISO 717:2020 descriptors for evaluation of field sound insulation	Airborne sound insulation between rooms (ISO 717-1) ^(b)	Airborne sound insulation of facades ^(a) (ISO 717-1) ^(b)	Impact sound insulation between rooms (ISO 717-2) ^{(b), (c)}
Basic descriptors (single-number quantities)	R'_w $D_{n,w}$ $D_{nT,w}$	R'_w $D_{n,w}$ $D_{nT,w}$	$L'_{n,w}$ $L'_{nT,w}$
Spectrum adaptation terms (listed according to intended main applications)	None C $C_{50-3150}$ $C_{100-5000}$ $C_{50-5000}$	None C_{tr} $C_{tr,50-3150}$ $C_{tr,100-5000}$ $C_{tr,50-5000}$	None C_I $C_{I,50-2500}$
Total number of descriptors	3 x 5 = 15	3 x 9 = 27	2 x 3 = 6
Notes			
(a) For facades, the complete indices for R'_w , $D_{n,w}$, $D_{nT,w}$ are found in ISO 717-1.			
(b) For simplicity, only 1/3 octave quantities and C-terms are included in the table, although some countries allow 1/1 octave measurements for field check.			
(c) Rating for tapping machine only, i.e. the new rating for the rubberball not included.			

Table A.2 - Airborne sound insulation between dwellings. Main class criteria in the Nordic countries.

Airborne sound insulation between dwellings - Main class criteria in dB - Status March 2023						
Country	Class A (dB)	Class B FI Class A1 (dB)	Class C FI Class A2 (dB)	Class D FI Class A3 (dB)	Class E (dB)	Class F (dB)
DK [4]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 40$
FI ⁽³⁾ [65]	N/A	$D_{nT,w} \geq 60$	$D_{nT,w} \geq 55$	$D_{nT,w} \geq 53$	N/A	N/A
IS [67]	$R'_w + C_{50-3150} \geq 63$	$R'_w + C_{50-3150} \geq 58$	$R'_w \geq 55^{(1)}$	$R'_w \geq 50$	N/A	N/A
NO [68]	$R'_w + C_{50-5000} \geq 62$	$R'_w + C_{50-5000} \geq 58$	$R'_w + C_{50-5000} \geq 54$	$R'_w \geq 50$	N/A	N/A
SE [69]	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 60$	$D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 56$	$(D_{nT,w} + C_{50-3150} \geq 52)^{(2)}$	$D_{nT,w} \geq 48$	N/A	N/A

(1) Use of $C_{50-3150}$ is recommended also in Class C. If applied, the limit value may be reduced by 1-2 dB.
(2) SS 25267 (2015) does not include class C criteria, but refers to limit values in the building regulations as class C.
(3) The limit values for Finland were revised in Dec. 2022. The previous limit values were for Classes A-D in dB, see [66]:
 $R'_w + C_{50-3150} \geq 63$; $R'_w + C_{50-3150} \geq 58$; $R'_w \geq 55$; $R'_w \geq 49$

Table A.3 - Impact sound insulation between dwellings. Main class criteria in the Nordic countries.

Impact sound insulation between dwellings - Main class criteria in dB - Status March 2023						
Country	Class A (dB)	Class B FI Class A1 (dB)	Class C FI Class A2 (dB)	Class D FI Class A3 (dB)	Class E (dB)	Class F (dB)
DK [4]	$L'_{n,w} \leq 43$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 43$	$L'_{n,w} \leq 48$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 48$	$L'_{n,w} \leq 53$	$L'_{n,w} \leq 58$	$L'_{n,w} \leq 63$	$L'_{n,w} \leq 68$
FI ⁽³⁾ [65]	N/A	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 48$	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 53$	$L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 58$	N/A	N/A
IS [67]	$L'_{n,w} \leq 43$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 43$	$L'_{n,w} \leq 48$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 48$	$L'_{n,w} \leq 53^{(1)}$	$L'_{n,w} \leq 58$	N/A	N/A
NO [68]	$L'_{n,w} \leq 46$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 46$	$L'_{n,w} \leq 50$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 50$	$L'_{n,w} \leq 54$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 54$	$L'_{n,w} \leq 56$	N/A	N/A
SE [69]	$L'_{nT,w} \leq 48$ and $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 48$	$L'_{nT,w} \leq 52$ and $L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 52$	$(L'_{nT,w} \leq 56)^{(2)}$ $(L'_{nT,w} + C_{1,50-2500} \leq 56)^{(2)}$	$L'_{nT,w} \leq 60$	N/A	N/A

(1) Use of $C_{1,50-2500}$ is recommended also in Class C.
(2) SS 25267 (2015) does not include class C criteria, but refers to limit values in the building regulations as class C.
(3) The limit values for Finland were revised in Dec. 2022. The previous limit values were for Classes A-D in dB, see [66]:
 $L'_{n,w} \leq 43$ & $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 43$; $L'_{n,w} \leq 49$ and $L'_{n,w} + C_{1,50-2500} \leq 49$; $L'_{n,w} \leq 53^{(1)}$; $L'_{n,w} \leq 63$

Appendiks B – ISO-standarder for måling og beregning af lydisolations i bygninger

De bygningsakustiske standarder, der anvendes i Danmark til måling, vurdering og beregning af lydisolations er hovedsageligt udarbejdet af ISO i den internationale tekniske komité [ISO/TC 43/SC 2 Building Acoustics](#), men nogle standarder (eller forarbejdet) er udarbejdet af i den europæiske komité [CEN/TC 126 Acoustic properties of building products and of buildings](#). De standarder, der er direkte knyttet til bygningsakustiske måle- og vurderingsmetoder (laboratorium og felt) samt beregningsmetoder, er næsten alle ISO-metoder, der også er implementeret som EN-standarder samt nationale standarder i CEN-lande.

I oversigten herunder er angivet de engelske navne. Standardernes danske navne findes på <https://webshop.ds.dk/>, og de standarder, der er knyttet direkte til lydkravene i BR2018, er angivet i [BR2018's lydvejledning](#).

ISO 16283-1 (2014), Acoustics -- Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation. <https://www.iso.org/standard/55997.html>

ISO 16283-2 (2020), Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation. <https://www.iso.org/standard/77436.html>

ISO 16283-3 (2016), Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades. <https://www.iso.org/standard/59748.html>

ISO 717-1 (2020), Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation. <https://www.iso.org/standard/77435.html>

ISO 717-2 (2020), Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation. <https://www.iso.org/standard/69867.html>

ISO 10140 (2021), Acoustics -- Laboratory measurement of sound insulation of building elements:

- Part 1: Application rules for specific products. <https://www.iso.org/standard/73910.html>
- Part 2: Measurement of airborne sound insulation. <https://www.iso.org/standard/79487.html>
- Part 3: Measurement of impact sound insulation. <https://www.iso.org/standard/79483.html>
- Part 4: Measurement procedures and requirements. <https://www.iso.org/standard/73911.html>
- Part 5: Requirements for test facilities and equipment. <https://www.iso.org/standard/79482.html>

ISO 12354:2017 Building acoustics -- Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements:

- Part 1: Airborne sound insulation between rooms. <https://www.iso.org/standard/70242.html>
- Part 2: Impact sound insulation between rooms. <https://www.iso.org/standard/70243.html>
- Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound. <https://www.iso.org/standard/70244.html>

ISO 10848-1:2017 ISO Acoustics — Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — Part 1: Frame document. <https://www.iso.org/standard/67226.html>

ISO 10848-2:2017 Acoustics — Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — Part 2: Application to Type B elements when the junction has a small influence. <https://www.iso.org/standard/67227.html>

ISO 10848-3:2017 Acoustics — Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — Part 3: Application to Type B elements when the junction has a substantial influence. <https://www.iso.org/standard/67228.html>

ISO 10848-4:2017 Acoustics — Laboratory and field measurement of flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — Part 4: Application to junctions with at least one Type A element. <https://www.iso.org/standard/67229.html>

ISO 10848-5:2020 Acoustics — Laboratory and field measurement of the flanking transmission for airborne, impact and building service equipment sound between adjoining rooms — Part 5: Radiation efficiencies of building elements. <https://www.iso.org/standard/74658.html>

ISO 12999-1:2020, Acoustics — Determination and application of measurement uncertainties in building acoustics — Part 1: Sound insulation. <https://www.iso.org/standard/73930.html>

Appendiks C – Lydisolation for træbyggeri – Erfaringer fra udlandet (eksempler publikationer)

Herunder er vist nogle få referencer vedrørende erfaringer fra udlandet om lydisolation i etageboligbyggeri af træ. En del institutter udgiver relevante publikationer. Og der har i en lang årrække på akustikkonferencer været sessioner relateret til træbyggeri. Der findes derfor mange konferencepapers og også en del journal papers samt publikationer udgivet på forskningsinstitutter.

Nedenstående er kun en meget lille del af relevante publikationer.

SINTEF Byggforsk (køb eller abonnement) <https://www.byggforsk.no/byggforskserien>

SINTEF rapporter https://www.sintefbok.no/papers/index/29/historisk_materiale

Fredrik Ljunggren, Christian Simmons (2022). Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number rating of impact sound, Part III. *Applied Acoustics*, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108955>

Homb, A., Guigou-Carter, C., Hagberg, K., Schmid, H. Impact sound insulation of wooden joist constructions: Collection of laboratory measurements and trend analysis. *Building Acoustics* 2016, Vol. 23(2) 73-91.

Homb, A., Guigou-Carter, C., Rabold, A. Impact sound insulation of cross-laminated timber/massive wood floor constructions: Collection of laboratory measurements and result evaluation. *Building Acoustics* 2017, Vol. 24(1) 35-52.

Klas Hagberg, Delphine Bard and Erik Nilsson (2022). Junctions and their acoustical behaviour in high rise CLT buildings. Paper 0531. Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, Korea, 24–28 Oct. 2022.

Eli TOFTEMO; Anders LØVSTAD (2022). Sound insulation in cross laminated timber buildings and the effect of junction damping. Paper 0910. Proceedings of the 24th International Congress on Acoustics, Korea, 24–28 Oct. 2022.

Catherine Guigou-Carter, Nicolas Balanant (2015). Acoustic comfort evaluation in lightweight wood-based and heavyweight concrete-based buildings. Proceedings of InterNoise2015, USA.

Maximilian Neusser; Thomas Bednar (2022). Construction details affecting flanking transmission in cross laminated timber structures for multi-story housing. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Anton Kraller; Paola Brugnara (2022). Acoustic behaviour of CLT structures: influence of decoupling bearing stripes, floor assembly and connectors under storey-like loads. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Anders Homb; Simone Conta (2022). Comparison of the direct sound insulation for wooden joist, CLT and timber hollow box floors. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Catherine Guigou-Carter; Nicolas Balanant; Jean-Luc Kouyoumji (2022). Apparent wood elements and acoustic performance – Feedback from Adivbois CLT building mockup. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Thomas TOULEMONDE; Bertrand DE BASTIANI (2022). A recent feedback of wooden multi-storey buildings in France. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Jeffrey Mahn; Markus Müller-Trapet; Iara B. Cunha (2022). The Vibration Reduction Index of Typical Canadian Cross-laminated Timber Junctions. Proceedings of InterNoise 2022, Glasgow.

Heinz Ferk, Christopher Leh, Markus Mosing, Jan Kasim, Selina Vavrik-Kirchsteiger, Bernd Nusser (2022). Sound.Wood.Austria - selected measurement results of building components for multi-storey timber construction in Austria. Proceedings of InterNoise2022, Glasgow.

Fredrik Ljunggren (2022). "Sound insulation, residents' satisfaction, and design of wooden residential buildings". Proceedings of EuroRegio-BNAM2022, 9-11 May 2022. https://www.conforg.fr/erbnam2022/output_directory/data/articles/000086.pdf

A Blödt & A Rabold (2019), Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung. Holzbau Deutschland. https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/2_Holzbau_Handbuch/R03_T03_F01_Schallschutz_Grundlagen_Vorbemessung_2019.pdf

Anders Løvstad, Per Kåre Limmestad (2021). Consequences of revised sound insulation requirements between dwellings in Norway. Proceedings of BNAM2021, Oslo, Norway. <http://www.norskakustiskselskap.org/bnam-2021/>

Sound Insulation Prediction of Single and Double CLT Panels, Fredrik Ljunggren. Proceedings of ICA2019, Aachen, Germany.

Christian Simmons (2021). A systematic comparison between EN ISO 12354 calculations of CLT floors with a large set of laboratory and field measurements. EuroNoise2021, Lyon, France.

Vardaxis, Nikolaos Georgios; Bard Hagberg, Delphine and Dahlström, Jessica (2022). Evaluating Laboratory Measurements for Sound Insulation of Cross-Laminated Timber (CLT) Floors : Configurations in Lightweight Buildings. *Appl. Sci.* 2022, 12(15), 7642; <https://doi.org/10.3390/app12157642>

SINTEF Byggforsk & Nordic-Wood (2000). Trehus i flere etasjer Lydteknisk prosjektering. Anvisning 37-2000. https://www.sintefbok.no/book/index/27/trehus_i_flere_etasjer_lydteknisk_prosjektering

Appendiks D – Måleresultater træskeletbyggeri

Dette appendiks indeholder baggrundsmateriale for anbefalingerne vedr. træskelet-baserede konstruktioner, der kan forventes at overholde lydkravene til vægge og dæk mellem lejligheder.

For hver konstruktionsdel resumeres indholdet af nogle relevante eksisterende vejledninger og derefter behandles resultater fra målerapporter for typiske bygninger.

Boligadskillende dæk

Eksisterende Vejledninger

Robust Details (2022) detalje E-FT-2 antages at opfylde de engelske krav, men de udtrykkes ikke ved samme metode som de danske, så niveauet kendes ikke. Det er næppe højere end de danske i kl. BR18_{krav}. Løsningen er baseret på bjælkelag med min 220 mm bjælker pr. 400 mm og med 11 mm træbaseret plade min 600 kg/m³ (evt. slidset) på oversiden (eller 240 mm bjælker pr 600 mm og 15 mm træbaseret plade). Der anvendes min 100 mm isolering i pladeform og nedhængt loft med 25 mm lydbøjler pr. 400 mm og 2 lag gipsplade med fladevægt 12 kg/m².

Som svømmende gulv anvendes min 70 mm strøer med pålimet lyddæmpende lag (som skal opfylde " $rd\Delta R_w + C_{tr} = 13\text{dB}$ og $rd\Delta L_w = 15\text{dB}$ ") og min 60 mm isolering mellem strøerne. Der pålægges gipsplade med fladevægt 13,5 kg/m² og 18 mm gulvplade (fx krydsfiner) med fer og not.

I *Ljudisolering i trähus (SP, 2007)*, der er en oversættelse af en finsk publikation, vises en løsning der i Finland antages at sikre $R'_w \geq 55\text{ dB}$ og $L'_{n,w} \leq 53\text{ dB}$ (BR18_{krav}). Den er baseret på bjælker pr. 600 mm med 18 mm krydsfinerplade med fer og not på oversiden og 100 mm mineraluld, der bæres af lufttæt membran og krydsslægter pr. 400 mm på undersiden. Der anvendes lydbøjler pr 400-450 mm med to lag 13 mm gipskarton. Hulrums-højden angives blot at skulle være mindst 200 mm, hvilket i praksis altid vil være overholdt, ikke mindst når der også anvendes krydsslægter.

Det svømmende gulv består af gulvpap, min 40 mm sand, gulvplade med fladevægt mindst 15 kg/m² (~22 mm gulvspånplade) og "fjedrende gulvbelægning med $\Delta L_w \geq 17\text{ dB}$ ".

Flervånings trähus (Nordic Wood, 1997), omtaler betydning af helt eller delvist udfyldt hulrum mellem bjælkerne. Uden kilde angives at både luft- og trinlyd kan forbedres op til 5 dB ved helt udfyldt hulrum, og der er ikke fundet noget nyere, der bekræfter det.

Målinger

I nedenstående Tabel D.1 vises resultater af in-situ målinger fra dels nyere danske træbyggerier (2014-2022), dels nordiske byggerier udført under Nordic Wood projektet omkring år 2000. I nogle tilfælde er der ikke bestemt en korrektion for lave frekvenser, så kun R'_w og $L'_{n,w}$ er angivet. Hvor korrektionen for lave frekvenser er bestemt, er den korrigerede værdi angivet som $R'_{w,50}$ og $L'_{n,w,50}$.

I tabellen markerer mørk grøn eller blå farve, at kravene til lydklasse B er overholdt for henholdsvis luftlyd og trinlyd. De ses at være opfyldt i en del tilfælde, dog især for Byggeri D, hvor der er udført flere målinger end normalt.

En lysere farve angiver at kravene BR18_{anbef} er overholdt. Det er tilfældet for alle byggerier, hvor der er målt ved lave frekvenser, og da BR18_{krav} rigeligt er overholdt for de øvrige, er BR18_{anbef} formentlig overholdt for luftlyd i alle tilfælde.

For trinlyd er BR18_{krav} overholdt i alle tilfælde, men i mange tilfælde kun det. Lyd-klasse B opfyldes af Bygning D, der har strøgulv opklodset med lydkiler og lægteunderlag for loftbeklædning ophængt i lydbøjler, som i højre side af figur 5.1, men med stållægte i stedet for trælægte. Det gør den samlede gulvtykkelse ret stor, men også meget let. Lydklasse B opfyldes også af Ylojjarvi, hvor der er anvendt et meget stift træelement bestående af en LVL-plade forbundet til bjælker af LVL, hvorpå der er krydsforskallet.

Nogle opbygninger omfatter ekstra masse i form af perlesten eller sand. Der er ingen tegn på, at det forbedrer lydisolationen.

Flere måleresultater findes i (Hveem et al., 1996).

Table D.1 Målt luft- og trinlydisolation for dæk af træelementer i henhold til målerapporter.

	Dæk- tyk. mm	Bjælke- højde, mm	R' _w dB	R' _{w,50} dB	L' _{n,w} dB	L' _{n,w,50} dB	Særlig opbygning
Nyere danske byggerier (Målerapporter)							
A1314	450	295	60	58	50	56	
A1516	450	295	60	58	48	51	
A56	450	295	60	57	53	55	
B24	443	300	57	56	51	54	
B35	443	300	56	54	52	56	
CR1L1	468	295	58	54	52	56	Ekstra gips på forskalling
D236237	544	333	70	68	39	42	Strøer på 20mm
D377378	544	333	68	66	45	49	lyddæmpende kiler
D3863877	544	333	64	57	42	45	- do
D373374	544	333	66	61	41	48	- do
D381	544	333			43	45	- do"
E1	564	405			44	49	
G35	490	245	63		48		På strøer m. kiler
Ældre nordiske byggerier							
Casa Nova Hørs.	372	220	61		46	53	45 mm perlesten
Casa Nova Herning	375	220	58		50		45 mm perlesten
Ylojjarvi	487	300	64		40	44	TT-dæk af-LVL + lægter
Vik/Viikki	400	222	60		51	56	Lægteforskalling
Uleaborg/Oulu	505	350	63		53	56	I-bjælker
Solbakken	555	400	63	59	47	59	
Walludden	439	300	57	56	51	53	Korrugeret stålplade*
Orgelbänken	530	400	61	59	50	51	30 mm gipsbeton under parket
Building 5	400	200			48	51	50 mm sand + lægter
* Korrugeret stålplade isf. trinlydplade og krydsfiner på oversiden							

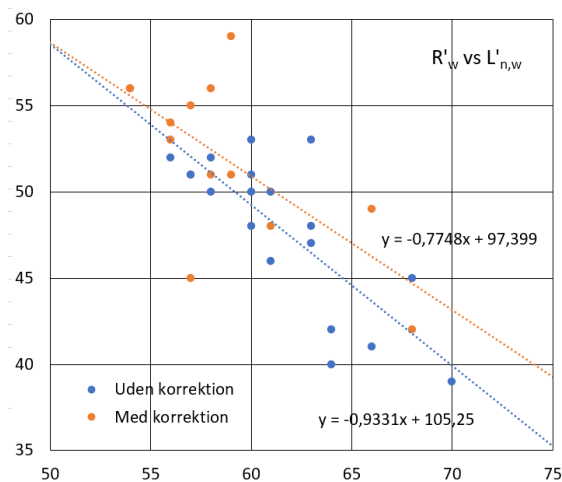
Tabel D.2 viser, at der ikke er systematisk forskel på resultaterne for 'Nyere byggerier' og 'Alle målinger', så alle resultater kan indgå ligeligt i vurderingen.

Tabel D.2 Middelværdier og dårligste værdier for målt luft- og trinlydisolation.

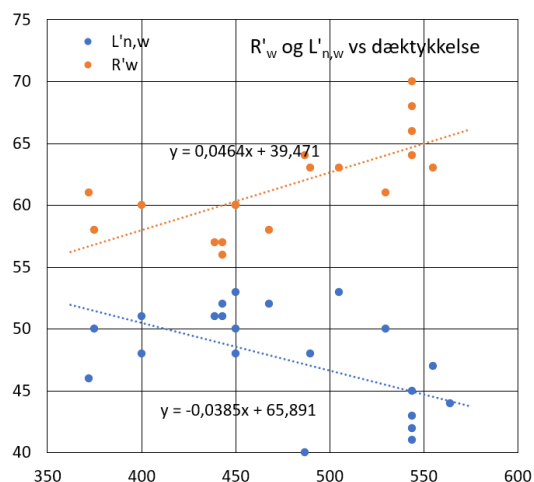
	R' _w dB	R' _{w,50} dB	L' _{n,w} dB	L' _{n,w,50} dB
Alle målinger				
Middel	61,5	58,7	47,5	51,5
Std.afv.	3,8	4,2	4,4	4,8
Min R' _w /Max L' _{n,w}	56	54	53	59
Kun nyere				
Middel	62,0	58,9	46,8	50,5
Std.afv.	4,6	4,7	4,7	4,9
Min R' _w /Max L' _{n,w}	56	54	53	56

Figur D.1 viser at der er ret stor korrelation mellem luft- og trinlydisolationen, især før korrektion for lave frekvenser (blå mærker), hvor hældningen af tendenslinjen er tæt på -1.

Figur D.2 viser at der er en vis relation mellem tykkelsen af dækket og både luft- og trinlydisolationen. Sammenhængen er kun vist uden korrektion for lave frekvenser.



Figur D.1 Relation mellem luft- og trinlydisolation. R'_w på lodret akse.



Figur D.2 Relation mellem lyd isolation og dækykkelse i mm.

I *Lydisolerende etasjeskillere med træbjælkelag* (SINTEF, 2016) er givet eksempler på lyd isolation for både luft- og trinlydisolation for et antal opbygninger. For opbygninger, der minder om højre side i Figur 5.1 vil luftlyden normalt overholde BR18_{anbef.} og lydklasse B er også mulig. Der anvendes dog slidset spånplade på bjælkelaget. Vedrørende trinlyd er det kun få løsninger, der opfylder blot BR18_{krav.} og korrektionen for lave frekvenser er stor. Dette afviger betydeligt fra ovennævnte måleresultater i nyere danske byggerier. Blød træfiberplade synes at være betydelig ringere end trinlydplade af mineraluld.

Boligadskillende vægge

Eksisterende vejledninger

I det følgende resumeres nogle vejledninger, der er tænkt som information om forventet opnåelig lydisolation i praksis. Kun den engelske *Robust Details (2022)* kan (i England og Wales) anvendes uden forbehold om specifik rådgivning i det enkelte projekt. Der er ret god overensstemmelse mellem vejledningerne.

Efter beskrivelsen af de forskellige vejledninger følger en oversigt i tabelform.

I vejledningen *Lydisolation for innervægger av bindingsværk* (SINTEF, 2000) er givet erfaringsmæssig lydisolation af dobbeltvægge med forskellige tykkelser og et eller to pladelag på hver side. Værdierne er baseret på målinger i et stort antal byggerier. Det er forudsat, at pladelagene mindst har fladevægten 8 kg/m^2 , fx 13 mm gipskarton, at stolpeafstanden er 600 mm, og at afstanden mellem skeletterne er mindst 20 mm.

Resultaterne ser meget systematiske ud, bortset fra de værdier, der i Tabel D.3 er markeret med rød eller blå farve, som ligger meget lavt eller højt. Hvis de skal følge mønsteret, skulle de være henholdsvis 60 dB og -5 dB.

Målingerne viser, at den praktiske værdi er ca. 4 dB under den laboratoriemålte og at korrektionen for lave frekvenser er ca. -5 dB, når $R'_w > 55 \text{ dB}$, altså det praktisk relevante område. De norske målinger viser også, at hvis hulrummet øges med 25 mm, så øges lydisolationen med 1 dB. Det er ikke undersøgt systematisk i andre studier.

For to lag beklædning på hver side og hulrum 250 mm angives $R'_w = 58 \text{ dB}$. Hvis 'outlierværdien' -8 dB ignoreres, og der korrigeres med -5 dB for lave frekvenser, fås $R'_{w,50} = 53 \text{ dB}$.

Hvis stolpeafstanden reduceres fra 600 mm til 450 mm, må det forventes at lydisolationen forringes med op til 2 dB.

Hvis der kun anvendes et lag gipsplade på hver side forringes lydisolationen med 2-3 dB, mest for de mindre hulrum. Ét lag anses dog ikke for at være en hensigtsmæssig løsning, bl.a. aht. brand, så det behandles ikke nærmere.

I *TRÆ 56 Træskelethuse* (Træinformation, 2008) er det angivet, at for to lag 12,5 mm gipsplade på hver side og hulrum 250 mm kan forventes $R'_{w,50} = 53 \text{ dB}$, altså som de norske målinger, men for et større hulrum. Med et ekstra gipslag vurderes at lydisolationen øges til $R'_{w,50} = 58 \text{ dB}$.

Hvis det skjulte pladelag ændres til 12 mm krydsfiner skal hulrummet, jf. TRÆ 56, øges med 50 mm for at opnå samme værdier. Løsningerne forventes således at opfylde kravene til BR18_{anbef} hhv. lydklasse B.

Stort set den samme løsning som i TRÆ 56 findes i *Robust Details (2022)* detalje E-WT-1, som kan antages at opfylde de engelske krav, men de udtrykkes ikke ved samme metode som de danske, så kravniveauet kendes ikke. Det er næppe højere end BR18_{krav}.

I *Robust Details* tillades lidt bindere mellem vægdelene og lidt beklædning mod hulrummet på en ene del. I detalje E-WT-2 tillades afstivende beklædning af min 9 mm træplade mod hulrummet på begge vægdele, hvilket burde forringe lydisolationen, selvom de engelske krav stadig kan anses for opfyldt.

I *Ljudisolering i trähus (SP, 2007)*, der er en oversættelse af en finsk publikation, vises en løsning, der i Finland kan antages at sikre $R'_w \geq 55 \text{ dB}$ (BR18_{krav}), som svarer

nøje til de foregående, bortset fra, at der tillades hulrum ned til 145 mm og skeletafstand ned til 5 mm, men da med forskudte stolper. SINTEF angiver $R'_w = 54$ dB for 150 mm hulrum, så der er god overensstemmelse.

Tabel D.3. Forventet luftlydisolation for dobbelte skeletvægge med to pladelag på hver side i henhold til nordiske anvisninger.

Kilde	Hulrum, mm	Skeletafstand, mm	Pladetykkelse, mm	R'_w dB	$R'_{w,50}$ dB
Hveem et al (2000)	150	20		54	48
	200	20	13	56	51
	250	20	13	58	50
	300	20	13	64	59
TRÆ 56 (2008)	250	50	13	55	53
SP (2007)	150	20	13	55	-
	200	70	13	56	-
	300	100	13	56,5	-

Farvemarkeringen indikerer hulrumdybden

Målinger

I Tabel D.4 vises resultater af in-situ målinger fra dels nyere danske træbyggerier, dels nordiske byggerier udført under Nordic Wood projektet omkring år 2000. I nogle tilfælde er der ikke bestemt en C-korrektion for frekvenser under 100 Hz, så kun R'_w er angivet. Hvor korrektionen for lave frekvenser er bestemt, er den korrigerede værdi angivet som $R'_{w,50}$.

I tabellen markerer grøn farve, at kravene til lydklasse B er overholdt. De ses at være opfyldt i de fleste tilfælde hvor $R'_{w,50}$ er bestemt. Tilfælde hvor kun $BR18_{anbef}$ overholdes er markeret med en lysere grøn farve.

Tabel D.5 viser nogle middelværdier og minimumsværdier for målingerne. Det ses at middelværdien af R'_w er 2 dB bedre for de tilfælde, hvor der også er målt ved lave frekvenser end for de (ældre) tilfælde, hvor det ikke er tilfældet.

Tabel D.4 Målt luftlydisolation for dobbelte skeletvægge med to pladelag på hver side i henhold til målerapporter.

	Hulrum mm	Skeletaf- stand mm	Pladetyk- kelse mm	R' _w dB	R' _{w,50} dB	Korrektion, C ₅₀ dB
Nyere danske byggerier (Målerapporter)						
A9	270	30	15	61	57	-4
A11	270	30	15	62	59	-3
CR2	220	30	15	58	53	-5
D384	220	30	15	67	60	-7
D371	220	30	15	71	63	-8
D238	220	30	15	67	60	-7
Ældre nordiske målinger (Hvem, 2000; SP, 2007)						
Casa Nova Hørsholm *	290	50	15	62		
Casa Nova Herning *	290	50	15	59		
Ylojarvi	225	25	13	63		
Vik/Viikki *	275	31	13	62		
Uleaborg/Oulu	215	20	13	65		
Solbakken	250	50	14	63		
Orgelbänken *	240	50	13	62		
Walludden *	275	34	14	57		
Building 6	150	20	13	64	58	-6
Building 7	150	20	13	62	57	-5
Building 8	150	20	13	63	60	-3
Building 9	150	20	13	62	58	-4

* Gennemgående træplade over hulrum

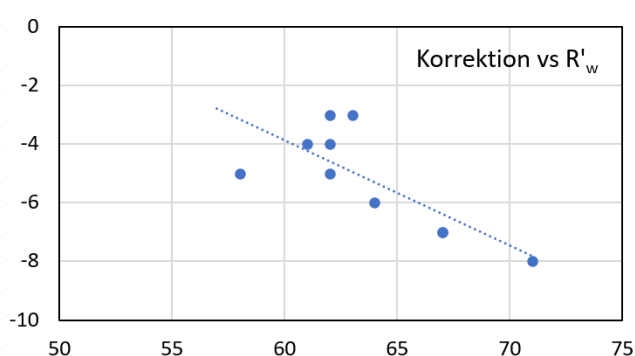
Tabel D.5 Niveau for nyere og ældre målinger samt indfyldelse af pladeforbindelse over hulrum.

	R' _w dB		R' _{w,50} dB	
	Middel	Min	Middel	Min
Alle målinger	62,8	57		
Målinger 100-3150 Hz	61,6	57		
Målinger 50-5000 Hz	63,7	58	58,5	53
Kun målinger med pladeforbindelse	60,4	57		
Kun målinger uden pladeforbindelse	63,7	58		

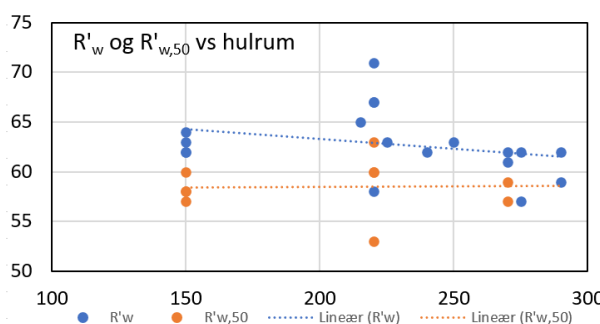
Korrektionen for lave frekvenser varierer mellem -3 og -8 dB som det ses af Tabel D.5. Middelværdien er -5,2 dB. På Figur D.3 ses at de numerisk største værdier af korrektionen optræder for høje værdier af R'_w, hvor der er bedst 'råd' til det. Så ved skøn over, om en væg opfylder kravene til lydklasse B er det rimeligt at antage, at korrektionen er -5 dB for de tilfælde, hvor den ikke er bestemt. Én måling afviger især, Walludden. Samlet er der altså god mulighed for at opfylde lydklasse B.

Umiddelbart ser det ud som om R'_w er et par dB bedre i de tilfælde, hvor der også er målt ned til 50 Hz, men det skyldes formentlig, at der kun er udført pladeforbindelse hen over hulrummet i byggerier, hvor der ikke er målt ned til 50 Hz, idet der opnås samme middelværdi for tilfælde hvor der er målt ned til 50 Hz og tilfælde, hvor der ikke er pladeforbindelse. Så der er næppe reel forskel på nyere og ældre byggerier, når udførelsen er sammenlignelig, men de to sidste linjer i Tabel D.5 viser, at en pladeforbindelse hen over hulrummet mellem vangerne reducerer middelværdien af R'_w med ca. 3 dB. Det stemmer dog ikke med *Flervånings træhus (Nordic Wood, 1997)*, der angiver, at forbindelser med lille bøjningsstivhed hen over lejlighedsskel ikke giver særlig stor lydbrø.

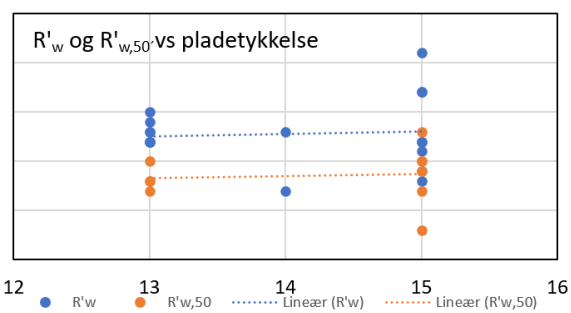
I lyset af anvisningerne omtalt ovenfor kunne man forvente en afhængighed af hulrumdybden og fladevægten af beklædningen. Det er dog ikke tilfældet, som det fremgår af Figur D.4 og D.5. For hulrumdybden synes der endog at være en negativ effekt. Det betyder dog blot at andre variationer har større indflydelse end hulrum og fladevægt.



Figur D.3. Korrektionen for lave frekvenser $C_{50} = R'_w - R'_{w,50}$ som funktion af R'_w .



Figur D.4. R'_w øges ikke med hulrummets dybde (mm)



Figur D.5. R'_w øges ikke med pladetykkelsen (mm)

Det ringe resultat for Walludden kan skyldes, at konstruktionen jf. en tegning i (Hveem, 2000) måske har 8 mm krydsfiner i stedet for 13 mm gips som første lag, som samme publikation angiver i en tabel. Det dårlige resultat genfindes dog ikke for Uleåborg, hvor det ene pladelag også er af krydsfiner.

'Building 6-9', for hvilke måleresultater er givet i (SP, 2007), er bygget efter anbefalingen i samme publikation refereret ovenfor. Her er korrektionen for lave frekvenser bestemt og resultatet lagt bedre end de forventede $R'_{w,50} = 55$ dB.

Der er udført ret få trinlydmålinger, som dog samstemmende viser, at trinlyd er uproblematisk for dobbeltvægge.

Litteratur

- Hveem, S., Homb, A., Hagberg, K., & Rindel, J. H. (1996). *Low-frequency footfall noise in multi-storey timber frame buildings*. (NKB Committee and Work Reports 1996:12E); Nordic Committee on Building Regulations, Helsinki. Reference [44].
- Flervånings trähus (Nordic Wood, 1997). Reference [60].
- Lydmålerapporter fra Hørsholm og Herning. (Seminar: Etagehuse af træ – CASA NOVA, 30. okt 2000).
- Hveem, S.: *Trehus i flere etasjer. Lydtekisk projektering* (Byggforsk Anvisning 37, 2000) Reference [45].
- *Ljudisolering i trähus (SP Rapport 2007:78)*. Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, 2007. Reference [61].
- Munch-Andersen, J. *Træskelethuse (TRÆ 56)*. Træinformation, 2008. Reference [62].
- *Lydisolerende etasjeskillere med trebjelkelag. Målte verdier* (Byggforskserien, Byggedetaljer 522.512). SINTEF, 2016. Reference [63].
- *Lydisolation for innervegger av bindingsværk* (SINTEF Byggforskserien, Byggedetaljer 524.325). SINTEF, 2020. Reference [64].
- *Robust Details Part E*. Robust Details, 2022. Reference [48].
- Lydmålerapporter fra nyere danske træbyggerier 2014-2022 (ikke tilgængelige).

Appendiks E – Projektets følgegruppe

Projektets emne vedrører mange forskellige aktører i byggebranchen, og det blev tilstræbt at etablere en bredt sammensat følgegruppe med repræsentanter fra de relevante faggrupper. Derfor var der følgegruppemedlemmer fra rådgivere (ingeniører og arkitekter), producenter, udførende og bygherrer. Følgegruppemedlemmernes navne og firmaer fremgår af nedenstående liste.

Følgegruppemedlemmer

Birgit Rasmussen (projektleder)	BUILD, AAU-CPH
Jørgen Munch-Andersen	BUILD, AAU-CPH
Johannes Martin Utoft Christensen	Social- og Boligstyrelsen (SBST)
Jan Christensen	Artelia A/S
Jacob Ettrup	ABC
Erik Kirt	BSF
Hallur Johannessen	Gade & Mortensen Akustik
Oliver Zillo Jensen	COWI A/S (Lyngby)
Rasmus Palm Vestergaard	Rambøll A/S (Aarhus)
Claus Riis	Riis akustik
Kim Dalgaard	Vandkunsten
Elias Mohr Wilson	Arkitema
Lauritz Rasmussen	Taasinge Elementer
Horst Günther	Scandibyg A/S
Camilla Lydersen	BM Byggeindustri
Søren Schmidt	Granab
Jakob Kock	Adserballe & Knudsen
Thomas Bülow	Enemærke & Petersen
Jørgen Søndermark	Realdania By & Byg
Morten Larsen	Boligselskabet Sjælland
Erik Frehr	Boligkontoret Århus
Finn Larsen	Teknologisk Institut
Peder Fynholm	Teknologisk Institut

Tre konstruktionsgrupper med medlemmer fra følgegruppen har udarbejdet rapportens kapitler 5, 6 og 7 om de tre hovedtyper af træbyggerier inkluderet i rapporten. Medlemmerne i de tre konstruktionsgrupper er angivet herunder.

Kap. 5 - Konstruktionstype 1 - Massivtræ

Birgit Rasmussen (BUILD-facilitator), Oliver Zillo Jensen, Jacob Ettrup, Hallur Johannessen, Rasmus Palm Vestergaard, Søren Schmidt.

Tegninger: Oliver Zillo Jensen

Kap. 6 - Konstruktionstype 2 – Træskelelementer

Jørgen Munch-Andersen (BUILD-facilitator), Lauritz Rasmussen, Jan Christensen, Jakob Kock, Thomas Bülow.

Appendiks D med måleresultater er knyttet til kap. 6 og udarbejdet af samme gruppe.

Tegninger: Jørgen Munch-Andersen

Kap. 7 - Konstruktionstype 3 – Rumstore træmoduler

Birgit Rasmussen (BUILD-facilitator), Horst Günther, Camilla G. Lydersen, Claus Riis.

Tegninger: Camilla Lydersen

Principper for konstruktionsløsninger til etageboligbyggeri i træ med fokus på lydisolationskrav – Pilotprojekt

Rapporten beskriver principseksempler på konstruktionsløsninger for de tre hovedtyper af træbyggesystemer anvendt i Danmark til etageboligbyggeri: Massivtræbyggeri, træskeletkonstruktioner og rumstore moduler.

Projektet er udført for Social- og Boligstyrelsen og har baggrund i den nationale strategi for bæredygtigt byggeri, hvor det beskrives som en udfordring for træbyggeri at efterleve bygningsreglementets lydisolationskrav. For at få erfaringer fra hele byggebranchen har projektet haft en bredt sammensat følgegruppe med repræsentanter fra rådgivere, producenter, entreprenører og bygherrer.

Etageboligbyggeri af træ er ret nyt i Danmark sammenlignet med en række andre lande, og derfor er der søgt oplysninger om erfaringer fra bl.a. Sverige, Norge og Tyskland.

Rapporten indledes med et overblik over lydisolationskrav for etageboligbyggeri i Danmark og en række udvalgte lande i Europa, og der henvises til brugertilfredshedsundersøgelser i Sverige og Norge, hvor det konkluderes, at især trinlydkrav bør inkludere frekvenser under 100 Hz. Sverige har gennem mange år haft krav ned til 50 Hz, og de seneste, meget omfattende feltundersøgelser anbefaler at gå ned til 25 Hz for trinlyd i lette byggerier.

I projektet er der indsamlet feltmåleresultater, men antal og resultater er utilstrækkelige som grundlag for robuste konstruktionsløsninger til bredere anvendelse i Danmark, og rapporten afsluttes med en række anbefalinger til bl.a. akustisk kvalitetssikring, indsamling af feltmåleresultater og internationalt samarbejde.