

Vibrasjoner i etasjeskillere av massivtre

Analyse av hvordan den kommende generasjon Eurokode 5 påvirker dimensjonering av KLT-dekker



ANDERS BIRKENES



ERIK LANGELAND



KASPER FOGEDGAARD
JUUL

VEILEDERE

Preben Aanensen
Bjørn Uppstad

Universitetet i Agder, 2025

Fakultet for teknologi og realfag

Institutt for ingeniørvitenskap

Bachelor

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	☒
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.	☒
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høyskoler i Norge, jf. Universitets- og høyskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	☒
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	☒
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høyskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	☒
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	☒

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller taushetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å

gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

☒ JA ☐ NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?

☐ JA ☒ NEI

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

☐ JA ☐ NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

☐ JA ☒ NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)

Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en del av bachelorprogrammet i byggdesign ved Universitetet i Agder. Oppgaven utgjør den avsluttende delen av emnet BYG315 og ble gjennomført i sjette semester, våren 2025.

Formålet med oppgaven har vært å undersøke hvordan den nye generasjon Eurokode 5 (EK5-25) vil påvirke beregning av vibrasjoner i KLT-dekker (krysslaminert tre), sammenlignet med dagens regelverk og beregningsmetoder. Oppgaven tar for seg hvilke endringer som introduseres i det reviderte regelverket, og hvordan disse endringene påvirker mulighetene for dimensjonering og prosjektering av konstruksjoner med KLT-elementer.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileder ved Universitetet i Agder, Preben Aanensen, for hans verdifulle veiledning, engasjement og faglige innspill gjennom hele prosjektperioden.

En særlig takk går også til vår eksterne veileder, Bjørn Uppstad i Procon Rådgivende Ingeniører, for å ha delt av sin omfattende kompetanse, gitt konstruktive tilbakemeldinger og vært tilgjengelig for jevnlig oppfølging.

Vi vil også takke Veidekke for å ha gitt oss tilgang til å gjennomføre vibrasjonsmålinger på SiA studentboliger på Lund Torv. Denne muligheten var uvurderlig for å kunne belyse de mange aspektene ved vibrasjonsberegninger i praksis.

Arbeidet med oppgaven har gitt oss dypere innsikt i både standardiseringsprosesser og de tekniske utfordringene knyttet til moderne trekonstruksjoner. Dette har vært en lærerik og utviklende prosess som vi tar med oss videre i vår faglige karriere.

Summary

This bachelor's thesis investigates the effect of the vibration criteria in the new Eurocode 5 (EK5-25) for the design of mass timber structures. The thesis addresses issues related to vibration criteria and how these affect the design of CLT (cross-laminated timber) floors. The theoretical framework includes a review of current regulations and standards, as well as a comparison with the new EK5-25.

The research questions addressed in this study include how the vibration criteria outlined in EK5-25 influence the structural design of CLT-floors, how these criteria differ from current regulatory standards, and the extent to which on-site measurements align with the new vibration requirements. The methodological approach comprises a combination of theoretical analysis, standard-based evaluations, and case studies, including vibration measurements conducted at the SiA student housing complex at Lund Torv.

The conclusion indicates that EK5-25 provides more detailed and specific guidelines for CLT floors, which may lead to both stricter requirements and simplifications in the design process. The on-site measurements show good agreement with the theoretical calculations, suggesting that the new vibration criteria offer reliable and realistic methods of analysis.

Innhold

Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring.....	i
Publiseringsavtale.....	ii
Forord.....	iii
Summary	iv
Innhold	v
Figurliste	viii
Tabelliste	x
1. Innledning	1
1.1. Samfunnsperspektiv	1
1.1.1. Bærekraft i byggebransjen.....	1
1.2. Massivtre i et samfunns- og miljøperspektiv.....	3
1.2.1. Miljømessige fordeler	3
1.2.2. Produksjon og transport.....	5
1.2.3. Byggetekniske fordeler.....	6
1.2.4. Bruksfase og innemiljø.....	6
1.2.5. Levetid og sirkulærøkonomi	6
2. Kunnskapsbakgrunn	7
2.1. Tre som materiale	7
2.1.1. Ortotropiske egenskaper.....	7
2.1.2. Kryss-laminert tre (KLT)	8
2.1.3. Fuktighet.....	9
2.2. Dynamisk respons og vibrasjoner i konstruksjoner.....	9
2.2.1. Frekvens	9
2.2.2. Egenfrekvens.....	10
2.2.3. Vibrasjoner i KLT-dekker.....	10
2.2.4. Stivhet.....	10
2.2.5. Resonant vibrasjon	11
2.2.6. Transient vibrasjon.....	11
2.2.7. Damping	12
2.2.8. Svingninger i et SDOF system.....	13
2.2.9. FFT Spectrum (Fast Fourier Transformation spectrum).	15

2.2.10.	Menneskets opplevelse av vibrasjon	17
2.2.11.	Skjærpåvirkning.....	17
2.2.12.	Dynamisk E-modul.....	18
2.3.	Regelverk og metoder for vurdering av vibrasjoner	19
2.3.1.	Eurokode 5 (EK5).....	19
2.3.2.	Kommende generasjon Eurokode 5 (EK5-25).....	22
2.3.3.	Østerrikes nasjonale tillegg til EK5 (ØNORM).....	27
2.3.4.	Beregningsmetode til Hamm/Richter (H/R)	30
2.3.5.	SINTEF	33
3.	Forskerspørsmål.....	34
3.1.	Avgrensninger	34
4.	Metode.....	35
4.1.	Litteraturstudie.....	35
4.2.	Kunstig intelligens	35
4.3.	Beregningsmetoder.....	36
4.3.1.	Analytiske beregninger i Excel.....	36
4.3.2.	CLT-designer	37
4.3.3.	Calculatis by Stora-Enso	38
4.4.	Analysering av KLT-dekker og klassifisering etter ulike beregningsmetoder.....	38
4.5.	Case Lund Torv – Testmetoder og utstyr.....	39
4.5.1.	SiA studentboliger Lund Torv.....	39
4.5.2.	Testleiligheten.....	40
4.5.3.	Testmetoder	41
4.5.4.	Måleutstyr.....	42
4.5.5.	Mobiltelefoner som måleverktøy	43
4.5.6.	Forhåndstesting av utstyr	43
4.6.	Case Lund Torv – Testdag 1.....	45
4.6.1.	Punktneadbøyning	45
4.6.2.	Testoppsett 1.1	47
4.6.3.	Testoppsett 2.1	49
4.6.4.	Testoppsett 3.1	50
4.6.5.	Testoppsett 4.1	51
4.6.6.	Fuktmåling	52
4.7.	Case Lund Torv – Testdag 2.....	53

4.7.1.	Testoppsett 1.2	55
4.7.2.	Testoppsett 2.2	56
4.7.3.	Testoppsett 3.2	57
4.7.4.	Testoppsett 4.2	58
4.8.	Analyse av målinger	59
4.8.1.	Programvare fra Brüel & Kjær.....	59
4.8.2.	Demping	60
4.8.3.	Hastighetsverdier (v_{rms}) i OMA.....	61
5.	Resultat og diskusjon	63
5.1.	Beregningsmetoder – Sammenligning	63
5.2.	Analysering av KLT-dekker og klassifisering etter ulike beregningsmetoder.....	66
5.3.	Case: Lund Torv – Resultater.....	70
5.3.1.	Punktneadbøyning	70
5.3.2.	Eigenfrekvens.....	72
5.3.3.	Demping	78
5.3.4.	Hastighetsmålinger.....	81
5.3.5.	Frekvensmålinger med telefoner.....	83
5.4.	Samfunnsperspektiv	87
5.5.	Svakheter/begrensninger.....	88
6.	Konklusjon.....	89
6.1.	Forslag til videre arbeid	91
Referanser		92
Vedlegg		98

Figurliste

Figur 1-1: Bærekraftsmål nr.3.....	2
Figur 1-2: Bærekraftsmål nr.9.....	2
Figur 1-3: Bærekraftsmål nr.12	2
Figur 1-4: Bærekraftsmål nr.13	2
Figur 1-5: Et treprodukts livssyklus[15].	4
Figur 1-6: Grønn materialguide, terskelverdier for massivtre [18].	5
Figur 2-1: Treets hovedretninger [31].	8
Figur 2-2: Illustrasjon av treets fiberretninger i et KLT-element [34].	8
Figur 2-3: Svingemoder for fritt opplagt bjelke [38].	10
Figur 2-4: Illustrasjon av transient vibrasjon fra «heel-drop» [42].	11
Figur 2-5: Peak (toppverdi) og rms verdi for en sinusbølge [43].	12
Figur 2-6 Illustrasjon av en dempet svingning [42].	13
Figur 2-7: Illustrasjon av et SDOF system [38].	13
Figur 2-8: Overføring av en harmonisk svingning fra tidsdomene til frekvensdomene [46].	15
Figur 2-9: Eksempel på analyse av FFT og flere topper [42].	16
Figur 2-10: Toleranse for menneskefølte vibrasjoner [38].	17
Figur 2-11 Skjærdeformasjoner i KL-tre [48].	17
Figur 2-12: b-verdi avhengig av hvilken a-verdi som beregnes	20
Figur 2-13: Flytskjema for å kontrollere dekke iht. H/R [55].	31
Figur 2-14: Verdier for den harmoniske del av kraften til gulvet [55].	32
Figur 4-1 Skjerm bilde fra Vedlegg A for å velge KLT-element [42].	36
Figur 4-2 Vibrasjonsberegninger etter EK5-25. Skjerm bilde fra Vedlegg A [42].	37
Figur 4-3: Valgmuligheter i de ulike beregningsmetodene. Skjerm bilde fra Vedlegg A [42].	38
Figur 4-4: Oversikts bilde av Bygg A (grønt) og Bygg B (rødt) ved Lund torv [61].	40
Figur 4-5: KLT-elementet spenner kontinuerlig gjennom testleiligheten (A) og videre gjennom to nabo leiligheter (B, C) [62].	40
Figur 4-6: Half-lap skjøt [42].	41
Figur 4-7: Forhåndstesting av utstyr [42].	44
Figur 4-8: Plantegning testdag 1 [42].	45
Figur 4-9: Deformasjonsmåler [42].	46
Figur 4-10: Målepunkter for punkt nedbøyning [42].	46
Figur 4-11: Bilde av måling på Lund torv fra testdag 1 [42].	47

Figur 4-12: Testoppsett 1.1 [42]	48
Figur 4-13: Testoppsett 2.1 [42]	49
Figur 4-14: Testoppsett 3.1 [42]	50
Figur 4-15: Testoppsett 4.1 [42]	51
Figur 4-16: Fuktmålinger utført på Lund Torv testdag 1 [42]	52
Figur 4-17: Plantegning test dag 2 [42].	53
Figur 4-18 Påstøpen brytes av lettvegger [42].	54
Figur 4-19: Oversiktsbilde fra testdag 2 [42].	54
Figur 4-20: Testoppsett 1.2 [42].	55
Figur 4-21: Testoppsett 2.2 [42]	56
Figur 4-22: Testoppsett 3.2 [42].	57
Figur 4-23: Testoppsett 4.2 [42].	58
Figur 4-24: Skjermbilde fra OMA [42].	59
Figur 4-25: Illustrasjon av akselerasjonens demping over tid [70].	60
Figur 4-26: Skjermbilde av hastighetsverdier per tid fra OMA [42].	61

Tabelliste

Tabell 2-1: Vibrasjonskriterier i EK5-25 [52].....	22
Tabell 2-2: Verdier for å bestemme k_e , 1 ved kontinuerlige dekker med 2 spenn i EK5-25 [52].	23
Tabell 2-3:Anbefalte dempingsverdier i EK5-25 [52]	25
Tabell 2-4: Inndeling av gulvklasser i EK5-25 [52].	26
Tabell 2-5, Definisjon av gulvklasser i ØNORM [54].	27
Tabell 2-6: Opplagerbetingelser for å bestemme k_e , 1 i ØNORM [54].	27
Tabell 2-7: Verdier for å bestemme k_e , 2 ved kontinuerlige dekker med 2 spenn i ØNORM [54].	28
Tabell 2-8: Gulvklassenes grenseverdier for frekvens og stivhet [54].	28
Tabell 2-9: Anbefalte dempingsverdier i ØNORM [54].	29
Tabell 2-10: Gulvklassenes grenseverdier for akselerasjon etter ØNORM [54].	29
Tabell 2-11: Kriterier for gulvklasser i H/R [55].....	30
Tabell 2-12 Anbefalt dempingsverdi for H/R [55].	32
Tabell 4-1: Oversikt av testmetoder brukt ved hvert testoppsett [42].	42
Tabell 4-2: Utstyr benyttet til målinger [42].....	42
Tabell 4-3: Mobiltelefoner brukt i målinger [42].	43
Tabell 5-1: Sammenligning av formler i de ulike beregningsmetodene [42]	64
Tabell 5-2: Beregning av ulike KLT-dekker og klassifisering i henhold til de respektive beregningsmetodene. Tabellen viser et utdrag fra Vedlegg B [42].	66
Tabell 5-3: Viser klasser for de respektive beregningsmetoder sammenlignet mot hverandre. Klassene til venstre for rød linje er etter egne krav godkjent for leilighetsbygg [42].	67
Tabell 5-4: Målt punktnebbøyning på KLT-element med 1 kN punktlast ved Lund Torv [42].	70
Tabell 5-5: Beregnet punktnebbøyning for KLT-element på testdag 1 [42].	71
Tabell 5-6: Målt frekvens og tilhørende kompleksitet fra testdag 1 ved Lund torv [42].	72
Tabell 5-7: Beregnet frekvens for testdag 1 for de respektive beregningsmetoder [42].	72
Tabell 5-8: Målt frekvens og tilhørende kompleksitet fra testdag 2 på Lund Torv [42].	74
Tabell 5-9: Beregnet frekvens, med og uten skjærdeformasjoner, testoppsett 1.2 og 2.2 og 4.2, Testdag 2 [42]	74
Tabell 5-10: Utdrag av dempingsverdier beregnet for ubehandlet KLT-dekke fra testdag 1 ved Lund Torv [42].	78
Tabell 5-11: Utdrag fra dempingsverdier beregnet for KLT-dekke med påstøp fra testdag 2 [42].	78
Tabell 5-12: Målte og beregnede hastighetsverdier v_{rms} for testmetode «gange» – testdag 1, Lund Torv [42].	81

Tabell 5-13 Målte og beregnede hastighetsverdier <i>v_{rms}</i> for testmetode «gange» – testdag 2 ved Lund Torv [42].....	81
Tabell 5-14: Frekvensmåling med mobiltelefoner testdag 1 på Lund Torv sammenlignet med resultatene fra akselerometre [34].....	83
Tabell 5-15: Frekvensmåling med mobiltelefoner testdag 2 på Lund Torv sammenlignet med resultatene fra akselerometre [42].....	84

1. Innledning

I takt med global urbanisering, klimautfordringer og politiske ambisjoner om å redusere klimagassutslipp, er byggenæringen under økende press for å utvikle mer bærekraftige løsninger [1]. Bygg- og anleggssektoren står i dag for omtrent 40 % av verdens totale energiforbruk og en tilsvarende andel av klimagassutslippene [2]. Dette gjør sektoren til en nøkkelaktør i overgangen mot lavutslippssamfunnet.

Materialvalg spiller en sentral rolle i denne overgangen. Tradisjonelle konstruksjonsmaterialer som betong og stål har høy miljøpåvirkning, særlig på grunn av energikrevende produksjonsprosesser og høye CO₂-utslipp [3]. I kontrast til dette har tre som byggemateriale fått økt oppmerksomhet i forskningslitteraturen og bransjen de siste årene, både som følge av sin evne til å lagre karbon og sitt relativt lave energibehov ved produksjon.

Spesielt trekonstruksjoner med høy grad av prefabrikasjon, som KLT-elementer, har vist seg å være attraktive alternativer i moderne byggeprosjekter, blant annet på grunn av gunstige miljøegenskaper, lav vekt og mulighet for rask montering [4]. I tillegg bidrar utviklingen av nye byggeforskrifter og sertifiseringsordninger til å fremme bruken av trebaserte materialer i både lav- og høyblokker.

Til tross for denne utviklingen er prosjekteringen av slike trekonstruksjoner fortsatt utfordrende. Dagens Eurokode 5 (EK5) retter seg primært mot heltre og limtre, og gir lite veiledning for moderne elementer som KLT og I-bjelker [5]. Som følge av dette brukes det i dag ulike beregningsmetoder og nasjonale tilnærminger. Dette fører til variasjon i forutsetninger, behov for leverandøravklaringer og økt kompleksitet i prosjekteringen.

Den kommende standarden, Eurokode 5 (EK5-25), har blant annet som formål å inkludere dimensjoneringsregler og beregningsmetoder for massivtreelementer.

Formålet med denne studien er å undersøke hvilke endringer og konsekvenser EK5-25 medfører med hensyn til vibrasjonsberegninger sammenlignet med dagens regelverk og beregningspraksis. Gjennom en kombinasjon av teoretiske analyser og casestudie på SiA studentboliger på Lund Torv [6] utføres detaljerte vibrasjonsberegninger og vurderinger. Studien søker å gi dypere innsikt i hvordan EK5-25 skiller seg fra eksisterende metodeverk, og hvilke konsekvenser dette får for dimensjonering av KLT-elementer i moderne bygg – både med hensyn til mulige innstramminger og eventuelle forenklinger.

1.1. Samfunnsperspektiv

Dette kapittelet viser hvordan bygg- og anleggsbransjen kan fremme en mer bærekraftig samfunnsutvikling gjennom økt bruk av trebaserte bygningsmaterialer, samt hvilke av FNs bærekraftsmål denne utviklingen kan bidra til å oppfylle.

1.1.1. Bærekraft i byggebransjen

FN er det viktigste internasjonale forum for forhandlinger om globale tiltak mot klimaendringer [7]. Gjennom Parisavtalen har Norge forpliktet seg til å holde den globale oppvarming under 2 grader

med et mål om å begrense temperaturøkningen til 1,5 grader [8]. Norge har som bidrag satt sitt mål for klimagassreduksjon til minst 55 % før 2030 i sammenligning med 1990-nivå. Dette betyr at Norge skal være klimanøytrale fra 2030, samtidig er det lovfestet mål i klimaloven om å bli et lavutslippssamfunn fra 2050 hvilket innebærer at klimagassutslippene reduseres med 90-95 %.

FNs bærekraftsmål er verdens felles arbeidsplan for å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 [9]. Målene består av 17 hovedmål og 169 delmål og har blitt til ved demokratiske innspill fra land over hele verden. Følgende bærekraftsmål er relevante for denne oppgaven:



Figur 1-1:
Bærekraftsmål nr.3

Figur 1-1 viser bærekraftsmål nummer 3; «Sikre god helse og fremme livskvaliteten, uansett alder» [10].



Figur 1-2:
Bærekraftsmål nr.9

Figur 1-2 viser bærekraftsmål nummer 9; «Bygge solid infrastruktur og fremme inkluderende og bærekraftig industrialisering og innovasjon» [11].



Figur 1-3:
Bærekraftsmål nr.12

Figur 1-3 viser bærekraftsmål nummer 12; «Sikre bærekraftig forbruks- og produksjonsmønstre» [12].



Figur 1-4:
Bærekraftsmål nr.13

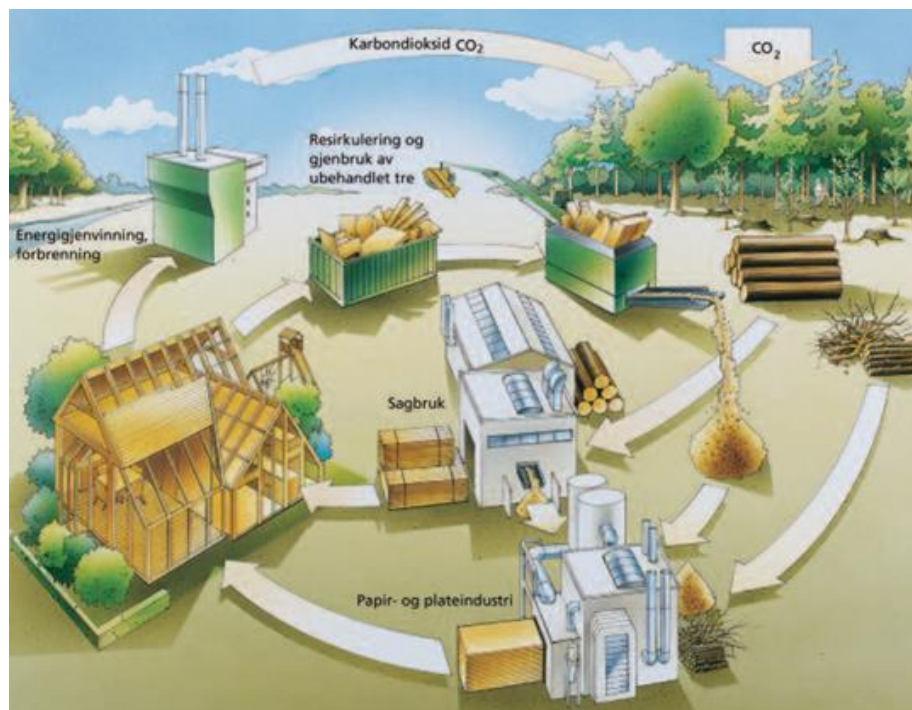
Figur 1-4 viser bærekraftsmål nummer 13; «Handle umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og konsekvensene av dem. Målet er å begrense den globale temperaturstigningen til godt under 2 grader celsius» [7].

1.2. Massivtre i et samfunns- og miljøperspektiv

I Norge har det tradisjonelt blitt bygget med trekonstruksjoner i 1-2 etasjer. Flere etasjer skaper utfordringer med stabilitet, vindbelastning og begrensninger for spennvidder ved bruk av vanlig konstruksjonstrevirke [13]. For bygg i flere etasjer har konstruksjoner i betong og stål vanligvis blitt benyttet. Innenfor de senere år har bruk av massivtre og spesielt KLT-elementer økt. Dette skyldes en rekke fordeler som f.eks. redusert belastning på fundamenter, rask montering, KLT-elementer klarer store spenn, mindre støy og støv på byggeplass, bedre fremkommelighet samt redusert karbonavtrykk [14]. Bruk av KL-tre i et systemperspektiv innebærer å se på KL-tre som en del av et større helhetlig system, hvor faktorer som bærekraft, livssyklus, økonomi, miljøpåvirkning og teknologiske muligheter vurderes. Perspektivet kan anvendes på ulike nivåer, fra skogbruk og produksjon til bygg, produktdesign og energibruk.

1.2.1. Miljømessige fordeler

Bruk av tre som byggemateriale har mange miljømessige fordeler. Tre er en fornybar ressurs og har lite negativ innvirkning på miljøet [15]. I dag opptar skog ca. en tredel av alle klimagassutslippene i Norge. Karbonlagringen i Norsk skog økes ved å drive en mer produktiv skog. Dette kan blant annet oppnås ved å ha tettere beplantning av særlig furu og gran. Ungskogpleie vil også kunne gi økt tilvekst og opptak av karbondioksid [16]. Dette gir bedre kvalitet på tømmeret og dermed kan mer av tømmeret benyttes til byggematerialer som igjen gir langvarig karbonlagring. I Norge er stort sett alt skogen sertifisert i henhold til internasjonale standarder for bærekraftig skogbruk [17]. Tre består hovedsakelig av karbon hvilket inngår i naturens eget kretsløp. Derfor skjer det en naturlig utveksling mellom jordens økosystem og atmosfæren gjennom en prosess med fotosyntese, respirasjon, nedbrytning og eller forbrenning, se Figur 1-5 [15].



Figur 1-5: Et treprodukts livssyklus[15].

Grønn materialguide har samlet sammenlignbare terskelverdier basert på miljødeklarasjonen EPD (Environmental Product Declarations) for ulike materialer i byggesektoren [18]. Guiden gir informasjon om fem områder med stor miljøpåvirkning; global oppvarming, ressursbruk, sirkulærøkonomi, miljøavgifter og innneklima. Figur 1-6 viser LCA (Life Cycle Assessment) for massivtre for fase A1-A3 som inkluderer materiale utvinning, transport til fabrikk og produksjon av materialet. Fase A4 transport til byggeplass er ikke medregnet, men har stor betydning for det samlede regnskap og skal medregnes i et komplett klimagassregnskap. Fra Figur 1-6 vises det også at for global oppvarming er anbefalt terskelverdi for massivtre på maks 95 kg CO₂ – ekv/m³, til sammenligning har lavkarbonbetong klasse A en anbefalt terskelverdi på maks 210 kg CO₂ – ekv/m³.



Figur 1-6: Grønn materialguide, terskelverdier for massivtre [18].

1.2.2. Produksjon og transport

KLT-elementer produseres hovedsakelig av gran [19]. Etter at trelasten har gjennomgått nøye kvalitetskontroll og tørket til et akseptabelt fuktighetsnivå, bearbeides det og presses sammen til ferdige elementer. CNC-maskiner sikrer høy presisjon, og alt av hulltaking for vindu, dører, ventilasjon etc. ivaretas automatisk i elementproduksjonen. Hele den automatiserte prosessen er med til å redusere avfall mens kapp ofte utnyttes til biobrensel, noe som bidrar til en bærekraftig produksjonsprosess. Transport av KLT-elementer fra fabrikk til byggeplass foregår oftest med lastebil, noe som fører til CO₂-utslipp. Tidligere ble KLT-elementer stort sett produsert i Østerrike og Tyskland, hvilket fører med seg lang transport og en negativ innvirkning på det totale klimagassregnskap. De senere år har det kommet flere produsenter i Norge og Norden, noe som reduserer transportavstandene og bidrar positivt til klimagassregnskapet og den samlede økonomi i prosjektene [18].

1.2.3. Byggetekniske fordeler

Det viktigste å ivareta på en byggeplass er HMS (Helse, Miljø & Sikkerhet), dette betyr blant annet at man skal unngå tungt fysisk arbeid, støv, støy og hudkontakt med kjemikalier [20]. Siden KLT-elementer er bearbeidet med CNC-maskiner på fabrikk trengs det lite tilpasning på byggeplass. Dette fører til mindre støy og støv samt en mer ryddig byggeplass [21]. Sammenlignet med betong elementer er KLT-elementer lettere å håndtere og det kreves mindre tungt utstyr ved monteringen. KLT-elementene monteres oftest ved hjelp av kran og monteringsprosessen vil være effektiv og føre til kortere byggetid.

1.2.4. Bruksfase og innemiljø

Det kan være flere fordeler med tre som materiale for inneklimaet i bruksfasen. Siden tre er et levende materiale kan det være med til å regulere luftfuktigheten og dermed også temperaturen [22]. Da fuktigheten i en bolig varierer med årstidene, vil treet når det er mer fuktig luft absorbere fukten og innetemperaturen stige på grunn av energi frigjøres. Når det er tørr luft, vil fukten i treet fordampe og temperaturen vil falle. Dette kan ha en positiv betydning for energiforbruket til boligen ved å fungere som et naturlig ventilasjonsanlegg. KLT-elementer har dårlig varmeledningsevne hvilket også kan medvirke til å redusere energiforbruket, dette kan ha en sammenheng med at overflatene holder lengre på varmen og temperaturen da kan senkes. Forskning viser også at rom med interiør i tre kan ha positive effekter på blant annet helse, trivsel, produktivitet samt føre til lavere stressnivå [23].

1.2.5. Levetid og sirkulærøkonomi

Et godt verktøy for å vurdere en bygnings samlede levetid er LCC (Life Cycle Cost). Alle offentlige byggeiere og byggherrer er pålagt å vurdere livssyklus-kostnader ved anskaffelser [24]. Ved å utføre en LCC-analyse kan man vurdere alle kostnadene i hele byggets levetid, dette gjelder oppføringskostnader, kapitalkostnader og FDVU (Forvaltning, Drift, Vedlikehold og Utvikling) kostnader.

På grunn av økt befolkningsvekst, økende urbanisering og mangel på utbyggbare tomter har løsningen ofte vært å rive bygg og bygge nytt med større utnyttelsesprosent [24]. Dette er lite bærekraftig og krever mye ressurser til både nedbrytning, avfallshåndtering og oppføring. Derfor er det kommet mer fokus på gjenbruk og ombruk av nye og eksisterende bygningsmasser. KL-tre har mange fordeler når det gjelder gjenbruk og ombruk og et eksempel på dette er Hasle Tre-prosjektet [25]. Her er det tenkt på gjenbruk og bygget er konstruert slik at det kan demonteres og brukes igjen hvilket bidrar til en god sirkulærøkonomi.

Levetiden til KLT-elementer er avhengig av flere faktorer. F.eks. produksjonsforhold, beskyttelse mot vær i monteringsfasen, gode fuktsikre løsninger i prosjekteringsfasen, mekaniske påvirkninger og slitasje i bruksfasen samt gode vedlikeholds intervaller [26].

2. Kunnskapsbakgrunn

I teorikapittelet blir det presentert teori og bakgrunnskunnskap som ligger bak emnene i denne rapporten. For å forstå innholdet i rapporten er det nødvendig å presentere noen bakgrunnskunnskaper for blant annet generelle egenskaper til tre, KLT-elementers oppbygging, vibrasjoner, egenfrekvens og stivhet samt dagens regelverk og den nye generasjon EK5-25.

2.1. Tre som materiale

Tre er et fornybart materiale som tar opp CO₂ fra omgivelsene [27]. Gjennom fotosyntese omdannes CO₂ og vann til oksygen og glukose. Karbonet som bindes i trevirket forblir lagret så lenge det eksisterer. Kombinasjonen av lavt energibehov ved bearbeidelse og bundet karbon i materialet gjør tre til et miljøvennlig byggemateriale. Samtidig er tre et lett materiale, med høy styrke i forhold til vekt.

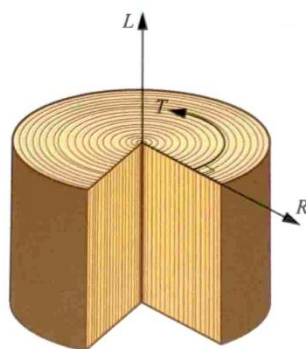
Tre er et av de mest benyttede byggematerialene i Norge, med lange tradisjoner [28]. Byggverk som vikingskip, laftebygg og stavkirker fra middelalderen finnes fortsatt. Kunnskapen om treets materialeegenskaper har gått i arv gjennom generasjoner, og mange av de gamle prinsippene er fortsatt gjeldende.

Til tross for lange tradisjoner har bruken stort sett begrenset seg til bolighus i en til to etasjer, med noen få unntak [13]. Basert på erfaringer fra USA og Canada med bruk av trekonstruksjoner opptil syv etasjer, begynte man på 1990-tallet å forske på bruken av trekonstruksjoner i flere etasjer. På denne tiden begynte Østerrike også å utvikle massivtreteknologien. Norges første bygg i massivtre ble oppført på Svartlamoen i 2005 [29].

For konstruksjonsformål har det vært nødvendig å fastsette materialverdier for beregningsgrunnlag. Konstruksjonstrevirke er tilgjengelig i forskjellige fasthetsklasser definert i NS-EN 338 [30]. De vanligste treslagene i konstruksjonstrevirke er furu og gran, og de mest brukte fasthetsklassene er C18, C24 og C30.

2.1.1. Ortotropiske egenskaper

Tre er et materiale med tre ortogonale retninger vist i Figur 2-1 [31]. langs fiberretningen (L), tvers på fiberretningen i radiell retning (R) og tvers på fiberretningen tangentielt til årringene (T). Selv om treet har fysiske og mekaniske egenskaper som er forskjellig i R- og T-retning, er forskjellene ikke større enn at de kan ansees som like for praktiske formål. Dette vil si at treet kan anses med egenskaper i fiberretning og på tvers av fiberretningen.

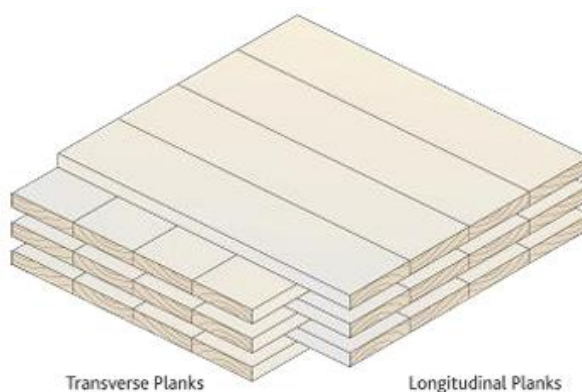


Figur 2-1: Treets hovedretninger [31].

2.1.2. Kryss-laminert tre (KLT)

Massivtre er en samlebetegnelse for konstruksjonsdeler sammensatt av to eller flere deler av tre. Delene kan limes, skrus eller monteres sammen på annen måte.

KLT er en forkortelse for «kryss-laminert tre». KLT består av flere lag med lameller limt sammen i kryssende retninger som vist i Figur 2-2. Gjeldende Eurokode 5 angir ikke verdier for fasthet og stivhet, verdiene er spesifisert i standarden NS-EN 338 [30]. For konstruksjonsvirke benyttes C-klasser hvor bøyefasthet er dominerende. For lameller til limtre og massivtre benyttes T-klasser som defineres av strekkfastheten. Limprosessen skal utføres i samsvar med NS-EN 16351 [32]. Antall sjikt bestemmes ut fra elementets krav til styrke og stivhet, og det er vanlig med 3, 5, 7 eller 9 sjikt. Tykkelsen på lamellene varierer normalt mellom 20 og 50 mm, og kan ofte være forskjellig i elementets lengde- og tverretning [33].



Figur 2-2: Illustrasjon av treets fiberretninger i et KLT-element [34].

2.1.3. Fuktighet

Tre er et hygroskopisk materiale som trekker til seg eller gir fuktighet i omgivelsene avhengig av luftfuktigheten. Treets materialeegenskaper påvirkes av trevirkets fuktinnhold [31]. Fuktinnholdet angis som vektprosent og regnes som forholdet mellom vannets vekt og treets vekt uten innhold av vann. Treets materialeegenskaper er målt ved 20°C og RF 65 %. Det gir trevirke en likevekts fuktighet til omgivelsene på ca. 12 % og ansees som tørt trevirke [31]. KLT-elementer leveres normalt med ca. 12 vektprosent for å redusere faren for oppsprekking. Kritisk nivå for fuktinnhold for trevirke som skal bygges inne er 20 %, mens konstruksjoner som vil ha lav uttørkingsevne bør ha fuktinnhold lavere enn 15 % [35].

2.2. Dynamisk respons og vibrasjoner i konstruksjoner

Vibrasjoner er svingninger som oppstår når et objekt beveger seg frem og tilbake over sin likevektsposisjon. Vibrasjoner kan deles til tvungne og frie vibrasjoner [36]. Tvungne vibrasjoner oppstår når et system påvirkes av en ytre kraft. Frie vibrasjoner oppstår når et system fortsetter å svinge uten ytre påvirkning etter å ha blitt forstyrret.

Frekvensen til vibrasjoner angir antallet svingninger per sekund. Amplituden er den maksimale avstanden et vibrerende objekt beveger seg fra likevektsposisjonen. Damping refererer til reduksjonen av svingningenes amplitude over tid, ofte på grunn av friksjon eller motstand.

For lette konstruksjoner, f.eks. massivtredekker som påvirkes av menneskelig aktivitet, er det ofte kravet om å unngå ubehagelige vibrasjoner og ikke bruddstyrken som avgjør dimensjonen [37]. Vibrasjoner blir ubehagelige når utsvingene blir merkbare, spesielt når svingfrekvensen er lav og de ikke dempes umiddelbart. Derfor er det viktig å ha kunnskap om konstruksjonens egenskaper for å kunne gi pålitelige anbefalinger.

2.2.1. Frekvens

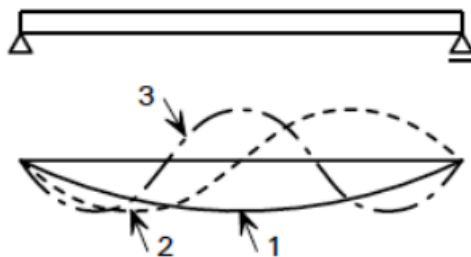
Systemets frekvens måles i Hertz (Hz), og angir hvor hurtig systemet svinger per sekund. Frekvens er en viktig del av vibrasjoner [38]. Dersom påvirkende frekvens sammenfaller med systemets egenfrekvens vil det oppstå store svingninger i systemet, dette kalles resonans. Derimot hvis systemets frekvens er mindre eller større enn den påførte frekvensen, vil effekten på systemet være liten.

2.2.2. Egenfrekvens

For et system med påførte svingninger refererer egenfrekvensen til de frekvensene som svingebevegelsen inntar når systemet er overlatt til seg selv [39]. Egenfrekvensen avhenger av systemets masse, lengde og stivhet.

Et system som for eksempel en fritt opplagt bjelke har en rekke egenfrekvenser som er tilhørende sin respektive svingemode [38]. Svingemodene beskriver som vist i Figur 2-3 ulike måter et system kan vibrere på. Den første svingemoden er den enkleste og har sammenheng med fundamentalfrekvensen og kan leses av likning (2-1).

$$f_1 = \frac{\pi}{2L} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2-1)$$



Figur 2-3: Svingemoder for fritt opplagt bjelke [38].

2.2.3. Vibrasjoner i KLT-dekker

For design av KLT-dekker, er det ofte bruksgrensetilstanden (SLS) som er styrende [40]. Herunder kan sjenerende vibrasjon oppstå, noe som skal hensyntas ved dimensjonering av KLT-dekker. Selv om vibrasjoner kan oppstå av andre kilder slik som for eksempel trafikk, maskiner o.l. er det ofte brukerne av dekket som skaper problematikken i sine hverdagslige aktiviteter for vibrasjoner i dekket. Vibrasjoner er spesielt problematiske fordi de er vanskelige å isolere fra konstruksjonen, samtidig som de forekommer hyppig. Sammenlignet med tunge gulv av f.eks. betong er amplitudene av vibrasjonsresponser fra menneskelig aktivitet i tregulv høye. Vibrasjoner blir ubehagelige når utsvingene blir merkbare, spesielt når svingfrekvensen er lav og ikke dempes umiddelbart.

2.2.4. Stivhet

Stivhet er en mekanisk egenskap som beskriver et materials evne til å motstå deformasjoner når det utsettes for en kraft.

KLT-dekkets stivhet påvirker bruksgrensetilstanden både for nedbøyning og egenfrekvens. Vekslede fiberretning i sjiktene gir ulik stivhet i elementenes lengde- og tverretning. Sjøkttykkelse, antall sjikt i

hver retning og gjeldende E-modul gir elementets lengdestivhet EI_L og tverrstivhet EI_T [41]. Skal det skal påstøp på dekket, vil den totale stivheten øke som følge av at KLT-elementets og påstøpens stivheter summeres. Dersom det i tillegg oppnås samvirke mellom KLT og påstøp vil den totale stivheten øke ytterligere. Stivheten i KLT-elementer blir angitt som stivhet per meter $\left[\frac{\text{Nmm}^2}{\text{m}}\right]$.

2.2.5. Resonant vibrasjon

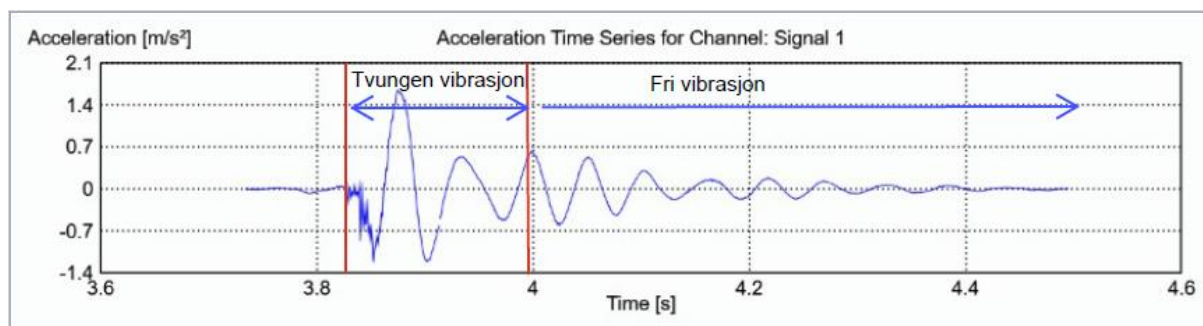
Når en periodisk kraft virker på et system med samme frekvens som egenfrekvensen til systemet, vil systemet ta til seg energi og systemets svingninger øker [39].

Dersom påvirkende kraft fra f.eks. gange sammenfaller med gulvets egenfrekvens, vil det oppstå svingninger i gulvet som igjen gir resonans. Dersom gulvets egenfrekvens ligger under 8-10 Hz, som ofte er klassifisert som lavfrekvente gulv, kan det oppstå resonansvibrasjoner når man går på gulvene [40]. Resonans vibrasjoner oppstår når gangfrekvensen treffer gulvets naturlige frekvens og opprettholdes ved f.eks. kontinuerlig gange.

2.2.6. Transient vibrasjon.

Transient vibrasjon refererer til vibrasjoner som oppstår i et system etter en kortvarig kraftpåvirkning som f.eks. et slag eller fottrinn. Transiente vibrasjoner kan kjennetegnes av en avtagende (dempet) respons over tid.

Når et gulvsystem blir utsatt for fottrinn, vil dets vibrasjonsrespons oppstå av to årsaker, som vist i Figur 2-4 [36]. Den første årsaken er tvungen vibrasjon når kraften fra hælene aktiverer systemet, mens den andre årsaken er gulvets frie vibrasjon som avtar over tid. Den frie vibrasjonen inneholder bestemte frekvenser som er karakteristiske for systemet og de respektive svingemodene.



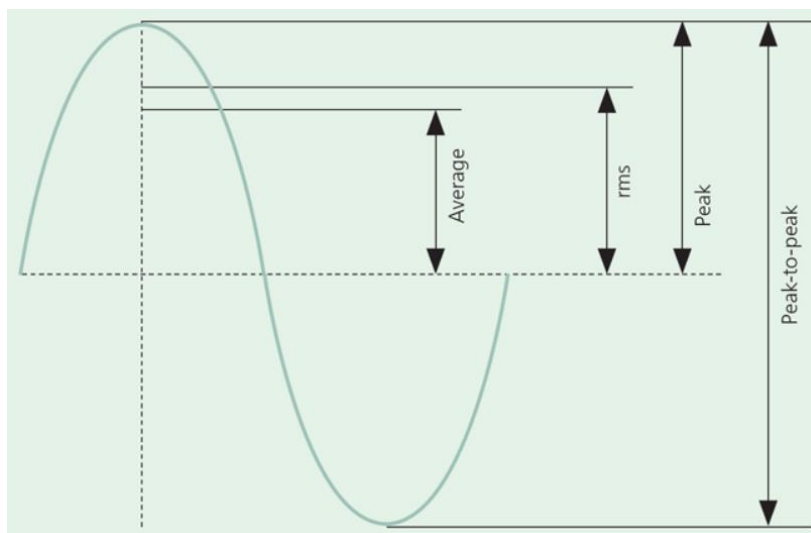
Figur 2-4: Illustrasjon av transient vibrasjon fra «heel-drop» [42].

Når et gulv blir utsatt for et støt, kan den midlertidige responsen måles som forskyvning, hastighet eller akselerasjon over tid [36]. Forskere bruker verdier som toppverdi eller root-mean-square (rms) verdi av hele responsen for å måle menneskelig reaksjon på vibrasjon.

Toppverdi - Dette er den høyeste verdien av responsen, som kommer fra den første delen av responsen (tvungen vibrasjon) på grunn av støtet.

RMS-verdi - Dette er en gjennomsnittsverdi som inkluderer hele responsen, både den tvungne og den frie vibrasjonen.

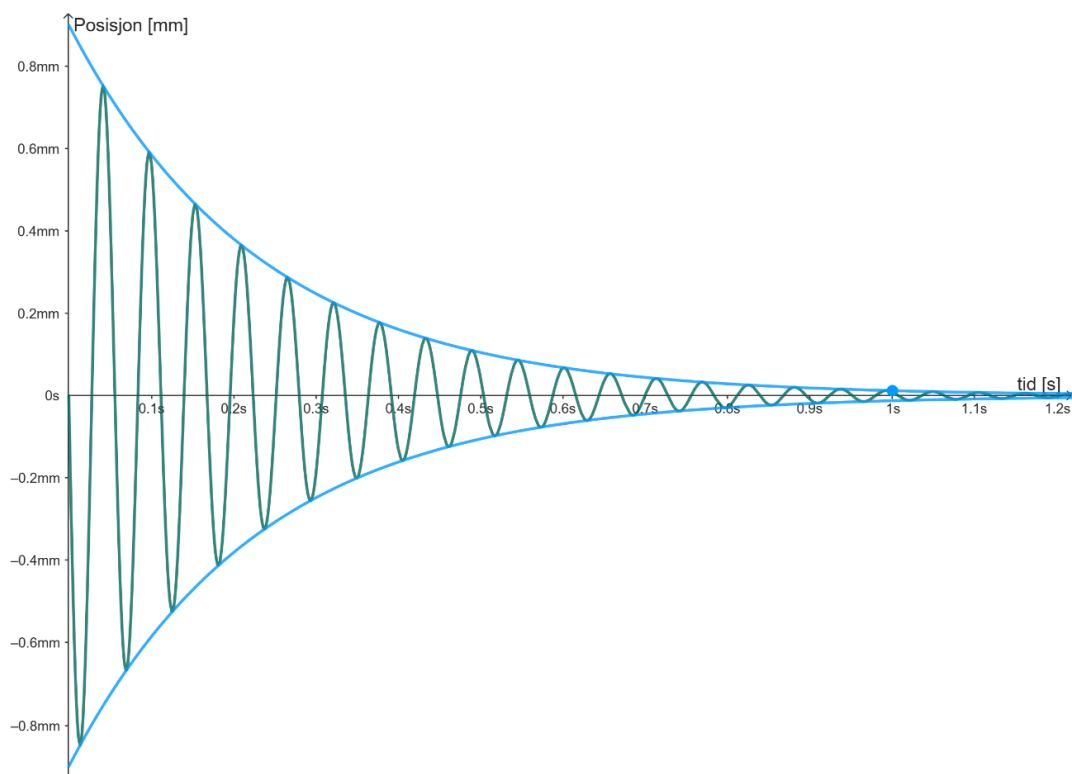
Selv om både toppverdi og rms-verdi er knyttet til egenskapene til støtet og gulvet, tar rms-verdien også hensyn til varigheten av den midlertidige responsen. Forskjellene er illustrert i Figur 2-5.



Figur 2-5: Peak (toppverdi) og rms verdi for en sinusbølge [43].

2.2.7. Damping

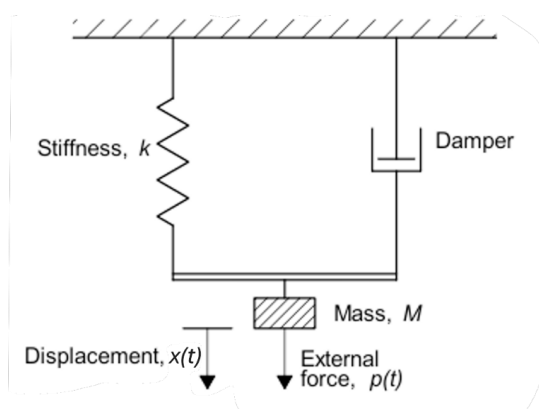
Damping er en egenskap som påvirker vibrasjonsamplituden under transient vibrasjon hvor amplituden avtar over tid [36]. Materialdamping og friksjon mellom komponenter antas å være de viktigste kildene til damping i gulv systemer. Damping som tilsvarer hver svingemode kalles modal damping. Modal damping for den grunnleggende modusen er den mest brukte dempingsverdien innenfor feltet. Figur 2-6 viser hvordan dempingen reduserer amplituden over tid.



Figur 2-6 Illustrasjon av en dempet svingning [42].

2.2.8. Svingninger i et SDOF system.

Vibrasjoner i et dekke kan betraktes som et SDOF (single degree of freedom) system [38]. Systemet er kun påvirket av en forskyvning normalt på dekket. Et SDOF-system er som vist i Figur 2-7, avhengig av parametere som masse, kraft, damping, og stivhet.



Figur 2-7: Illustrasjon av et SDOF system [38].

Fra Newtons andre lov kan systemets svingning uttrykkes som en differensiallikning [44]:

$$kx + bv = -ma$$

Her er:

- k Fjærstivhet
- x Avstand fra likevekts punktet
- b Dempings faktor til en viskøs demping
- v Hastighet
- m Massen i sving
- a Akselerasjon

Dette kan skrives slik:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + b \cdot \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

Forenkler uttrykk:

$$\frac{b}{m} = 2\delta, \quad \frac{k}{m} = \omega_0^2$$

Karakteristisk likning:

$$\lambda^2 + 2\delta \cdot \lambda + \omega_0^2 = 0$$

Gir karakteristiske røtter:

$$\lambda = \frac{-2\delta \pm \sqrt{4\delta^2 - 4\omega_0^2}}{2} = -\delta \pm i\omega$$

Hvor:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Det er her det bestemmes om det er underdempet, overdempet eller kritisk dempet svingning. I KLT-dekker er det underdemping som er gjeldene fordi $0 < \delta < \omega_0$ [44].

Allmenn løsning:

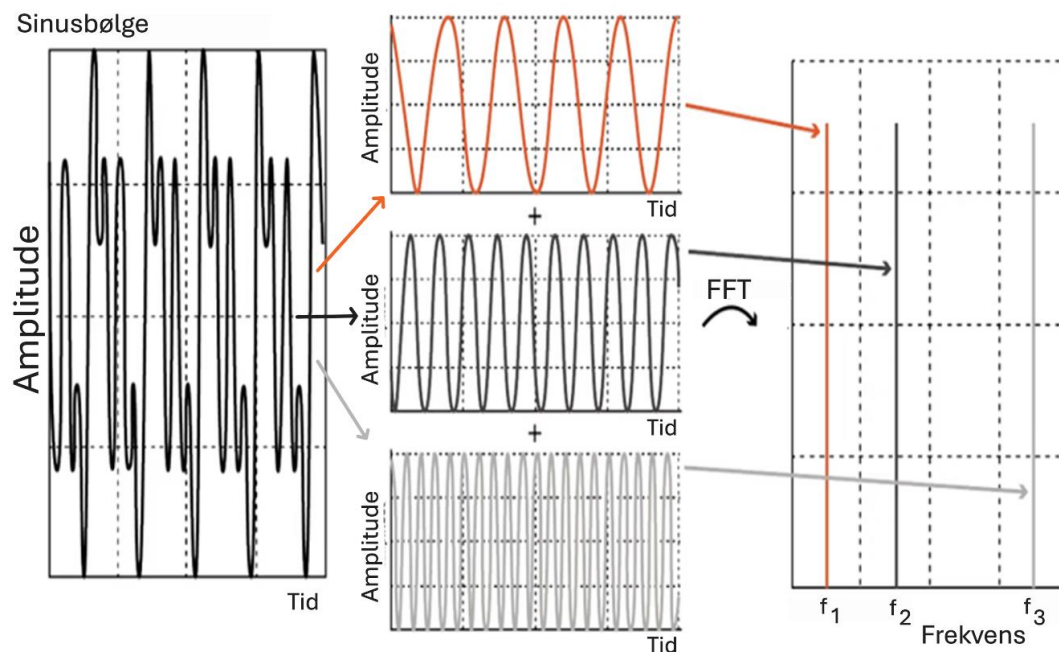
$$x(t) = Ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \phi)$$

- A Amplitude
- ϕ Faseforskyvning
- δ Demping
- ω Vinkelfart
- t Tid

Figur 2-6 viser at systemet går mot 0, når $t \rightarrow \infty$.

2.2.9. FFT Spectrum (Fast Fourier Transformation spectrum).

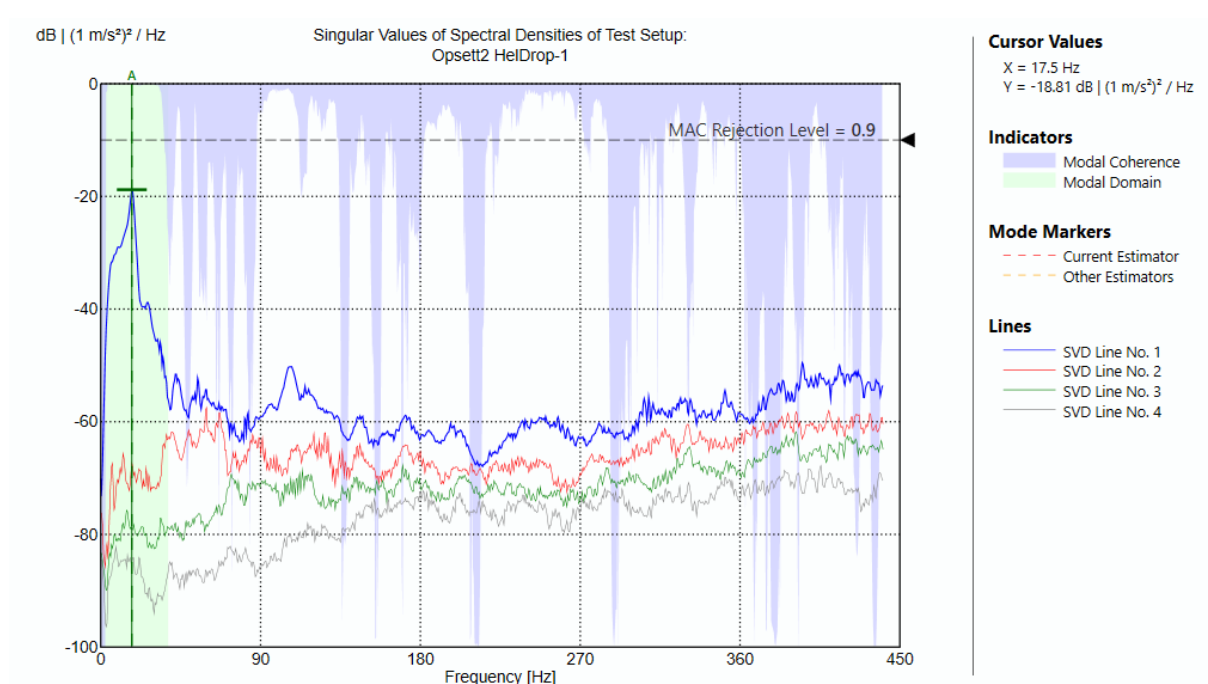
Fast Fourier transformasjon er en matematisk funksjon som kan transformere for eksempel signaler gitt i et tidsdomene til et frekvensdomene [45]. Ved en harmonisk svingning vil frekvensene bli vist slik som Figur 2-8 med markant frekvens.



Figur 2-8: Overføring av en harmonisk svingning fra tidsdomene til frekvensdomene [46].

Visse kritiske vibrasjonskomponenter som samsvarer med spesifikke svingemoder kan forekomme ved lave amplituder [43]. Disse komponentene er mindre fremtredende på en lineær amplitudeskala fordi lave amplituder har en tendens til å flate ut nederst på skalaen. En logaritmisk skala presenterer derimot viktige vibrasjonskomponenter tydelig uavhengig av amplitude. Videre kan prosentvise endringer i amplitude leses direkte som en dB-endring. På grunn av dette plottes støy- og vibrasjonsfrekvensanalyser vanligvis på en logaritmisk amplitudeskala.

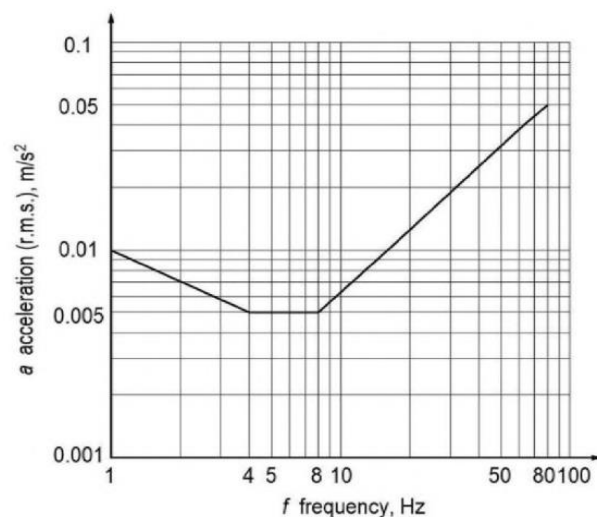
Eksempelvis for en bjelke, kan det samles inn data av akselerasjon over tid som fremkalles av en ytre kraft. Bevegelsene vil da ligne en sinusbølge. Denne sinusbølgen kan transformeres med «FFT» fra tidsdomene til frekvensdomene. Ved analysering får man som vist i Figur 2-9 topper som samsvarer med bjelkens egenfrekvenser.



Figur 2-9: Eksempel på analyse av FFT og flere topper [42].

2.2.10. Menneskets opplevelse av vibrasjon

Akseptable vibrasjonsnivåer på menneskelige oppholdsrom varierer med individet, personens aktivitet, miljøet rundt og personens forventning av følt vibrasjon [47]. Kurven i Figur 2-10 indikerer terskelen hvor vibrasjoner i vertikal retning blir ubehagelige for mennesker [40]. Særlig viktig er frekvens område fra 4–8 Hz. Grunnen til at dette området er spesielt viktig, er at store organer i kroppen, som de i brystkassen og magen, begynner å vibrere i takt med disse frekvensene.



Figur 2-10: Toleranse for menneskefølte vibrasjoner [38].

2.2.11. Skjærpåvirkning

Spenningsfordeling og deformasjon i et KLT-dekke som blir belastet vertikalt er også avhengig av skjærdeformasjonen [41]. Figur 2-11 viser skjærdeformasjoner i KLT. Skjærdeformasjonen øker med tykkere sjikt i tverrgående retning.



Figur 2-11 Skjærdeformasjoner i KL-tre [48].

Skjærdeformasjoner kan regnes med flere forskjellige metoder. I denne oppgaven anvendes *Shear Analogy Method*. Med denne metoden erstattes EI_l med $EI_{l,app}$ som regnes etter formelen [40]:

$$EI_{l,app} = \frac{EI_l}{1 + \frac{k_s \cdot EI_l}{GA_l \cdot L^2}} \left[\frac{\text{Nmm}^2}{\text{m}} \right]$$

Der

$(EI)_l$ er effektiv stivhet i lengderetningen

k_s er en konstant basert på virkningene av skjærdeformasjon. Denne kan settes til 11,5 ved jevnt fordelt last og støtte på to sider [40].

L er lengde på spennet

$(GA)_l$ er skjærstivhetsareal

Det finnes vurderinger av når skjærdeformasjoner medregnes i formlene for vibrasjon. I fokus nr. 20 utgitt av Treteknisk er det oppgitt en formel for når skjærdeformasjoner medregnes [15]:

$$L/t < 30 \quad (2-2)$$

Der

L er lengden på spennet

t er tykkelsen på elementet

2.2.12. Dynamisk E-modul

Elastisitetsmodulen kan betraktes annerledes dersom den er utsatt for dynamisk påkjenning i stedet for statisk påkjenning. Norsk granvirke brukt i KL-tre kan gi en økning på 4 % fra den statiske til den dynamiske E-modulen [49]. Dersom fundamental frekvensen er kjent, kan likning (2-3) brukes til å finne den dynamiske E-modulen [50].

$$E_{dyn} = \rho(2Lf_1)^2 \quad (2-3)$$

2.3. Regelverk og metoder for vurdering av vibrasjoner

Vibrasjonsberegning av trekonstruksjoner blir i dag håndtert på ulike måter, både i Norge og internasjonalt [51]. På slutten av 1950-tallet ble nedbøyning under en punktlast innført som en metode. Senere har også vurderingskriterier som grenseverdier for konstruksjonens egenfrekvens og en maksimal impulshastighet, samt en kombinasjon av disse blitt benyttet. Omfattende arbeid har blitt utført opp gjennom årene og disse har også fått plass i gjeldende Eurokode 5 [5]. I Norge kom SINTEF på 2000-tallet med egne anbefalinger på bakgrunn av tidligere utført forskningsarbeid [51]. Østerrike som er et foregangsland med hensyn til massivtrekonstruksjoner, har som eneste land et eget nasjonalt tillegg med omfattende regler for dokumentasjon av vibrasjoner i konstruksjoner. De senere år har det pågått et stort arbeid med revidering av Eurokode 5, her har regler for beregning av vibrasjoner fått et eget kapittel.

2.3.1. Eurokode 5 (EK5)

Eurokode 5 er den europeiske standarden for trekonstruksjoner [5]. Standarden beskriver felles europeiske beregningsregler, samtidig som den åpner for nasjonale tillegg. I nasjonalt tillegg kan de enkelte lande korrigere verdier og beregningsmetoder for å tilpasse reglene til geografiske forhold. Ved å oppfylle kravene gitt i standarden tilfredsstilles også kravene i byggeteknisk forskrift (TEK 17), hvilket betyr at man ikke trenger ytterligere dokumentasjon.

Eurokode 5 har regler for vibrasjon i konstruksjonsdeler. Den angir betingelser for å opprettholde funksjonen og komforten til konstruksjoner. Dampingsfaktoren er satt til 1 %, med mindre annet kan dokumenteres. For boliggulv med egenfrekvens under 8 Hz kreves spesielle undersøkelser, som ikke utdypes i standarden. For gulv med egenfrekvens større enn 8 Hz må følgende betingelser oppfylles:

$$\frac{w}{F} \leq a \quad \left[\frac{\text{mm}}{\text{kN}} \right]$$

Og

$$v \leq b(f_1 \cdot \zeta^{-1}) \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{Ns}^2} \right]$$

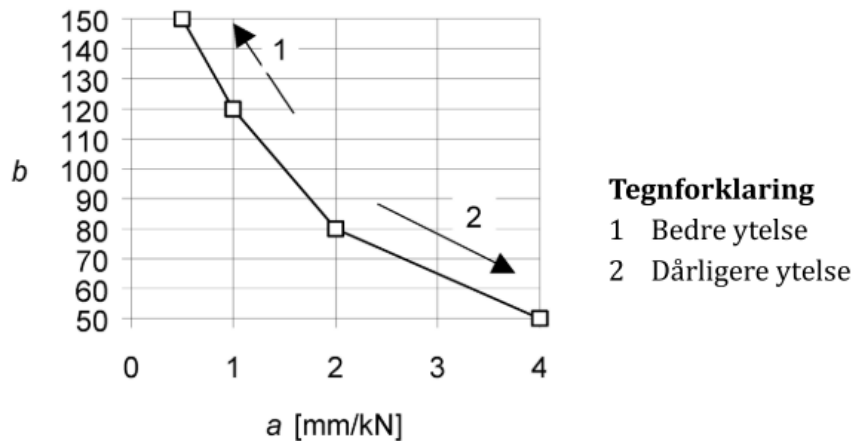
Hvor

- w er den største vertikale punktnedbøyning forårsaket av en vertikal punktlast $F = 1 \text{ kN}$
- v er hastighetsresponsen ved en enhetsimpuls. Som er den største initialverdien for gulvets vibrasjonshastighet $[\text{m/s}]$ forårsaket av ideell enhetsimpuls ($1,0 \text{ Ns}$) påført det punktet i gulvet som gir maksimal respons. Komponenter over 40 Hz kan ses bort fra.
- ζ er den relative dempingen, settes lik 1 %

a er den eneste verdi som er nevnt i det norske nasjonale tillegget. Tillegget sier at grenseverdien a for gulv i bolig med spennvidde inntil 4,5 meter bør settes lik:

- Normal stivhet: $a = 0,9 \left[\frac{\text{mm}}{\text{kN}} \right]$
- Høy stivhet: $a = 0,6 \left[\frac{\text{mm}}{\text{kN}} \right]$

b hentes fra Figur 2-12. Må ikke forveksles med bredde i likning (2-4):



Figur 2-12: b -verdi avhengig av hvilken a -verdi som beregnes

Eigenfrekvensen regnes:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}}$$

Der

f_1 er egenfrekvensen [Hz]

m er masse per arealenhet [kg/m^2]

l er gulvets spennvidde [m]

EI_l er gulvets ekvivalente bøyestivhet i plateplanet om akse tvers på bjelkeretningen [Nmm^2/m]

Punktnebbøyning regnes:

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI_l \cdot b} \quad (2-4)$$

Responshastigheten regnes:

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{mbl + 200}$$

der

v er hastighetsresponsens enhetsimpuls [m/Ns²]

b er gulvbredde [m]

m er massen [kg/m²]

l er gulvets spennvidde [m]

n_{40} er førsteordensmodi med egenfrekvenser opptill 40 Hz

2.3.2. Kommende generasjon Eurokode 5 (EK5-25)

Det pågår arbeid med en ny generasjon av Eurokode 5 [52]. En foreløpig versjon er sendt ut på høring og er derfor ikke tilgjengelig hos Standard Norge. Høringsutkastet som er tilgjengeliggjort for bachelorgruppen via veileder er «FprEN 1995-1-1 2025». EK5-25 er forventet publisert i 2027. Det gjøres flere endringer for kapittelet som omhandler vibrasjoner. KLT som ikke er nevnt i gjeldende Eurokode 5, har fått flere egendefinerte verdier i EK5-25.

Vibrasjonskriterier i henhold til gulvytelsesklasser vist i Tabell 2-1 må innfris.

Tabell 2-1: Vibrasjonskriterier i EK5-25 [52].

	Gulvytelsesklasser							
Kriterier	1	2	3	4	5	6	7	8
For alle gulv i brukskategoriene A, B, C1, C3 og D som definert i prEN 1991-1-1:2023								
Frekvens kriterier	$f_1 \geq 4,5 \text{ Hz}$				$f_1 \geq f_{1,lim}$			
Stivhets kriterier	$w_{1kN} \leq w_{lim} \text{ mm}$							
Nedbøyningsgrense w_{lim}	$w_{lim} = w_{lim,max}$			$w_{lim} = \max \left\{ w_{lim,max} \cdot \frac{3,6}{l}; 0,5 \right\} \leq w_{lim,max}$				
Øvre nedbøynings- grense $w_{lim,max}$	0,25		0,5	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
Hastighetskriterier	$v_{rms} \leq v_{rms,lim} \text{ m/s}$							
Grense hastighets respons $v_{rms,lim}$	0,0004	0,0008	0,0012	0,0016	0,0024	0,0036	0,0042	0,0048
For gulv med resonansrespons med fundamental frekvens $f_1 < f_{1,lim}$								
Akselerasjonskriterier	$a_{rms} \leq a_{rms,lim} \text{ m/s}^2$				Ikke aktuelt			
Grense for rms verdi for akselerasjon $a_{rms,lim}$	0,02	0,04	0,06	0,08				

Eigenfrekvensen regnes:

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Med

$$k_{e,2} = \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot (EI)_b}{(EI)_l}}$$

Hvor

$k_{e,1}$ er en faktor ved doble spenn på stive støtter som kan hentes fra Tabell 2-2

$k_{e,2}$ er en faktor som tar hensyn til effekten av gulvets tverrstivhet (ved gulv med enveisspenn er $k_{e,2} = 1,0$)

l er gulvspennet (det lengste spenn ved doble spenn)

$(EI)_l$ er gulvets bøyestivhet i spennretningen pr. meter

m er gulvets masse pr. enhetsareal

b er gulvbredden

$(EI)_b$ er gulvets bøyestivhet på tvers av spennretningen pr. meter

Tabell 2-2: Verdier for å bestemme $k_{e,1}$ ved kontinuerlige dekker med 2 spenn i EK5-25 [52].

l_2/l^a	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$k_{e,1}^b$	1,0	1,09	1,16	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,41
^a l ansees som det lengste spennet									
^b Verdiene kan interpoleres									

Grensen for fundamentalfrekvensen hvor resonansresponsen ikke vil oppstå er:

Hvor

$$f_{1,lim} = 4 \cdot f_w \quad (2-5)$$

f_w er gangfrekvensen. Gangfrekvensen f_w bør antas å være minst 1,5 Hz for boliggulv og 2,0 Hz for gulv i andre bruksgrupper. For gulv med uhindret passasje i mer enn 10 m, bør gangfrekvens settes til 2,5 Hz for alle gulv og bruksgrupper.

$f_{1,lim}$ vil endre seg for leilighetsbygg, da den minste tillatte verdien er 8 Hz. f_w vil derimot forholde seg uendret på 1.5 Hz i forhold til likning (2-5) selv om $f_{1,lim} = 8$ Hz.

Stivhet regnes etter EK5-25 ved å finne den maksimale deformasjonen w_{1kN} på grunn av en punktlast $F = 1$ kN på den mest ugunstige posisjon.

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$$

Hvor

b_{ef} er den effektive bredden

$$b_{ef} = \min \left\{ 0,95 \cdot \left(\frac{(EI)_b}{(EI)_l} \right)^{0,25} ; b \right\}$$

Det er også oppsatt kriterier for akselerasjon. Kravet til akselerasjon skal oppfylles når det kan oppstå resonans i konstruksjonen. Dette gjelder ifølge Tabell 2-1 når beregnet frekvens er mindre enn grenseverdien for frekvens $f_1 < f_{1,lim}$.

Formel for akselerasjon:

$$a_{rms} = \frac{k_{res} \cdot \mu_{res} \cdot F_{dyn}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M^*}$$

Hvor

k_{res} er en faktor som tar høyde for høyere vibrasjonsmoduser

μ_{res} er en resonansfaktor, settes til 0,4

F_{dyn} er den vertikale dynamiske kraften fra den antatte vekten til en gående person, og bør settes som $F_{dyn} = 50 \text{ N}$

$\sqrt{2}$ er en verdi som gjør om en toppverdi til en root mean square verdi.

ζ dempingsfaktoren Tabell 2-3

M^* er den modale massen

$$M^* = \frac{m \cdot l \cdot b}{4}$$

I kommende EK5-25 er det satt krav til hastighet. Kravene til hastighet skal oppfylles uansett egenfrekvensverdier.

Formel for hastighet:

$$v_{rms} = v_{tot,peak} \cdot (0,65 - 0,01 \cdot f_1) \cdot (1,22 - 0,11 \cdot \zeta) \cdot \eta \quad (2-6)$$

Hvor

$v_{tot,peak}$ er den totale toppfartsresponsen

$$v_{tot,peak} = k_{imp} \cdot v_{1,peak}$$

Der

k_{imp} er en faktor som tar høyde for de høyere moduser i den transiente responsen

$$k_{imp} = \max \left\{ 0,48 \cdot \left(\frac{b}{l} \right) \cdot \left[\frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right]^{0,25} ; 1,0 \right\}$$

Og

$v_{1,peak}$ er toppfartresponsen, i [m/s]

$$v_{1,peak} = k_{red} \cdot \frac{I_{mod,mean}}{(M^* + 70)} \quad (2-7)$$

Der

k_{red} er en reduksjonsfaktor som settes til 0,7

70 er antatt vekt på en person som går i kg

$I_{mod,mean}$ er den gjennomsnittlige modulære impulsen

$$I_{mod,mean} = \frac{42 \cdot f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}}$$

Hvor

$$\eta = \begin{cases} 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{når } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,9 \text{ ellers } \eta = 0,59 \\ 1,35 - 0,4 \cdot k_{imp} & \text{når } 1,0 \leq k_{imp} \leq 1,7 \text{ ellers } \eta = 0,67 \end{cases}$$

Bjelkelag

Alle andre gulv

ζ

er dempingsfaktoren som velges etter gulvtype i Tabell 2-3.

Tabell 2-3: Anbefalte dempingsverdier i EK5-25 [52]

Gulvtype	Dempingsfaktor ζ
Bjelkelag	0,02
Tre-betong-gulv, ribbegulv og platetyper (f.eks. CLT, LVL, GLVL, GL)	0,025
Bjelkelag med et flytende gulv	0,03
Tre-betong-gulv, ribbegulv og platetyper (f.eks. CLT, LVL, GLVL, GL) med et flytende gulv	0,04

Gulvytelsesklasse for brukskategori A og B angitt i Tabell 2-4.

Tabell 2-4: Inndeling av gulvklasser i EK5-25 [52].

Bruks kategori	Premium choice	Standard choice	Base choice
A (Bolig) - multi-family building (leilighetsbygg) - Single family building (enebolig)	Klasse 1-3	Klasse 4-5	Klasse 6-7
	Klasse 1-4	Klasse 5	Klasse 6-8
B (kontor)	Klasse 1-2	Klasse 3	Klasse 4-5

2.3.3. Østerrikes nasjonale tillegg til EK5 (ØNORM)

Østerrike har brukt massivtre siden 1990-tallet og landet er i dag verdens største produsent av massivtre [53]. Landet har derfor også en ledende posisjon innen forskning på trekonstruksjoner. I det nasjonale tillegg har Østerrike med et eget avsnitt som omhandler vibrasjoner.

ØNORM definerer tre gulvklasser, disse er vist i Tabell 2-5

Tabell 2-5, Definisjon av gulvklasser i ØNORM [54].

Brukskategorier (ØNORM)	Dekkeklasse 1	Dekkeklasse 2	Dekkeklasse 3
	A1, B, C1, C2, C3.1, D		A2
Brukstilfeller	Multi-family house, Korte spenn, Kontorer	Single-family house	Bruk uten krav

Eigenfrekvens for gulv opplagt på to sider regnes:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}}$$

Med opplegg på alle fire sider:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^4 \cdot \left(\frac{EI_b}{EI_l}\right)}$$

I Østerisk tillegg kan man justere frekvensen etter opplager betingelsene fra Tabell 2-6.

Tabell 2-6: Opplagerbetingelser for å bestemme $k_{e,1}$ i ØNORM [54].

Koeffisienter for opplagerbetingelser	$k_{e,1}$
Ledd - ledd	1,000
Fast innspent - ledd	1,562
Fast innspent – fast innspent	2,268
Fast innspent - utkraget	0,356

Frekvensen blir også justert etter Tabell 2-7 når det er kontinuerlig dekke over 2 spenn:

Tabell 2-7: Verdier for å bestemme $k_{e,2}$ ved kontinuerlige dekker med 2 spenn i ØNORM [54].

l_2/l	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$k_{e,2}$	1,000	1,090	1,157	1,206	1,245	1,282	1,318	1,359	1,410	1,474	1,562

Der

l er spennet i største felt

l_2 er spennet i det minste felt

Stivhetskriteriet i Østerrikes tillegg er basert på en punktlast $F = 1$ kN, påført midt på dekket.

$$w_{stat} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$$

der

w_{stat} er den vertikale nedbøyning som følge av en punktlast på $F = 1$ kN

b_{ef} er effektiv bredde:

$$b_{ef} = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

Minste tillatte frekvens i Østerrikes tillegg er $f_{1,min} \geq 4,5$ Hz. Grenseverdiene for gulvklasse 1-3 er definert etter Tabell 2-8:

Tabell 2-8: Gulvklassenes grenseverdier for frekvens og stivhet [54].

Kriterier	Gulvklasse 1	Gulvklasse 2	Gulvklasse 3
Grenseverdi for frekvenskriterier	$f_1 \geq f_{grense} = 8 \text{ Hz}$	$f_1 \geq f_{grense} = 6 \text{ Hz}$	—
Grenseverdi for stivhetskriterier	$w_{stat} \leq w_{grense} = 0,25$	$w_{stat} \leq w_{grense} = 0,5$	—

For gulvdekker med $f_{1,min} \leq f_1 \leq f_{grense}$ må krav til akselerasjon oppfylles, gitt ved formelen:

$$\alpha_{rms} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*}$$

Der

α er fourierkoeffisienten til den 1. egenfrekvens. Regnet som: $\alpha = e^{-0,4 \cdot f_1}$

F_0 Kraften til en person på det betraktete dekke (kan settes til $F_0 = 700 \text{ N}$)

ζ Den modale dempingsfaktor gitt i Tabell 2-9

M^* Den modale massen, regnet: $M^* = \frac{m \cdot l \cdot b_{ef}}{2}$

Den modale dempingsfaktoren er angitt i Tabell 2-9.

Tabell 2-9: Anbefalte dempingsverdier i ØNORM [54].

Oppbygging gulvkonstruksjon	Modale dempingsfaktor ζ
Gulvkonstruksjon uten eller med lett gulvoppbygging	0,01
Gulvkonstruksjon med flytende avretningsmasse	0,02
Massivtredekker uten eller med lett gulvoppbygging	0,025
Bjelkelag og massivtredekker med flytende avretningsmasse	0,03
Massivtredekker med flytende avretningsmasse og tung gulvoppbygging	0,04

Kravene til svingningsakselerasjon er gitt i Tabell 2-10.

Tabell 2-10: Gulvklassenes grenseverdier for akselerasjon etter ØNORM [54].

	Gulvklasse 1	Gulvklasse 2	Gulvklasse 3 (Gulv uten krav)
Grenseverdier for svingningsakselerasjon [m/s ²]	$\alpha_{rms} \leq \alpha_{grense} = 0,05$	$\alpha_{rms} \leq \alpha_{grense} = 0,10$	-

2.3.4. Beregningsmetode til Hamm/Richter (H/R)

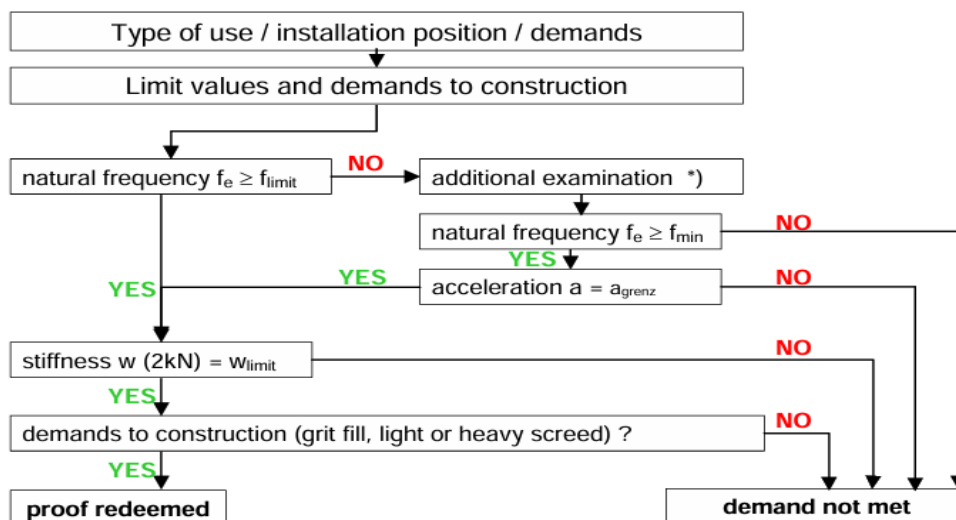
Patricia Hamm, Antje Richter og Stefan Winter utførte i 2010 et forskningsprosjekt ved Technische Universität i München angående vibrasjoner i tregulv [55]. Prosjektet ble gjennomført fordi det jevnlig oppstår problemer med vibrasjoner i tregulv til tross for at gjeldende regelverk er oppfylt. Ved å utføre laboratorietester samt teste ca. 50 bygninger og 100 gulv, hvorav 38 av dem var KL-tre gulv, fant de frem til to kategorier for tregulv. Gulv i leilighetsbygg og i kontorbygg kan kategoriseres med høyere krav (kl. 1), mens enebolig kan kategoriseres med lavere krav (kl.2).

Tabell 2-11 viser en oversikt over kriteriene som må oppfylles.

Tabell 2-11: Kriterier for gulvklasser i H/R [55].

Kriterier	Gulv med større krav (Klasse 1)	Gulv med mindre krav (Klasse 2)	Gulv uten krav
Type bruk	Etasjer mellom ulike bruksenheter (Multi-family house, office)	Gulv i samme bruksenhet (Single-family house)	Annet
Frekvens kriterium $f_{e,1} \geq f_{lim}$	$f_{lim} = 8 \text{ Hz}$	$f_{lim} = 6 \text{ Hz}$	-
Stivetskriterium $w_{2kN} \leq w_{lim}$	$w_{lim} = 0,5$	$w_{lim} = 1,0$	-
Tilleggsundersøkelser av akselerasjon, hvis $f_{e,1} < f_{lim}$	$f_{min} < f_{e,1} < f_{grense}$ $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ $a_{lim} = 0,05 \frac{m}{s^2}$	$f_{min} < f_{e,1} < f_{grense}$ $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ $a_{lim} = 0,10 \frac{m}{s^2}$	-

Hamm/Richter har utviklet et flytskjema som kan etterfølges i Figur 2-13.



Figur 2-13: Flytskjema for å kontrollere dekke iht. H/R [55]

For konstruksjoner med ett spenn regnes frekvensen:

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Ved opplegg på alle 4 sider regnes frekvensen:

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\alpha^4}}$$

hvor:

$$\alpha = \frac{b}{l} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_l}{(EI)_b}}$$

Forskningsprosjektet viste at stivhetskriteriet er minst like viktig som frekvenskriteriet.

Stivhetskriteriet regnes på bakgrunn av en påført punktlast på 2 kN og må oppfylle grensene for de respektive klassene:

$$w_{2 \text{ kN}} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{w(2 \text{ kN})}}$$

Hvor:

$$b_{w(2 \text{ kN})} = \min \left\{ b_{ef}, b \text{ (bredde gulv)} \right\}$$

og

$$b_{ef} = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$$

Forskningsprosjektet fant også frem til at gulv med frekvens mindre enn grensefrekvensen kan være akseptable hvis to kriterier er oppfylt. Frekvensen må være større enn 4,5 Hz og akselerasjonen må være mindre enn de oppgitte grenseverdiene i Tabell 2-11.

Akselerasjonen beregnes slik:

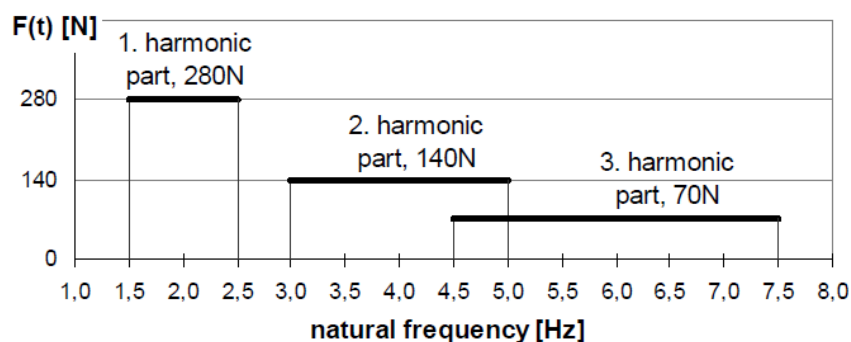
$$a = \frac{F_{dyn}}{M^* \cdot 2 \cdot D}$$

F_{dyn} er den totale dynamiske kraften, som kan settes til $0,4 \cdot F(t)$.

$F(t)$ er den harmoniske del av kraften til gulvet og finnes i Figur 2-14.

M^* er modal massen i kg.

D er en dempingsfaktor som hentes i Tabell 2-12.



Figur 2-14: Verdier for den harmoniske del av kraften til gulvet [55].

Tabell 2-12 Anbefalt dempingsverdi for H/R [55].

Type gulv	Dempingsfaktor
Tregulv uten noe annet	0,01
KL-tre med flytende sjikt over	0,02
Bjelke og dragergulv med flytende sjikt over	0,03

2.3.5. SINTEF

SINTEF er et norsk forskningsinstitutt som utfører forskning innenfor flere områder med spesialkompetanse innenfor teknologi, naturvitenskap og samfunnsfag. SINTEF er et av Europas største forskningsinstitutter og utfører oppdragsforskning for både norske og utenlandske selskaper [56]. Innen bygningskonstruksjon og prosjektering gir SINTEF Byggforsk dokumenterte løsninger og ytelser for å oppfylle minstekravene i byggeteknisk forskrift (TEK17) [57].

SINTEF Byggforsk sine beregningsmetoder for vibrasjon bygger på resultatene i SINTEF prosjektrapport 8 av Anders Homb fra 2007 [51]. Kriteriene er basert på ulike forskningsrapporter fra flere land. Rapporten bemerker at vibrasjonsberegningene gjelder for vanlige bjelkelag, men ikke nødvendigvis for massivtredekker. Det blir dog kommentert som rimelig sikkert å benytte kriteriet ned til 12,5 Hz for massivtredekker, samtidig som det ikke angis noen konkrete kriterier i området 8-12 Hz. I Byggetal 520.205 publisert i 2023 av Byggforskserien beskrives planlegging av bygg med KLT-elementer [4]. Her anbefaler SINTEF byggforsk å benytte en frekvens med nedre grense på 10 Hz for lett oppbygging. Samtidig blir det kommentert at det kan benyttes lavere frekvens ved tyngre oppbygging, men da må stivhet, nedbøyning og akselerasjon kontrolleres. Dette gir SINTEF ikke egne beregningsmetoder for, men henviser til produsenter eller andre beregningsmetoder.

Etter SINTEF regnes egenfrekvens:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_l}{m}}$$

Med grenseverdi:

$$f_1 > 10 \text{ Hz}$$

Punktnebbøyning regnes:

$$\Delta = \frac{Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b}$$

Med grenseverdi:

$$\Delta < 1.3 \text{ mm}$$

Med formel for kontroll:

$$\frac{f_1}{\Delta^{0.44}} > 18.7 \text{ Hz} \quad (2-8)$$

hvor:

Δ er beregnet punktnebbøyning under 1 kN punktlast [mm]
 b 1 m bredde

3. Forskerspørsmål

Denne oppgaven undersøker effekten av EK5-25 på dagens metoder for dimensjonering av KLT-elementer. Gjeldende versjon av EK5 omfatter ikke bestemmelser for KLT-elementer, og dimensjoneringen baseres derfor ofte på ulike metoder, som leverandørspesifikke programmer, nasjonale tillegg eller eksterne veiledninger.

Denne oppgaven har som mål å belyse forskjellene i beregningsmetodene som benyttes i dag for dimensjonering av KLT-dekker, og sammenligne disse med kommende EK5-25. Videre vil oppgaven også undersøke hvordan teoretiske beregninger samsvarer med målinger utført på byggeplass.

Oppgaven har som mål å besvare følgende spørsmål:

Hvordan påvirker vibrasjonskriteriene i den nye generasjonen Eurokode 5 dimensjonering av KLT-dekker?

- **Hvordan skiller kravene til vibrasjon i den nye generasjonen Eurokode 5 seg fra dagens regelverk og standarder for KLT-dekker?**
- **Hvordan samsvarer målinger utført på byggeplass med vibrasjonskriterier i den nye generasjon Eurokode 5, regelverk og standarder.**

I forbindelse med målinger på Lund Torv oppstår det noen naturlige tilleggsspørsmål. Selv om disse spørsmålene ikke direkte knytter seg til hovedspørsmålet, vil de likevel bli diskutert:

- **Hvilken testmetode egner seg best for å sammenligne resultater fra byggeplassmålinger med teoretiske beregninger?**
- **Kan mobiltelefoner benyttes til å måle et KLT-dekkes egenfrekvens?**

3.1. Avgrensninger

Oppgaven ser på menneskeskapte vibrasjoner.

Oppgaven ser på kriteriene til multi-family building (leilighetsbygg) under brukskategori A (Bolig).

Oppgaven fokuserer på dimensjonering av KLT-dekker i henhold til vibrasjonskriterier.

Det blir utført forenklet kontroll av ULS og SLS ved hjelp av beregningsprogrammer. Beregningene blir ikke presentert i oppgaven.

4. Metode

Metodene som er brukt for å fremskaffe resultater i denne rapporten presenteres i dette kapitlet. Dette sikrer at forsøkene blir transparente og repeterbare og det gir mulighet for å etterprøve resultatene for videre forskning.

4.1. Litteraturstudie.

I denne oppgaven er det utført litteraturstudie for å undersøke gjeldende regelverk og forskningsartikler relatert til dimensjonering av trekonstruksjoner med hensyn på vibrasjoner. Studien har tatt utgangspunkt i Eurokode 5 og Byggforskserien.

Den første fasen av bacheloroppgaven inkluderte henting av informasjon om vibrasjoner, massivtredekker og benyttede standarder for vibrasjoner i massivtre. Litteratur ble funnet med internettsøk på søkemotorer som Google, ScienceDirect og Oria. Viktige søkeord inkluderte «etasjeskiller i tre», «KLT», «CLT», «vibrasjoner» «massivtredekke» og «dMoe». Disse søkeordene ble også brukt i ulike varianter og kombinasjoner med bolske operatorer som AND. Det ble gjort avgrensninger med utgivelses år fra «2010-2025». Søkeresultatene ble sortert ved å lese titler og deretter sammendrag. Under søkeprosessen ble fagfelleverderte kilder prioritert for å benytte kvalitetssikret informasjon. Det ble også gitt anbefalinger om relevante artikler fra både intern og ekstern veileder.

Videre gikk litteraturstudien over til en metode kalt "citation search". Denne metoden innebærer å undersøke kildelistene i relevante artikler for å identifisere ytterligere kilder av betydning. Denne metoden gjør det enkelt å finne ytterligere litteratur om emnet. Ulemper kan være vanskeligheter med å sortere relevant informasjon og risikoen for å følge et smalt spor hvor forfattere siterer hverandre, noe som kan føre til at man går glipp av ny informasjon.

4.2. Kunstig intelligens

Kunstig intelligens (KI) har blitt brukt som et hjelpemiddel til bacheloroppgaven. Det er primært «Copilot» fra Microsoft og Chat GPT som er benyttet.

KI er brukt til å søke etter informasjon om emnet og finne kilder om temaet. KI har også blitt brukt til å be om forklaringer og utdypninger om emner, ord og uttrykk som har vært vanskelige å forstå. Her har det vært mulig å få forklaringer, samtidig som kilder har blitt oppgitt hvor det er mulig å finne mer informasjon.

Copilot er også brukt som hjelp til skriving av oppgaven, ved å gi forslag til formuleringer og finne passende ord eller uttrykk for teksten.

4.3. Beregningsmetoder

En vesentlig del av oppgaven har vært å analysere formlene i de ulike beregningsmetodene og foreta en sammenligning av disse. For beregningsmetodene til EK5-25, H/R og ØNORM er det nødvendig å definere randbetingelser og tilhørende parametere for å beregne egenfrekvens, nedbøyning og akselerasjon. Resultatene blir deretter vurdert opp mot grenseverdier angitt i de respektive metodene for å fastsette den tilhørende dekkeklassen. For å gjøre beregningene lettere å sammenligne har et Excel-ark med de respektive beregningsmetodene blitt utarbeidet. Det er også benyttet to beregningsprogrammer utviklet for beregning av KLT-elementer.

4.3.1. Analytiske beregninger i Excel

Gruppen opprettet tidlig i arbeidet med bacheloroppgaven et Excel-ark for å kunne sammenligne resultatene fra de ulike beregningsmetodene av vibrasjoner i KLT-dekker (Vedlegg A). Regnearket er laget slik at i det første arket som vist i Figur 4-1, angis rammebetingelsene for KLT-dekket. Dvs. KLT-elementets spennvidde, tykkelse, antall sjikt osv. I tillegg kan det velges å legge til påstøp på dekket og om det skal tas hensyn til skjærdeformasjoner ved beregning av vibrasjoner.

Vibrasjonsberegninger for etasjeskiller av massivtre					
Velg parametere for KLT-element ved å legge inn opplysninger i de røde cellene					
Valg for KLT-Element		Påstøp		Skjærmodul	
Type element	Kontinuerlig	Inkluder påstøp		Ikke inkluder skjær	
Lengde 1	4,62 [m]	Tykkelse	60 [mm]	L/h	38,5
Lengde 2	3,3 [m]	Densitet	2000 [Kg/m³]	G0	690 [Mpa]
Bredde	7 [m]	E-Modul	26000 [Mpa]	G90	50 [Mpa]
Antall sjikt	3 [stk]	Virkning på stivhet for påstøp		Ks	11,5
Tykkelse sjikt i lengderetning	40 [mm]	100 %			
Tykkelse sjikt i tverretning	40 [mm]				
E-modul [Mpa]	12000 [Mpa]				
Egenvekt	500 [kg/m³]				
Beregning av Dynamisk E-modul					
Målt frekvens					
E _{dyn}	0 [Mpa]				
Sammendrag for KLT element		Sammendrag for Påstøp		Totale verdier	
Antall lengdesjikt	2 [stk]	Masse påstøp	120 [kg/m²]	masse	180 [kg/m²]
Antall tverrsjikt	1 [stk]			EI _L	2,13E+12 [Nmm²/m]
tykkelse	120 [mm]			EI _T	5,32E+11 [Nmm²/m]
masse KLT-element	60 [kg/m²]			GA _{eff}	7,46E+06 [N/m]
				EI _{L,app}	1,85E+12 [Nmm²/m]
Stivheter		Stivheter			
Brutto stivhet I _{TOT}	1,44E+08 mm⁴	I _{PÅSTØP}	1,80E+07 mm⁴		
Tverrstivhet I _T	5,33E+06 mm⁴	EI _{PÅSTØP}	4,68E+11 [Nmm²/m]		
Lengdestivhet I _L	1,39E+08 mm⁴				
EI _L	1,66E+12 [Nmm²/m]				
EI _T	6,40E+10 [Nmm²/m]				

Figur 4-1 Skjerm bilde fra Vedlegg A for å velge KLT-element [42].

Videre har hver av beregningsmetodene angitt i EK5, EK5-25, ØNORM, H/R og SINTEF ulike formler og fremgangsmåter for å regne egenfrekvens, nedbøyning, akselerasjon og hastighet. Hver av beregningsmetodene har et eget ark for utregninger, hvor rammebetingelsene for dekket benyttes. I tillegg har hver av metodene ulike valg man må ta stilling til ved beregning av vibrasjoner. Det kan være valg for innspenning, damping, antall oppleggs sider, nyttelast med flere. Disse valgene, vist i Figur 4-2 er lagt inn i hvert ark for å kunne gjøre så presise utregninger som mulig.

Når verdiene for egenfrekvens, nedbøyning, akselerasjon og hastighet er funnet vil resultatene kontrolleres mot grenseverdier i beregningsmetodene, og det oppgis utnyttelse for tilhørende klasse. EK5-25 [52] angir 8 ulike ytelsesklasser, «Floor performance level» (FPL) for gulvelementer. Figur 4-2 viser at ønsket gulvytelsesklasse (FPL) kan velges manuelt, og utnyttelsene vises mot den valgte klassen.

EK5-25			Spenn	Påstøp	Skjærmodul	
			Kontinuerlig	Inkludert	Av	
				100 %		
Valg for EK5-25			Verdier for dekket		Krav	Utnyttelse FPL
Floor performance level [FPL]	Åpen		Egenfrekvens f_1 [Hz]	9,11	8 [Hz]	Sjekk v-rms
Damping ζ	4,0 %		Nedbøyning [mm]	0,311	0,500 [mm]	62 % KL.3
Opplegg	2	[sider]	v_{rms}	0,0007	0,0008 [m/s]	93 % KL.2
Nyttelast	Bolig		a_{rms}	0,109	Ingen verdi 5 [m/s ²]	Ikke aktuelt KL.5
Menneskelig gangfrekvens k_{red}	1,5	[Hz]				
	0,7					
Type gulv	Andre gulv					

Figur 4-2 Vibrasjonsberegninger etter EK5-25. Skjermbilde fra Vedlegg A [42].

4.3.2. CLT-designer

CLT-designer er en programvare utviklet i Østerrike med formål om å støtte prosjektering av KLT-elementer [58]. CLT-designer gir mulighet for å gjennomføre beregninger basert på enten egendefinerte parametere eller forhåndsdefinerte elementer fra åtte ulike KLT-leverandører.

Programvaren benytter beregningsmetode iht. EK5 for å kontrollere opplagerkrefter, ULS og SLS. Det gjennomføres også vibrasjonskontroll i henhold til metodene i EK5, ØNORM og H/R. For å utføre vibrasjonskontroll må ulike valg i programmet gjøres, inkludert antall spenn, elementtype, opplagerbetingelser, lengde, ekstra laster fra f.eks. påstøp og samlet gulvbredde. Deretter utarbeides det en rapport som presenterer alle beregninger og verdier. Vibrasjonsresultatene vises i henhold til de respektive standardene og metodene, hvor de dimensjonerende verdiene for frekvens, nedbøyning, akselerasjon og hastighet oppgis med utnyttelsesprosent.

I programinnstillingene kan enkelte verdier i formlene justeres ved behov. Det er også mulig å legge til skjærdeformasjoner i beregningene, noe som påvirker frekvens, nedbøyning og akselerasjon [58].

Skjærdeformasjoner blir kun lagt til på EK5 og ØNORM. H/R tar ikke med skjærdeformasjoner i beregningene.

4.3.3. Calculatis by Stora-Enso

Stora Enso er en finsk-svensk produsent av trebaserte produkter, inkludert KLT-elementer [59]. Beregningsprogrammet Calculatis utviklet av Stora-Enso, er også brukt i denne oppgaven ettersom Stora-Enso er leverandør av KLT-elementer på Studentskipnaden i Agder (SiA)-studentboliger på Lund Torv. Beregningene utført av Calculatis følger EK5 for beregning av opplagerkrefter, ULS og SLS mens programmet benytter ØNORM for beregning av vibrasjonskriterier. Programmet krever input om element, spennlengder, last med lastkategori, total bredde og påstøp. Resultatene presenteres deretter med verdier, utnyttelsesgrader og dekkeklasse.

4.4. Analysering av KLT-dekker og klassifisering etter ulike beregningsmetoder

En rekke sammenligninger av forskjellige KLT-elementer har blitt utført for å identifisere sammenhengen mellom gulvkategorier i EK5-25, klassifiseringer i H/R og ØNORM, samt kravene definert av SINTEF. Testene er utført i et Excel-ark (Vedlegg A) og resultatene blir presentert i et eget Excel-ark (Vedlegg B).

Formålet med sammenligningen er å evaluere om gulvelementene klassifiseres forskjellig i ulike standarder. Beregningene sammenligner «ferdige gulvkonstruksjoner», dvs. KLT-element med påstøp. Rammebetingelser benyttet i sammenligningene følger anbefalingene fra hver enkelt standard og er vist i Figur 4-3. Disse valgene er ikke endret underveis i beregningene.

En forutsetning i alle beregningene er at elementene også tilfredsstiller kravene til bruddgrense ULS og bruksgrense SLS i henhold til dagens EK5. Dette er verifisert i programmene CLT-designer og Calculatis.

Valg for EK5-25		
Floor preformance level	Åpen	
Demping ζ	4,0 %	
Opplegg	2	[sider]
Nyttelast	Bolig	
Menneskelig gangfrekvens	1,5	[Hz]
k _{red}	0,7	
Type gulv	Andre gulv	

Valg for Hamm/Richter		
Demping ζ	3 %	
Opplegg	2	[sider]
Modal Mass	4	

Valg for Østerisk tillegg		
Demping ζ	4 %	
Opplegg	2	[sider]
Opplager-betingelser	Ledd - Ledd	

Figur 4-3: Valgmuligheter i de ulike beregningsmetodene. Skjerm bilde fra Vedlegg A [42].

Oppbyggingen av gulvet i den teoretiske studien er inspirert av gulvkonstruksjonen brukt på Lund Torv. Det forutsettes at lydkravene er oppfylt gjennom bruk av påstøp og trinnlydsplater. Det er brukt 60 mm påstøp for alle beregninger, da dette er den anvendte tykkelsen ved Lund Torv, og den maksimalt tillatte tykkelsen for det spesifikke produktet [60]. Studien analyserer ulike dekkekombinasjoner med variasjoner på KLT-elementets tykkelse, spennlengder.

Hvert element og spennvidde er testet med forskjellige nivåer av påvirkning fra påstøpen: full stivhet, eller uten stivhet. Hensikten med å variere stivhetsvirkningen i påstøpen er å simulere ulike effekter. 100 % stivhet betyr påstøp som en kontinuerlig flate der installasjoner og skillevegger plasseres oppå påstøpen. Det andre tilfellet beregner kun massen fra påstøpen.

Alle dekkene i sammenligningen er kontrollert for ULS og SLS. I virkeligheten kan løsninger variere, og det er ikke utenkelig at påstøpen kan være brutt av lettvegger. Dersom påstøpen er brutt, er det vanskelig å fastsette hvilken stivhet det vil resultere i. Derfor er kontroll av ULS/SLS beregnet uten stivhet, som antas å være det verste tilfellet. Det vil si en masseøkning uten økning i stivhet.

Verdiene for egenfrekvens, nedbøyning og hastighet er registrert for hvert tilfelle. Akselerasjon er registrert når de respektive beregningsmetodene krever det. Resultatene er registrert med tilhørende klasser og kategori, for å kunne sammenligne hvordan de respektive klasser og kategorier samsvarer for de enkelte beregningsmetodene.

4.5. Case Lund Torv – Testmetoder og utstyr

For å få en større forståelse for tematikken, ble det vurdert som hensiktsmessig å finne et bygg i massivtre under oppføring. Ved oppstart av bacheloroppgaven var Veidekke Entreprenør i sluttfasen med montering av KLT-elementer på SiA's studentboliger på Lund Torv i Kristiansand. Det ble etablert kontakt med Veidekke med forespørsel om mulighet for å gjennomføre vibrasjonsmålinger på bygget. Det ble avtalt tidspunkt for målinger i februar og april. Dette gav mulighet for å utføre målinger på «rått» KLT-dekke, i tillegg til KLT-dekke med lettvegger, himling og påstøp.

4.5.1. SiA studentboliger Lund Torv

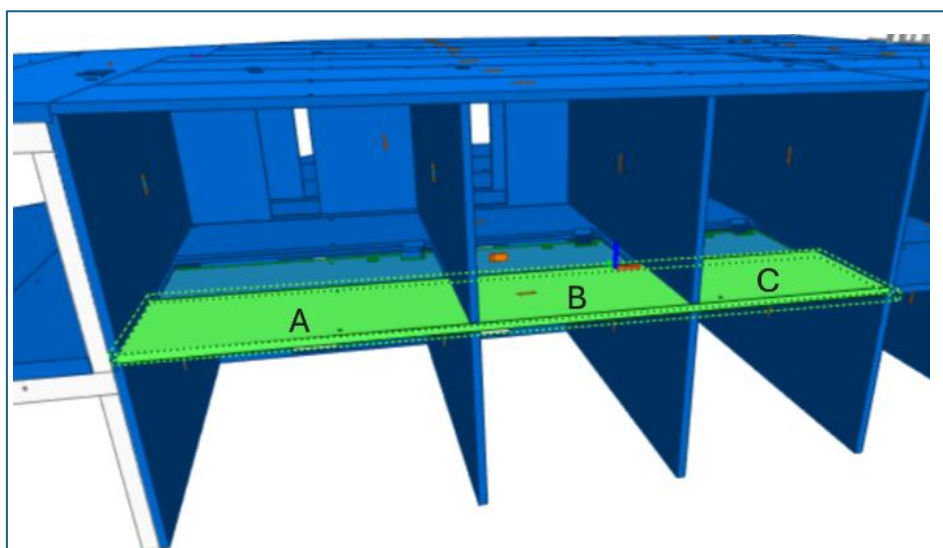
Veidekke AS har siden høsten 2023 vært totalentreprenør på to nybygg på Lund torv i Kristiansand [6]. SiA er byggherre og byggene vist på Figur 4-4 inneholder 371 studentboliger, treningslokaler, restaurant og butikk. Prosjektet skal være innflytningsklart til studiestart 2025. Byggene har 5 og 6 etasjer over bakken i tillegg til parkeringskjeller under bygg B. Første etasje i bygg A har bæresystem i betong, mens det i bygg B er betong fra parkeringskjeller opp til dekke over andre etasje. I resterende etasjer er benyttet KLT-elementer. Det er innsatt prefabrikkerte baderom i leilighetene mens fasader er utført i prefabrikkerte bindingsvekelementer.



Figur 4-4: Oversiktsbilde av Bygg A (grønt) og Bygg B (rødt) ved Lund torv [61].

4.5.2. Testleiligheten

Gruppen ble tildelt en leilighet i 4. etasje i bygg B. Leiligheten er en såkalt familieleilighet med større areal og spennlengde enn resterende standardleiligheter. KLT-elementene har kontinuerlig spenner over tre leiligheter med en total lengde på 11,1 m. Det ble foretatt målinger i leiligheten øverst til venstre i Figur 4-5.



Figur 4-5: KLT-elementet spenner kontinuerlig gjennom testleiligheten (A) og videre gjennom to naboileiligheter (B, C) [62].

Massivtredekket består av 3 sammensatte elementer i bredden. KLT-Elementet i midten har full bredde på 2400 mm hvor de to andre er tilpasset. KLT-elementet markert med grønn i Figur 4-5 er montert med stålvinkler inntil de prefabrikkerte fasadeelementene. Elementet mot korridoren hviler over skilleveggen (med døråpning) som det i tillegg er festet til med skruer. De langsgående skjøter er av typen «half-lap» som vist i Figur 4-6, her er KLT-elementene skrudd sammen med en avstand på c/c 300 mm.



Figur 4-6: Half-lap skjøt [42].

4.5.3. Testmetoder

Ved Lund Torv ble det benyttet metodene beskrevet i rapporten til Hamm, Richter og Winter for å fremkalle vibrasjoner. [55]:

- Gange

Vibrasjonsmålinger under «gange» ble utført ved at en testperson med vekt 94 kg gikk rundt i leiligheten. Gangfrekvensen ble opprettholdt på 1,5 Hz ved bruk av en metronom på testpersonens sportsklokke, innstilt til 90 bpm. Den første gangtesten ble utført tre ganger for å sikre riktig skrittfrekvens.

- Heel-drop

«Heel-drop» ble gjennomført ved at en testperson på 82 kg løftet seg opp på tærne og lot hælene falle ned til gulvet.

- Svakt slag

En planke på ca. 1 kg ble benyttet og løftet opp ca. 8 cm, og deretter sluppet slik at testpersonens hånd fulgte bevegelsen naturlig.

Varigheten av hver test var 60 sekunder, i tråd med anbefalingene fra opplæringsvideoene til Brüel & Kjær, som foreslår å oppnå ca. 1000 svingninger ved den laveste forventede egenfrekvensen. En

enkel test med en mobiltelefon indikerte en egenfrekvens på cirka 17,5 Hz. Tiden ble dermed beregnet:

$$t = 1000 \cdot \frac{1}{17.5} = 58.8s \approx 60s$$

Testmetodene er utført noe forskjellig i forhold til testoppsettene og test dagene. Tabell 4-1 viser hvordan testmetodene ble utført.

Tabell 4-1: Oversikt av testmetoder brukt ved hvert testoppsett [42].

Testoppsett	Testmetode	Leilighet A	Leilighet B	Leilighet C	Korridor
1	Gange	X ^b			
	Heel drop	X	X	O	
	Svakt slag	X			
2	Gange	X			
	Heel drop	X	X		
	Svakt slag	X			
3^a	Gange				
	Heel drop	X			
	Svakt slag				
4^a	Gange	X			
	Heel drop	X			X
	Svakt slag	X			

X – Utført begge testdager.
O – Utført kun ved testdag 1.
^a Det ble i disse testoppsettene brukt referanse sensor og flyttet rundt de resterende sensorene.
^b Første testdag ved måling 1 ble utført tre ganger for å sikre riktig skrittfrekvens.

4.5.4. Måleutstyr

Forskjellig utstyr som er brukt i testene utført på Lund torv kan sees i Tabell 4-2.

Tabell 4-2: Utstyr benyttet til målinger [42].

Utstyr	Produkt	Antall
Akselerometer fra Brüel & Kjær [63]	Type 8344	4
LAN XI fra Brüel og Kjær [63]	3050-A-040	1
Adapter fra Brüel og Kjær [63]	JP-0145	4
Kabel fra Brüel & Kjær [63]	AO-0038-D-050	4
Deformasjonsmåler [64]	Mitutoyo	1
Baderomsvekt [65]	Coline	1
Fuktmåler [66]	Protimeter mini	1
Objekt til svakt slag	48x68 mm planke	1

4.5.5. Mobiltelefoner som måleverktøy

Det ble ved begge testdager også benyttet mobiltelefoner med appen «Phyphox» (Physical phone experiments) til å måle egenfrekvensen til dekket [67]. Phyphox benytter telefonens innebygde akselerometre, og finner med FFT-transformasjon dekkets egenfrekvens. Mobiltelefoner som ble brukt kan sees i Tabell 4-3.

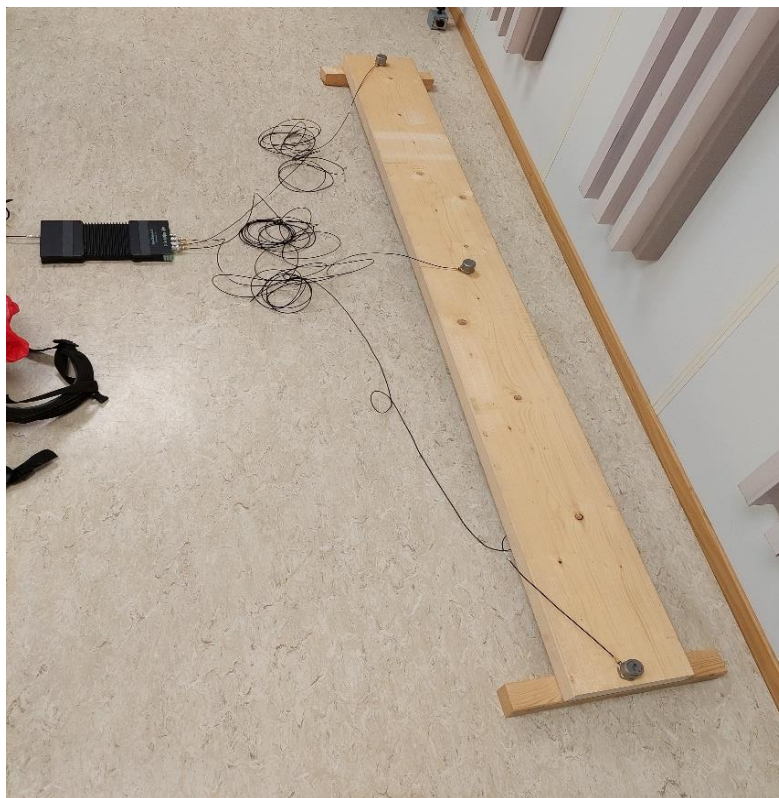
Tabell 4-3: Mobiltelefoner brukt i målinger [42].

Merke	Modell
Samsung	Galaxy A52
Apple	Iphone 13
Samsung	Galaxy S22

Alle tre telefoner ble satt opp med like tidsinnstillinger før målingene startet. Det ble lagt inn fem sekunders forsinkelse fra telefonen ble aktivert til den begynte å lagre måledata. Forsinkelsen ble brukt for at vi kunne komme oss bort fra testområdet før målingene startet, slik målingene ikke ble påvirket. Hver måling ble utført med 60 sekunders varighet.

4.5.6. Forhåndstesting av utstyr

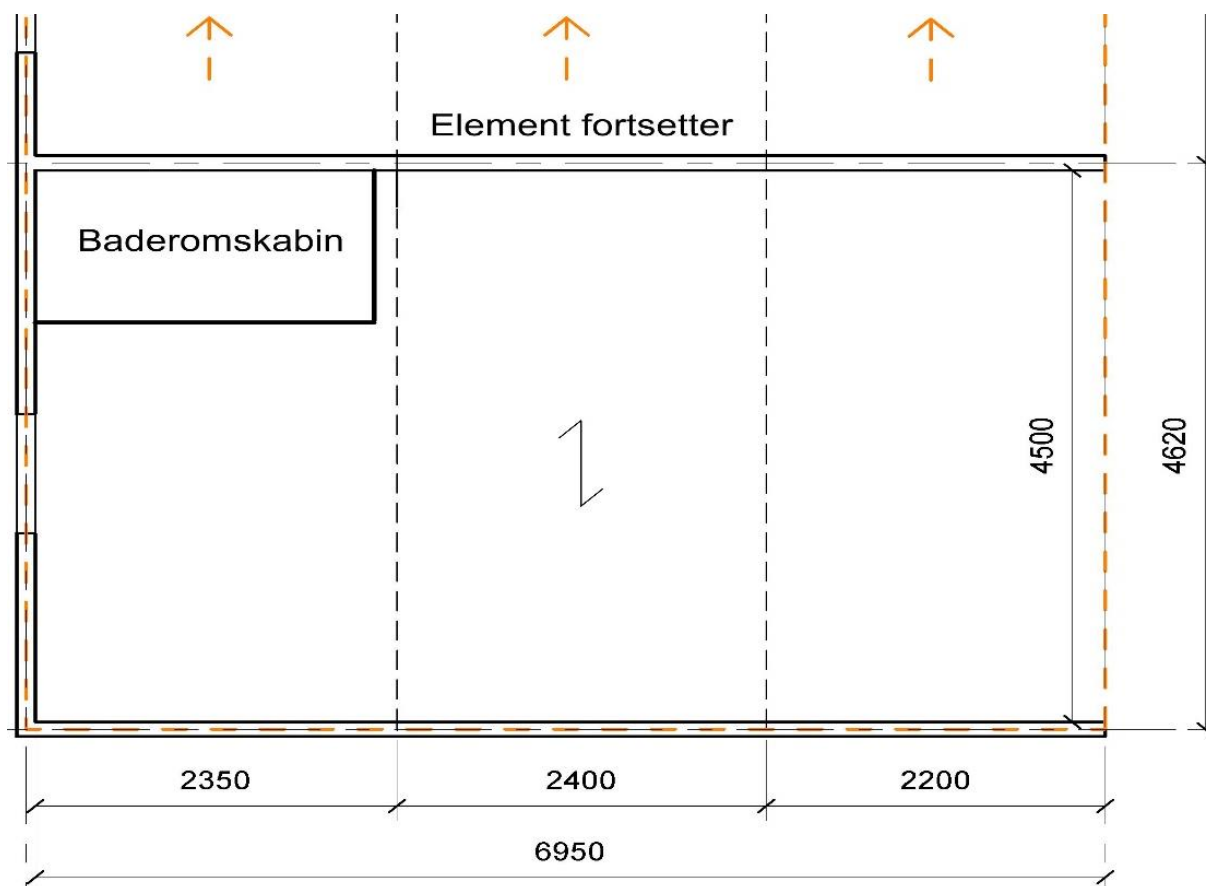
Før målingene på Lund Torv ble det utført et testoppsett av utstyret fra Brüel & Kjær. Testen ble gjennomført på UiA Kristiansand for å bli kjent med hvordan utstyret brukes og settes opp. Figur 4-7 viser hvordan en 2000 mm lang 48x198 mm planke ble plassert på to støtter. Tre akselerometre fra Brüel & Kjær ble montert på planken. Ved å følge opplæringsvideoene utlevert av UiA, fikk gruppen bedre forståelse for bruken av programvaren, testmetoder og oppsett av utstyr. Mobiltelefoner med Phyphox-applikasjonen ble også lagt på planken for å undersøke om egenfrekvensen stemte overens med utstyret til Brüel & Kjær. Verifisering av forskjeller gjorde det hensiktsmessig å bruke Phyphox også på Lund Torv.



Figur 4-7: Forhåndstesting av utstyr [42].

4.6. Case Lund Torv – Testdag 1

Det ble utført tester tirsdag 04.02.2025. Det ble først utført nedbøyningsmålinger. Deretter ble vibrasjonsmålinger utført i henhold til de beskrevne testmetodene. Figur 4-8 viser plantegning over testleilighet ved første måling. Den sorte stiplede linjen viser skjøten mellom KLT-elementene.



Figur 4-8: Plantegning testdag 1 [42]

4.6.1. Punktnedbøyning

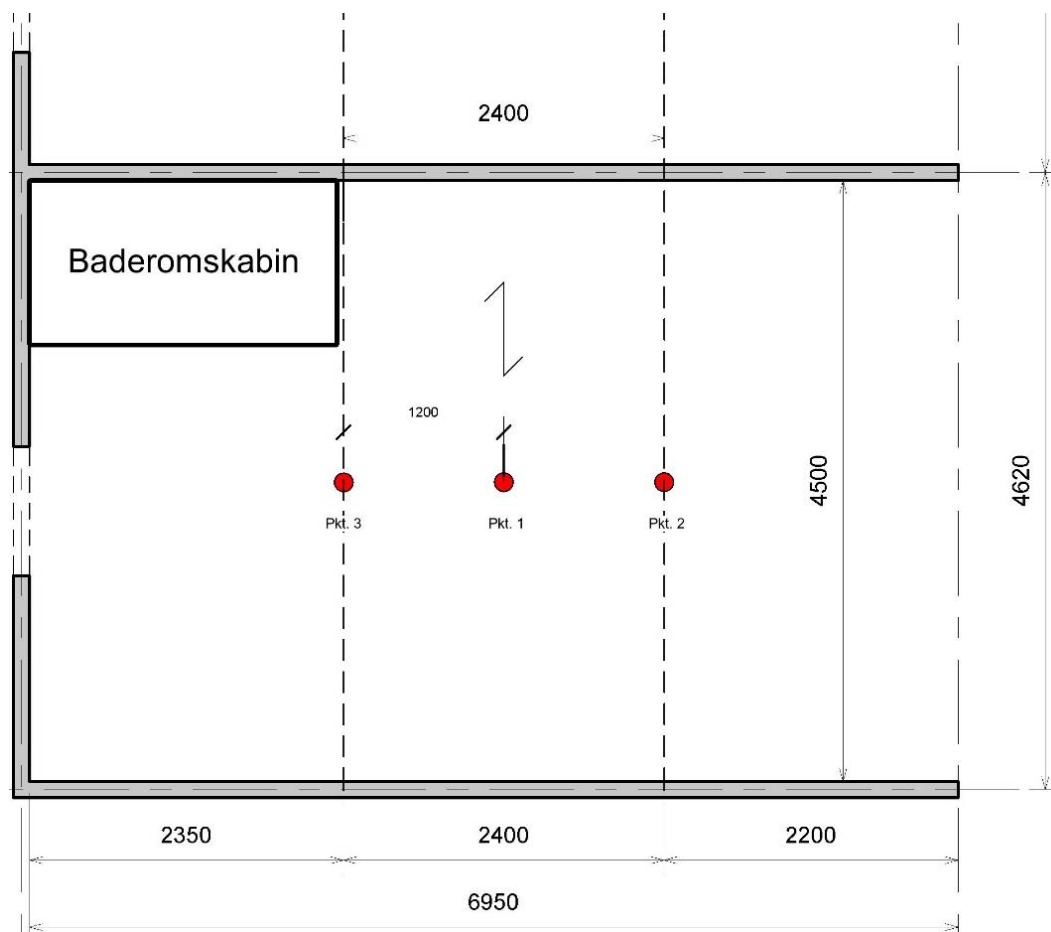
Det ble gjennomført måling av punktnedbøyning på KLT-elementene ved å påføre en punktlast på 1 kN i målepunktene. Punktlasten ble påført av en testperson som bar vekter, slik det ble oppnådd en total vekt på 102,1 kg.

Deformasjonene ble målt i etasjen under testleiligheten, hvor en 48x98 mm stender ble festet til undersiden av KLT-elementet. Deformasjonsmåleren ble plassert på gulvet, som vist i Figur 4-9. Testpersonen beveget seg deretter varsomt ut til de respektive målepunktene, og punktnedbøyningen i KLT-elementet ble målt. Lasten ble påført fem ganger ved hvert punkt vist i Figur 4-10, og nedbøyningen er beregnet som gjennomsnittet av målingene.

Punktnedbøyning ble kun utført ved testdag 1. Ved testdag 2 var det montert lettvegger og himlinger i leiligheten hvilket førte til at det ikke var tilgang til KLT-dekket for å måle nedbøyninger.



Figur 4-9: Deformasjonsmåler [42].



Figur 4-10: Målepunkter for punktnedbøyning [42].

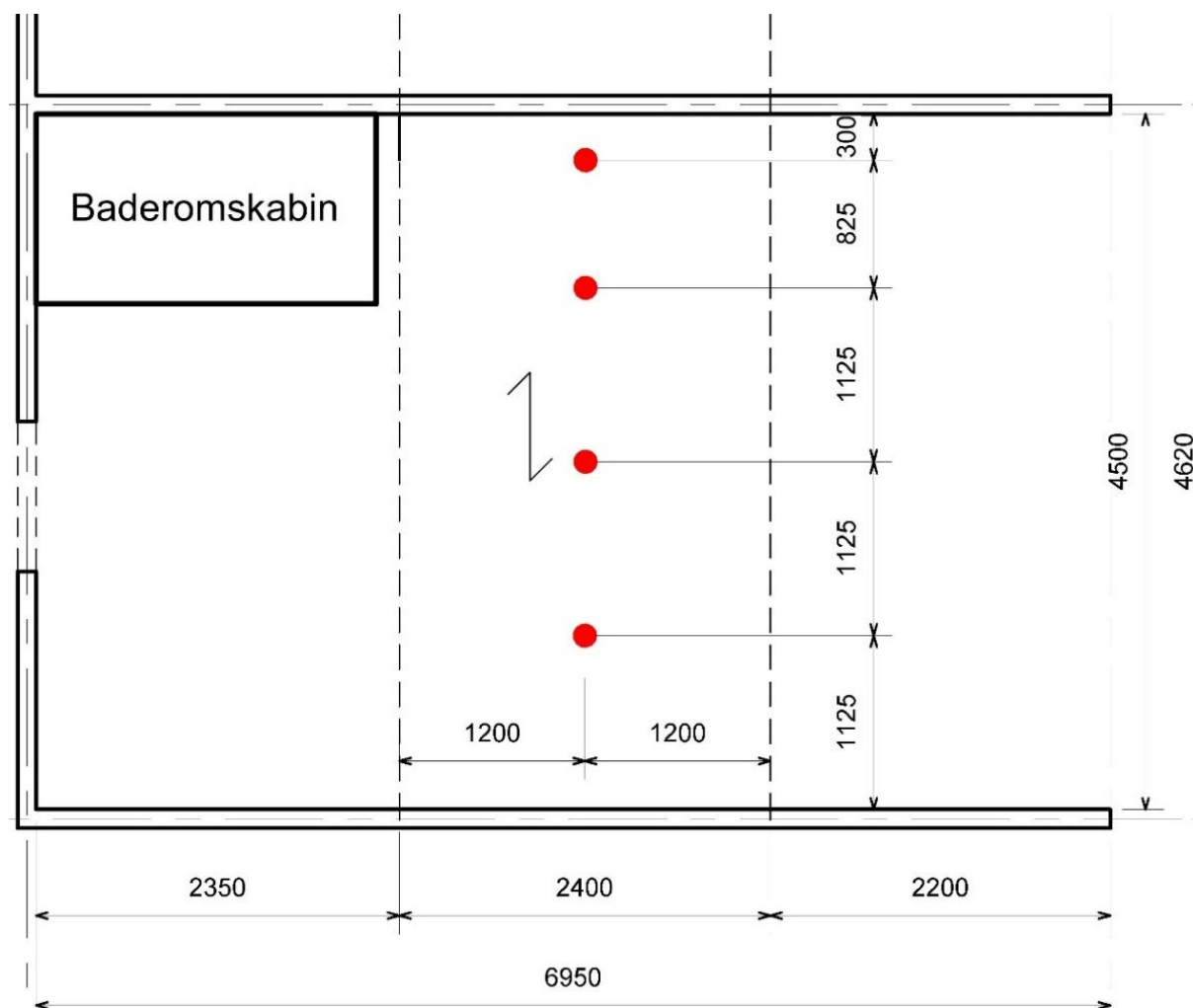
4.6.2. Testoppsett 1.1

Ved testoppsett 1.1 ble måleutstyret til Brüel & Kjær satt opp i testleiligheten som vist i Figur 4-11.



Figur 4-11: Bilde av måling på Lund torv fra testdag 1 [42].

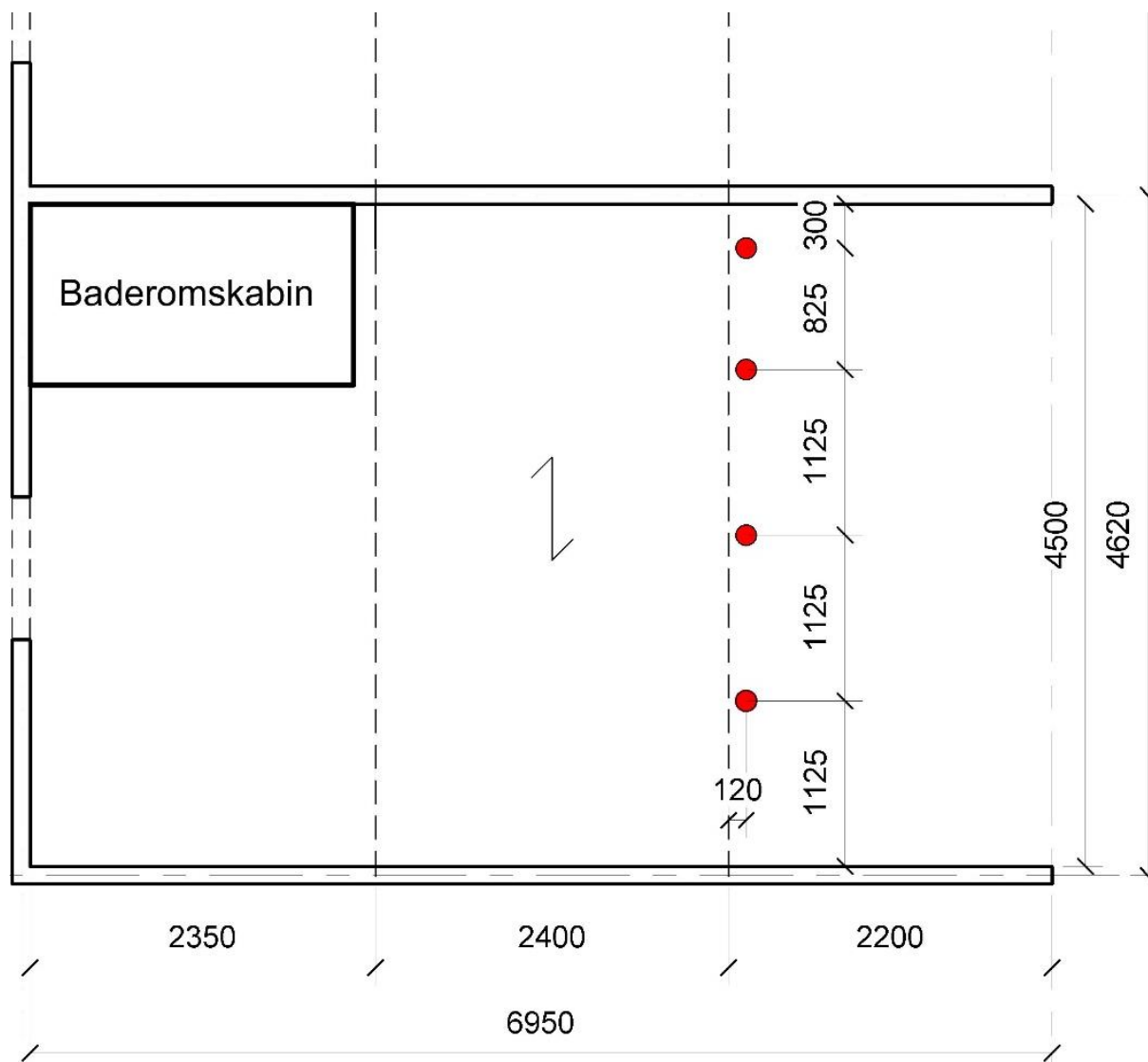
Akselerometrene ble plassert midt på det midterste elementet i bredderetningen illustrert med rødt i Figur 4-12. I testleiligheten ble fire akselerometre fordelt i lengderetning med følgende avstander: $\frac{L}{4}$, $\frac{L}{2}$, $\frac{3L}{4}$ og 300 mm fra vegg mot naboileilighet hvor elementet fortsetter kontinuerlig inn. Plasseringene ble antatt som fornuftige for best mulig å treffe de største amplitudene for svingemodene. Siden massivtredekket er kontinuerlig over tre leiligheter, og leiligheten som ble testet hadde større spenn enn de to naboileiligheter, stod det klart at største deformasjonen antageligvis ikke ville være akkurat i $\frac{L}{2}$. Det ble uansett vurdert som tilstrekkelig. Testen «heel-drop» ble i tillegg utført i leilighet B og C, vist i Figur 4-5, hvor KLT- elementet er sammenhengende, for å kontrollere vibrasjons påvirkningen fra naboileilighetene.



Figur 4-12: Testoppsett 1.1 [42].

4.6.3. Testoppsett 2.1

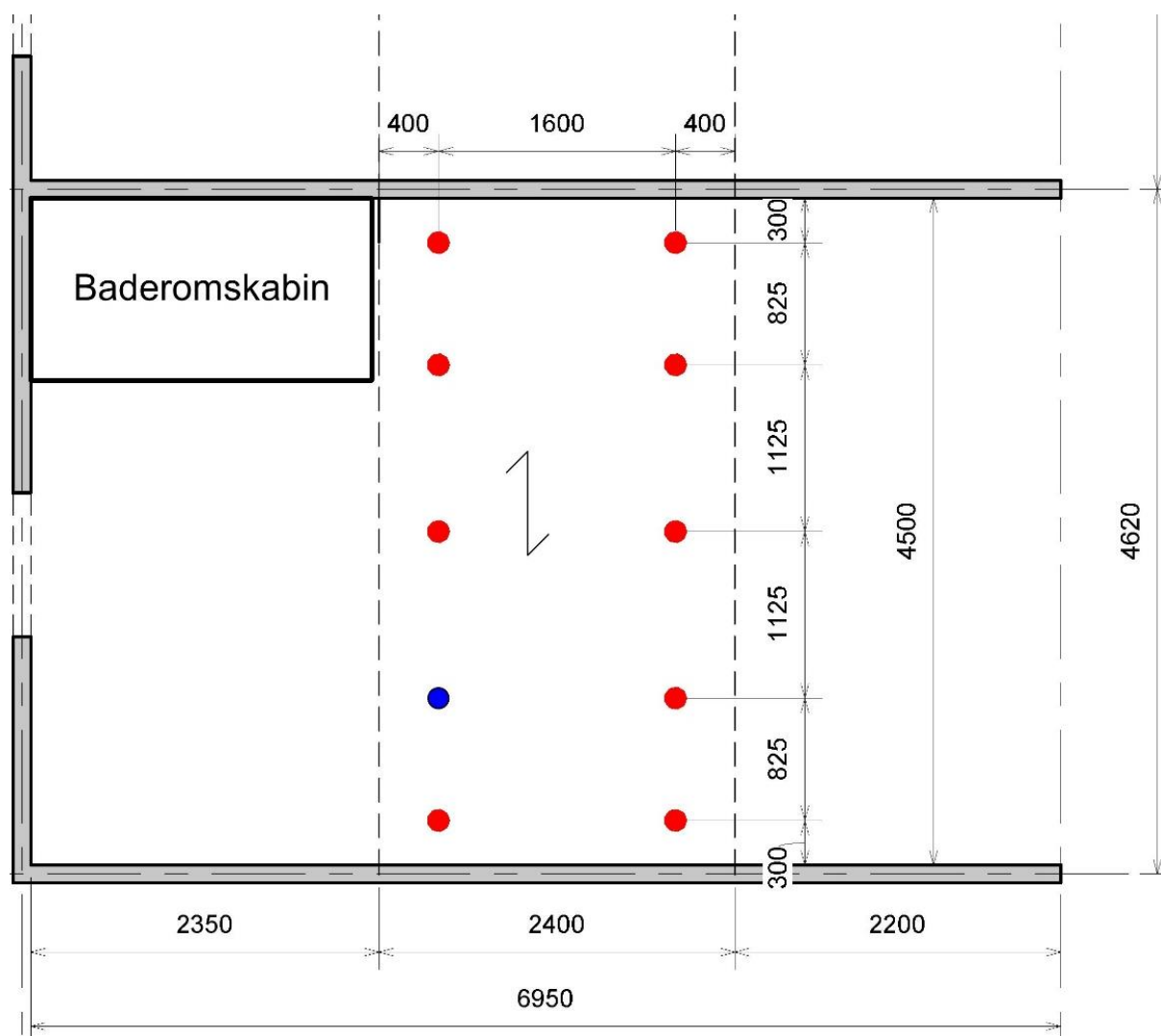
Testoppsett 2 ble valgt for å verifisere om måleresultatene i elementskjøten korresponderte med resultatene ved midten av elementet. Pga. ujevnheter i overflaten ble akselerometrene plassert 120 mm til siden for skjøten i elementet nærmest fasadeveggen, se Figur 4-13. Testmetodene og plassering av akselerometrene i lengderetningen var de samme som for testoppsett 1, men utenfor testleiligheten ble det kun utført «heel-drop» i den leilighet B.



Figur 4-13: Testoppsett 2.1 [42].

4.6.4. Testoppsett 3.1

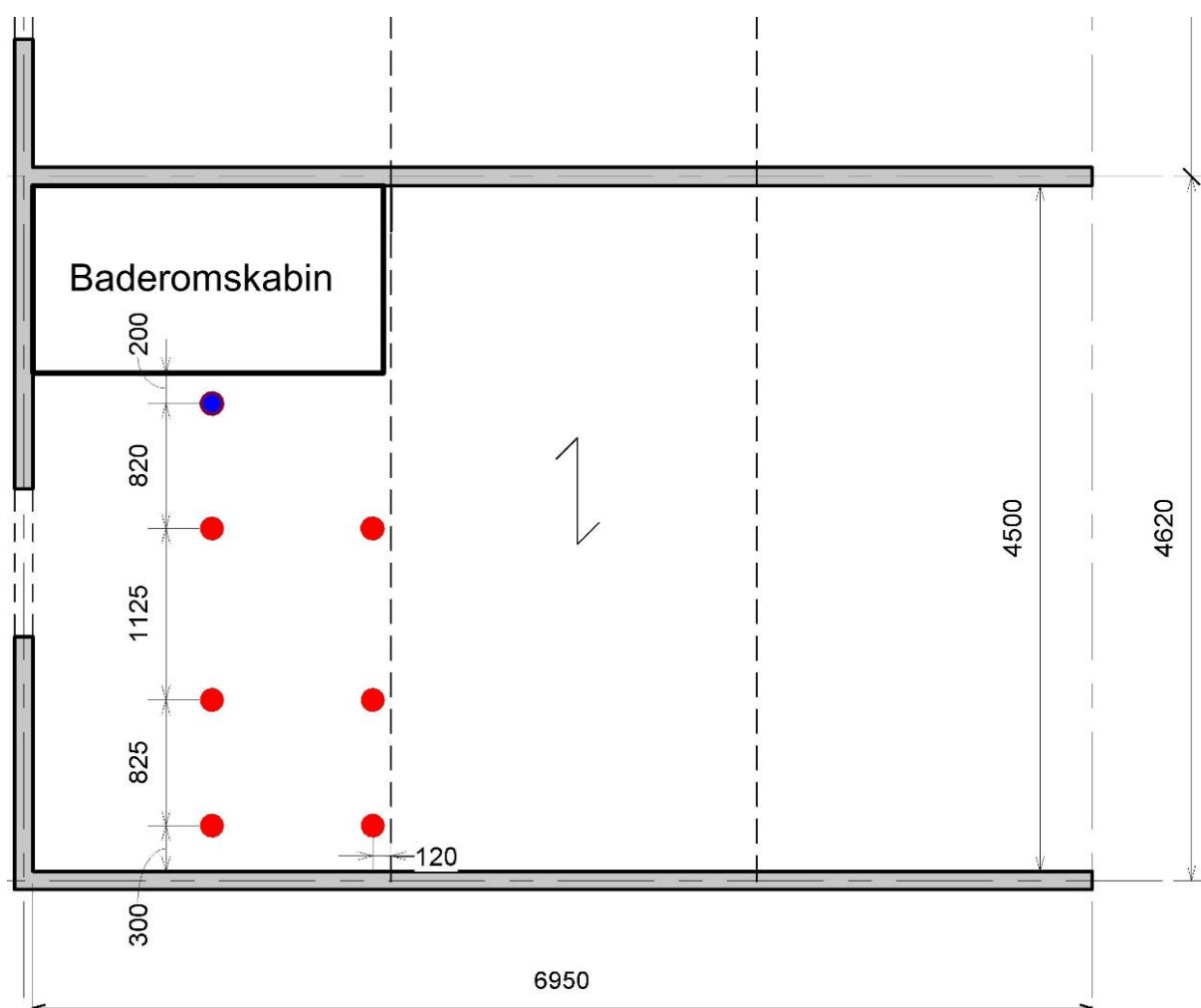
Testoppsett 3 involverte vibrasjonsmålinger over hele midtelementet ved bruk av et akselerometer som referanse, markert med blå farge på Figur 4-14. Målingene ble utført ved å flytte akselerometrene tre ganger slik at alle posisjoner ble dekket. Ved testoppsett 3 ble kun «heel-drop» brukt for å påføre vibrasjoner i dekket. Akselerometrene var plassert 400 mm fra kantene i bredderetningen på begge sider av midtelementet, samt 300 mm inn fra veggene mot oppleggene. Øvrige plasseringer i lengderetning er likt testoppsett 1.



Figur 4-14: Testoppsett 3.1 [42].

4.6.5. Testoppsett 4.1

Testoppsett 4 ble valgt for å vurdere om belastningen fra baderomskabinen hadde innvirkning på egenfrekvensen til elementet kabinen står på. Den prefabrikkerte baderomskabinen var plassert inntil vegg til naboileiligheten hvor KLT-dekket fortsetter kontinuerlig inn. Akselerometrene ble plassert midt på elementet i bredderetningen og 120 mm inn på elementet fra elementskjøten. I lengderetningen ble akselerometrene plassert ved $\frac{l}{4}$, $\frac{l}{2}$ og 300 mm fra vegg og baderomskabin. Testen er sammensatt av to målinger. Akselerometeret nærmest baderomskabinen, markert med blå i Figur 4-15, ble benyttet som referanse. For testoppsett 4 ble vibrasjoner påført ved bruk av «gange», «heel-drop» og «svakt slag» inne i testleiligheten. I tillegg ble målingen med «heel-drop» i korridor utført. Dette ble kun gjort da akselerometrene var plassert i raden nærmest døren.

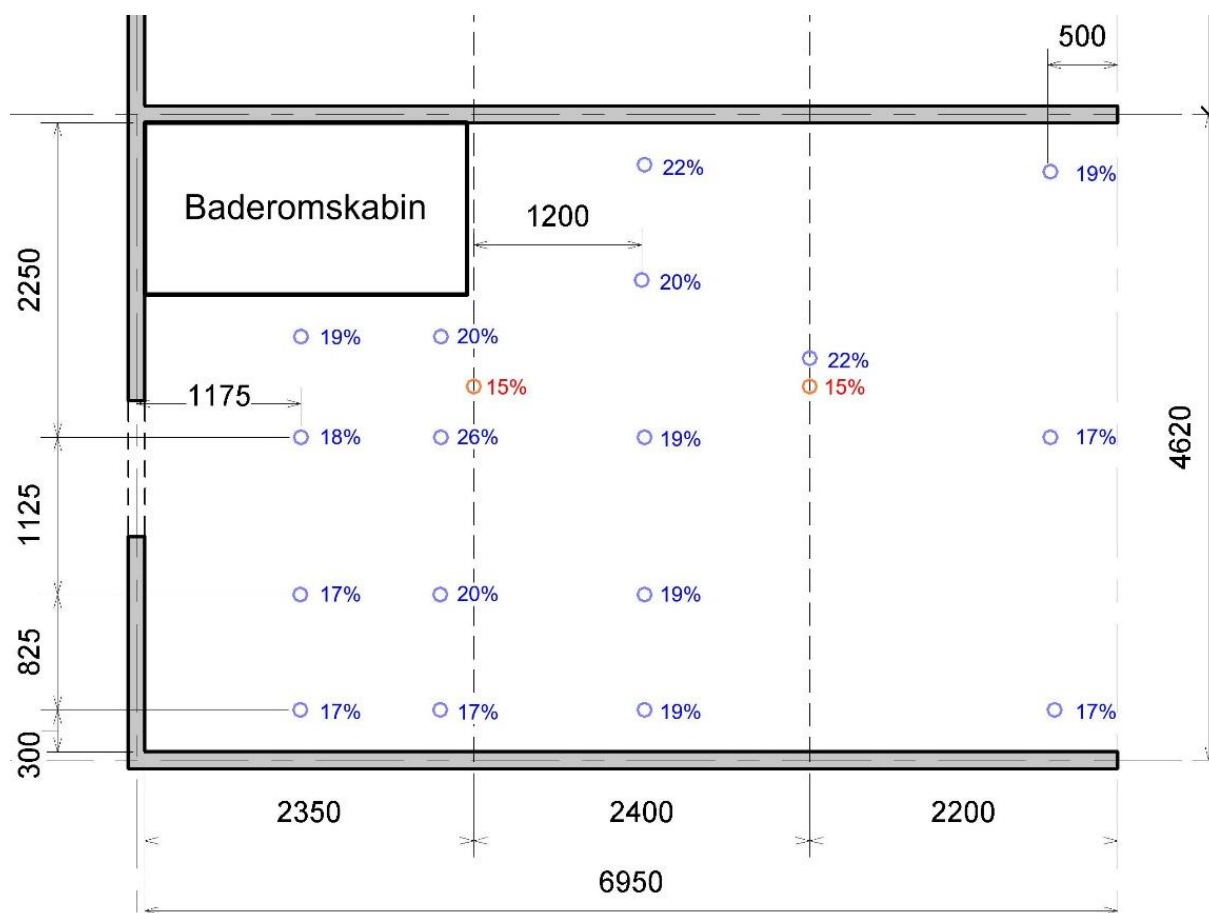


Figur 4-15: Testoppsett 4.1 [42].

4.6.6. Fuktmåling

På Lund torv ble fuktinnholdet i KLT-elementene målt ved hjelp av en fuktmåler av typen «Protimeter mini» [66]. Fuktmåleren fungerer ved at to elektroder presses inn i trevirket, og enheten måler materialets konduktans, dvs. evnen til å lede strøm mellom elektrodene. Fuktinnholdet i treet påvirker ledningsevnen, og fuktmåleren kan på den måten angi fuktinnholdet. Figur 4-16 viser hvor fuktmålingene ble utført samt målt fuktinnhold. Det ble også målt ved to punkter på undersiden av KLT-elementene vist i rød skrift. Elektrodene presses 5-6 mm inn i trevirket, og målingene gir derfor kun en indikasjon på fuktighetsinnholdet i overflaten av KLT-elementet.

Ifølge byggeleder på Lund Torv var KLT-elementene montert omtrent to uker før målingene. Taket ble tekket få dager før målingene. Det var tegn til at det hadde lekket noe vann fra taket og denne restfuktigheten var mulig å se på overflaten i enkelte områder. Det var ikke tegn til vann som hadde trengt gjennom dekket eller renn merker på vegger.



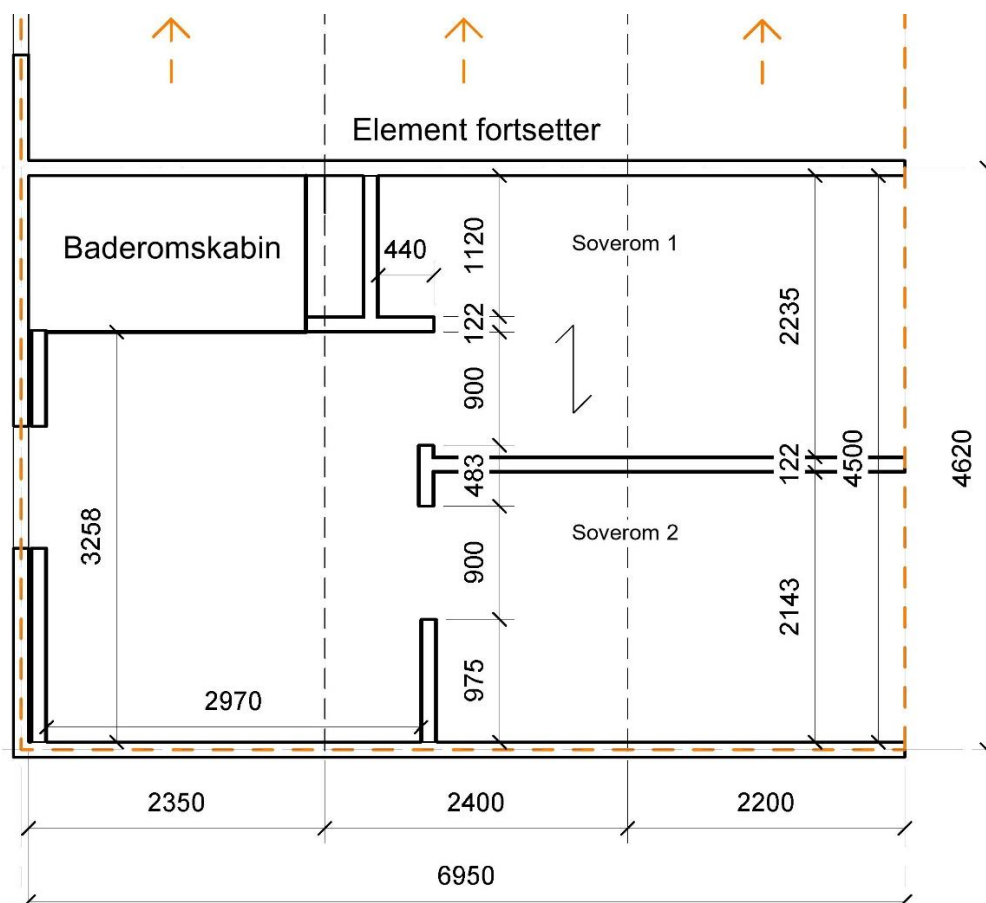
Figur 4-16: Fuktmålinger utført på Lund Torv testdag 1 [42].

TEK 17 angir en grenseverdi for når konstruksjonen kan lukkes på 20 % [35]. Målinger over 20 % samsvarer med områder hvor det var synlige tegn på fuktighet fra lekkasje før taket ble tett. Den samlede vurderingen indikerer at elementene sannsynligvis har høyere fuktinnhold på overflaten,

men at dette ikke påvirker deres bæreevne. Fuktigheten forventes å tørke ut før videre arbeid. Verdiene anses derfor som tilfredsstillende og antas å ha liten innvirkning på målinger og fremtidige beregninger. Fuktinnholdet vil ikke bli tatt hensyn til i videre beregninger, og emnet anses som avsluttet.

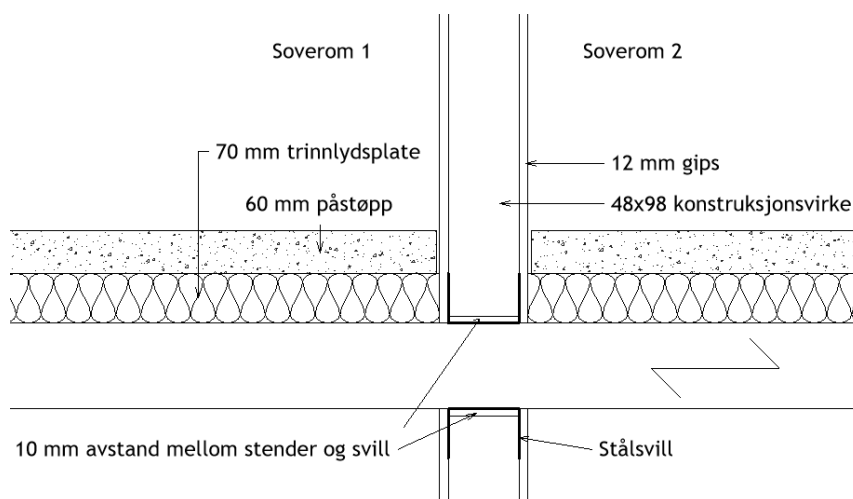
4.7. Case Lund Torv – Testdag 2

Testdag 2 på Lund Torv ble gjennomført fredag 11.04.2025. Figur 4-17 viser plantegning av testleiligheten på testdag 2. På dette tidspunktet var det påført 70 mm trinnlydsplater, 60 mm påstøp, i tillegg var innvendige lettvegger satt opp. Påstøpen var sammenhengende gjennom døråpninger, men brutt av lettvegger, som vist i Figur 4-18. Det var delvis montert gulvbelegg i testleiligheten. Veggene var montert med 100 mm stålsviller og med 48 x 98 mm stendere samt ett lag med 12 mm gips på begge sider. Det var i tillegg montert stendere mellom toppen av baderomskabinen og opptil KLT-elementet. Disse stenderne fikk påført ultraboard gipsplater i 15 mm tykkelse.



Figur 4-17: Plantegning test dag 2 [42].

Det ble benyttet de samme forsøksoppsettene som ved testdag 1, men enkelte akselerometerplasseringer kolliderte med veggene som var satt opp. De berørte akselerometrene ble satt så nære opprinnelig plassering som mulig. Forsøksoppsettene og metodene med «heel-drop» og «svakt slag» for påføring av vibrasjoner ble gjort på samme måte, og på samme sted. Mens «gange» ble gjort i et litt annet mønster på grunn av innervegger som var satt opp. Figur 4-19 viser et oversiktsbilde for testdag 2.



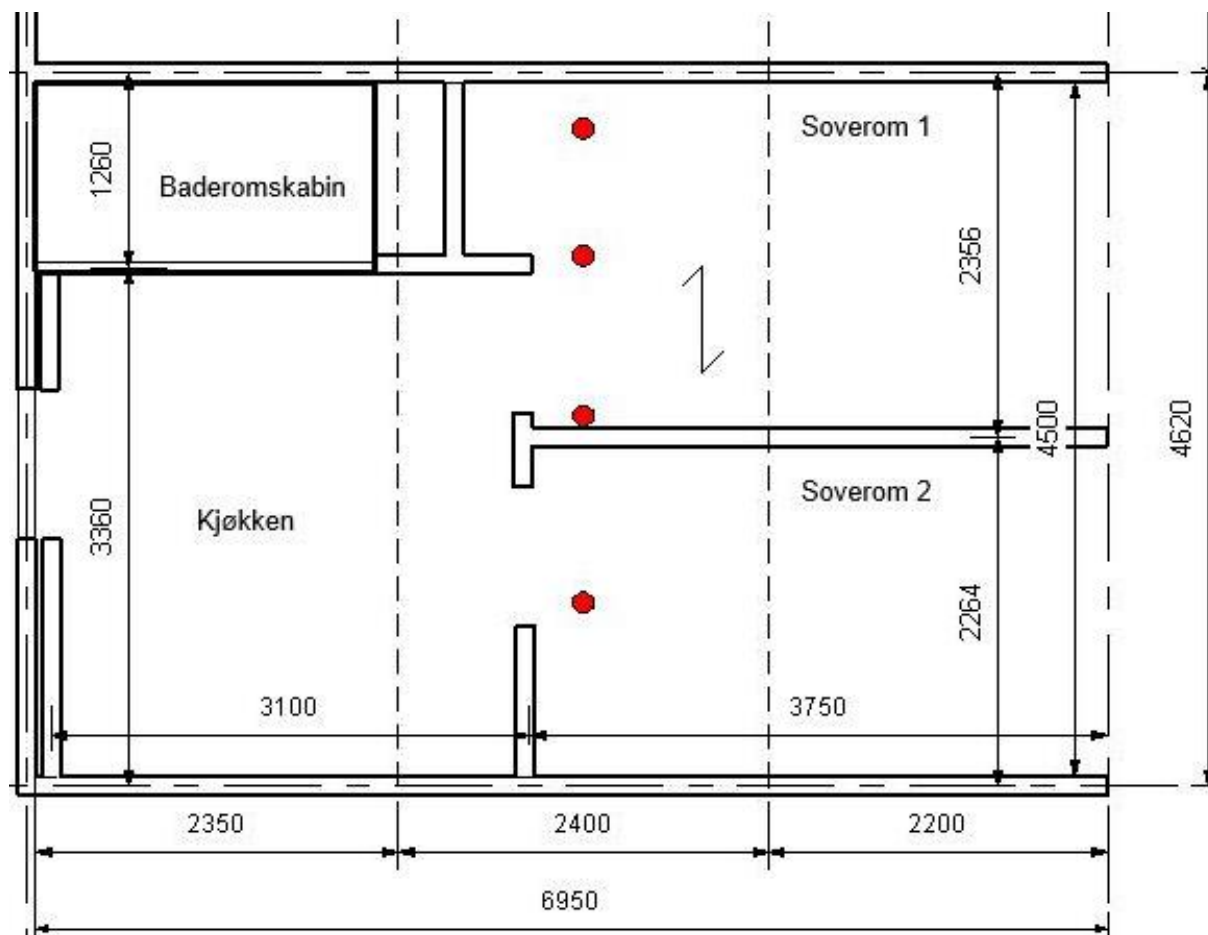
Figur 4-18 Påstøpen brytes av lettvegger [42].



Figur 4-19: Oversiktsbilde fra testdag 2 [42].

4.7.1. Testoppsett 1.2

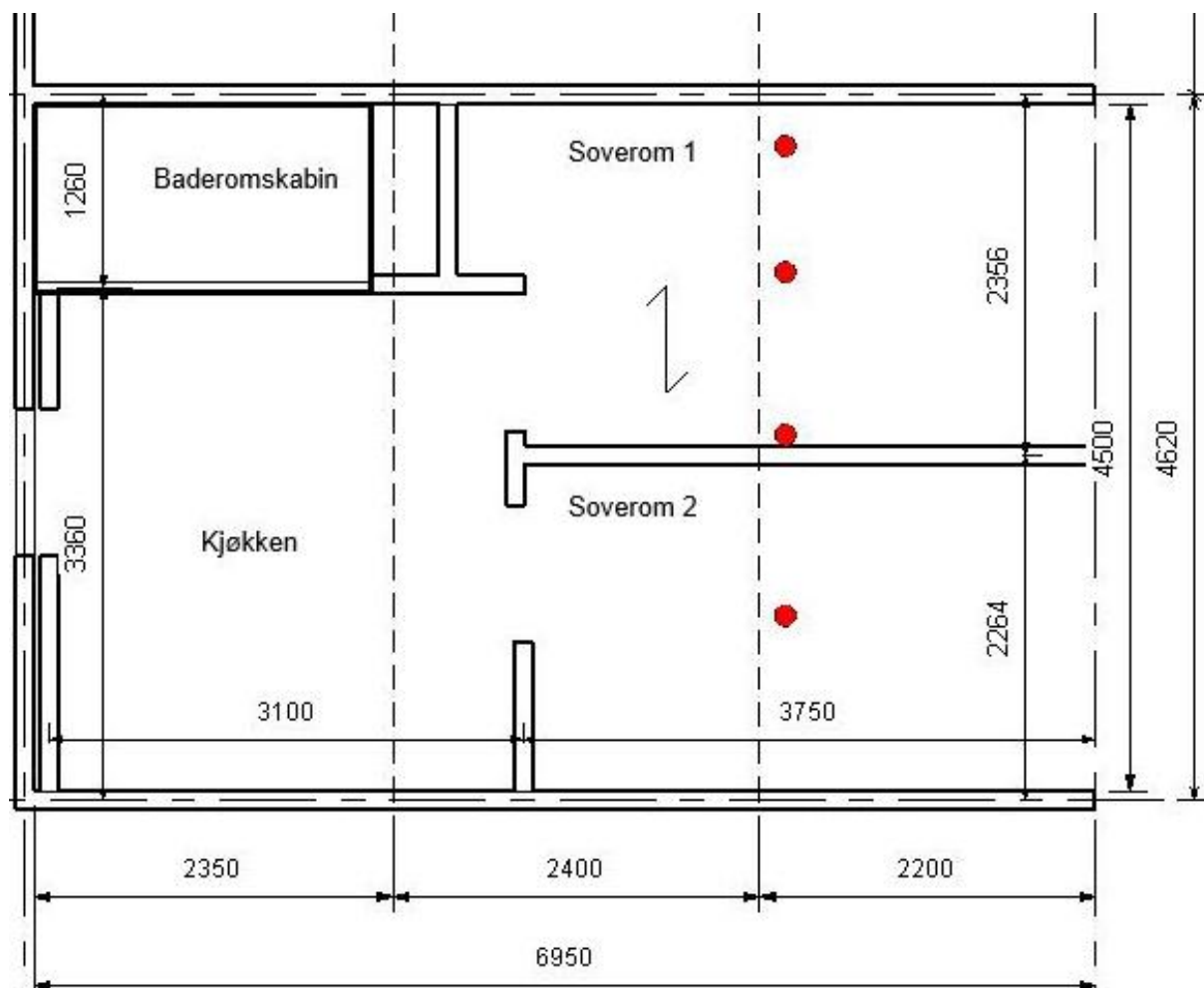
Akselerometrene ble plassert som ved testoppsett 1.1. Men akselerometeret nærmest lettveggen som skiller soverommene måtte justeres pga. veggen, se Figur 4-20. Testmetodene som ble utført var likt testoppsett 1.1. «Heel-drop» og «svakt slag» ble utført i soverom 1 hvorfra KLT-dekket fortsetter kontinuerlig inn i naboileiligheten.



Figur 4-20: Testoppsett 1.2 [42].

4.7.2. Testoppsett 2.2

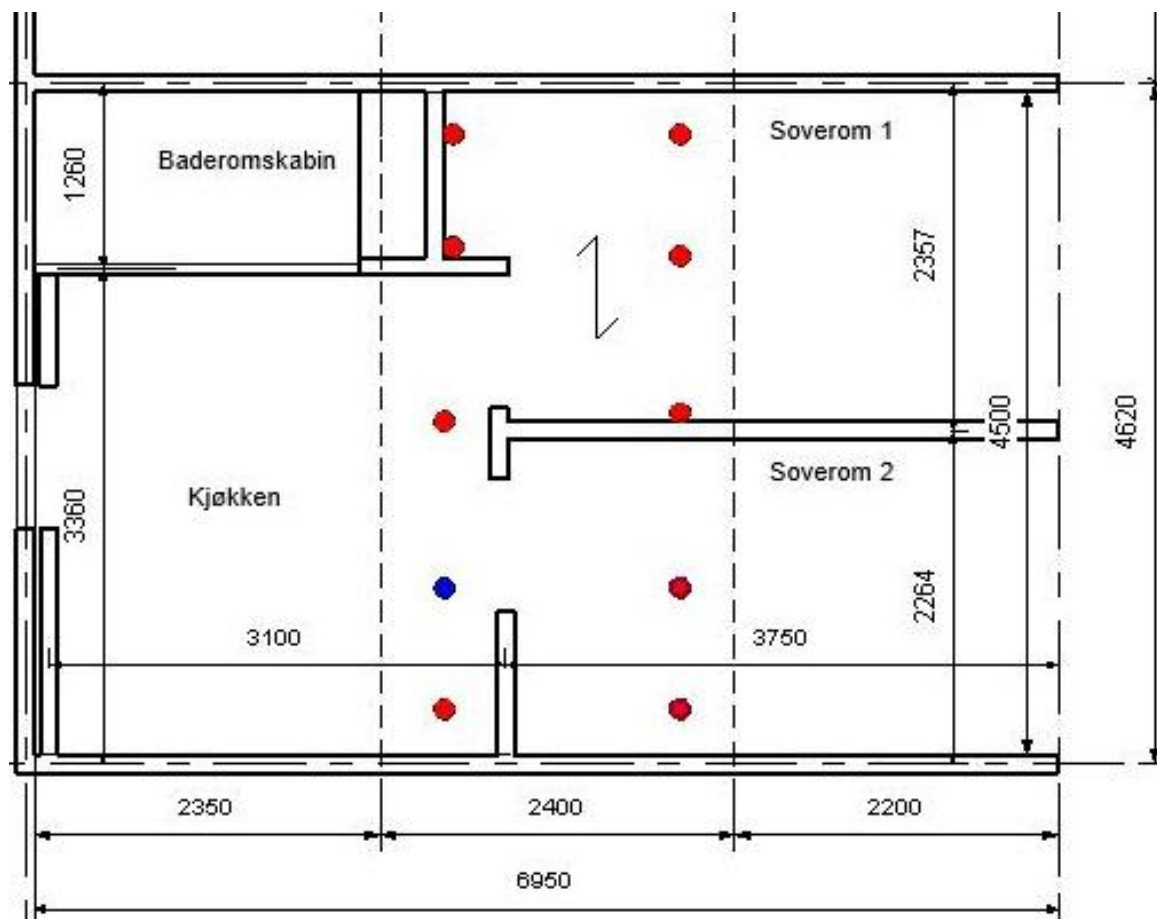
Akselerometrene ble plassert som ved testoppsett 2.1. Akselerometer nærmest lettvegg som skiller soverommene måtte justeres pga. vegg, som vist i Figur 4-21. Testmetodene ble utført som i testoppsett 2.1.



Figur 4-21: Testoppsett 2.2 [42]

4.7.3. Testoppsett 3.2

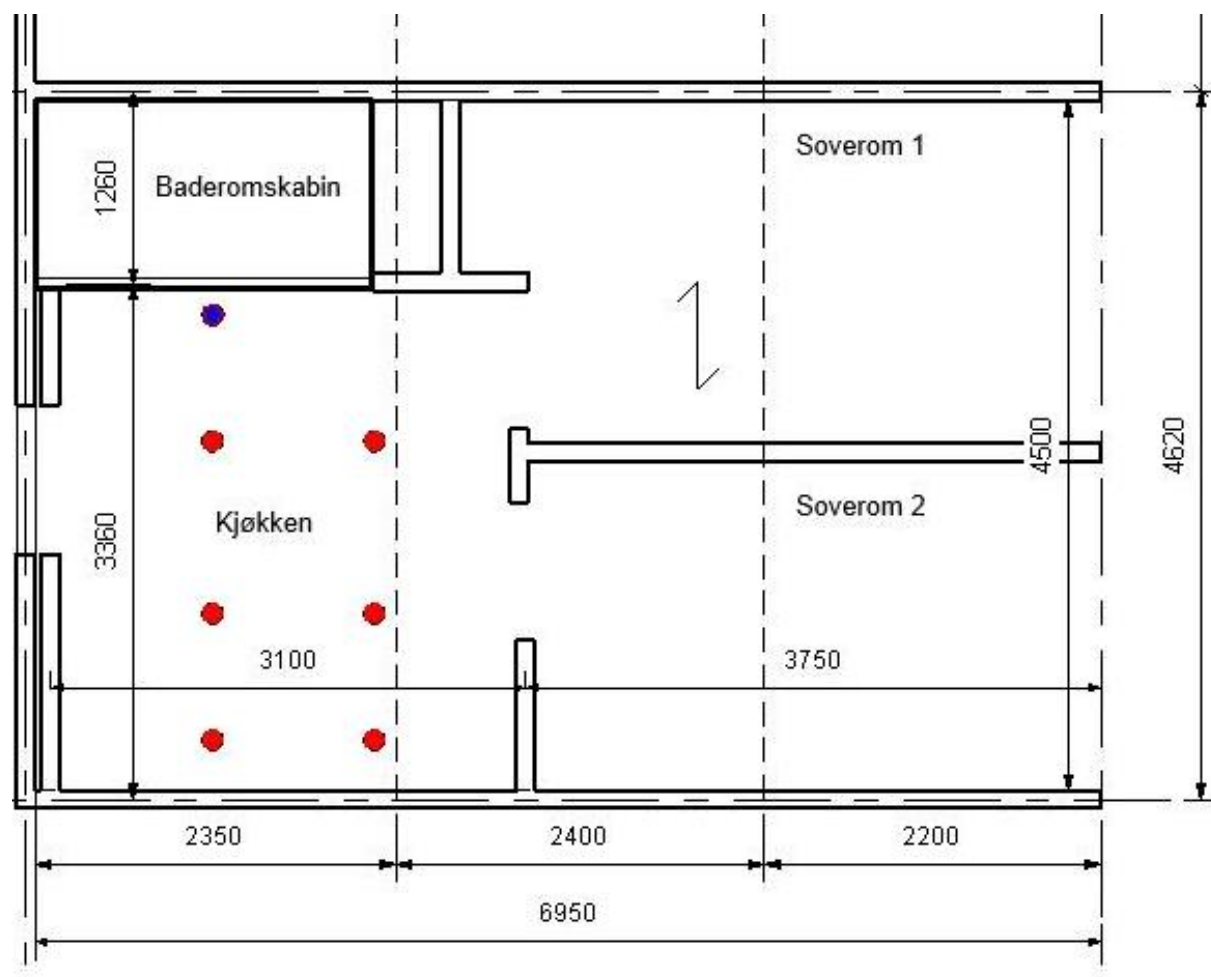
Akselerometrene ble plassert som ved testoppsett 3.1, og målingen ble utført med referansesensor. Akselerometeret nærmest lettvegg som skiller soverommene måtte justeres pga. veggen, se Figur 4-22. Akselerometrene nærmest baderomskabinen i samme rommet ble også justert siden opprinnelig plassering kolliderte med veggen. Testmetodene ble utført som i testoppsett 3.1.



Figur 4-22: Testoppsett 3.2 [42].

4.7.4. Testoppsett 4.2

Akselerometrene ble plassert som ved testoppsett 4.1, og målingene ble utført med referansesensor, se Figur 4-23. Testmetodene ble utført som i testoppsett 4.1.



Figur 4-23: Testoppsett 4.2 [42].

4.8. Analyse av målinger

I dette kapittelet presenteres metode for fremkalling av vibrasjonskriteriene.

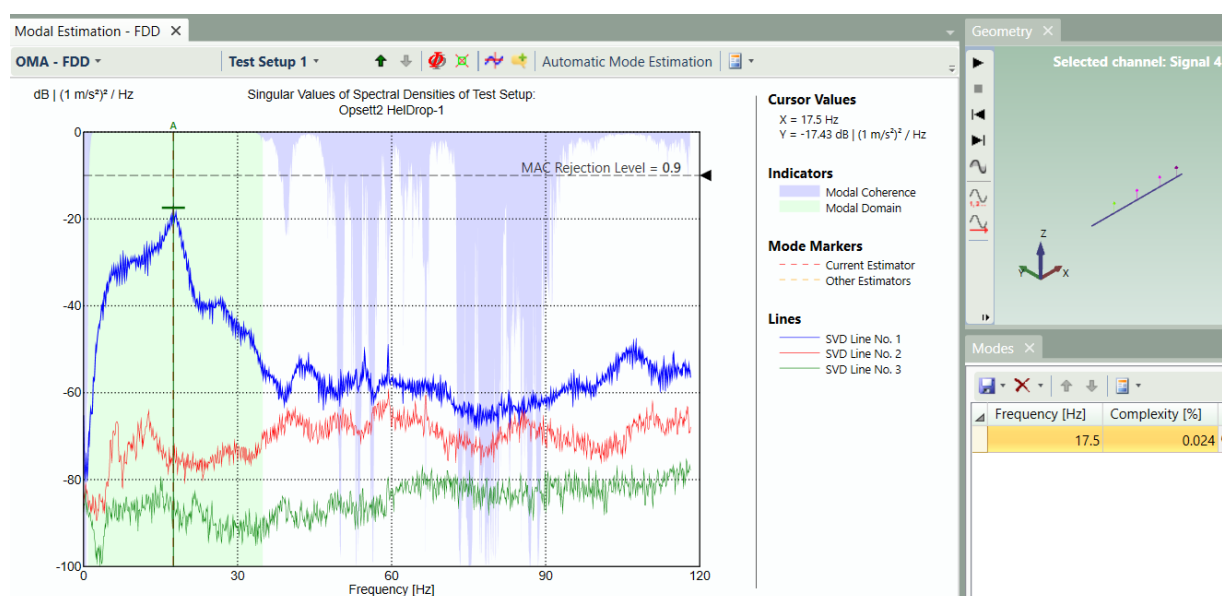
4.8.1. Programvare fra Brüel & Kjær

Eigenfrekvensen og dempingen til dekket ble bestemt ved hjelp av programmene «BK Connect» og «Operational Modal Analysis» (OMA) utviklet av Brüel & Kjær [63][68]. Disse programmene brukes til testing og simulering av systemer utsatt for vibrasjoner. Programmene kan analysere målinger for å identifisere svingemodus og frekvenser.

I «BK Connect» opprettes en forenklet geometrisk modell av forsøksoppsettet. Akselerometrenes plassering i forsøket knyttes til nodene med samme posisjon i modellen. Når oppsettet er gjort benyttes programmet til å samle inn og lagre rådataene fra forsøket. Rådataene lastes så over til OMA

OMA utfører en modal analyse ved å kombinere rådataene fra akselerometrene og den forenklede modellen [68]. Programmet utfører vibrasjonsberegninger på faktiske forhold, uten behov for å kjenne påførte krefter. OMA analyserer akselerasjonene og via «Fast Fourier Transform» (FFT) konverteres signalene til frekvenser. Resultatet presenteres i en graf hvor strukturens egenfrekvens vil danne toppunkter.

OMA har en innebygget funksjon «Automatic Mode Estimation» som vises i Figur 4-24 og automatisk finner fremtredende egenfrekvenser ved hjelp av toppunkter. Det kan også velges toppunkter manuelt. Frekvensene som leses av har en tilhørende verdi for kompleksitet og animasjon for svingemodus. Det er viktig å kontrollere svingemodus-animasjon og kompleksitet for å kontrollere påliteligheten til resultatet.



Figur 4-24: Skjerm bilde fra OMA [42].

Kompleksitet i OMA oppgis i prosent og refererer til hvor mye fasen av modusformen avviker fra den ideelle eller forventede formen. Lav kompleksitet betyr pålitelig frekvens basert på faktiske målinger.

Høy kompleksitet indikerer imaginær frekvens, ofte på grunn av utilstrekkelige data eller støy. Da må programvaren beregne bidrag for å fylle ut manglende informasjon i grafen [69].

a_{rms} og v_{rms} er parametre som også måles og beregnes innenfor valgt tidsrom av opptaker. Dette kan enkelt hentes ut fra OMA.

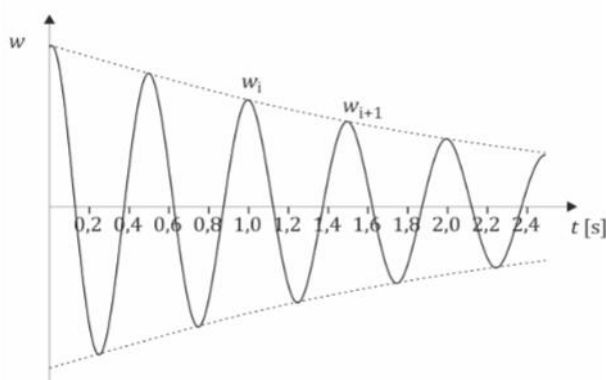
4.8.2. Damping

For å verifisere systemets dempingsverdier ble det benyttet en metode for å innhente et logaritmisk dekrement utfra den registrerte akselerasjonen over tid [70]. Avlesning av akselerasjonsverdier ble gjort i programmet OMA basert på rådataene. Dampingen er beregnet fra målinger i testleiligheten utført med metodene «gange» og «heel-drop». Disse metodene for påføring av vibrasjoner resulterte i frie svingninger i dekket som kunne brukes til å beregne dampingen. Damping ble ikke beregnet ved «svakt-slag»-metoden, da denne metoden ikke var tilstrekkelig til å skape store nok svingninger i systemet for å gjenkjenne de frie vibrasjonene ved analyse i OMA.

Dampingen testdag 1 ble beregnet fra målinger ved oppsett 1.1, 2.1 og 3.1, som tolkes som de mest sammenlignbare dempingsverdiene av gulvet, ettersom det er mindre bidrag av energioptak i badromselementer og eventuelle opplagere i skillevegger. På testdag 2 viste oppsett 1.2, 2.2 og 4.2 seg å være de mest hensiktsmessige valgene, som et resultat av etter monterte skillevegger.

Hver vibrasjonsmåling ble utført med fire akselerometre over en periode på 60 sekunder. For å finne damping ble to tidspunkter i hver måling valgt, hvor akselerasjonsverdier under frie svingninger etter tvungen kraft ble lest av fra rådataene. For hvert tidspunkt ble alle fire sensorene kontrollert. Dampingen ble beregnet som gjennomsnittet av de fire sensorene ved det aktuelle tidspunktet. Den totale dempingsverdien er gjennomsnittet av alle målingene.

Det ble lest av akselerasjonsverdier for w_i og w_{i+n} som vist i Figur 4-25. Herfra ble det hentet verdier til likning (4-1) for de respektive målte oppsettene, hvor $n = 5$ for test dag 1, og $n = 4$ for test dag 2. Videre ble verdiene lagt inn i Excel som ved formel (4-2) regner ut dampingen (Vedlegg C)



Figur 4-25: Illustrasjon av akselerasjonens damping over tid [70].

Logaritmisk dekrement:

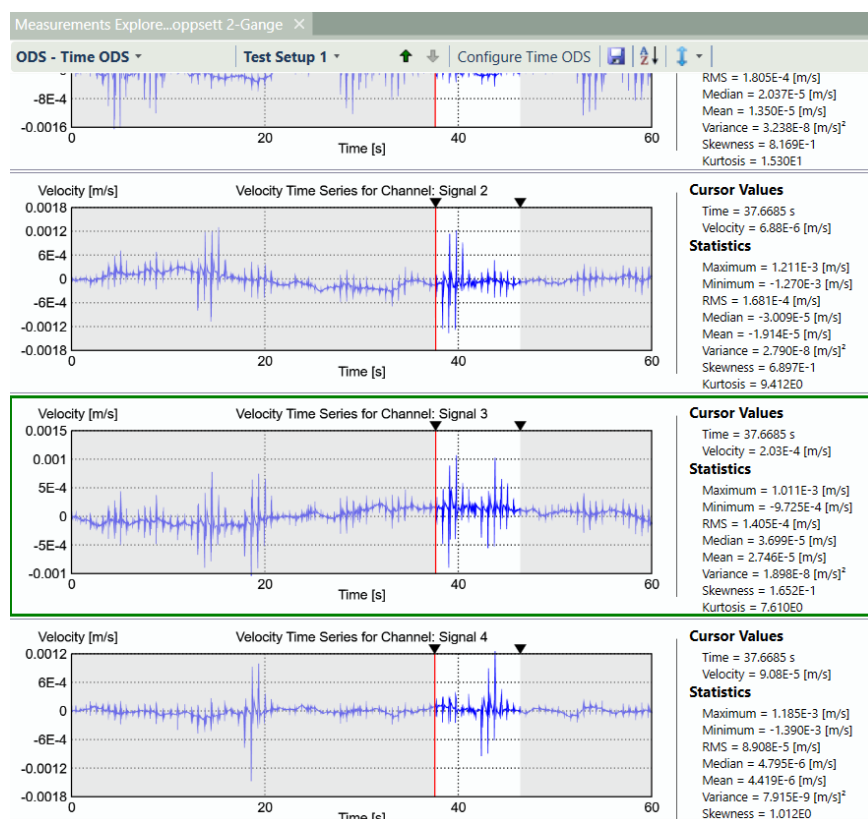
$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{w_i}{w_{i+n}}\right)}{n} \quad (4-1)$$

Dempingsforhold:

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}} \quad (4-2)$$

4.8.3. Hastighetsverdier (v_{rms}) i OMA

Det er hentet ut hastighetsverdier fra OMA. Verdiene er hentet fra testmetode «gange» ved både test dag 1 og 2. Det er hentet høyeste verdier fra oppsett 1, 2 og 4 på begge testdager. Til sammen er det fire v_{rms} målinger hver testdag. Oppsett 4 har to v_{rms} målinger fordi testoppsettet består av to opptak med én referansesensor. OMA beregner v_{rms} -verdi innenfor tidsrommet som er valgt i opptaket. Verdiene er hentet i et tidsrom på ca. 7-20 sekunder. Figur 4-26 viser skjermbilde fra OMA av hastighet over tid. Inne i OMA er det uavhengig av plassering på sensorene, hentet størst verdi.



Figur 4-26: Skjermbilde av hastighetsverdier per tid fra OMA [42].

De målte verdene for v_{rms} er kontrollert mot teoretisk beregnet verdi. Utregningen er gjort iht. EK5-25 sin likning (2-6), hvor det er benyttet de anbefalte verdiene for demping, personens vekt og dekkets stivhet fra EK5-25. I tillegg er det beregnet med de faktiske verdier for demping, personens vekt og stivhet med skjærdeformasjon tatt i betraktning.

For testdag 2 er teoretiske utregninger gjort etter nytt oppsett for spennvidder og bredde. Henholdsvis er det spennvidder på 2,35 m og 2,26 m samt bredde på 3.75 m, ved testoppsett 1.2 og 2.2, mens det er benyttet spennvidder 3,30 m og 1,26 m samt bredde på 3.10 m ved testoppsett 4.2.

5. Resultat og diskusjon

I dette kapitlet blir funnene som er gjort ved gjennomføring av metodene presentert. Først presenteres teoretiske sammenligninger av beregningsmetodene. Deretter presenteres teoretiske sammenligninger av KLT-dekker etter de ulike beregningsmetoder. Videre presenteres resultatene fra Case Lund Torv hvor det er utført vibrasjonsmålinger. Måleresultatene blir sammenlignet med teoretiske beregninger hvor det også blir drøftet likheter, ulikheter og feilkilder mellom målinger og beregninger. Måleresultatene settes også opp mot resultater fra mobiltelefoner for å kontrollere påliteligheten ved å bruke mobiltelefoner til vibrasjonsmålinger. Til slutt settes funnene inn i et samfunnsperspektiv.

5.1. Beregningsmetoder – Sammenligning

Tabell 5-1 viser hvilke beregningskriterier som er inkludert i de respektive beregningsmetodene.

Tabell 5-1 gir en sammenligning av formler, men også hva som ikke inkluderes ved de respektive beregningsmetodene. Celler som er merket «–» betyr ikke inkludert, mens celler merket «X» beskriver at det er medtatt i beregningsmetoden.

Tabell 5-1: Sammenligning av formler i de ulike beregningsmetodene [42]

Kriterier			EK5	EK5-25	ØNORM	H/R	SINTEF
Eigenfrekvens	f_1	[Hz]	$\frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$	$k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m^a}}$	$k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$	$\frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$	$\frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$
Kontinuerlige spenn			–	X	X	–	–
Modal Mass,	M^*	[kg]	–	$\frac{m^a \cdot l \cdot b}{4}$	$\frac{m^a \cdot l \cdot b_{ef}}{2}$	$\frac{m \cdot l \cdot b_{ef}}{4}$	–
Demping	ζ	[%]	1 %	2 – 4 %	1 – 4 %	1 – 3 %	–
Punktnedbøyning ^b	Δ	[mm]	$\frac{[1 \text{ kN}] \cdot Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b}$	$\frac{[1 \text{ kN}] \cdot Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$	$\frac{[1 \text{ kN}] \cdot Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$	$\frac{[2 \text{ kN}] \cdot Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{ef}}$	$\frac{[1 \text{ kN}] \cdot Fl^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b}$
Effektiv bredde	b_{ef}	[m]	1	$0,95 \cdot l \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$	$\frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$	$\frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}}$	1
Akselerasjon		$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$	–	$a_{rms} = \frac{K_{res} \cdot \mu_{res} \cdot F_{dyn}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M^*}$	$a_{rms} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*}$	$a = \frac{F_{dyn}}{2 \cdot \zeta \cdot M^*}$	–
Hastighet	v_{rms}	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	–	$v_{tot,peak}(0,65 - 0,01f_1) \cdot (1,22 - 11,0 \cdot \zeta)$	–	–	–
Hastighetsrespons	v	$\left[\frac{\text{m}}{\text{Ns}^2}\right]$	$\frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{mbI + 200}$	–	–	–	–

^a Masse inkluderer 10 % nyttelast i tillegg til egenvekten.

^b Nedbøyning beregnes konservativt for største spenn med leddet opplegg.

Ved beregning av egenfrekvens inkluderer EK5-25 faktorer som tar hensyn til kontinuerlig spenn og om dekket har to eller fire oppleggssider. EK5-25 inkluderer 10 % av nyttelasten i tillegg til massen ved beregningene av egenfrekvens. ØNORM inkluderer faktorer som tar hensyn til flere spenn og ulike opplagerbetingelser. EK5, H/R og SINTEF fokuserer kun på det største spennet, og bruker dette som en fritt opplagt bjelke i sine beregninger av egenfrekvens.

Alle beregningsmetodene har krav til punktnedbøyning. Beregningene undersøker nedbøyning med en punktlast midt på spennet. H/R benytter en punktlast på 2 kN, mens de resterende metodene bruker 1 kN. EK5-25, H/R og ØNORM tar hensyn til effektiv gulvbredde i nedbøyningsberegningene for stivheten, mens EK5 og SINTEF beregner nedbøyning med 1 meter bredde. Ingen av beregningene for punktnedbøyning tar hensyn til kontinuerlig spenn på dekket.

EK5, EK5-25, ØNORM og H/R har egne verdier for damping som benyttes i beregningene. EK5-25 har angitt damping fra 2 – 4 %, ØNORM bruker dempingsverdier fra 1 – 4 %, H/R bruker 1 – 3 % mens EK5 har angitt 1 % med mindre annet kan bevises. For KLT-dekker hensyntar dempingsverdiene om dekket er påført flytende gulvmasse som påstøp, eller om det er rått dekke.

EK5-25, ØNORM og H/R har krav til beregning av akselerasjon ved frekvenser under definerte grenser i de respektive regelverk. Akselerasjonsverdiene beregnes noe ulikt. EK5-25 og ØNORM beregner «rms»-verdi, mens H/R beregner «peak»-verdien. De ulike dempingsverdiene benyttes også i beregning av akselerasjon.

I EK5 er det krav om beregning av hastighetsrespons som gjelder ved frekvens over 8 Hz. I EK5-25 er hastighetsrespons byttet ut med krav om beregning av hastighet, som har egne grenseverdier for å klassifisere dekket, og gjelder ved alle frekvenser.

SINTEFs beregningsmetoder kan sammenlignes med EK5, men skiller seg ved at hastighetsrespons ikke inngår i beregningene. SINTEF opererer med et stivhetskrav på maksimalt 1,3 mm, hvilket i tillegg må kontrolleres i sammenheng med frekvens fra likning (2-8). Ettersom SINTEF har kommentert og fastsatt grenser for frekvens ved bruk av massivtre, er SINTEFs formler tatt med i de videre beregningene.

Massivtre er ikke spesifikt nevnt i EK5, da de anvendte formlene kun refererer til trebjelker. Videre fremstår formlene, særlig de som gjelder hastighetsimpuls, som uklare og til dels vilkårlige ved avlesning av verdiene a og b fra i Figur 2-12. Med begrunnelse i at EK5 ikke er aktuell for massivtre benyttes ikke EK5 til videre sammenligninger.

5.2. Analysering av KLT-dekker og klassifisering etter ulike beregningsmetoder

Tabell 5-2 viser et utdrag fra klassifisering av ulike dekker med påstøp etter beregningsmetodene EK5-25, ØNORM, H/R og SINTEF. Utnyttelsesgrad for kriteriet som avgjør klasse er synliggjort med parentes i tabellen. Utrekningene er utført med Vedlegg A. Fullstendig oversikt over alle beregninger finnes i Vedlegg B.

Tabell 5-2: Beregning av ulike KLT-dekker og klassifisering i henhold til de respektive beregningsmetodene. Tabellen viser et utdrag fra Vedlegg B [42].

		Fargekoder		Kl. 1	Kl. 2	Kl. 3	Kl. 4	Kl. 5	Kl. 6	Kl. 7	Kl. 8						
Situasjon	Element type	Spennvidder		Stivhet påstøp [%]	EK-25				Ønorm			H/R			Sintef		
		L1 [m]	L2 [m]		frekvens [Hz]	Nedb [mm]	Vrms [m/s]	Arms [m/s²]	frekvens [Hz]	Nedb [mm]	Arms [m/s²]	frekvens [Hz]	Nedb [mm]	A [m/s²]	frekvens [Hz]	Nedb [mm]	kontroll
A-1	120L3	4.62	3.3	100	9.11	0,311 (62 %)	0.0007	-	9.60	0,325 (65 %)	-	8.01	0,649 (65 %)	-	8,01 (f1<10 Hz)		
A-2	120L3	4.62	3.3	0	8.05	0,635 (82 %)	0.001	-	8.48	0,664 (133 %)	-	7.08	1,328 (133 %)	-	7,08 (f1<10 Hz)		
B	160L5	4.62	3.3	100	12.07	0.166	0,0005 (56 %)	-	12.66	0,173 (69 %)	-	10.56	0,346 (69 %)	-	10.56	0.499	14,33 (130 %)
C	200L5	4.62	3.3	100	14.86	0.092	0,0003 (78 %)	-	15.52	0,096 (38 %)	-	12.94	0,192 (38 %)	-	12.94	0.302	21,9 (85 %)
D	120L3	5	3.3	100	7.92	0.364	0.0008	0,101 (126 %K14)	8.35	0,38 (76 %)	-	6.84	0,76 (76 %)	-	6,84 (f1<10 Hz)		
E	160L5	5.5	3.3	100	8.84	0.235	0,0006 (73 %)	-	9,27	0,245 (98 %)	-	7.45	0,49 (49 %)	-	7,45 (f1<10 Hz)		
F	160L5	7	3.3	100	5.67	0.38	0.0009	0,066 (82 %)	5.94	0.397	0,106 (106 %)	4.60	0.794	0,31 (305 %)	4,6 (f1<10 Hz)		
G	240L7	8	5	100	5.76	0.172	0.0006	0,049 (81 %)	6.00	0.18	0,052 (52 %)	4.86	0.359	0,154 (154 %)	4,86 (f1<10 Hz)		

Tabell 5-3 viser hvilke klasser i de ulike beregningsmetodene som samsvarer med Premium choice for multi-family building (leilighetsbygg) i henhold til EK5-25. Den røde linje viser hvilke klasser de respektive beregningsmetode definerer som ok for leilighetsbygg.

Tabell 5-3: Viser klasser for de respektive beregningsmetoder sammenlignet mot hverandre. Klassene til venstre for rød linje er etter egne krav godkjent for leilighetsbygg [42].

EK5-25	Premium choice			Standard choice		Base choice		
	Kl. 1	Kl. 2	Kl. 3	Kl. 4	Kl. 5	Kl. 6	Kl. 7	Kl. 8
ØNORM	Klasse 1		Klasse 2	Utenfor ktagori				
H/R	Klasse 1		Klasse 2	Utenfor ktagori				
SINTEF	OK	Ikke ok						

Tabell 5-3 viser sammenhengen mellom klassene i ulike beregningsmetoder, basert på resultater fra Tabell 5-2. Klasse 1 og 2 i EK5-25 samsvarer med klasse 1 i ØNORM og H/R, mens klasse 3 i EK5-25 samsvarer med klasse 2 i ØNORM og H/R. Dekker som oppfyller vibrasjonskravene til SINTEF tilfredsstiller klasse 1 i andre metoder. Klasse 4 til 8 i EK5-25 grupperes som Standard choice og Base choice og ligger utenfor kategori sammenlignet med ØNORM og H/R. For dekker med egenfrekvens over 10 Hz vil nedbøyningskravet i størst grad være avgjørende for klassifisering. Nedbøyningskravene i de ulike klassene samsvarer med oppsettet i Tabell 5-3.

Tabell 5-2 viser forskjellige dekker med påstøp, hvor flere har frekvenser i området 4,5 – 10 Hz. I dette frekvensområdet vil akselerasjonskriteriet ofte utfordres. Tabellen gir eksempler på hvordan dette kan påvirke resultatet i de ulike beregningsmetodene.

Sammenligningen tar for seg ulike spennvidder og tykkelser på KLT-dekker med påstøp. 120L3 refererer til en 120 mm tykkelse og 3 sjikt hvor fibre i de ytterste sjiktene ligger parallelt med elementets lengderetning. Tabell 5-2 viser 7 forskjellige situasjoner, hvor situasjon A er delt i to og viser med og uten stivhetsvirkning fra påstøpen. Videre viser tabellen hvilken klasse dekkene oppfyller i henhold til EK5-25, ØNORM, H/R og SINTEF. Utnyttelsesgraden er fremhevet for kriteriet som er avgjørende for klassifisering.

Videre følger en mer detaljert forklaring av de ulike situasjonene i Tabell 5-2:

Situasjon Beskrivelse

- A-1 Element type og spennviddene er de samme som er benyttet på Lund Torv. Dekket klassifiseres i klasse 3 etter EK5-25 og klasse 2 i ØNORM og H/R. SINTEF beregner en egenfrekvens under 10 Hz, og dekket blir dermed ikke godkjent av SINTEF.
- A-2 Samme dekket som i A-1, uten å ta hensyn til stivhet fra påstøpen. Vibrasjonsberegningene plasserer dekket i klasse 4 etter EK5-25, mens dekket ikke oppfyller kravene i ØNORM, H/R og SINTEF.

- B** Dekket har samme spennvidder som i A, men økning i tykkelsen på KLT-elementet til 160 mm plasserer dekket i klasse 2 i henhold til EK5-25. Dekket oppfyller klasse 1 i ØNORM og H/R, mens kravene i SINTEF ikke er oppfylt
- C** Ved å øke tykkelsen på KLT-elementet til 200 mm og beholde spennviddene til situasjon A oppfyller dekket nå kravene til SINTEF. I henhold til de andre beregningsmetodene plasseres dekket i klasse 1.
- D** EK5-25 beregner egenfrekvensen til $f_1 = 7,92$ Hz. $f_1 < f_{lim} = 8$ Hz utløser kravet om å kontrollere akselerasjon. Beregnet a_{rms} (0,101) overskrider kravet (0,08) i klasse 4. EK5-25 tillater ikke frekvens under f_{lim} ved klassene 5 – 8 og dekket blir dermed ikke godkjent.
- ØNORM beregner egenfrekvens over 8 Hz, hvilket gjør at nedbøyning blir det avgjørende kriteriet for at dekket tilfredsstiller klasse 2.
- Beregnet nedbøyning i H/R tilfredsstiller klasse 2. Kravet for å kontrollere akselerasjon i klasse 2 gjelder hvis $f_1 < 6$ Hz. Dekket plasseres dermed i klasse 2 etter H/R.
- E** Dekket tilfredsstiller klasse 2 i EK5-25 og klasse 1 i ØNORM. For disse beregningsmetodene er egenfrekvens over 8 Hz, og det er nedbøyningskravet som avgjør klassen i tillegg til hastighetskravet i EK5-25.
- H/R beregner nedbøyning 0,49 mm, innenfor grenseverdien i klasse 1. Videre må akselerasjonen kontrolleres fordi H/R ikke tar hensyn til flere spenn, og egenfrekvensen da blir under 8 Hz. Beregnet akselerasjon gir 988 % utnyttelse av grenseverdien, og dekket tilfredsstiller ikke kravet i klasse 1. Ved å se på klasse 2 er beregnet nedbøyning innenfor grenseverdien, kravet for å sjekke akselerasjon er 6 Hz, og akselerasjonskriteriet slår dermed ikke inn. Dekket er dermed innenfor klasse 2.
- F** Dekket har større spenn enn situasjon E, dette fører til så lav egenfrekvens at det er behov for å kontrollere akselerasjon etter alle beregningsmetodene som krever det. I henhold til EK5-25 klassifiseres dekket som klasse 4 på grunn av akselerasjonen, mens både ØNORM og H/R ikke oppfyller kravene til akselerasjon.
- G** Dekket i situasjon G spennvidde 8 m. Nedbøyning er etter EK5-25, ØNORM og H/R innenfor klasse 1. Videre får dekket en lav egenfrekvens og det er nødvendig å kontrollere akselerasjon. Iht. EK5-25 havner dekket i klasse 3 pga. kravet til akselerasjon. ØNORM ender også i klasse 2 pga. akselerasjonskravet, mens for H/R er akselerasjonskriteriet ikke oppfylt og dekket havner utenfor kategori.

Alle dekkene i Tabell 5-2 er kontrollert for ULS og SLS ved bruk av CLT-designer. Tabellen viser dekker med full stivhet fra påstøp, mens ULS og SLS kontroll er gjort uten stivhet fra påstøp. Situasjon A-2 er vist som eksempel for hvordan dekkene er kontrollert. ULS og SLS kontroll finnes i Vedlegg D

Den røde linjen i Tabell 5-3 viser hvor grensen for leilighetsbygg settes i de ulike beregningsmetodene. Studentleilighetene ved Lund Torv kategoriseres som leilighetsbygg, det er dermed naturlig å fokusere på dette kravet.

I henhold til gulvklassene for Premium choice har EK5-25 definert gulvytelsesklasse 1 – 3 for bruk i leilighetsbygg. ØNORM og H/R definerer at et dekke må være i klasse 1 for å tilfredsstille leilighetsbygg. Det viser at ØNORM og H/R setter strengere krav for dekker som kan tilfredsstille bruk i leilighetsbygg.

Videre viser sammenligningen at SINTEF ikke deler inn i gulvklasser, og i tillegg har de strengeste kriteriene.

Ved å kontrollere situasjonene A – C som bruker ulike KLT-elementer for lik spennvidde for bruk i leilighetsbygg, viser Tabell 5-2 at et 120L3 element som gir klasse 3 er tilstrekkelig for EK5-25. ØNORM og H/R krever klasse 1 til bruk i leilighetsbygg. Dette kravet er oppfylt med et 160L5 element. For å oppfylle kravene i SINTEF er det nødvendig med et 200L5 element.

Ved å se på hele Tabell 5-2 viser det at:

- EK5-25 oppfylder beregningskravene til leilighetsbygg i fem av syv tilfeller
- ØNORM oppfylder beregningskravene til leilighetsbygg i tre av syv tilfeller.
- H/R oppfylder beregningskravene til leilighetsbygg i to av syv tilfeller.
- SINTEF har ingen klassifiseringssystem, men oppfylder egne kriterier i kun et av syv tilfeller.

Oppsummering:

For situasjon A – C som tilsvarer spennviddene ved Lund Torv vil beregning etter EK5-25 redusere bruken av tre med i KLT-elementer med 25 % sammenlignet med ØNORM og H/R. Sammenlignet med SINTEF vil EK5-25 redusere bruken av tre med hele 40 %.

EK5-25 og ØNORM har kun mindre ulikheter i beregning av frekvens, nedbøyning og akselerasjon, men ØNORM gir generelt høyere verdier. Forskjellene mellom klassifisering etter EK5-25 og ØNORM skyldes hovedsakelig ulike grenseverdier for punktnedbøyning, noe som i stor grad avgjør om kravene til leilighetsbygg oppfylles. Videre har også H/R mange fellestrekk med ØNORM, men skiller seg ut ved å ikke ta hensyn til flere spenn.

SINTEFs beregningsmetoder for KLT-elementer fremstår som konservative, spesielt fordi de mangler egne beregningsmetoder for frekvenser under 10 Hz. Kriteriene er også strengere enn alle de andre beregningsmetodene.

EK5-25 definerer gulvytelsesklasser for Premium choice i leilighetsbygg. Når den nye Eurokode 5 introduseres, vil det også innføres et nasjonalt tillegg som kan gi nasjonale føringer som overstyrer de anbefalte verdiene.

5.3. Case: Lund Torv – Resultater

Her presenteres resultatene fra vibrasjonsmålingene som ble utført på Lund Torv under testdag 1 og testdag 2. Målingene gir verdier for egenfrekvens, demping og hastighet. I tillegg blir resultater fra teoretiske beregninger av vibrasjonskriteriene presentert. Målingene sammenlignes med de teoretiske beregningene, og både likheter og avvik mellom disse vurderes og diskuteres.

På testdag 1 ble målingene gjennomført på et rått KLT-dekke. I tillegg til målinger med akselerometer ble det også utført målinger av punktnedbøyning i testleiligheten. Det var høy aktivitet i bygget denne dagen, og under enkelte målinger forekom det sporadisk bruk av verktøy.

På testdag 2 var bygget nærmere ferdigstilt tilstand, med monterte lettvegger, himling og påstøp. Påstøpen var tilstrekkelig herdet til at det delvis var lagt belegg i leiligheten, derfor antas det at den beregningsmessige stivhet i påstøpen var oppnådd. I soverom 2 var det imidlertid ikke lagt belegg på testdag 2, og det ble observert et svinnriss i støpen ved døråpningen. Det er usikkert om risset har betydning for de utførte målingene. Målingene som ble gjennomført var de samme som på testdag 1, med identiske testmetoder og tilnærmet likt testoppsett for å sikre sammenlignbare resultater. Målinger av punktnedbøyning ble ikke utført på testdag 2, ettersom himlinger var montert og undersiden av KLT-dekket ikke var tilgjengelig. Det var generelt lavere byggeaktivitet ved testdag 2.

5.3.1. Punktnedbøyning

Resultatene fra måling av nedbøyning med 1 kN punktlast er vist i Tabell 5-4. Det ble foretatt 5 målinger for hvert punkt vist i Figur 4-10.

Tabell 5-4: Målt punktnedbøyning på KLT-element med 1 kN punktlast ved Lund Torv [42].

Måling [mm] Punkt	1	2	3	4	5	Gjennomsnitt
1	0,37	0,35	0,33	0,38	0,36	0,36
2	0,50	0,53	0,54	0,53	0,52	0,52
3	0,31	0,29	0,31	0,27	0,29	0,29

Tabell 5-5 viser beregnet punktnedbøyning for samme KLT-dekke og spennlengder etter de respektive beregningsmetoder. For EK5-25, ØNORM og H/R er kravet som må oppfylles for leilighetsbygg satt i tabellen. SINTEF har krav på 1,3 mm, hvor nedbøyning også må oppfylle krav i kontrollformelen fra likning (2-8).

Tabell 5-5: Beregnet punktnebbøyning for KLT-element på testdag 1 [42].

	Beregnet punktnebbøyning [mm]	Grenseverdi for leilighetsbygg	
		Punktnebbøyning [mm]	Klasse
EK5-25	0,66	0,5	3
ØNORM	0,66	0,25	1
H/R	1,32	0,5 ^a	1
SINTEF	1,24	1,3	

^a H/R regner med en påført last på 2 kN.

Resultatene for punktnebbøyning vist i Tabell 5-4 viser at den målte nedbøyningen varierer fra 0,29 mm til 0,52 mm. Den største nedbøyningen ble registrert i punkt 2. Figur 4-10 viser at plasseringen av punkt 2 er i skjøten mellom to elementer. Elementet nærmest ytterveggen er festet med vinkler i fasadeelementet. Antakeligvis fører "half-lap" skjøten mellom elementene til at full stivhet ikke kan overføres, slik at elementet ikke oppnår full effekt fra det tilstøtende elementet.

Ved punkt 1 i som kan sees i Figur 4-10, ble det målt nedbøyning på 0,36 mm. Det er ingen andre påvirkninger på det midterste elementet bortsett fra punktlasten. Dette kan indikere en reell verdi for målt nedbøyning.

I punkt 3, er det målt en punktnebbøyning på 0,29 mm. Figur 4-10 viser at målingen i punkt 3 ble utført i elementskjøten nærmest korridoren, og elementet har på grunn av veggen mot korridor opplegg på tre sider. Det antas at tverrstivheten spiller en større rolle for dette elementet på grunn av tresidig opplegg. I tillegg står baderomskabinen på fire føtter, hvorav en er nær skjøten på det samme KLT-elementet som nedbøyningen ble målt. Punktlasten fra baderomskabinen kan også ha påvirket den langsiktige nedbøyningen, noe som kan ha redusert effekten av punktlasten på 1 kN.

Tabell 5-5 viser beregnet nedbøyning for et KLT-element med samme spennvidder og tykkelser som måleresultatene i Tabell 5-4. Beregnet nedbøyning er større enn den målte nedbøyningen. EK5-25 og ØNORM beregner nedbøyning med 1 kN punktlast til 0,66 mm. SINTEF beregner nedbøyning til 1,24 mm, mens H/R som bruker en punktlast på 2 kN beregner 1,33 mm nedbøyning. Formlene for nedbøyning betrakter gulvet som ett fritt opplagt dekke, og tar ikke høyde for effekten av flere spenn. Programmer som CLT-designer kan gi mer nøyaktige verdier ved å ta hensyn til virkningen av flere spenn.

Tabell 5-5 viser også grenseverdiene for et dekke i kategorien leilighetsbygg, hvor det kun er nedbøyningskravet i SINTEF som er oppfylt.

Den målte punktnebbøyningen ved testdag 1 ble gjennomført kun på KLT-elementet uten annen påvirkning. Ferdig gulv vil derimot inkludere en påstøp som gir økt stivhet og bidrar til lastfordeling. Videre vil innvendige lettvegger sannsynligvis også ha en positiv effekt, selv om de ikke er konstruert som bærende vegger. Disse faktorene vil bidra til å redusere nedbøyningen fra en punktlast, og punktnebbøyningen for et ferdig gulv vil dermed med stor sannsynlighet være mindre enn målingen ved testdag 1.

Formlene for punktnedbøyning som er oppgitt i beregningsmetodene er forenklede og tar ikke hensyn til opplagerbetingelser eller kontinuerlig dekke. Det gjør formelene noe konservative i forhold til utførte målinger.

5.3.2. Egenfrekvens

Testdag 1

Tabell 5-6 viser målt egenfrekvens og tilhørende kompleksitet for testdag 1 ved Lund Torv.

Tabell 5-6: Målt frekvens og tilhørende kompleksitet fra testdag 1 ved Lund torv [42].

Testmetode	Frekvens [Hz] og tilhørende kompleksitet [%]			
	Oppsett 1.1	Oppsett 2.1	Oppsett3.1	Oppsett 4.1
Gange	17,5 (0,03)	17,7 (0,00)		23,4 (1,57)
Heel-drop	17,9 (0,03)	17,5 (0,02)	17,4 (0,20)	17,2 (0,01)
Svakt slag	17,7 (0,00)	17,9 (0,01)		56,7 (7,89)
Heel-drop Leilighet B	17,3 (1,77)	17,3 (0,14)		
Heel-drop Leilighet C	17,4 (1,26)			
Heel-drop Korridor				23,9 (0,19)

Tabell 5-7 viser den teoretisk beregnede egenfrekvensen etter forholdene på testdag 1. Utregningene er gjort med Excel-arket i Vedlegg A. Beregningene for EK5-25 og ØNORM omfatter to spenn, mens H/R og SINTEF beregner egenfrekvensen for det største spennet. Videre er det undersøkt om skjærdeformasjoner bør inkluderes i beregningene.

Tabell 5-7: Beregnet frekvens for testdag 1 for de respektive beregningsmetoder [42]

Beregningsmetode	EK5-25	ØNORM	H/R	SINTEF
Beregnet frekvens [Hz]	14,7	14,7	12,3	12,3

Måleresultatene fra frekvensmålingene i Tabell 5-6 viser flere verdier som sammenfaller i området 17,2 Hz til 17,9 Hz. Kompleksiteten til disse målingene er under 2 % og kan klassifiseres som lav. Den målte egenfrekvensen til testoppsettene 1-3 er konsistente med den samme frekvensen, uavhengig av hvilken vibrasjonsmetode som er benyttet. For testoppsett 4 er det større variasjon i målingene, og verdien på 56,7 Hz har også høy kompleksitet. Dette testoppsettet er, som vist i Figur 4-15, plassert på et element med opplegg på tre sider. I tillegg er det også plassert en punktlast fra baderomskabinen på elementet. Disse faktorene kan ha påvirkning på den målte frekvensen.

Når testmetode vurderes, viser resultatene at «heel-drop» ved testoppsett 4.1 gir samme frekvens som de øvrige oppsettene. Metoden «svakt slag» ved oppsett 4.1 samsvarer dårlig med de øvrige målingene, og gir et resultat med høy kompleksitet, og en frekvens som ikke samsvarer med noe annet. Det kan skyldes at «svakt slag» gir en relativt liten kraft for å sette svingninger i dekket i forhold til de andre testmetodene. Kombinasjonen av liten påført kraft, større stivhet i opplegget, samt en punktlast på dekket fra baderomskabinen, gjør det sannsynlig at vibrasjonsmetoden er mer sensitiv for forstyrrelser i målingene.

For testoppsett 4.1 er det også målt egenfrekvens ved «heel-drop» i korridor. KLT-elementene i korridor er ikke sammenhengende med elementet i testleiligheten, men elementene har opplegg på samme vegg. Egenfrekvensen ved «heel-drop» i korridor (23,9 Hz) samsvarer med bruk av «gange» i leiligheten (23,4 Hz). En hypotese kan være at egenfrekvensen til den langsgående veggen påvirker målingene og gir en frekvens rundt 23,5 Hz. Flere målinger vil være nødvendige for å bekrefte dette.

KLT-dekket har to langsgående «half-lap» skjøter som er skrudd sammen. Disse vil antageligvis ikke gi den samme tverrstivheten som et sammenhengende KLT-element. Målingene for oppsett 1-3 er likevel svært like og skjøten synes å ha liten innvirkning på egenfrekvensen.

Sammenligning av måleresultatene for testoppsett 1-3 viser mange samsvarende frekvenser i området 17,2 – 17,9 Hz (snitt 17,6 Hz), med lav kompleksitet. Mange samsvarende resultater og lav kompleksitet indikerer at egenfrekvensen til dekket ligger rundt 17,6 Hz.

Tabell 5-7 viser de beregnede egenfrekvensene til det samme dekket. EK5-25 og ØNORM beregner en egenfrekvens på 14,7 Hz, mens H/R og SINTEF beregner en egenfrekvens på 12,26 Hz. H/R og SINTEF bruker kun det største spennvidden i beregningene og gir derfor en lavere egenfrekvens. EK5-25 og ØNORM tar hensyn til kontinuitet i beregningene, men finner likevel en lavere frekvens enn målingene.

Dynamisk E-modul øker stivheten i elementet og dermed egenfrekvensen. Ved bruk av målt egenfrekvens (17,6 Hz) i likning (2-3), blir den dynamiske E-modulen på 13 223 MPa. Ved bruk av dynamisk E-modulen i Vedlegg A, øker frekvensen til 15,4 Hz. Dynamisk E-modul bidrar derfor til at beregnet frekvens kommer nærmere den målte, men det konkluderes med at dynamisk E-modul alene ikke kan forklare forskjellen. Dynamisk E-modul blir derfor ikke benyttet i videre beregninger.

Formlene for utregning av frekvens tar utgangspunkt i et fritt opplagt dekke med kontinuerlig spenn. Den målte frekvensen er høyere enn beregningene, antageligvis gir KLT-veggene over og under dekket i oppleggene en liten fastholding, noe som gir en grad av innspenning i oppleggene, som i tillegg øker den målte frekvensen noe.

Testdag 2

Tabell 5-8 viser de målte egenfrekvensene og kompleksiteten til målingene. Frekvensene i oppsett 3.1 og 4.1 er resultatet av flere målinger med en referansesensor kombinert i OMA.

Tabell 5-8: Målt frekvens og tilhørende kompleksitet fra testdag 2 på Lund Torv [42].

Testmetode	Frekvens [Hz] og tilhørende kompleksitet [%]			
	Oppsett 1.2	Oppsett 2.2	Oppsett3.2	Oppsett 4.2
Gange	24,8 (6,63)	23,2 (11,14)		20,6 (0,84)
Heel-drop	23,0 (9,29)	23,0 (5,52)	29,0 (52,12)	20,4 (1,52)
Svakt slag	93,8 (3,98)	93,8 (3,98)		21,0 (0,78)
Heel-drop Leilighet B	37,2 (37,07)	23,0 (3,61)		
Heel-drop Leilighet C	36,8 (30,07)			
Heel-drop Korridor*				20,8 (0,39)

Tabell 5-9 viser teoretisk beregnede egenfrekvenser for dekket. I situasjon A antas det at de innvendige skilleveggene i testleiligheten ikke påvirker dekkets spenn, og dekket er beregnet som et kontinuerlig dekke over både testleiligheten og naboileiligheten. I situasjon B antas full støtte fra lettveggene. Situasjon B-1 angir spennvidder hvor dekket spenner kontinuerlig over de to soverommene i testleiligheten. I situasjon B-2 er veggen over badet før opp til taket og beregnet som et opplager, dermed er beregningene utført som et kontinuerlig dekke over kjøkkenet og badet. De teoretiske beregningene er gjort med Excel-arket i Vedlegg A.

Tabell 5-9: Beregnet frekvens, med og uten skjærdeformasjoner, testoppsett 1.2 og 2.2 og 4.2, Testdag 2 [42]

Situasjon	Testoppsett	L/t	Beregnet frekvens [Hz]			
			EK5-25	ØNORM	H/R	SINTEF
A		38,5	9,6 (8,9)	9,6 (8,9)	8,0	8,0
B						
	B-1	1.2 og 2.2	19,6	32,0 (25,7)	32,0 (25,7)	31,8
	B-2	4.2	27,8	20,3 (17,9)	20,3 (17,9)	15,3

Tabell 5-8 viser de målte frekvensene fra testdag 2, og viser større sprik i de målte verdiene enn hva som var tilfellet med testdag 1 vist i Tabell 5-6.

Testoppsett 1.2 og 2.2

For testoppsett 1 og 2 peker frekvensene fra testmetode «heel-drop» og «gange», seg ut som en gruppe med like verdier. Frekvensene ligger i området 23,0 – 24,8 Hz (snitt 23,5 Hz), og med kompleksitet mellom 5,5 – 11,1 %, hvilket er et akseptabelt nivå. Ved testmetode «svakt slag» er det ved begge oppsettene målt frekvens på 93,8 Hz med kompleksitet på 4,0 %. Her er det to målinger som peker mot en annen egenfrekvens og med lavere kompleksitet enn testmetode «gange» og «heel-drop».

Dekket består av KLT-element med 70 mm trinnlydsplate og 60 mm påstøp. Formålet med trinnlydsplaten er å dempe vibrasjoner fra fottrinn. På grunn av funnet med ulike frekvenser med de ulike metodene er det usikkert om de målte frekvenser hører til dekkets vibrasjoner, eller om vibrasjonene stammer fra påstøpen.

Videre i Tabell 5-8 kan man se målt egenfrekvens fra testmetode «heel-drop» utført i naboleilighetene. For oppsett 1.2 gir det resultater på ca. 37,2 Hz og 36,8 Hz, med kompleksitet på 37 % og 30 %, noe som betyr forholdsvis høy usikkerhet. Videre gir «heel-drop» i naboleilighet i oppsett 2.2 en egenfrekvens på 23 Hz, og lav kompleksitet med 3,6 %. Denne frekvensen sammenfaller godt med frekvensene funnet for «gange» og «heel-drop» gjort i leiligheten. KLT-elementet er kontinuerlig fra testleiligheten til naboleiligheten. Dette tyder på at disse vibrasjonene må stamme fra KLT-dekket, og ikke kun tilhører påstøpen. Det kan derfor antas at de målte frekvensene på ca. 23,7 Hz må tilhøre systemets egenfrekvens.

I sammenheng med at «svakt slag» også ved testdag 1 gav noen utfordringer med å fremkalle egenfrekvensen er en antakelse at frekvensen på 93,8 Hz kan knyttes til påstøpens egenfrekvens, men det er ikke tilstrekkelig med målinger til å konkludere dette.

Testoppsett 3.2

Resultatet for egenfrekvens ved oppsett 3.2 presentert i Tabell 5-8 viser en egenfrekvens på 29 Hz. Den høye kompleksiteten på 52,1 % gir indikasjoner på stor usikkerhet. Figur 4-22 viser at testoppsett 3.2 i praksis ligger i tre ulike rom, hvor flere sensorer ligger tett inntil vegger. Den totale vurderingen av en frekvens som ikke harmonerer med andre verdier, målingens kompleksitet og testoppsettets kompleksitet gjør at denne frekvensen blir sett på som svært usikker. Verdien blir derfor ikke benyttet i videre beregninger eller sammenligninger.

Testoppsett 4.2

Oppsett 4.2 i Tabell 5-8 viser at målt egenfrekvens ligger i området 20,4 – 21,0 Hz (snitt 20,7 Hz). Kompleksiteten på målingene er lav og varierer mellom 0,4 % og 1,5 %. Figur 4-23 viser at akselerometrene ved oppsett 4.2 er plassert i samme rom, og ikke er påvirket av lettvegger som i oppsett 1.2 – 3.2. De målte verdiene for oppsett 4.2 samsvarer godt og har lav kompleksitet, noe som gir gode indikasjoner på at kjøkkengulvets egenfrekvens er omtrent 20,7 Hz.

Teoretiske beregninger av frekvens

Tabell 5-9 viser teoretisk beregnede egenfrekvenser etter ulike situasjoner. Situasjon A viser beregnet egenfrekvens uten påvirkning fra lettvegger og bruker samme spennvidder som ved testdag

1. Ved testdag 2 er det i tillegg medregnet påstøp hvilken er forutsatt kontinuerlig, og ikke brutt av lettvegger.

Situasjon A viser en beregnet frekvens på 9,7 Hz etter EK5-25 og ØNORM, mens H/R og SINTEF beregner egenfrekvensen til 8,0 Hz. H/R og SINTEF tar ikke hensyn til kontinuerlige spenn i beregningene og beregner derfor en lavere egenfrekvens enn EK5-25 og ØNORM.

Ved situasjon A viser kontrollformelen for skjærdeformasjoner: $L/t = 4620\text{mm}/120\text{ mm} = 38,5$. L/t er altså større enn 30 og det er i henhold til kontrollformelen ikke nødvendig å ta hensyn til skjærdeformasjoner i beregningene. Dersom man likevel tar med skjærdeformasjon i beregningene blir ny beregnet frekvens 8,9 Hz.

Situasjon B-1 beregner frekvens for et kontinuerlig dekke som spenner over de to soverommene i testleiligheten tilsvarende testoppsett 1.2 og 2.2 vist i Figur 4-17. EK5-25 og ØNORM beregner frekvensen til 32,0 Hz mens H/R og SINTEF beregner 31,8 Hz. L/T er mindre enn 30, som anbefaler å ta hensyn til skjærdeformasjoner.

Ved å medta skjærdeformasjon reduseres beregnet frekvens etter EK5-25 og ØNORM til 25,7 Hz.

Situasjon B-2 beregner et kontinuerlig dekke over kjøkkenet og badet. Tilsvarende testoppsett 4.2. Det gir etter EK5-25 og ØNORM en beregnet frekvens på 20,3 Hz. H/R og SINTEF beregner 15,3 Hz. Kontrollformelen for skjærdeformasjoner gir $L/t < 30$, skjærdeformasjon anbefales medtatt. Ved å ta med skjærdeformasjon blir beregnet frekvens 17,88 Hz.

I EK5-25 åpnes det for at den tilsynelatende stivhet kan assosieres med den effektive stivhet, slik at skjærdeformasjoner kan utelates i beregningene. Sammenhengen for beregningene i Tabell 5-9 viser at skjærdeformasjoner har liten innvirkning ved lave frekvenser og større innvirkning ved høye frekvenser. Dette innebærer at ved høye frekvenser, hvor innvirkningen er betydelig, vil det likevel ikke påvirke utfallet i henhold til grenseverdiene i vibrasjonsberegningene. Dette kan være en årsak til at EK5-25 fastslår at det ikke er nødvendig å ta hensyn til skjærdeformasjoner.

Sammenligning av målinger og beregninger av frekvens

Målinger av frekvens, vist i Tabell 5-8, er utført på et dekke med kontinuerlig spenn. For teoretiske beregninger tar både EK5-25 og ØNORM høyde for kontinuerlige spenn i beregningen. Derfor blir kun EK5-25 omtalt videre i sammenligningen mellom målt frekvens og teoretisk beregnet frekvens.

Testoppsett 1.2 og 2.2 viser en målt egenfrekvens på ca. 23,5 Hz. Teoretisk beregnet frekvens for samme oppsett (situasjon B-1) er 32,0 Hz uten å hensynta skjærdeformasjoner og 25,7 Hz inkludert skjærdeformasjoner. Dette viser at beregnet frekvens er nær den målte frekvensen ved å bruke soverommens spennvidder, til tross for at veggen er en lettvegg.

Et usikkerhetsmoment ved disse beregningene, er at beregnet frekvens er høyere enn målt frekvens. Tidligere har beregninger ofte vist seg å være konservative, og gi en lavere frekvens enn hva man finner ved målinger.

I dette tilfellet kan det skyldes at denne beregningen er gjort på et kontinuerlig dekke som spenner over soverom 1 og soverom 2. Frekvensformelen beregner egenfrekvensen for det største spennet, som i dette eksempelet er soverom 1. I praksis strekker dekket seg også kontinuerlig fra soverom 1

og inn i naboileiligheten, hvor spennet er større. Ved å bruke Excel-arket i Vedlegg A til å beregne frekvens for et kontinuerlig dekke med spennvidde på henholdsvis 3,3 m og 2,35 m for naboileiligheten og soverom 1, inkludert påstøp og skjærdeformasjoner, oppnås en frekvens på 16,5 Hz. Frekvensen beregnes igjen for det største spennet, som nå gjelder naboileiligheten.

Frekvensen i soverom 1 er beregnet til 25,7 Hz uten å ta hensyn til påvirkning fra kontinuerlig spenn mot naboileiligheten. I tillegg er frekvensen i naboileiligheten beregnet til 16,6 Hz. Det er derfor sannsynlig at den målte frekvensen ligger mellom disse verdiene.

I bygningsmessig sammenheng har naboileiligheten det største spennet og den laveste egenfrekvensen som blir dimensjonerende for vibrasjoner. Frekvensformelen beregner egenfrekvens for det største spennet, og det viser seg vanskelig å beregne egenfrekvens på det målte gulvet i soverom 1 på grunn av rammebetingelsene.

Videre viser Tabell 5-8 en målt egenfrekvens ved oppsett 4.2 på ca. 20,7 Hz. Tabell 5-9 viser en beregnet egenfrekvens på 20,3 Hz uten å inkludere skjærdeformasjoner. Forholdet L/t er i dette tilfellet $27,8 < 30$, og ved å inkludere skjær, som anbefales, beregnes egenfrekvensen til 17,9 Hz. Den beregnede frekvensen samsvarer godt med målingen uten skjærdeformasjoner, mens med skjærdeformasjoner blir den beregnede frekvensen noe lavere enn målingene.

Som Figur 4-23 viser er sensorene for testoppsett 4.2 plassert på det samme spennet, uten oppdeling av lettvegger, som var tilfellet for oppsett 1.2 og 2.2. Dette resulterer i en mer samlet måling med lavere kompleksitet. Oppsettet samsvarer også bedre med formlenes betraktning i EK5-25 om et kontinuerlig dekke, der spennviddene er 3,35 m og 1,26 m for henholdsvis kjøkken og badrom. Målingen ble utført på det største spennet, noe som gir den laveste frekvensen, i tråd med formelens intensjon.

Oppsummering

For et KLT-dekke med påstøp kan valg av testmetode se ut til å ha en del å bety. Testmetoden med «svakt slag» gir utydelige resultater som ikke kan knyttes direkte til dekkets egenfrekvens. En mulig årsak kan være at KLT-dekket med påstøp har en høyere masse enn før påstøpen ble tilført. Det betyr at det trengs større krefter for å skape svingninger i dekket. Ved å bruke testmetoden «svakt slag» påføres en kraft som er for liten til å fremkalle dekkets egenfrekvens.

Beregnet frekvens ser ut til å samsvare godt med målinger av frekvens. Frekvensformelen virker noe konservativ ved at den stort sett beregner noe lavere frekvens enn det som ble funnet som dekkets egenfrekvens. Dette kan skyldes at det ved oppleggene finnes en grad av innspenning som er vanskelig å tallfeste.

Lettveggene i testleiligheten er ikke lastbærende. Likevel viser sammenligningene at målinger og beregninger stemmer best når spennviddene til det nye oppsettet brukes. Dette antyder at selv om veggene ikke har konstruksjonsmessig stivhet, kan vibrasjoner beregnes med full stivhet fra lettvegger. Et viktig forhold er at veggene som skiller soverommene i testleiligheten også er plassert på samme sted i leiligheten under. Effekten betinger at veggene ikke flyttes. For studentboligene ved Lund Torv er rominndelingen permanent, siden påstøpen brytes av veggene, og endring krever ny påstøp.

5.3.3. Damping

Tabell 5-10 viser et utdrag av beregnede dempingsverdier basert på målinger av KLT-dekke på testdag 1. Verdiene er differensiert etter testoppsett og metode. Fullstendige resultater for damping finnes i Vedlegg C.

Tabell 5-10: Utdrag av dempingsverdier beregnet for ubehandlet KLT-dekke fra testdag 1 ved Lund Torv [42].

Oppsett	Metode	Damping [%]
1.1	Gange ^a	3,7
	Heel-drop	4,2
2.1	Gange	3,3
	Heel-drop	4,3
3.1	Heel-drop ^b	4,2
4.1	Gange	(5,8) ^c
	Heel-drop	–
Gjennomsnitt		4,0
^a Tallene er hentet fra måling 3. ^b Gjennomsnitt av tre målinger. ^c Det er valgt å utelate oppsett 4.1 gange fra gjennomsnittet pga. forstyrrelser fra baderomskabin.		

Tabell 5-11 viser et utdrag av beregnede dempingsverdier basert på målinger av KLT-dekke på testdag 2. Verdiene er differensiert etter testoppsett og metode. Fullstendige resultater for damping finnes i Vedlegg C.

Tabell 5-11: Utdrag fra dempingsverdier beregnet for KLT-dekke med påstøp fra testdag 2 [42].

Oppsett	Metode	Dempingsverdier [%]
1.2	Gange	5,0
	Heel-drop	6,2
2.2	Gange	5,8
	Heel-drop	(9,0) ^a
3.2	Heel-drop	– ^b
4.2	Gange	5,8
	Heel-drop	5,7
Gjennomsnitt		5,7
^a Det er valgt å utelate oppsett 2.2 Heel-drop fra gjennomsnittet pga. forstyrrelser i målingen. ^b Ikke mulig å hente damping-		

Testdag 1

Tabell 5-10 viser gjennomsnittlige dempingsverdier basert på målinger utført på Lund Torv testdag 1, differensiert etter de ulike testoppsett og metoder. Oppsettene fra dag 1 viser demping i området 3,3 – 4,3 %, med unntak av oppsett 4.1 som viser 5,8 % demping. Ved oppsett 4.1 var det utfordrende å finne frie svingninger for å avlese akselerasjonsverdier til beregning av demping. Ved testmetode «heel-drop» var måledataene for utydelige til å lese av akselerasjonsverdier og beregne demping, mens ved «gange» er verdien svært høy. Det vurderes at baderomskabinen kan ha et energiopptak som forstyrrer målingene. Dempingsverdien på 5,8 % avviker betydelig både fra 2,5 % som er anbefalingen i EK5-25 og de øvrige resultatene. Dette resultatet ble derfor forkastet.

Sammenligning av testoppsettene fra testdag 1 indikerer at dempingsverdiene er like, uavhengig av plasseringen på gulvet. Videre viser sammenligningen av dempingsverdiene basert på testmetode at «heel-drop» gir noe høyere demping enn «gange».

En forklaring på funnet om at demping påvirkes av testmetode kan forklares med at «heel-drop» skaper større svingninger i dekket, i tillegg blir testpersonen stående på samme sted gjennom forsøket. Det medfører at testpersonen «svinger i takt med dekket» i større grad enn ved bruk av metoden «gange», hvor personen beveger seg. Den økte dempingsverdien kan skyldes at testpersonen har en annen egenfrekvens enn gulvet. Ulikheten kan gi et energiopptak og tilfører på den måten ekstra demping til systemet.

Gjennomsnittlig funnet dempingsverdi er 4 % for rått KLT-dekke. Til sammenligning anbefaler EK5-25 og ØNORM 2,5 % demping, mens H/R anbefaler 1 % for KLT-dekker uten påstøp. Lund Torv viser en høyere dempingsverdi enn disse anbefalingene. En forklaring på den økte dempingsverdien i forhold til anbefalingene, kan skyldes at det brukes XYLOFON[71] mellom elementene i knutepunkter for å begrense lydsmitte. Formålet med XYLOFON er å dempe vibrasjoner fra lyd, det er derfor tenkelig at det også kan dempe vibrasjoner fra fottrinn.

Funnene ved Lund Torv viser 4 % demping for KLT-dekket. Det kan tyde på at de teoretiske beregningsmetodene er konservative og legger seg på sikker side. Samtidig vil den faktiske dempingen kunne variere fra bygg til bygg, avhengig av hvilke løsninger som benyttes.

Testdag 2

Ved testdag 2 var det bygget vegger som deler inn rommene og støpt påstøp på gulv. På soverom 1 og på kjøkkenet var det også lagt gulvbelegg.

Tabell 5-11 viser at dempingsverdiene har økt fra testdag 1. På testdag 2 er det lite variasjoner for gulvene, med unntak av «heel-drop» for testoppsett 2.2, som gir en verdi på 9 %. Årsaken til denne verdien er uklar. Og det er vanskelig å finne en forklaring på verdien. Grunnet usikkerhet rundt målingen, og stort avvik fra de andre måleresultatene, og anbefalt verdi er denne verdien valgt å forkastes.

For testoppsett 3.2 var det ikke mulig fra å beregne demping fordi det ikke lot seg gjøre å finne frie svingninger. Figur 4-22 viser at testoppsettet i praksis ligger i tre ulike rom og fire ulike spennlengder.

Som beskrevet i kapittelet «Eigenfrekvens» var det også utfordrende å finne frekvens for dette testoppsettet.

Funnet av at «heel-drop» gir større demping enn «gange», gjentar seg ved testdag 2 i oppsett 1.2. For oppsett 4.2 er resultatet motsatt, og ved oppsett 2.2 forkastes sammenligningsgrunnlaget, noe som gjør sammenhengen mer uklar. Det kan forklares med at trinnlydsplater og påstøp på dekket bidrar til større masse, og testpersonens vekt vil ha mindre innflytelse på et tyngre dekke.

Testoppsettene fra dag 2 viser dempingsverdier i området 5,0-6,2 %, med gjennomsnitt 5,7 % ved å utelukke den forkastede verdien.

EK5-25 [52] anbefaler henholdsvis 2,5 % og 4 % demping for rått KLT-dekke, og KLT-dekke med påstøp. Målingene fra testdag 1 og testdag 2 viser et gjennomsnitt på 4 % og 5,7 % for de samme tilfellene. I sammenheng med målingene viser det at EK5-25s verdier for demping er konservative, da alle dempingsverdiene i Tabell 5-10 og Tabell 5-11 større enn anbefalingene.

5.3.4. Hastighetsmålinger

Verdiene fra målingene på testdag 1, samt de teoretisk beregnede v_{rms} -verdiene, er presentert i Tabell 5-12. Tabellen inkluderer også tidspunktet for målingene. Av de to beregnede verdiene er den første basert på anbefalingene fra EK5-25 [52], mens den andre er justert for testpersonens vekt og faktisk demping, men uten å ta hensyn til skjærdeformasjoner.

Tabell 5-12: Målte og beregnede hastighetsverdier v_{rms} for testmetode «gange» – testdag 1, Lund Torv [42]

Oppsett	Målt hastighet		Beregnet hastighet etter EK5-25	
	Tidspunkt [s]	v_{rms} [m/s]	Anbefalt	Faktiske verdier
			v_{rms} [m/s] Person 70 [kg] ζ 2,5 [%]	v_{rms} [m/s] Person 94 [kg] ζ 4 [%]
1.1	1,8 – 21,3	0,00097	0,00156	0,00123
2.1	1,9 – 14,2	0,00103	0,00156	0,00123
4.1-1	21,2 – 29,2	0,00099	0,00156	0,00123
4.1-2	25,2 – 31,3	0,00098	0,00156	0,00123

Verdiene fra målingene på testdag 2, samt de teoretisk beregnede v_{rms} -verdiene, er presentert i Tabell 5-13. Tabellen inkluderer også tidspunktet for målingene. Av de to beregnede verdiene er den første basert på anbefalingene i EK5-25 [52], mens den andre er justert for testpersonens vekt, faktisk demping og skjærdeformasjoner.

Tabell 5-13 Målte og beregnede hastighetsverdier v_{rms} for testmetode «gange» – testdag 2 ved Lund Torv [42].

Oppsett	Målt hastighet		Beregnet hastighet etter EK5-25	
	Tidspunkt [s]	v_{rms} [m/s]	Anbefalt	Faktiske verdier
			v_{rms} [m/s] Person 70 [kg] ζ 4 [%]	v_{rms} [m/s] Person 94 [kg] ζ 5,7 [%] m/Skjærdeform.
1.2	13,0 – 22,2	0,00034	0,00032	0,00037
2.2	37,6 – 45,6	0,00023	0,00032	0,00037
4.2-1	15,5 – 22,6	0,00038	0,00065	0,00059
4.2-2	15,2 – 21,8	0,00028	0,00065	0,00059

Tabell 5-12 viser resultatene fra målingene utført på testdag 1, med tilhørende beregninger. Målingene viser at de høyeste hastighetsverdiene er registrerte av akselerometrene plassert midt i spennet. Videre er hastighetene for de ulike oppsettene tilnærmet like, noe som styrker målingenes pålitelighet. Sammenlignet med anbefalingene i EK5-25 [52], gir beregningene høyere verdier enn målingene. Når de teoretiske beregningene justeres med faktiske verdier for demping og testpersonens masse, reduseres avviket, og resultatene samsvarer godt med målingene. Skjærdeformasjon er ikke tatt med i beregningene, ettersom spennet er så langt at denne effekten blir ubetydelig fra likning (2-2).

Tabell 5-13 viser hastighetsmålingene utført på testdag 2 med tilhørende beregninger. Oppsett 1.2 og 2.2 ble gjennomført med akselerometre plassert i begge soverom. For oppsett 1.2 viser resultatene at den høyeste hastighetsverdien ble registrert av akselerometeret nærmest skilleveggen – et uventet funn som er vanskelig å forklare. I oppsett 2.2 målte akselerometeret plassert midt i soverom 1 den største hastigheten.

De beregnede verdiene i henhold til EK5-25 [52] stemmer i stor grad overens med de målte dataene. Avviket øker når beregningene justeres med de faktiske verdier som demping og testpersonens masse samt skjærdeformasjoner. Dette skyldes at skjærdeformasjon er inkludert i de faktiske beregningene og har større innvirkning på resultatene enn både demping og vekt. Likevel er forskjellene relativt små, og de samlede resultatene vurderes som godt samsvarende.

Oppsett 4.2 ble på testdag 2 gjennomført på kjøkkenet. På testdag 2 ble det definert et nytt system for spennvidder som tok hensyn til effekten av veggen over baderomskabinen. Akselerometrene var plassert med samme posisjon som på testdag 1, med en referansesensor plassert foran baderomskabinen, se Figur 4-23. Som følge av dette ble ingen akselerometre plassert midt i spennet hvor største hastighet normalt opptrer. Målingene viser noe lavere hastighetsverdier enn de som er beregnet i henhold til EK5-25 [52]. I motsetning til målingene i soverommet er det i dette tilfellet beregningen etter EK5-25 som gir den høyeste hastighetsverdien. Dette støtter antakelsen om at skjærdeformasjoner har større innvirkning ved korte spenn.

Generelt viser beregningene etter EK5-25 [52] høyere hastighetsverdier enn målingene. Nøyaktigheten øker imidlertid når beregningene justeres for faktorer som demping, testpersonens masse og eventuell skjærdeformasjon. Analysen av de ulike rommene viser at skjærdeformasjon blir en dominerende faktor ved korte spenn, og har større innvirkning enn både demping og masse.

5.3.5. Frekvensmålinger med telefoner

Det ble ved testdag 1 og 2 på Lund Torv gjort sammenligning mellom målinger utført med Brüel & Kjær sine akselerometre og tre mobiltelefoner med Phyphox appen installert. Forsøkene ble først og fremst utført for å avklare om telefoner med app kan være et troverdig verktøy for å anslå frekvenser for KLT-dekker. Siden det ble benyttet mobiltelefoner av ulike fabrikat og årgang var det også noen forskjeller som dukket opp. Mest synlig var det at Iphone 13 hadde en øvre grense for måling av frekvens på 50 Hz. Denne kunne ikke endres i innstillingene, men siden verdier over 50 Hz uansett ble betraktet som urealistiske for fundamentalfrekvensen til dette systemet, ble dette ikke problematisert.

Testdag 1

Tabell 5-14 viser resultatene fra frekvensmålinger på Lund Torv gjort på testdag 1. På grunn av utfordringer med å få startet målinger på tre telefoner samtidig er det enkelte målinger som ikke har blitt registrert. Målinger som ikke ble registrert er merket med X. De umerkede rutene tilsier at de respektive testmetodene ikke er utført.

Tabell 5-14: Frekvensmåling med mobiltelefoner testdag 1 på Lund Torv sammenlignet med resultatene fra akselerometre [34].

	Måleinstrument	Frekvens [Hz]		
		Gange	Heel-drop	Svakt slag
Oppsett 1.1	Akselerometer	17,5	17,9	17,7
	Samsung S22	18,1	17,5	43,0
	Samsung A52	19,6	X	135,6
	Iphone 13	17,7	18,1	44,1
Oppsett 2.1	Akselerometer	17,7	17,5	17,9
	Samsung S22	18,1	17,9	X
	Samsung A52	18,7	18,1	17,7
	Iphone 13	17,9	17,6	17,7
Oppsett 3.1	Akselerometer ^a		17,4	
	Samsung S22		16,8 17,4 17,7	
	Samsung A52		17,7 17,9 17,7	
	Iphone 13		X	
Oppsett 4.1	Akselerometer	23,4	17,2	56,7
	Samsung S22	28,0 X	17,4 9,5	109,3 147,3

	Samsung A52	28,1 21,5	18,7 16,5	108,8 42,2
	Iphone 13	23,4 28,0	27,9 21,5	4,5 18,2

^a Oppsett 3 består av tre målinger hvor gjennomsnittet er presentert i tabellen

Testdag 2

Tabell 5-15 viser resultater av frekvensmålinger gjort med mobiltelefoner ved testdag 2. De umerkede rutene tilsier at de respektive testmetodene ikke er utført.

Tabell 5-15: Frekvensmåling med mobiltelefoner testdag 2 på Lund Torv sammenlignet med resultatene fra akselerometre [42].

	Måleinstrument	Frekvens [Hz]		
		Gange	Heel-drop	Svakt slag
Oppsett 1.2	Akselerometer	24,8	23	93,8
	Samsung S22	26,1	11,2	95,3
	Samsung A52	24,6	8,8	92,4
	Iphone 13	29,4	14,9	41,1
Oppsett 2.2	Akselerometer	23,2	23	93,8
	Samsung S22	27,6	150,2	106,2
	Samsung A52	25,7	22,7	98,2
	Iphone 13	26,0	17,6	37,1
Oppsett 3.2	Akselerometer ^a		29,0	
	Samsung S22		15,2 21,8 X	
	Samsung A52		14,8 24,5 19,6	
	Iphone 13		22,3 19,6 23,3	
Oppsett 4.2	Akselerometer	20,6	20,4	21,0
	Samsung S22	21,0 20,7	20,7 150,1	154,7 155,4
	Samsung A52	23,3 21,1	20,1 20,7	6,4 155,0
	Iphone 13	20,9 20,6	22,9 18,4	21,7 20,5

^a Oppsett 3 består av tre målinger hvor gjennomsnittet er presentert i tabellen

Testdag 1

Troverdigheten til frekvens målingene utført med Phyphox appen blir i Tabell 5-14 sammenlignet med målingene fra akselerometrene til Brüel & Kjær for testdag 1.

Oppsett 1.1 viser stor likhet mellom akselerometre og alle telefoner med Phyphox appen ved testmetodene for «heel-drop» og «gange». Derimot er forskjellene større når testmetode «svakt slag» benyttes. Hva som forårsaker dette er uvisst, men en forstyrrende faktor kan være at det ble utført arbeid med slagdrill i underetasjen. I og med at et «svakt slag» gir mindre svingninger i dekket enn «gange» og «heel-drop» kan det ikke utelukkes at vibrerende verktøy kan ha en innvirkning.

Mobiltelefonene ble for oppsett 1.1 plassert i det midterste KLT-elementet og i elementets senter både sideveis og i lengderetningen. Ved testing ble det vurdert at mobiltelefonene som ble brukt, burde vendes med skjermen ned. Det ble også vurdert at telefonene ikke skulle legges over elementenes bordskjøt, endringene ble fulgt etter oppsett 1.1.

Ved oppsett 2.1 stemmer målingene med akselerometre overens med målinger med telefonene, inkludert «svakt slag». Målingene med telefonene ble utført rett ved siden av den langsgående element skjøten i senter av rommet.

Ved oppsett 3.1 ble det kun gjennomført testmetode «heel-drop». Resultater viser stor likhet mellom verdiene fra akselerometrene og Phyphox appen. For Phyphox appen samsvarer målingene med oppsett 1.1, hvilket gir god mening da plasseringen av telefonene er den samme. Verifiseringen angir ett godt bilde av egenfrekvensen til det midterste element ved bruk av telefonene med Phyphox appen, det samsvarer også med målingene fra akselerometrene.

Resultatene fra oppsett 4.1 gir mer varierende resultater i forhold til de resterende oppsettene på testdag 1. Ved metoden «svakt slag» resulterer det i en veldig høy frekvens i forhold til øvrige resultater. Denne virker lite troverdig for gulvets fundamentalfrekvens, men i og med at både Brüel & Kjær, Samsung Galaxy S22 og A52 får samme verdi ved oppsett 4.1 på ca. 108 Hz, kan det tenkes at verdien er frekvensen for en annen svingemodus.

Overordnet for rått KLT-dekke samsvarer telefonene meget godt med målingene fra akselerometrene til Brüel & Kjær ved testmetodene «gange» og «heel-drop». Ved testmetoden «svakt slag» varierer resultatene mer og de må tolkes i sammenligning med akselerometrene.

Testdag 2

Tabell 5-15 viser resultatene fra testdag 2. For samtlige oppsett ble telefonene plassert på samme måte som under testdag 1. For oppsett 1.2, 2.2 og 3.2 innebærer dette at telefonene ble plassert tett inntil skillevegger som ble montert etter testdag 1.

Oppsett 1.2 viser forholdsvis like resultater fra akselerometrene til Brüel & Kjær og telefonene sine målinger ved testmetodene «gange» og «svakt slag». Derimot gir testmetode «heel-drop» et større avvik. «Svakt slag» har en urealistisk frekvens i forhold til systemet, men med alle likhetene fra de forskjellige måleinstrumentene er det nærliggende å tro at en frekvens fra en annen svingemodus er fremtredende.

Ved oppsett 2.2 «gange» viser målingene fra alle telefonene noe høyere verdi enn akselerometrene. Målingene for «heel-drop» finner tre forskjellige verdier, hvor den ene dog stemmer godt overens med målingene fra akselerometrene. Resultatene fra «svakt slag» har store variasjoner og kan vanskelig sammenlignes, men det kan være andre svingemoder som inntreffer.

Ved oppsett 3.2 er det kun testmetode «heel-drop» som er benyttet. Telefonene er plassert på samme sted som i oppsett 1.2. Brüel & Kjær sine akselerometre er plassert som ved oppsett 3.1, dette gjør at akselerometrene er plassert i begge soverom samt på utsiden av den tverrgående vegg mot soverommene. Målingene fra telefoner og målinger fra akselerometre samsvarer dårlig. Dette kan antakelig forklares med at telefonene kun ligger i det ene rommet, mens akselerometrene er plassert i tre rom med skillevegger mellom seg. Det blir derfor vurdert at målingene ikke er brukbare.

Telefonene er for oppsett 4.2 plassert likt som på testdag 1. Målingene for telefonene har store likheter for «gange» og «Heel-drop», med et par målinger som stikker seg ut. Målingene samsvarer i tillegg godt med resultatene fra akselerometrene til Brüel & Kjær. Iphone 13 som kun måler til 50 Hz har også like målinger med akselerometrene for «svakt slag», derimot hvor de to andre telefonene måler markant høyere frekvens for denne test.

Sammenligningen mellom resultatene til telefonene og resultatene til akselerometrene fra Brüel & Kjær er ved testdag 2 mindre tydelige enn ved testdag 1. Dette gjelder spesielt ved oppsettene hvor akselerometrene er plassert i flere rom, mens telefonene ligger i samme rom. Ved oppsett 4.2 hvor telefoner og akselerometre er plassert i samme rom er det til gjengjeld stor likhet i resultatene.

5.4. Samfunnsperspektiv

Dagens EK5 omhandler i hovedsak konstruksjonstre og limtre, og gir lite eller ingen direkte veiledning for prosjektering av moderne trekonstruksjoner som massivtreelementer og I-bjelker [5]. Bruken av slike elementer har imidlertid økt betydelig de siste årene i Norge [72]. I Norge er det en tydelig økning i bruken av massivtre i boligblokker, skoler og næringsbygg, blant annet som følge av politiske ambisjoner og teknologiske fremskritt.

På grunn av manglende felles prosjekteringsstandarder benyttes det i dag ulike beregningsmetoder og nasjonale tilnærminger for massivtre, inkludert ØNORM, H/R og produsentspesifikke metoder. Dette fører til variasjon i beregningsforutsetninger, behov for leverandørgodkjenninger og økt kompleksitet i prosjekteringsarbeidet. Det kan også skape redusert fleksibilitet i planlegging og bygging.

SINTEF har gitt ut enkelte anbefalinger for bruk av massivtre, men disse viser i stor grad til overordnede prinsipper eller andre standarder [4]. Det gjør dem mindre praktiske i prosjekteringsfasen, og erfaringer tilsier at de sjelden brukes som primærkilde i dagens prosjekter.

Erfaring gjort i denne rapporten viser at massivtrekonstruksjoner som beregnes etter den kommende EK5-25 ofte klassifiseres mindre konservativt enn ved bruk av dagens beregningsmetoder. Årsaken er blant annet at EK5-25 åpner for optimaliserte beregninger samt justerte grenseverdier.

Dette gir flere fordeler: mindre dimensjoner, lavere materialforbruk, redusert CO₂-utslipp og lavere byggekostnader – uten å gå på kompromiss med funksjon og sikkerhet. Dette er særlig gunstig i større bygg, som boligblokker, hvor både effektiv arealbruk og lange spenn er avgjørende.

En harmonisering av regelverket gjennom EK5-25 legger til rette for felles europeiske rammer for prosjektering, som gjør det lettere å sammenligne løsninger, utvikle referansedatabaser og stimulere til kunnskapsdeling. På systemnivå kan dette bidra til økt innovasjon, raskere bygging og styrket konkurransekraft for treindustrien – viktige faktorer i det grønne skiftet og utviklingen av en bærekraftig byggenæring i Europa og Norge spesielt.

Erfaringer fra prosjektet Lund Torv illustrerer ytterligere dimensjoner ved samfunnsperspektivet: Her ble massivtreelementene levert fra Sverige. Ifølge prosjektledelsen ble det vurdert at dersom disse måtte leveres fra Østerrike – en av verdens største produsenter – ville klimagassregnskapet ikke være konkurransedyktig sammenlignet med prefabrikkerte betongelementer produsert lokalt. Dette understreker betydningen av kortreiste materialer og logistikkens rolle i både kostnadsregnskapet og i livsløpsanalyser (LCA), hvor transport står for en stor andel av klimagassutslippene.

Dette eksemplet viser behovet for å styrke lokal produksjon og verdikjeder for massivtre. Norge har et uutnyttet potensial for økt foredling av trevirke [73]. Å utvikle en nasjonal treindustri som støtter lokal massivtreproduksjon vil ikke bare styrke den grønne omstillingen, men også bidra til regional verdiskaping og økt forsyningssikkerhet.

Videre må byggekostnader vurderes i et livsløpsperspektiv (LCC), og ikke bare ved oppføring. Trekonstruksjoner, særlig massivtre, har kortere byggetid enn betong og stål – noe som gir betydelige besparelser i arbeidskostnader, rigg og drift [74]. I tillegg krever massivtre enklere fundamentering, noe som f.eks. kan føre til redusert bruk av peler [75].

På grunn av lav egenvekt egner KLT-elementer seg godt til påbygg på eksisterende bygg, og kan bidra til å forlenge levetiden til eldre konstruksjoner [75]. Det gir en mulighet til å bevare og transformere fremfor å rive og bygge nytt – en strategi som er vesentlig for å redusere utslipp [76]. Det mest CO₂-besparende tiltaket i byggesektoren er å bevare eksisterende bygningsmasse.

Massivtre er også gunstig i ombruksperspektiv [77]. Til forskjell fra betong, som har høye produksjonsutslipp og lav ombruksevne, fungerer tre som karbonlager gjennom hele levetiden. Når trekonstruksjoner gjenbrukes eller bevares, blir denne bindingen videreført, noe som ytterligere forsterker treets rolle i klimastrategien.

Norge har forpliktet seg til å redusere sine klimagassutslipp med minst 55 % innen 2030 (i forhold til 1990-nivå) og har i klimaloven satt et mål om å bli et lavutslippssamfunn innen 2050 [1]. For å nå dette målet må byggebransjen transformeres.

EK5-25 er med til å fremme mulighetene for økt bruk av tre i byggebransjen.

Bruk av tre – særlig lokalt produsert massivtre – fremstår som et strategisk viktig tiltak for å redusere utslipp, øke graden av sirkulærøkonomi og stimulere til industriutvikling.

5.5. Svakheter/begrensninger

- Akselerometerene ble plassert «etter beste evne» på testdag 1. Ved bedre tid i forkant av Testdag 1 burde vi gjort oss kjent med plantegninger, og plassert akselerometrene mer strategisk i forhold til endelig romløsning. På testdag 2 ble det valgt de samme plasseringene på akselerometrene som ved testdag 1 for å kontrollere de samme punktene, men hvor enkelte plasseringer måtte justeres noe pga. konflikt med lettvegger. Det kunne gjerne vært gjort noen flere målinger for å kontrollere ny rominndeling.
- Det var ikke mulighet for å utføre nedbøyningsmålinger for testdag 2, da det var montert gipshimlinger i leilighetene.
- Målinger utført på Lund Torv er utført på en byggeplass «med full drift». Pågående arbeider kan ha ført til rystelser i bygget, noe som kan ha påvirket måleresultater.
- Fuktmålinger utført på testdag 1 viste et fuktinnhold på 17 – 26 %, med hyppigste forekommende verdi på 19 % på oversiden, og 15 % på undersiden av dekket. Det er valgt å neglisjere differansen mellom målt fuktinnhold og for karakteristiske verdier som beregnes ved fuktinnhold på ca. 12 %.

6. Konklusjon

Hvordan påvirker vibrasjonskriteriene i den nye generasjonen Eurokode 5 dimensjonering av KLT-dekker?

Vibrasjonskriteriene i den nye generasjonen Eurokode 5 (EK5-25) har betydelig innvirkning på dimensjoneringen av KLT-dekker. Den inkluderer spesifikke regler og beregningsmetoder som tidligere ikke var dekket i gjeldende EK5. EK5-25 er mer åpen og transparent i vibrasjonsberegninger. EK5-25 definerer tydelige ytelsesklasser med krav til egenfrekvens, nedbøyning, akselerasjon og hastighet, noe som bidrar til mer presise og konsistente vurderinger.

Hvordan skiller kravene til vibrasjon i den nye generasjonen Eurokode 5 seg fra dagens regelverk og standarder for KLT-dekker?

- Dagens regelverk inkluderer ikke massivtre. Metodene er ellers mangelfulle.
- EK5-25 tar hensyn til kontinuerlige spenn og bygger videre på formlene til ØNORM ved beregning av egenfrekvens. Dette er en forbedring fra dagens metoder som ofte fokuserer på det største spennet som en fritt opplagt bjelke.
- EK5-25 angir spesifikke dempingsverdier fra 2-4 %. ØNORM og H/R benytter verdier fra 1-4 %. Dagens EK5 benytter 1 %
- EK5-25 tillater resonante gulv. Ved frekvenser under definert grense for resonante gulv stilles det krav til beregning av akselerasjon.
- EK5-25 inkluderer et hastighetskrav v_{rms} for alle gulv.
- EK5-25 innfører 8 gulvytelsesklasser og bygger videre på ØNORM og H/R som har definert klasser for ulike bruk.
- EK5-25 medregner 10 % av nyttelasten ved beregning av egenfrekvens.
- EK5-25 er mer lempelig for brukskategori A, noe som fører til bedre materialutnyttelse.

Hvordan samsvarer målinger utført på byggeplass med vibrasjonskriteriene i den nye generasjonen av Eurokode 5, gjeldende regelverk og standarder?

- Resultater fra målingene viser at EK5-25 er presis når man benytter riktige randbetingelser.
- Lettvegger kan benyttes som opplegg ved vibrasjonsberegninger. Det forutsetter at veggplasseringene er permanente.
- Beregninger kan ansees som «noe konservative» ved å benytte anbefalte verdier.
- Beregninger av egenfrekvens samsvarer godt med målinger ved å benytte formlene i EK5-25 og ØNORM som tar hensyn til kontinuerlige spenn.
- Målt punktnedbøyning viser at alle beregningsmetoder gir konservative resultater, hovedsakelig fordi de ikke tar hensyn til kontinuerlige spenn.
- EK5-25 setter krav til hastighet. Ved å sammenligne beregningene med faktiske dempingsverdier, testpersonens vekt og inkludere skjærdeformasjoner, viser det at formlene er nøyaktige.

Hvilken testmetode egner seg best for å sammenligne resultater fra byggeplassmålinger med teoretiske beregninger?

- Metodene som best fremkaller egenfrekvensen på byggeplass, er «heel-drop» og «gange».
- «Gange» må benyttes dersom hastighet eller akselerasjon skal kontrolleres.
- «Svakt slag» egner seg ikke til vibrasjonsmålinger, da testmetoden ikke skaper store nok svingninger i dekket for å gjenkjenne egenfrekvensen.

Kan mobiltelefoner benyttes til å måle et KLT-dekkes egenfrekvens?

Målingene fra mobiltelefonene viser et moderat samsvar med egenfrekvensen til et rått KLT-dekke. For et dekke med påstøp viser resultatene fra mobiltelefonene større variasjoner, og telefonene kan derfor kun indikere frekvensområdet til dekkets egenfrekvens.

- Målingene fra mobiltelefonene viser et moderat samsvar med egenfrekvensen til et rått KLT-dekke. For et dekke med påstøp viser resultatene fra mobiltelefonene større variasjoner, og telefonene kan i beste fall gi en indikasjon på frekvensområdet til dekkets egenfrekvens.

6.1. Forslag til videre arbeid

Det vil være hensiktsmessig å måle nedbøyninger på et ferdig KLT-dekke. Dette er særlig relevant, da kravet til punktnedbøyning ofte viser seg å være det dimensjonerende kriteriet for valg av dekkeklasse. Beregninger av punktnedbøyning antas å være konservative fordi de ikke tar hensyn til kontinuerlige spenn, noe som kan føre til en unødvendig lav klassifisering av dekkene.

Et av funnene i denne oppgaven er at lettvegger har betydelig innvirkning på beregnet frekvens. Det anbefales derfor å gjennomføre videre undersøkelser for å kartlegge effekten av lettvegger mer detaljert. – Vil en vegg i samme etasje som utførte målinger (uten vegg med samme plassering under) ha samme effekt? – Kan det bygges et «skjørt» i etasjen under som vil gi en økt egenfrekvens. Dette kan være interessante angrepvinkler for en oppgave som ser på kontorbygg, som skifter romløsninger og leietakere oftere enn det som er tilfelle i et leilighetsbygg.

Resonante gulv er tillatt i henhold til EK5-25. Det kan være nyttig å gjennomføre målinger eller testoppsett av slike gulv. Dette vil gjøre det mulig å sammenligne akselerasjon fra målinger med beregnede verdier. Videre kan det evalueres nøyaktigheten i beregningsmetodene for gulv med egenfrekvens under 8 Hz. Slike undersøkelser ble ikke gjennomført i denne oppgaven, da alle testede gulv hadde frekvens over 8 Hz og derfor ikke falt inn under kategorien resonante gulv. Videre vil det også være mulig å hente ut akselerasjonsverdier fra måledata og sammenligne med teoretiske beregninger.

Referanser

- [1] G. Alfredsen, L. R. Gobakken, E. Enlid, K. M. Sandland, og E. Selvig, «Klima-og Miljødepartementet», Ås, jun. 2020. Åpnet: 9. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.regjeringen.no/contentassets/72688a1ce00a423bb97ae6ca8bd286fa/nibio_rapport_2020_6_20-08.06.2020-publ..pdf
- [2] J.-P. Tricoire, «Buildings are the foundation of our energy-efficient future | World Economic Forum». Åpnet: 18. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.weforum.org/stories/2021/02/why-the-buildings-of-the-future-are-key-to-an-efficient-energy-ecosystem>
- [3] X. Le Den og A. Qvist Secher, «Sirkulær økonomi 8 tiltak for å kutte 60% CO2 i byggebransjen - Ramboll Group». Åpnet: 18. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.ramboll.com/no-no/innsikt/kutte-klimagassutslipp-til-nettonull/8-circular-actions-to-cut-60-co2-in-the-buildings-sector>
- [4] SINTEF, «520.205 Planlegging av bygninger med KLT-elementer - Byggforskserien», byggforsk.no. Åpnet: 29. januar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/3009/planlegging_av_bygninger_med_klt-elementer
- [5] «NS-EN 1995-1-1:2004+A2:2014+NA:2024, Prosjektering av trekonstruksjoner», standard.no. Åpnet: 17. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://lese.standard.no/product/2565873/nb>
- [6] «Kranselag på Lund Torv». Åpnet: 10. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://sia.no/artikler/kranselag-paa-lund-torv/>
- [7] FN, «Stoppe klimaendringene», fn.no. Åpnet: 25. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/stoppe-klimaendringene>
- [8] K. miljødepartementet, «Klimaendringer og norsk klimapolitikk», aug. 2023, Åpnet: 25. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/klimaendringer-og-norsk-klimapolitikk/id2636812/>
- [9] FN, «FNs bærekraftsmål», fn.no. Åpnet: 30. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal#Norgeogb%C3%A6rekraftsm%C3%A5lene-2>
- [10] FN, «God helse og livskvalitet», fn.no. Åpnet: 2. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/god-helse-og-livskvalitet>
- [11] FN, «Industri, innovasjon og infrastruktur», fn.no. Åpnet: 2. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/industri-innovasjon-og-infrastruktur>
- [12] FN, «Ansvarlig forbruk og produksjon», fn.no. Åpnet: 2. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon>
- [13] G. Glasø, «Nr. 32 - Fleretasjes trehus», Oslo, 2011. Åpnet: 17. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.treteknisk.no/resources/6.-publikasjoner/1.-fokus-pa-tre/Fokus-nr-32.pdf>

- [14] Rambøll, «Hvorfor bygge i massivtre?», c.ramboll.com. Åpnet: 25. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://c.ramboll.com/no-no/massivtre-hvorfor-bygge-i-massivtre>
- [15] J. Aarstad, A. Bunkholt, og G. Glasø, «Nr. 20-Massivtre», Oslo, aug. 2011. Åpnet: 11. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/20-Massivtre.pdf>
- [16] Nibio, «Ungskogpleie», nibio.no. Åpnet: 22. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.nibio.no/tema/skog/skogbehandling-og-skogskjotsel/ungskogpleie>
- [17] T. Husum, «Fokus: Vannmiljø», statsforvalteren.no. Åpnet: 22. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.statsforvalteren.no/contentassets/c16c78a3856547b3bb76f8200bb779c7/prese-ntasjon-naturmangfoldsveka_webinar_18-januar-2023-husum.pdf
- [18] M. Fuglseth, R. Hagen, og R. Hagen, «Grønn MaterialGuide veileder i Miljøriktig Materialvalg versjon 4.0», byggalliansen.no. Åpnet: 26. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://byggalliansen.no/kunnskapscenter/publikasjoner/gronn-materialguide/>
- [19] Splitkon, «Ledende leverandør av Norsk massivtre - Splitkon», splitkon.no. Åpnet: 26. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://splitkon.no/massivtre/>
- [20] Arbeidstilsynet, «HMS i bygg og anlegg», arbeidstilsynet.no. Åpnet: 28. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.arbeidstilsynet.no/hms/hms-i-bygg-og-anlegg/>
- [21] J. Brommeland, S. Og, og R. Myreng, «Trebyggeri 2024», Veidekke, Red., Grimstad: InnoTre, nov. 2024. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://innotre.no/aktuelt/trebyggeri-2024-trehus-gjor-at-baerekraft-og-helse-gar-hand-i-hand/>
- [22] Fremtidens byggenæring, «Bruk av tre i innredning er bra for helsen», fremtidensbygg.no. Åpnet: 28. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.fremtidensbygg.no/ny-undersokelse-bruk-av-tre-i-innredning-er-bra-for-helsen/>
- [23] K. A. Heltorp og A. Q. Nyrud, «Rapport fra gjennomgang av forskningsbasert litteratur om trebruk i innemiljø og helseeffekter Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning», Ås, aug. 2022. Åpnet: 30. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://innotre.no/wp-content/uploads/2024/07/04-Litteraturgjennomgang-Kaja-og-AQN.pdf>
- [24] Direktoratet for forvaltning og IKT, «LCC basiskurs», nr. 3, des. 2013, Åpnet: 3. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://anskaffelser.no/sites/default/files/20131203_kurshefte_basiskurs_lcc.pdf
- [25] T. A. Brun, «Bærekraftpris til Hasle Tre-prosjektet», *estatenyheter.no*, 30. mars 2023. Åpnet: 3. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.estatenyheter.no/baerekraftpris-til-hasle-tre-prosjektet/370010>
- [26] SINTEF, «700.307 Definisjoner, etablering og bruk av levetidsdata for bygg og bygningsdeler - Byggforskserien», byggforsk.no. Åpnet: 3. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på:

- https://www.byggforsk.no/dokument/3208/definisjoner_etablering_og_bruk_av_levetidsdata_for_bygg_og_bygningsdeler
- [27] H. Aarnes, M. Foslie, og E. Bøhmer, «tre», snl.no. Åpnet: 26. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://snl.no/tre#-Les_mer_i_Store_norske_leksikon
- [28] R. Flatland, «Nr. 41 - Tradisjonsbasert trebruk», Oslo. Åpnet: 17. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://treteknisk.no/publikasjoner/fokus-pa-tre/fokus-41--tradisjonsbasert-trebruk>
- [29] G. Glasø og A. Q. Nyrud, «Neste generasjons trebygg kommer nå», *forskning.no*, Oslo, 30. april 2018. Åpnet: 17. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.forskning.no/arkitektur-bygningsmaterialer-forskeren-forteller/forskeren-forteller-neste-generasjons-trebygg-kommer-na/272123>
- [30] «NS-EN 338:2016, Konstruksjonstrevirke- Fasthetsklasser», standard.no. Åpnet: 10. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://lese.standard.no/product/2529108/nb>
- [31] K. Bell, *Dimensjonering av trekonstruksjoner*, 2. utg. 5068 Bergen: Fagbokforlaget, 2021.
- [32] «NS-EN 16351:2021, Trekonstruksjoner — Krysslimt massivtreelement — Krav», standard.no. Åpnet: 28. januar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://lese.standard.no/product/2514290/nb>
- [33] Stora Enso, «Results - KnowledgeHub», storaenso.com. Åpnet: 26. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://knowledge.buildingsolutions.storaenso.com/en/results?topics=f40d213e-bbab-42df-b90f-ea1dd107a197&products=2bb603d1-c1ce-4f7b-b22a-a06eef9371d9>
- [34] E. Karacabeyli og S. Gagnon, Red., *CLT Handbook*, 2019 Edition., bd. 1. Pointe-Claire: FPInnovations, 2019. Åpnet: 20. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://web.fpinnovations.ca/wp-content/uploads/clt-handbook-complete-version-en-low.pdf>
- [35] Direktoratet for byggkvalitet, «§ 13-14. Byggfukt», dibk.no. Åpnet: 20. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/13/vi/13-14?_t_q=byggfukt
- [36] L. J. Hu, Y. H. Chui, og D. M. Onysko, «Vibration serviceability of timber floors in residential construction», *Progress in Structural Engineering and Materials*, bd. 3, nr. 3, s. 228–237, okt. 2001, doi: 10.1002/PSE.69.
- [37] A. Homb, «Nedbøyning og vibrasjoner til bjelkelag», 2009. Åpnet: 19. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: www.sintef.no/byggforsk
- [38] A. Smith, S. Hicks, og P. Devine, *Design of Floors for Vibration: (Revised Edition, February 2009)*, nr. February. Ascot: Steel Construction Institute, 2009. doi: 10.13140/RG.2.2.29342.95048.
- [39] H. Ormestad og K. Hofstad, «egenfrekvens», snl.no. Åpnet: 22. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/egenfrekvens>

- [40] N. Simovic og I. Glisovic^, «Građevinski materijali i konstrukcije Building Materials and Structures Design of cross-laminated timber (CLT) floors for human-induced vibrations», *Building Materials and Structures*, bd. 66, s. 69–78, feb. 2023, doi: 10.5937/GRMK2301069S.
- [41] E. Aasheim, *Bygge med Massivtreelementer Hefte 1*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt, 2006. Åpnet: 19. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://docplayer.me/143042094-Handbok-bygge-med-massivtreelementer-hefte-3-dimensjonering.html>
- [42] A. Birkenes, K. F. Juul, og E. Langeland, «Egenprodusert».
- [43] Brüel & Kjær, «Sound and Vibration Pocket Handbook», bksv.com. Åpnet: 18. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.bksv.com/downloads/svpockethandbook/index.html>
- [44] B. Davidsen, «Dempede svingninger», Ingfag.no. Åpnet: 14. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://ingfag.no/matematikk/notater/Svingninger/DempetSvingning.pdf>
- [45] «Fun with fourier transforms». Åpnet: 18. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/fft-fun-with-fourier-transforms.pdf>
- [46] S. L. Gjelstrup, «Guide to FFT Analysis», Dewesoft. Åpnet: 18. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://dewesoft.com/blog/guide-to-fft-analysis>
- [47] «Serviceability of buildings and walkways against vibrations, ISO 10137:2007», standard.no. Åpnet: 15. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://lese.standard.no/product/1928301/nb>
- [48] D. Glasner, A. Ringhofer, R. Brandner, og G. Schickhofer, «Rolling Shear Strength of Cross Laminated Timber (CLT)-Testing, Evaluation, and Design», bd. 13, nr. 11, nov. 2023, doi: 10.3390/buildings13112831.
- [49] A. Olsson, W. Schirén, og M. Hu, «Dynamic and quasi-static evaluation of stiffness properties of CLT: longitudinal MoE and effective rolling shear modulus», *European Journal of Wood and Wood Products* 2024 83:1, bd. 83, nr. 1, s. 1–15, des. 2024, doi: 10.1007/S00107-024-02185-W.
- [50] C. Fischer, O. A. Høibø, G. I. Vestøl, M. Hauglin, E. H. Hansen, og T. Gobakken, «Predicting dynamic modulus of elasticity of Norway spruce structural timber by forest inventory, airborne laser scanning and harvester-derived data», *Scand J For Res*, 2018, doi: 10.1080/02827581.2018.1427790.
- [51] S. Byggforsk, «Kriterier for opplevde vibrasjoner i etasjeskillere Delrapport fra prosjektet 'Comfort properties of timber floor constructions'», 2007, Åpnet: 14. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: www.sintef.no/byggforsk
- [52] «Design of timber structures- (Upublisert)», FprEN 1995-1-1:2025. Åpnet: 17. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://online.standard.no/nb/search?q=ns%20en%201995-1-1&scope=all&includeWithdrawn=true&narrowResultsOpen=false>
- [53] C. Kunøe, «Massiv vekst til 2024?», *Byggmesteren*, Oslo, 9. oktober 2018. Åpnet: 1. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://byggmesteren.as/2018/10/09/massiv-vekst-til-2024/?utm_source=chatgpt.com

- [54] «Design of timber structures», ÖNORM B 1995-1-1. Åpnet: 19. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.austrian-standards.at/en/shop/onorm-b-1995-1-1-2023-08-15~p2670783>
- [55] P. Hamm, A. Richter, og S. Winter, «Floor vibrations-new results», i *presentert ved 11th World Conference on Timber Engineering 2010*, Torino, jun. 2010. Åpnet: 17. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.hochschule-biberach.de/sites/default/files/medien/dokumente/paper%20WCTE%20HAMM%20Floor%20vibrations%20%20new%20results.pdf>
- [56] SINTEF, «Anvendt forskning, teknologi og innovasjon». Åpnet: 21. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.sintef.no/>
- [57] «Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning», Direktoratet for byggkvalitet. Åpnet: 14. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>
- [58] «CLTdesigner». Åpnet: 18. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.cltdesigner.at/en/>
- [59] «Home I Stora Enso». Åpnet: 20. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.storaenso.com/en>
- [60] «Hey'di Proplan® Multi ECO», Hey'di. Åpnet: 10. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: https://heydi.no/heydi_produkter/heydi-proplan-multi-eco/
- [61] V. Damsgård, «Lund Torv endres i rekordfart», *Fædrelandsvennen*, Kristiansand, 25. juli 2024. Åpnet: 3. april 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.fvn.no/nyheter/lokalt/i/Llyx89/lund-torv-endres-i-rekordfart>
- [62] Woodcon, «BIMvision».
- [63] Brüel & Kjær, «Sound and Vibration Measurement», Hottinger - Brüel & Kjær. Åpnet: 13. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.bksv.com/en>
- [64] «Mitutoyo, Product family: Series 4». Åpnet: 13. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: [https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/all/all/Series%204/\\$catalogue/mitutoyoData/PG/4_LARGE1/index.xhtml?result=1739446867749](https://shop.mitutoyo.eu/web/mitutoyo/en/all/all/Series%204/$catalogue/mitutoyoData/PG/4_LARGE1/index.xhtml?result=1739446867749)
- [65] «Coline EB9008 handleiding (20 pagina's)». Åpnet: 18. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.handleidi.ng/coline/eb9008/handleiding>
- [66] «Protimeter Mini | Mini Pin-Type Moisture Meter». Åpnet: 13. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.protimeter.com/mini>
- [67] RWTH Aachen University, «Physical Phone Experiments», Phyphox. Åpnet: 13. februar 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://phyphox.org/>
- [68] «Operational Modal Analysis (OMA) - 8760, 8761, 8762». Åpnet: 10. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.hbkworld.com/en/products/software/daq/bk-connect-pulse/structural/operational-modal-analysis/operational-modal-analysis-8760-8761-8762>

- [69] L. Zhang Nanjing, «An Overview of Operational Modal Analysis: Major Development and Issues», jan. 2005, Åpnet: 10. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på:
https://www.researchgate.net/publication/286994015_An_overview_of_operational_modal_analysis_Major_development_and_issues
- [70] «Prøvingsmetoder - Tregulvsystemer - Bestemmelse av vibrasjonsegenskaper», NS-EN 16929:2018. Åpnet: 12. mars 2025. [Online]. Tilgjengelig på:
<https://lese.standard.no/product/2525236/nb>
- [71] Rothoblaas, «HIGH-PERFORMANCE RESILIENT SOUNDPROOFING PROFILE», rothoblaas.com. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på:
<https://www.rothoblaas.com/products/soundproofing/resilient-profiles/xylofon>
- [72] Norconsult, «Vil gi bedre råd om bruk av tre», norconsult.no. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://norconsult.no/aktuelt/vil-gi-bedre-raad-om-bruk-av-tre/>
- [73] Norges Skogeierforbund, «Det grønne skiftet», skog.no. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://skog.no/skogfaglig/det-gronne-skiftet/>
- [74] M. G. Solberg, «Boligblokk i tre tok halvparten så lang tid å bygge som 'naboblokka' i betong», tu.no. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.tu.no/artikler/boligblokk-i-tre-tok-halvparten-sa-lang-tid-a-bygge-som-naboblokka-i-betong/276082>
- [75] «Hvorfor bygge i massivtre?» Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på:
<https://c.ramboll.com/no-no/massivtre-hvorfor-bygge-i-massivtre>
- [76] Grønn byggallianse, «Eiendomssektorens veikart mot 2050», byggalliansen.no. Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på:
<https://byggalliansen.no/kunnskapssenter/publikasjoner/eiendomssektorens-veikart-mot-2050/>
- [77] Ø. R. Haanæs, «Returtre kan bli nye bygningselementer». Åpnet: 14. mai 2025. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.regionaleforskningsfond.no/Oslo/rff-oslo/nyheter/returtre-kan-bli-nye-bygningselementer/>

Vedlegg

Vedlegg A.	Vibrasjonsberegninger etter ulike metoder.xlsx
Vedlegg B.	Teoretisk sammenligning.xlsx
Vedlegg C.	Demping Lund Torv.xlsx
Vedlegg D.	Kontroll av ULS og SLS.pdf