



SAFETY & TRANSPORT
RISE FIRE RESEARCH



Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger – en litteraturstudie

Nina K. Reitan, Kathinka L. Friquin, Ragni F. Mikalsen

RISE rapport 2019:09

Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger – en litteraturstudie

Nina K. Reitan, Kathinka L. Friquin, Ragni F. Mikalsen

Abstract

Fire safety in cross laminated timber buildings; a review

Key words: Cross laminated timber; CLT; fire safety; exposed CLT; auto-extinction; charring; delamination; detailing

This literature study presents recent research on fire safety in cross laminated timber (CLT) buildings. Results from large fire experiments and other studies in the period 2010 - 2018 are summarized, with focus on the following research questions:

- How do constructions consisting of protected or exposed CLT contribute to the fire development in a room?
- How can contribution to the fire development from detailing of CLT be avoided?

There is an increasing desire to use wooden structures in tall buildings, as a substitute for more traditional construction materials. However, the use of combustible constructions in buildings in Norwegian Fire Class 3 (usually five floors or more) is not pre-accepted in the guideline to Regulations on technical requirements for construction works (TEK17), and fire safety must therefore be documented by analysis in such structures. When designing tall and complex timber buildings, it must be taken into account that a fire involving a timber construction may have more severe consequences than in buildings with constructions of steel or concrete, if the fire design of the construction and detail solutions is insufficient. Several studies show that fire exposed CLT, or CLT with insufficient protection, can cause a fire to develop faster, be more intense and last longer than a fire where the only fuel is the furniture and fixtures in the fire room. It is shown that the amount of fire exposed timber in a room may have impact on the extent and duration of a fire, but the knowledge has not yet been sufficient enough to be used in fire modeling, design and analysis.

Research on charring rates, delamination and auto-extinction, all of which are factors that can have major impact on fire development and the fire resistance of the construction, takes place in Europe, Australia and North America. Although extensive research has been carried out, it is based on few large fire experiments, and the literature is still pointing to several knowledge gaps. However, the research projects have increased the knowledge of fire in timber buildings, and have contributed to the design of detail solutions, guidelines and development of models for function-based design. Revision of EN 1995-1-2 is under preparation and expected to apply from 2022. A knowledge base for the audit can be found in the network COST Action FP1404 Fire Safety Use of Bio-Based Building Products (COST FP1404) Working Group 2 (WG2). They have published several guidelines relevant for the fire design of CLT, including e.g. calculation methods for the prediction of charring rates and depths, determination of reduced CLT cross-section, design of CLT detailing and a suggested test method for evaluating adhesive performance.

Based on the literature review, the following conclusions and recommendations are given for CLT constructions:

- The design phase must sufficiently consider protection of the construction and contribution of the construction to the fire energy, and to a greater extent include the assessment of detailing and ventilation conditions. It should be considered whether analytic fire engineering design also should be required for buildings in the Norwegian Fire Classes 1 and 2 where more than one CLT wall is exposed.
- By protecting all CLT surfaces of the structure with cladding, the construction may retain the stability and the load bearing capacity during the required time of fire resistance.
- In buildings with only one exposed CLT wall in each fire cell, it may also be appropriate to use solutions that satisfy the pre-accepted performances, but one must consider whether a somewhat longer and more intense heat radiation and flame exposure on the facade outside window openings will require measures beyond the pre-accepted performances given in the guideline to TEK17.
- Rooms where two or more CLT walls in addition to the ceiling are exposed, are configurations that should be avoided.
- The risk of delamination can be reduced by using heat-resistant glue.
- There is generally a need for relevant documentation for fire-resistant solutions for joints between CLT walls and floors and service penetrations in CLT constructions.
- Test methods for testing of joints and penetrations in CLT constructions should be standardized. For example, there exists no standardized test for corner joints. Tests of penetration seals for CLT constructions are scarce, although they can be tested according to EN 1366-3. However, CLT is not a standard supporting construction according to EN 1366-3, and this must be taken into consideration when the test results are evaluated. Joints in glulam constructions should also be tested because they are often used in conjunction with CLT elements.

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2019:09

ISBN: 978-91-88907-36-3

Prosjektnummer: 20385

Kvalitetssikring: Anne Steen-Hansen

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap og Direktoratet for byggkvalitet

Gjenbruk av bilder/figurer:

Forsidebilde: <https://www.flickr.com/photos/usdagov/39309537250>

Photo courtesy of Structurlam (merket for gjenbruk)

Alle figurer i rapporten er gjengitt med tillatelse og oversatt.

Trondheim 2019

Innhold

Abstract	2
Innhold.....	4
Forord	5
Sammendrag.....	6
Definisjoner og forkortelser	8
1 Bakgrunn.....	9
1.1 Målsetting	10
1.2 Begrensninger.....	10
1.3 Metodebeskrivelse	10
1.4 Rapportens oppbygging	10
2 Regelverk og praksis	11
2.1 Funksjonsbaserte forskrifter	11
2.2 Tre som konstruksjonsmateriale.....	11
2.3 Metoder for brannteknisk analyse	13
2.4 Byggeregler i Norge	14
3 Teori.....	16
3.1 KLT som konstruksjonselement	16
3.2 Brannsikkerhet i bygninger med KLT.....	16
4 Nyere forskning (2010 - 2018)	24
5 Diskusjon og oppsummering.....	32
5.1 KLT-konstruksjoners påvirkning på brannutviklingen	32
5.2 Detaljløsninger	38
5.3 Kunnskapshull	42
6 Konklusjon og anbefalinger	43
6.1 Konklusjoner.....	43
6.2 Anbefalinger	45
Referanser	47

Vedlegg A: Beskrivelse av forskningsprosjekter med brannforsøk

Forord

Prosjektet er utført av RISE Fire Research i samarbeid med SINTEF Byggforsk, og er finansiert av Direktoratet for byggkvalitet og Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) gjennom samarbeidsavtalen om forskning og utvikling mellom DSB og RISE Fire Research.

Sammendrag

Denne litteraturstudien presenterer nyere forskning på brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre (KLT) i bygninger. Resultater fra store brannforsøk og andre studier i perioden 2010 – 2018 er oppsummert, med hovedfokus på følgende forsknings-spørsmål:

- Hvordan påvirkes brannutviklingen i rom der det er brukt tildekkede eller eksponerte KLT-elementer?
- Hvordan forhindre at detaljløsninger for KLT-elementer bidrar til brannutviklingen?

Det er et økende ønske om å kunne benytte trekonstruksjoner i høye bygninger, som erstatning for mer tradisjonelle konstruksjonsmaterialer. Bruk av brennbare konstruksjoner i bygninger i brannklasse 3 (vanligvis fem etasjer eller mer) er imidlertid ikke preakseptert i henhold til veiledningen til forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK17), og brannsikkerheten må derfor dokumenteres ved analyse i slike byggverk. Bruk av trekonstruksjoner i høye og komplekse bygninger stiller andre krav til konstruksjonen og detaljløsninger (f.eks. sammenføyninger, overganger mellom bygningsdeler og gjennomføringer) enn ved bruk av stål eller betong, fordi en brann som involverer trekonstruksjonen kan få større konsekvenser om prosjektering og utførelse er utilstrekkelig. Flere studier viser blant annet at eksponert KLT, eller KLT med utilstrekkelig beskyttelse, kan medføre at en brann vokser raskere, er mer intens og varer lenger enn en brann der det eneste brenselet er inventaret i brannrommet. Mengden eksponert tre i et rom kan ha betydning for omfanget og varigheten av en brann, men kunnskapsgrunnlaget har foreløpig ikke vært tilstrekkelig til å kunne benyttes i modellering, prosjektering og analyser.

Forskning på forkullingshastigheter, delaminering og selvsløkking, som alle er forhold som kan ha stor innvirkning på brannutviklingen og konstruksjonens brannmotstand, foregår både i Europa, Australia og i Nord-Amerika. Selv om det er utført omfattende forskning, er den basert på få store brannforsøk, og litteraturen peker fremdeles på flere kunnskapshull. Forskningsprosjektene har imidlertid økt kunnskapen om brann i trebygninger, og har bidratt til utforming av detaljløsninger, retningslinjer og utvikling av modeller for funksjonsbasert prosjektering. Revidert EN 1995-1-2 er under utarbeidelse og forventes gjeldende fra 2022. Et kunnskapsgrunnlag for revisjonen kan finnes i nettverket COST Action FP1404 Fire Safe Use of Bio-Based Building Products (COST FP1404) Working Group 2 (WG2). De har utgitt flere retningslinjer for prosjektering av KLT, som blant annet inneholder utviklede beregningsmetoder for forkullingshastighet og -dybde, bestemmelse av redusert KLT-tverrsnitt, utførelse av detaljløsninger og en foreslått testmetode for evaluering av limeegenskaper.

Basert på kunnskapsgrunnlaget i litteraturen, gis følgende konklusjoner og anbefalinger for KLT-konstruksjoner:

- Prosjekteringsfasen må ta hensyn til beskyttelse av konstruksjonen og konstruksjonens bidrag til brannenergien, og i større grad inkludere vurdering av detaljløsninger og ventilasjonsforhold. Det bør vurderes om analytisk brannteknisk prosjektering også bør kreves for bygninger i brannklasse 1 og 2 med mer enn én KLT-vegg eksponert.

- Dersom alle deler av konstruksjonen tildekkes tilstrekkelig med kledning, kan konstruksjonen opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp.
- I bygninger med bare én eksponert KLT-vegg i hver branncelle, kan det være riktig å benytte løsninger som tilfredsstiller de preaksepterte ytelsene, men man må vurdere om en noe mer langvarig og intens varmestråling og direkte flammepåkjenning på fasaden over vinduene krever tiltak utover de preaksepterte ytelsene gitt i veiledningen til TEK17.
- Rom der to eller flere vegger av KLT og i tillegg himlingen er eksponert, er konfigurasjoner som bør unngås.
- Risikoen for delaminering kan reduseres ved å benytte varmebestandig lim.
- Det er generelt behov for å fremskaffe relevant dokumentasjon av brannsikre løsninger for servicegjennomføringer i KLT-konstruksjoner og skjøter mellom KLT-vegger og gulv.
- Testmetoder for systemtesting av skjøter og gjennomføringer i KLT-konstruksjoner bør standardiseres. Det eksisterer eksempelvis ingen standardisert test for hjørnesammenføyninger. Brannprøving av tettinger av gjennomføringer for KLT-konstruksjoner er mangelvare, selv om de kan testes i henhold til NS-EN 1366-3. KLT er imidlertid ikke standardkonstruksjon i NS-EN 1366-3, og det er behov for validering av testmetodens gyldighet for KLT. Sammenføyninger for limtre bør også testes, fordi de ofte brukes i forbindelse med ulike KLT-elementer.

Definisjoner og forkortelser

β_0 : Referanseforkullingsegenskaper for endimensjonal forkulling,

COST FP1404 WG2: Nettverket COST Action FP1404 *Fire Safe Use of Bio-Based Building Products*, Working Group 2 *Structural Elements made of bio-based building materials and detailing*.

EI: Angir ytelse til bygningsdel som bevarer sin integritet (E) og varmeisolasjonsevne (I) i et gitt antall minutter ved standardisert brannprøving.

HRR: Heat Release Rate = varmeavgivelseshastighet. Varmemengde som avgis per tidsenhet ved forbrenning av et materiale under angitte prøvingsbetingelser. (I noen referanser omtales total HRR. Dette kan indikere at målingen inkluderer forbrenningsprodukter både i og utenfor branntestrommet.)

KLT: Krysslaminert trevirke (krysslaminert massivtre).

R: Angir en bygningsdels bæreevne ved brann. Dette er evnen til å motstå brannpåkjenning på én eller flere sider i en gitt tid, uten at bygningsdelen mister nødvendig bæreevne og stabilitet, når den samtidig er påført gitt mekanisk last.

TEK17: Forskrift om tekniske krav til byggverk. Gyldig fra 1. juli 2017.

THR: Total heat release = total varmeavgivelse. Varmemengden et materiale avgir under forbrenning.

1 Bakgrunn

Norsk treindustri er i utvikling og har blant annet økende fokus på miljø og effektive byggeprosesser. Konkurransesevnen til trekonstruksjoner har økt de siste årene. Fabrikksproduksjon av elementer gir kortere byggetid og bygninger med trekonstruksjoner kan oppnå bedre miljøregnskap enn bygninger av for eksempel stål og betong. Trekonstruksjoner lagrer CO₂, og mulighetene for lokal produksjon gir kort transport og mindre forurensing. Imidlertid er trekonstruksjoner brennbare, og bruk av brennbare konstruksjoner i bygninger i brannklasse 3 (vanligvis fem etasjer eller mer) er ikke preakseptert i henhold til forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK17) [1] med veiledning.

Det er likevel et økende ønske om å kunne benytte trekonstruksjoner også i bygninger med fem etasjer og mer, som erstatning for mer tradisjonelle konstruksjonsmaterialer. På grunn av krav til bæring og stabilitet, er det mest aktuelt å bruke krysslaminert massivtre (KLT) og limtre i høye trebygninger, og ikke lett stenderverk. Eksempler på prosjekter som er gjennomført i Norge er Moholt 50|50 i Trondheim med ni etasjer, studentboliger i Tromsø med ti etasjer og Mjøstårnet i Brumunddal med 18 etasjer. Alle disse bygningene har elementer av KLT, som er produktet vi fokuserer på i denne litteraturstudien. I Norge ønsker vi at trematerialet skal være eksponert og synlig, det vil si uten tildekking, noe som er vist å ha betydning for brannutviklingen i et rom. Mange av disse stadig mer komplekse bygningene blir konstruert for brannmotstand basert på standard brannpåkjenning (også kjent som ISO 834-brannkurve). Relevansen av dette er omdiskutert, ettersom en standard brannkurve ikke gir en reell brann, men en branneksposering som anvendes i laboratorietesting, og i hovedsak brukes for å kunne klassifisere ulike bygningsdeler.

Ved bruk av trekonstruksjoner i høye og komplekse bygninger, er det også viktig at detaljløsningene, eksempelvis sammenføyninger mellom bygningsdeler og branntetting av gjennomføringer, har tilstrekkelig gode brannegenskaper. Løsningene bør også være mer robuste, noe som blant annet betyr at de må være mindre sårbare for feil i utførelsen og skader i bruksfasen.

Preaksepterte ytelser for høye bygninger med bærende trekonstruksjoner eksisterer som nevnt ikke i dagens byggregler, men det kan være aktuelt å innføre dersom kunnskapen tilsier det. For å komme dit, må man tette kunnskapshullene med hensyn til hvordan man kan oppnå påkrevd brannsikkerhetsnivå i bygningene. Som dette litteraturstudiet viser, kan eksponert KLT, eller KLT som har tilstrekkelig beskyttelse, medføre at brannen vokser raskere, er mer intens og har lengre varighet enn en brann der det eneste brenselet er inventaret i brannrommet. Selv om det er vist at mengden eksponert tre i et rom kan ha betydning for omfanget og varigheten av en brann, har kunnskapsgrunnlaget foreløpig ikke vært tilstrekkelig til å kunne benyttes i modellering, prosjektering og analyser.

Forskning på forhold som kan ha innvirkning på brannutviklingen og konstruksjonens brannmotstand, som mengde eksponert tre, forkullingshastigheter, delaminering og selvsløkking, foregår blant annet i Europa, Australia, USA og Canada. Resultatene fra denne forskningen gir ny kunnskap om hvordan man kan oppnå tilfredsstillende sikkerhetsnivå i bygninger av KLT, og vil etter hvert danne grunnlag for regelverk og verktøy for risiko-modellering.

1.1 Målsetting

Dette prosjektet er en videreføring av en tidligere litteraturstudie utført av RISE Fire Research i 2016 [2], og gir en sammenstilling av nyere, internasjonal kunnskap om brann-sikkerhet ved bruk av KLT i bygninger. Prosjektet fokuserer på et utvalg faktorer som kan påvirke brannutviklingen i et rom med KLT, og belyser problemstillinger der det fremdeles er kunnskapshull og behov for mer forskning.

Forskningsspørsmål som prosjektet har søkt svar på i litteraturen:

- Hvordan påvirkes brannutviklingen i rom der det er brukt tildekkede eller eksponerte KLT-elementer?
- Hvordan forhindre at detaljløsninger for KLT-elementer bidrar til brannutviklingen?

1.2 Begrensninger

Prosjektet fokuserer på:

- Konstruksjonselementer laget av KLT, og ikke andre typer trekonstruksjoner.
- Forskning i perioden 2010 – 2018, med hovedvekt på nyere forskning fra 2016 – 2018.
- Brannutvikling i rom, selvslokking, delaminering, forkulling og detaljløsninger.

Prosjektet fokuserer ikke på:

- Beregningsmetoder.
- Brannsikkerhet i byggefasen.

1.3 Metodebeskrivelse

Informasjonen er samlet ved søk i databaser for vitenskapelige tidsskrifter, innhenting av dokumentasjon, og direkte kommunikasjon med aktører fra myndigheter, forskning og industri.

1.4 Rapportens oppbygging

Etter en kort innføring i regelverk og praksis (kapittel 2) og teori (kapittel 3), gir rapporten en oversikt over noen store prosjekter som i de senere år har bidratt til viktig forskning på brannegenskapene til KLT og påvirkningen på brannutviklingen, og et utvalg større brannforsøk beskrives (kapittel 4 og vedlegg A). Deretter diskuteres resultatene fra brannforsøkene og annen litteratur (kapittel 5), før de viktigste konklusjoner og anbefalinger gis (kapittel 6).

2 Regelverk og praksis

2.1 Funksjonsbaserte forskrifter

Det finnes i hovedsak to ulike typer byggeregler. *Ytelsesbaserte* byggeregler gir spesifikke tallfestede ytelser som konstruksjoner og materialer må oppfylle. *Funksjonsbaserte* byggeregler oppgir hvilket nivå sikkerheten skal ligge på, uten å spesifisere hvilke egenskaper konstruksjoner og materialer må ha for at dette skal kunne oppnås. Funksjonsbaserte byggeregler har ofte tilhørende veiledninger med blant annet preaksepterte ytelser som vil oppfylle funksjonskravene.

Mange land i verden har de siste årene innført funksjonsbaserte byggeregler, der brannsikkerheten i bygninger kan dokumenteres ved branntekniske analyser. Det betyr at selv om mange land opererer med et begrenset tillatt etasjetall, er det i noen av disse landene likevel mulig å bygge høyere bygninger med trekonstruksjoner dersom man dokumenterer brannsikkerheten ved brannteknisk analyse, slik som tilfellet er i Norge.

Funksjonsbasert prosjektering baserer seg på bruk av branntekniske analyser, beregninger og passende modelleringsverktøy for å tilfredsstille byggeregler. I stedet for å forutsi hvilke beskyttende tiltak som kreves, gis det forskriftskrav om egenskapene til det totale systemet. Hovedprinsippet med funksjonsbasert prosjektering er at bygningen skal prosjekteres og oppføres med grunnlag i kunnskap om risiko, og ved bruk av relevante dimensjonerende brannscenarier. Følgende må være oppfylt i henhold til EUs byggevarerforordning (CPR) [3]: *Brannsikkerhet: Byggverket skal være utformet og bygget på slik måte at byggverket kan antas å ha sin bæreevne i behold en viss tid, utvikling og spredning av ild og røyk inne i byggverket er begrenset, spredning av ild til byggverk i nærheten er begrenset, personer som befinner seg i byggverket, kan forlate bygningen eller redde på annet vis, redningsmannskapets sikkerhet er ivaretatt.*

Kriterier for hva som er tilstrekkelig brannsikkerhetsnivå defineres i hvert enkelt land gjennom nasjonale byggeregler.

2.2 Tre som konstruksjonsmateriale

Bestemmelse av brannegenskaper, testing av brannmotstand og branndimensjonering for KLT kan i Europa utføres i henhold til europeiske standarder, men noen av landene har også nasjonale standarder som supplerer eller overlapper disse (f.eks. DIN 4102-1 [4]). De europeiske standardene inkluderer klassifiseringssystemer for egenskaper ved brannpåvirkning, byggeprodukters brannmotstand og Eurokoder for dimensjonering av konstruksjoner. Veiledningen til TEK17 inneholder mer informasjon om hvilke standarder som bør benyttes i Norge.

EN 1995-1-2 [5] er den europeiske dimensjoneringsstandarden for trekonstruksjoner eksponert for brann. Gjeldende versjon ble publisert i 2004 og inkluderer ikke beregningsmetoder for KLT. Brannmotstanden for KLT kan imidlertid klassifiseres i henhold til europeiske standarder (NS-EN 13501-2 [6]), eller beregnes ved bruk av metoder

beskrevet i håndbøker [7]. EN 1995-1-2 er under revisjon, og ny versjon ventes mellom 2022 og 2024.

Östman gir en oversikt over status for bruk av tre som konstruksjonsmateriale, og peker på forskjellene mellom ulike land [8]. Selv om metoder for brannprøving og klassifisering er blitt harmonisert i Europa, gjelder fremdeles nasjonale regelverk for krav til egenskapene.

Det er store nasjonale forskjeller i regelverk for bruk av trekonstruksjoner i bygninger, både når det gjelder tillatt antall etasjer og synlige treoverflater i og utenpå bygninger. Flere europeiske land har regelverk som begrenser bruken av trekonstruksjoner til bygninger med inntil fire etasjer, mens noen land tillater inntil seks etasjer. Det er imidlertid vanlig praksis med maksimum fem til åtte etasjer for trekonstruksjoner.

Grunnen til begrensningene i byggehøyde, eller strengere krav til brannsikkerheten i høye bygninger, er at konsekvensene ved en brann kan være større i høye bygninger, siden rømning, redning og slokking er mer utfordrende. Eksempelvis kreves det i Norge, Danmark og Estland at høye bygninger skal motstå en fullstendig brann uten innsats fra brannvesenet, noe som betyr at brannen må avta og slokne av seg selv. For lave bygninger kan livreddende tiltak være å sikre nok tid til at mennesker kan evakuere bygningen. Etter dette kan det, under visse forutsetninger, være akseptabelt å tillate at bygningen brenner ned.

Fullstendig evakuering kan være utfordrende i høyere bygninger. For bygninger opp til åtte etasjer er det mulig å utføre brannslokking og redning via brannvesenets høyderedskap, men dette kan være vanskelig i enda høyere bygninger. For at mennesker skal være trygge i høye bygninger, er det derfor essensielt å avgrense brannen og forhindre strukturell kollaps. I brannteknisk prosjektering er derfor bygningshøyde en kritisk parameter.

De norske byggereglene med veiledning tillater bruk av trekonstruksjoner i bygninger med inntil fire etasjer, mens for høyere bygninger må brannsikkerheten dokumenteres ved analytisk brannteknisk prosjektering.

Byggereglene i Canada har en funksjonsbasert del og en del med preaksepterte ytelser. De preaksepterte ytelsene tillater ikke eksponert KLT i rømningsveier. Preaksepterte ytelser inkluderer heller ikke høye trekonstruksjoner, som må prosjekteres basert på de funksjonsbaserte byggereglene. Canada har ingen omforente metoder for å utvikle og vurdere funksjonsbaserte løsninger, men de har tekniske retningslinjer som rådgivere kan benytte for å prosjektere høye trebygninger som tilfredsstillende funksjonsbaserte byggereglene [9].

I USA begrenser regelverket bruk av trekonstruksjoner til maksimalt seks etasjer, og godkjenning av høyere bygninger krever brannteknisk analyse [10].

Byggereglene i Sverige skiller ikke mellom bygningsmaterialer, og gir ikke begrensninger i bruken av trekonstruksjoner så lenge brannsikkerheten dokumenteres tilstrekkelig [11].

Før 2016 var det i Australia bare preakseptert å benytte trekonstruksjoner i bygninger med maks to etasjer. Brannbeskyttede trekonstruksjoner («fire-protected timber») regnes nå inn under Class A-konstruksjoner, som er konstruksjoner med høy brannmotstand, og er dermed preakseptert brukt i alle bygninger med inntil åtte etasjer. «Fire-protected timber» er trekonstruksjoner som er beskyttet med ubrennbar kledning som hindrer forkulling av trekonstruksjonen i en bestemt tidsperiode ved en brann. Hvor lenge kledningen må beskytte konstruksjonen bestemmes av om det er lette trekonstruksjoner eller KLT som benyttes, og hvor i bygningen bygningsdelen er plassert. Slike bygninger

må ha automatisk sprinkleranlegg og ubrennbar isolasjon. Veiledende informasjon til National Construction Code 2016 (NCC2016) [12] finnes i [13]. En kort oppsummering av prosjektering av trekonstruksjoner i New Zealand og Australia er gitt i [14].

2.3 Metoder for brannteknisk analyse

God kunnskap om egenskapene til konstruksjoner er viktig for å kunne utføre relevante branntekniske analyser.

Östman beskriver kort et utvalg retningslinjer som er publisert i ulike land [8]. Som nevnt inkluderer ikke EN 1995-1-2 beregningsmetoder for KLT, men den europeiske veiledningen «Fire Safety in Timber Buildings» ble publisert i 2010, og oppgir beregningsmetoder for trekonstruksjoner, inkludert KLT [7].

Mange publikasjoner anbefaler løsninger for forbedring og forenkling av branndimensjonering. I Sverige er det utarbeidet en veiledning som kan benyttes ved brannteknisk dimensjonering av høye bygninger med trekonstruksjoner, der blant annet eksponering av KLT-konstruksjoner er inkludert [15]. Barber foreslår en brannteknisk tilnærming på 19 steg for å beregne grensen for tillatt eksponert KLT [16]. Bartlett et al. foreslår en metodikk for å analysere og prosjektere bygninger med trekonstruksjoner, der egenskaper som eksempelvis forkulling, delaminering og varmegjennomgang hensyntas, og foreslår områder der det er behov for mer forskning, kunnskap og verktøy [17]. For å unngå en ukontrollert brann, og for å beskytte liv og eiendom, mener de at brannen må slokne av seg selv når inventaret er utbrent. Metoden de foreslår består av åtte steg, og anbefaler at konstruksjonen må vurderes i sin helhet. Metoden er opprinnelig utviklet for ubrennbare konstruksjoner, og må derfor modifiseres noe ved bruk i prosjektering av bygninger med brennbare konstruksjoner. Eksempelvis må man ved vurdering av brannutviklingen og branndynamikken i rommet ta hensyn til brennbarheten til konstruksjonen og de termiske egenskapene til overflatene i rommet. I tillegg må man inkludere et steg der man analyserer sannsynligheten for at brannen skal slokne av seg selv når inventaret i rommet er utbrent. Ved prosjektering av trekonstruksjoner må man også se på sammenhengen mellom de ulike stegene; for eksempel kan den brennbare konstruksjonen påvirke brannutviklingen og branndynamikken i rommet.

Ytterligere informasjon om regelverk og prosedyrer i ulike land når det gjelder brannsikkerhet og bruk av KLT er utgitt i flere publikasjoner [9,14,18–20]. Barber gir eksempelvis en oversikt over forskriftskrav for trekonstruksjoner i USA, og foreslår metoder for godkjenning av høye trekonstruksjoner [19]. I 2018 er det, som et resultat av forskning i nettverket COST FP1404 WG2, publisert en veiledning for branndimensjonering av KLT-vegger og -tak [21]. Denne vil utgjøre bakgrunnsinformasjon ved revisjonen av EN 1995-1-2.

2.4 Byggeregler i Norge

Krav til brannsikkerheten i bygninger i Norge gis i TEK17. Forskriften er funksjonsbasert, men den gir også noen ytelseskrav på enkelte områder. Veiledningen til TEK17 oppgir preaksepterte ytelser som tilfredsstillende kravene i TEK17.

TEK17 krever at bygninger i brannklasse 1 og 2 (vanligvis bygninger med inntil fire etasjer) skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet, minimum i den tiden som er nødvendig for å rømme og redde personer og husdyr i og på byggverket.

Forutsetningene for å slokke en brann er bedre i lave enn i høye bygninger. Høyere bygninger (brannklasse 3 og 4) må kunne opprettholde sin bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, og verste mulige brannscenario må derfor vurderes. Det omfatter som regel at automatisk sprinkleranlegg ikke fungerer som forutsatt og at brannvesenets innsatspersonell ankommer sent, eller ikke kommer, til de delene av bygningen som brenner. For høye bygninger med trekonstruksjoner kan dette bety at bygget må prosjekteres slik at brannen slukker av seg selv og forkullingen av konstruksjonen stagnerer. Forskning har imidlertid vist at selvslukking ikke nødvendigvis er tilstrekkelig til å opprettholde konstruksjonens bæreevne i naturlig brann [22].

Videre i dette kapitlet kommenteres kravene og de preaksepterte ytelsene med hensyn til bruken av brennbare konstruksjoner i Norge.

2.4.1 Bæreevne og stabilitet

Konstruksjoners bæreevne og stabilitet er omtalt i §11-4 i TEK17 med veiledning. I bygninger i brannklasse 3, vanligvis bygninger med fem etasjer eller mer, er preakseptert ytelse for bærende og stabiliserende bygningsdeler at de er ubrennbare. Dersom man ønsker å bruke brennbare konstruksjoner, må analytisk brannteknisk prosjektering utføres. Konstruksjonen må da opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.

For ubrennbare konstruksjoner antas det at brannmotstand på 90 min er tilstrekkelig til å opprettholde bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. En av grunnene til at ubrennbare og brennbare konstruksjoner behandles ulikt, er at den brennbare trekonstruksjonen kan gi bidrag til brannen og påvirke brannforløpet, for eksempel med hensyn til brannens varighet og intensitet. Dersom deler av trekonstruksjonen er eksponert vil brannforløpet kunne vare lenger, men dersom trekonstruksjonen er tilstrekkelig tildekket, kan brannforløpet bli tilsvarende som for en bygning med ubrennbar konstruksjon. Mange brannforsøk har vist at massive trekonstruksjoner av KLT kan oppnå høy brannmotstand med hensyn til bærende funksjon, *R*.

2.4.2 Branncellebegrensede bygningsdeler

§11-8 i TEK17 omhandler branncellebegrensede bygningsdeler, og også her er preakseptert ytelse gitt i veiledningen til TEK17 at bygningsdeler i bygninger i brannklasse 3 skal være ubrennbare. Mange brannmotstandsforsøk viser imidlertid at konstruksjoner av KLT kan oppnå høy brannmotstand med hensyn til branncellebegrensende funksjon, *EI*.

2.4.3 Materialer og produkters egenskaper i brann

Veiledningen til TEK17 åpner for bruk av treoverflater i brannceller på inntil 200 m² i brannklasse 3, med unntak av i rømningsveier og i bygninger i risikoklasse 6 (bygninger for overnatting der personene ikke kjenner rømningsveiene, og ikke kan bringe seg selv i sikkerhet). Overflatene kan likevel påvirke brannforløpet i liten eller større grad.

2.4.4 Automatisk brannsløkkeanlegg

For noen bygninger krever TEK17 at automatisk brannsløkkeanlegg skal være installert, og veiledningen til TEK17 oppgir hvilke ulike typer automatiske sløkkeanlegg som er preakseptert i bygninger med ulike virksomheter.

Bygninger i risikoklasse 4 hvor det kreves heis (vanligvis bygninger med tre etasjer eller mer) skal ha automatisk sløkkeanlegg. Automatisk sløkkeanlegg skal også installeres i bygninger i risikoklasse 6.

I boligbygninger (risikoklasse 4) er sprinkleranlegg i henhold til NS-INSTA 900 [23] type 1, 2 eller 3 preakseptert, avhengig av antall etasjer.

I bygninger i risikoklasse 6 er sprinkleranlegg i henhold til NS-INSTA 900 eller NS-EN 12845 [24] preakseptert, avhengig av type bygning og antall etasjer. For overnattingssted, hotell, pleieinstitusjon, sykehjem og sykehus forutsettes sprinkleranlegg i henhold til NS-EN 12845. Noen av disse bygningene kan likevel ha anlegg av NS-INSTA 900 type 3 i beboelsesrom og tilhørende rømningsveier, men alle skal ha hurtigutløsende sprinklere for beboelsesrom og rømningsveier. Det forutsettes ikke bruk av anlegg med økt pålitelighet, som beskrevet i NS-EN 12845 Tillegg F.

I bygninger der det installeres et automatisk sprinkleranlegg i samsvar med de nevnte standardene, er det på noen områder mulig å velge reduserte preaksepterte ytelser uten at dette krever analyse. De reduserte preaksepterte ytelsene fremgår av veiledningen til TEK17.

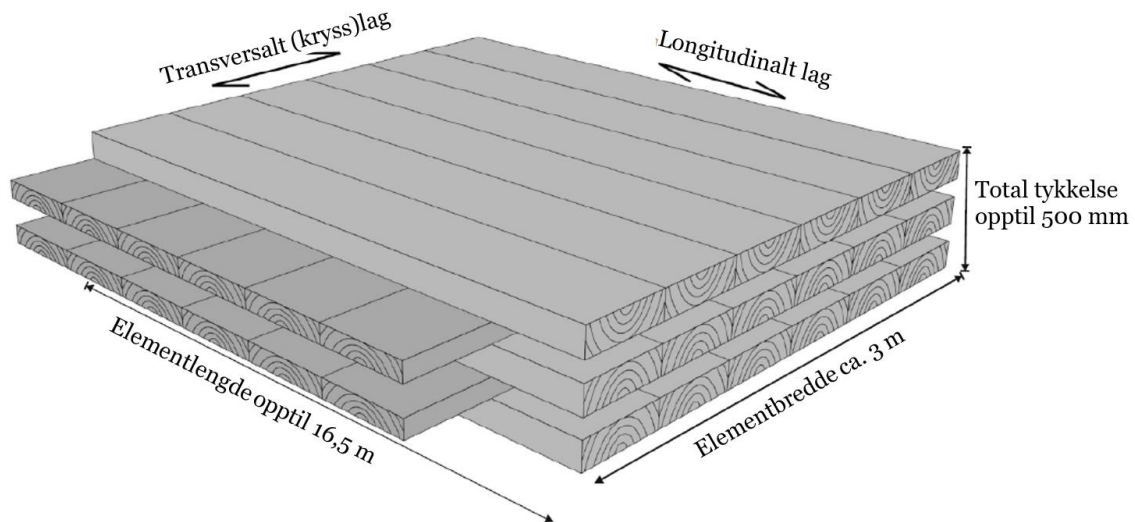
I bygninger der forskriften ikke stiller krav om et automatisk sløkkeanlegg, for eksempel i en kontorbygning (risikoklasse 2), kan eventuell reduksjon av (fravik fra) andre preaksepterte ytelser dokumenteres ved analyse.

Ved beregning av brannmotstand for bærende konstruksjoner, kan dimensjonerende spesifikk brannenergi etter nasjonalt tillegg til Eurokode 1 (NS-EN 1991-1-2 [25]) reduseres med inntil 40 % for bygninger med automatisk sløkkeanlegg, forutsatt at dette er vurdert og fremgår av brannsikkerhetsstrategien.

3 Teori

3.1 KLT som konstruksjonselement

KLT-elementer er konstruerte treprodukter som kan brukes som lastbærende vegger, gulv- og takelementer. KLT-elementer er satt sammen av planker, 10 – 40 mm tykke og 80 – 240 mm brede, som oftest av gran eller furu, men andre tresorter kan også benyttes. Antall lag varierer fra tre til ni, og det kan være ulik tykkelse på lagene i et element. Vanligvis festes lagene til hverandre med lim, men spiker og treplugger kan også brukes. Hvert lag er orientert på tvers av det tilstøtende. Resultatet er et todimensjonalt konstruksjonssystem som kan være lastbærende i to retninger (Figur 3-1) [26].



Figur 3-1. Skisse av KLT-element [26].

3.2 Brannsikkerhet i bygninger med KLT

Et hovedprinsipp innen brannsikkerhet er begrensning av spredning av brann og røyk ut av branncelle og eventuelt til andre bygninger. Konstruksjonens bæreevne og stabilitet og den branncellebegrensende evnen til vegg- og gulvelementer er derfor kritiske funksjoner ved brann. Disse egenskapene kan dokumenteres ved brannprøving og klassifisering etter standarder, eller beregnes etter standardiserte metoder.

Bygningsdeler av KLT-elementer kan oppnå høy bæreevne og branncellebegrensende funksjon ved branneksporing i standardiserte tester.

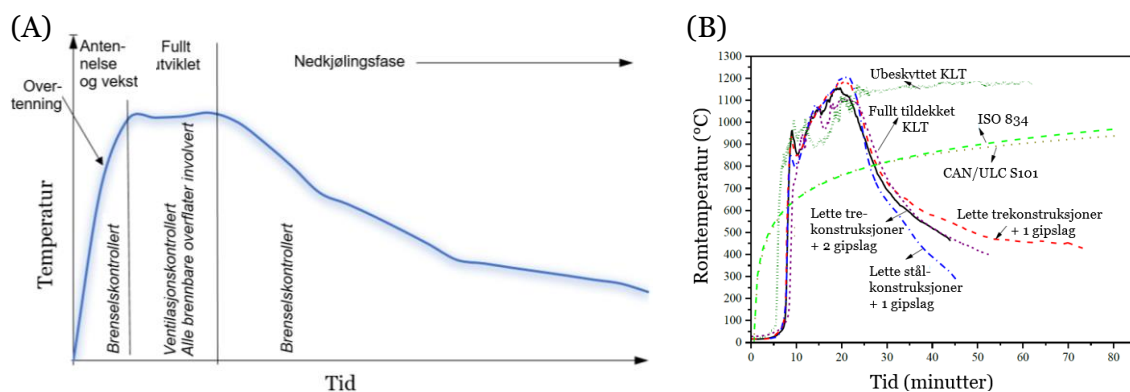
3.2.1 Brannutvikling

Utviklingen av en brann avhenger av flere faktorer [27]:

- Tennkilde
- Tilgang på brensel
- Oksygentilgang (åpninger i vegger/tak og størrelsen på disse)
- Forbrenningsvarmen til brenselet
- Mengde brensel
- Overflater på vegger, himling og gulv
- Beskyttelse av konstruksjonen
- Brennbarheten til konstruksjonen

I starten av en brann er tennkilden og type brensel viktig. Når flammene har «fått tak» er inventaret i rommet viktig for brannutviklingen. Etter hvert som brannen vokser, vil også overflatene på vegger, i himling og på gulv gi bidrag til brannen i form av varmeenergi og stråling. Ved en fullt utviklet brann vil alle flater i rommet avgi varme, og produksjonen av forbrenningsgasser er høy. Tilgangen på oksygen er da viktig for intensiteten og utviklingen av brannen. Brannen er ventilasjonsstyrt dersom det er lite tilgang på oksygen, og brenselstyrt dersom flammene får tilstrekkelig oksygen. En ventilasjonsstyrt brann kan gi store flammer ut gjennom vinduer og andre åpninger, fordi uforbrente branngasser presses ut av rommet.

Figur 3-2A viser et teoretisk eksempel på de tre fasene av brannutviklingen i et rom. Figur 3-2B viser temperaturutviklingen i reelle branner i rom med ubeskyttet og tildekket KLT, sammenlignet med standard brannkurve som benyttes i brannmotstandsprøving av bygningsdeler. I et naturlig brannforløp vil brannutviklingen kunne være annerledes enn ved standard brannpåkjenning, og det kan være lengre oppvarming, høyere temperaturer ved overtenning, og deretter en nedkjølingsfase. Konstruksjonen kan respondere annerledes, blant annet i form av en annen forkullingshastighet, og det kan oppstå spenninger og andre forhold i konstruksjonen ved nedkjølingen. Figur 3-2B viser at maksimaltemperaturene for ulike typer konstruksjoner kan være mye høyere ved naturlig brannpåkjenning enn ved standard brannkurve. Figur 3-2B viser videre at i et rom med ubeskyttet KLT vedvarte brannen lenge og fikk ingen nedkjølingsfase.



Figur 3-2. (A) De ulike fasene i brannutviklingen i et rom. (B) Temperaturutviklingen i en reell rombrann sammenlignet med standard brannkurve [28].

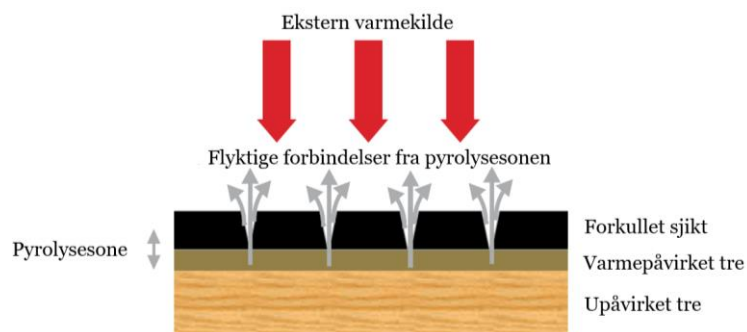
Kledninger har begrenset tykkelse, og dermed også begrenset påvirkning på brannen, men selve KLT-elementene kan gi store bidrag til brannenergien og brannutviklingen. I en bygnings levetid vil kledning på KLT-elementer kunne bli skadet på ulike vis, tilpasninger og ombygging vil gjennomføres, og beskyttelsen av trekonstruksjonen kan bli forringet. En skadet, eller på andre måter, endret beskyttelse kan føre til at KLT-konstruksjonen blir involvert i brannen. Dette kan resultere i økt varmeavgivelse, et lengre brannforløp, mer flammer ut av vinduer, høyere påkjenning på branncellebegrensende bygningsdeler, reduksjon i stabiliteten og bæreevnen til konstruksjonen, og til slutt kollaps av bygningen.

I tillegg til temperaturutviklingen, er varmeavgivelseshastigheten (HRR) i brannen viktig for å beskrive brannutviklingen i et rom. HRR beskriver varmemengden, eller energien, som avgis i brannen per tidsenhet, og forteller dermed hvor intens brannen er i de ulike fasene av brannen. I følge [29] er HRR den viktigste faktoren når man skal vurdere risikoen ved brann.

3.2.2 Forkulling og delaminering

Ved tilstrekkelig oppvarming (over 250 – 300 °C) starter en termisk degraderingsprosess, kalt pyrolyse, i trematerialet. I denne prosessen, skissert i Figur 3-3, produseres brennbare gasser, og massen til trevirket avtar. Et forkullet lag dannes på den branneksponeerte overflaten, og tykkelsen til kullet vokser underveis i brannen, mens tverrsnittet til det uskadete trematerialet reduseres. Forkullingsfronten defineres som regel ved målte 300 °C. Bæreevnen til konstruksjonen reduseres med minkende tverrsnitt, og laster omfordeles. Oppvarmingen av tverrsnittet og intern transport av fuktighet påvirker strekk- og trykkstyrken og skjærkapasiteten til konstruksjonsdelene [30].

Pyrolysen, og deretter forkullingen, av treet avhenger av branneksponeeringen i rommet, strålingen fra de varme røykgassene og strålingen fra brennende overflater i rommet. Kullet er en god isolator og beskytter trevirket som ikke er forkullet mot oppvarming. Treelementer med store tverrsnitt kan dermed inneha høy brannmotstand.



Figur 3-3. Illustrasjon av tverrsnitt av trebjelke med forkullet sjikt, pyrolysesone og friskt treverk [20] (gjengitt med tillatelse fra Forest and Wood Products Australia Limited).

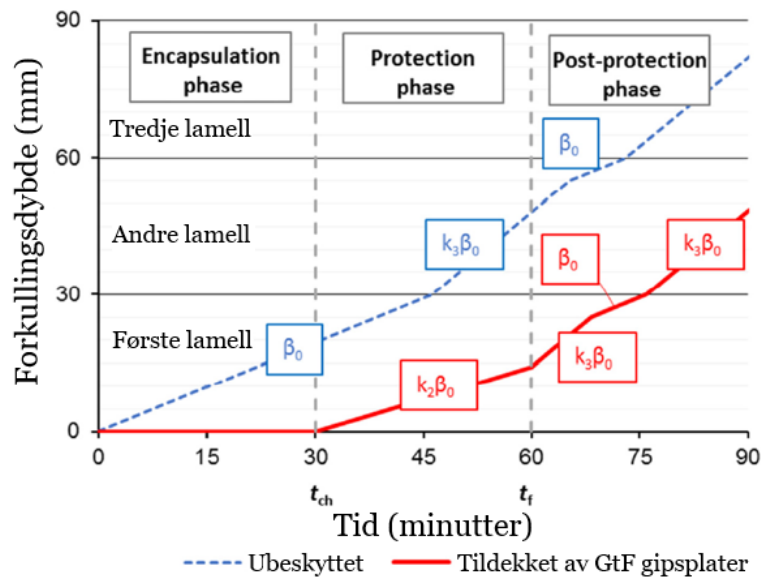
Mens lette trekonstruksjoner må tildekkes med trebaserte plater eller gipsplater for å hindre forkulling og påfølgende reduksjon av bæreevne og stabilitet, kan KLT-elementer være utildekket og direkte eksponert for flammene. Dette er fordi KLT-elementer har en iboende brannmotstand ved at materialet forkuller sakte, og ved at tverrsnittet kan reduseres mye før konstruksjonen kolliderer. KLT-elementer kan imidlertid påvirke

brannutviklingen negativt, ved at de kan øke varmeavgivelsen i rommet dersom de bidrar i forbrenningen.

Forkullingsegenskapene til KLT er annerledes enn for homogene trepaneler, fordi limlag og skjøter i KLT-elementene kan medføre økt forkulling [30]. Klippel et al. oppsummerer senere års brannforsøk av KLT vegg- og gulvelementer, der blant annet forkullingsegenskapene er dokumentert [26]. Forkullingen kan påvirkes av mange ulike faktorer, som materialegenskaper og geometrien til KLT-elementet, dvs. utforming, oppbygging (lamellenes antall og tykkelser), grad av beskyttelse, åpenrom mellom lameller, sprekker, sammenføringer, bruk av metallinnfesting, oksygentilgang m.m.

Forkullingsegenskapene beskrives vanligvis med forkullingshastigheten for éndimensjonal forkulling, β_0 , som referanse. Forkullingshastigheten angir tiden det tar å forkulle treverket gradvis lengre innover, vekk fra brannen. β_0 varierer for ulike treprodukter i henhold til EN 1995-1-2. Beregningsmodeller for forkulling for KLT-elementer er viktig for enkel beregning av brannmotstand, og vil komme med i den reviderte EN 1995-1-2.

Tildekking av KLT-elementene har påvirkning på forkullingshastigheten. Små- og stor-skala eksperimenter med standard og naturlig brannpåkjenning har vist stor variasjon i målte forkullingshastigheter for trevirke med ulike typer tildekning, som oppsummert i [2]. Figur 3-4 viser at ulike forkullingshastigheter kan gjelde, avhengig av om KLT-elementet er tildekket i utgangspunktet eller ikke.



Figur 3-4. Eksempler på forkullingsscenarier for KLT-elementer uten gipskledning (blå, stiplet linje) og med kledning (rød, heltrukket linje). Figuren viser forkullingsdybder gjennom første, andre og tredje lamellag per tid. t_{ch} er starttidspunkt for forkulling og t_i er forkullingstid. «Encapsulation phase»: forkulling er ikke oppstått. «Protection phase» (beskyttelsesfase): Forkulling oppstår bak kledning. «Post-protection phase»: Kledning har falt ned. [31]

KLT som er beskyttet med kledning forkuller ikke i starten av brannen, og forkullingshastigheter starter saktere bak beskyttede strukturer (beskyttelsesfase), som vist i Figur 3-4. I noen tilfeller vil forkulling av KLT-elementene kunne starte mens kledningen fortsatt henger på plass, mens i andre tilfeller oppstår ikke forkulling før kledningen er ødelagt av brannen. Dette er avhengig av kledningens type og tykkelse, og antall lag med kledning.

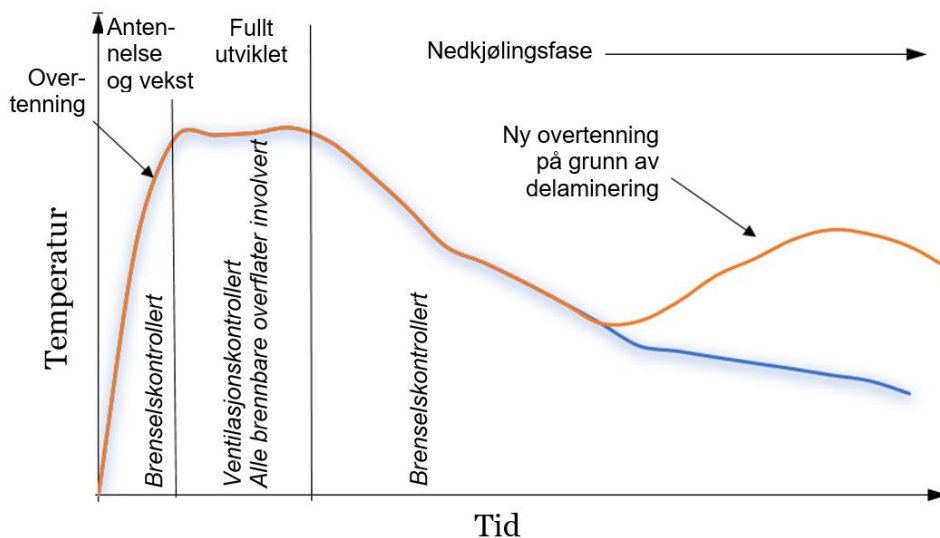
Når tildekkingen først faller av, går forkullingen mye raskere enn for KLT som er ubeskyttet i utgangspunktet, fordi temperaturen i rommet har blitt høyere. Starttiden av forkullingen og tiden til nedfall, dvs. når tildekkingen faller av, er derfor viktige parametre i prosjektering av beskyttede KLT-konstruksjoner [18].

Nedfallstider for platekledninger som følge av termisk nedbrytning kan variere for ulike produkter og for ulike typer av gipsplater. For enkle gipsplater uten brannklassifisering, som antas ikke å ha beskyttelsesfase, er starttiden for forkulling antatt å være lik nedfallstiden til gipsplaten. Imidlertid vil flere lag med denne typen gipsplater, eller bruk av brann-gipsplater, gi en tydelig forsinkelse mellom nedfall av kledning og starten på forkulling [18].

EN 1995-1-2 oppgir en forkullingshastighet på $\beta_o = 0,65$ mm/min for bruk i brann-dimensjonering for éndimensjonal forkulling av ubeskyttet tre. Hvis treet er tildekket kan to scenarier oppstå. Forkulling starter enten når beskyttelsen faller av, eller før nedfall av beskyttelsen. Ved naturlig brannpåkjenning foregår det en kontinuerlig oppvarming før en avkjølingsfase. Forkullingshastigheten antas da konstant inntil starten av avkjølingsfasen, og deretter antas den å avta lineært til null [32].

Etter hvert som treverket forkulles, kan det også oppstå delaminering og nedfall av forkullet sjikt. Delaminering skjer når en eller flere lameller av KLT-elementet faller av. Friskt trevirke kan bli avdekket og føre til oppblussing av brannens intensitet, med ny økning i HRR og mer KLT involvert i brannen [26,32–34]. Delamineringen endrer altså brannforløpet, og fører til raskere forkulling og reduksjon av tverrsnittet, noe som igjen påvirker bæreevnen og stabiliteten til konstruksjonen. Forkullingshastigheten er altså ikke konstant underveis i et brannforløp.

Sekundær oppflamming og eventuelt overtenning er illustrert i Figur 3-5. Dette kan oppstå dersom eksponert KLT delaminerer, brannbeskyttelsen på KLT-elementene faller ned, eller store deler av kullsjiktet faller ned.



Figur 3-5. Brannforløp. Blå kurve viser eksempel på temperaturutvikling for brannrom uten eksponert tre, eller med mindre flater eksponert. Oransje kurve viser eksempel på temperaturutvikling når eksponert KLT delaminerer eller beskyttelsen på de tildekkede overflatene svikter.

3.2.3 Selvslokking

Selvslokking betyr at brannen dør ut, selv om alt brennbart materiale ikke er forbrent.

Brennende flater avgir varmestråling til andre flater i rommet. Strålingen mellom ulike flater påvirker varmen og forbrenningen i konstruksjonen, og kan gi en langvarig brann dersom strålingen er høy nok til å opprettholde forkulling i trekonstruksjonen.

Pyrolyse fortsetter så lenge strålingsintensiteten er tilstrekkelig høy, men dersom strålingen har for lav intensitet, stopper pyrolysen. Hvis trekonstruksjonen beskyttes med kledning og isolasjon, og slik gir beskyttelse lenge nok til å forhindre pyrolyse og forkulling i trekonstruksjonen inntil alt brennbart materiale i rommet har brent opp, vil brannen slokne av seg selv. Alternativt kan man tillate at noe pyrolyse og forkulling oppstår. I det siste tilfellet må konstruksjonens påvirkning på brannutviklingen vurderes, konstruksjonens bæreevne og stabilitet må kontrolleres, og bygningsdelenes branncellebegrensende funksjon må fortsatt opprettholde nødvendig nivå.

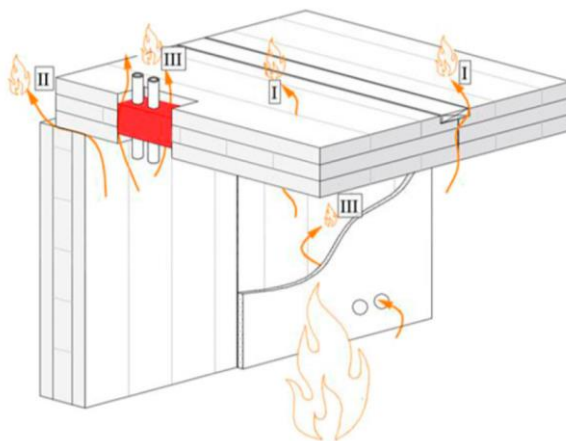
Det er foreløpig lite kunnskap om mekanismene som forårsaker selvslokking.

3.2.4 Detaljløsninger

Branntester har vist at detaljløsninger kan være svake punkter for gjennomtrenging av brann og røyk [32,34]. KLT-elementer settes sammen ved bruk av ulike detaljløsninger som kan bestå av tre eller stål. Stål som blir eksponert for høye temperaturer mister raskt sin styrke ved oppvarming og kan også spre brannen i trevirke, og stålet må derfor beskyttes mot oppvarming. Gjennomføringer av eksempelvis serviceinstallasjoner er uunngåelig i en bygning. Det er viktig å sørge for tilstrekkelig brannbeskyttelse av gjennomføringer og sammenføyninger for å unngå brannspredning ut av branncellen.

For konstruksjoner som inneholder KLT, må hovedsakelig følgende tre potensielle flammespredningsveier, vist i Figur 3-6, tas hensyn til ved brannteknisk prosjektering:

- I. Skjøter i og mellom planet i prefabrikkerte KLT-elementer
- II. Hjørneskjøter mot andre bygningsdeler
- III. Gjennomføringer (f.eks. serviceinstallasjoner)



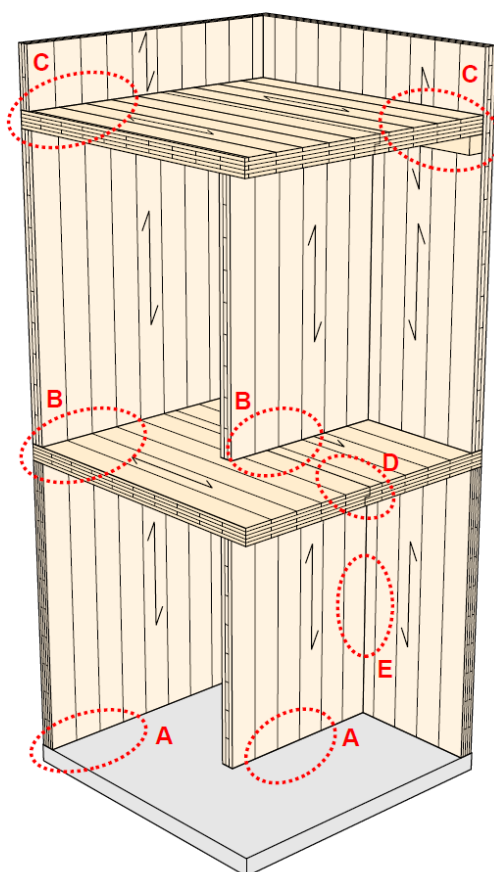
Figur 3-6. I bygninger med KLT kan flammer spres via skjøter i planet til det prefabrikkerte elementet (I), via skjøter mot andre KLT-elementer eller andre bygningsdeler (II) og via serviceinstallasjoner og gjennomføringer (III) [18].

Spredning via flammespredningsvei I (Figur 3-6) kan evalueres ved bruk av standardiserte branntester. For å evaluere funksjonen til slike skjøter, brukes kravet om isolasjonsevne og integritet (EI) for å sikre at temperaturen på ikke-eksponert siden ikke øker mer enn 180 °C relativt omgivelsestemperaturen, og at ikke varme gasser antenner objekter på ueksponert side. For å evaluere funksjonen til flammeeksponerte hjørneskjøter (flammespredningsvei II), finnes ingen standardiserte testmetoder.

Fernando et al. deler forbindelser for skjøter i to hovedkategorier [35]:

- Skruer
- Metallbraketter og tredimensjonale spikerbeslag

Figur 3-7 skisserer typiske skjøter i KLT-konstruksjoner. I tillegg finnes det sammenføyninger som er dimensjonert for spesielt konsentrert last.



Figur 3-7. Typiske skjøter i KLT-konstruksjon: A: KLT-vegg til betong; B: KLT-vegg til KLT-tak; C: Tak til parapet; D: Skjøter mellom elementer; E: Sammenføyning i hjørne i vegg [35].

Servicegjennomføringer gjennom KLT-elementene er nødvendige, men bør unngås så langt det er mulig. Inntil i dag er testede og godkjente løsninger for brannsikre serviceinstallasjoner i trekonstruksjoner sjeldne, og kommer sakte på markedet, selv om de kan testes i henhold til EN 1366-3. Denne standarden beskriver imidlertid ikke KLT. Gjennomføringer finnes i mange ulike varianter med egne spesifikke karakteristikk. Eksempler er brannklassifiserte kanaler, brannspjeld, enkle kabler, kabelbunter/-renner, plast/stålrør og samlinger av ulike gjennomføringer. Det finnes derfor ikke én enkel løsning som kan beskytte alle typer gjennomføringer mot brannspredning.

3.2.5 Oppsummering av brannsikkerhetsmessige utfordringer

Brannsikkerhetsmessige utfordringer ved bruk av KLT i bygninger:

- Konstruksjonen er brennbar.
- Det kan oppstå delaminering og nedfall av kullsjikt.
- Det kan være skjulte hulrom i konstruksjonen (selv om det er mindre av dette i bygninger med KLT-elementer enn i bygninger med lette trekonstruksjoner).
- Gjennomføringer og sammenføyninger er potensielle spredningsveier for flammer og røyk.
- Brannrådgivere har ikke nødvendige verktøy og metoder for blant annet å kunne bestemme brannscenarier og dimensjonere konstruksjonen for bygninger med eksponert KLT.

4 Nyere forskning (2010 - 2018)

Et utvalg store forskningsprosjekter og brannforsøk utført i perioden 2010 – 2018 presenteres kort i dette kapitlet og beskrives i mer detalj i vedlegg A. Resultater fra brannforsøkene og annen forskning diskuteres i kapittel 5.

Det er gjennomført flere store forskningsprosjekter de siste årene der brannegenskapene til KLT-konstruksjoner er studert, de fleste med fokus på høye eller mellomhøye bygninger. Mange storskalaforsøk på rombranner med eksponert KLT er utført, for eksempel i Europa, Australia, USA og Canada, og informative småskaletester er også gjennomført. Målet med forsøkene har vært å forstå hvordan eksponert tre påvirker utviklingen og varigheten av en brann, og også forstå effekten av ulik beskyttelse av KLT-elementene. Prosjektene har hatt som hovedmål å utvikle kunnskap, verktøy og metoder for prosjektering og dimensjonering av bygninger med KLT-konstruksjoner, og å utvikle detaljløsninger med tilfredsstillende brannegenskaper.

Problemstillinger det er forsket på:

- Trekonstruksjonens påvirkning på brannutviklingen.
- Forkullingshastigheter for ulike konstruksjonsprodukter av tre ved standard og naturlig brannpåkjenning.
- Årsaker til delaminering.
- Forhold som gir selvslukking av brannen i startbrannrommet.
- Brann- og røykspredning via detaljløsninger.

Forskningsprosjektene har økt kunnskapen om brann i trebygninger, og har bidratt til utforming av detaljløsninger og utvikling av modeller for funksjonsbasert prosjektering. De fleste lands byggeregler har i omtrent 100 år forhindret bruk av trekonstruksjoner i bygninger med mer enn to til tre etasjer på grunn av brannegenskapene til materialet. Resultatene fra forskningsprosjektene har i flere land (f.eks. Canada, USA og Australia) ført til endringer i byggereglene, med utvikling av preaksepterte ytelser og løsninger for å oppnå tilfredsstillende brannsikkerhet ved bruk av trekonstruksjoner i mellomhøye [13] og høye bygninger [36].

Følgende omfattende prosjekter er gjennomført siste årene eller er under arbeid:

- Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings (2018), USA [37]
- The Timber Tower Research Project (2013), USA [38]
- Research Consortium for Wood and Wood-Hybrid Mid-rise Buildings (2014), Canada [39]
- Tall Wood Buildings in Canada (2014), Canada [40,41]
- Fire Safety of Modern Timber Infrastructure (pågående), Skottland [42]
- Use of Timber in Tall Multi-Story Buildings (2014), Sveits og Tyskland [43]
- Brandsäkra trähus v.3 (2012), Norden og Baltikum [44]
- Fire Safety in Timber Buildings – Technical Guideline for Europe (2010), Europa [7]
- Fire Safety in Mid-Rise Timber Buildings (2017), Australia [14]

I tillegg er det gjennomført mye forskning i flere europeiske land. Forskningen har hatt synergier med nettverket COST FP1404, som ble avsluttet i 2018. Dette arbeidet har resultert i at retningslinjer er blitt utarbeidet og publisert i 2018, blant annet Guidance document - Fire design of KLT incl. best practice [21].

Informasjon om forsøkene er beskrevet i Tabell 4-1.

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Rom-dimensjoner	Eksponerte overflater			Ventilasjons-åpning	Påført last	Brann-energi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
Estland (se vedlegg A.1.1) Ref: [45,46]	1	2-etasjes hus.		Grunnflate 3,5×4,5 m ²	Vegger	2 i hver etasje	20,25 m ²	0,072 m ^{1/2}		600 MJ/m ²	Lameller 40/30/20/20/20 mm. Tykkeste lamell på eksponeringsside.	Nei. Nedkjøling før delaminering og sekundær overtenning 2 timer etter teststart. Påfølgende manuell slokking.
Skottland (se vedlegg A.1.2) Ref: [42,47]	5	Små rom. Liten ventila-sjonsåpning.	Alpha-1	2,72×2,72 ×2,77 m ³	Bakvegg og sidevegg	2	15 m ²	Døråpning: 1,84×0,76 m ² . Åpningsfaktor: 19 m ^{-1/2}	Nei	132 MJ/m ²	Massivtre var beskyttet med 2×12,5 mm brann-gips Type F, pluss 50 mm stein-ullisolasjon og ett gipsplatelag ekstra (unntatt i Alpha-1). Golvet var dekket med steinull-isolasjon. Lameller 5×20 mm.	Delvis nedkjøling. Sekundær overtenning, 43,5 min.
			Alpha-2		Bakvegg og sidevegg	2	15 m ²					Delvis nedkjøling. Sekundær overtenning, 45 min.
			Beta-1		Bakvegg og himling	2	14 m ²					Ja
			Beta-2		Bakvegg og himling	2	14 m ²					Sekundær overtenning, 20 min.
			Gamma		Bakvegg, sidevegg og himling	3	22 m ²					Vedvarende brann.

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner forts.

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Rom-dimensjoner	Eksponerte overflater			Ventilasjons-åpning	Påført last	Brann-energi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
Skottland (se vedlegg A.1.2) Ref: [48]	5	Småskala	Alpha (lav brann-energi)	637,5×660 ×637,5 mm ³	Bakvegg og sidevegg	2	0,83 m ²	Åpningsfaktor: ~23,5 m ^{-1/2}	Nei	47,3 MJ/m ²	Massivtre var beskyttet med brangips Type F og mineralull som i [47].	Sekundær overtenning, 43 min.
			Alpha (medium brann-energi)		Bakvegg og sidevegg	2	0,83 m ²			104 MJ/m ²		Sekundær overtenning, 90 min.
			Beta (lav brann-energi)	575×660 ×700 mm ³	Bakvegg og himling	2	0,78 m ²			47,3 MJ/m ²		Ja
			Beta (medium brann-energi)		Bakvegg og himling	2	0,78 m ²			104 MJ/m ²		Ja
			Beta (høy brann-energi)		Bakvegg og himling	2	0,78 m ²			277 MJ/m ²		Vedvarende brann.
Nederland (se vedlegg A.1.3) Ref: [49]	5	Små rom	2.1	0,5×0,5 ×0,5 m ³	Bakvegg	1	0,25 m ²	Åpning: 900 cm ³	Nei	41 kW	Lameller 5×20 mm.	Ja
			2.2		Bakvegg og sidevegger	3	0,75 m ²			41 kW		Vedvarende brann.
			2.3		Sidevegger	2	0,5 m ²			41 kW		Sekundær overtenning.
			2.4		Sidevegger	2	0,5 m ²			41 kW		Ja
			2.5		Sidevegger	2	0,5 m ²			41 kW		Lameller 40/20/20/20/40 mm.

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner forts.

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Rom-dimensjoner	Eksponerte overflater			Ventilasjons-åpning	Påført last	Brann-energi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
Norge (se vedlegg A.1.4.1) Ref: [50]	2	Hybel med korridor utenfor.	Test 1	5,75×2,3 ×2,75 m ³	Vegg	1	575×280 cm ²	Døråpning 1,8 m ² .	Nei	8735 MJ	Lameller 20/20/ 20/20/20 mm.	Effektiv slokking med sprinkler. Små rester av brann manuelt slokket.
			Test 2						Nei			Deaktivert sprinkler. Ikke selvslokking. Brann til overtenning. Manuell slokking.
USA Forest Products Laboratory (se vedlegg A.2.1.1) Ref: [51]	5	Leilighet med stue/kjøkken, soverom, bad og korridor utenfor.	Test 1	Leilighet: 9,14×9,14 ×2,74 m ³	Beskyttet.	0	0	Store åpninger i stue/soverom med totalt areal 17,8 m ² . Dør lukket.	Nei	550 MJ/m ²	Massivtre var beskyttet med 2×15,9 mm branngips Type X. Gulv beskyttet med 2×12,7 mm. Sementbaserte plater. Lameller 5×35 mm.	Ja
			Test 2		Delvis himling på stue og soverom.	1*	16,714 m ²		Ja			Ja
			Test 3		Én vegg på stue og soverom.	2*	16,714 m ²		Ja			Ja
		Test 4	Én vegg på stue og soverom, himling i stue og soverom, bjelker/søyler.		3*	~41 m ²	Vinduer montert i åpninger, dør lukket.	Nei	Sprinkler			
		Test 5			3*	~41 m ²	Åpninger dekket med vinduer. Åpen dør, areal 1,9 m ² .	Nei	Sprinkler utløst etter 23 min.			

* De eksponerte overflatene var i to ulike rom.

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner forts.

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Rom-dimensjoner	Eksponeerte overflater			Ventil-asjons-åpning	Påført last	Brann-energi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
USA NIST/NRC (se vedlegg A.2.1.2) Ref: [52]	6	Stort rom innredet med stue, kjøkken og seng.	Test 1-1	9,1×4,6 ×2,7 m ³	Beskyttet.	0	0	3,6 m ²	0,95 kN/m ² (20-psf)	550 MJ/m ²	Massivtre var beskyttet med 2 og 3×15,9 mm branngips Type X. Gulv var plater av OSB (Oriented Strand Board). Lameller 5×35 mm.	Ja
			Test 1-2		Beskyttet. Gipslag: 3 i himling, 2 på vegger.	0	0	7,2 m ²				Ja
			Test 1-3		1 langvegg eksponert, Gipslag: 3 i himling, 2 på vegger.	1	21%	7,2 m ²				Sekundær oppflamming, 80 min.
			Test 1-4		Himling eksponert. 3 lag gips på vegger.	1	36%	3,6 m ²				Sekundær oppflamming, 150 min.
			Test 1-5		1 langvegg eksponert. 3 lag gips på andre vegger og i himling.	1	21%	3,6 m ²				Sekundær oppflamming, 150 min.
			Test 1-6		1 langvegg og himling eksponert. 3 lag gips på de andre veggene.	2	57%	3,6 m ²				Vedvarende brann.
USA SwRI (se vedlegg A.2.2) Ref: [53]	2	Ett mellomstort rom innredet som stue.	Test 1	4,11×3,60 ×2,38 m ³	Beskyttet.	0	0	1,87×2,07 m ²	Ja	570 MJ/m ²	Massivtre og gulv var beskyttet med 2×16 mm branngips Type X.	Selvslokking
			Test 2		Beskyttet	0	0					Ja

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner forts.

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Romdimensjoner	Eksponeerte overflater			Ventilasjonsåpning	Påført last	Brannenergi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
Canada Carleton University (se vedlegg A.3.1) Ref: [28]	10	Mellomstort rom.	Test 1 (KLT)	4,5×3,5 ×2,5 m ³	Alle vegger og himling.	5		1,0×2,0 m ²	Nei	753 MJ/m ² (propan)	Massivtre var beskyttet med 2×12,7 mm branngips Type X. Gulv dekket med 19 mm parkett av lønn. Lameller 5×35 mm.	(Referanserom)
			Test 2 (KLT)		Beskyttet.	0	0		Nei			Vedvarende brann.
			Test 3 (KLT)		Alle vegger og himling.	5			Nei	Ja		
			Test 4 (KLT)		Beskyttet.	0	0		Nei	Sekundær overtenning, 75 min		
			Test 5 (KLT)		2 eksponerte vegger, innvendig hjørne.	2	52,8 %		Nei	Sekundær overtenning, 45 min.		
			Test 6 (KLT)		2 eksponerte vegger, motstående.	2	59,4 %		Nei	Ja		
			Test 7 (KLT)		1 vegg.	1	29,7 %		Nei	Ja		
			Test 8 (treramme)		Beskyttet, 2 lag gips.	0	0		Nei	Ja		
			Test 9 (treramme)		Beskyttet, 1 lag gips.	0	0		Nei	Ja		
			Test 10 (stålramme)		Beskyttet, 1 lag gips.	0	0		Nei	Ja		

Tabell 4-1. Informasjon om forsøk på rombranner forts.

Forsøk	Antall forsøk	Beskrivelse	Testserie	Rom-dimensjoner	Eksponerte overflater			Ventilasjons-åpning	Påført last	Brann-energi	Annet	Selvslokking
					Overflater	Ant	Areal					
Canada NRC (se vedlegg A.3.2) Ref: [39]	4	3 etasjes hus. Leilighet med flere rom (stue/kjøkken, soverom, bad, gang).	LWF1 (bindingsverk)	8,51×6,55 × 2,44 m ³	Beskyttet. 2 × 12,7 mm branngips på front- vegg.	0	0	Åpninger på stue og sove- rom. Totalt areal 4,5 m ² .	Egen- last, flere etasjer.	Som i vanlig leilighet.	Alle konstruksjoner og himling var beskyttet med 2×12,7 mm branngips. Lettvegg i alle forsøk var beskyttet med 1×12,7 mm branngips. Gulvet var sementbaserte plater. Parkett var lagt påover platene, unntatt for LSF.	Vedvarende brann.
			LWF2 (bindingsverk)		Beskyttet. 1×12,7 mm branngips på front- vegg.	0	0					Vedvarende brann.
			KLT (massivtre)		Beskyttet. 2×12,7 mm branngips på front- vegg.	0	0					Veldig sakte nedkjøling som stagnerte.
			LSF (tynnstål- profiler)		Beskyttet. 1×12,7 mm branngips på front- vegg.	0	0					Selvslokking.
	1	Enkelt- stående soverom.	PRF-03	3,81×4,43 ×2,44 m ³	Beskyttet. Stålramme (2 lag branngips).	0	0	Areal 2,25 m ² .		Sementbaserte plater uten parkett, som for LSF.	Ikke relevant.	
Australia (se vedlegg A.4) Ref: [54]	1	Mellomstort rom.		3,5×3,5 × 2,7 m ³	Sidevegg og himling eksponert.	2		Areal 1,78 m ² .	Nei	80 kg trelekter.	Massivtre var beskyttet med 2×13 mm branngipsplater. Lameller 45/20/ 20/20/45 mm.	Ja

5 Diskusjon og oppsummering

I denne litteraturstudien har vi sett på flere store brannforsøk utført i rom med eksponert KLT: Ett utført i Estland [45,46], fem i Skottland [42,47], fem i Nederland [49], to i Trondheim [50], 13 i USA [51–53], 15 i Canada [28,32,39,55,56], ett i Australia [54,57]. Mange av forsøkene er utført i små rom, men i noen forsøk er brannrommene store, og det er også utført forsøk i leiligheter med flere rom og korridor utenfor leiligheten, og i oppsett med flere etasjer. Informasjon om, og resultater fra, testene er presentert i Tabell 4-1 og i vedlegg A.

I løpet av årene 2014 – 2018 har det også pågått mye arbeid i nettverket COST FP1404 for å få frem mer kunnskap om brannegenskapene til KLT som byggemateriale generelt og som konstruksjonsmateriale. Parallelt har det pågått standardiseringsarbeid i arbeidsgruppen CEN TC 250/SC5/WG4 EN 1995-1-2 Eurocode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering. Arbeidet i COST FP1404 og CEN har vært koordinert, og mange av resultatene presentert gjennom COST FP1404 vil danne grunnlag for endringer i EN 1995-1-2.

I dette kapittelet oppsummeres og diskuteres resultater fra brannforsøk og annen relevant litteratur om hvordan eksponert KLT og detaljløsninger påvirker brannutviklingen i et rom. Videre pekes det på fortsatte kunnskapshull.

5.1 KLT-konstruksjoners påvirkning på brannutviklingen

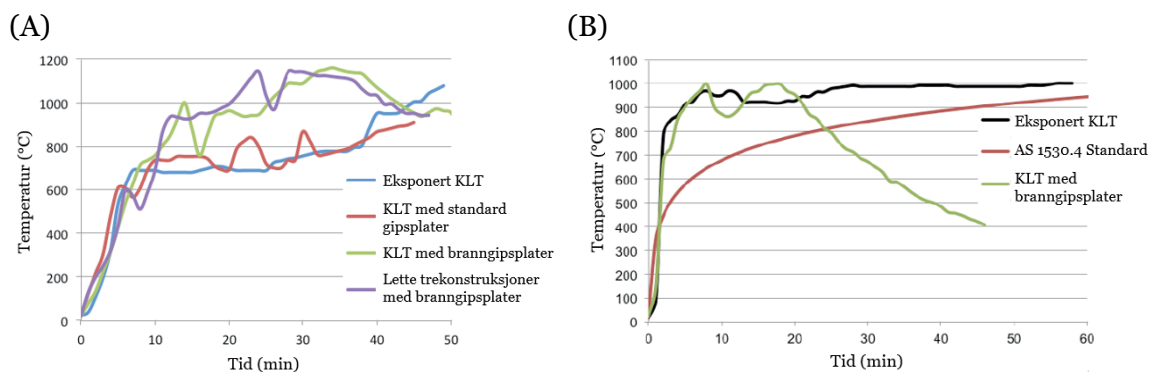
5.1.1 Brannutvikling

Antennelseskilde, møbler og inventar har stor innvirkning på brannutviklingen i starten, men etter overtenning, når alt brennbart materiale i rommet bidrar og strålingen er intens, er det overflatene som har størst påvirkning. Dersom trekonstruksjonen er eksponert, vil den bli involvert i brannen etter overtenning, noe som kan resultere i en mer langvarig fase der brannen er fullt utviklet, og at nedkjøling ikke starter før konstruksjonen er nesten utbrent.

Sammenlignet med lette trekonstruksjoner beholder massive trekonstruksjoner, som KLT, sin bæreevne og stabilitet lenge ved branneksposering. Dette skyldes at massivtre forkuller sakte, og bæreevnen reduseres derfor også sakte. Konstruksjoner av KLT har i tillegg få hulrom der en brann kan utvikle seg uoppdaget.

Mye forskning de siste årene har hatt som mål å avdekke hvordan eksponert KLT påvirker brannutviklingen. Blant annet har andelen eksponerte overflater og konfigurasjonene av de eksponerte overflatene vært studert. Resultatene viser at andelen og plasseringen av eksponert KLT er avgjørende for hvor stor påvirkning trekonstruksjonen har på brannutviklingen.

Brannforsøk utført av Hakkarainen i 2002 [58] viste at temperaturer i rom med eksponert eller delvis beskyttet KLT kan være lavere enn for fullt beskyttet KLT eller lette trekonstruksjoner i de første 30 min etter overtenning, som vist i Figur 5-1A. På den andre siden viste McGregor i 2013 [32] at KLT som var beskyttet ikke bidro til brannen, som for øvrig avtok, mens for rom med eksponert KLT på alle veggoverflater og i himling varte fullt utviklet brann inntil testen ble avsluttet, som vist i Figur 5-1B.



Figur 5-1. Gjennomsnittlige temperaturer i rombrann med og uten gipskledning i to ulike studier, henholdsvis (A) og (B) [20] (gjengitt med tillatelse fra Forest and Wood Products Australia Limited).

Barber studerte brannforsøk fra Europa og Canada, og resultatene viste at det var behov for flere forsøk for å utvide kunnskapen om delaminering, hvordan ulik plassering av eksponerte flater påvirker brannutviklingen og hvordan luftstrømmen inn i rommet påvirker varmeavgivelsen fra KLT-elementene [59]. De få forsøkene som var utført, var ikke tilstrekkelig til å konkludere med hvor mange flater og hvor store arealer som kan eksponeres uten at det påvirker brannutviklingen i et så stort omfang at det må tas hensyn til i prosjekteringen. Forsøkene viste imidlertid at himlingen er mer sårbar enn veggene, og får blant annet høyere forkullingshastighet når den er eksponert. Dette følger av at temperaturene er høyere i de øverste sjiktene i rommet.

Barber et al. pekte på flere kunnskapshull. De understreket behovet for å utvide metodene som ble benyttet for å beskrive brannutviklingen i brannrom, og for å bestemme scenarier som omfatter bygninger med eksponerte trekonstruksjoner. De mente også at flere brannforsøk i stor- og småskala med ulike konfigurasjoner av eksponerte overflater og størrelser var nødvendig for å bekrefte tidligere forsøksresultater, og for å verifisere de nye metodene som var utviklet for å analysere selvslokking og brannutvikling. Det manglet kunnskap om hvordan brennende og glødende KLT-elementer kan påvirke forkullingen av inntilliggende trekonstruksjoner som bjelker og søyler, og det ble påpekt at forskning på området er viktig for at man skal kunne ta med denne effekten inn i dimensjoneringen av hele konstruksjonen. Mange forskningsprosjekter og storskalaforsøk som er utført de siste to årene, har hatt som mål å tette disse kunnskapshullene.

Sammenlignet med ubrennbare overflater, er det blant annet vist at eksponert KLT kan påvirke brannutviklingen som følger [17]:

- Store eksponerte overflater kan gi raskere brannutvikling og overtenning.
- Økt produksjon av branngasser og røyk på grunn av høyere brannenergi.
- Økt total HRR på grunn av høyere brannenergi.
- Mer langvarig brann.
- Sekundær overtenning og lengre brannforløp på grunn av delaminering.
- Fare for at brannen ikke kan slokkes eller ikke slokner av seg selv, noe som kan medføre at konstruksjonen kollapser.
- Større og mer intense flammer og høyere varmekraft på fasaden, som følge av at en fullt utviklet brann vanligvis er ventilasjonskontrollert og kan føre til forbrenning av branngassene utenfor branncellen.

Forsøkene utført av Li et al. [28] samsvarer med funn fra tidligere studier [58,60], som også viser at eksponert KLT kan gi økt forbrenning av branngasser utenfor brannrommet, og dermed høyere brannpåkjenning på fasaden.

Brannforsøkene viser at dersom bare *én trevegg* er eksponert, uansett størrelse i forhold til totalt overflateareal, kan overtenning oppstå litt tidligere enn i et rom med fullstendig beskyttet KLT eller med ubrennbare konstruksjoner [28,49,52]. En fullt utviklet brann vil vare bare en kort stund. Deretter synker temperaturen i rommet, og flammene ut gjennom vindu og andre åpninger blir mindre og kan forsvinne. Varigheten av denne nedkjølingsfasen og hvor raskt temperaturen synker, er avhengig av om KLT-elementene delaminerer og om beskyttelsen på KLT-konstruksjonen ellers har god brannmotstand. Sekundær overtenning eller oppflamming kan oppstå, men forsøkene viser at det tar lang tid før dette eventuelt inntreffer. I rom med bare én vegg eksponert vil ikke varme-strålingen til KLT-veggen etter at inventaret er utbrent være tilstrekkelig til å opprettholde pyrolysen i treet, og brannen selvslukker. Dette er et ønsket brannscenario i bygninger med konstruksjoner av KLT, men forutsetter at lamellene ikke er for tynne og fører til at delaminering oppstår tidlig i brannforløpet, og at beskyttelsen på de andre KLT-overflatene har lang nok brannmotstand.

Forsøk med flere eksponerte KLT-overflater har gitt varierende resultater.

For rom der *to vegger i innvendig hjørne* var eksponert, indikerer resultatene at brannen går inn i nedkjølingsfasen, men sekundær overtenning eller oppflamming kan oppstå etter noe tid [28,47]. Tiden til sekundær overtenning varierte fra 43 til 90 minutter. I forsøkene utført av Hadden et al. [47] var beskyttelsen av KLT bedre, men sekundær overtenning oppsto tidligere enn i forsøkene utført av Li et al. [28]. Den tidligere sekundære overtenningen kan ha vært forårsaket av at lamellene bare var 20 mm tykke, mot 35 mm i forsøkene utført av Li et al. Tynne lameller kan gi raskere dannelse av røyklag i taket, og dette laget vil gi tilbakestråling til veggene. Hadden et al. mente at himlingen fungerte som en tredje eksponerte overflate og resulterte i mer stråling. Limtypen, lamelltykkelsen og beskyttelsen på de ueksponerte overflatene vil også være viktige faktorer for å unngå sekundær oppflamming.

I forsøket der *to vegger rett overfor hverandre* var eksponert, så det ut til at strålingen mellom veggene var så intens at den opprettholdt pyrolysen og forkullingen i de to veggene [28]. Etter fullt utviklet brann oppsto en kort nedkjølingsfase med synkende temperaturer, men sekundær oppflamming og overtenning oppsto etter omtrent 40 min, samtidig med delaminering av første lamell.

I de to forsøkene med bare *himlingen* eksponert var resultatene noe ulike, og viser at størrelsen på ventilasjonsåpning og brennbart gulv i rommet kan ha stor innvirkning på brannutviklingen, men det er uvisst på hvilken måte de påvirker. I en testleilighet med flere rom og bare 16,7 m² himling eksponert, oppsto en rask nedkjølingsfase og selvslokking [51]. I et forsøk med ett stort testrom og 41 m² himling eksponert, ble nedkjølingsfasen lang, med sakte nedkjøling av brannen og sekundær overtenning etter 150 min [52]. I et testrom med stor eksponert himlingsflate var åpningen liten, slik at de varme brann-gassene ikke kunne ventilere ut så lett, noe som kan ha innvirket på den lange nedkjølingsfasen. Resultatet kan også ha sammenheng med at gulvet var av plater av OSB (Oriented Strand Board), mens i leiligheten med flere rom besto gulvet av sementbaserte plater. Det kan derfor ha vært mye varmestråling mellom gulvet og himlingen i rommet med stor eksponert himlingsflate.

Forsøkene i rom med eksponert KLT på *én vegg og i himling* viste ulike resultater, og det er ikke mulig å trekke entydige konklusjoner om hvordan denne konfigurasjonen kan påvirke brannutviklingen. Brannen vedvarte i ett forsøk [52], mens i to forsøk selvslokket brannen [47,54]. I det ene forsøket oppsto sekundær overtenning, og brannen ble manuelt slokket [47].

I rom med eksponert KLT på *to vegger eller flere og i tillegg himling*, ser det ut til at brannen ikke gikk over i nedkjølingsfasen, men vedvarte til den ble slokket [28,42,47]. Dette er derfor en konfigurasjon som bør unngås.

I leiligheten med flere rom med eksponert KLT på *to vegger i ulike rom*, ser det ut til at veggene var skjermet for hverandres varmestråling og derfor påvirket hverandre lite [51]. I begge forsøkene oppsto selvslokking, selv om nedkjølingen i det ene rommet var litt saktere enn i det andre.

I noen av forsøkene falt gipsplatekledningen ned tidlig og forårsaket ny vekst i brannen. Dette viser at gipsplatekledningens brannmotstand og innfestingsmetode er viktig.

Forsøkene viste også at ventilasjonsforhold påvirker brannutviklingen. Små ventilasjonsåpninger gir lengre brannforløp fordi tilgangen på oksygen er liten. Små åpninger kan også gi lengre tid til sekundær overtenning enn større åpninger, men saktere nedkjøling av brannen i nedkjølingsfasen. I forsøkene der varmestrålingen over åpningene og i horisontal avstand fra åpningene på utsiden av brannrommene ble målt, nådde flammene lengre opp på fasaden på bygninger med eksponert KLT i rommet enn på bygninger som kun hadde tildekket KLT [52]. En større ventilasjonsåpning ga mindre intens brann i rommet, men høyere varmefluks og temperaturer på fasaden utenfor rommet. I horisontal avstand fra ventilasjonsåpningen viste imidlertid resultatene ingen betydelig forskjell på varmestrålingsfluksen fra åpninger i rom med og uten eksponert KLT. Dette antyder at varmestrålingen mot nabobygg er like stor for bygg med eller uten brennbar konstruksjon. Varmestrålingen kan imidlertid vare lenge dersom eksponert KLT fører til en vedvarende brann.

HRR er en svært viktig faktor når man skal vurdere risikoen ved brann. I mange av forsøkene som er utført er ikke HRR målt. Forsøk der HRR er målt har vist at eksponerte overflater har betydelig påvirkning på HRR. Rom med fullstendig beskyttet KLT hadde samme temperaturutvikling over tid og samme HRR gjennom brannforløpet, som rom med lette stålkonstruksjoner med samme type branngipsplater. I rom med KLT eksponert på alle overflater, var derimot HRR og total varmeavgivelse (THR) betydelig høyere [28].

Hadden et al. og Putynska et al. fant begge at tilgjengelige metoder for å beregne maksimaltemperaturene i brannrommet samsvarte godt med eksperimentelle forsøk, mens metoder for å beregne total HRR ga lavere verdier enn de eksperimentelle. De mente at forskjellene mellom beregninger og målinger skyldtes at noe av brannenergien var plassert i vegger og tak i form av KLT-elementer [47,61]. Både i Edinburgh [47] og i Australia [61] viser forskningen at tilgjengelige, anerkjente metoder for å beregne varmeavgivelse ikke gir tilsvarende resultat som målingene i brannforsøkene som er utført i rom med eksponerte treoverflater på vegg og himling, fordi metodene er utviklet for rom med brannenergien plassert på gulvet. Metoder for å beregne varmeavgivelsen i rom med brannenergien fordelt på gulv, vegg og i himling bør derfor utvikles.

5.1.2 Selvslokking

Flere kilder i litteraturen påpeker at man ved bruk av eksponert KLT inne i rommet må forutsette at brannen skal selvslokke etter at inventaret i rommet har brent ut [48,62,63]. Hvis man ikke prosjekterer i henhold til dette, vil hele bygget kunne brenne ned dersom brannvesenet ikke får kontroll på brannen før den har spredd seg ut av branncellen. Det er imidlertid viktig å merke seg at bæreevnen til KLT-konstruksjoner kan fortsette å reduseres under nedkjølingsfasen i en brann, selv etter at selvslokking er oppnådd og forkullingsprosessen har stoppet [22].

Mulighetene for at en brann slokner av seg selv etter at alt inventaret i brannrommet er utbrent har vært diskutert i mange år. I de senere årene er det flere forskningsmiljøer som har gjennomført eksperimenter for å avdekke hvilke forhold som bestemmer om selvslokking oppstår. Selvslokking er blant annet forsket på i Australia [54,57,63] og Edinburgh [42,47].

Småskalaforsøk har vist at selvslokking kan skje når KLT som brenner oppnår en kritisk nedre massetapsrate på $3,5 \text{ g/m}^2\text{s}$ [17,42,64]. I forsøkene ble KLT eksponert for konstant varmestrålingsfluks for å la oppbygging av forkullingslag føre til selvslokking, og selvslokking ble observert ved eksponering for varmestråling under 31 kW/m^2 . Bartlett et al. viser til lignende resultater der Emberley et al. målte kritisk massetapsrate til $4,0 \text{ g/m}^2\text{s}$ [57]. Data fra disse småskalaforsøkene ble brukt videre i storskalatester [42,47], der $3,5 - 4 \text{ g/m}^2\text{s}$ ble satt som grenseområde for massetapsrate for selvslokking.

Forsøkene i Edinburgh [42,47] viste at selvslokking kan skje i rom med to eksponerte vegger, eller én vegg og himling eksponert, men det forutsetter at det ikke oppstår delaminering og nedfall av kullsjiktet. Ved delaminering og nedfall vil en sekundær overtenning kunne oppstå og brannen vil vedvare. I rom med tre eksponerte overflater

observerte de ikke selvslukking, og brannen vedvarte. Grunnen til dette var at varme-strålingen mellom overflatene opprettholdt pyrolysen og forkullingen.

Faren for, og omfanget av, delaminering avhenger av størrelsen på brannenergien i rommet og lengden på brannforløpet [47,49,54]. Høy brannenergi kan gi et lengre brannforløp og resultere i mer omfattende delaminering, og frigjør friskt trevirke som gir flammene tilgang til mer brennbart materiale. Delaminering kan oppstå på små lokale områder og gi liten påvirkning på brannutviklingen, eller på store områder og gi stor påvirkning på brannforløpet [48]. Det er fremdeles for lite kunnskap om mekanismene rundt delaminering, men limtyper og tykkelsen på lameller virker å ha betydning [45,46]. COST FP1404 WG2 har foreslått en standard testmetode for å evaluere egenskapene til lim i CLT-elementer [65]. Metoden kan også benyttes for andre limte trekonstruksjoner, eksempelvis limtre.

5.1.3 Forkulling

Forsøk har vist at forkulling er avhengig av graden av eksponert KLT, plassering av eksponerte flater, og av ventilasjonen i rommet [28,39,52].

Li et al. [28] og Crielaard et al. [49] viste at når bare én vegg har eksponert KLT, vil ikke dette påvirke brannutviklingen, selv om det oppstår forkulling av de eksponerte KLT-elementene. Dersom det oppstår delaminering, vil det imidlertid kunne utvikle seg en sekundær overtenning fordi friskt trevirke blir avdekket og deltar i forbrenningen. Dette forårsaker en ytterligere forkulling av konstruksjonen.

For forsøk med full tildekking av KLT med tre lag gips, ble forkulling unngått, til tross for at det var en ventilasjonsåpning i rommet [52]. Ved tildekking med to lag gips viste forsøkene ulike resultater. Eksempelvis ble forkulling observert i KLT-himling bak kledning og i gipsskjøter, men ikke i KLT-elementer bak kledning på vegg [28,39,52].

For forsøk med eksponert KLT, ble det målt forkullingsdybder på 60 – 154 mm på de eksponerte overflatene. Det ble også observert forkulling på veggene og i himlingen som var kledd med gips. Stor ventilasjonsåpning i rommet ga tidligere forkulling enn liten ventilasjonsåpning. To vegger som var plassert overfor hverandre ga mer intens gjensidig varmestråling, og forårsaket dermed raskere oppvarming og forkulling av KLT, noe som resulterte i raskere delaminering [39]. I forsøkene med eksponert KLT og stor ventilasjonsåpning, startet delaminering før forkullingsfronten nådde limsjiktet [52]. Dette er en viktig observasjon, ettersom det viser at forkullingsfronten ikke trenger å nå helt frem til limsjiktet for at delaminering skal kunne finne sted. Dette kan igjen være viktig for å forstå selvslukking, der delaminering har vist seg å være en viktig faktor.

En konklusjon var at dersom alle vegger og himlingen beskyttes med tre lag 15,9 mm tykk branngips, forhindres forkulling av KLT-elementene, og KLT gir dermed heller ingen bidrag til brannen [52].

Det ble også vist at forkullingshastigheter i forsøk i mellomskala hadde samsvar med verdier fra storskalaforsøk, forutsatt at det samme KLT-produktet ble brukt [53].

5.2 Detaljløsninger

Et av hovedprinsippene innen europeiske byggeregler med hensyn til brannsikkerhet er begrensningen av spredning av brann og røyk ut av en branncelle. Werther nevner at inspeksjoner av nye og eksisterende bygninger gjentatte ganger har rapportert at risiko for tidlig spredning fra en branncelle til den neste hovedsakelig er forårsaket av utilstrekkelig utformete skjøter og servicegjennomføringer i vegger og gulv [66].

Av forskning på hvordan man kan unngå spredning av brann og røyk og opprettholde integriteten til branncellebegrensende KLT-elementer, nevner Werther flere eksperimentelle studier fra perioden 1998 – 2013. Studiene hadde fokus på sammenføyninger for elementskjøter i KLT-planet, sammenføyninger for hjørneskjøter og servicegjennomføringer [66]. Forsøkene viste at skjøter kan senke brannmotstanden og påvirke røyktettheten negativt, og at utettheter eller unøyaktig produksjon kan føre til gjennomtrenging av varme gasser og røyk, noe som også er vist i andre studier [32,34,37]. Alle studiene viste at god tetting av spredningsveier er essensielt for å opprettholde brannsikkerheten i hele strukturen.

Flere publikasjoner har påpekt behovet for mer forskning på skjøter og servicegjennomføringer og bedre dokumentasjon av skjøter mellom KLT-vegg og -gulv [8,16,18]. Brennbarheten til trebaserte materialer kan bidra til brannspredning hvis varme gasser infiltrerer konstruksjonselementene. Studier viser at en strøm av varme gasser gjennom elementer av tre, øker forkulling som følge av et tillegg av termisk eksponering av ellers ueksponerte områder. Varme gasser som passerer gjennom branncellebegrensende elementer vil slik kunne føre til tidlig svikt i integritet [66].

I Australia har England gitt følgende anbefalinger for skjøter og gjennomføringer [20]:

- Utvikle detaljert veiledning for brannbeskyttelse av detaljløsninger.
- Minimere omfanget av gjennomføringer gjennom brannklassifiserte konstruksjoner.
- Sørge for kontinuerlig brannbeskyttelse over overganger mellom brannvegger og andre vegger.
- Senke tak hvis sprinkler skal monteres i tak, for å unngå gjennomføring.
- Hvis gjennomføringer gjennom konstruksjonsdeler med brannmotstand er nødvendig, bør de heller gå gjennom sjakter eller kanaler enn gjennom konstruksjonsdelen, samt grupperes og tettes tilstrekkelig.

Dagens metoder for evaluering av brannmotstand for bygningselementer er generelt basert på standardiserte branntester, dimensjonering basert på tabulerte data eller beregningsmetoder (f.eks. NS-EN 1995-1-2). Selv om det er vist at detaljløsninger kan være svake punkter for gjennomtrenging av brann og røyk, tar dagens metoder ikke, eller bare i liten grad, hensyn til detaljløsninger. I rapporten «Guidance document – Fire design of CLT including best practice» som ble publisert av COST FP1404 i 2018, gir Werther generelle forslag til løsninger og prinsipper for å begrense brannspredning via skjøter, sammenføyninger og gjennomføringer [21]. Løsningene er ment å kunne brukes som veiledning i prosjekteringsprosessen, og som grunnlag for revidering av EN 1995-1-2.

5.2.1 Skjøter

Det er utviklet relativt effektive og brannsikre sammenføyninger for KLT. Ofte brukes lange skruer innlemmet i panelene. Dette gir gode brannegenskaper, fordi skruhodet er lite (arealmessig) i forhold til branneksponeering, og resten av skruen er beskyttet av rent tre [37,67].

I litteraturstudien i fase 1 av prosjektet *Fire safety challenges of tall wood buildings* oppsummeres mange branntester på stålforbindelser i trematerialer [37,67].

Studien konkluderte med:

- Innebygde forbindelser (skruer, nagler og bolter) har bedre brannegenskaper enn for eksempel beslag/platefester.
- Jo større stålareal, jo dårligere brannegenskaper.
- Tildekking av stålforbindelser gir bedre resultat i brann.

Karuse nevner brannforsøk som har vist ulike resultater for skjøter [46]. Gjennomtrenging av varme gasser har vært observert både med og uten bruk av tettemiddel [32]. Det har også vært observert at sammenføyninger har sviktet [32,34]. Andre forsøk har vist at gjennomføringstettinger og andre detaljløsninger har vært i henhold til krav og bestått branntester [68]. I storskalaforsøkene beskrevet av Karuse, var testhuset dimensjonert for god brannsikkerhet, åpninger var godt tettet, og både skjøter og gjennomføringer viste gode branntekniske egenskaper [46].

Gode prosedyrer og retningslinjer for detaljløsninger i konstruksjoner er nødvendig for å sikre tilstrekkelig brannsikkerhet. I COST FP1404 WG2 har de arbeidet for å utvikle modelleringsverktøy for prosjektering, for slik å unngå kostbar testing av skjøter.

Standardiserte branntester kan brukes til å vurdere påvirkningen fra skjøtene mellom KLT-elementene, såkalte *elementsjøter* (flammespredningsvei I, se Figur 3-6). For å vurdere elementsjøter i KLT-planet, brukes *EI*-kriteriet for å unngå at temperaturen på uekspontert side øker mer enn 180 °C over omgivelsestemperaturen, og at varme gasser antenner objekter på den ueksponterte siden.

Werther lister opp brannforsøk fra 1998 – 2013 av elementsjøter i KLT [66]. Resultatet fra disse testene viser at skjøter kan redusere brannmotstanden og påvirke røyktetthet negativt, og at utettheter som følge av unøyaktigheter i produksjon eller konstruksjon tillater gjennomtrenging av varme gasser og røyk ved brann.

Anbefalinger gitt i litteraturen er [18,69,70]:

- Unngå buttsjøter.
- Sammenføyninger med not og fjær, langsgående spor med innlagt lekt eller fals mellom elementene viser, under visse betingelser, bra brannmotstand når man sammenligner med KLT-elementet.
- For å forbedre brannmotstanden og røyktettheten, anbefales bruk av elastisk fugemasse på begge sider av elementet, eller fleksibel mineralull.

For *hjørnesjøter* eksisterer ingen standardisert testmetode [18]. Derfor har testdata og anbefalinger vært basert på tester som generelt følger NS-EN 1365-1 og -2, men også på småskalatester eller storskalatester med naturlig brannpåkjenning.

Flere forsøk av ulike skjøter med ulike branntettemidler har vist god motstand mot brann og gjennomtrenging av røyk [71–73]. Generelt har brannforsøk vist at forkullingsdybdene i hjørner er mindre enn i selve elementene. På samme måte som for elementskjøter i KLT-planet, underbygger alle eksperimenter behovet for lufttett forsegling [66]. Skjøter for KLT vegg-gulv kan for eksempel sammenføres med vibrasjonsabsorbenter av elastomer eller lignende. Brannforsøk har vist at slike absorbenter, med riktig lufttett tetting, ikke bidrar negativt til brannmotstanden [71,72]

Wormdahl et al. [2] har også sett på tidligere brannforsøk av festemekanismer, forbindelser og beslag [67,74,75]. Resultatene viste at ulike festemekanismer ga ulike brannegenskaper. For festemekanismer med hullplater og dybler var forkullingsrater høyere i områder nært festemekanismene enn lengre unna. For hybride festemekanismer av stål og tre påført strekkrefter, viste typen tre-stål-tre bedre brannmotstand enn stål-tre-stål for bjelker av samme tverrsnitt.

Brannforsøk har vist viktigheten av å beskytte stålet i skjøter i trestrukturer. Siden en sammenføring vanligvis består av en kombinasjon av tre og stål, bør mengden eksponert stål minimeres, eller beskyttes med isolasjon eller ekspanderende maling [76]. Dette er eksempelvis blitt gjort ved å montere gipsplate over eksponerte strukturer og skjøter, men det har ikke vært en kostnadseffektiv løsning.

5.2.2 Gjennomføringer

På samme måte som for skjøter, må åpninger som følge av gjennomføringer branntettes for å avgrense brannen og forhindre røyk og brannspredning.

Tettinger av monteringsdeler og servicegjennomføringer gjennom konstruksjonsdeler av ulike materialer kan testes i henhold til NS-EN 1366-3. Imidlertid er ikke KLT standardkonstruksjon i testmetoden og det er ikke tilstrekkelig dokumentert om egenskaper hos KLT-strukturen kan påvirke brannmotstanden annerledes enn standardkonstruksjonene.

Gjennomføringer gjennom et brannklassifisert element skal unngås i størst mulig grad, og må inkluderes i vurderingene under prosjekteringen. Hvis gjennomføringer er nødvendig for bruken av bygningen, må det benyttes systemer som opprettholder brannklassifiseringen til konstruksjonen. Gjennomføringer finnes i mange ulike varianter med egne spesifikke karakteristikk, og det finnes derfor ikke én enkel løsning, eller én enkel måte å beskytte alle typer gjennomføringer mot brann- og røykspredning. Generelt gjelder imidlertid at gjennomføringer må tettes med branntetting for å forhindre gjennomtrenging av brann og røyk. I brennbart materiale, som tre, vil potensiell forkulling mellom konstruksjons-elementet og branntetting redusere effekten av branntettingen. Tetting av åpninger gjennom brannklassifiserte vegger og gulv kan evalueres ved brannprøving.

Fremdeles er godkjente tettesystemer for serviceinstallasjoner sjeldne på markedet. Noen forskningsprosjekter har forsøkt å gi generelle løsninger for å tilpasse eksisterende og godkjente tettesystemer til KLT [68], og flere brannforsøk har vist at eksisterende gjennomføringstettinger kan brukes i kombinasjon med KLT-elementer for å oppnå tilstrekkelig brannsikkerhet. Werther et al. fant at systemer med ekspanderende materialer effektivt forseglert åpninger mellom gjennomføringselementet og tre-elementet [68] og brannprøving har vist at ekspansjonsbaserte systemer kan oppfylle isolasjonskrav i mer enn 90 min [7,77]. For passive ikke-ekspanderende systemer, er det blitt anbefalt å

påføre ekstra tettemiddel på begge sider av gjennomføringselementet [66]. Det er også vist at ved god nok lufttetthet i konstruksjonen kan flamme- og røykspredning unngås [45,46]. Det påpekes at de ekspanderende systemene bør foretrekkes og festes slik at de tilfredsstillende den nødvendige brannmotstanden [66].

Følgende er viktig for å oppnå brannsikker serviceinstallasjon for trekonstruksjoner [69]:

- Ta serviceinstallasjoner med i betraktningen fra starten av et prosjekt for å unngå unødige gjennomføringer.
- Unngå kontinuerlige skjøter ved å påføre for eksempel ekspanderende materialer og tildekke eksponert område.
- Unngå tidlig brannspredning ved å lufttette på begge sider av en gjennomføring, også for å redusere spredning av røyk og giftige gasser.
- Sikre tilstrekkelig innfestingsdybde for festemidler som brukes til branntetting.
- For metallrør er branntettemasse rundt røret, i kombinasjon med rørisolasjon, essensielt for å forhindre antennelse på ueksponert side
- Veiledningsdokumenter for prosjektering er tilgjengelig i mange land, og nye og godkjente produsentspesifikke systemer for trekonstruksjoner kommer på markedet.

5.3 Kunnskapshull

Skepsisen til store og høye trekonstruksjoner er forsterket av at vi mangler vitenskapelige data og forsøk som i tilstrekkelig grad dokumenterer de branntekniske egenskapene til bygningene. Mye kunnskap om hvilke brannegenskaper KLT-elementer har, og hvordan elementene påvirker brannutviklingen, er fremskaffet de siste årene, og nye løsninger for hvordan man kan benytte elementene i bygninger og samtidig oppnå nødvendig brannsikkerhet er utviklet. Det er likevel nødvendig å utvikle løsninger og metoder videre for å kunne bestemme dimensjonerende brannforløp, om delaminering oppstår og om selvslukking kan oppnås. Det er også behov for mer kunnskap og bedre metoder for brannsikker prosjektering og dokumentasjon av detaljløsninger for å kunne utvikle optimale brannstrategier for bygningene.

Oppsummering av kunnskapshull som er påpekt i litteraturen:

- Det behøves mer kunnskap om hvordan brannutviklingen påvirkes av ulike konfigurasjoner av eksponert KLT og størrelsen på ventilasjonsåpninger. Det må undersøkes hvilke tiltak som er nødvendige for å unngå brannspredning på fasaden, siden eksponert KLT gir mer intens varmestråling og større flammehøyde på fasaden. Det bør også studeres nærmere hvordan start av forkulling bak, og nedfallstid til, kledningen på KLT-elementer påvirkes av naturlig brannpåkjenning, der temperaturene kan være mye høyere enn ved standard brannpåkjenning?
- Det er fremdeles usikkert hvilke forhold som må ligge til rette, for eksempel hvilken grad av beskyttelse som er nødvendig, for at brannen skal slukne av seg selv. Egenskapene og sårbarheten til brannbeskyttelsen på KLT-elementene må tas med i betraktningen, fordi tidlig brudd i beskyttelsen vil medføre at KLT-konstruksjonen kan gi et betydelig bidrag til brannutviklingen.
- Mekanismene rundt delaminering er ikke godt nok kjent til at man kan simulere eller beregne seg frem til om delaminering vil oppstå i et spesifikt brannrom. Det behøves mer kunnskap om hvordan delaminering påvirker brannutviklingen, hvordan delaminering kan unngås og om delaminering skjer raskere fra himling. Det bør undersøkes hvilke forhold som gir glødebrann i nedkjølingsfasen, med fare for oppflamming av brannen dersom delaminering oppstår.
- Når det gjelder detaljløsninger, bør det utvikles metoder for å dokumentere brannsikre løsninger for servicegjennomføringer i KLT-konstruksjoner, og bedre dokumentasjon på skjøter mellom KLT-vegg og -gulv. Brannegenskapene til skjøter og sammenføyninger mellom tre-elementer og mellom tre og kompositt bør også studeres nærmere. Det etterlyses brannforsøk på systemnivå av ulike typer sammenføyninger og det bør undersøkes hvordan man best kan klassifisere gjennomføringer gjennom brannklassifiserte KLT-elementer. Det er viktig å etablere gode metoder for å gi lufttetthet i konstruksjonen, også med tanke på ulike byggemetoder og produksjon av KLT-paneler.

6 Konklusjon og anbefalinger

Denne rapporten oppsummerer resultater fra store brannforsøk og andre studier av brannsikkerhet ved bruk av KLT i perioden 2010 – 2018. Hovedfokus har vært på følgende forskningsspørsmål:

- Hvordan påvirkes brannutviklingen i rom der det er brukt tildekkede eller eksponerte KLT-elementer?
- Hvordan forhindre at detaljløsninger for KLT-elementer bidrar til brannutviklingen?

6.1 Konklusjoner

Den største utfordringen med KLT-konstruksjoner er at de er brennbare og derfor kan bidra til brannutviklingen. Prosjektering av konstruksjoner må derfor ta hensyn til dette, og enten beskytte konstruksjonene så lenge at forkulling ikke oppstår, eller inkludere konstruksjonens bidrag til brannenergien ved bestemmelse av brannutviklingen. Detaljløsninger må også vurderes i prosjekteringsfasen.

COST FP1404 WG2 publiserte i 2018 retningslinjer for prosjektering av KLT, inkludert skjøter og gjennomføringer [21]. Dokumentet gir grunnleggende informasjon for revisjonen av EN 1995-1-2, som antas gjeldende fra 2022. Den vil blant annet inneholde modeller for å bestemme forkullingshastighet og forkullingsdybde for KLT, null-sjiktet og branndimensjonering av KLT.

6.1.1 KLT-konstruksjoners påvirkning på brannutvikling

I rom med eksponerte KLT-elementer vil konstruksjonen kunne antenne og brenne, og dermed bidra til at varmeavgivelsen i rommet øker. Hvor stor påvirkning de eksponerte trekonstruksjonene får på brannutviklingen avhenger blant annet av:

- Størrelsen på eksponert areal
- Om det er én eller flere flater som er eksponerte
- Hvilke flater som er eksponerte (f.eks. himling eller vegg)
- Hvordan flatene er plassert i forhold til hverandre
- Forkullingshastighet
- Om delaminering oppstår og limtype
- Nedfall av kullsjikt
- Tildekking (f.eks. hvilken type og hvor lang tid den beskytter)
- Åpningsfaktor
- Luftstrøm på KLT-overflaten

Eksponerte KLT-konstruksjoner kan påvirke brannutviklingen, blant annet ved:

- Raskere overtenning
- Lengre varighet på fullt utviklet brann
- Saktere nedkjøling
- Sekundær oppflamming og overtenning på grunn av delaminering eller nedfall av kullsjikt

Brannforsøk viser at overtenning i brannrommet oppstår noen minutter tidligere i rom med eksponert KLT, mens varigheten på fullt utviklet brann varierer mye med andel og plassering av eksponerte KLT-overflater. Starten på, og varigheten av, nedkjølingsfasen er også veldig påvirket av eksponert KLT. Maksimaltemperaturene i rom med eksponert KLT er omtrent like uansett hvor stor andel av overflatene som er eksponerte, og omtrent like høye som i rom med brennbare eller ubrennbare konstruksjoner beskyttet med gipsplater. Temperaturutviklingen videre i brannforløpet er imidlertid forskjellig. HRR er høyere i brannrom med eksponert KLT enn i brannrom med beskyttet KLT eller med ubrennbar konstruksjon. Disse forskjellene i temperaturutvikling og HRR skyldes at mye av branngassene forbrenner utenfor brannrommet, og målinger av varmestrålingsfluks utenfor brannrommene bekrefter dette.

Den senere tidens forskning har presentert løsninger for hvordan man kan unngå bidrag fra KLT-konstruksjonen i en brann. Dersom arealet av eksponert KLT begrenses til bare én overflate eller to overflater ved siden av hverandre, kan temperaturutviklingen være som i et brannrom med ubrennbare konstruksjoner. Den samme effekten kan oppnås ved å bruke limtyper som tåler høye temperaturer, slik at KLT-elementene ikke delaminerer. Imidlertid vil forbrenningen av branngasser utenfor åpninger i brannrommet, som for eksempel vinduer, kunne være mye mer omfattende og gi høyere, mer intense flammer over åpningene. Med riktig dimensjonerte lamelltykkelser, bruk av lim som tåler høye temperaturer, og ellers godt beskyttet KLT, vil brannen gå over i en nedkjølingsfase og temperaturene vil synke kraftig. I et slikt tilfelle vil det være naturlig å anta at brannen enkelt kan slokkes.

Resultatene viser altså at i rom der hele konstruksjonen er beskyttet, vil brannutviklingen være tilsvarende som i et rom med beskyttet stål- eller betongkonstruksjon. Det kan derfor vurderes om preakseptert ytelse $R 90$, bæreevne og stabilitet i 90 minutter, er tilstrekkelig for bærekonstruksjonen, så lenge denne er beskyttet, slik at forkulling forhindres i den tiden som trengs for at brannen skal nedkjøles så mye at den kan slokkes med enkelt utstyr. Spredning av brannen må også forhindres i denne tidsperioden, og derfor bør branncellebegrensende funksjon også være tilsvarende $EI 90$. Fordi KLT-konstruksjonen har veldig liten påvirkning på brannutviklingen i rom med bare én eksponert KLT-overflate, kan man vurdere om $R 90$ og $EI 90$ også vil være tilstrekkelig her.

Det er behov for mer kunnskap om hvordan ulike konfigurasjoner av eksponert KLT kan påvirke brannen. Kunnskapen kan deretter benyttes til å utvikle simuleringsmetoder og beregningsmodeller for å bestemme brannutviklingen i rom med ulike konfigurasjoner av eksponerte vegger og himlinger.

6.1.2 Detaljløsninger

Selv om studier har vist at detaljløsninger i en konstruksjon kan være svake punkter ved brann [32], så har forsøk også vist at god tetting av skjøter og gjennomføringer kan gi god brannmotstand og begrense utvikling av brannen [45,46]. Både utførelse av fasade, isolering og tetting kan forhindre spredning av røyk og flammer gjennom skjøter og gjennomføringer og via fasaden. Tetting med ekspanderende materiale er effektivt, og kan beskytte mot gjennomtrenging av flammer, varme gasser og varm røyk.

Flere studier har i de senere år gjort forskning og oppsummert ulike detaljløsningers brannmotstand og påvirkning på brannutvikling, men de understreker at det fremdeles er kunnskapshull og at detaljløsninger ofte er neglisjert i brannprosjektering. Det er gjort flere brannforsøk som viser gode egenskaper til detaljløsninger, men det finnes mange ulike produkter og løsninger og det er vanskelig å definere enhetlige krav som dekker alt.

Når det gjelder sammenføyninger, så bør buttskjøter unngås, fordi utettheter kan oppstå som følge av unøyaktig produksjon eller konstruksjon [32]. Sammenføyninger med not og fjær, langsgående spor med innlagt lekt eller fals mellom elementene viser, under visse betingelser, bra brannmotstand når man sammenligner med KLT-elementet [78]. Motstand mot brann- og røykspredning kan økes ved riktig bruk av tettemiddel eller isolasjon [45,46,71]. For hjørneforbindelser er det vist at vibrasjonsabsorbenter av elastomer eller lignende med riktig lufttett tetting ikke bidrar negativt til brannmotstanden [71,72]. Det bør utvikles gode brannprøvningsmetoder for systemtesting av hjørneskjøter og gjennomføringer.

6.2 Anbefalinger

Selv om forskningen som det er referert til i denne rapporten er omfattende, er den basert på få forsøk, noe som gjør det vanskelig å konkludere med hva som gir god nok brann-sikkerhet. Noen anbefalinger og løsninger mener vi likevel at forskningen gir grunnlag for:

- Prosjektering:
 - Prosjekteringsfasen må ta tilstrekkelig hensyn til brannsikkerheten ved å
 - enten beskytte konstruksjonene så lenge at forkulling ikke oppstår, eller inkludere konstruksjonens bidrag til brannenergien ved bestemmelse av brannutviklingen.
 - i større grad inkludere vurdering av detaljløsninger og ventilasjonsforhold (her trengs bedre informasjon og relevant dokumentasjon).
 - Ettersom forskningen viser at eksponert KLT kan gi store bidrag til brannen, bør det vurderes om analytisk brannteknisk prosjektering også bør kreves for bygninger i brannklasse 1 og 2 der mer enn én KLT-vegg eksponeres.
- Beskyttelse:
 - Dersom alle deler av konstruksjonen tildekkes tilstrekkelig med kledning som forhindrer at temperaturen i trematerialet stiger opp mot 300 °C, kan man unngå at konstruksjonen forkuller og gir bidrag til brannutviklingen. Konstruksjonen vil da kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. En slik brannutvikling vil være

relativt tilsvarende som i bygninger uten brennbare konstruksjoner, for eksempel stål- eller betongkonstruksjoner.

- I bygninger med bare én eksponert KLT-vegg i hver branncelle, kan det være riktig å benytte løsninger som tilfredsstiller de preaksepterte ytelsene, men man må vurdere om en noe mer langvarig og intens varmestråling og direkte flammepåkjening på fasaden over vinduene krever tiltak utover de preaksepterte ytelsene gitt i veiledningen til TEK17.
- I rom der to eller flere vegger av KLT og i tillegg himling er eksponert, ser det ut til at brannen ikke går over i nedkjølingsfasen, men vedvarer til den sløkkes. Dette er derfor konfigurasjoner som bør unngås.
- Delaminering:
 - Ved å benytte varmebestandig lim kan risikoen for delaminering, og dermed påfølgende sekundær oppflamming og overtenning, reduseres. Mye forskning foregår på limtypers egenskaper ved branneksporing, og mer kunnskap blir stadig tilgjengelig. En annen løsning for å unngå delaminering, er å øke tykkelsen på lamellen som ligger nærmest overflaten i brannrommet. Denne løsningen kan imidlertid være mindre robust enn bruk av varmebestandig lim.
- Detaljløsninger:
 - Testmetoder for systemtesting av skjøter og gjennomføringer bør standardiseres. Det eksisterer eksempelvis ingen standardisert test for hjørnesammenføyninger, og anbefalinger bygger på tester basert på NS-EN 1365-1 og NS-EN 1365-2, små- eller storskalatester. Brannprøving av tettinger av gjennomføringer for KLT-konstruksjoner er mangelvare, selv om de kan testes i henhold til NS-EN1366-3. KLT er imidlertid ikke standardkonstruksjon i denne testmetoden og det er behov for validering av testmetodens gyldighet for KLT. Sammenføyninger for limtre bør også testes, fordi de brukes ofte i forbindelse med ulike KLT-elementer.

Referanser

- [1] Kommunal- og moderniseringsdepartementet, *Forskrift 19. juni 2017 nr. 840 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK17)*. 2017.
- [2] E. D. Wormdahl, K. Hox, A. Steen-Hansen, G. Baker, and M. Ulfnes, "Brannsikkerhet i bygg med massivtre," SP Fire Research, Trondheim, Norge, SPFR-rapport A17 20229:1, Mar. 2017.
- [3] "Construction Products Regulation (CPR) (2013) Official Journal Council Directive 89/106/EEC OJ L 88 of April 4." European Commission, Brussel, 2011.
- [4] "DIN 4102-1: Fire behaviour of building materials and elements - Classification of building materials - Requirements and testing." DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Germany.
- [5] "EN 1995-1-2 (2004): Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2 - General: Structural fire design." CEN, European Committee for Standardization, 2004.
- [6] "NS-EN 13501-2:2016 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 2: Klassifisering ved bruk av resultater fra brannmotstandsprøving, unntatt ventilasjonssystemer." Standard Norge, 2016.
- [7] B. Östman *et al.*, "Fire safety in timber buildings," *Technical guideline for Europe. SP*, vol. 19, 2010.
- [8] B. Östman, D. Brandon, and H. Frantzich, "Fire safety engineering in timber buildings," *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 11–20, 2017.
- [9] J. Z. Su, "Fire safety of CLT buildings in Canada," *Wood and Fiber Science*, pp. 102–109, 2018.
- [10] American Wood Council (AWC), "2015 Code Conforming Wood Design," 2015.
- [11] Boverket, "BBR BFS 2011:6 Boverkets byggregler med endringer till och med BFS 2016:6," 2016.
- [12] "National Construction Code. Australian Building Codes Board. Canberra, ACT." 2016.
- [13] The Australian Building Codes Board, "Building Code of Australia," Canberra, Australia, NCC ABCD, 2016.
- [14] A. H. Buchanan, A. Dunn, J. O'Neill, and D. Pau, "Fire Safety of CLT Buildings in New Zealand and Australia," *Wood and Fiber Science*, pp. 96–101, 2018.
- [15] B. Andersson, L. Broberg, J. Hultquist, B. Evers, C. Eriksson Lantz, and F. Nystedt, "Brandskydd i BRO-byggnader: Tillämpningsstöd vid brandteknisk dimensionering av höga Bro-byggnader med förnyelsebara material (trä)," AB Fristad Bygg, Brandskyddslaget AB, Briab Brand & Riskingenjörerna AB, 2018.
- [16] D. Barber, "Fire Safety Engineering of Tall Timber Buildings in the USA," in *WCTE 2016 CD-ROM Proceedings*, Vienna, Austria, 2016.
- [17] A. Bartlett *et al.*, "Needs for total fire engineering of mass timber buildings," in *Proceedings of the 14th World Conference on Timber Engineering, TU Wien*, 2016.
- [18] B. A.-L. Östman, J. Schmid, M. Klippel, A. Just, N. Werther, and D. Brandon, "Fire design of CLT in Europe," *Wood and Fiber Science*, pp. 68–82, 2018.
- [19] D. Barber, "Fire Safety of Mass timber Buildings with CLT in USA," *Wood and Fiber Science*, pp. 83–95, 2018.
- [20] P. England, "Fire Safety Design of Mid-rise Timber Buildings, Basis for the 2016 changes to the National Construction Code," Forest and wood products Australia, Australia, ISBN 978-1-925213-36-2, 2016.
- [21] M. Klippel, and A. Just, "Fire safe use of bio-based building products: Guidance document – Fire design of CLT including best practise (N223-07)," COST FP 1404, FP1404 WG2 TG1, 2018.
- [22] F. Wiesner *et al.*, "Structural capacity in fire of laminated timber elements in compartments with exposed timber surfaces," *Engineering Structures*, vol. 179, pp. 284–295, Jan. 2019.
- [23] "NS-INSTA 900-1 Boligsprinkler - Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold."
- [24] "NS-EN 12845:2015 Faste brannslukkesystemer - Automatiske sprinklersystemer - Dimensjonering, installering og vedlikehold." Standard Norge, Sep. 2015.

- [25] Standard Norge, “NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008, Eurocode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-2: Allmenne laster, Laster på konstruksjoner ved brann.” Standard Norge, 2002.
- [26] M. Klippel, J. Schmid, and A. Frangi, “Fire design of CLT,” in *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, Cross Laminated Timber—a Competitive Wood Product for Visionary and Fire Safe Buildings*, 2016, pp. 101–122.
- [27] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*. John Wiley & Sons, 2011.
- [28] X. Li, C. McGregor, A. Medina, X. Sun, D. Barber, and G. Hadjisophocleous, “Real-scale fire tests on timber constructions,” presented at the World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria, 2016.
- [29] V. Babrauskas and R. D. Peacock, “Heat release rate: The single most important variable in fire hazard,” *Fire Safety Journal*, vol. 18, no. 3, pp. 255–272, 1992.
- [30] A. Bartlett, R. Hadden, L. Bisby, and B. Lane, “Sectional Analysis of Cross-Laminated Timber as a Design for Fire Methodology,” presented at the 9th International Conference on Structures in Fire, USA, 2016.
- [31] K. Nele Mäger and A. Just, “The Component Additive Method for the separating function,” in *Fire safe use of bio-based building products: Guidance document – Fire design of CLT including best practise (N223-07)*, M. Klippel and A. Just, Eds. COST FP 1404 WG2 TG1, 2018.
- [32] C. J. McGregor, “Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires,” Masters of Applied Science Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 2013.
- [33] A. Frangi, G. Bochicchio, A. Ceccotti, and M. P. Lauroli, “Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building,” presented at the 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Miyazaki, Japan, 2008.
- [34] A. R. Medina Hevia, “Fire Resistance of Partially Protected Cross-Laminated Timber Rooms,” Masters in Engineering Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 2014.
- [35] P. Fernando and T. Wallwork, “Connections Between CLT Elements and Future Challenges For CLT in practice,” in *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, 10.3. 2016 Cross Laminated Timber—A competitive wood product for visionary and fire safe buildings*, 2016.
- [36] L. Veilleux, S. Gagnon, and C. Dagenais, “Mass timber buildings of up to 12 storeys - Directives and explanatory guide,” Régie du bâtiment du Québec, Canada, Quebec City, Canada, 2015.
- [37] D. Barber and R. Gerard, “Summary of the fire protection foundation report-fire safety challenges of tall wood buildings,” *Fire Science Reviews*, vol. 4, no. 1, p. 1, 2015.
- [38] O. Skidmore and L. Merrill, “Timber tower research project - final report,” SOM (2013), Chicago, USA, 2013.
- [39] J. Z. Su and G. D. Lougheed, “Fire safety summary: Fire research conducted for the project on midrise wood construction (Report to research consortium for wood and wood-hybrid mid-rise buildings),” NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA, Canada, A1-004377.1, Dec. 2014.
- [40] E. Karacabeyli and C. Lum, *Technical guide for the design and construction of tall wood buildings in Canada*. FPInnovations Pointe-Claire, QC, 2014.
- [41] E. Karacabeyli and B. Douglas, “CLT Handbook-US Edition,” *Library and Archives Canada Cataloguing in Publication, Quebec, Canada*, 2013.
- [42] A. I. Bartlett *et al.*, “Auto-extinction of engineered timber: Application to compartment fires with exposed timber surfaces,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, no. Fire Safety Science: Proceedings of the 12th International Symposium, Supplement C, pp. 407–413, Jul. 2017.
- [43] I. Smith and A. Frangi, *Use of timber in tall multi-storey buildings*. International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 2014.
- [44] B. Östman, J. König, J. Schmid, and A. Just, “Brandsäkra trähus 3 : nordisk-baltisk kunskapsöversikt och vägledning,” SP Rapport 2012:18, 2012.
- [45] A. Just, D. Brandon, K. N. Mäger, R. Pukk, J. Sjöström, and F. Kahl, “CLT compartment fire test,” presented at the 2018 World Conference on Timber Engineering (WCTE 2018), Seoul, Republic of Korea, 2018.

- [46] M. Karuse, “Large scale fire test of CLT - fire spread through the joints and penetrations,” Tallinn University of Technology, 2018.
- [47] R. M. Hadden *et al.*, “Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 480–489, 2017.
- [48] C. J. Bateman, A. I. Bartlett, and R. M. Lukas Rutkauskas, “Effects of fuel load and exposed CLT surface configuration in reduced-scale experiments,” presented at the World Conference on Timber Engineering, Seoul, Republic of Korea, 2018.
- [49] R. Crielaard, J. van de Kuilen, K. Terwel, G. Ravenshorst, P. Steenbakkers, and A. Breunese, “Self-extinguishment of cross-laminated timber,” in *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016)*, 2016.
- [50] K. Hox, “Branntest av massivtre,” SP Fire Research AS, Trondheim, SPFR A15101, 2015.
- [51] S. L. Zelinka *et al.*, Compartment fire testing of a two-story mass timber building. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2018.
- [52] J. Su, P.-S. Lafrance, M. S. Hoehler, and M. F. Bundy, “Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings—Phase 2: Task 3-Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests,” National Research Council of Canada, MD, USA, 2018.
- [53] M. Janssens, “Full-scale tests in a furnished living room to evaluate the fire performance of protected cross-laminated and nail laminated timber construction,” Texas, USA, Southwest Research Institute, 2015.
- [54] R. Emberley *et al.*, “Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 327–335, 2017.
- [55] A. R. Medina Hevia, “Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms,” 2014.
- [56] X. Li, X. Zhang, G. Hadjisophocleous, and C. McGregor, “Experimental study of combustible and non-combustible construction in a natural fire,” *Fire Technology*, vol. 51, no. 6, pp. 1447–1474, 2015.
- [57] R. Emberley, A. Inghelbrecht, Z. Yu, and J. L. Torero, “Self-extinction of timber,” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, no. 2, pp. 3055–3062, 2017.
- [58] T. Hakkarainen, “Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments,” *Journal of fire sciences*, vol. 20, no. 2, pp. 133–175, 2002.
- [59] D. Barber, R. Gerard, N. Butterworth, R. Crielaard, and X. Li, “Towards Fire Safe Design of Exposed Timber in Tall Timber Buildings,” in *WCTE 2016 CD-ROM Proceedings*, Vienna, Austria, 2016.
- [60] A. Frangi and M. Fontana, “Fire performance of timber structures under natural fire conditions,” *Fire Safety Science*, vol. 8, pp. 279–290, 2005.
- [61] C. G. Putynska, A. Law, and J. Torero, “An investigation into the effect of exposed timber on thermal load,” presented at the 24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, 2016.
- [62] D. Barber, R. Crielaard, and X. Li, “Towards fire safe design of exposed timber in tall timber buildings,” presented at the World Conference on Timber Engineering (wcte2016), Wien, Østerrike, 2016.
- [63] R. Emberley, T. Do, J. Yim, and J. L. Torero, “Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber,” *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 252–258, 2017.
- [64] A. Bartlett, R. Hadden, L. Bisby, and N. Butterworth, “Auto-extinction of engineered timber as a design methodology,” in *WCTE 2016 CD-ROM Proceedings*, Vienna, Austria, 2016.
- [65] M. Klippel and J. Schmid, “Fire safe use of bio-based building products: Guidance Document on the Verification of the Adhesive Performance in Fire,” FP1404 WG2 TG1 (N222-07), 2018.
- [66] N. Werther, J. K. Denzler, R. Stein, and S. Winter, “Detailing of CLT with respect to fire resistance,” in *Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, 10.3. 2016 Cross Laminated Timber – A competitive wood product for visionary and fire safe buildings*, 2016, p. 125.
- [67] R. Gerard, D. Barber, and A. Wolski, *Fire safety challenges of tall wood buildings*. National Fire Protection Research Foundation, 2013.

- [68] N. Werther, M. Merk, R. Stein, and S. Winter, "Fire safe service installations in timber buildings," presented at the 12th World Conference on Timber Engineering 2012 (WCTE 2012), 2012, pp. 61–69.
- [69] N. Werther, "Fire stops and penetration – best practise and detailing," in *Fire safe use of bio-based building products: Guidance document – Fire design of CLT including best practise (N223-07)*, M. Klippel and A. Just, Eds. COST FP 1404 WG2 TG1, 2018.
- [70] M. Teibinger and I. Matzinger, "Basis for evaluation of the fire resistance of timber constructions," *Final Rep.*, 2010.
- [71] M. Teibinger, "Brandschutz im Detail. Holzbau - die neue quadriga," 2011.
- [72] M. Merk *et al.*, "Erarbeitung weiterführender Konstruktionsregeln/-details für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4," Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, Deutschland, 2014.
- [73] D. Hosser and B. Kampmeier, "Bewertung des Brandverhaltens unbekleideter flächiger massiver Holzbauteile im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im mehrgeschossigen Holzbau unter Berücksichtigung des geltenden nationalen Sicherheitsniveaus sowie der DIN EN 1995-1-2. Forschungsauftrag der deutschen Gesellschaft für Holzforschung," Braunschweig, Deutschland, 2008.
- [74] S. Zhang, W. Wang, and X. Fan, "Fire behaviour of dowel-type timber connection with slotted in steel plates under bending and shear," in *WCTE 2016 CD-ROM Proceedings*, Vienna, Austria, 2016.
- [75] M. Alam, G. Hadjisophocleous, and J. Erochko, "Performance of hybrid connections exposed to fire," in *WCTE 2016 CD-ROM Proceedings*, Vienna, Austria, p. 2016.
- [76] G. Larsson, "High capacity timber joints, Proposal of the Shear plate dowel joint," Licentiate Dissertation, Lund University, Lund, Sweden, 2017.
- [77] M. Teibinger and I. Matzinger, "Brandabschottung im Holzbau.," Wien, Österreich: Holzforschung Austria. (only available in German), 4, 2012.
- [78] M. Teibinger and I. Matzinger, "Construction with Cross- Laminated Timber in Multi-Storey Buildings—Focus on Building Physics.," Holzforschung, Austria, 2013.
- [79] J. Schmid, A. Menis, M. Fragiaco, I. Clemente, and G. Boichicchio, "Behaviour of loaded cross-laminated timber wall elements in fire conditions," *Fire technology*, vol. 51, no. 6, pp. 1341–1370, 2015.
- [80] M. Klippel, J. Schmid, R. Fahrni, A. Frangi, and D. Lange, "Assessing the adhesive performance in CLT exposed to fire," presented at the World Conference on Timber Engineering, 2018.
- [81] M. Klippel and J. Schmid, "Design of cross-laminated timber in fire," *Structural Engineering International*, vol. 27, no. 2, pp. 224–230, 2017.
- [82] J. Schmid, D. Lange, J. Sjöström, D. Brandon, M. Klippel, and A. Frangi, "The use of furnace tests to describe real fires of timber structures," presented at the Proceedings of 10th International Conference on Structures in Fire, 2018.
- [83] D. Brandon and B. Östman, "Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings Phase 2: Task 1 - Literature Review: The contribution of CLT to compartment fires," SP Technical Research Institute of Sweden/NFPA, Stockholm, Sweden/Massachusetts USA, FRPF-2016-22, Sep. 2016.
- [84] D. Brandon, "Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings—Phase 2: Task 4-Engineering methods," *National Fire Protection Association. NFPA report: FRPF-2018-04*, 2018.
- [85] "ANSI/APA PRG 320-2018: Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber."
- [86] M. Janssens and J. Huczek, "Using CFAST and FDS to Evaluate the Response of CLT in Natural and Standard Fires," in 15th Fire and Materials Conference, San Francisco, CA, 2017, pp. 567-578.
- [87] "CAN/ULC-S101-07. Standard methods of fire endurance tests of building construction and materials." 2007.

A Beskrivelse av forskningsprosjekter med brannforsøk

A.1 Europa

Flere store og mindre forskningsprosjekter pågår eller er utført i Europa de siste årene, med fokus på å fremskaffe kunnskap om forkulling, delaminering, selvsløkking og påvirkning på brannutviklingen [79,80]. Resultatene fra forskningsprosjektene benyttes for eksempel til å utvikle metoder for å beregne forkullingsdybde, bæreevne og branncellebegrensende funksjon for KLT ved branneksponeering [81]. Dimensjoneringsmetodene skal blant annet inkluderes i revidert EN 1995-1-2 og europeiske retningslinjer. Prosjektene fokuserer hovedsakelig på standard brannkurve som beskrevet i EN 1991-1-2, men noe forskning på forkulling og påvirkning på brannutviklingen er også utført [82].

A.1.1 Estland

Tallinn Tekniske Universitet, RISE Research Institutes of Sweden m.fl. utførte en storskala rombranntest på testområdet til Estonian Academy of Security Sciences i Väike-Maarja, Estland [45,46].

Testhypotesen tok utgangspunkt i naturlig brannpåkjenning (dvs. lastbærende funksjon til bygning skal opprettholdes gjennom hele varigheten av brannen, inkludert avkjølingsfasen, eller i en spesifisert tidsperiode). Målet med eksperimentet var å studere temperaturutviklingen og måle forkullingsdybden i utildekkede, lastbærende trekonstruksjoner eksponert for naturlig brannpåkjenning. Gjennomtrenging av røyk og flammer gjennom skjøter og gjennomføringer, samt egenskapene til skjøter, sammenføyninger og gjennomføringer ved rombrann, ble også testet, siden dette ikke er godt dokumentert fra før.

Testoppsett

Testen ble utført i et toetasjes hus med grunnplan $3,5 \times 4,5 \text{ m}^2$. Begge etasjene hadde to vinduer ($1,4 \times 1,5 \text{ m}^2$) og dør ($0,95 \times 2,1 \text{ m}^2$). De to høyeste veggene hadde toetasjes høyde, mens de to andre veggene var avgrenset i høyden med gulvelementer.

Alle vegger, gulv og tak mellom etasjene var av KLT. Innvendig i begge etasjer besto to av veggene av eksponert KLT, mens de to andre veggene var tildekket med to lag 15 mm branngipsplater. KLT-himlingen var dekket med tre lag branngipsplater og gulvet var dekket med steinull med sementplater. KLT-elementene besto av fem lameller, med økt tykkelse på den branneksponteerte siden (40/30/20/20/20 mm).

Skjøter, sammenføyninger, gjennomføringer og fasade ble robust utformet for å begrense brannspredning fra første etasje til andre etasje. Ulike løsninger var brukt til å koble sammen KLT-elementene. Det var vertikale sammenføyninger i de høye vegg-panelene. Skjøter mellom gulv og veggpaneler var enkle buttskjøter. Alle skjøter var festet med

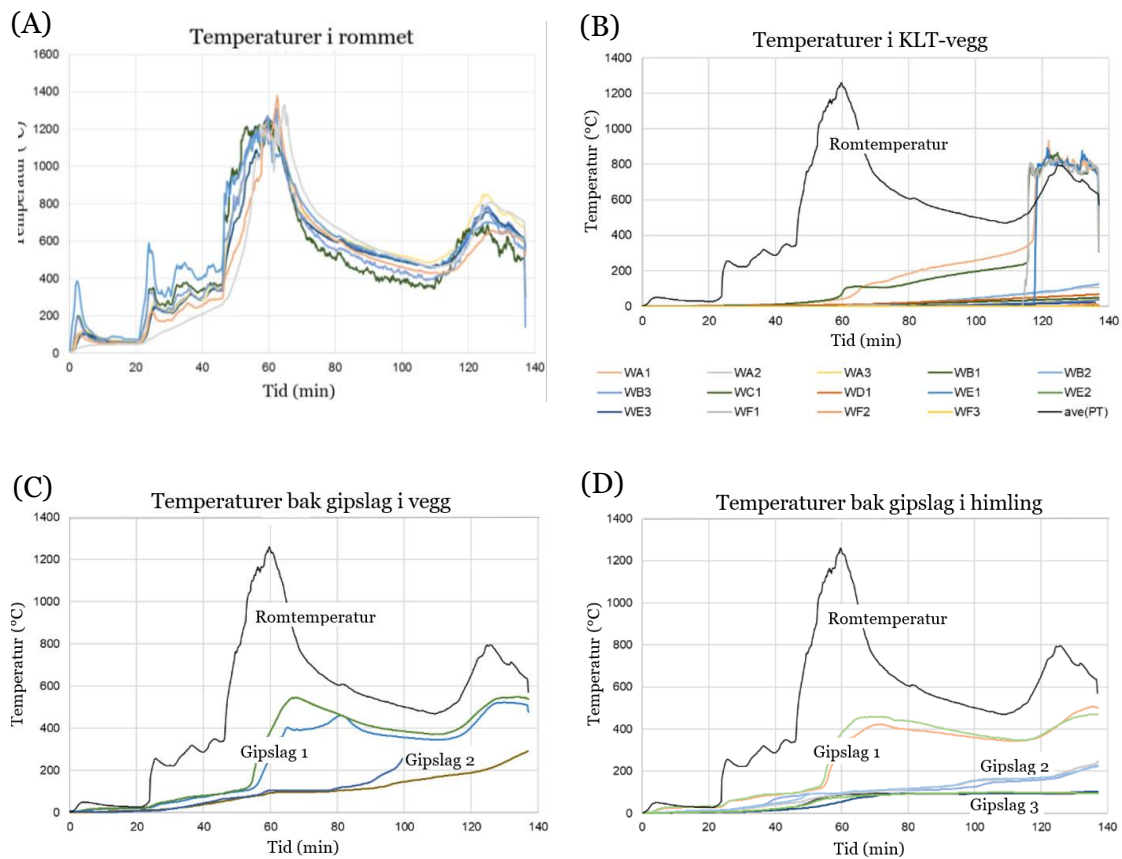
skruer og/eller tettet med ekspanderende materiale. Konstruksjonen besto også av flere små vegg- og takgjennomføringer og en større gjennomføring for ventilasjonskanal. Kanalen var beskyttet med steinull og de mindre gjennomføringene var tettet med branntetting.

På den utvendige fasaden var de korte veggene isolert med polyisocyanurate (PIR) og de lange med steinull. Ytre kledning var en kombinasjon av treplater og sementbaserte plater. Hulrom i fasaden ble beskyttet med steinull og brannmaling.

Brannen ble startet på grunnplanet og brannenergien var 600 MJ/m².

Resultater

Figur A-1 viser temperaturmålinger i brannrommet, i KLT-elementene og mellom gipslag.



Figur A-1. Temperaturmålinger. (A): Ni termoelementer plassert i brannrommet. (B): Termoelementer plassert i eksponert KLT bak første, andre og tredje lamell (nummerert hhv. 1, 2 og 3) i ulike vegger i nedre (WA-WD) og øvre (WE,WF) etasje (WE1 and WF1 viser ikke korrekt temperatur, da de var plassert bak lamell i øvre etasje og eksponert for høye temperaturer ved nedfall av lamell i nedre etasje). (C): Termoelementer plassert bak første og andre gipslag på vegg. (D): Termoelementer plassert bak første, andre og tredje gipslag i himling. Romtemperaturkurven i (B)-(D) viser gjennomsnittlig romtemperatur. [45]

De to vinduene i 1. etasje ble manuelt knust henholdsvis 20 og 23 min etter brannstart for å gi oksygen til brannen. Temperaturene i rommet (Figur A-1A) viste deretter to overtenninger, den første ved ca. 60 min og den andre ved ca. 120 min, og temperaturene var

høyest under den første overtenningen (1400 °C). Deretter sank temperaturen til ca. 350 °C før det oppsto en ny overtenning og temperaturen steg til 850 °C før den raskt avkjøltes.

Som forventet, økte temperaturen under det ytterste, eksponerte KLT-lamellaget sakte etter en time (Figur A-1B). Laget delaminerte imidlertid ved ca. 120 min og viste at limet ikke var tilstrekkelig varmeresistent.

To lag gips på vegg beskyttet effektivt mot forkulling og nedfall ble ikke observert. Den høyeste temperaturen under første gipslag var lavere enn henholdsvis 600 °C for vegg (Figur A-1C) og 500 °C for himling (Figur A-1D). I himlingen var KLT-temperaturen bak gipslagene som forventet lav på grunn av effektiv beskyttelse med tre lag med gips.

Fasadeutførelsen, isolering og tetting forhindret brannspredning via fasaden til andre etasje. Det var ikke brannspredning gjennom skjøter mot øvre etasje. Det var ingen gjennomtrenging av røyk eller flammer til øvre etasje, der treoverflater var intakte. Det var heller ikke betydelig temperaturøkning i, eller flamme- og røykspredning gjennom, ventilasjonskanaler eller andre gjennomføringer. Det ekspanderende materialet som ble benyttet til branntetting ble aktivert i brannen og beskyttet mot gjennomtrenging av flammer og varme gasser.

Konklusjoner

Gjennom testen oppsto nedfall av lameller og en andre overtenning. Til tross for dette falt temperaturer raskt og ingen ny fullt utviklet fase ble nådd. Studien konkluderer med at en økning i lamelltykkelse på eksponeringssiden ikke er tilstrekkelig for å unngå delaminering. I stedet nevner forfatteren bruk av limtyper med bedre brannegenskaper som en mer robust løsning. Det antas likevel at den økte lamelltykkelsen i denne studien bidro til å forhindre en ny fullt utviklet brann til tross for delamineringen.

Fordi KLT-veggen begynte å brenne igjen etter delamineringen, ble selvslukking ikke oppnådd, og det var brannvesenet som slokket brannen. Imidlertid var det ikke tegn på bygningskollaps og brannen nådde heller ikke øvre etasje.

Studien viste at god utførelse av skjøter og gjennomføringer kan bidra til god brannmotstand. Tetting av testhuset var vellykket, ved at løsningene som besto av lufttetting, skjøter og gjennomføringer og fasadeutførelsen effektivt begrenset brannen mot spredning til øvre etasje. Karuse oppsummerer likevel behov for videre arbeid på følgende problemstillinger [46]:

- Det må gjøres forskning på flere ulike typer sammenføyninger for skjøter. Også vanlige sammenføyninger brukt i limtre bør testes, fordi disse brukes også i skjøting av KLT-elementer, og det er ikke nok kunnskap om hvordan disse sammenføyningene i kombinasjon med KLT oppfører seg i brann.
- Testen viste at lufttette betingelser gjorde at brannen avtok før vinduene ble manuelt knust, men det bør forskes mer på metoder for å gi tette konstruksjoner.

A.1.2 Skottland

Universitetet i Edinburgh studerer brannegenskapene til konstruksjoner av KLT-elementer. De har forsket eksperimentelt på forholdene som må ligge til rette for at selvslukking skal oppstå, årsakene til delaminering og hvordan delaminering påvirker brannutviklingen, påvirkningen fra eksponert KLT på brannodynamikken i brannrommet og egenskapene til ulike typer beskyttelse av KLT-konstruksjonene. Både storskala [42,47] og småskala [48] forsøk er utført.

Testoppsett

Storskalaforsøkene ble gjennomført i fem rom med samme størrelse, men med ulik plassering av eksponerte KLT-overflater. Rommene hadde grunnflate $2,72 \times 2,72 \text{ m}^2$ og høyde $2,77 \text{ m}$ og en døråpning på $0,76 \times 1,84 \text{ m}^2$.

Tabell A-1 gir informasjon om de tre ulike romkonfigurasjonene (Alpha, Beta og Gamma), som hadde ulik plassering og størrelse av eksponert KLT i rommet. Det ble gjort to forsøk for to av konfigurasjonene (Alpha-1, Alpha-2, Beta-1 og Beta-2) og ett forsøk av den tredje (Gamma).

Tabell A-1. Testmatrise for de fem storskalaforsøkene av de tre romkonfigurasjonene [47].

Romkonfigurasjon (eksponerte overflater)	Alpha (bakvegg og sidevegg)	Beta (bakvegg og himling)	Gamma (bakvegg, himling og sidevegg)
Antall forsøk	2	2	1
Eksponert KLT [m^2]	15	14	22

KLT-elementene hadde en tykkelse på 100 mm og besto av fem lameller med tykkelse 20 mm . Ueksponerte KLT-overflater var beskyttet med to lag $12,5 \text{ mm}$ tykke branngipsplater, og i alle forsøkene unntatt ett (Alpha-1) ble det også montert 25 mm steinullisolasjon og et ekstra gipsplatelag. Gulvene var beskyttet med 50 mm steinullisolasjon. Synlige skjøter i KLT-elementene ble tettet med brannsement.

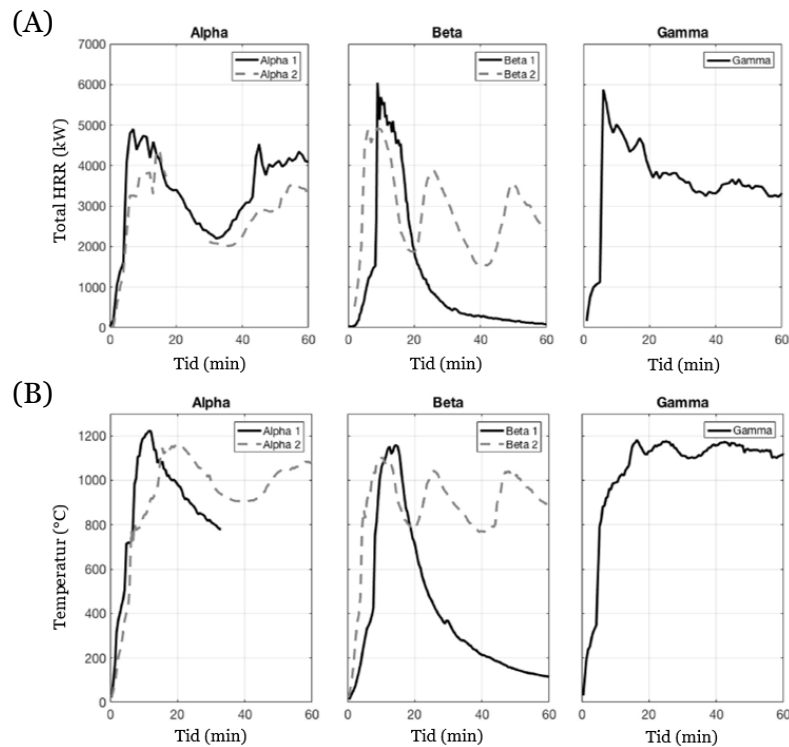
Brannen ble startet i romåpningen. Brannenergien i rommene var 132 MJ/m^2 , i form av fire stabler av trelekter, og var beregnet for å gi rask overtenning, ettersom nedkjølingsfasen var hovedfokus i forsøkene.

I de to testene som hadde eksponert bakvegg og himling (Beta-1 og Beta-2), ble i tillegg potensialet for selvslukking studert [42]. Det ble undersøkt om flammepunktteorien er gyldig i storskala, det vil si hvorvidt et materiale vil fortsette å brenne uten ytre varmekilde eller -stråling.

Småskalaforsøkene [48] omfattet to små rom, det ene med grunnplan $637,5 \times 660 \text{ mm}^2$ og høyde $637,5 \text{ mm}$, og det andre med grunnplan $575 \times 660 \text{ mm}^2$ og høyde 700 mm . Konfigurasjonen av eksponerte KLT-overflater var tilsvarende Alpha og Beta for storskalaforsøkene. Småskalaforsøkene ble utført med tre ulike brannenergier; liten (47 MJ/m^2 for Alpha og Beta), medium (104 MJ/m^2 for Alpha og Beta) og stor (277 MJ/m^2 for Beta). Beskyttede overflater var tildekket på samme måte som i storskalaforsøkene.

Resultater

Resultater fra forsøkene er vist i Figur A-2 [47]. Resultatene indikerte at tid til overtenning i rommet var påvirket av de eksponerte KLT-overflatene, dels fordi overtenning oppsto kort tid etter at flammer ble observert på disse overflatene, og dels fordi høyeste HRR ble målt like etter overtenning, noe som trolig er et resultat av forkulling av treet. Fasen «fullt utviklet brann» var veldig kort.



Figur A-2. Total HRR (A) og temperaturutviklingen (B) i brannrommet i de fem forsøkene [47].

Figur A-2 viser videre at HRR og temperaturutviklingen var tydelig forskjellig i de tre rommene. Blant annet tyder det på at eksponert himling kan gi større bidrag til brannenergien og påvirke brannutviklingen mer enn eksponerte vegger, fordi forskjellen i maksimalverdien til HRR er stor mellom to konfigurasjoner med omtrent like store eksponerte arealer, Alpha (to vegger eksponert) og Beta (en vegg og himling eksponert). For Beta og Gamma (to vegger og himling eksponert) er forskjellen i maksimalverdien for HRR mindre, selv om Gamma har nesten 50% høyere eksponert areal enn Beta.

De høyeste målte temperaturene i rommene er imidlertid ikke så ulike, med 1114°C for Beta-1 og 1236°C for Alpha-1, og gjennomsnittlig høyeste temperatur ble målt til 1174°C. Dette viser at eksponerte treoverflater har liten påvirkning på maksimaltemperaturene i brannrommet. Det lange brannforløpet for Gamma, Alpha-2 og Beta-2 viser imidlertid at stråling mellom de eksponerte overflatene kan ha stor påvirkning på brannutviklingen i rommet. Antall eksponerte overflater og plasseringen av overflatene i forhold til hverandre har stor betydning. Delaminering ble observert, med den konsekvens at temperaturer og HRR viste en periodisk økning når en lamell falt av og ferskt treverk ble eksponert. Delaminering skjedde raskere (etter ca. 20 min) for testoppsett Beta med én vegg og himling eksponert, sammenlignet med Alpha (etter ca. 30 min) med to eksponerte vegger. Delaminering kunne ikke observeres like tydelig i kurvene for temperatur og HRR i

forsøket med tre eksponerte overflater, noe som forklares med at flere faktorer spiller inn, for eksempel tilbakestråling.

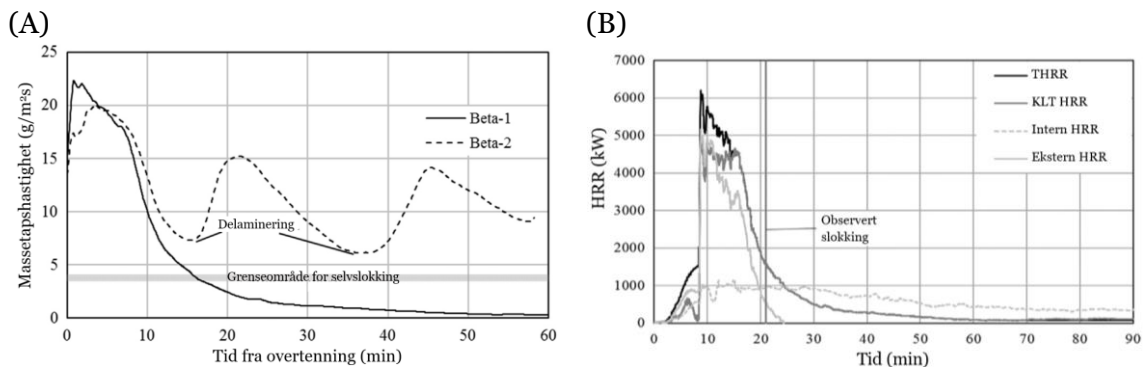
Videre viser resultatene for Beta at rom med samme geometri, areal av eksponerte overflater og type beskyttelse kan gi svært ulike resultater. I Beta-1 oppsto nedkjøling og selvslukking, mens i Beta-2 oppsto delaminering på store arealer, noe som forårsaket avdekking av friskt trevirke, nye overtenninger og vedvarende brann. Tid til overtenning var også ulik og kan ha stor påvirkning på videre brannforløp. I virkeligheten er hver brann ulik og bestemmelse av brannutviklingen vil alltid være usikker. Resultatene må derfor sees i sammenheng med andre liknende forsøk for å kunne trekke flere konklusjoner.

Resultatene viste også at tilgjengelige metoder for å bestemme maksimaltemperaturene i rommet stemte godt med forsøkene, mens metoder for å bestemme total HRR ga lavere resultater enn det som ble målt. Fordi noe av brenselet er plassert på vegger og i himling i form av eksponert KLT, mens metodene er utviklet for brensel plassert på gulvet, kan målinger og beregninger gi svært ulike resultater.

Maksimal forkullingsdybde ble målt til mellom 11 og 58 mm i løpet av 60 min test. Det ble målt mindre forkullingsdybde i himling sammenlignet med vegger, noe som kan forklares med at det er lavere oksygenkonsentrasjon i himling, og dermed saktere pyrolyse. Gjennomsnittlig forkullingshastighet for de fem forsøkene var 0,7 mm/min (median 0,9 mm/min). Ut fra den målte totale forkullingsdybden, estimerer studien at forventet fullstendig forkulling av første 20 mm lamell er ca. 18 min. Selvslukking ble observert i ett av fem forsøk, hvor en vegg og himling var eksponert. Selvslukking var ikke repeterbart, og var ikke observert i rom med tre eksponerte overflater. Studien peker på at selvslukking var avhengig av at delaminering ikke fant sted. Maksimal forkullingsdybde var 11 mm i forsøket der selvslukking fant sted, noe som er mindre enn den ytterste lamellen på 20 mm.

Forskerne i Edinburgh har også utviklet en metode for å kunne vurdere om selvslukking vil oppstå eller ikke i et bestemt brannrom, men flere forsøk behøves for å verifisere metoden og inkludere fenomener som blant annet delaminering og luftstrøm [64].

Selvslukking ble studert for den ene romkonfigurasjonen (Beta) [42]. Den ene av de to testene nådde ikke selvslukking på grunn av omfattende delaminering av KLT-panelene, som vist i Figur A-3A. Figur A-3B viser HRR gjennom testen som oppnådde selvslukking. Her ble overtenning registrert ca. 8,5 min etter antennelse, noe som kan ses i figuren som rask økning i HRR fra 1550 til 6210 kW.



Figur A-3. (A) Massetapshastighet og (B) HRR for romkonfigurasjoner Beta-1 og Beta-2 [42].

I småskalaforsøkene ble det studert hvordan størrelsen på brannenergien og plasseringen av eksponerte overflater i forhold til hverandre påvirker brannutviklingen og muligheten for selvslukking [48]. Resultatene fra forsøkene indikerer, i motsetning til [47], at Beta (en vegg og himling eksponert) gir mindre delaminering enn Alpha (to eksponerte vegger) når brannenergien er 47 og 104 MJ per m² gulvareal. Dette forklares med at laget med varme røykgasser i himlingen fungerer som en tredje overflate i rommene med to eksponerte vegger, mens rom med én vegg og himling eksponert ikke får denne tilleggs-effekten. Total varmestråling mellom de to veggene og de varme røykgassene i himlingen i Alpha-rommene var dermed høyere enn mellom vegg og himling i Beta-rommene, og ga en langsommere nedkjøling av brannen, KLT ble varmet opp lengre innover i tverrsnittet, og forkullingsdybden ble større enn i Beta-rommene. Ved en mye høyere brannenergi på 277 MJ/m² i Beta-konfigurasjonen oppsto ikke selvslukking, og omfattende delaminering førte til en langvarig brann. I dette tilfellet var forholdene i rommet annerledes enn i rommene med lavere brannenergi, fordi den løse brannenergien som besto av trelekter stablet på gulvet fylte store deler av rommet. Høyere brannenergi gir også mer forbrenning utenfor branncellen [48].

Resultatene tydet også på at forbrenningshastigheten (g/m²s) avhenger av størrelsen på eksponert areal av KLT [48], noe som er i samsvar med annen forskning [61]. Selv om forbrenningshastigheten i begge Alpha-rommene sank til under 3,5 og 3,7 g/m²s, referert til som grenser for selvslukking [57,64], vedvarte brannen. Ved den laveste brannenergien sloknet flammene når forbrenningshastigheten lå under disse grensene, men på grunn av gløding og delaminering antente branngassene igjen, og temperaturen i rommene økte på nytt. I rommet med mellomstor brannenergi sloknet ikke flammene selv om forbrenningshastigheten sank under 3,5 g/m²s. Dette kan tyde på at de kritiske grensene for selvslukking ikke egner seg for disse romstørrelsene og konfigurasjonene.

Konklusjoner

Forsøkene viste kortere tid til overtenning i rommet når KLT-elementer var direkte eksponert for brannen. Delaminering og sekundær økning i brannen, og i noen tilfeller overtenning, oppsto både i rom med to eksponerte vegger og i rom der én vegg og himling var eksponert. I rom der to vegger og himling var eksponert, vedvarte brannen lenge. Resultatene indikerer også at eksponert KLT i himling kan ha større påvirkning på brannutviklingen enn eksponerte vegger.

Beskyttelse av vegger og himling med to lag 12,5 mm branngips, 25 mm tung steinull-isolasjon og ett lag 12,5 mm branngips direkte på KLT-elementene, var tilstrekkelig til å forhindre forkulling av elementene i løpet av branntiden på 60 min. Alle lagene var festet direkte til KLT-elementet.

Studien indikerer at småskala målinger av massetapsrate for selvslukking kan brukes som input til å bruke flammepunktteorien til å predikere selvslukking i storskala, gitt at delaminering ikke oppstår. Studien viser at dersom delaminering skjer før det inntreffer selvslukking (massetapsrate kommer under et visst nivå), så vil treverket fortsette å brenne.

A.1.3 Nederland

Ved TU Delft i Nederland ble det utført to testserier for å kvantifisere forholdene som kreves for at selvsløkking skal oppstå, og for å verifisere en modell for prosjektering av en branncelle slik at selvsløkking inntreffer [49].

Testoppsett og resultater

Det ble utført tolv småskala forsøk i konkalorimeter (prøvestykker $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$) og fem forsøk i små rom (innvendige mål $500 \times 500 \times 500 \text{ mm}^3$). Rommene hadde én åpning med bredde 180 mm og høyde 500 mm. Rommene var bygget av KLT med fem lameller. To ulike elementtykkelser ble testet. Den ene (100 mm) besto av lamelltykkelser 20/20/20/20/20 mm, og den andre (120 mm) hadde lamelltykkelser 40/20/20/20/40 mm (dvs. tykkere lamell nærmest brannen).

Testene ble utført i konkalorimeteret med en varmekraft fra 0 til 10 kW/m^2 mot KLT-overflatene, og i to forsøk ble det også påført en luftstrøm på overflaten. I de små rommene ble propan brukt som brannenergi, med en konstant varmeavgivelseshastighet på 41 kW , og med en nedkjølingsfase som startet etter 40 minutter. Ulike overflater ble eksponert i rommene, se Tabell A-2.

Tabell A-2. Eksponerte overflater, lamelltykkelse og resultater for forsøk i små rom [49].

Eksperiment	Eksponerte overflater	Tykkelse ytterste lamell	Resultater
2.1	Bakvegg	20 mm	Selvsløkking, til tross for delaminering, grunnet lave temperaturer og lav varmestråling.
2.2	Bakvegg og sidevegger	20 mm	Delaminering, kontinuerlig brann.
2.3	Sidevegger	20 mm	Nedkjølingsfase, men delaminering og sekundær overtenning.
2.4	Sidevegger	20 mm	Selvsløkking, til tross for delaminering, grunnet lave temperaturer og lav varmestråling.
2.5	Sidevegger	40 mm	Selvsløkking.

Konklusjoner

Crielaard et al. fant at kritisk varmekraft for å sikre selvsløkking er $5\text{-}6 \text{ kW/m}^2$, og anbefalte å benytte maks 5 kW/m^2 som grense for hvor høy varmestråling man kan tillate ved bruk av denne metoden [49]. De fant også at en luftstrøm på mer enn $0,5 \text{ m/s}$ over overflaten kan påvirke selvsløkking. Resultatene viste at eksponerte KLT-overflater økte HRR og ga en mer langvarig brann.

A.1.4 Norge

A.1.4.1 Storskala rombrann

I forbindelse med byggeprosjektet Moholt 50/50 (fem blokker med ni etasjer med studenthybler, eid av Studentsamskipnaden i Trondheim (SiT)), ble det utført to storskala brannforsøk hos RISE Fire Research i Trondheim for å studere hvordan et branntilløp i en typisk hybel kan utvikle seg [50].

Testoppsett

Testhybelen i forsøkene hadde innvendige grunnflate $5,75 \times 2,3 \text{ m}^2$ og høyde 2,75 m, inkludert et lite bad, og vindu og dører mot henholdsvis bad og korridor utenfor hybelen. Hybelen var bygget av KLT-elementer med tykkelse 100 mm, laget av fem lameller med tykkelse 20 mm. En langvegg og en kortvegg var beskyttet med isolasjon og gipsplater, og gulvet var beskyttet med 30 mm trinnlydplate og 40 mm påstøp. Veggen mot badet var bare ett lag 13 mm standardgips festet i stålstendere av tynnplateprofil. Brannenergien i den møblerte hybelen var ca. 8735 MJ. Døren ut mot korridoren ($0,9 \times 2,0 \text{ m}^2$) var åpen under testene. I den ene testen var sprinkler aktiv i korridor og hybel, mens i den andre testen var sprinkler deaktivert i hybelen for å undersøke et fullstendig brannforløp.

Resultater

Storskalaforsoeket av brann med deaktivert sprinkler i hybelen viste at brannen vokste raskt. Taket kollapset 1 time og 36 min etter teststart. Hybelen var ikke påført last under testen. Brannens intensitet avtok ikke, og brannen måtte slukkes manuelt. Etter hvert som branneksonert KLT forkullet, falt deler av kullsjikt ned og nytt friskt tre ble eksponert. Kullet som falt av ble liggende på gulvet i hybelen og gløde. Forkullingshastigheten varierte mellom 1,4 til 0,7 mm/min, med et gjennomsnitt på 1,1 mm/min. KLT hadde god isolasjonsegenskap, med store temperaturforskjeller over tverrsnittet. Etter fullt utviklet brann ble det observert høye, intense flammer ut av vinduet i hybelen.

A.1.4.2 Gjennomføringstettinger

Testbeskrivelse

I 2018 ble det gjennomført brannmotstandsprøving av gjennomføringstettinger i en støttekonstruksjon av KLT ved RISE Fire Research. En sammenfatning av testen er gitt her med tillatelse. Testoppsettet er vist i Figur A-4.

En pilotovn ($1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$) ble brukt i forsøket og testen var basert på NS-EN 1366-3:2009. KLT-veggen, som var av typen KLT100 5S fra Stora Enso (levert av WoodCong og angitt til å ha brannmotstand *REI 60*), var 100 mm tykk og besto av fem lameller med tykkelse 20 mm.

Gjennomføringene for rør og kabler besto av en stor utsparing ($1000 \times 600 \text{ mm}^2$) med gjennomføringer gjennom en mineralullplate (to lag 50 mm, 160 kg/m^3). I tillegg var det individuelle utsparinger med gjennomføringer gjennom vegg for fire kabler og et avløpsrør (PP-rør). Tettemidlene som var brukt var FR Acrylic, FR Board, FR Collar og FR Pipe Wrap fra Polyseam4. Mineralull-bakdytt ble også brukt på noen av gjennomføringene. Det ble brukt brannmaling (FR service coating FR-1) i sårflaten til alle utsparingene.

(A)



(B)



Figur A-4. Bilde av testoppsettet før test fra ueksponert side (A) og eksponert side (B). Gjengitt med tillatelse.

Resultater

Total testtid var 92 min. De fleste av gjennomføringene hadde ikke brudd på integritet gjennom testen, mens noen nådde temperaturgrensen før 92 min, og ga dermed brudd på branncellebegrensende funksjon.

Læringspunkter fra testen med hensyn på KLT inkluderer følgende:

- Innfesting av oppheng for støtte av gjennomføringer kan være et svakt punkt.
- KLT-veggen hadde ingen detekterbar defleksjon etter 60 min. Fra 85 – 90 min var det noe defleksjon, under 2 mm totalt. Dette innebærer at KLT-veggen oppførte seg som en rigid vegg. Det er viktig å merke seg at dette kan sammenlignes direkte med en test utført i en større ovn.

A.2 USA

A.2.1 Forskningsprosjektet *Fire safety challenges of tall wood buildings*

I USA er det over flere år gjennomført et omfattende prosjekt med tittelen *Fire safety challenges of tall wood buildings* [37,51,52,67,83,84]. Prosjektet var initiert av International Code Council (ICC) Ad Hoc Committee on Tall Wood Buildings. Målene med prosjektet var å evaluere dagens kunnskap om KLT, avdekke kunnskapshull, gi bedre forståelse for hvilken brannsikkerhet som kan oppnås i høye bygninger med trekonstruksjoner og forstå potensialet ved bruk av trekonstruksjoner i høye bygninger. Bakgrunnen for prosjektet var et økende ønske om å kunne utnytte trematerialets positive egenskaper også i høye bygninger, mens dagens byggregler i USA ikke tillater dette. Ved å øke kunnskapen om brannsikkerheten i høye trekonstruksjoner ønsker man med tiden å kunne endre byggereglene. Mye av prosjektet ble utført av National Fire Protection Association (NFPA), men også andre organisasjoner var involvert, blant annet RISE Research Institutes of Sweden (tidligere SP) i Sverige.

Prosjektet består av flere faser. Deler av fase 1 og 2 er beskrevet i dette kapittelet.

Fase 1

Litteratur om brannegenskapene til trematerialer som ble brukt i høye bygninger ble samlet og oppsummert. I tillegg ble det kartlagt kunnskapshull i forhold til prosjektering, og materialegenskaper som må undersøkes nærmere for å oppnå bedre forståelse for brannegenskapene til høye bygninger med trekonstruksjoner.

Litteraturstudien kartla mye litteratur som oppsummerer resultater fra brannforsøk av limtre og KLT-elementer [67].

De fleste brannforsøk var utført med standard brannkurve. Det ble påpekt at relevansen av standard brannkurve burde undersøkes nærmere, for å bygge opp bedre forståelse for hvordan konstruksjonen responderer på temperaturendringene, og for slik bedre å kunne dimensjonere konstruksjonen.

Rapporten fra litteraturstudiet oppsummerer også kort mange mulighetsstudier som er gjennomført, der brannsikkerheten vurderes ved analytisk brannteknisk prosjektering. Disse studiene inneholder imidlertid lite informasjon om hvilke detaljløsninger som bør velges for å oppnå tilfredsstillende brannsikkerhet. Omfattende studier var utført på skjøter og forbindelser, men flere av løsningene de fant er verken praktiske, kostnads-effektive eller estetisk gode. Behovet for å utvikle bedre og mer optimale løsninger ble derfor påpekt.

For å kunne forutsi en konstruksjons brannmotstand, ble det etterlyst mer kunnskap om hvordan tildekket og eksponert KLT blir påvirket av brannen, og hvordan forkullingen av KLT kan påvirke brannforløpet. Det ble uttrykt behov for kartlegging av hvilke forhold som kan føre til selvslukking, slik at nødvendige tiltak kan inkluderes i brannstrategien.

Skjulte hulrom har vist seg å være en risiko med tanke på spredning av branner. Slike hulrom er ikke så vanlig i bygninger av KLT, men kan forekomme, og løsninger som forhindrer brannspredning ble derfor etterlyst.

Alle høye bygninger har en kjerne med trapperom og heiser. Denne er ofte bygget i betong, men for å redusere CO₂-avtrykket og redusere byggetiden er det ønskelig å kunne benytte KLT-elementer. I noen bygninger er dette allerede gjennomført. Kjernen er som regel del av rømnings- og angrepsveiene i bygningen og må derfor ha høy brannmotstand. Litteraturstudien konkluderte med at mer forskning var nødvendig for å øke forståelsen av brannegenskapene til kjerner av KLT, og sikre at disse gir nødvendig brannsikkerhet.

Flere forsøk var utført for å avdekke hvordan mekanisk last på konstruksjonen påvirker brannmotstanden. Resultatene var entydige og viste at med økende last ble brannmotstanden redusert, noe som gjelder for alle konstruksjonsmaterialer. Forsøkene var imidlertid hovedsakelig utført på enkeltkomponenter, og behovet for flere analyser og forsøk på større deler av konstruksjonen, for å bygge opp kunnskapen om blant annet fordeling av krefter i konstruksjonen, ble påpekt. Ved å utvide denne kunnskapen kan konstruktører forutsi kollaps med større nøyaktighet, og dimensjonere konstruksjonen for å unngå dette. Forskning på hele konstruksjonssystemer vil også øke forståelsen for konstruksjonens kontinuitet, stivhet, lastfordeling, samspill mellom ulike konstruksjonselementer, duktilitet til forbindelser og bruddmekanismer.

De fant lite forskning og testing på samvirkekonstruksjoner og -elementer, for eksempel samvirke mellom stål og tre eller betong og tre, og de konkluderte med at det var behov for mer kunnskap om riktig bruk av disse komponentene og konstruksjonene.

De fant også at bedre kommunikasjon av kunnskapsbasert risikobilde for brukere av bygninger med trekonstruksjoner var nødvendig for å bli kvitt myter, og for å lære brukerne hvordan de skal reagere og agere ved en brann i slike bygninger. I tillegg manglet innsatspersonell kunnskap om hvilken risiko branner i slike bygninger utgjør for dem, og hvordan de bør utføre rednings- og slokkearbeidet. Kommunikasjon mellom forskere og bygningsmyndigheter om kunnskap og løsninger er veldig viktig for utviklingen av byggereglene, noe som også påvirker samfunnets oppfatning av brannrisikoen i trebygninger.

Brannrisikoanalyser må utføres for å sette inn nødvendige tiltak på riktige steder for å oppnå tilfredsstillende brannsikkerhet. Det var imidlertid mangel på kunnskap om hvordan passive og aktive tiltak fungerer i bygninger med trekonstruksjoner, og hvordan de påvirker brannrisikoen. I tillegg var det behov for å avklare hvilket brannsikkerhetsnivået som er tilstrekkelig.

Litteraturstudien medførte at det i videreføringen av prosjektet ble forsket på:

- Eksponerte trekonstruksjoners påvirkning på brannforløpet i en branncelle; forstå hva eksponerte trekonstruksjoner kan bety for branndynamikken og fjerne myter om brannsikkerheten i trebygninger.
- Skjøter mellom bygningskomponenter av tre og komposittkomponenter; øke kunnskap om forbindelsenes egenskaper ved branneksposering.
- Gjennomføringer; hvordan ivareta funksjonene for branncellebegrensende bygningsdeler.

Kartleggingen av kunnskapshull førte til at forskning på følgende områder ble anbefalt for å få bedre forståelse for brannsikkerheten i høye trebygninger [37,67]:

- Brannforsøk av nye, innovative løsninger av tre og av kombinasjonsløsninger.
- Storskala brannforsøk av høye trekonstruksjoner.
- Brannforsøk av høye trekonstruksjoner med naturlig brannpåkjenning.
- Økonomiske analyser for å kvantifisere byggekostnader, driftskostnader og kostnader for konstruksjonsmaterialene.
- Informasjon og kommunikasjon om brannrisiko og muligheter.

Spesielt for skjøter og forbindelser:

- Utføre systemtesting og ikke bare av enkeltkomponenter.
- Ulike forbindelser for skjøter mellom tre og kompositter.
- Kostnadseffektive løsninger.
- Mer arbeid på å forstå brannbeskyttelse for skjøter (selv om det også ble påpekt at det for KLT er utviklet effektive og brannsikre sammenføyninger).
- Mer forskning på brannklassifisering av gjennomføringer gjennom brannklassifiserte plater.
- Mer kunnskap om system for forvaltning, drift og vedlikehold

Spesielt for gjennomføringer:

- Generelt antas det at forseglingen der strukturen og branntettingen møtes, ikke påvirkes av høye temperaturer. Dette gjelder ikke nødvendigvis hvis gjennomføringen går gjennom brennbart materiale og andre funksjonskrav trer i kraft.
- Viktigheten av å opprettholde integriteten til branntettende materialer ble understreket i anbefalinger for brannmotstand i trebygninger.

Fase 2

Aktiviteter:

- 41 brannforsøk på rombranner med trekonstruksjon, i tillegg til noen referanseforsøk med ubrennbare konstruksjoner, ble oppsummert og diskutert. Trekonstruksjonene var helt eller delvis beskyttet.
- Seks store brannforsøk ble planlagt og gjennomført.
- Praktiske metoder for funksjonsbasert prosjektering, basert på naturlig brannutvikling, ble utviklet og evaluert. I disse metodene må man forutsette at trekonstruksjonen er fullstendig beskyttet slik at brannen kan slokne av seg selv når inventaret er utbrent. Rapporten beskriver derfor også en metode for å forutse nedfall av gipsplatelag som danner beskyttelsen av konstruksjonen.
- Brannodynamikken i KLT-elementer med ulike limtyper ble undersøkt, og resultater fra forsøk med ulike KLT- og limtyper der delaminering var undersøkt ble presentert.

A.2.1.1 Storskala brannforsøk utført av Forest Products Laboratory

I prosjektets *Phase 2, Task 2&3*, ble de største brannforsøkene som er utført til dags dato gjennomført av Forest Products Laboratory hos US Department of Agriculture [51]. Det ble utført fem storskala forsøk av brann i leiligheter med flere rom og korridor i testoppsett med to etasjer. Målet var å studere eksponerte KLT-elementers bidrag til brann i leiligheter, selvslokking, personsikkerheten til beboere og brannsikkerheten for innsatspersonell. I tillegg ble effekten av sprinklersystem testet i to av forsøkene.

Testoppsett

Leilighetene besto av flere rom, en korridor utenfor langs to av veggene i leiligheten, med trapperom i ene enden og åpning ut til forsøkshallen i andre enden. I leiligheten var det flere åpninger. Døråpning fra leilighet til korridor var $0,914 \times 2,10 \text{ m}^2$, og i front av leilighetene var det to store åpninger på $3,66 \times 2,44 \text{ m}^2$ høyde.

Bærekonstruksjonen var av KLT, mens de ikke-bærende innerveggene hadde søyler av limtre, tynne stålprofiler og ett lag 12,7 mm gipsplatekledning. KLT-elementene var 175 mm tykke og var sammensatt av fem lameller med tykkelse 35 mm.

I første etasje var det to lag sementbaserte plater direkte på betonggulvet, mens gulvet i andre etasje besto av KLT-elementer med to lag 12,7 mm sementbaserte plater oppå. Himlingen var nedsenket i kjøkkenarealet og i en liten gang mellom bad og soverom. Himlingen besto av ett lag 12,7 mm gipsplater, og over den nedsenkete himlingen var KLT-elementene beskyttet med to lag 15,9 mm branngips. Døren mellom leiligheten og korridoren hadde 20 min brannmotstand. I to av forsøkene ble det satt inn vindu i de to store åpningene i frontveggen av leilighetene. Vegger og himling som skulle være brannbeskyttet i forsøkene, ble tildekket med to lag 15,9 mm branngips.

Møblene i rommene utgjorde totalt en brannenergi på 550 MJ/m^2 . Brannen ble startet i et av de lave kjøkkenskapene i hjørnet på kjøkkenet.

Forsøkene hadde tre variabler: mengden eksponert KLT; åpne eller lukkede ventilasjonsåpninger i front av leiligheten; og sprinklersystem eller ikke. Temperaturer, luftstrømhastighet, varmefluks og HRR ble målt. Informasjon om testoppsettet finnes i Tabell A-3.

Tabell A-3. Testmatrise for de fem storskalaforsøkene [51].

Test	Etasje	Eksposering	Vinduer	Annet	Sprinkler
1	1	Ingen. Alle KLT-overflater var beskyttet og alle åpninger i leiligheten i andre etasje var tildekket for at brannen ikke skulle spre seg inn i leiligheten over.	Nei		Nei
2	2	Delvis. Ca. 30% av himlingen i stuen og soverommet var eksponert (eksponert areal 16,714 m ²).	Nei	Taket var belastet med vanntanker som tilsvarer en jevnt fordelt belastning på 0,96 kPa, som er samme belastning som ble brukt i forsøkene utført hos National Institute of Standards and Technology (NIST) [42].	Nei
3	2	Eksponert. Langveggen i stuen (ikke kjøkkenet) og KLT-veggen i soverommet (ikke veggen med den store åpningen) var eksponert (eksponert areal 16,714 m ²).	Nei	Døren mellom leiligheten og korridoren var lukket, men pumpen var ved en forglemmelse ikke koblet på. Taket var belastet på samme måte som i Test 2.	Nei
4	1	Eksponert. Samme overflater som i Test 3, samt himlingen i hele stuen, nesten hele himlingen på soverommet, limtresøylene og bjelken var eksponert (eksponert areal 41 m ²).	Ja	Vinduer var installert i de store åpningene i fronten av leiligheten. Sprinklersystem var installert i hele leiligheten. I denne testen var sprinklersystemet fylt med vann og fullt operativt.	Ja
5	1	Eksponert. De samme overflatene som i Test 4 var eksponert (eksponert areal 41 m ²).	Ja	Sprinklersystemet var ikke operativt i starten av brannen. Døren mellom leiligheten og korridoren var ikke lukket.	Ja (20 min sen aktivering)

Resultater

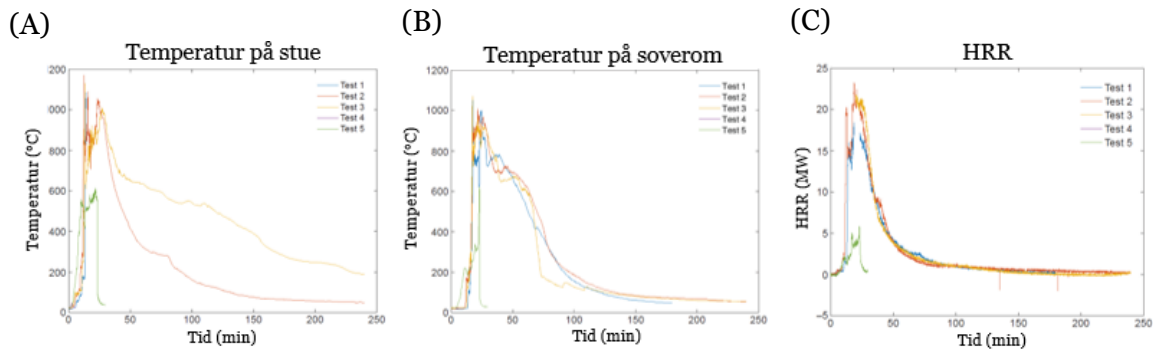
Tabell A-4 og Figur A-5 viser resultater for forsøkene.

Tabell A-4. Tid fra teststart til observasjoner i løpet av brannforsøkene [51].

Test	Tid til overtenning i stue [mm:ss]	Tid til overtenning i soverom [mm:ss]	Tid til flammer i korridor utenfor dør til leilighet [mm:ss]	Tid til svikt i dør til leilighet [mm:ss]	Tid til sprinkleraktivering [mm:ss]
1	13:27	17:20	26:51	57:46	N/A
2	11:42	17:20	30:38	63:59	N/A
3	12:37	17:00	13:06	29:42	N/A
4	N/A	N/A	N/A	N/A	2:37
5	N/A	N/A	~9:00 ^a	N/A	23:00 ^b

a Dør til leilighet var åpen ved teststart.

b Sprinkler ble aktivert manuelt.



Figur A-5. Kurvene viser temperaturutviklingen i stuen (A) og soverommet (B) og HRR (C) for hvert av forsøkene Test 1-5. I Test 4 og 5 var HRR begrenset fordi sprinklersystem var installert. Avvik: Målt maks HRR kan være lavere enn reelle verdier i Test 1 og 2, fordi et gassfilter måtte skiftes i en periode da HRR var høy, og fordi hetta på avsuget ikke fanget opp all røyken og branngassene i Test 1. I de påfølgende forsøkene økte man hastigheten på avsuget for å fange opp mer av røyk og gasser. Temperaturmålingene i Test 1 i stuen stoppet etter overtenning og vises derfor ikke på kurven. I Test 3 ble ikke HRR målt de første 21 min av forsøket. [51]

Brannene i de fire forsøkene uten sprinklersystem eller med forsinket aktivering av sprinklersystemet hadde en rask vekstfase. I Test 1, 2 og 3 gikk brannen til overtenning, og etter fullt utviklet brann fulgte nedkjølingsfasen. I stuen varierte nedkjølingsfasen mye mellom de ulike testoppsettene og temperaturen sank raskest i Test 2 med delvis eksponerte himlinger. Temperaturutviklingen i Test 1, 2 og 3 var lik, mens Test 4 og 5 skiller seg ut på grunn av at sprinklersystemet slokket brannene tidlig. Høyeste temperatur er litt lavere på soverommet enn i stuen. Dette er forventet, fordi stuen er i samme rom som kjøkkenet, der brannen startet. Fullt utviklet brann varte kortere i stuen enn på soverommet, men nedkjølingen av brannen var raskere på soverommet enn stuen. Temperaturutviklingen i vekstfasen i Test 5 var raskere enn i de andre forsøkene, men den høyeste målte temperaturen var lavere, til tross for at deler av himlingen var eksponert, i tillegg til de samme veggene som i Test 3. Grunnen til dette er blant annet at ventilasjonsåpningen i Test 5 var mye mindre enn i de andre forsøkene, og dermed var tilgangen på oksygen mindre.

For Test 1, uten eksponert KLT, ser det ut til at HRR var noe lavere ved fullt utviklet brann enn i Test 2 og 3. HRR i Test 2 og 3 var lik, selv om plassering og størrelse av eksponerte overflater var ulik, med delvis eksponert himling i Test 2, mens i Test 3 var to vegger eksponert. Brannen i Test 4 ble raskt slukket av sprinklersystemet og vises derfor ikke på kurven. I Test 5 var de store åpningene lukket med vindu, mens inngangsdøren til leiligheten var åpen. Brannen utviklet seg litt raskere enn i de andre forsøkene helt i starten, men høyeste målte HRR var mye lavere enn i de andre forsøkene. Brannen ble slokket av sprinklersystemet som ble manuelt aktivert etter 23 min.

A.2.1.2 Storskala brannforsøk utført av National Institute of Standards and Technology (NIST) og National Research Council of Canada (NRC)

I prosjektets *Phase 2, Task 2&3*, ble forsøk utført i samarbeid mellom National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA og National Research Council of Canada (NRC) i Canada. Det ble gjennomført seks store brannforsøk med mål om å kvantifisere KLT-elementenes bidrag til brannutviklingen, og å undersøke hvilke forhold som skal til for at brannen skal selvslokke [52].

Testoppsett

Forsøkene ble gjennomført i store rom med grunnflate $9,1 \times 4,6 \text{ m}^2$ og høyde 2,7 m. Rommene skulle simulere en ettroms leilighet med stue, kjøkken og soverom. I fire forsøk var ventilasjonsåpningen en dør med åpning $1,8 \times 2,0 \text{ m}^2$, mens i to forsøk var døråpningen $3,6 \times 2,0 \text{ m}^2$.

Konstruksjonen var av 175 mm tykke KLT-elementer med fem lag lameller med tykkelse 35 mm. KLT-elementene som var beskyttet hadde to eller tre lag 15,9 mm branngips. Brannenergien var 550 MJ/m^2 i form av møbler.

Det ble gjort målinger av temperaturutviklingen inne i rommene, HRR, varmekraft inne i leiligheten og utenfor, forkullingsdybde, luftstrømmer, samt temperaturen inne i KLT-elementene og mellom de ulike gipsplatelagene og konstruksjonen.

De seks forsøkene ble utført i rom med varierende åpningsfaktor og grad av eksponert KLT. Test 1-1 og 1-2 ble brukt som referanseforsøk for å kunne definere KLT-elementenes påvirkning på brannen i de påfølgende forsøkene med ulik grad av eksponert KLT. Tabell A-5 viser en oversikt over de seks testene med informasjon om åpningene, størrelsen på de ulike vegg- og himlingsoverflatene, og om overflatene var beskyttet eller eksponert.

Tabell A-5. Testmatrise for rombrannforsøk av KLT [52].

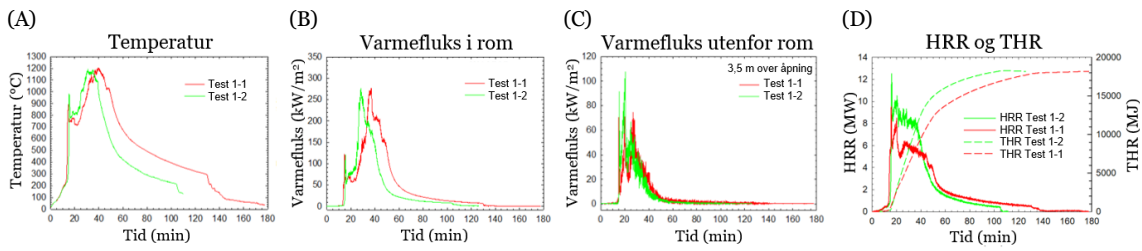
Test	Ventilasjons- åpning	Overflate				
		Vegg 1 ($9,1 \times 2,7 \text{ m}^2$)	Vegg 2 ($4,6 \times 2,7 \text{ m}^2$)	Vegg2 ($9,1 \times 2,7 \text{ m}^2$)	Vegg 4 ($4,6 \times 2,7 \text{ m}^2$)	Himling ($9,1 \times 4,6 \text{ m}^2$)
1-1	$(1,8 \times 2,0 \text{ m}^2)$	3G	3G	3G	3G	3G
1-4		3G	3G	3G	3G	Eksponert
1-5		Eksponert	3G	3G	3G	3G
1-6		Eksponert	3G	3G	3G	Eksponert
1-2	$(3,6 \times 2,0 \text{ m}^2)$	2G	2G	2G	2G	2G
1-3		Eksponert	2G	2G	2G	3G

2G og 3G betyr beskyttet med hhv. 2 og 3 lag gips

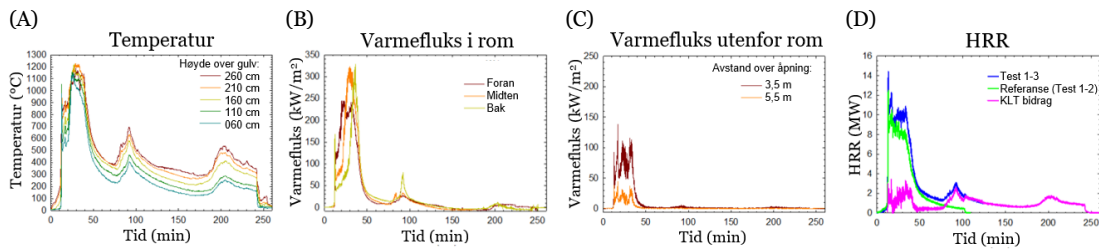
Resultater

Resultatene fra forsøkene er brukt til å utvikle og verifisere et modelleringsverktøy som kan benyttes til å vurdere KLT-konstruksjonens bidrag til brannutviklingen i rombranner [84].

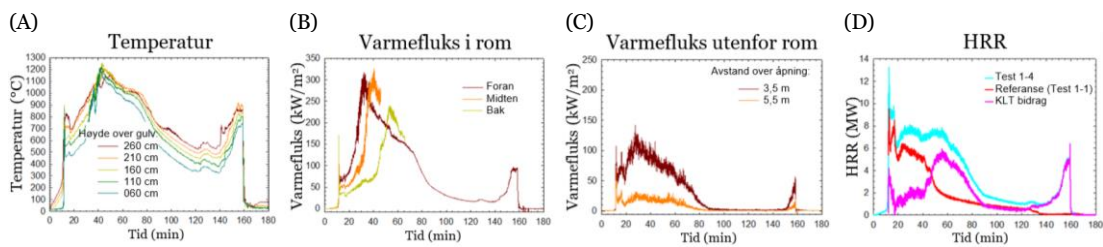
Figur A-6 til A-10 viser eksempler på målinger av temperaturer, varmekraft i og utenfor rom, samt HRR for Test 1-1 – Test 1-6.



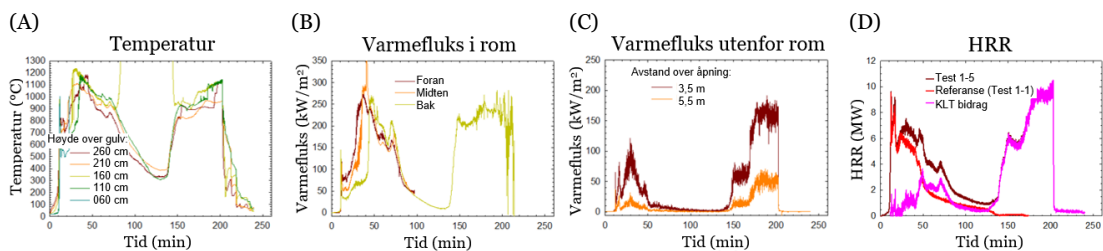
Figur A-6. **Test 1-1 og 1-2.** Temperaturutvikling (A), varmekraft (B,C) og HRR og THR (D) for referansetester med liten ventilasjonsåpning og tre lag branngips på alle flater (Test 1-1) og med stor ventilasjonsåpning og to lag branngips på alle flater (Test 1-2) [52].



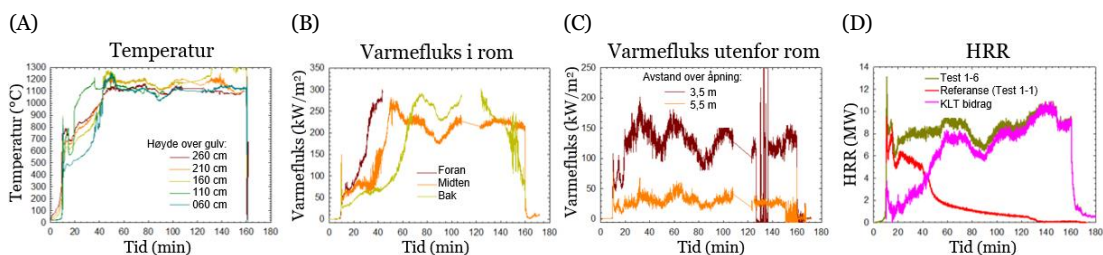
Figur A-7. **Test 1-3.** Temperaturutvikling (A), varmekraft (B,C) og HRR (D) for rom med stor ventilasjonsåpning, én eksponert vegg og tre lag branngips på resterende vegger og to lag i himling. (D): Test 1-3 er sammenstilt med Test 1-2 med tilsvarende ventilasjonsåpning [52].



Figur A-8. **Test 1-4.** Temperaturutvikling (A), varmekraft (B,C) og HRR (D) for rom med liten ventilasjonsåpning, eksponert himling og tre lag branngips på vegger. (D): Test 1-4 er sammenstilt med Test 1-1 med tilsvarende ventilasjonsåpning [52].



Figur A-9. **Test 1-5.** Temperaturutvikling (A), varmekraft (B,C) og HRR (D) for rom med liten ventilasjonsåpning, én eksponert vegg og tre lag branngips på resterende flater. (D): Test 1-5 er sammenstilt med referansetest Test 1-1 med tilsvarende ventilasjonsåpning [52].



Figur A-10. **Test 1-6.** Temperaturutvikling (A), varmekraft (B,C) og HRR (D) for rom med liten ventilasjonsåpning, én eksponert vegg og eksponert himling og to lag branngips på resterende vegger. (D): Test 1-6 er sammenstilt med referansetest Test 1-1 med tilsvarende ventilasjonsåpning [52].

Test 1-1 og 1-2 (Figur A-6)

Rommene hadde ulik ventilasjonsåpning, og KLT var tildekket med forskjellig antall lag branngips.

I begge disse testene med beskyttet KLT nådde brannen overtenning etter omtrent 15 min. Fullt utviklet brann varte i 24 – 30 min, nedkjølingen startet etter 37 – 45 min og var rask. Flammene ut ventilasjonsåpningen forsvant etter 40 – 50 min og brannen selvslokket.

Varmefluksen inne i de to rommene var sammenlignbar og var mellom 170 – 275 kW/m² ved fullt utviklet brann, mens maksimal varmekraft utenfor rommet med stor ventilasjonsåpning (Test 1-2) var høyere (22 – 105 kW/m²) enn for rommet med liten ventilasjonsåpning (Test 1-1, 12 – 70 kW/m²). I Test 1-2 med stor ventilasjonsåpning brant inventaret raskere, og fasen med fullt utviklet brann varte kortere, enn i Test 1-1 med mindre åpning. En større ventilasjonsåpning gir altså en mindre intens brann inne i rommet, men høyere varmekraft og temperaturer på utsiden av rommet.

HRR var også høyere for Test 1-2 enn for Test 1-1.

Test 1-3 (Figur A-7)

Rommet hadde én eksponert KLT-vegg og ventilasjonsåpningen var tilsvarende stor som i Test 1-2 uten eksponert KLT.

Overtening skjedde etter 12,5 min. Deretter var det fullt utviklet brann med intens forbrenning av inventar og den eksponerte KLT-veggen i ca. 23 min. Nedkjølingsfasen startet etter 35 min og flammene ut åpningen opphørte etter 38 min. Fra 40 – 80 min inn i brannutviklingen forkullet KLT-veggen, men lite flammer ble observert. Etter 80 min begynte KLT-veggen å brenne med flammer igjen, og det første lamellaget falt gradvis ned. Flammene vedvarte i 20 min før de slokket og forbrenningen gikk over til glødebrann. Etter 190 min oppsto flammer igjen og det andre lamellaget falt etter hvert ned. Den tredje oppflammingen var kortere enn den andre. Begge tilfellene med ny oppflamming oppsto før lamellaget falt ned, og opphørte ved nedfall av det forkullede lamellaget. Temperaturen midt i rommet økte under de to oppflammingene.

Varmefluksen inne i rommet varierte fra 200 – 320 kW/m², noe som er mye høyere enn i Test 1-2, som hadde samme ventilasjonsåpning men ikke eksponert KLT. Utenfor rommet var varmekraften 25 – 115 kW/m², omtrent likt med Test 1-2. Varmefluksen over ventilasjonsåpningen var imidlertid høyere i Test 1-3 enn i Test 1-2. Varmefluksen målt i horisontal avstand utenfor ventilasjonsåpningen var omtrent like i de to forsøkene.

HRR var høyere og brannen varte lenger i Test 1-3 enn i Test 1-2. I Test 1-3 med én eksponert KLT-vegg oppsto overtenning ca. 3 min tidligere, med maksimal HRR på ca. 2 MW høyere i vekstfasen og ved fullt utviklet brann, enn i Test 1-2. Temperaturutviklingen og varmekraften på de to veggene uten eksponert KLT og åpning, og mot himlingen, var lik i de to forsøkene, bortsett fra i senere deler av nedkjølingsfasen. Varmefluksen mot utvendig fasade over åpningen var høyere i Test 1-3 med én eksponert KLT-vegg. Den eksponerte KLT-veggen bidro med 18 % av høyeste HRR, noe som vurderes å være et ubetydelig bidrag. KLT-veggen påvirket HRR i vekstfasen, ved fullt utviklet brann og ved de to sekundære oppflammingene.

KLT-veggen bidro med omtrent 540 MJ per m² gulvareal, og ga nesten en fordobling av brannenergien fra 550 MJ/m² til 1090 MJ/m².

Test 1-4 (Figur A-8)

Rommet hadde eksponert himling og ventilasjonsåpning var tilsvarende liten som i Test 1-2 uten eksponert KLT.

Overttenning oppsto etter 11,5 min med himlingen fullt involvert. Etter 50 min falt deler av første lamellag ned fra himlingen, og etter 55 min var forbrenningen i himlingen årsak til flammene ut åpningen. Nedkjølingsfasen startet 75 min etter at første lamellag hadde falt ned fra himlingen. Etter 85 min opphørte flammene ut åpningen. Fra 90 – 140 min forkullet himlingen med bare små stikkflammer innimellom, men etter 150 min oppsto forbrenning med flammer i himlingen og forårsaket en ny overtenning med blant annet flammer ut åpningen. Brannen ble slukket etter 159 min fordi det andre lamellaget hadde falt ned, og forkulling av tredje lamellag startet.

Varmefluksen inne i rommet varierte fra 150 – 320 kW/m², noe som er høyere enn i Test 1-1, som hadde samme ventilasjonsåpning men ikke eksponert KLT. Utenfor rommet var varmekuelsen fra 17 – 115 kW/m², også høyere enn i Test 1-1. Varmefluksen over ventilasjonsåpningen (140 kW/m²) var høyere og varte lenger enn i Test 1-1 (70 kW/m²). Varmefluksen målt i horisontal avstand utenfor ventilasjonsåpningen var ca. like høye i de to forsøkene, men varte mye lenger i Test 1-4.

Temperaturen midt i rommet og HRR viser tydelig den sekundære overtenningen for Test 1-4, sammenlignet med Test 1-1. I Test 1-4 oppsto overtenning ca. 3,5 min tidligere, og fullt utviklet brann varte 33 min lenger, enn i Test 1-1. Himlingen bidro med maksimalt 5,5 MW til HRR ved fullt utviklet brann og ved den sekundære overtenningen. Maksimaltemperaturene i rommene i de to testene var like, men i nedkjølingsfasen var det store ulikheter i temperaturutviklingen. Varmefluksen mot vegger og himling inne i rommene, og mot utvendig fasade over åpningen, var ulik i de to forsøkene. Varmefluksen mot utvendig fasade over åpningen var høyere og varte lenger i Test 1-4 enn i Test 1-1. Varmefluksen mot eventuelle nærliggende overflater/bygninger i 2,4 og 4,8 m horisontal avstand var like høy, men varte lenger, i Test 1-4 på grunn av den eksponerte himlingen.

KLT-veggen bidro med omtrent 900 MJ per m² gulvareal, og nesten tredoblet brannenergien fra 550 MJ/m² til 1450 MJ/m².

Test 1-5 (Figur A-9)

Rommet hadde én eksponert vegg og ventilasjonsåpningen var tilsvarende liten som i Test 1-2 uten eksponert KLT.

Brannen gikk til overtenning etter 11,5 min, altså 1 minutt tidligere enn for Test 1-3 med større ventilasjonsåpning, og 3 min tidligere enn for Test 1-1 med liten ventilasjonsåpning og ingen eksponerte KLT-overflater. Fullt utviklet brann varte i 39 min, noe som var lenger enn i både Test 1-3 (22 min) og Test 1-1 (30 min). Inventaret var utbrent etter 40 min, men den eksponerte veggen fortsatte å brenne. Etter 52 min begynte noe av kullsjiktet på veggen å falle ned, og brannen gikk inn i nedkjølingsfasen. Flammene ut åpningen opphørte etter 67 min, men veggen fortsatte å brenne. Det andre lamellaget i KLT-elementet fortsatte å brenne med flammer inntil 100 min, men fra 100 – 130 min

forkullet det nesten uten synlige flammer. Fra 130 – 140 min flammet brannen på den eksponerte veggen opp igjen, og nå ble også himlingen, og etter hvert de andre veggene, involvert i brannen. Brannen gikk inn i sekundær overtenning og flammer kom ut åpningen. Brannen ble sløkket etter 202 min.

I Test 1-5 med én eksponert langvegg oppsto overtenning noen få min tidligere enn i Test 1-1 uten eksponert KLT og Test 1-3 med eksponert langvegg og større ventilasjonsåpning. Maksimaltemperaturene i rommene var like, men brannen varte lenger i Test 1-5 og sekundær overtenning oppsto.

Varmefluksen inne i rommet varierte fra 175 – 290 kW/m², noe som er høyere enn i Test 1-1 uten eksponert KLT. Utenfor rommet var varmekraften 15 – 120 kW/m², også høyere enn i Test 1-1. Varmefluksen over ventilasjonsåpningen var høyere enn i Test 1-1, og varmekraften var høyere under den sekundære overtenningen enn under den første. Varmefluksen i horisontal avstand utenfor ventilasjonsåpningen var generelt omtrent like i de to forsøkene, men under den sekundære overtenningen i Test 1-5 ble varmekraften litt høyere enn i Test 1-1.

HRR og temperaturen midt i rommet målte tydelig den sekundære overtenningen, sammenlignet med Test 1-1 som hadde like stor ventilasjonsåpning, men ingen eksponert KLT-overflate. HRR i første del av brannen, før sekundær overtenning, var omtrent som i Test 1-1, fordi forbrenningen var kontrollert av ventilasjonsforholdene. Nedkjølingsfasen startet imidlertid litt senere i Test 1-5. Under den sekundære overtenningen ble først himlingen involvert, i tillegg til den eksponerte langveggen, og deretter de andre veggene, og varmeavgivelseshastigheten steg først til 6 MW og deretter videre til 10 MW.

KLT-veggene og himlingen bidro totalt med ca. 2000 MJ per m² gulvareal, og nesten femdoblet brannenergien fra 550 MJ/m² til 2550 MJ/m².

Test 1-6 (Figur A-10)

Rommet hadde én vegg og himling eksponert og ventilasjonsåpningen var liten, som i Test 1-2 uten eksponert KLT.

Brannen gikk til overtenning etter 9,8 min, som er den korteste tiden av alle forsøkene. Fullt utviklet brann varte til 160 min da brannen ble sløkket, noe som er mye lenger enn de andre forsøkene. Når brannen gikk til overtenning, kom det store flammer ut av åpningen. Etter inventaret var utbrent, fortsatte den eksponerte veggen og himlingen å brenne. Etter 80 min avtok flammene ut åpningen, men etter 100 min økte flammene igjen og forhindret sikten inn i rommet. 150 min inn i brannen hadde forkullingen av himlingen gått gjennom hele KLT-elementet. Brannen ble sløkket etter 160 min, og himlingen falt ned.

Etter overtenning steg temperaturen midt i rommet til maksimaltemperatur 1200°C, og var over 1000°C gjennom resten av forsøket.

Varmefluksen utenfor åpningen i horisontal avstand varte lenger og var høyere i Test 1-6 (maksimalt 55 kW/m²), sammenlignet med Test 1-1 (maksimalt 40 kW/m²).

I Test 1-6 med en langvegg og hele himlingen eksponert for brannen, oppsto overtenning ca. 5 min tidligere enn i Test 1-1 uten eksponert KLT, og fullt utviklet brann varte helt til brannen ble sløkket etter 160 min. Maksimaltemperaturene i rommene var like, men i

nedkjølingsfasen var det store ulikheter i temperaturutviklingen i Test 1-6 og Test 1-1. Varmefluksen mot vegger og himling inne i rommene, og mot utvendig fasade over åpningen, var svært ulik i de to forsøkene. Varmefluksen mot utvendig fasade over åpningen var mye høyere og varte mye lenger i Test 1-6 med eksponert KLT. Varmefluksen mot eventuelle nærliggende overflater/bygninger i horisontal avstand var også veldig høy, og varte lenger i Test 1-6, på grunn av de eksponerte KLT-elementene og nedfall av beskyttelsen på de andre overflatene.

HRR var høyere i Test 1-6 enn i Test 1-1, og nådde 10 MW før brannen ble slokket. HRR var høy gjennom hele brannforløpet etter overtenning, og økte litt når KLT-elementene delaminerte, og ved nedfall av det siste gipsplatelaget på overflatene som var beskyttet. Både varmekraften inne i rommet (170 – 290 kW/m²) og utenfor rommet (20 – 120 kW/m²) var høyere enn i Test 1-1. Varmefluksen over ventilasjonsåpningen var høyere i Test 1-6 (190 kW/m²) enn i Test 1-1 (70 kW/m²), og varte mye lenger.

KLT-veggen bidro med omtrent 2850 MJ per m² gulvareal, og økte brannenergien fra 550 MJ/m² til 3400 MJ/m².

Forkullingsdybde og forkullingshastighet

Forkulling av KLT-elementene ble observert i Test 1-2 (to lag gips og stor ventilasjonsåpning), men ikke i Test 1-1 (tre lag gips og liten ventilasjonsåpning). I Test 1-2 ble forkullingsdybden i bakre og midtre del av himlingen målt til 0 – 15 mm, og forkullingsmønsteret reflekterte skjøtene mellom gipsplatene. To steder hadde dyp forkulling (ca. 50 mm) i gipsskjøt i himling og i hjørne. KLT-elementene på veggene var ikke forkullet. I disse eksponerte testene var det også plassert små KLT-blokker (305 × 203 × 175 mm³) i bakre, midtre og fremre del av rommet for å måle forkulling. Forkullingsdybde på disse var 55 mm, 45 mm og 42 mm i Test 1-1 (liten ventilasjonsåpning) og 46 mm, 35 mm og 35 mm i Test 1-2 (stor ventilasjonsåpning).

Tabell A-6 viser målt forkullingsdybde i brannforsøkene med eksponert KLT. Forkullingsdybde ble målt til 60 – 154 mm på de eksponerte overflatene. Det ble også observert forkulling på veggene og himlingen som var tildekket med gips. Noe av denne forkullingen skyldtes varmeledning gjennom gipsen etter at den var tørket, og noe skyldtes at gipsen falt av.

Tabell A-6. Forkullingsdybde, målt manuelt etter de fire storskala brannforsøkene med eksponert himling eller vegg. Ikke-relevant er angitt med (-).

Test	Eksponert himling (mm)	Eksponert himling (mm)	Ikke-eksponert himling (mm)	Ikke-eksponert vegg (mm)
Test 1-3	-	60-80	0-10	0-20
Test 1-4	70-90	-	-	0-14
Test 1-5*	-	102-141	25-79	0-52
Test 1-6*	116-154	88-143	-	5-68

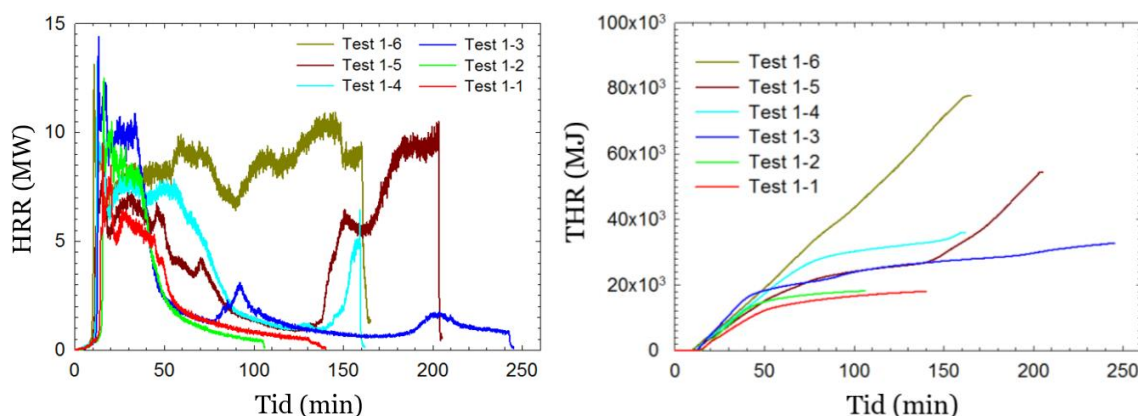
*Mer forkulling ville ha skjedd, dersom testen hadde fått fortsette uavbrutt.

Delaminering

Delaminering ble observert og bidro til brannutviklingen i alle fire tester med eksponert treverk. For testene med én eksponert overflate (langvegg eller himling), avtok brannen i en periode, og delaminering bidro i større eller mindre grad til at brannen tok seg opp igjen. For testen med to eksponerte overflater (langvegg og himling), bidro delaminering til at brannen aldri avtok. En årsak til at det var ulike bidrag fra delaminering til at brannen tok seg opp igjen, var den ulike størrelsen på ventilasjonsåpning. Liten åpning ga et mer innelukket rom, der delaminering ga et større bidrag til brannen, og en ny overtenning ble observert. For forsøk med stor ventilasjonsåpning bidro også delaminering til brannen, ikke som ny overtenning, men i form av noe økt HRR og varmestråling.

Figur A-11A sammenstiller HRR for alle brannforsøkene. For testene 1-3, 1-4 og 1-5 avtok brannen etter første maksimum. Deretter vises bidrag fra delaminering ved at brannen tar seg opp igjen, i størst grad for testene med liten ventilasjonsåpning på grunn av større grad av innelukkning. For test 1-6 avtok aldri brannen, fordi det var to eksponerte flater og større areal tilgjengelig for delaminering.

THR for alle brannforsøkene er vist i Figur A-11B. THR var ganske lik i Test 1-3 og 1-5 frem til delaminering og sekundær overtenning ved rundt 140 min. I Test 1-4 med eksponert himling var THR litt høyere enn i Test 1-3 og 1-5 med eksponert langvegg, mens i Test 1-6 økte HRR raskt gjennom hele forsøket. KLT-konstruksjonen bidro til HRR i brannen, avhengig av eksponert areal. KLT-elementenes bidrag til brannen økte med økende størrelse på eksponerte KLT-overflater, og ble også påvirket av ventilasjonsforholdene.



Figur A-11. HRR (A) og THR (B) som funksjon av tid for alle seks brannforsøk [52].

Temperaturøkningen inne i KLT-veggen ved limsjiktet i Test 1-3 var bratt og startet ved 220°C, noe som er lavere enn typisk forkullingsfronttemperatur på 300 °C. Dette tyder på at delaminering fant sted før forkullingsfronten nådde limsjiktet. Det er en viktig observasjon, ettersom det viser at forkullingsfronten ikke trenger å nå helt frem til limsjiktet for at delaminering skal kunne finne sted. Dette kan være viktig for å forstå selvslokking, der delaminering har vist seg å være sentralt.

Fordi KLT-elementene som ble benyttet i forsøkene delaminerte, er det behov for å kvantifisere bidraget til brannutviklingen fra KLT-elementer der delaminering ikke oppstår.

Selvslokking ble ikke observert i noen av testene med eksponert KLT.

Oppsummering

Forsøkene viser at størrelsen på ventilasjonsåpninger og eksponerte KLT-overflater, konfigurasjonen av eksponerte overflater og beskyttelsen på KLT-elementene påvirker brannutviklingen.

Dersom alle vegger og himling beskyttes med tre lag 15,9 mm tykk branngips, forhindres forkulling av KLT-elementene, og KLT gir dermed heller ingen bidrag til brannen [52]. I forsøket med to lag branngips på alle vegger og i himling oppsto litt forkulling på overflaten av KLT i himlingen innerst i rommet, men dette påvirket ikke brannutviklingen. I bygninger med tre lag 15,9 mm branngips på alle vegger og i himling vil brannens utvikling, temperaturer, HRR og varmefluks være tilsvarende som i en bygning med ubrennbare konstruksjoner og gipsplatekledning innvendig, og konstruksjonen vil være upåvirket av brannen. I rom med to lag branngips vil konstruksjonen kunne få litt redusert kapasitet på grunn av forkulling i overflaten, men brannen vil ellers utvikle seg som i en bygning med ubrennbare konstruksjoner.

I rommene med stor ventilasjonsåpning og ellers lik eksponering av KLT forbrant inventaret raskere og ga større flammer ut av åpningen, men et kortere brannforløp, enn i rommene med liten åpning. Maksimaltemperaturer og HRR var like i rommene med liten eller stor åpning, men varigheten på fullt utviklet brann varierte og nedkjølingsfasen startet tidligere i rommene med stor åpning. I rom med stor åpning var HRR høyere gjennom brannen, men mer av branngassene forbrant utenfor rommet.

Eksponering av KLT-overflater påvirket brannutviklingen i ulik grad, avhengig av størrelsen på de eksponerte overflatene, plasseringen (vertikal/horisontal) og ventilasjonsforholdene i rommet. Maksimaltemperaturer i rommene var omtrent like, men eksponert KLT førte til tidligere overtenning enn i rommene med fullstendig beskyttet KLT, uansett størrelsen og plasseringen av eksponert KLT-overflate. Forsøkene viser at i rommene med beskyttet KLT eller med bare én eksponert overflate og gode ventilasjonsforhold, varte fullt utviklet brann til 40 – 50 min ut i brannforløpet og deretter sank temperaturene raskt.

I testene med én eksponert langvegg startet nedkjølingsfasen tidligere og var raskere i Test 1-3 (stor ventilasjonsåpning) enn i Test 1-5 (liten ventilasjonsåpning). I Test 1-5 var mye av branngassene forhindret fra å slippe ut, temperaturene i rommet var høye over lengre tid, og dermed forkullet også mer KLT. Dette forårsaket delaminering og en sekundær overtenning, der himlingen og de andre veggene ble involvert fordi gipsplatebeskyttelsen falt ned. Delaminering oppsto også i Test 1-4 og 1-6 i ulikt omfang.

Større åpninger, eksponert himling eller flere eksponerte overflater samtidig gav mer forbrenning av branngasser utenfor rommet, høyere flammer og mer intens stråling på fasaden over rommet. I de to forsøkene der alle KLT-elementene var beskyttet, medførte størrelsen på åpningen større flammer og mer stråling på utvendig fasade, både for bygninger med brennbare og ubrennbare konstruksjoner. Ved valg av fasadesystem må man altså ta hensyn til dette uansett hvilken konstruksjon bygningen har.

I bygninger med eksponert KLT vil størrelsen på eksponert overflate, og delvis orienteringen (vertikal/horisontal), være avgjørende for brannutviklingen.

På grunn av den høye varmefluksen i horisontal avstand fra åpningen i Test 1-3, 1-5 og 1-6, anbefales at oppstilling av brannvesenets utsyr plasseres 12 m fra åpningen, der varmefluksen er omtrent 5 kW/m².

A.2.1.3 Skalering av brannforsøk

I prosjektets *Phase 2, Task 5*, ble det utført en teststudie av delaminering [84] som tok utgangspunkt i å gjenskape tidligere rombranntester [52]. Brannbetingelsene ble gjenskapt i mellomskala ovnstester av eksponert KLT.

Resultatene viste at branntemperatur, oksygenkonsentrasjon, innfallende strålingsfluks, temperaturer i KLT, forkullingshastighet og tid til delaminering samsvarte med rombranntestene når det samme KLT-produktet ble brukt. Det ble også vist at noen KLT-produkter med andre limtyper ikke delaminerte under samme betingelser.

Å gjenskape relevante betingelser av en rombranntest i en mellomskala ovnstest gir en mindre kostbar alternativ metode for fremtidige KLT produktstandarder. Sammenligninger av forkullingsrater, materialtemperaturer og tid til delaminering ved bruk av det samme KLT-produktet i begge typer tester, indikerte altså at ovnstestene kan gjenskape de relevante betingelsene. Derfor foreslås den mellomskala ovnstesten som et alternativ til testmetoden som er beskrevet i Annex B i 2018-versjonen av ANSI/APA PRG 320 [85] i fremtidige oppdateringer [84].

A.2.2 Southwest Research Institute (SwRI)

Ved Southwest Research Institute (SwRI) i USA gjennomførte de to storskala brannforsøk (Test 1 og Test 2) på rom med KLT-konstruksjoner [53].

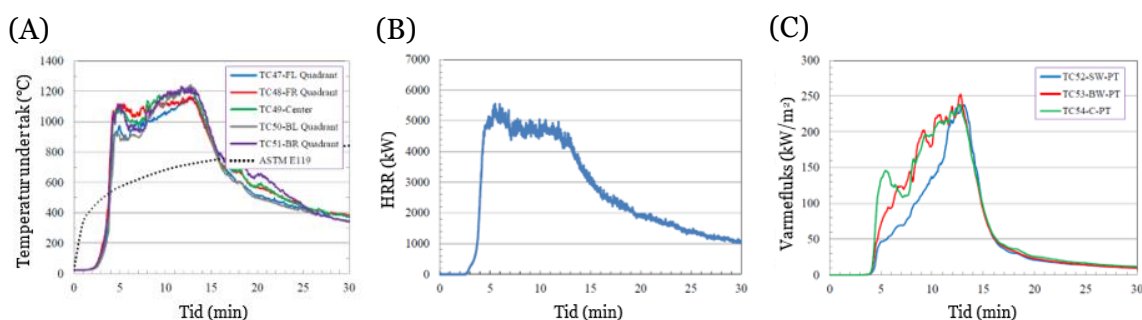
Målet med forsøkene var å evaluere egenskapene til konstruksjoner av KLT og spikerlaminerte elementer ved brannforløp tilsvarende en møblert leilighet. Elementene var beskyttet med to lag 16 mm branngipsplater.

Veggene i rommene var av KLT, mens himlingen besto av spikrede bordstabelementer. KLT-elementene var 175 mm tykke med fem lag lameller, mens bordstabelementene besto av planker med dimensjoner 38×140 mm, som ble spikret sammen stående og parallelt med hverandre. Rommene hadde innvendige grunnflate $4,11 \times 3,60$ m² og høyde 2,38 m. I den ene vegg var det en døråpning på $1,87 \times 2,07$ m². Gulvet, alle veggene og himlingen var beskyttet med to lag 16 mm tykk branngips. Veggene sto direkte på gulvet. En mekanisk last på 1,9 kN/m² ble påført konstruksjonen på taket. Temperaturutviklingen i rommet og varmeavgivelsen fra brannen ble målt gjennom brannforløpet.

Brannenergien per gulvareal i form av møbler var 570 MJ/m² i Test 1 og 610 MJ/m² i Test 2.

Figur A-12 viser målte temperaturer, HRR og varmefluks for Test 1. Både i Test 1 og 2 utviklet brannen seg raskt, og overtenning ble nådd etter omtrent 4 min. Brannen var mest intens mellom 5 og 7 min. Fullt utviklet brann varte fra 4 til 13 min, og temperaturene nådde 1200°C mot slutten (Figur A-12A). Da startet nedkjølingen, som var rask i starten og saktere etter hvert. Etter ca. 30 min falt de første gipsplatebitene ned fra himlingen. Da var nesten alt brennbart inventar utbrent, mens resten fortsatte å brenne. Høyeste HRR ble målt til 5,5 MW i Test 1 og 4,9 MW i Test 2. Imidlertid ble en del av røyken ikke sugd inn i avtrekket når brannen var på sitt mest intense. Forfatterne brukte derfor modelleringsverktøyet Consolidated Model of Fire and Smoke Transport (CFAST) til å estimere HRR i den samme perioden ved å sammenstille beregnede og målte verdier av temperaturer i det varme gasslaget. Maksimalverdien av HRR ble da estimert til 8 MW [86]. Høyeste varmefluks, Figur A-12C, ble i brannforsøkene målt til 253 kW/m² i Test 1 og 241 kW/m² i Test 2.

Resultatene samsvarer godt med andre forsøk med fullstendig beskyttet KLT, ved at startfasen er lik, fullt utviklet brann varer omtrent like lenge, og man får en nedkjølingsfase. To lag 16 mm branngips var tilstrekkelig til å forhindre forkulling og delaminering i KLT-elementene.



Figur A-12. Varmeavgivelseshastigheten (A), temperaturutviklingen i øvre deler av rommet (B) og varmefluksen målt på øverste del av bakveggen og ene sideveggen, og i bakre del av himlingen (C) for Test 1 [53] (gjengitt med tillatelse fra American Wood Council/Southwest Research Institute).

A.3 Canada

I Canada har både Carleton University og National Research Council of Canada (NRC) gjennomført forsøk der de blant annet har undersøkt hvordan fullstendig beskyttet og delvis eksponert KLT påvirker brannutviklingen i et rom. De har studert hvordan varmeavgivelseshastigheten, temperaturer, brannutvikling og forkullingshastighet påvirkes av KLT-konstruksjonen [28,32,39,55,56]. De har også undersøkt trekonstruksjonens bidrag til brannen og hvordan KLT-elementer og gipsplater oppfører seg ved branneksposering, sammenlignet med lette konstruksjoner av stål og tre.

A.3.1 Eksposering av KLT, brann i soverom

Ved Carleton University utførte de i løpet av fem år til sammen 10 fullskala forsøk for å sammenligne fullt og delvis beskyttet KLT med lette stål- og trekonstruksjoner i naturlig brann [28,32,55,56].

Testoppsett

De ti forsøkene (Test 1 – 10) ble utført i rom med grunnflate $4,5 \times 3,5$ m² og høyde 2,5 m, og døråpning på $1,0 \times 2,0$ m². Rommet var møblert. Forsøkene skulle simulere brann i soverom og brannenergien i rommet var beregnet i forhold til dette. De to første testene (Test 1 og 2) var referansetester med propan som brensel og 753 MJ/m² brannenergi. I Test 3 – 10 var brenselet i form av møbler og brannenergien var 8400 MJ (550 MJ/m²).

Tabell A-7 viser romkonfigurasjonene. Sju forsøk ble utført med ulik grad av eksponert KLT. To forsøk ble utført med lette trekonstruksjoner med ett og to lag gipsplater, og ett forsøk med lette stålkonstruksjoner med ett lag gipsplatebeskyttelse. I rommene med fullt eksponert KLT var både vegger og himling eksponert. KLT-elementene og de lette konstruksjonene, inkludert himlingen, ble beskyttet med ett eller to lag 12,7 mm branngipsplater. Isolasjonen som ble brukt i alle tre testene med lette konstruksjoner var mineralull av glassfiber. Gulvene var av betong, dekket med 19 mm parkett av lønn.

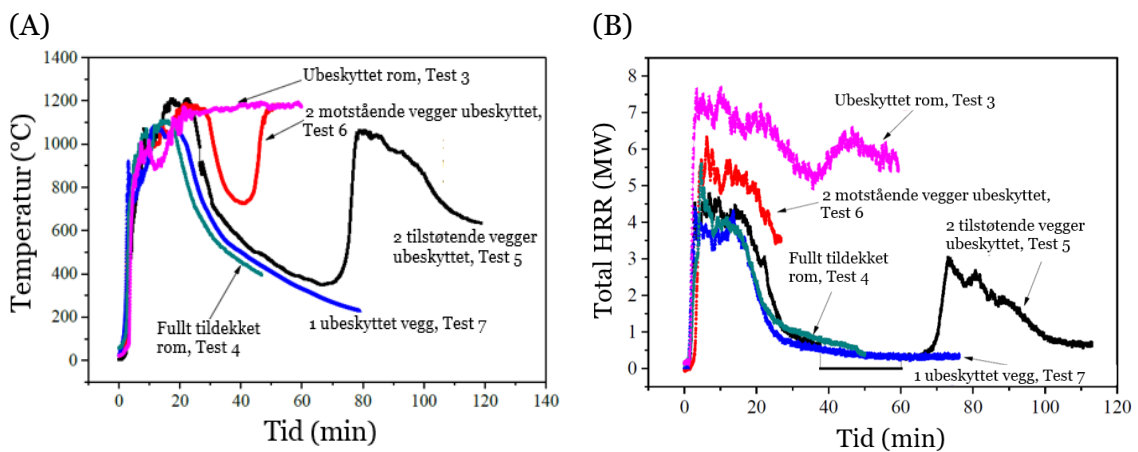
Tabell A-7. Konfigurasjoner for rombrannforsøk.

Test	Konstruksjonsmateriale	Eksposering	Brensel
1	KLT	Ubeskyttet	Propan
2	KLT	Tildekket (2 lag gips)	Propan
3	KLT	Ubeskyttet	Møbler
4	KLT	Tildekket (2 lag gips)	Møbler
5	KLT	To tilstøtende vegger ubeskyttet, ellers tildekket (2 lag gips)	Møbler
6	KLT	To motstående vegger ubeskyttet, ellers tildekket (2 lag gips)	Møbler
7	KLT	En sidevegg ubeskyttet, ellers tildekket (2 lag gips)	Møbler
8	Lette trekonstruksjoner	Tildekket (2 lag gips)	Møbler
9	Lette trekonstruksjoner	Tildekket (1 lag gips)	Møbler
10	Lette stålkonstruksjoner	Tildekket (1 lag gips)	Møbler

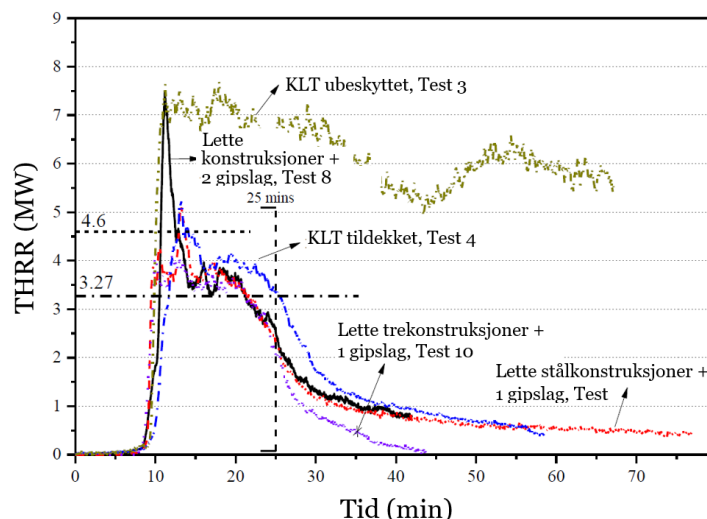
Ulike typer sammenføringer ble brukt mellom elementene. I lengderetningen ble vegg-, tak- og gulvelementer sammenkoblet med falsskjøt, festet i 300 mm avstand med selv-borende skruer. I hjørner ble det brukt noe større selv-borende skruer i 300 mm avstand.

Resultater

Resultater fra forsøkene er vist i Figur A-13 og A-14. Brannen vokste raskt i starten, og temperaturøkningen avtok deretter litt før overtenning og fullt utviklet brann. Maksimaltemperaturene var mye høyere, og brannforløpet annerledes, enn for standard brannkurve som benyttes ved brannmotstandstester og dimensjonering. Når inventaret i rommet var utbrent sank temperaturen raskt i nedkjølingsfasen av brannen. Brannutviklingen i alle rommene, både med og uten eksponert KLT og med tildekkede lette tre- eller stålkonstruksjoner, viste tilnærmet lik temperaturutvikling frem til nedkjølingsfasen startet, med noe høyere maksimaltemperatur for Test 5.



Figur A-13. Romtemperaturer (A) og total HRR (B) fra forsøkene med ulik tildekking av KLT-elementer [28].



Figur A-14. Total HRR fra forsøk med ulik tildekking av KLT-elementer, sammenlignet med tildekkede, lette tre- og stålkonstruksjoner [28].

Effekten på temperatur og total HRR fra ulik grad av tildekking av KLT kan leses fra Figur A-13 og A-14. Temperaturutviklingen i rommet med fullstendig ubeskyttet KLT (Test 3) skilte seg fra de andre rommene med KLT-elementer ved at maksimaltempera-

turen ved fullt utviklet brann var noe lavere. I tillegg sank ikke temperaturen etter at inventaret var utbrent og nedkjølingsfasen uteble. I stedet økte temperaturen litt etter at inventaret var utbrent. Grunnen til at temperaturen under fullt utviklet brann var lavere enn for de andre rommene, var at forholdet mellom brensel og oksygentilgang var høyere på grunn av at KLT-elementene bidro til brannenergien. Brannen var ventilasjonskontrollert og mye av branngassene måtte derfor forbrennes utenfor rommet. Nedkjølingsfasen uteble fordi KLT-elementene brant også etter at inventaret i rommet var utbrent. Økningen i temperaturen etter fullt utviklet brann kom av bedre ventilasjon i rommet etter at inventaret var utbrent. I denne testen ble det observert gasser gjennom skjøtene [32]. Temperaturøkningen var raskere ved skjøter enn i samme dybde i panelene, noe som indikerte lekkasje. Den største svakheten var i takskjøten, og resulterte i høyere temperaturer som følge av transport av branngasser. Glødende forbrenning var også observert gjennom skjøt når forkulling nådde dybden til sammenføyningen. I de andre testene ble det brukt silikonbasert branntetting, men noe gjennomtrenging av gasser ble likevel observert i alle tester.

Bidraget fra KLT til brannutviklingen kan leses av HRR-kurvene i Figur A-14, ved å sammenligne kurvene for rom med eksponert KLT med kurvene for beskyttet KLT og kurvene for lette konstruksjoner med gipsplatebeskyttelse. Kurvene viser et nært forhold mellom høyeste HRR og størrelsen på eksponert areal av KLT. I rommet med fullt eksponert KLT økte HRR til et mye høyere nivå enn i rommet med fullstendig beskyttet KLT. Brannutviklingen i rommene med fullstendig beskyttet konstruksjon kan antas å være lik utviklingen i rom med samme type platekledning i bygninger med ubrennbare konstruksjoner. I rommet med fullt eksponert KLT, sto KLT for 60% av total energiproduksjon, og 75% av varmeavgivelsen foregikk utenfor brannrommet i fasen med fullt utviklet brann. I rommet med to eksponerte vegger overfor hverandre, gav KLT-elementene et høyere bidrag til brannen enn i rommet med to vegger ved siden av hverandre (innvendig hjørne). Brannutviklingen i rommet med bare én eksponert vegg var veldig lik brannutviklingen i rommene med fullstendig beskyttet KLT og lett konstruksjon. I testene med fullstendig beskyttet KLT og med bare én KLT-vegg eksponert, sloknet brannen av seg selv etter at inventarer var utbrent, mens i testene med to eksponerte KLT-vegger, oppsto delaminering og sekundær overtenning. I rommet med to vegger ved siden av hverandre, var nedkjølingsfasen imidlertid lang, og delamineringen oppsto først langt ut i brannen, etter ca. 70 min. Dette indikerer gode muligheter for å slokke brannen før delaminering.

Forkulling av KLT var ikke observert i Test 2 og 4, der maksimaltemperaturene mellom gipslag og KLT var henholdsvis 161 og 132 °C. Den totale gjennomsnittlige forkullingshastigheten var 0.63 mm/min, noe som er i samsvar med EN 1995-1-25 (0.65 mm/min)

Konklusjoner

Resultatene viser at antall eksponerte vegger og totalt eksponert areal hadde liten påvirkning på brannutviklingen i starten av brannen og ved fullt utviklet brann. Dette ble begrunnet med at det i disse fasene er inventaret i rommet som er avgjørende for brannutviklingen. Etter fullstendig utviklet brann, når inventaret var utbrent og nedkjølingsfasen startet, hadde størrelsen og antallet av flater med eksponert KLT stor betydning for den videre utviklingen av brannen. Større eksponerte arealer ga saktere nedkjøling, og i rom med to eksponerte vegger oppsto sekundær overtenning på grunn av delaminering

av sjiktene i KLT-elementene. I rommet der veggene var plassert rett overfor hverandre oppsto sekundær overtenning mye raskere enn i rommet med to vegger ved siden av hverandre (innvendig hjørne). To motstående vegger ga mer intens varmestråling til hverandre enn to tilstøtende vegger, og forårsaket dermed raskere oppvarming og forkulling av KLT, noe som resulterte i raskere delaminering.

Forsøkene viste at i et rom med liknende geometri og åpningsfaktor, kan én vegg med KLT være eksponert, men arealet må være maks 29,7% av de totale veggoverflatene i rommet for at KLT ikke skal påvirke brannutviklingen nevneverdig (resten av veggene og himling må være beskyttet med to lag 12,7 mm branngips).

Det ble påpekt at forsøk med større åpningsfaktor bør gjennomføres for å undersøke hvordan eksponert KLT påvirker brannutviklingen under bedre ventilasjonsforhold.

A.3.2 Trekonstruksjoner i 5- og 6-etasjes bygninger

National Research Council Canada (NRC) i Canada har i samarbeid med blant annet Canadian Wood Council og FPInnovations utført fem storskalaforsøk [39] som en del av et større prosjekt, der målet var å bygge opp kunnskapen om trekonstruksjoner i fem- og seksetasjers bygninger. Kunnskapen ble etterpå brukt til å endre de kanadiske byggereglene.

Testoppsett

Forsøkene skulle simulere et reelt brannforløp i en leilighet i en blokk med seks etasjer (mellomhøy bygning, «mid-rise»). Fire blokker med tre etasjer ble bygget med tre forskjellige bærende materialer; bindingsverk (LWF1 og LWF2), tynnstålprofiler (LSF) og KLT-elementer. Løsningen med tynnstålprofiler (LSF) tilfredstilte daværende National Building Code (NBC) of Canadas preaksepterte ytelse om bruk av ikke-brennbart materiale i bærende bygningsdeler over fire etasjer. I tillegg utførte de ett brannforsøk i et enkeltstående soverom med samme dimensjoner og brannenergi som soverommet i leiligheten (PFR-03).

Leiligheten hadde yttermål $8,51 \times 6,55$ m³ og takhøyde 2,44 m, og inneholdt en liten gang, stue og kjøkken i ett rom, bad og soverom. Soverommet var $3,81 \times 4,43$ m². På stuen og soverommet var det én åpning på $1,5 \times 1,5$ m² i frontveggen av leiligheten.

I leilighetene ble alle konstruksjoner tildekket med to lag 12,7 mm branngips, med unntak av i leiligheten med lette stålkonstruksjoner, der det bare ble lagt ett lag branngips. Lettveggen mellom soverom og bad/gang hadde bare ett lag standardgips i alle forsøkene. Frontveggen med de to store åpningene ble i forsøkene med LWF1 og KLT beskyttet med to lag 12,7 mm tykke branngipsplater, men i forsøkene med LSF og LWF2 ble den bare beskyttet med ett lag 12,7 mm tykk standardgips. På gulvet var det lagt parkett oppå sementbaserte plater i alle leilighetene, unntatt i forsøkene med LSF og PRF-03.

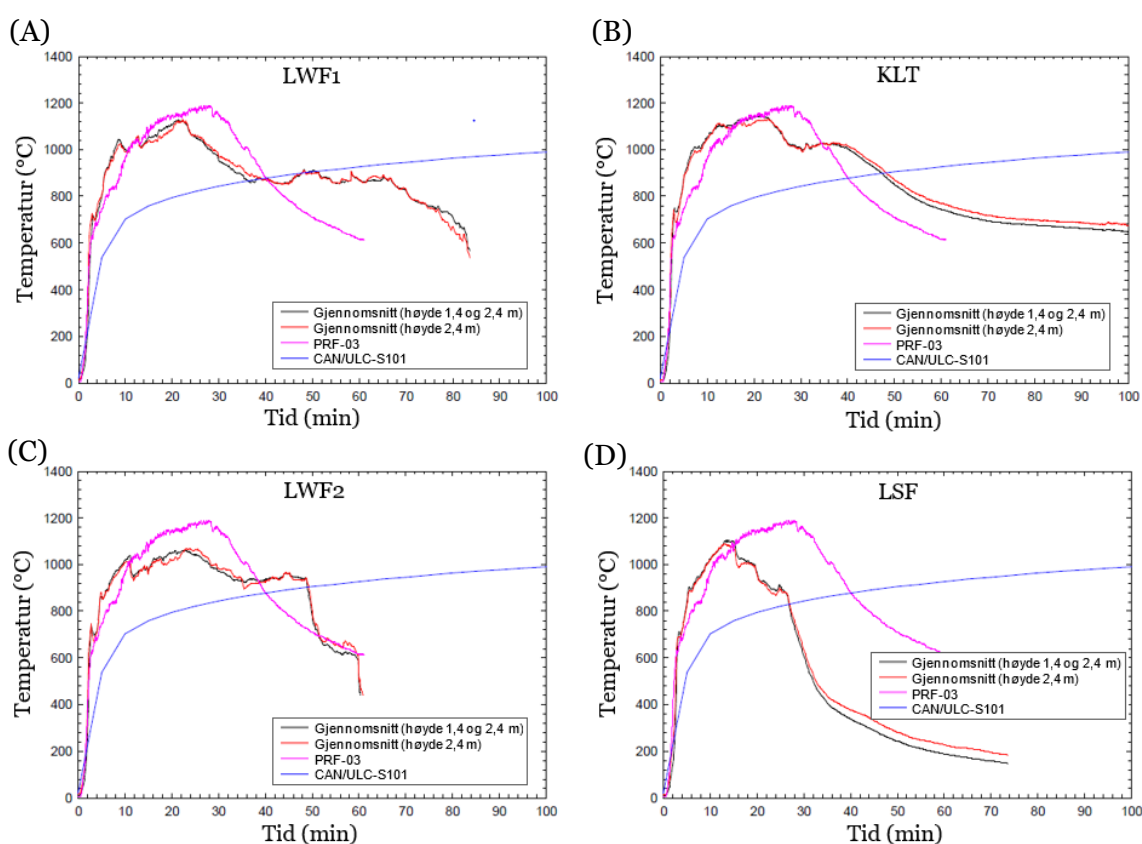
Leilighetene var møblert. Brannenergien er ikke oppgitt i rapportene, men var i henhold til undersøkelser som er utført på mengden brennbare møbler som finnes i leiligheter i Canada. I det enkeltstående soverommet, PRF-03, var brannenergien lik som på soverommet i leilighetene, men ventilasjonsforholdene ble noe annerledes etter at døren mellom soverom og gang ble brutt.

Brannen ble startet på soverommet i den midterste etasjen.

HRR, varmekraft, røykproduksjon og temperaturutvikling ble målt for å kunne vurdere intensiteten til brannen og egenskapene til gipsplatebeskyttelsen på konstruksjonene.

Resultater

Forsøkene viste at temperaturutviklingen i startfasen av brannen i leiligheten med fullstendig beskyttet KLT, var omtrent identisk med utviklingen i rom med fullstendig beskyttede lette konstruksjoner av stål eller tre [39]. Figur A-15 viser gjennomsnittstemperaturene i soverommet, der brannen startet, for de fem brannforsøkene og standard brannkurve CAN/ULC-S101 [87]. Overtenning oppsto omtrent samtidig i alle forsøkene, etter ca. 3 min. Også makstemperaturene ved fullt utviklet brann var omtrent like, og nådde omtrent 1200°C, men etter overttenning utviklet brannene seg ulikt.



Figur A-15. Temperaturutvikling i soverom i leilighet med ulike konstruksjonsmaterialer. (A) LWF1 og (C) LWF2 er lette trekonstruksjoner, (B) er KLT og (D) LSF er lette stålkonstruksjoner. Kurvene er sammenlignet med resultater fra forsøk i et enkeltstående soverom (PRF-03) og standard brannkurve CAN/ULC-S101. [39]

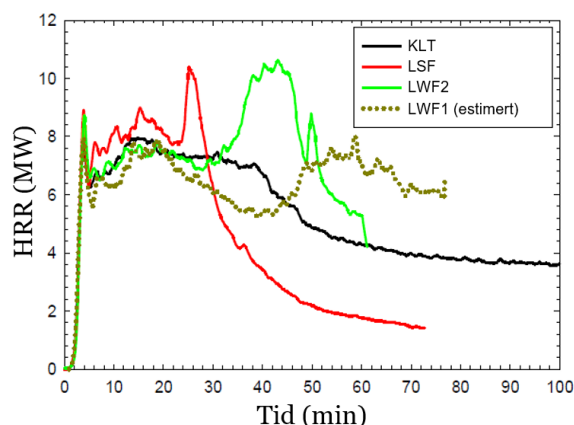
I forsøket med lette stålkonstruksjoner (LSF) varte fullt utviklet brann i omtrent 15 min før alt brennbart inventar var utbrent og nedkjølingsfasen startet. Den raske nedkjølingen i soverommet var imidlertid delvis forårsaket av varmetap til takkonstruksjonen over rommet, og etter omtrent 20 min falt deler av gipsplatene i himlingen ned. Frontveggen med bare ett lag standardgips ble etter hvert en stor åpning fordi gipsplatene falt ned. Dette bidro også til hurtig nedkjøling av brannen.

I begge leilighetene med lette trekonstruksjoner (LWF 1 og 2) varte fullt utviklet brann lenge, fordi gipsplatene i himlingen falt ned og konstruksjonen i taket etter hvert deltok i brannen. I leiligheten med to lag branngips (LWF1), startet nedkjølingsfasen etter 24 min,

men 45 min inn i brannen falt deler av platene i himlingen ned og takkonstruksjonen bidro til brannenergien (kan sees som et platå i kurvene i kurven for LWF1 i Figur A-15A. I leiligheten med ett lag standardgips på frontveggen med de store åpningene (LWF2), startet også nedkjølingen etter omtrent 24 min. Her falt himlingsplatene ned etter ca. 35 min og forårsaket en forlenget brann.

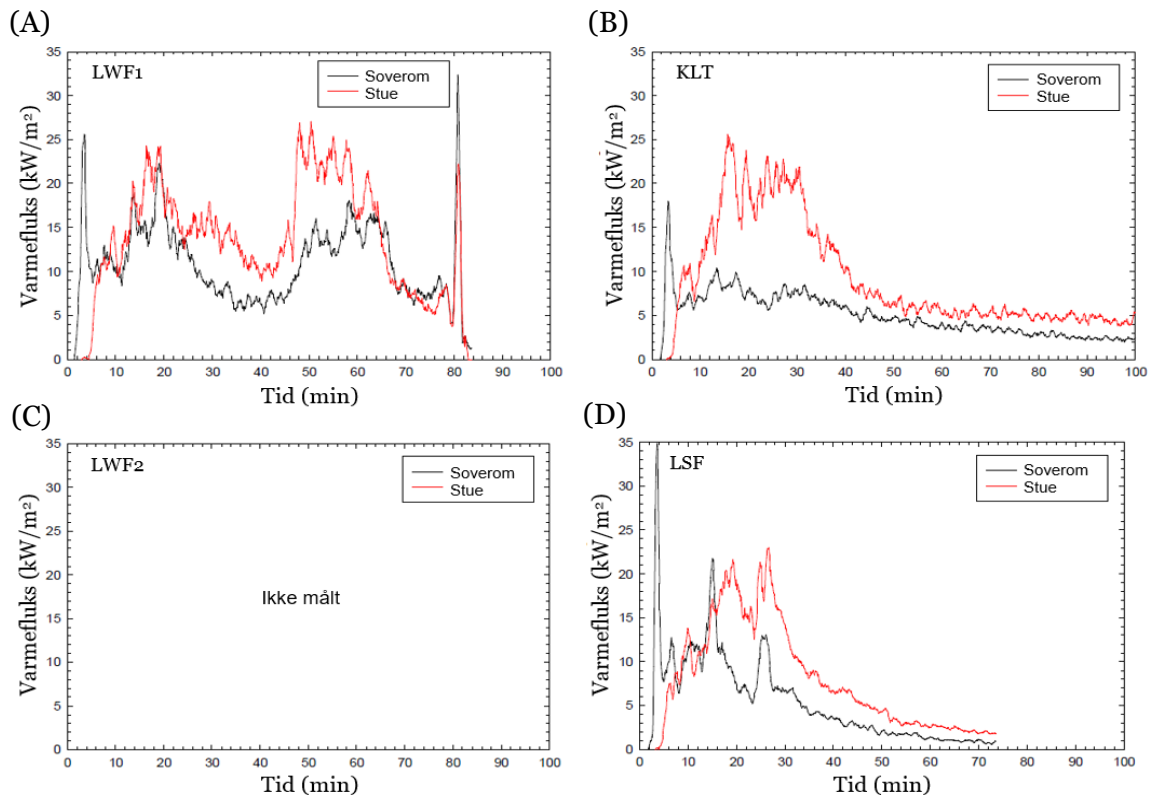
I leiligheten med KLT-elementer, der alle KLT-overflater var beskyttet med to lag brann-gips, varte fullt utviklet brann til omtrent 23 min ut i brannen, og i nedkjølingsfasen sank temperaturene sakte. Etter omtrent 28 min stanset nedkjølingen, og temperaturutviklingen nådde et platå ved ca. 1000°C. Temperaturmålinger mellom gipsplatehimlingen og KLT-elementene bak, viste at det i enkeltpunkt i himlingen oppsto forkulling som ga bidrag til brannen (ikke vist i figur).

Figur A-16 viser HRR i de fire leilighetene. Den første toppen viser overtenning i soverommet etter omtrent 3 min. Etter hvert som brannen spredde seg ut av soverommet, økte HRR til ca. 8 MW, og var begrenset av ventilasjonsåpningene. For LSF og LWF2 økte HRR etter hvert til en høyere topp på rundt 10 MW. Dette skyldtes at gipsplatene i himlingen falt ned, slik at trekonstruksjonen over himlingen ble involvert i brannen, og gipsplatene på frontveggen falt ned og økte ventilasjonsfaktoren i leilighetene.

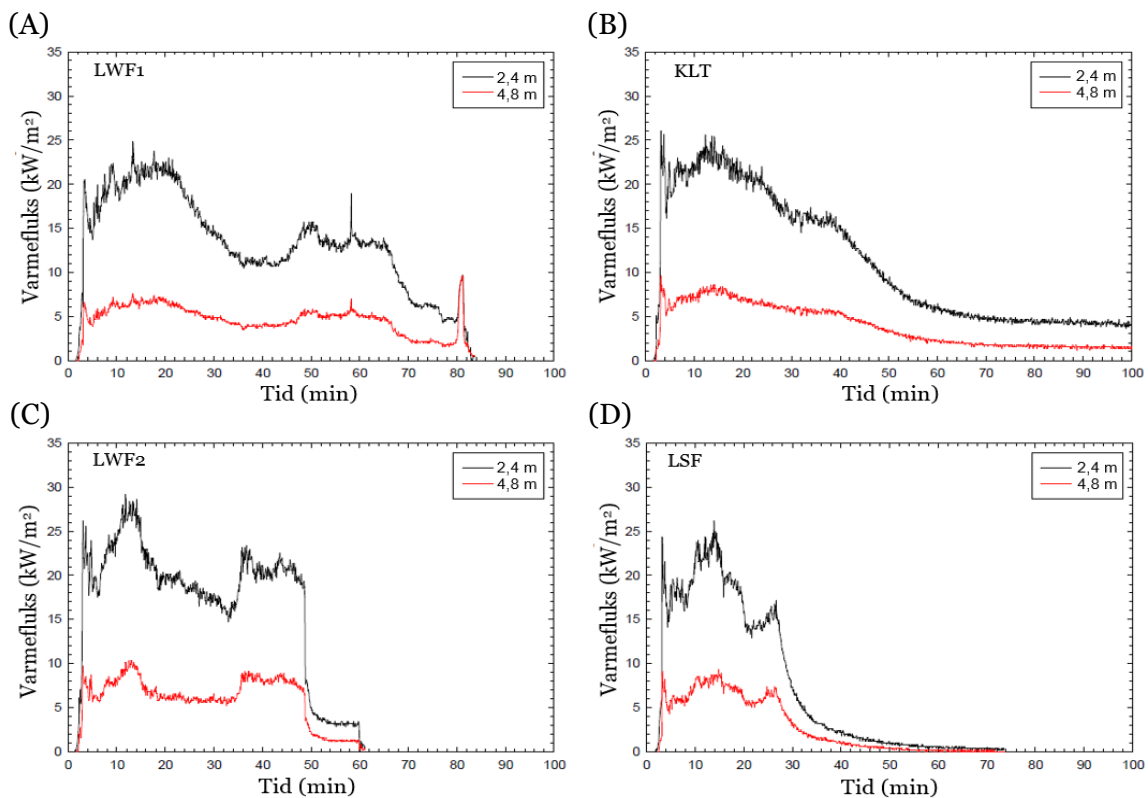


Figur A-16. Varmeavgivelseshastigheten i de fire leilighetene med ulike konstruksjonsmaterialer. I tillegg til KLT er det brukt lette trekonstruksjoner (LWF1 og LWF2) og lette stålkonstruksjoner (LSF). Kurven for LWF1 er estimert på grunn av svikt i viftene i avsuet over leiligheten. [39]

Varmefluksen ut av rommet ble målt på fasaden over åpningene i soverom og stue, i tillegg til i horisontal avstand fra åpningen i soverommet, som vist i Figur A-17 og A-18. Varmefluksen utenfor soverommet økte raskt, og nådde maksimalverdi ved tidspunktet for overtenning i soverommet. Etter påfølgende 3 min ble det målt maksimal varmekraft utenfor stua, som følge av at brannen spredte seg fra soverommet til stua. Høyeste varmekraft over åpningene i soverommet var høyere, og varte lenger, for LSF enn for LWF1 og KLT. Varmefluksen over åpningen i stua fikk en ny høy topp for LSF etter 28 min, som følge av at gipsplatene på frontveggen falt ned. Varmefluksen ved 2,4 m horisontal avstand fra åpningen på soverommet var høyest for LWF2. Varmefluksen utenfor rommene med fullstendig beskyttet KLT var altså omtrent den samme som utenfor rom med beskyttet ubrennbar konstruksjon.



Figur A-17. Varmeflukt på fasaden 3,5 m over åpningene i soverom og stue for ulike konstruksjonsmaterialer. (A) LWF1 og (C) LWF2 er lette trekonstruksjoner, (B) er KLT og (D) LSF er lette stålkonstruksjoner [39].



Figur A-18. Varmeflukt 2,4 og 4,8 m i horisontal avstand fra åpningen i soverommet for ulike konstruksjonsmaterialer. (A) LWF1 og (C) LWF2 er lette trekonstruksjoner, (B) er KLT og (D) LSF er lette stålkonstruksjoner [39].

Konklusjon

Ingen av de beskyttede veggene bidro til brannforløpet før det var gått 175 min. Gipskledningen beskyttet bakenforliggende konstruksjon i 65 – 99 min på veggene. De to gipsplatelagene i himlingen forhindret forkulling av KLT-elementet i 55 min, men det var lite flammer i himlingen før det var gått 170 min. Konklusjonen var at bygningen i KLT oppførte seg mer gunstig, fordi det tok lengre tid før konstruksjonen ble involvert i brannen. Konstruksjonens påvirkning på brannen ble dermed også begrenset, og konstruksjonen beholdt sine egenskaper lengre, sammenlignet med lett stålramme.

A.4 Australia

I Australia har flere aktører vært involvert i et prosjekt for å få frem preaksepterte ytelser for mellomhøye («mid-rise») trebygninger. «Mid-rise» bygninger defineres her som bygninger med minst fire etasjer og maksimalt 25 m høyde opp til overside gulv i øverste etasje, noe som tilsvarer omtrent åtte etasjer. Resultatene fra prosjektet danner grunnlag for endringer i byggereglene og er med i National Construction Code 2016 (NCC2016). Forskingen som er utført ved University of Queensland i Australia inkluderer småskala brannforsøk og ett storskalaforsøk av rombrann, med mål om å bestemme ved hvilke innfallende varmekulser selvslokking oppstår, eksponeringstiden for å oppnå steady-state burning og delaminering av KLT [54,57]. I tillegg er det utført småskalaforsøk der målet har vært å finne en systematisk metode for å bestemme kritisk masse og varmekulser for heltre og KLT av flere ulike tresorter [63]. Forsøkene i ulik skala ble sammenlignet for å se om resultatene fra småskalaforsøk kunne overføres til brann i et rom med eksponert KLT på én vegg og i himling, eksempelvis ved at selvslokking oppsto ved samme varmekulser.

Testoppsett

Småskalaforsøkene [57] ble utført med konkalorimeter for å bestemme hvilken varmekulser som kreves for at trematerialet skal fortsette å brenne, og hvilken varmekulser som kan gi selvslokking. Forsøkene ble utført på prøvestykker med overflate $100 \times 100 \text{ mm}^2$ og $120 \times 120 \text{ mm}^2$ og tykkelse minst 60 mm. Eksperimentene ble utført på fem ulike tresorter.

I forsøkene eksponerte de prøvestykkene med varmekulser mellom $30 - 100 \text{ kWm}^2$, tilsvarende det som trematerialene kan utsettes for i en virkelig brann. Prøvestykkene ble eksponert for denne varmekulsen inntil konstante forbrenningsforhold ble oppnådd. Resultatene fra småskala testen ble brukt som input til storskala testen.

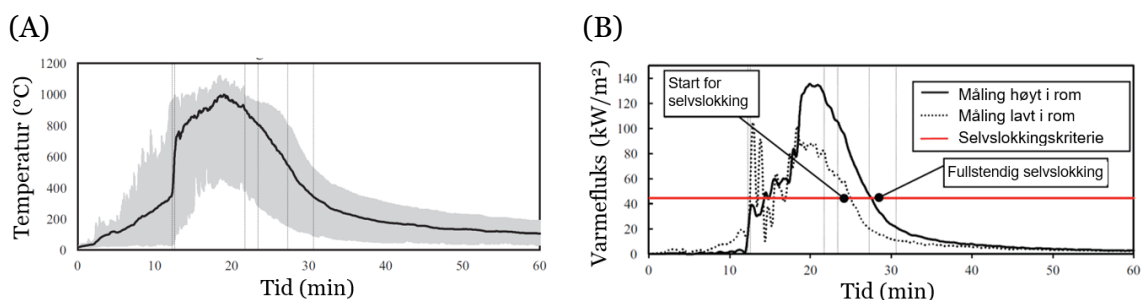
Flere liknende forsøk er rapportert [63]. Forsøkene er utført på andre tresorter og andre KLT-oppbygninger, med tykkelser $47 - 90$ for heltre og $145 - 150$ mm for KLT med fem lag. Tettheten varierte fra $200 - 1000 \text{ kg/m}^3$.

For brannforsøk i stor skala ble det benyttet rom med grunnflate $3,5 \times 3,5 \text{ m}^2$ og høyde $2,7 \text{ m}$ [54]. Rommet hadde en ventilasjonsåpning på $0,85 \times 2,1 \text{ m}^2$. KLT-elementene var 150 mm tykke og besto av fem lameller ($45/20/20/20/45 \text{ mm}$) av samme tykkelse som ble brukt i småskalaforsøkene. Gulvet var bygd opp med ubrennbare plater øverst. KLT-konstruksjonen var beskyttet med to lag 13 mm gipsplater. Geometrien, brannenergien og testoppsettet var planlagt for å oppnå en bestemt maksimaltemperatur, sikre overtenning og at den eksponerte KLT-veggen startet å brenne, men forhindre at fullt utviklet brann varte så lenge at delaminering oppsto.

Resultater

Fra småskalaforsøkene fant de at for KLT, med tre eller fem lamelllag og maksimal tykkelse 145 mm , og heltre tykkere enn 60 mm , vil selvslokking alltid oppstå når ekstern varmestrålingskilde fjernes, uansett intensitet på varmestrålingen. Uavhengig av oppvarmingsforløpet og intensiteten til varmestrålingen, oppsto selvslokking når masse-tapet falt under $4,0 \text{ g/m}^2\text{s}$.

Varigheten på storskalaforsøket ble bestemt ut fra resultatene fra småskalaforsøkene, som viste at treet måtte brenne i minst 10 min og maksimalt 30 min. Minimumstiden skulle sikre stabil forbrenning i treet og maksimaltiden skulle forhindre påvirkning ved eventuell delaminering. Brannen nådde overtenning etter 12,5 min, nedkjølingen startet etter ca. 21 min og flammene døde ut etter 30 min. Brannen blusset ikke opp igjen og delaminering oppsto ikke. Temperaturutviklingen fra målinger ulike steder i rommet er vist i Figur A-19.



Figur A-19. Temperaturutvikling (A) og varmeffluks (B) de første 60 minuttene av brannforsøket. Målinger er gjort ulike steder i rommet. [54] (gjengitt med tillatelse fra Elsevier)

Kritisk varmeffluks for selvslukking øverst på veggen stemte godt med målingene fra småskalaforsøkene, som indikerte at selvslukking kunne oppstå ved en varmeffluks på 45 kW/m². Ved bunnen av veggen var imidlertid varmeffluksen 55 kW/m². Flammene på den eksponerte veggen sloknet først nederst på veggen og gradvis oppover. Flammene i himlingen sloknet når flammene på øverste del av veggen sloknet.

Oppsummering

Emberley et al. [57] oppsummerer også tidligere litteraturs konklusjoner om at forbrenning av trematerialer ikke kan vedvare uten ekstern varmetilførsel, fordi temperaturen på overflaten av kullsjiktet gradvis øker, konveksjon og avstråling av varme fra overflaten øker, og pyrolysefronten i treet forflytter seg stadig lengre fra varmen på overflaten.

Resultatene fra storskalaforsøket [54] viste at man kan utføre et rom og en brann som utvikler seg på en måte som gjør at delaminering ikke oppstår og brannen selvslukker, og at en brann kan slokne av seg selv dersom ekstern varmekilde fjernes og massetapet faller under 4,0 g/m²s. Tykkelsen av prøvestykkene er viktig fordi termisk tynne prøvestykker vil kunne fortsette å brenne når ekstern varmekilde fjernes, mens termisk tykke prøvestykker, som brukt i disse forsøkene, vil selvslukke.

Kritisk massetap og kritisk varmeffluks var ikke avhengig av tettheten til prøvestykkene, men av tresorten. Basert på resultatene mener forfatterne at kritisk massetap og varmeffluks er nøkkelparametre til forståelsen av selvslukking av trematerialer. Også i dette prosjektet fant de at delaminering forårsaket ny antennelse av treet etter selvslukking. Årsakene til delaminering ble ikke studert i dette prosjektet.

Det ble videre konkludert med at resultatene fra de utførte småskalaforsøkene også er overførbare til full skala [63].

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

Gjennom internasjonalt samarbeid med akademi, næringsliv og offentlig sektor bidrar vi til et konkurransekraftig næringsliv og bærekraftig samfunn. RISEs 2 200 medarbeidere driver og støtter alle typer innovasjonsprosesser. Vi tilbyr et hundretalls test- og demonstrasjonsmiljø for framtidssikre produkter, teknikker og tjenester. RISE Research Institutes of Sweden eies av den svenske staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM
Telefon: 464 18 000
E-post: post@risefr.no, Internett: www.risefr.no

RISE Fire Research
RISE-rapport 2019:09
ISBN: 978-91-88907-36-3