



# Brannsikkerhet i bygg med massivtre

Espen Daaland Wormdahl, Kristian Hox, Anne Steen-Hansen,  
Greg Baker og Mette Kristin Ulfnes

SP Fire Research AS



# Brannsikkerhet i bygg med massivtre

<b>VERSJON</b> 1	<b>DATO</b> 2017-03-02	<b>NØKKELOORD:</b> Brann Massivtre Brannsikkerhet
<b>FORFATTERE</b> Espen Daaland Wormdahl, Kristian Hox, Anne Steen-Hansen, Greg Baker og Mette Kristin Ulfnes		
<b>OPPDRAGSGIVERE</b> Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap Direktoratet for byggkvalitet	<b>OPPDRAGSGIVERS REF.</b> Lars Haugrud Vidar Stenstad	
<b>PROSJEKTNR.</b> 20229	<b>ANTALLSIDER OG VEDLEGG:</b> 22 + 0 vedlegg	
<b>SAMMENDRAG</b> I dette prosjektet er det gjennomført et litteraturstudie på brannsikkerhet ved bruk av massivtre i bygninger.  Problemstillingene det ble jobbet med var temperaturforløp i en naturlig brann, selvslukking og forkullingshastighet. Ut fra litteraturstudiet konkluderer vi med at kunnskapen om brannsikkerhet i forbindelse med massivtre i bygninger er mangelfull. Det er spesielt rundt problemstillinger knyttet til ubeskyttet massivtre, forkullingshastigheter, delaminering og selvslukking det er flere ubesvarte spørsmål, og dette er forhold som kan ha stor innvirkning på brannsikkerheten i bygninger.  Vi anbefaler at det utarbeides retningslinjer for hvordan anvendelse av massivtre skal håndteres i prosjektering og risikoanalyse for nye bygg.		
<b>UTARBEIDET AV</b> Kristian Hox	SIGNATUR	
<b>KONTROLLERT AV</b> Anne Steen-Hansen	SIGNATUR	
<b>GODKJENT AV</b> Paul Halle Zahl Pedersen	SIGNATUR	
<b>RAPPORTNR.</b> A17 20229:1	<b>GRADERING</b> Åpen	<b>GRADERING DENNE SIDE</b> Åpen

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	2017-03-02	Første versjon

---

# Innholdsfortegnelse

<b>Sammendrag</b>	<b>4</b>
<b>Summary in English</b>	<b>5</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>6</b>
1.1 Bakgrunn	6
1.2 Målsetting	6
1.3 Metodebeskrivelse	7
1.4 Hypoteser	7
<b>2 Resultater fra litteraturstudiet</b>	<b>8</b>
2.1 Hvor mye bidrar massivtre til en brannutvikling?	8
2.1.1 Areal av massivtre eksponert for brann	8
2.1.2 Delaminering	12
2.2 Vil brannen slukne av seg selv?	13
2.3 Forkullingshastighet	14
2.4 Festemekanismer, forbindelser og beslag	15
2.5 Behov for videre forskning	16
<b>3 Diskusjon</b>	<b>17</b>
3.1 Effekten av tildekking av overflater i massivtre	17
3.2 Effekten av type lim på brannegenskapene til massivtre	17
3.3 Vil brannen slukne av seg selv?	17
3.4 Prosjekteringspraksis	18
3.5 Hvor godt stemmer hypotesene?	18
<b>4 Konklusjoner og anbefalinger til videre arbeid</b>	<b>19</b>
4.1 Risikoanalyse og prosjekteringspraksis	19
4.2 Behov for flere branntester	19
<b>Referanser</b>	<b>21</b>

## Sammendrag

I dette prosjektet er det gjennomført et litteraturstudie på brannsikkerhet ved bruk av massivtre i bygninger. Et sammendrag av den litteraturen som er funnet er gjengitt i denne rapporten.

Problemstillingene som ble undersøkt var temperaturforløp i en naturlig brann, selvslokking og forkullingshastighet. Det ble funnet flere eksempler på at branner i massivtre kan ha en rask temperaturutvikling til høye temperaturer på grunn av den store andelen ubeskyttede flater. Videre ble det funnet at om massivtre slokner av seg selv eller ikke avhenger av forsøksbetingelsene og hvordan man definerer selvslokking. Litteraturen viser også at forkullingshastigheten i massivtre varierer, og delaminering har en stor betydning for denne hastigheten.

Ut fra litteraturstudiet konkluderer vi med at kunnskapen om brannsikkerhet i forbindelse med massivtre i bygninger er mangelfull. Det er spesielt rundt problemstillinger knyttet til ubeskyttet massivtre, forkullingshastigheter, delaminering og selvslokking det er flere ubesvarte spørsmål, og dette er forhold som kan ha stor innvirkning på brannsikkerheten i bygninger.

Vi anbefaler at det utarbeides retningslinjer for hvordan anvendelse av massivtre skal håndteres i prosjektering og risikoanalyse for nye bygg.

## Summary in English

In this project we have carried out a literature study on the fire safety aspects of CLT when used in buildings. A lot of earlier studies were found, and a summary of the most relevant literature is presented in this report.

The topics that were studied were temperature development in a natural fire, self-extinguishment and charring rate. Several examples of fires in structures with CLT with a rapid increase in temperature to high values due to the large proportion of unprotected surfaces were found. The question if CLT will self-extinguish or not depends on the test conditions and the definition of self-extinguishment. There are large variations in the reported charring rates and the occurrence of delamination has a great impact on the charring rate.

From the literature study we conclude that there are gaps in the existing knowledge regarding the fire safety aspects of CLT. The found knowledge gaps mainly concerns CLT without protection/covering, charring rates, delamination and self-extinguishing. There are several unanswered questions and they may have implications for the fire safety level in buildings.

We recommend that practical guide lines for use of CLT are made in order to assist in the project and risk analysis stage for new buildings.

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Det har de siste årene blitt populært med bygninger av tre der det brukes bæresystem av limtre eller massivtreelementer. Spesielt massivtrebygg har fått en stor økning i antall, og det er planlagt eller bygget blant annet studentboliger, helsebygg, skoler, barnehager og leilighetsbygg i opptil 14 etasjer. Massivtrebygg er konstruert av massive treelementer som er laget av kompakt krysslåst trevirke, og benyttes som bærende konstruksjoner i form av vegger og etasjeskiller. Slike massivtrebygg velges ofte fordi de er miljøvennlige, har effektiv og kort byggetid, og dermed kan gi god økonomi.

Det er en økende bruk av massivtre i stadig større og høyere bygninger, og gjerne med store eksponerte treoverflater. Bærende trekonstruksjoner er ikke preakseptert i brannklasse 3 (ref. TEK10 §11-3 [1]). Treoverflater i relativt store brannceller (inntil 200m<sup>2</sup>) er preakseptert i risikoklasse 1-5.

Målsettingen med dette prosjektet er å undersøke branntekniske utfordringer ved bruk av massivtre gjennom et litteraturstudie, og finne frem til områder der det er behov for mer kunnskap. Prosjektet undersøker hvilke forhold som er relevante for å vurdere brannsikkerheten knyttet til utstrakt bruk av massivtre i bærekonstruksjonen, konstruksjonsdeler og eksponerte overflater.

Eksempler på slike forhold kan være:

- Sammenhenger mellom tremodulenes oppbygging, brannutvikling og brannforløp
- Brannenergi og brannforløp
- Bærekonstruksjon av massivtre og/eller limtre
- Forkullingshastigheter

Fravik fra preaksepterte ytelser ved bruk av brennbar bærekonstruksjon i brannklasse 3 gir utgangspunkt for problemstillingene, og dokumentasjon av fullstendig brannforløp er vesentlig i den sammenhengen.

Denne rapporten presenterer resultatene fra litteraturstudiet. Litteratur og informasjon som omhandler brannforsøk og vurderinger av brannsikkerheten har vært av spesiell interesse. Hensikten er å gi en oversikt over kunnskapsstatusen innenfor området, og informasjonen legges til grunn for videre arbeid i prosjektet.

## 1.2 Målsetting

Målsettingen har vært å skaffe informasjon om tre forskjellige tema som vi anser som de mest relevante i forbindelse med massivtre:

1. Bidraget fra massivtre til brannutvikling, intensitet og varighet av brannen.
2. Vil brann i massivtre vil slokke av seg selv når det øvrige brenselet i brannrommet er brukt opp?
3. Forkullingshastigheter i massivtre, spesielt for naturlig brann (ikke-parametrisk).

I tillegg er litteratur som omhandler andre faktorer, som for eksempel forbindelser og festemekanismer tatt med. Med bakgrunn i litteraturstudiet er det utarbeidet et forslag til videre arbeid og tester som bør gjennomføres for å få en bedre forståelse for egenskapene til massivtre i brann.

Massivtre kan brukes som den primære bærekonstruksjonen, i brannskillende konstruksjoner, og som eksponerte innvendige kledninger. Gjennomgangen har ikke inkludert bruk av massivtre som utvendig kledning eller fasadesystem.

### **1.3 Metodebeskrivelse**

Dette prosjektet er gjennomført ved et litteraturstudie.

Det er søkt etter publikasjoner i aktuelle litteraturl databaser som er tilgjengelig gjennom SPs biblioteksdatabase. I tillegg er det søkt etter publikasjoner fra aktuelle konferanser, utenlandske forskningsmiljøer, og gjennom vårt faglige nettverk.

### **1.4 Hypoteser**

Følgende hypoteser legges til grunn for prosjektet:

1. Bruk av massivtre i byggverk gir samme temperaturer i brann som ved tilsvarende bruk av ubrennbare materialer.
2. Brann i konstruksjonselementer av massivtre og limtre vil slokke av seg selv ved bortfall av tilført energi.
3. Forkullingshastighet for massivtre er konstant og enkel å beregne.



## 2 Resultater fra litteraturstudiet

Brandon og Östman har nylig utgitt en rapport med resultater fra et litteraturstudium på brannsikringsmessige utfordringer knyttet til høye trebygninger [2]. Dette studiet har vært spesielt viktig for vår gjennomgang av litteratur, fordi formålet var ganske sammenfallende med formålet for vårt litteraturstudium. Brandon og Östmans studie var finansiert gjennom NFPAs forskningsprosjekt *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings*. I dette studiet ble rapporter og artikler fra perioden 2000 til 2015 som omhandlet 45 branntester i rom gjennomgått. 41 av testene var med fabrikkfremstilte treelementer i vegger og/eller tak, og 4 av testene omfattet brann i rom med ubrennbare konstruksjonsmaterialer. Hensikten var å finne ut hvor mye slike produkter bidrar til brannutviklingen i rom når de er eksponert for brannpåvirkning, og også å undersøke effekten av ulike typer tildekning av treoverflatene. Det ble identifisert tre ulike måter å måle varmeavgivelsen i rommet på; ved måling av forkullingsdybder, ved måling av massetap, og ved kalorimetrisk bestemmelse basert på analyse av røykgassene.

### 2.1 Hvor mye bidrar massivtre til en brannutvikling?

#### 2.1.1 Areal av massivtre eksponert for brann

Et kanadisk prosjekt hadde som målsetting å undersøke tekniske løsninger på områdene brannsikringsmessighet, akustikk og bygningsskall for å kunne anvende konstruksjonsmaterialer av trevirke i mellomhøye trebygninger (5-6 etasjer og mer). Prosjektet undersøkte metoder for innbygging av trevirket, løsninger for å begrense utvendig brannspredning og utvikling av vegg-løsninger med påkrevd brannmotstand for bruk i lavere etasjer [3].

Rapporten fra prosjektet konkluderer med at innbygging av massivtrelementer er en effektiv metode for å forsinke tiden det tar til konstruksjonselementene i trevirke blir påvirket av – og eventuelt bidrar i – brannen. Behov for videre undersøkelser er beskrevet i rapporten, og er blant annet knyttet til innbygging, festemetoder, betydning av tykkelsen til massivtrelementene og effekten av tildekning med gips.

I en rapport fra 2014 blir resultater fra brannmotstandstester av en etasjeskiller og en vegg i massivtre presentert [4]. Etasjeskillet var kledd med 15,9 mm gipsplate (såkalt type X) på den branneksponeerte siden (ned mot ovnen), og to lag sementbaserte plater på den ueksponeerte siden. Veggen var kledd med to lag 15,9 mm gipsplate type X på begge sider. Den bærende etasjeskillet tilfredsstilte kravene til brannmotstand i henhold til CAN/ULC-S101-14 i 128 minutter med en påført last  $9,4 \text{ kN/m}^2$ , mens den bærende veggen holdt i 219 minutter med en påført last  $449 \text{ kN/m}$ .

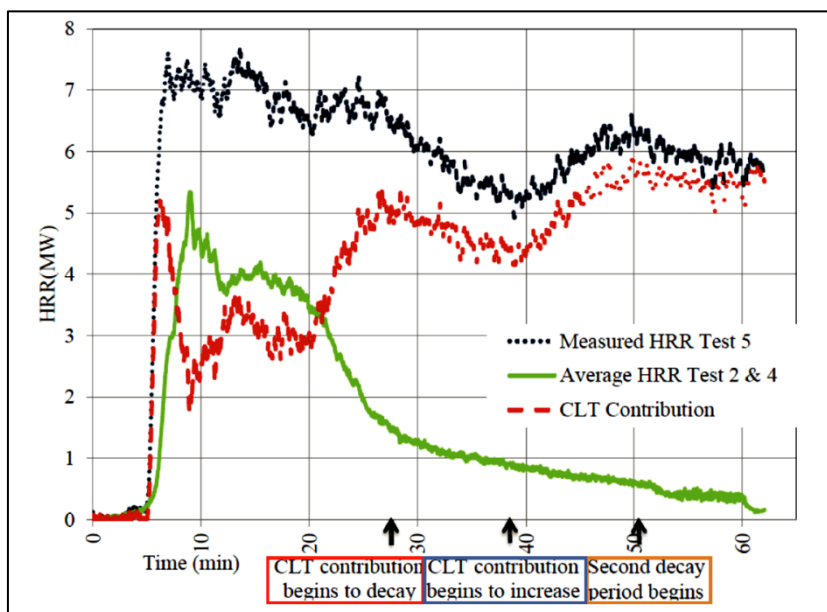
Taber et. al. har rapportert resultater fra forsøk med tildekket massivtre i en testrigg som skulle representere en mellomhøy bygning (for eksempel seks etasjer) [5]. Testriggen var 8,51 m lang og 6,55 m bred, og plassert under en stor avtrekkshette. Målet var å undersøke effekten av tildekning av massivtrelementer med gipsplater og sementbaserte plater. Forsøkene viste blant annet at ett enkelt lag med 12,7 mm gips ga begrenset beskyttelse mot antennelse av bakenforliggende treoverflater (mindre enn 16 minutter). Hvor lang tid to lag gips ga beskyttelse var avhengig av hvor i modellen platene var plassert.

I Brandon og Östmans studie [2] vises det til en serie på seks storskalaforsøk som ble utført ved Carleton University i Canada, og som blant annet ble publisert av Li og McGregor i 2015 [6]. Tre av disse testene inngikk i McGregors masteroppgave, og er omtalt nedenfor [7]. Analyse av disse testene viste at når trevirket er tildekket med passiv

brannbeskyttelse, er brannutviklingen med hensyn til varmeavgivelse og temperaturer ganske lik med brannutvikling i rom med stålkonstruksjon og ubrennbare konstruksjonsmaterialer. I testene der trevirket var fullstendig eksponert, var varmeavgivelsen målt til å være 80 % høyere enn i testene med beskyttet trevirke eller ubrennbare konstruksjonsmaterialer. Imidlertid var ikke maksimaltemperaturene signifikant høyere i testene med eksponert trevirke, fordi mye av forbrenningen fant sted utenfor brannrommet. Tilsvarende konklusjoner er tidligere presentert i andre publikasjoner [8,9].

Figur 2-1 viser varmeavgivelseshastigheten (HRR) i forsøkene rapportert av McGregor [7]. Brannrommet hadde en grunnflate på 3,5 m x 4,5 m, og en høyde på 2,5 m. Det var en enkel åpning med bredde 1,07 m og høyde 2 m på den ene veggen. Rommet var konstruert av frittstående (ikke understøttete) massivtrepaneler med 3 lameller og tykkelse 105 mm.

Brenselet i hvert forsøk i var typiske soveromm møbler og inventar (for eksempel klær og bøker). Denne brannen kan derfor klassifiseres som en «naturlig» eller «ikke-parametrisk» brann, i motsetning til en brann som følger en bestemt tid-temperatur kurve, som for eksempel i en standard test av brannmotstand.



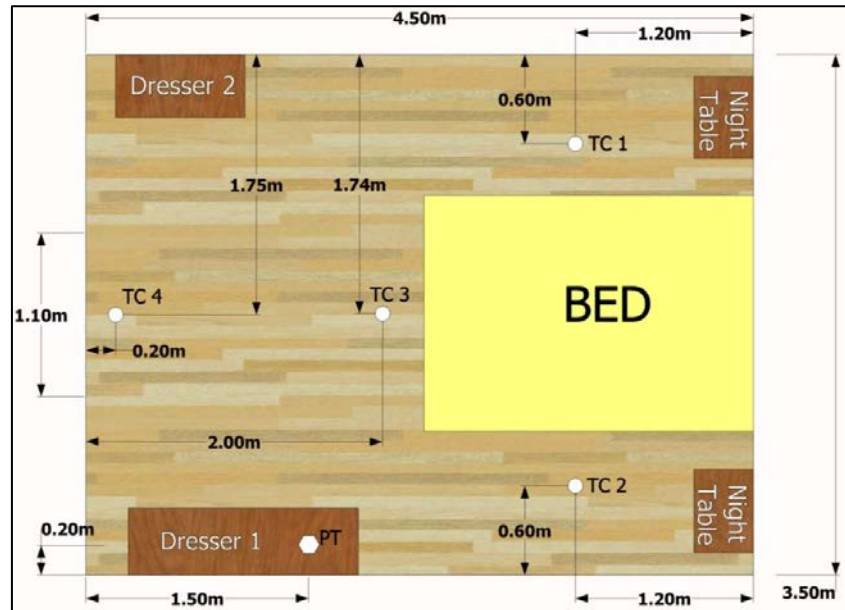
**Figur 2-1 Kurver for varmeavgivelseshastighet (HRR) i kanadiske brannforsøk med rom med paneler av massivtre, og med møbler som brensel. I test 2 og test 4 er trevirket beskyttet med gipsplater; i test 5 er det helt ubeskyttet. Kurven merket «CLT Contribution» er beregnet differanse mellom kurvene for Test 5 og Test 2 & 4 [7].**

Figur 2-1 viser at når varmeavgivelseshastigheten er på topp, omtrent 10 minutter etter antennelse, så bidrar massivtrepanelene med omlag 2 MW av en total varmeavgivelseshastighet på omtrent 7,5 MW. Når varmeavgivelseshastigheten fra møbler og inventar derimot begynner å avta, omtrent 20 minutter ut i testen, starter varmeavgivelsen fra massivtrepanelene å øke igjen. Beregninger viser at massivtrepanelene bidro til 63 % av den totale avgitte energien i brannen.

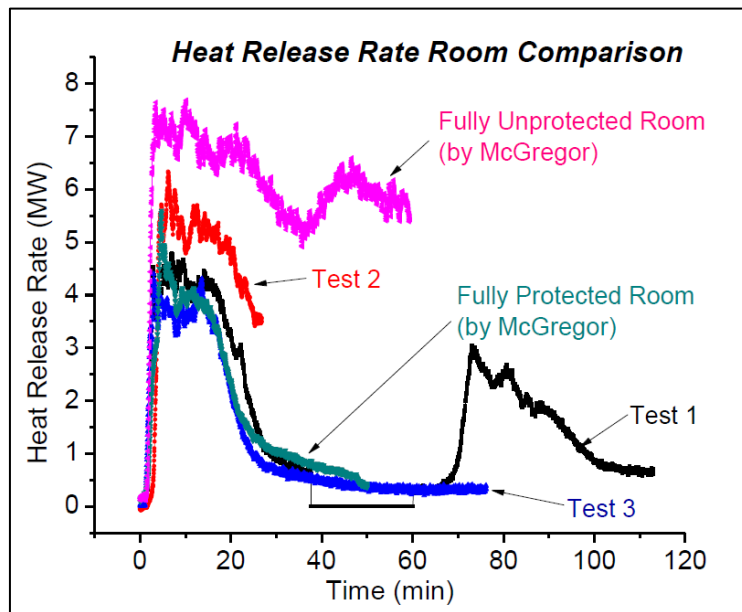
Det andre resultatet å merke seg i Figur 2-1, er at testen med eksponert massivtre hadde en hurtigere vekstfase for brannen enn i testene der treoverflatene var beskyttet med

gipsplater. Maksimal hastighet for varmeavgivelse inntraff 3 minutter tidligere i testen med eksponert trevirke enn i testen med beskyttet trevirke.

Brandon og Östman [2] omtaler tre tilsvarende tester rapportert av Medina Hevia fra Carleton University, der forskjellen var mengden eksponert massivtre [10]. Disse forsøkene ble utført i det samme testoppsettet (vist i Figur 2-2) som i McGregors tester, og resultatene kan dermed sammenlignes med hverandre. Kurvene for varmeavgivelse for alle de seks testene er vist i Figur 2-3.



**Figur 2-2** Oversikt over brannrommet som ble brukt i Medina Hevias tester med plassering av inventar og termoelementer (angitt med TC). Døråpningen er vist på veggen til venstre. [10]



**Figur 2-3** Sammenligning av kurver for varmeavgivelseshastighet (HRR) for de seks kanadiske testene [10]. Test 1: Bakvegg og sidevegg ubeskyttet. Test 2: De to sideveggene ubeskyttet. Test 3: En sidevegg ubeskyttet. I Test 2 oppsto det en feil i måleutstyret for varmeavgivelseshastigheten etter ca. 30 minutter, og det var ikke mulig å registrere data for varmeavgivelseshastighet for resten av testen.

Det ble konkludert med at ubeskyttet massivtre bidrar til å øke brannveksten, intensiteten og varigheten av brannen, og at bidraget generelt er mer signifikant når mer av overflaten er eksponert [2]. I Test 3 i testene til Medina Hevia (Figur 2-3) var en av sideveggene ubeskyttet, dette utgjorde om lag 30 % av det totale veggarealet. I dette forsøket var brannutviklingen sammenlignbar med brannutviklingen i rommet der alt trevirke var beskyttet med gipsplater (kurven merket «Fully Protected Room by McGregor»). I Test 2, med de to motstående sideveggene eksponert, var maksimal varmeavgivelse 13 % høyere enn for testene der alle veggene var tildekket. Test 3, med kun bakveggen eksponert, hadde en maksimal varmeavgivelse som var 21 % lavere enn for rommet med fullt beskyttete vegger. Ved sammenligning av total varmeavgivelse i løpet av de første 26 minutter av testen, var resultatene som gjengitt i **Tabell 2-1**.

**Tabell 2-1** Sammenligning av resultater for maksimal og total varmeavgivelse i de kanadiske testene. Verdiene er beregnet på bakgrunn av Medina Hevias resultater [10].

Beskrivelse av test	Maksimal hastighet for varmeavgivelse [MW]		Total varmeavgivelse de første 26 minutter [MJ]	
	Målt verdi [kW]	% av resultat fra test med alle vegger beskyttet	Målt verdi [MJ]	% av resultat fra test med alle vegger beskyttet
Sidevegg og bakvegg ubeskyttet (Test 1)	4,79	86 %	5 275	115 %
Motstående sidevegger ubeskyttet (Test 2)	6,33	113 %	6 702	146 %
Bakvegg ubeskyttet (Test 3)	4,40	79 %	4 383	96 %
Alle vegger beskyttet	5,60	100 %	4 581	100 %
Alle vegger ubeskyttet	7,69	137 %	9 864	215 %

For både Test 1 og Test 2, der to vegger var ubeskyttet, delaminerte massivtreet, og det oppsto det Brandon og Östman omtaler som en *andre overtenning* omlag 70 minutter (Test 1) og 45 minutter (Test 2) etter start av test. For Test 2 er dette dokumentert ved måling av temperatur og observasjoner etter at måleutstyret for varmeavgivelse sviktet. I de tidlige fasene av brannforløpet var temperaturene i rommet ganske like for alle testene. Eksponert trevirke så ut til å forsinke tiden det tok til temperaturen i brannrommet sank eller brannen avtok.

I en artikkel fra 2008 presenterer Frangi et. al. resultatene fra en test av et 3-etasjes trehus i Japan som ble eksponert for en naturlig brann [11]. Bygningen hadde en grunnflate på 7 m x 7 m. Limtreelementene var dekket av 27 mm mineralull og ett eller to lag gipsplater. Testen viste at det var mulig å begrense brannen til å omfatte kun ett rom i bygningen. Gipsplatene falt ned under brannen, men mineralullen var delvis intakt. Skadene i trevirket, målt som forkullingsdybde, var relativt små.

## 2.1.2 Delaminering

Det at lameller løsner fra massivtreelementene i løpet av brannen – såkalt delaminering – er en faktor som vil føre til at varmeavgivelsen fra trevirket øker, som vist i kurven merket Test 1 i Figur 2-3. I et slikt tilfelle vil det ta lengre tid før brannen i massivtreet slokner enn om delaminering ikke inntreffer. Delaminering ble også observert i tester gjennomført hos SP Fire Research i 2014 [12,13].

Brandon og Östman beskriver et fenomen som de har kalt *andre overtenning* (eng. second flashover), som inntreffer når forholdene endrer seg slik at temperatur og varmeavgivelsen øker. Dette kan for eksempel forårsakes av delaminering, eller når tildekking av eksempelvis gipsplater faller ned. En slik andre overtenning ble observert i flere av testene [2,10].

Det er mulig at tendensen til delaminering avhenger av typen lim som er brukt i produksjonen av det aktuelle massivtreproduktet. Massivtreelementene i både McGregors og Medina Hevias forsøk inneholdt lim av typen polyuretan [7,10]. I McGregors forsøk, var den andre vekstfasen i varmeavgivelse i kurven merket «CLT Contribution» i Figur 2-1 forårsaket av delaminering av den ytterste av de tre lamellene i massivtrepanelet ca.

39 minutter ut i testen. Denne delamineringen eksponerte friskt trevirke for brannen, og førte til at varmeavgivelseshastigheten økte til en topp i kurven. Polyuretanlim er ganske temperaturfølsomt, og ved omtrent 200 °C vil resultatet bli en «tidlig delaminering». «Tidlig» brukes her i betydningen at 200 °C er en lavere temperatur enn den som vil forårsake forkulling av trevirke, som generelt er forventet å starte ved ca. 300 °C. Det som skjedde med dette massivtreproduktet var at delamineringen ikke var et resultat av forkulling, men av temperaturfølsomheten til limet. Hvis et mer robust og varmebestandig lim hadde vært brukt, kunne delamineringen ha vært forsinket eller unngått.

Effekten av ulike typer lim og konfigurasjon av lameller er undersøkt i et prosjekt ved Forest Products Laboratory i USA [14]. Det ble utført 13 tester i en mellomskala horisontalovn med tid-temperaturkurve i henhold til amerikansk standard ASTM E119, og fire ulike limtyper ble undersøkt: melamin-formaldehyd (MF), fenol-resorcinol-formaldehyd (PRF), reaktiv polyuretan (PUR), og emulsjonspolymerisert isocyanatlim (EPI). Massivtreelementene hadde enten 3 lameller eller 5 lameller. Studiet konkluderte med at lim av typene MF og PRF kan forhindre delaminering.

Rapporten “Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings” fra 2013 [15] presenterer funn fra et litteraturstudium som var finansiert gjennom NFPAs forskningsprosjekt *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings*. Målsettingen med prosjektet var å undersøke kunnskapsstatusen innenfor høye trekonstruksjoner og identifisere kunnskapshull, og vurdere hva som var nødvendig av videre forskning for å få en bedre forståelse av brannsikkerheten i høye trebygninger. Et av temaene som ble undersøkt var massivtre sitt bidrag i rombrann. Delaminering ble identifisert som kritisk, siden det fører til økning i brannutviklingen og varmeavgivelsen i senere stadier av en brann. I følge studiet var det imidlertid vanskelig å avgjøre om delaminering var avhengig av limtype, eller om det var naturlig nedfall av forkullet materiale.

## 2.2 Vil brannen slokne av seg selv?

Det er spørsmål om bygningsdeler av massivtre vil fortsette å brenne etter at det øvrige brenselet i et rom er brent opp, eller om brannen vil slokne av seg selv. Svaret på dette spørsmålet er avhengig av hvordan begrepet «selvslokking» er definert. I denne sammenhengen vil selvslokking innebære at bidraget til brannen fra massivtreelementene avtar omtrent tilsvarende som bidraget fra øvrig brennbar inventar i rommet. I Figur 2-1 ser vi imidlertid et tilfelle der dette ikke skjer. Etter 20 minutter går varmeavgivelsen fra inventaret ned (Test 2 & 4), mens det beregnede bidraget fra massivtreelementene øker (kurve merket «CLT Contribution»), og deretter holder seg på et relativt konstant nivå i en periode på 30-40 minutter.

I de fleste av de 45 testene som er gjennomgått i studiet til Brandon og Östman, hadde brannutviklingen en fase der effekten var redusert før brannen ble sloknet [2]. Fire av testene som involverte eksponert trevirke viste reduksjon i brannutviklingen, i en av dem sloknet brannen av seg selv. I syv av testene var det imidlertid ikke en slik reduksjon i brannutviklingen. Branntestene som ble utført hos SP Fire Research i 2014 i forbindelse med bygging av nye studentboliger i massivtre i Trondheim, var blant disse [12,13]. I dette prosjektet ble gjennomført to tester av en modell av en studenthybel med bygningselementer av massivtre. Hybelen hadde areal 13,2 m<sup>2</sup>, og døren sto åpen til en tiliggende korridor med lengde 7,5 m. Det var installert sprinkleranlegg både i hybel og i korridor. Vegger og himling besto av 100 mm massivtreelementer med fem lameller. En av langveggene i massivtre var ubeskyttet, og en var beskyttet med gips og isolasjon. Taket var ubeskyttet massivtre, og gulvet var dekket med en lydplate. Brenselet i testen simulerte brannenergi i normalt hybelinventar. I den første testen ble sprinkleranlegget på hybelen utløst, og kontrollerte brannen. I den andre testen var sprinkleranlegget

deaktivert, og brannen på hybelen gikk raskt til overtenning. Vinduet på kortveggen ble knust etter kort tid, og det ble målt temperaturer i rommet på vel 1000 °C. Sprinkleranlegget i korridoren klarte ikke å kontrollere brannen. Rapporten konkluderer med at en brann i et rom med store brennbare overflater med stor masse og tykkelse vil ha en rask brannutvikling og brannspredning, og raskt nå høye temperaturer.

En masteroppgave utført ved Delft University of Technology i 2013 hadde som hovedmål å undersøke hvilke forhold som fører til at det er potensiale for at brann i massivtreelementer slokner av seg selv [16]. Selvslokkingen er antatt å bestå av flere faser: Brannen i massivtreet vil avta samtidig med at brann i øvrig interiør avtar, deretter vil flammebrannen i massivtreet gå over i en ulmefase og til slutt slokne. Det ble utført to serier med forsøk for å studere dette. Den ene serien besto av småskaletester i konkalorimeteret (ISO 5660), og den andre serien besto av tester av prøvestykker av massivtre formet som bokser med interne mål 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m. Rapporten konkluderte med at ulming i massivtreelementer har et potensiale for å slokne av seg selv når

- påvirkning fra ekstern varmekraft er lavere enn 5 til 6 kW/m<sup>2</sup>
- delaminering og nedfall av passiv beskyttelse forhindres
- luftstrømmen over massivtreoverflaten er lavere enn 0,5 m/s ved varmekraft på 6 kW/m<sup>2</sup>

Forfatteren anbefaler videre forsøk i større skala, både med lastbærende prøveelementer og med variasjon av faktorene som er nevnt over, og at potensialet for at brann i massivtre kan slokne av seg selv bør inkluderes i brannkonseptet for trebygninger [17].

Selvslokking av massivtreelementer er også undersøkt ved School of Engineering, University of Edinburgh, der et tema som er studert er kritisk varmekraft for vedvarende flammebrann [18]. Det er utført en serie forsøk i den såkalte *FM Global Fire Propagation Apparatus (FPA)* med prøvestykker i massivtre med dimensjoner 85 mm x 85 mm x 100 mm. Prøvestykkene ble enten utsatt for konstant høy varmekraft, eller for en varmepåkjenning i to faser med først et høyt og deretter et lavere nivå av varmekraft. I dette testoppsettet var kritisk kraft for antennelse bestemt til å være 13 kW/m<sup>2</sup>, mens kritisk kraft for vedvarende flammebrann var bestemt til 31 kW/m<sup>2</sup>. Forfatterne antar at dette vil bety at flammebrann i massivtre vil slokne når varmekraften fra de andre flatene i brannrommet er lavere enn 31 kW/m<sup>2</sup>, men påpeker at det er nødvendig med forsøk i realistisk skala. Faktorer som delaminering og ulming må også tas hensyn til.

## 2.3 Forkullingshastighet

Det er utført mye forskning på forkullingshastigheter for massivtre, men målet i dette litteraturstudiet var å identifisere forkullingshastighet for naturlige branner (det vil si en brann som utvikler seg naturlig, i motsetning til en tid-temperaturstyrt brannpåkjenning), og sammenligne dataene med parametrisk branneksposering. Det å ha gode data for forkullingshastighet er viktig for konstruksjonsmessige beregninger, men det har mindre (eller ingen) betydning for klassifiseringer for brannmotstand og materialers egenskaper ved brannpåvirkning, hvor standardiserte tester er den vanligste måten å dokumentere at forskriftskrav er overholdt.

Friquin [19] gjennomførte tre brannmotstandstester på massivtrepaneler, hver av disse med en forskjellig tid-temperatur-oppvarming (NS-EN 1991-1-2 parametrisk kurve [20], NS-EN 1991-1-2 standard kurve [20] og den såkalte «svenske kurven» presentert av Magnusson og Thelandersson i 1970 [21]). Fra 23 forskjellige målinger av

forkullingshastighet i de tre forsøkene, var den gjennomsnittlige forkullingshastighetens 0,57 mm/min og verdiene varierte mellom 0,31 og 0,95 mm/min.

I Brandon og Östmans litteraturstudium ble det beskrevet åtte tester der forkullingsrate for ubeskyttet trevirke ble målt. Her varierte denne mellom 0,63 og 1,1 mm/min [2]. Forkullingsrate i testene der trevirket var tildekket varierte mye, og var blant annet avhengig av om det beskyttende materialet (gips eller annet ubrennbart materiale) var intakt, eller om det falt av. Mange studier viste at det ikke var betydelig forkulling av treelementene. For testene i Medina Hevias studie, var forkullingshastighetene ganske like i alle de tre forsøkene med ulike vegger eksponert massivtre.

Frangi *et al.* gjennomførte 11 tester av massivtre med en liten brannmotstandsovn og bruk av ISO 834-1 standard tid-temperaturkurve [22]. Ni av prøvestykkene var laminert med polyuretanlim (PU), og i de andre to prøvestykkene var det brukt melaminureaformaldehyd-lim (MUF). For prøvestykkene med PU-lim ble det observert delaminering i forsøkene, mens det ikke ble observert delaminering for de med MUF-lim. Den gjennomsnittlige forkullingshastigheten for prøvestykkene med MUF-lim var 0,57 mm/min, og varierte over området 0,53 til 0,61 mm/min. Gjennomsnittlig forkullingshastighet for prøvestykkene med PU-lim var 0,78 mm/min, med verdier fra 0,55 til 1,09 mm/min.

I testene utført av Medina Hevia [10] ble det registrert en gjennomsnittlig forkullingshastighet på 0,7-0,8 mm/min. McGregor [7] rapporterte en gjennomsnittlig forkullingshastighet på 0,85 mm/min for testene der alle overflatene var eksponert massivtre.

Det fremgår av forskningen til Frangi *et al.* at typen lim kan ha en innflytelse på hvordan massivtreelementer oppfører seg i brann. For eksempel var gjennomsnittlig forkullingshastighet for prøvematerialet av massivtre med PU-lim betydelig høyere enn for elementer med MUF-limet. Dette var et resultat av delaminering av elementene med PU-limet. Dette tyder på at typen lim må anses som en faktor i en brannsikringsanalyse. Med hensyn til spørsmålet om forskjellen i forkullingshastighet mellom en naturlig og en parametrisert brann, har det ikke blitt utført en omfattende analyse for å sammenligne temperaturer i brannrommet for naturlige- og parametriserte branner. Data fra forsøk er begrenset, men det ser ut til at den gjennomsnittlige forkullingshastigheten for naturlige branner kan være høyere enn for parametriserte branner.

## 2.4 Festemekanismer, forbindelser og beslag

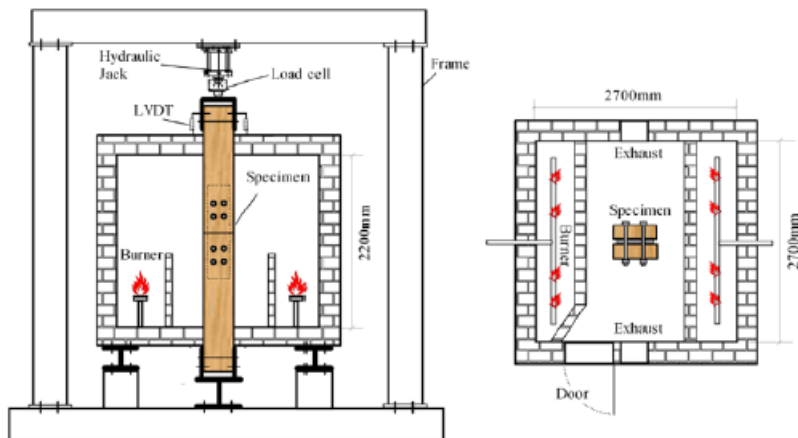
Et av temaene som var undersøkt av Gerard *et al.*, var brannegenskapene til ulike festemekanismer og beslag for sammenføyning av konstruksjonsdeler i trevirke [15]. Disse kan deles inn i to grupper: trebaserte- og stålbaserte festemekanismer. Studiet viste at tildekkete festemekanismer, som skruer, bolter og spikre, ser ut til å ha bedre egenskaper i brann enn beslag og spikerplater, sannsynligvis fordi et mindre areal av stålet er eksponert for varmpåkjenningen. Jo større stålareal som er eksponert for høye temperaturer, jo dårligere er festemekanismenes egenskaper i brann. Tester av festemekanismer er i hovedsak begrenset til tester med standard tid-temperaturkurve, men det er også funnet et studie der andre tid-temperaturkurver er anvendt. Forfatterne av dette studiet har identifisert kunnskapshull med hensyn til brannegenskaper til festemekanismer mellom komponenter i trevirke og sammensatte trekonstruksjoner, og anbefaler at dette bør prioriteres for videre forskning.

Forskere fra Shanghai har undersøkt brannegenskapene til ulike varianter av festemekanismer med hullplater og dybler i en brannmotstandstest med ISO 834-



eksponering [23]. Forsøket indikerte at forkullingsraten var høyere i området med festemekanismene enn lengre unna. De påpeker også at det er behov for mer kunnskap om slike forbindelser i brann utsatt for kombinert bøye- og skjærkrefter.

Carleton University i Canada har gjennomført syv tester der de har undersøkt hvordan hybride festemekanismer av stål og tre oppfører seg når de er påført strekkrefter i brann [24]. Testene ble utført i brannmotstandsovn med forbindelser i henholdsvis tre-stål-tre og stål-tre-stål i en vertikal bjelke. Festemekanismene var boltet til prøvestykket på hver side av skjøten, og påført strekkrefter, se Figur 2-4.



**Figur 2-4** Brannmotstandsovn sett forfra og ovenfra [24].

Resultatene viser at forbindelsene av typen tre-stål-tre hadde bedre brannmotstand enn typen stål-tre-stål for bjelker av samme tverrsnitt.

## 2.5 Behov for videre forskning

I en artikkel om brannmotstand for høye trebygninger har Buchanan påpekt følgende behov for videre forskning [25]:

1. Påkjenningen fra ulike designbranner
2. Bidrag fra trevirket til brannutviklingen
3. Forkullingsrate som funksjon av branneksposering
4. Selvslokking av forkullet trevirke
5. Egenskaper til innkledd trevirke i brann
6. Brannrisiko ved fasader i trevirke
7. Effekten av ulike kombinasjoner av passive og aktive brannsikringstiltak
8. Kvantitativ risikoanalyse

I artikkelen *Timber structures subject to non-standard fire exposure – advances & challenges* blir det gitt en oversikt over brannforsøk med trekonstruksjoner i ikke-standardiserte tester fra 1992 til i dag [26]. Det blir påpekt at antallet tester er begrenset, og at det er mange forhold der det enda ikke finnes tilstrekkelig kunnskap. Inntil slik kunnskap er på plass, anbefales det at usikre faktorer blir ivaretatt gjennom å anvende formålstjenlige og konservative metoder. Det bør også legges større vekt på å sikre at de prosjekterte løsningene blir implementert og vedlikeholdt som forutsatt.

## 3 Diskusjon

Mye av den tilgjengelige litteraturen har sitt utspring i Canada og Japan, og spesielt har den kanadiske litteraturen vært en viktig del av dette litteraturstudiet. På grunnlag av gjennomgangen har vi identifisert fem forhold der det enten er behov for videre forskning, eller der vi anbefaler at myndighetene tar hensyn til disse forholdene når det planlegges endringer i regelverk.

### 3.1 Effekten av tildekking av overflater i massivtre

Studier har vist at bidraget til brann fra tildekkete trebaserte produkter kan være svært lite eller neglisjerbart. Dersom tildekkingen feiler, for eksempel ved at gipsplater faller ned, kan dette føre til at trevirket blir involvert i brannen, og til en såkalt andre overtenning. Utildekkete overflater kan medføre en økning i hastigheten for varmeavgivelse, men ikke nødvendigvis til høyere temperaturer i rommet. Ved underventilerte forhold kan ubeskyttet trevirke føre til betydelige flammer på utsiden av ventilasjonsåpninger, slik som vinduer. Bidraget fra eksponerte treoverflater kan føre til at brannen varer lengre før varmeavgivelsen avtar.

En brann med bidrag fra eksponert massivtre kan vokse raskere, bli mer intens, og ha en lengre varighet sammenlignet med en brann der massivtre er fullstendig beskyttet, men vi har også funnet eksempler på at brannutviklingen kan være sammenlignbar med brannutvikling i rom med bare ubrennbare konstruksjonsmaterialer, eller innkledde massivtreelementer. Mengde, geometri til eksponerte overflater, termiske egenskaper til omkringliggende grenseflater, konfigurasjon av brensel, og ventilasjonsforhold vil være faktorer med betydning for brannutviklingen. En kvantifisering av effekten av slike forhold er ikke funnet i litteraturen.

Eksponert massivtre gir ikke nødvendigvis dårlig brannsikkerhet og er ikke uten videre uegnet til å bruke i bygninger. Enkle aktive og passive brannsikringstiltak kan bekjempe den ekstra brannenergien fra massivtre, slik at sikkerheten for beboerne er ivaretatt. Dette er det vesentlige i funksjonsbasert brannteknisk prosjektering (fire safety engineering) der det blir gjort kompensierende tiltak som er godt dokumentert. Sikkerheten for beboerne i en bestemt bygning vil måtte vurderes gjennom brannteknisk prosjektering.

### 3.2 Effekten av type lim på brannegenskapene til massivtre

Det er indikasjoner på at limtypen som er brukt til å lime lamellene sammen vil ha betydning for om massivtreelementet delaminerer i brann eller ikke. Bruk av alternative limtyper som opprettholder klebeegenskapene ved temperaturer over 300 °C (det vil si forkullingstemperatur for tre), kan forsinke eller forhindre delaminering. Uten en systematisk undersøkelse av forskjellige limtyper, er det imidlertid ikke mulig å konkludere med hvilken innvirkning forskjellige limtyper vil ha på brannutvikling i massivtreelementer.

### 3.3 Vil brannen slokne av seg selv?

Det synes å være noe motstridende opplysninger i litteraturen på spørsmålet om massivtre slokner av seg selv eller ikke når bidraget til brannen fra inventar opphører. En del av disse motsetningene skyldes sannsynligvis ulike definisjoner, og er delvis et produkt av ufullstendige eller mangelfulle eksperimentelle data, eller mangelfull rapportering av disse.

Basert på resultater fra eksperimentene som er gjennomgått i dette litteraturstudiet, vil brann i massivtreelementer ikke nødvendigvis slokne av seg selv med en gang brenselet fra inventar i brannrommet er brukt opp. I noen tilfeller kan brannen vokse i størrelse etter at annet brennbart materiale er brent opp.

### 3.4 Prosjekteringspraksis

Der bygningsdeler av massivtre anvendes må prosjekteringen ta hensyn til hvordan disse bygningsdelene vil oppføre seg i brann. RIB (Rådgivende ingeniør Bygg) i et prosjekt har ansvaret for å utforme konstruksjonen for å tåle de belastninger som følger av en brann, mens RIBr (Rådgivende ingeniør Brann) er ansvarlig for å designe system for personsikkerhet i tilfelle brann. I denne forbindelse kan en rekke forskjellige aktive- og passive brannsikringstiltak bli innlemmet i brannprosjekteringen av en bygning som inneholder elementer av massivtre.

### 3.5 Hvor godt stemmer hypotesene?

Gjennom litteraturstudiet har vi prøvd å finne svar på hvor godt hypotesene våre stemmer med virkeligheten, og nedenfor er en kort oppsummering av vurderingene våre.

Hypotese 1:    Bruk av massivtre i byggverk gir samme temperaturer i brann som ved tilsvarende bruk av ubrennbare materialer.

Hypotesen er delvis avkrefet da det er funnet flere forsøk med ubeskyttet massivtre der massivtreet bidrar til å øke brannveksten, intensiteten og varigheten av brannen, og at bidraget generelt er større når mer av overflaten er eksponert.

Hypotese 2:    Brann i konstruksjonselementer av massivtre og limtre vil slokne av seg selv ved bortfall av tilført energi.

Hypotesen er delvis avkrefet. I kun 1 av 45 tester gjennomgått av Brandon og Östman [2] slokner brannen av seg selv. Man kan derfor ikke regne med at brannen slokner, likevel er det flere av brannene som har en avkjølingsfase. Det er en større andel av testene på ubeskyttet massivtre der brannen ikke reduseres i løpet av testen, enn for testene med beskyttet massivtre.

Hypotese 3:    Forkullingshastighet for massivtre er konstant og enkel å beregne.

Hypotesen er avkrefet, hastigheter mellom 0,31 og 1,1 mm/min er funnet i litteraturen.

## 4 Konklusjoner og anbefalinger til videre arbeid

Ut fra litteraturstudiet konkluderer vi med at kunnskapen om brannsikkerhet i forbindelse med massivtre i bygninger er mangelfull. Det er spesielt rundt problemstillinger knyttet til ubeskyttet massivtre, forkullingshastigheter, delaminering og selvslokking det er flere ubesvarte spørsmål, og dette er forhold som kan ha stor innvirkning på brannsikkerheten i bygninger.

### 4.1 Risikoanalyse og prosjekteringspraksis

Litteraturen har vist at eksponert massivtre, eller massivtre som har utilstrekkelig beskyttelse, kan medføre at brannen vokser raskere, er mer intens og har lengre varighet, enn en brann der det eneste brenselet er inventaret i et brannrom. Det er derfor viktig at bidraget fra brennbare materialer i konstruksjonen eksplisitt blir tatt med i beregningen i «fire safety engineering»-analysen for å fastslå den faktiske personrisikoen gjennom en serie med representative scenarier. Ideelt sett ville dette bli gjort som en kvantitativ risikoanalyse, slik at ikke bare konsekvensene er vurdert, men at også sannsynlighetsdelen av risiko er veiet inn i beregningene. En slik øvelse vil være et nyttig bidrag til eventuelle regelverksendringer.

Med hensyn til brannteknisk prosjektering, er det viktig at massivtre ikke behandles som et generisk materiale. På et praktisk nivå vil dette for eksempel bety at den brannprosjekterende må spesifisere hvilke ytelser massivtreet som vil bli brukt i prosjektet skal ha. Eksempelvis kan det kreves at det brukes massivtre som ikke delaminerer, eller at det stilles krav til forkullingshastigheten til elementet i sin helhet. Det er ofte vanskelig å sikre at dette detaljnivået i prosjekteringsfasen faktisk blir overført til den praktiske utførelsen av prosjektet, så konkrete tiltak må utvikles for å sørge for at dette skjer.

Videre anbefaler vi at det utvikles en håndbok i brannsikker bruk av massivtre for aktører på feltet for å unngå subjektive vurderinger. Denne må være basert på forskningsresultater. En slik håndbok vil kunne være enten preskriptiv eller funksjonsbasert, eller en kombinasjon av disse. Denne bør inneholde beskrivelse av hvordan ytelsene til massivtreet kan dokumenteres.

### 4.2 Behov for flere branntester

Det kan være svært vanskelig – eller umulig - å forutse hva som vil skje i en brann i stor skala basert på kun branntester i mindre skala. Dokumentasjonen på løsninger som benytter massivtre bør derfor baseres på tester i stor skala. I praksis er det kostbart og lite gjennomførbart å kreve storskala testing for å dokumentere alle tenkelige løsninger som skal bygges. På sikt vil det derfor være hensiktsmessig å utvikle retningslinjer for hvordan mer standardiserte tester kan gjennomføres for å måle parametere som:

- forkullingshastighet
- varmeavgivelse
- selvslokking

Som et grunnlag for slike retningslinjer er det nødvendig å teste de samme materialene i både stor og i mindre skala for å kunne sammenlikne resultatene og finne mulige sammenhenger mellom testoppsettene. For å sette opp de mest relevante testene i stor skala er det et godt utgangspunkt å teste ulike konfigurasjoner i mellomskala først. Erfaringene fra disse testene kan så brukes for å vurdere hva som er mest hensiktsmessig i

forhold til videre tester når det gjelder andel ubeskyttet areal, ventilasjon, behov for påføring av last osv. ut fra hvilke parametere vi ser har størst betydning for utfallet av testene. Det ville også vært interessant å sammenligne med tester av tilsvarende konstruksjoner gjennomført i ubrennbare materialer.

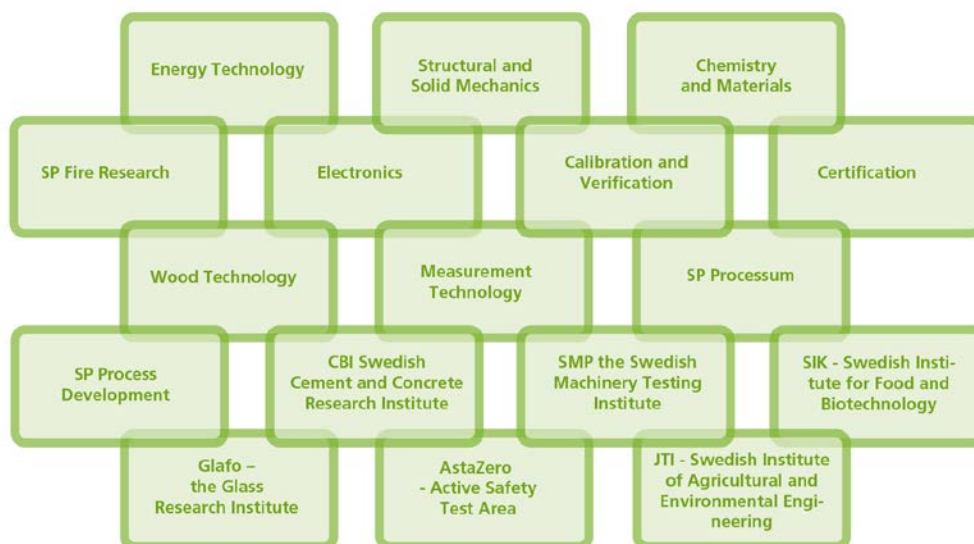
# Referanser

1. Kommunal- og moderniseringsdepartementet. Forskrift 26. mars 2010 nr. 489 om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10) [Internett]. FOR-2010-03-26-489 jul 1, 2010. Tilgjengelig på: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html>
2. Brandon D, Östman B. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings Phase 2: Task 1 - Literature Review: The contribution of CLT to compartment fires [Internett]. Stockholm, Sweden/Massachusetts USA: SP Technical Research Institute of Sweden/NFPA; 2016 sep. Report No.: FRPF-2016-22. Tilgjengelig på: <http://www.nfpa.org/~media/files/news-and-research/resources/research-foundation/research-foundation-reports/building-and-life-safety/rftallwoodphase2.pdf?la=en>
3. Su JZ, Lougheed GD. 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). Canada: NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA; 2014 des. Report No.: A1-004377.1.
4. Su J, Roy-Poirier A, Leroux P, Lafrance PS, Gratton K, Gibbs E, mfl. Fire endurance of cross-laminated timber floor and wall assemblies for tall wood buildings. Quebec, Canada; 2014 des. Report No.: A1-005991.1.
5. Taber BC, Lougheed GD, Su JZ, Bénichou N. Solutions for mid-rise wood construction: apartment fire test with encapsulated cross laminated timber construction (Test APT-CLT) (Report to research consortium for wood and wood-hybrid mid-rise buildings). Quebec, Canada; 2014 des. Report No.: A1-100035-01.10.
6. Li X, McGregor C. Experimental Study of Combustible and Non-combustible Construction in a Natural Fire. *Fire Technol.* 2015;51:1447-74.
7. McGregor CJ. Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires [Masters of Applied Science Thesis]. [Ottawa, Canada]: Carleton University; 2013.
8. Hakkarainen T. Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments. *J Fire Sci.* 2002;20(2):133-75.
9. Frangi A, Fontana M. Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions. I Beijing, China; 2005. Tilgjengelig på: <http://www.iafss.org/8th-international-symposium-on-fire-safety-science/>
10. Medina Hevia AR. Fire Resistance of Partially Protected Cross-Laminated Timber Rooms [Masters in Engineering Thesis]. [Ottawa, Canada]: Carleton University; 2014.
11. Frangi A, Bochiccio G, Ceccotti A, Laurolia MP. Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building. I Miyazaki, Japan; 2008. Tilgjengelig på: [http://support.sbcindustry.com/Archive/2008/june/Paper\\_074.pdf](http://support.sbcindustry.com/Archive/2008/june/Paper_074.pdf)
12. Hox K. Branntest av massivtre [Internett]. Trondheim: SP Fire Research AS; 2015. Report No.: SPFR A15101. Tilgjengelig på: <http://www.spfr.no/media/publikasjoner/upload/2015/spfr-a15101-branntest-av-massivtre.pdf>

13. Hox K, Baker G. Full-scale fire test of CLT structure used for student housing. I: Conference Proceedings Interflam2016 Volume 2. London, UK: Interscience Communications Ltd; 2016. s. 1087–93.
14. Hasburgh L, Bourne K, Peralta P, Mitchell P, Schiff S, Pang W. Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of cross-laminated timber. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.
15. Gerard R, Barber D, Wolski A. Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings. Phase 1. Final Report [Internett]. San Francisco, USA: Arup North America Ltd; 2013. Tilgjengelig på: [http://sustainable-fireengineering.ie/wp-content/uploads/2015/08/NFPA-FPRF\\_Tall-Wood-Buildings-Fire-Safety-Challenges\\_2013.pdf](http://sustainable-fireengineering.ie/wp-content/uploads/2015/08/NFPA-FPRF_Tall-Wood-Buildings-Fire-Safety-Challenges_2013.pdf)
16. Crielaard R. Self-extinguishment of cross-Laminated timber [Master thesis]. [Delft]: Delft University of Technology; 2015.
17. Crielaard R, van de Kullen J-W, Terwel K, Ravenshorst G, Steenbakkens P, Breunese A. Self-extinguishment of cross-laminated timber. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.
18. Bartlett A, Hadden R, Bisby L, Butterworth N. Auto-extinction of engineered timber as a design methodology. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.
19. Friquin KL. Charring rates of heavy timber structures for Fire Safety Design. A study of the charring rates under various fire exposures and the influencing factors. [Internett]. Trondheim: NTNU; 2010. (Doctoral theses at NTNU). Report No.: 2010:128. Tilgjengelig på: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:357755/FULLTEXT02.pdf>
20. 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.
21. Magnusson SE, Thelandersson S. Temperature-time curves of complete process of fire development. Theoretical study of wood fuel fires in enclosed spaces. Acta Polytechnica Scandinavica Publ. Office; 1970.
22. Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jöbstl R. Experimental Analysis of Cross-Laminated Timber Panels in Fire. Fire Saf J. 2009;44(8):1078–87.
23. Zhang S, Wang W, Fan X. Fire behaviour of dowel-type timber connection with slotted in steel plates under bending and shear. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.
24. Alam M, Hadjisophocleous G, Erochko J. Performance of hybrid connections exposed to fire. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.
25. Buchanan AH. Fire resistance of multi-storey timber buildings. I Tsukuba, Japan; 2015.
26. Hopkin D, Schmid J, Friquin KL. Timber structures subject to non-standard fire exposure – advances & challenges. I: WCTE 2016 CD-ROM Proceedings. Vienna, Austria; 2016.

## SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



## SP Fire Research AS

Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim

Telefon: 464 18 000

E-post: [post@spfr.no](mailto:post@spfr.no), Internett: [www.spfr.no](http://www.spfr.no)

[www.spfr.no](http://www.spfr.no)

SPFR-rapport A17 20229:1



For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP Fire Research og SP:  
[www.spfr.no/publikasjoner](http://www.spfr.no/publikasjoner) og [www.sp.se/publ](http://www.sp.se/publ)