

Kjartan Bertelsen  
Marcus Levin Tollefsen

# Vurdering av standardiserte tid-temperaturkurvers relevans i forbindelse med branndimensjonering av høye trehus.

Bacheloroppgave i Byggingeniør  
Veileder: Jan Steiner Egenes  
Mai 2019



Kjartan Bertelsen  
Marcus Levin Tollefsen

# Vurdering av standardiserte tid-temperaturkurvers relevans i forbindelse med branndimensjonering av høye trehus.

Bacheloroppgave i Byggingeniør  
Veileder: Jan Steiner Egenes  
Mai 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



# Forord

Oppgaven er valgt på bakgrunn av sterk interesse for temaet, og fordi et av gruppemedlemmene jobber som brannmann i Oslo Brann & Redningsetat. Inspirasjon til problemstillingen har vi hentet fra en kronikk (1) utgitt i Teknisk Ukeblad.

Vi ønsker først og fremst å takke forfatteren og sivilingeniør Eivind Løken for særdeles god hjelp i startfasen, og råd og veiledning underveis i oppgaveskrivingen. Vi takker også rådgiver ved NTNU i Gjøvik, Jan Steinar Egenes for god hjelp.

Til utforming av metode, rettskrivning og redigering, har vi fått uvurderlig hjelp av René Jørgensen, takk! Vi setter også stor pris på tålmodighet fra familie, venner og arbeidsgiver i denne lærerike prosessen.

Kjartan Bertelsen

Marcus Levin Tollefsen

# Sammendrag

Denne bacheloroppgaven har som hovedfokus å vurdere hvor egnet tidstemperaturkurven for en standardbrann (ISO-834) er til å dokumentere bæreevnen til bygninger i brannklasse 3, som er oppført av eksponerte KLT-elementer. Dette gjør vi ved å sammenligne testbranner i KLT hvor brannforløpet går fritt, med standardbranner.

Gjennom en litteraturstudie ble relevant nyere forskning gjennomgått for å kartlegge hvordan en rombrann som er bygget opp av KLT, vil utarter seg. Vi satte oss grundig inn i hvilke faktorer som er styrende for et naturlig brannforløp i KLT, slik at vi kunne gjøre en vurdering på om det finnes forskjeller i den totale innbrenningen, temperaturutviklingen og om bruken av KLT hadde innvirkning på tidsforløpet frem til en eventuell selvslukking. Funnene ble så systematisert og sammenlignet med brannforløpet til en standardbrann som er beskrevet i ISO 834.

Litteraturstudiet avdekket at det er til dels store sprik mellom innbrenningshastigheter som måles i et naturlig brannforløp og en ISO brann, og at det er store usikkerheter knyttet til om en rombrann med flere enn to eksponerte sider vil selvslukke. Graden av delaminering er her en avgjørende faktor, da delaminering kan føre til at brannen tar seg opp igjen slik at man kan få flere overtenninger med påfølgende fullt utviklede rombranner og et tidsforløp som går langt utover det som konstruksjonen er dimensjonert for å tåle. Det er også avdekket at det ikke nødvendigvis er høyest mulig temperatur i brannrommet som er den mest kritiske faktoren, men tiden til en eventuell selvslukking inntreffer som er avgjørende for om man får en kollaps eller ikke. Summen av disse faktorene viser at tidstemperaturkurven til ISO 834 i mange tilfeller ikke gir et godt nok bilde av virkelige brannsituasjoner, og dermed ikke er egnet for branndimensjonering av bygg hvor det er flere eksponerte brennbare flater.

I reelle storbranner er vind og naturlig trekk kritiske faktorer, så vi hadde forventet at det skulle eksistere litteratur og forskning på temaet om hvilken påvirkning tvungen ventilasjon hadde på innbrenningshastigheten og varmeproduksjonen. Det viste seg at dette temaet, uvisst av hvilken grunn var nesten helt fraværende i forskningslitteraturen.

# Abstract

The main focus of this bachelor degree thesis is to assess the suitability of the time temperature curve for a standard fire, in accordance with ISO-834, and to document the load bearing capacity of fire class 3 buildings where Cross Laminated Timber (CLT) has been used. This is achieved by comparing the fire test results from a free cycle test with those from a standard temperature-temperature curve.

A literature review of relevant research papers allowed the mapping of how a fire develops once ignited in a compartment constructed from CLT. This allowed us to determine whether there were differences in total burn time, temperature variations and whether or not the use of CLT had an impact on the length of time to self-extinguishment. The findings were then tabulated and compared to the cycle of a standard fire as described in ISO 834.

The literature review revealed that there are, in part, large gaps between the charring rates when measured in a natural fire cycle and those from a standard ISO fire. In addition, there are large uncertainties associated with whether a compartment fire, with more than two exposed sides, will actually self-extinguish. The degree of delamination, of CLT during the fire, is the decisive factor as delamination can cause new growth period within subsequent fully developed fires, and a time lapse that goes far beyond what the construction is expected to endure. It is also revealed that it is not necessarily the maximum temperature in the fire zone that is the most critical factor, rather, it is the time to self-extinguishment that is essential for determining if there will be a collapse or not. The sum of all these factors indicates that the standard time temperature curve of ISO 834, in many cases, does not provide an accurate enough representation of real fire situations. Thus, it is not suitable for fire sizing of buildings where there are several exposed flammable surfaces.

In all major fires, wind and natural draw are both critical factors, so we had expected that through the course of our literature review there would be sufficient research available on the impact that enforced ventilation had on burn-in rates and heat production. However, it turned out that this subject matter, for whatever reason, was almost entirely absent in any available research literature.

# Innhold

<b>Forord</b>	I
<b>Sammendrag</b>	II
<b>Innhold</b>	IV
Tabeller	VII
Figurer	VIII
1. Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	2
2. Metode	3
2.1 Valg av metode	3
2.2 Validitet og reliabilitet	3
2.2 Søkeprosessen	4
2.3 Analyse	5
2.4 Etske aspekter	5
3. Teoretisk grunnlag	7
3.1 Lover og forskrifter	7
3.2 Branndimensjonering	9
Risikoklassifisering	10
Brannklassifisering	10
Brannmotstand	11
3.3 Tre som byggemateriale	12
Limtre	13
Massivtre-KLT	13
3.4 Brann i tre	14
Pyrolyse:	15
Varmeproduksjon:	17
Varmeproduksjon i en naturlig brann	17
3.5 Brannforløp:	19
3.5.1 Rombrann	19
Faser	20
3.6 ISO 834 – Standard brannkurve	23



3.7 Forkullingshastighet	25
3.8 Temperaturens påvirkning av treets mekaniske egenskaper	26
3.9 Oppsummering av teori	27
4. Litteraturstudie	29
4.1 Brannsikkerhet i høye trehus	29
Brannenergi	29
Forkulling	30
Gipsbeskyttelse	30
Fullstendig brannforløp	30
Naturlig brann og standardbrann	31
4.2 Needs for total fire engineering of mass timber buildings	31
Forkulling og pyrolyse	31
Brannodynamikk	32
Delaminering	32
Lavtemperaturforbrenning	32
Thermo-mekaniske egenskaper	33
Strukturelle endringer	33
Konklusjon	33
4.3 Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions	34
Testoppsett	34
Resultat	35
Konklusjon	36
4.4 Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels	36
Testoppsett	37
Simulering	37
Branntest	38
Konklusjon	39
4.5 REAL-SCALE FIRE TESTS ON TIMBER CONSTRUCTIONS	39
Testoppsett	39
Resultater	40
Konklusjon	42
4.6 Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics	42
Testoppsett	43

Resultat	43
Alpha-1	43
Alpha-2	44
Beta	44
Gamma	44
Konklusjon	45
4.7 Self-extinguishment of cross-laminated timber	46
Testoppsett	46
Sett 1	46
Sett 2	47
Resultat	48
Sett 1	48
Sett 2	49
Konklusjon	51
4.8 Branntest av massivtre	51
Testoppsett	52
Resultat	52
Test 1	53
Test 2	54
Konklusjon	55
<b>Oppsummering</b>	56
5. Diskusjon	58
5.1 Forkulling:	58
5.2 Brannenergi	58
5.3 Temperatur	59
5.4 Selvslukking	60
6. Konklusjon og anbefalinger	61
6.1 Konklusjon	61
6.2 Videre arbeid	62
Referanser	64

# Tabeller

- 3.1 Risikoklasser (2)
- 3.2 Tabell for brannklasse (BKL) for byggverk (3)
- 3.3 Bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse (4)
- 4.1 Oversikt over oppsett brukt i testene (5)
- 4.2 Forkullingsresultater av branntest (6)
- 4.3 Oversikt over antall eksponerte overflater og type brensel (7)
- 4.4 Forkulling og HRR resultater (8)
- 4.5 Testoppsett for småskala tester med konkalorimeter (9)
- 4.6 Testoppsett for branntester (9)
- 4.7 Resultat fra småskala tester (9)
- 4.8 Resultat fra branntester (9)
- 4.9 Hendelsesforløp og temperaturmålinger under test 1 (10)
- 4.10 Hendelsesforløp og temperaturmålinger under test 2 (10)
- 4.11 Oppsummering av testene utført i litteraturstudiet

# Figurer

- 2.1 Validitet og reliabilitet
- 3.1 Oppbygging av forskrifter og lover
- 3.2 Klassifisering av brannmotstand
- 3.3 Limtrebjelke (11)
- 3.4 Oppbygging av KLT-element (12)
- 3.5 Forkullingsprosess (13)
- 3.6 Brannforløp (14)
- 3.7 Temperaturkurve beskrevet i ISO-834
- 3.8 Testing ved bruk av ISO 834 (15)
- 3.9 Reduksjonsfaktorer (16)
- 3.10 Forkulling
- 4.1 Temperaturmålinger sammenlignet med standards ISO-834 brann (5)
- 4.2 Sammenligning av simulering resultat for massivtre 5 x 17 mm (venstre) og 3 x 28 mm (høyre) med homogent trepanel (6)
- 4.3 Temperaturkurve for de forskjellige tverrsnittene for både simulering og branntest ved ISO-brann på en side (6)
- 4.4 Temperatur og varmeavgivelsesrate (HRR) over tid ved bruk av KLT-elementer (7)
- 4.5 Testoppsett og andel eksponert trevirke (8)
- 4.6 Temperaturutvikling i de forskjellige testene (8)
- 4.7 Geometri for modulene i branntestene (9)

# 1. Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

De siste årene har det blitt mer og mer populært å bygge høye trehus hvor man bruker massivtre eller limtre i form av KLT-elementer (krysslaminert tre) til bærende konstruksjoner. Årsaken til dette kan være av økonomiske grunner eller at man ønsker å ha et større fokus på miljø og bærekraft. Å bygge høyt med tre har flere fordeler, men bringer også med seg noen alvorlige utfordringer. Den største av disse er brannsikkerhet og hvordan man skal ta hensyn til konstruksjonens reduserte bæreevne og overflatenes bidrag til brannens utvikling med tanke på tid og varmeproduksjon.

Dersom et bygg har fem etasjer eller flere, klassifiseres det i brannklasse 3. Det vil si at det er krav til at hovedbæresystemet skal opprettholde sin funksjon gjennom et fullstendig brannforløp. Veiledningen oppgir R90 som tilfredsstillende for dette, og tolker med det et fullstendig brannforløp til å vare i 90 minutter.

Dersom man har et bygg med en ubrennbar bærende konstruksjon i stål eller betong, kan man med god nøyaktighet beregne hvor lenge en brann vil vare og hvor mye energi som blir frigjort fra forbrenningen av inventaret. Slik kan man si om den frigjorte energien vil gi for høye temperaturer i stålet. Det kan utarbeides ulike brannmodeller og brannkurver som viser forventet forløp av en slik brann. På bakgrunn av dette velger man de mest kritiske brannkurvene for å dimensjonere slike konstruksjoner; dvs. de varmeste temperaturene en teoretisk kan få i X antall minutter.

Ved brann i et høyt trehus hvor selve konstruksjonen bidrar med brannenergi vil brannscenariet kunne forløpe annerledes. Dersom man studerer reelle storbranner og relevante tester som er gjort på rombranner med KLT, så viser flere av disse at brannforløpet kan vare vesentlig lengre enn 90 min og ha høyere forkullingshastigheter enn det som oppgis i norsk standard.

Det mest kritiske brannforløpet i høye trehus vil være en brann ute av kontroll hvor selve bærekonstruksjonen i tre vil bidra med brannenergi og føre til et lengre forløp enn en i

bygning oppført i stål- og betong. Dersom trekonstruksjonen kun er dimensjonert for en 90 minutters brann vil det være fare for kollaps. Dette gir usikkerhet rundt bæreevnen til høyhus av tre i ekte branner.

Dette mener vi er svært betenkelig og har gitt bakgrunn for vår problemstilling:

## 1.2 Problemstilling

Hvor egnet vil en tidstemperaturkurve for en standardbrann (ISO-834) være til å dokumentere bæreevnen til komponenter som skal inngå i bygninger i brannklasse 3 og 4, oppført av eksponerte KLT-elementer?

## 2. Metode

I dette kapitlet beskriver vi metoden vi har brukt for å samle informasjon og hvordan vi søker å besvare problemstillingen i oppgaven. Dette er for å gi oppgaven etterprøvbarehet.

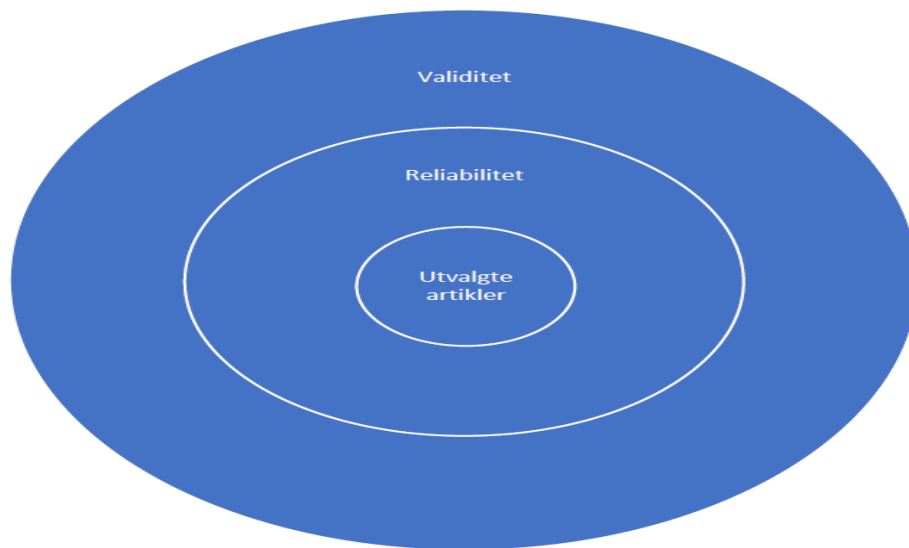
### 2.1 Valg av metode

Metode er læren om å samle inn, organisere, bearbeide, analysere og tolke fakta på en så systematisk måte at andre kan etterprøve våre data og konklusjoner. Den forskningsmetoden som velges, vil være med på å bestemme hva en vil se eller oppdage (17).

Vi har valgt å benytte en litteraturstudie for å besvare vårt spørsmål i problemstillingen. En litteraturstudie er en søkestrategi for å finne fram til litteratur som omhandler vårt tema og spørsmål. Det kan skilles mellom to typer – den tradisjonelle og den systematiske litteraturstudien. I vårt tilfelle er den systematiske mest aktuell. Dette fordi vi ønsker å finne studier som omhandler et avgrenset forskningsspørsmål (18).

### 2.2 Validitet og reliabilitet

Når man gjør bruk av en litteraturstudie er det viktig at man gjør en vurdering av validitet og reliabilitet på den litteraturen og forskningen man benytter. Validitet handler om hvorvidt forskningen er relevant i forhold til vår problemstilling, og reliabiliteten sier noe om hvor godt denne forskningen treffer vår oppgave. Oppsummert kan en si at – god reliabilitet er en forutsetning for god validitet.



**Figur 2.1:** Validitet og reliabilitet

En utfordring ved denne typen litteraturstudie er at man risikerer å «ensidig» lete etter studier som bekrefter det en allerede mener er svaret på egen problemstilling. En vil lett kunne overse de resultatene som ikke passer inn. Dette krever at man er bevisst ved utvelgelsen og ikke utelater studier som peker i en annen retning enn den man selv «ønsker».

## 2.2 Søkeprosessen

Fokuset for vår søkeprosess var å finne ny og relevant informasjon som var tilgjengelig via pålitelige kilder. Tidsmessig begrenset vi oss til forskning som er blitt gjort de fem siste årene på rombranner hvor det har vært brukt KLT-elementer.

På grunn av begrenset tilgang til databaser og kunnskap om hva som er anerkjente kilder, søkte vi etter relevante artikler og rapporter som er brukt som referanser i publiserte masteroppgaver, som er avlagt ved NTNU og ved brannsikkerhetsstudiet ved Høgskolen på Vestlandet.



De fleste dokumentene vi fant inneholdt langt mer data og informasjon enn hva som var aktuelt til vårt formål. Vi måtte derfor avgrense søket ytterligere slik at artiklene måtte omhandle følgende emner/variabler:

- KLT-elementers bidrag til den totale brannenergien
- Temperatur og temperaturutvikling
- Heat release rate, HRR
- Forkullingshastighet
- Brannforløpets varighet
- Delaminering.
- Reduserte mekaniske egenskaper pga. varmepåvirkning.

Vårt søk endte opp med at vi valgte ut 7 artikler og 1 masteroppgave.

## 2.3 Analyse

For å kunne svare på vår problemstilling, måtte de utvalgte artiklene gjennomgås med tanke på å trekke ut relevante data. Vi valgte å benytte et resultatskjema hvor vi for hver artikkel/studie har presentert problemstilling, valgt metode, hvilke relevante variabler som har vært studert og resultat/konklusjon i studien.

Denne oppsummeringen gir grunnlaget for vår drøfting av de enkelte emner og variabler som er relevante for trekonstruksjoner som skal holde et fullstendig brannforløp, opp mot standardiserte brannkurver og tidsforløp benyttet på stål og betongkonstruksjoner.

## 2.4 Ethiske aspekter

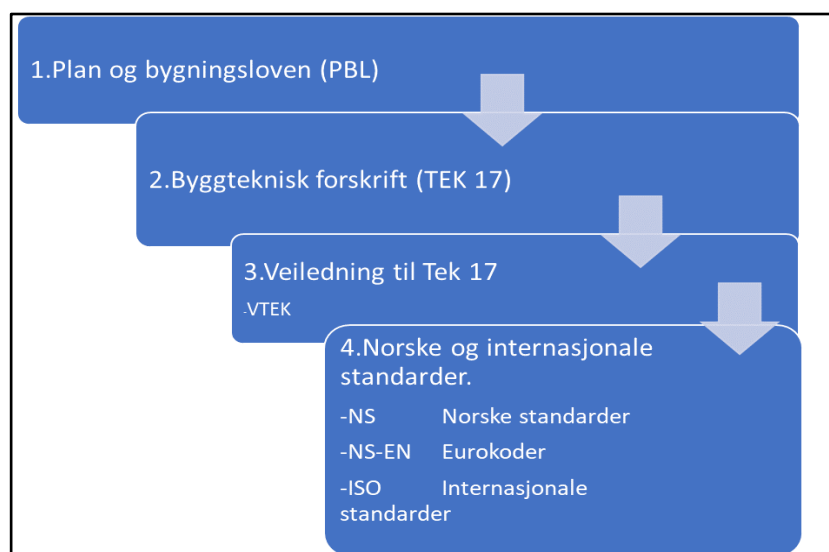
I boken (17) Å forske på samfunnet skriver Knut Halvorsen blant annet om etiske prinsipper og at man bør tilstrebe sannhet, åpenhet og etterrettelighet i vitenskapelig arbeid. Siden en av gruppens medlemmer har over 20 års erfaring som brannmann, og dermed av noen kan tolkes

som forutinntatt angående oppgavens tema, så har gruppen hatt ekstra fokus på at man følger prinsippet om etterprøvnbarhet, og at utvelging av data ikke er håndplukkede eksempler. Gruppens arbeid er drevet av nysgjerrighet for dette temaet, og har et helt klart ønske om å bidra med objektive fakta ved at vi ikke omgår sannheten, eller ved at vi holder tilbake relevant informasjon.

## 3. Teoretisk grunnlag

Dette kapittelet gjennomgår lover og forskrifter som gjelder for brannteknisk prosjektering, og gir i tillegg grunnleggende teori om hvordan trekonstruksjoner påvirkes og dimensjoneres for brann. For at man på best mulig måte skal kunne drøfte problemstillingen som handler om eksisterende brannkurvers egnethet til å branndimensjonere heltrekonstruksjoner, med hensyn til temperatur og tidsforløp i massivtrekonstruksjoner, så vil teori om aktuelle faktorer som styrer og påvirker brannens lengde, temperatur og intensitet bli spesielt gjennomgått.

### 3.1 Lover og forskrifter



**Figur 3.1:** Oppbygging av forskrifter og lover

**1. Plan og bygningsloven PBL** er det øverste juridiske nivå for byggesaker. Lovverket gjelder for alle byggeprosjekter og virksomheter i Norge og har som formål å fremme bærekraftig utvikling til beste for den enkelte, samfunnet og framtidige generasjoner (19).

**2. Byggteknisk forskrift - TEK17** skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi (20).

TEK17 er en av flere forskrifter til PBL og er den viktigste når det kommer til brannprosjektering av bygg, hvor kapittel 11 beskriver generelle minimumskrav til sikkerhet ved brann (21).

Bestemmelsene i TEK 17 presenteres som ytelseskrav og funksjonskrav. Funksjonskrav er beskrevet med ord (kvalitative), mens ytelser er tallfestet (kvantitative) der det er mulig.

Eksempel på et ytelseskrav som er gitt i TEK 17, §11-12 første ledd, bokstav b)  
Byggverk i risikoklasse 6 skal ha automatisk brannsløkkeanlegg.

Eksempel på spesielt relevante funksjonskrav gitt i TEK 17 er: §11-4 Bæreevne og stabilitet:

(1) *Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at byggverket som helhet, og de enkelte delene av byggverket, har tilfredsstillende sikkerhet med hensyn til bæreevne og stabilitet.*

(2) *Ved dimensjonering for tilfredsstillende bæreevne og stabilitet ved brann skal det medregnes termisk påkjenning fra den brannenergien og det brannforløpet som kan forventes i byggverket.,*

(4) *Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.*

(5) *Sekundære konstruksjoner og konstruksjoner som bare er bærende for én etasje, eller for tak, skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i den tiden som er nødvendig for å rømme og redde personer og husdyr i og på byggverket.*

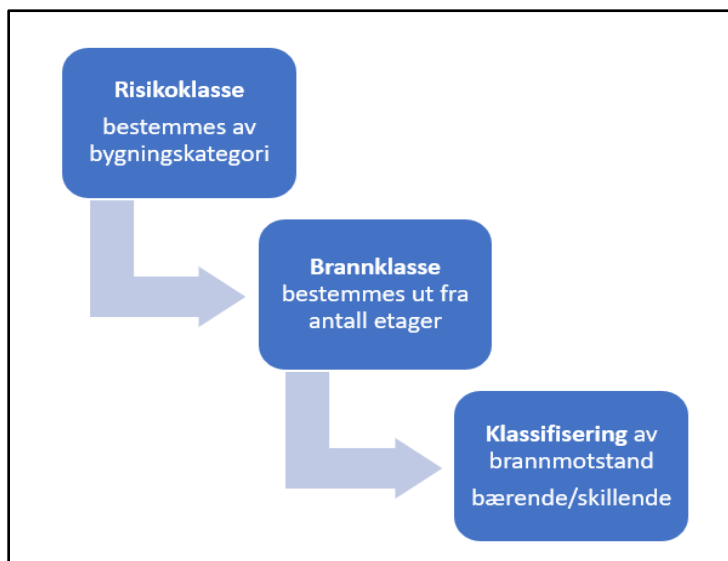
Funksjonskravene kan ikke fravikes av brannrådgiver.

### 3. Veiledning om tekniske krav til byggverk, VTEK.

VTEK forklarer forskriftens krav og angir preaksepterte ytelser eller «løsningsforslag» som tilfredsstillende ytelsesnivået i funksjonskravene som er gitt i TEK17. VTEK gir ikke konkrete detaljløsninger, men henviser for eksempel til Byggforskserien og Norsk standarder. Dersom man følger «løsningsforslaget» som er gitt i VTEK sine henvisninger, er kravene tilfredsstillende og man trenger ikke å produsere ytterligere dokumentasjon. Ved å følge de preaksepterte løsningene gjør man en forenklet brannprosjektering, som er god nok og passer for de aller fleste byggverk. Ved manglende oppfyllelse av krav, vil det oppstå et fravik. For at dette skal kunne lukkes, må man dokumentere at den valgte løsningen som fraviker de preaksepterte løsningene tilfredsstillende funksjonskravene gitt i TEK 17.

Som et eksempel på dette er prosjektering av trehus i brannklasse 3 og 4. Her får man blant annet fravik på bruk av brennbare materialer i bærende hovedsystem. Dette fører til at man ved analyse må dokumentere at valgte løsningene tilfredsstillende funksjons- og ytelseskravene gitt i TEK 17.

## 3.2 Branndimensjonering



I TEK 17 § 11-1 Generelle krav til sikkerhet ved brann heter det at *“Hovedformålet med å stille krav til sikkerhet ved brann, er å redusere sannsynligheten for tap av liv og helse ved brann til et akseptabelt lavt nivå. Kravene skal også bidra til å ivareta materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold ved brann.”*

**Figur 3.2:** Klassifisering av brannmotstand

Ved prosjektering og utførelse av byggverk skal det legges vekt på å oppnå tilfredsstillende sikkerhet ved brann for personer som oppholder seg i eller på byggverket samt for materielle verdier og for miljø- og samfunnsmessige forhold.

## Risikoklassifisering

For å avgjøre hvilke krav som skal stilles til brannsikkerhet, klassifiseres alle bygg i risikoklasser ut fra byggets funksjon. Inndelingen i klasser framgår av tabellen under, hentet fra TEK 17 § 11-2 Risikoklasser.

Risikoklasser	Byggverk kun beregnet for sporadisk personopphold	Personer i byggverk kjenner rømningsforhold, herunder rømningsveier, og kan bringe seg selv i sikkerhet	Byggverk beregnet for overnatting	Forutsatt bruk av byggverk medfører liten brannfare
1	ja	ja	nei	ja
2	ja/nei	ja	nei	nei
3	nei	ja	nei	ja
4	nei	ja	ja	ja
5	nei	nei	nei	ja
6	nei	nei	ja	ja

**Tabell 3.1:** Risikoklasser (2)

## Brannklassifisering

er en bygningsteknisk definisjon som fastslår bygg og bygningsdelers evne til å motstå brann. Ved definisjon av brannklasse legges risikoklassifiseringen til grunn, da byggets anvendelse sammen med dets størrelse og planløsning vil være avgjørende for hvilke konsekvenser en brann kan få. Inndelingen i brannklasser går fra 1 (liten konsekvens) til 4 (særlig stor konsekvens).

Risikoklasse	Antall etasjer			
	1	2	3 og 4	5 eller flere
1	-	BKL 1	BKL 2	BKL 2
2	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
3	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
4	BKL 1	BKL 1	BKL 2	BKL 3
5	BKL 1	BKL 2	BKL 3	BKL 3
6	BKL 1	BKL 2	BKL 2	BKL 3

**Tabell 3.2:** Tabell for brannklasse (BKL) for byggverk (3)

## Brannmotstand

Brannmotstand er den tid, angitt i minutter, som en bygningsdel motstår oppvarming eller røykspredning i en brannsituasjon og beholder nærmere spesifiserte egenskaper (bæreevne, tetthet, overflatetemperatur). Brannmotstanden bestemmes ved normert prøving eller ved beregning (22).

Hovedformålet med å stille branntekniske krav til bærende konstruksjoner er å oppnå en tilstrekkelig bæreevne og stabilitet til å motstå en forventet brannpåkjenning slik at byggverket ikke styrter sammen under brann, men bevarer sin stabilitet og bæreevne i nødvendig tid for rømning, redning og slokking.

Tabellen under viser at for et bygg i Brannklasse 3, er kravet at det bærende hovedsystemet skal opprettholde sine bærende funksjoner i min 90 minutt -[R90], og bestå av ubrennbare materialer [A2].

I veiledningen til TEK 17 § 11-4 annet ledd heter det videre at konstruksjonsdeler som etter tabell 1 (tabell 3.3) må ha brannmotstand R 90 eller høyere, må det brukes en dimensjonerende brannenergi der karakteristisk brannenergi multipliseres med faktoren 1,5. Faktoren på 1,5 samsvarer med overgangen fra brannmotstand R 60 til R 90 ved bruk av preaksepterte ytelser.

Bygningsdel	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R 30 [B 30]	R 60 [B 60]	R 90 A2-s1,d0 [A 90]
Sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er del av hovedbæresystem eller stabiliserende	R 30 [B 30]	R 60 [B 60]	R 60 A2-s1,d0 [A 60]
Trappeløp	-	R 30 [B 30]	R 30 A2-s1,d0 [A 30]
Bærende bygningsdeler under øverste kjeller	R 60 A2-s1,d0 [A 60]	R 90 A2-s1,d0 [A 90]	R 120 A2-s1,d0 [A 120]
Utvendig trappeløp, beskyttet mot flammepåvirkning og strålevarme	-	R 30 [B 30] eller A2-s1,d0 [ubrennbart]	A2-s1,d0 [ubrennbart]

**Tabell 3.3:** Bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse (4)

### 3.3 Tre som byggemateriale

I lette konstruksjoner har tre lenge vært det dominerende materialet på grunn av god styrke og stivhet i forhold til sin vekt. Tre som byggemateriale har flere positive effekter. Det er en fornybar ressurs og kan gjenbrukes. I Norge er det gran og furu som er mest benyttet.

Tre er en naturlig kompositt som består av cellulose, hemicellulose og lignin, som igjen er bygget opp av 50% karbon, 44% oksygen og 6% hydrogen (23).

Under tørkeprosessen vil det frie vannet som ligger i cellens hulrom først forsvinne. Fuktighetsinnholdet i treet vil da ligge litt under 30%. Denne tilstanden kalles fibermetningspunktet, og er den tilstanden hvor treet ikke inneholder fritt vann og hvor celleveggene er mettet. Ytterligere tørking under 30% resulterer i krymping av celleveggene og en påfølgende krymping av trevirket. Fuktinnholdet i tørt tre ligger på 12%



og endres med relativ fuktighet til omgivelsene. Det varierer derfor gjennom årstidene, og er en svært relevant faktor for treets egenskaper ved brann. De aller fleste av treets mekaniske egenskaper er relatert til fuktinnholdet og densiteten. Densitet er definert som  $\rho = m/V$  [kg/m<sup>3</sup>](24, 25).

Varmekonduktiviteten som sier noe om trevirkets evne til å lede varme, varierer med fuktinnhold, densitet og forholdet mellom varmestrømmen og fiberretningen til treet. Høy densitet gir høy varmeledningsevne.

## Limtre



Ved å benytte bearbeidet tre slik som limtre eller massivtre utnytter man treets allerede gode styrkeegenskaper på en bedre måte slik at det kan benyttes i større bærende konstruksjoner.

Limtre er et produkt som består av 45 mm tykke lameller av gran eller furu som er limt sammen i parallell fiberretning. Ved å benytte styrkesortert trevirke som fingerskjøtes kan man produsere bjelker og søyler med ønsket styrke og stivhet og

**Figur 3.3:** Limtrebjelke (11)

ifølge limtreboka er det teknisk mulig å konstruere limtrekonstruksjoner med spenn på opptil 150 m (13).

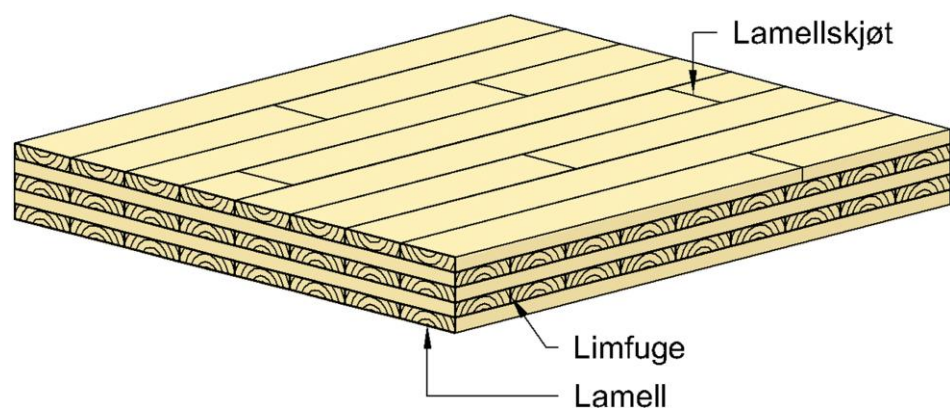
## Massivtre-KLT

Massivtre eller cross laminated timber - KLT, består av lameller som er satt sammen til elementer ved bruk av spiker, skruer, tredybler, lim eller stålstag. Det finnes tre hovedtyper massivtre: kantstilte elementer, krysslagte elementer og hulromselementer

(26). Kantstilte elementer er elementer som er satt sammen av stående planker. Krysslagte elementer er en fellesbetegnelse for elementer som er satt sammen av planker i flere sjikt. Hulromselementene har et hulrom mellom et øvre- og nedre element (27, 28).

De krysslagte elementene er vanligvis presset og limt sammen. Limet som brukes er av typen MUF (melaminureaformaldehyd) eller PUR (polyuretan). Det har vært forsket mye på limtyper da det er et kjent problem at massivtre elementene kan delaminere under brann. Forskning viser at delaminering i enkelte tilfeller kan gi forlenget brannforløp og en varierende og uforutsigbar innbrenningshastighet (29).

Elementene kan være bygd opp av 3-9 sjikt og tykkelsen kan variere fra ca. 60 mm og opptil ca. 300 mm, hvor tykkelse og antall sjikt er avhengig av elementets funksjon og bruksområde.

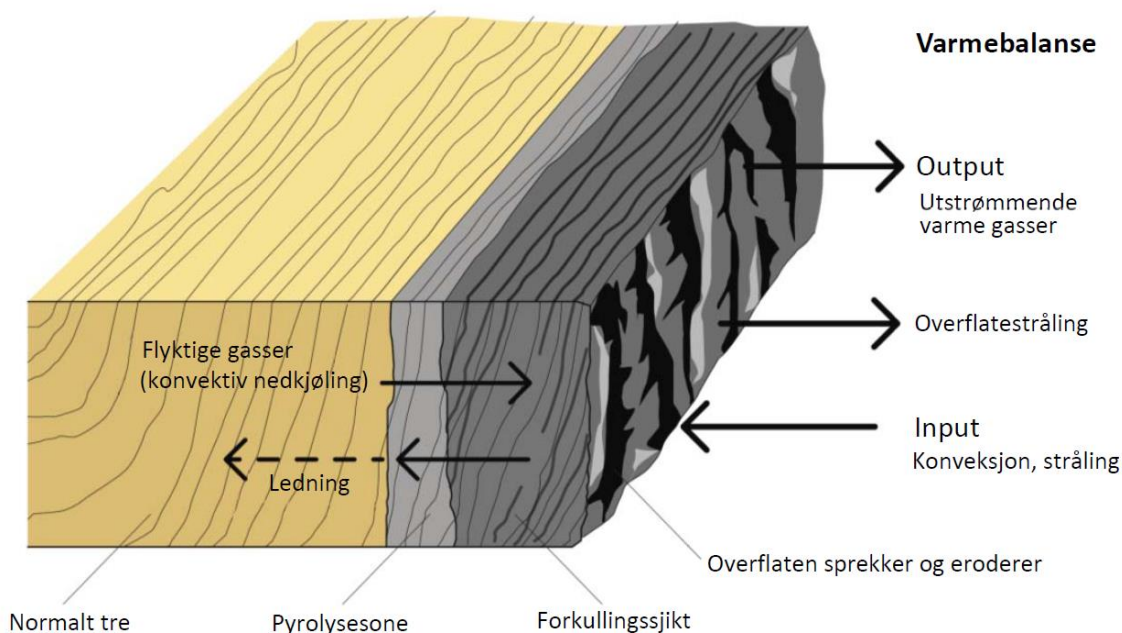


**Figur 3.4:** Oppbygging av KLT-element (12)

### 3.4 Brann i tre

Tre er et brennbart materiale som brenner med tilnærmet konstant hastighet, ca. 0,65 mm/min. Etterhvert som tre brenner vil det dannes et lag av kull som beskytter og skjermer det bakenforliggende og fortsatt upåvirkede og friske trevirket mot innkommende stråling. Denne forutsigbarheten gjør at man ved brann fortløpende kan vurdere størrelsen på restverrsnittet og dermed gjøre en vurdering av bæreevne og tid til

kollaps. Det er på grunnlag av disse fakta man i henhold til EC 5 branndimensjonerer limtresøyler og bjelker ved å se på om resttverrsnittet er stort nok til å holde konstruksjonen. Dette er en godt anerkjent og mye brukt metode for å branndimensjonere konstruksjoner i tre (13).



**Figur 3.5:** Forkullingsprosess (13)

### Pyrolyse:

Når tre blir varmet opp brytes det ned og spaltes gjennom en anaerob og endoterm prosess, det vil si at prosessen ikke er avhengig av oksygen og at den krever tilførsel av energi for at den skal kunne skje. Denne prosessen kalles for *pyrolyse* og er en kompleks prosess som generer en mengde forskjellige brennbare stoffer. Mengden av nedbrutt og fordampnet materiale pr tidsenhet også kalt massetapsrate [g/m<sup>2</sup>s], er avhengig av type materiale, størrelsen på overflaten og stråling fra røyk og brennende overflater.

I følge (30) så skjer den termiske nedbrytningen av treets hovedbestanddeler i følgende rekkefølge ettersom temperaturen stiger:

1. Hemicellulose      200-260°C
2. Cellulose            240-350°C
3. Lignin                280-500°C

Man ser her at disse temperaturene ligger langt under kritisk ståltemperatur. Dette er en viktig og kritisk forskjell, da stål ikke får varige svekkelser ved temperaturer under kritisk ståltemperatur som typisk ligger i området 500-550°C, mens tre brytes ned ved langt lavere temperaturer.

I følge (31) kan pyrolyse under spesielle omstendigheter starte allerede ved 70°C og selvantennning kan skje ved 77°C. Under en brann vil vann og fuktighet først fordampe og temperaturen i trevirket vil ikke øke noe særlig over 100°C før alt vannet er borte. I følge (32) foregår pyrolysen relativt sakte under 200°C. Ved økt temperatur reduseres både trevirkets fasthet og stivhet. Denne reduksjonen er imidlertid liten i de temperaturer som trevirket normalt opplever.

Etterhvert som temperaturen øker så vil den termiske nedbrytingen akselerere. Når temperaturen i trevirket har nådd 300°C regner man med at all bæreevne er borte og at forkullingen er fullstendig.

Formel for massetapsraten:

(sier noe om mengden trevirke som fordamper per kvadratmeter, per tid).

$$\dot{m}'' = \frac{q''_B + q''_E - q''_T}{L_V}$$

Hvor: $\dot{m}''$ er massetapsraten	[g/m <sup>2</sup> s]
$q''_B$ er varmestrålingen fra flammen	[kW/m <sup>2</sup> ]
$q''_E$ er varmestrålingen fra ekstern kilde	[kW/m <sup>2</sup> ]
$q''_T$ er tilbakestrålingen fra brenseloverflaten til omgivelsene	[kW/m <sup>2</sup> ]
$L_V$ er fordampningsvarmen	[kJ/g]

## Varmeproduksjon:

Fra massetapsraten kan man regne ut HRR *heat release rate* eller varmeproduksjonen som sier noe om mengden energi som kan bli produsert pr tidsenhet i en brann[kW] (33). Ved beregning av HRR så multipliseres massetapsraten med brannens totale areal og brenselets forbrenningsvarme. Det legges også inn en variabel for forbrenningseffektivitet  $X$ . Denne variabelen brukes der hvor materialet forkuller og dermed skaper en variasjon i overflatens evne til å gjennomgå en pyrolyse.

Formel for HRR heat release rate:

$$q = X \cdot \dot{m}'' \cdot A_b \cdot \Delta H_c$$

Hvor: q	er varmeproduksjonsraten	[kW]
$X$	er forbrenningseffektivitet	[-]
$\dot{m}''$	er massetapsraten	[g/m <sup>2</sup> s]
$A_b$	er brannens areal	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta H_c$	er forbrenningsvarmen til brenselet	[kJ/g]
		[6]

Massetapsraten og HRR er svært viktige faktorer når man skal gjøre beregninger med brann fordi disse sier indirekte noe om forkullingshastigheten. Variablene i disse ligningene viser også hvilke faktorer som styrer et brannforløp.

## Varmeproduksjon i en naturlig brann

I en virkelig brann skjer som regel forbrenningen med begrenset tilgang på oksygen. Det er dermed det samlede arealet og plasseringen av åpninger som styrer brannens utvikling og intensitet. Når dette skjer sier man at brannen er ventilasjonskontrollert. Massetapsraten og HRR i en virkelig brann, er derfor i tillegg begrenset av rommets

åpninger og geometri. Ved beregning av maksimal varmeavgivelseshastighet i en ventilasjonsstyrt brann skal man i henhold til (16) ta hensyn til tilgjengelig oksygenmengde.

Dersom rombrannen er ventilasjonsstyrt, så kan man beregne varmeproduksjonen via tilgjengelig mengde oksygen. Dette uttrykket forutsetter at alt tilgjengelig oksygen deltar i forbrenningen. Da kan en ventilasjonskontrollert brann uttrykkes på følgende måte:

Ventilasjonskontrollert brann:

$$Q = \dot{m}_{\text{luft}} \cdot \Delta H_{c, \text{luft}} \text{ [kW]}$$

Hvor:  $\dot{m}_{\text{luft}} = 0.5 \cdot A \cdot \sqrt{H_0} \text{ [g/s]}$

der:  $\dot{m}_{\text{luft}}$  er luftstrømmen

(A) er åpningens areal

(H<sub>0</sub>) er åpningens høyde.

$\Delta H_{c, \text{luft}}$  er forbrenningsvarmen per gram luft (3kJ/g)

Uttrykket for luftstrømmen er et sterkt forenklet uttrykk hvor man ser på trykkdifferansen mellom brannrommet og tilstøtende rom som drivkraften for luftstrømmen (34).

Ved beregning av luftstrømmen multipliserer man åpningens høyde med bredden som igjen multipliseres med roten av høyden på åpningen. Dette resulterer i at lufttilstrømningen er mer avhengig av høyde enn bredde på åpningen, noe som er naturlig da det vil gi større trykkforskjell med påfølgende større drivkrefter.

Ved en ventilasjonskontrollert brann vil uforbrente brennbare gasser og partikler brenne på utsiden av åpningen der hvor de får tilgang på oksygen. Dette kan føre til brannspredning via fasade til overliggende etasjer.

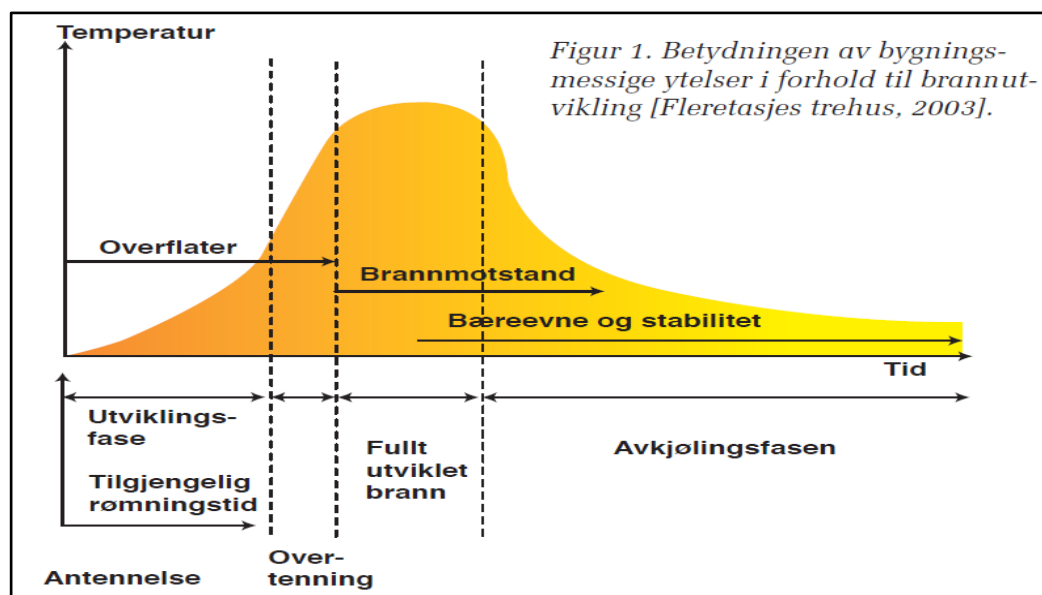
### 3.5 Brannforløp:

Å ha en god forståelse av hvordan en virkelig brann i et rom utvikler seg og vite hva som er styrende faktorer er relevant når man skal drøfte og sammenligne en naturlig brann med en standardbrann. Vi går derfor i detalj gjennom fasene i en brannutvikling og beskriver relevante variable faktorer, før vi går gjennom et standard brannforløp.

#### 3.5.1 Rombrann

Alle branner utvikler seg forskjellig med hensyn på tid og temperatur. Dersom en brann inne i et rom får utvikle seg fritt uten begrenset tilgang på oksygen kan brannen gå gjennom fire faser. Disse er: 1. antennelse, 2. vekstfase, 3. fullt utviklet brann og 4. utbrenning. Dette kalles et fullstendig brannforløp.

En brann som ikke er påsatt starter gjerne i det små, og utvikler seg over tid. Etterhvert som flammene vokser bygger det seg opp et varmt røyklag. Dette røyklaget er fullt av sot og uforbrente karbonpartikler som avgir store mengder varme ved stråling, noe som vil øke pyrolysen og forbrenningsraten på omkringliggende materialer. Dette gjør at de brannbare materialene blir forvarmet og derfor senere trenger mindre tilført energi for å brenne, som igjen fører til at brannen kan vokse hurtig og gir en raskere brannspredning



Figur 3.6: Brannforløp (14)

## Faser

### 1. Antennelse:

En brann starter med at et fast stoff, væske eller en gass blir antent. Det vanligste er at man benytter en tennkilde slik som en fyrstikk, eller at en elektrisk feil skaper en gnist eller et varmt punkt som kan starte en forbrenning.

### 2. Vekstfase:

Når brannen er startet vil den utvikle seg. I denne fasen er det tilgangen på, og type brensel som er den viktigste faktoren. Aggregattilstanden til det brennbare materialer er også viktig, da en brann i en væske eller gass vil kunne utvikle seg svært hurtig. Et fast stoff må først gjennomgå en endoterm nedbrytning før det blir til gass som kan brenne. Dette gjør at en brann i et fast stoff må produsere mer varme enn en brann i væsker eller gasser, for å opprettholde forbrenningen. En brann vil derfor kunne utvikle seg og vokse dersom den klarer å produsere mere brennbare gasser per tid i en vekstfase. Brannen er i denne fasen brenselkontrollert og vil fortsette å utvikle seg helt til tilgangen på oksygen begrenser videre utvikling.



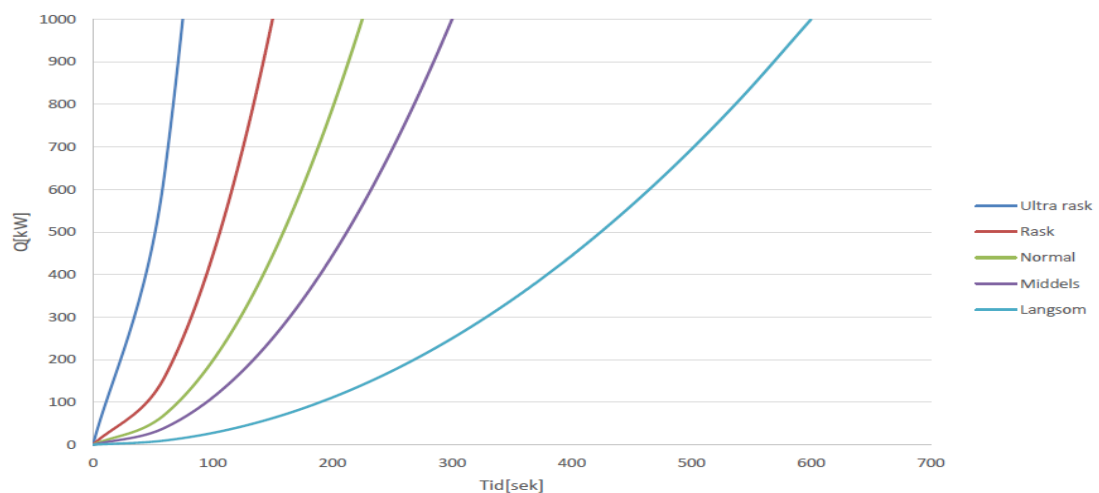
Man kan beregne brannens utvikling i en vekstfase med uttrykket:

$$Q = \alpha_f \cdot t^2$$

Hvor: -Q er varmeavgivelsesrate [MW]

-  $\alpha_f$  er brannintensitetens koeffisient [MW/s<sup>2</sup>]

- t er tid [s]



Dette kalles  $t^2$ - brannkurver og viser varmeavgivelsesraten i en vekstfase ved parabelformede kurver. Alt etter om man regner med en hurtig eller en sakte brannutvikling på bakgrunn av type brennbart materiale så kan verdien av  $\alpha_f$  [kW/s<sup>2</sup>] variere mellom 0,00293 for en sakte utvikling og 0,1876 i en ultrarask utvikling i for eksempel PE skumplast. (15)

### 3. Overtenning:

Dersom overgangen mellom vekstfasen og en fullt utviklet brann skjer ved at alle brennbare overflater og røyklaget under taket antennes samtidig kalles dette for en overttenning. Dette regnes ikke som en egen fase da overgangen fint kan skje uten at dette fenomenet inntreffer. Når dette skjer får man en svært hurtig økning i

varmeproduksjonen. I følge (30) så kan man bruke ett av to følgende kriterier for å vurdere hvorvidt en overtenning kan skje:

1. Varmestrålingen fra røyklaget må være over 20 kW/m<sup>2</sup>
2. Temperaturen i røyklaget under taket må være over 600°C

Tiden frem til en eventuell overtenning er av stor interesse for personsikkerheten i et bygg da dette sier noe om tiden man har tilgjengelig til rømning. Perioden før overtenning er også kritisk med tanke på brannslukking og redning, da man regner med at sjansene for en person å overleve er minimale etter at en overtenning har inntruffet.

#### **4. Fullt utviklet brann:**

I denne fasen er brannen i et rom på sitt største. Det vil si at den ikke kan vokse ytterligere uten å spre seg til andre rom. Brannen er nå ventilasjonskontrollert og styrt av tilgangen på oksygen som er begrenset av arealet på åpninger til rommet. På grunn av dette kan man ofte observere at flammene står ut av åpninger. Dette skjer fordi de brennbare gassene må ut av rommet for å reagere med oksygen og dermed forbrenne. På grunn av begrenset lufttilgang vil det i denne fasen i større grad produseres uforbrente gasser. Ved temperaturmålinger vil man også kunne måle en noe lavere temperatur inne i rommet fordi mye av selve forbrenningen skjer på utsiden.

Etterhvert som alt brennbart materiale er brent opp vil intensiteten avta og brannen går inn i utbrenningsfasen.

#### **5. Utbrenningsfasen:**

Denne fasen kalles også for avkjølningsfasen. Denne fasen inntreffer når mengden brennbare gasser som produseres per tid reduseres og den gjennomsnittlige temperaturen har falt med 80% av maksimal temperatur. Dette kan være på grunn av at deler av, eller alt brennbart materiale er brent opp, eller

på grunn av kullet som bygger seg opp skjerm for stråling som når friskt tre slik at graden av pyrolyse avtar.

Dersom en delaminering skjer vil friskt trevirke bli eksponert og en ny overtenning kan skje. Dette kan føre til at store tverrsnitt kan inneha god eller dårlig brannmotstand alt etter om elementene delaminerer eller ikke (30, 33).

### 3.6 ISO 834 – Standard brannkurve

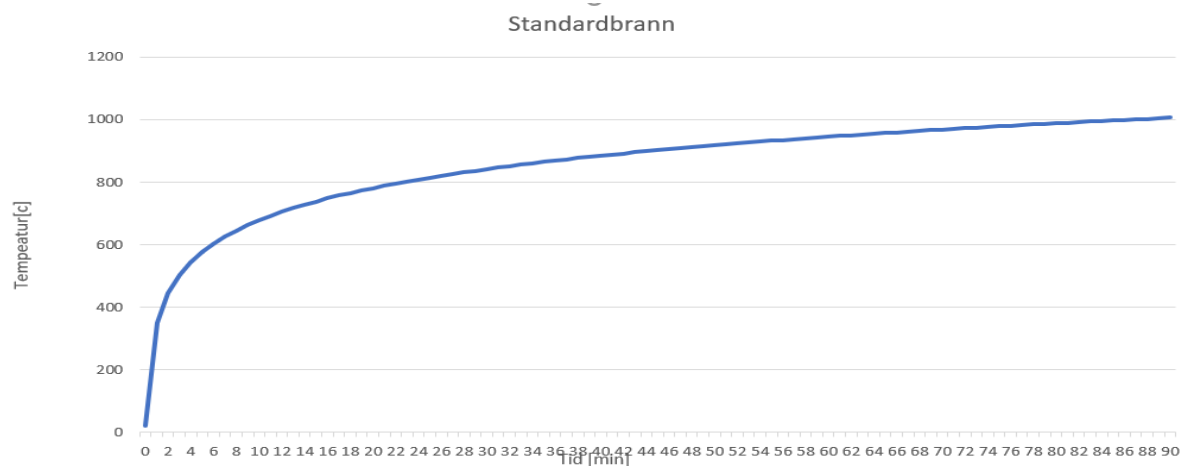
Det har blitt utviklet flere modeller for å beskrive og beregne et brannforløp med tanke på sammenhengen mellom tid og temperaturutviklingen i et brannrom. Eurokoden skiller mellom nominelle og parametriske kurver. Disse presenteres i NS-EN 1991-1-2.

Produkter som skal benyttes i bygg må sertifiseres og klassifiseres. Dette skjer i henhold til EU sitt byggevaredirektiv. Hensikten med dette er at produktene skal kunne sammenlignes og vurderes. Det er ikke noe hovedmål at testene man benytter skal være så like virkeligheten som mulig, men at resultatene fra testene skal kunne gi et best mulig sammenligningsgrunnlag. På grunn av dette er det utviklet standarder som skal sikre at testmetodene er etterprøvbare og lik for alle. Dette medfører at ikke alle resultatene gir en direkte anvendbar tallverdi som man kan benytte til videre beregninger og analyser. Egenskaper som det klassifiseres for kan ofte være: brennbarhet, røykproduksjon, brannmotstand og HHR -varmeavgivelseshastighet.

Som nevnt tidligere, så styres brannforløpet av flere faktorer og som et svar på usikkerheten rundt disse faktorene presenterer Eurokoden ulike Standardbranner. Disse inneholder grafiske kurver som viser forholdet mellom temperatur og tid og kalles for ISO-kurver. Mest kjent er ISO-834 kurven og finnes i NS-EN 1991-1-2. Den blir brukt for å kvantifisere den termiske påkjenningen til bygningsdelene som testes i fullskala ovner. Det er på grunnlag av disse standardiserte testene man undersøker om skillende og bærende konstruksjoner holder de forhåndsbestemte kravene, som for eksempel kan være REI 90.

ISO-kurven for standardbrann er gitt ved:

$$T = 345 \log (8t + 1) + 20$$

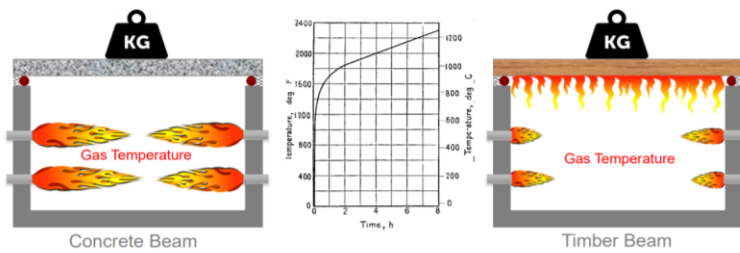


**Figur 3.7:** Temperaturkurve beskrevet i ISO-834

Svakheten ved denne modellen er at den ikke tar hensyn til utformingen av branncellen, arealet på åpninger, mengden av og bidraget fra brennbart materiale i rommet. Den tar heller ikke hensyn til avkjølningsfasen.

Dr Barbara Lane, 26/3 2015 ved Edinburgh University har stilt seg kritisk til testmetodene fordi de opprinnelig var designet for betongkonstruksjoner og ikke for testing av heltre. Figuren er hentet fra en presentasjon hun har gitt og viser at ved testing av en betongbjelke må man tilføre mer varme for å holde den samme temperaturen som ved en tilsvarende test av en trebjelke (15).

### 3/Conventional furnaces were not intended for timber ...



The test on concrete will use more fuel than tests on exposed timber to yield the same gas temperatures in a furnace:

- Do timber buildings have less fuel in them than concrete buildings?
- Is this a 'fair' comparison of candidate structural framing systems?

Figur 3.8: Testing ved bruk av ISO 834 (27)

## 3.7 Forkullingshastighet

Tre er et brennbart materiale og graden av forkulling påvirkes av en rekke faktorer.

Dette kan være:

- Type brennbart materiale.
  - Densitet. Høy densitet krever at det tilføres mer energi for at en pyrolyse skal kunne skje.
  - Fukt i materialet. Fukt krever energi for å fordampe.
- Størrelsen på åpninger styrer tilgangen på oksygen. Ved en ventilasjonsstyrt brann er det tilgangen på oksygen som begrenser brannens størrelse.
- Hvor stor del av rommets overflater som er brennbare og bidraget til den totale brannlasten fra disse.
- Brennbarheten til eksponerte overflater.
- Hvordan eksponerte overflater står i forhold til hverandre.
  - Romgeometrien har noe å si i forhold til tilbakestrålt mengde varme og dermed om det eventuelt oppstår selvslukking eller ikke.
- Temperatur og varmemestrøm. Høyere varmemestrøm bidrar til høyere grad av pyrolyse.

I den refererte artikkelen fra Fire Technology (32), konkluderes det med at det er varmekraften og oksygentilførselen som er de mest dominerende faktorene når man skal vurdere og beregne hastigheten av forkulling. Varmekraften er igjen sterkt avhengig av om KLT elementene delaminerer, og om det skjer en svikt i brannbeskyttelsen. Delaminering skjer når en eller flere lameller faller av. Dette eksponerer friskt tre og kan føre til at brannen vokser igjen. Delaminering kan også gi sekundære overtenninger og svært variable forkullingshastigheter. Man kan derfor ikke regne med at forkullingshastigheten er konstant dersom det er muligheter for at delaminering kan skje.

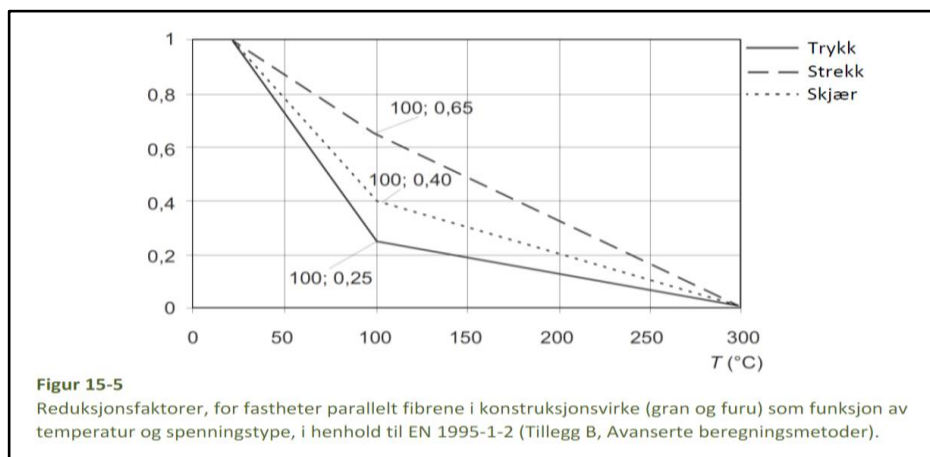
### 3.8 Temperaturens påvirkning av treets mekaniske egenskaper

På grunn av trevirkets dårlige varmeledningsevne og fordi pyrolyseprosessen krever tilførsel av energi tar det relativt lang tid før varme trenger inn i dypere deler av det ikke-forkullede tverrsnitt.

Ifølge en artikkel som er publisert i Engineering Structures (35) hvor en ser på reduksjonen i de mekaniske egenskapene til tre i en avkjølningsfase, blir det påpekt at man kan forvente økt temperatur lenge etter at brannen har selvslukket, og at det i enkelte tilfeller har blitt målt stigning i temperaturen i 240 min etter en 90 min standard brannpåkjenning. Det er et kjent fenomen for betong og stålkonstruksjoner at konstruksjonen kan varmes opp en tid etter at brannen har slukket, men dette er ekstra kritisk for trekonstruksjoner da det raskt skjer endringer i trevirkets trykk og skjærfasthet i temperaturer opp mot 100°C.

Den samme artikkelen påpeker at det skjer varige svekkelser i trevirkets mekaniske egenskaper allerede ved temperaturer rett over 60°C. De stiller seg derfor kritiske til eurokodens beregningsmetoder hvor man bare trekker fra 7 mm i tillegg til beregnet forkulling og regner med at det resterende resttverrsnittet har de samme mekaniske egenskapene som upåvirket tre.

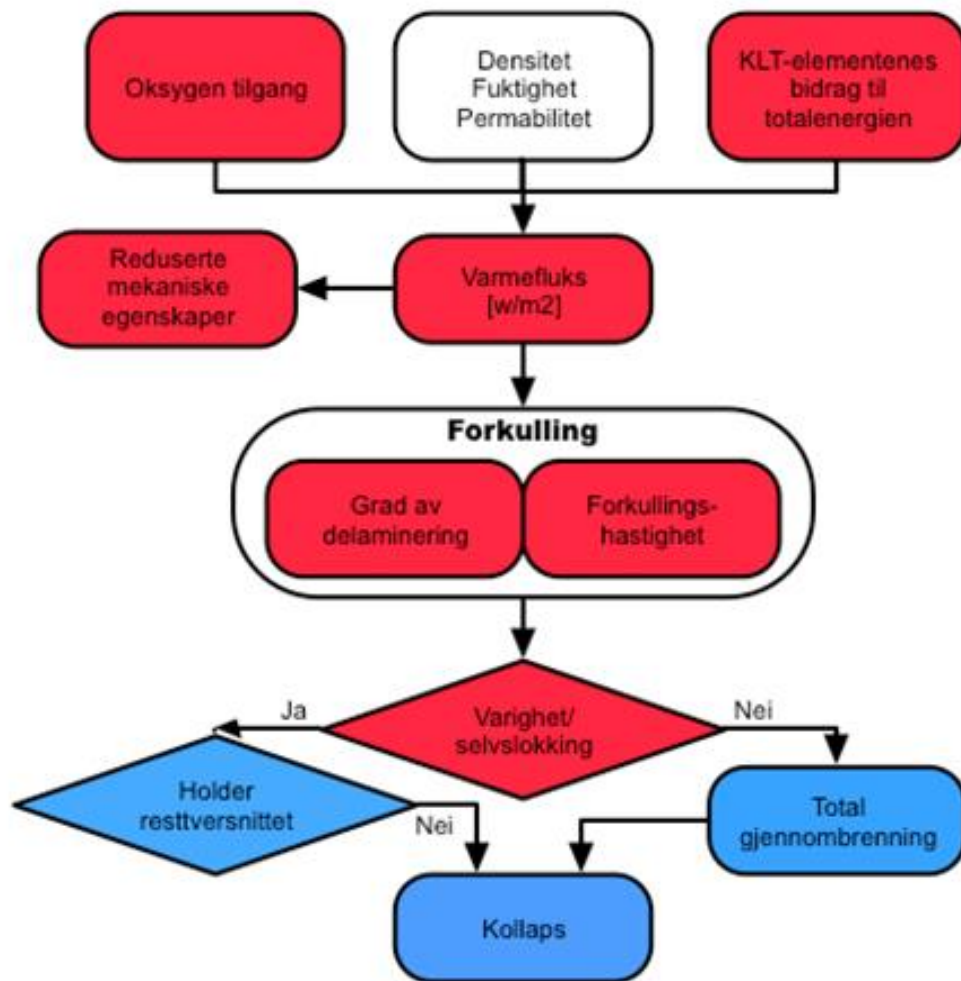
Fra NS- EN 1995-1-2 (16) ser man at trykk og skjærfastheten reduseres relativt raskt i temperaturintervallet opp mot 100°C. Den største endring skjer i trykkfastheten som får en reduksjonsfaktor på ca. 0,3 allerede ved 100°C.



**Figur 3.9:** Reduksjonsfaktorer (16)

### 3.9 Oppsummering av teori

Figuren under er et forsøk på å oppsummere hvilke forhold/variabler som er mest relevante for brann i trekonstruksjoner hvor det er benyttet KLT-elementer. Boksene som er røde, er de faktorene som vi har valgt å se nærmere på i litteraturstudien.



Figur 3.10: Forkulling



## 4. Litteraturstudie

### 4.1 Brannsikkerhet i høye trehus

I 2016 undersøkte Åsmund Deraas Lieblein (31) flere av usikkerhetene ved konstruksjon av høye trehus i masteroppgaven «Brannsikkerhet i høye trehus». Oppgaven hadde som hensikt å avdekke hvilke konsekvenser mangler ved preaksepterte løsninger kunne føre til ved konstruksjon av høye trehus og om forskriftene i dag leder til et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Forfatteren tok i bruk tidligere utgitte rapporter, artikler og forskrifter for å danne et grunnlag og avsluttet med å undersøke tre byggeprosjekter. Det ble totalt gjennomgått ni artikler som er gjengitt under.

#### **Brannenergi**

Oppgaven fant at det var få av de gjennomgåtte artiklene som undersøkte bidrag til brannenergi fra konstruksjonen. Det ble undersøkt tre artikler med eksponerte overflater, hvorav to omhandlet massivtre og et omhandlet bindingsverk av tre. I alle tre testene ble det observert tidlig overtenning og bidrag fra konstruksjonen til brannen. Dessverre ble brannen slukket før en eventuell avkjølningsfase og det ble gjort flere forenklinger ved beregningene, noe som bidrar til en viss usikkerhet.

Den siste artikkelen som omhandlet brannenergi viste at ved store eksponerte overflater av massivtre vil det være et betydelig bidrag til brannenergi fra konstruksjonene. Det konkluderes med at det er blitt gjort for få tester og undersøkelser over realistiske brannsituasjoner og at den mangelen på kunnskap i dag gjør det uklokt å ta i bruk preaksepterte løsninger ved konstruksjon av høyhus med bæresystem eller skillende konstruksjoner i tre.

## **Forkulling**

Undersøkelsen av byggeprosjektet Moholt 50|50 avdekket betydelige avvik fra standardene når man så på forkulling. Ved testing ble det påvist at forkullingshastighetene var betydelig høyere enn det standardene tilsier. Dette ble undersøkt videre.

I de resterende kildene ble det rapportert forkullingsrater mellom 0.65 mm/min og 1.0 mm/min, dette er et relativt stort sprik som man mener kommer av varierende lamelltykkelse og delaminering. Det konkluderes med at det er usikkert hvilke verdier som er trygge å ta i bruk ved dimensjonering og konstruksjon, og at det empiriske grunnlaget burde utvides.

## **Gipsbeskyttelse**

Det ble påvist under flere tester at et eller to lag gipsbeskyttelse vil gi god beskyttelse for treverket mot varme. Ved bruk av to lag ble det observert at treoverflaten ble fullstendig beskyttet i opp mot 169 minutter, mens et lag kunne beskytte i opp mot 60 minutter. Hvert lag med gips kunne forsinke forkulling med 20 minutter hvis den er utført på riktig måte og er av god kvalitet. Disse resultatene og beregningene for eventuell svikt, stemte godt overens med NS-EN 1995-1-2.

## **Fullstendig brannforløp**

Problemstillingen om hva et fullstendig brannforløp egentlig er og hvordan dette kan modelleres, ble aktualisert under de fleste testene. Flere av artiklene nevner at det burde bli gjort mer forskning på dette området. Masteroppgaven understreker at tester hvor brannen får utvikle seg fritt uten ytre påvirkning, burde bli utforsket nærmere.

## **Naturlig brann og standardbrann**

Det påpekes at det ble målt betydelig høyere temperaturer og varmefluks enn hva ISO-834 standarden tilsier i eksponerte konstruksjoner under naturlig brann. Kurven har blitt benyttet ved tidligere konstruksjoner hvor det er brukt andre materialer og det stilles spørsmål ved validiteten av denne standarden. En god del av de testene som har blitt undersøkt bruker ISO-834 kurven som grunnlag. Dette kan føre til upålitelige resultater.

## **4.2 Needs for total fire engineering of mass timber buildings**

I denne studien (36) undersøkte Universitetet i Edinburgh hvilke faktorer som innvirker dersom det oppstår brann i konstruksjoner av tre, enten KLT eller limtre.

Problemområdene som det ble fokusert på var forkulling og pyrolyse, branndynamikk, delaminering, lavtemperaturforbrenning, thermo-mekaniske egenskaper og strukturelle endringer. Det stilles også spørsmål ved den vitenskapelige informasjonen som er tilgjengelig og hvilke uforutsette hendelser som kan oppstå i en virkelig brannsituasjon.

### **Forkulling og pyrolyse**

Under forkulling og pyrolyse blir det diskutert hvordan forkullingshastigheten endrer seg. Basert på treverkets tetthet og vanninnhold kan denne verdien variere mellom 0.4 mm/min og 0.8 mm/min i standardene og fiberretningen kan føre til flere kritiske tilfeller grunnet oksygen og vanntransport. Det blir nevnt at forkullingsgraden varierer mye mellom testprøvene og at dette ikke har blitt undersøkt tilstrekkelig. Det kan imidlertid se ut som at større prøver vil ha høyere forkullingsgrad. De fleste av de internasjonale standardene gir gjennomsnittlige verdier for forkullingshastigheter rundt 0.65 mm/min, en verdi som i virkeligheten vil variere veldig i brannforløpet basert på tilgang på nytt treverk gjennom delaminering eller kollaps av isolasjon og brannforløpets intensitet.

## **Brannodynamikk**

Selv om det er blitt gjort flere tester på KLT-konstruksjoner er det fortsatt mye usikkerhet knyttet til hvordan et brannforløp kan utvikle seg, basert på hvor stor overflate som er eksponert for brannen. Det er krav til at en slik bygning skal være i stand til å selvslukke, noe som blir problematisk ifølge tester som er blitt gjort. Dersom branncellen ikke selvslukker vil det være mulig for brannen å bevege seg vertikalt langs fasaden gjennom åpninger slik som dører og vinduer. Dette fører igjen til at brannen beveger seg utenfor branncellen og kan antenne andre brannceller. De viktigste faktorene som virker inn på brannforløpet er balansen mellom oksygen og brensel og tilgang på brensel via ubeskyttet trevirke.

## **Delaminering**

Delaminering referer til en situasjon hvor lamellene i et KLT-element som blir holdt sammen av et limstoff, separeres. I en brann vil dette være veldig kritisk da det gir tilgang på nytt brennbart materiale og den beskyttelsen man forventer at en forkullet overflate vil ha forsvinner. Dette leder normalt til en sekundær overtenning og kan oppstå dersom lamelltykkelsen er for tynn, eller at limet mykner ved temperaturøkninger. Det blir også spekulert at væsketap, vridning, oppsprekking og lastpåvirkninger i treverket kan være relevante faktorer.

## **Lavtemperaturforbrenning**

Lavtemperaturforbrenning tilsier en ulmende smuldring i forkullet trevirke. Dette oppstår rundt 300-600°C og er en reaksjon mellom oksygen og den forkullede overflaten som skjer etter at brannen er utbrent. Faren med lavtemperaturforbrenning er et at det spontant kan oppstå en nyutviklet brann og det frigjøres giftige gasser slik som karbonmonoksid på grunn av ufullstendig forbrenning.

## **Thermo-mekaniske egenskaper**

Treverkets bærende evner blir allerede redusert ved 60°C da ligninets forbindelser blir varig svekket. Dette blir ytterligere forverret ved 100°C. Cellulosen og hemicellulosen blir svekket ved 200°C og 180°C. Ved 300°C vil treverket ha mistet sin bærende evne permanent. Strekkfastheten i trevirket vil gradvis reduseres opp mot 200°C, hvoretter den reduserende effekten vil akselerere og forverre seg. Trykkfastheten vil derimot øke opp mot 70-80% når vanninnholdet reduseres fra 12% og videre nedover. Skjærfastheten og elastisitetsmodulen vil virke økende ved uttørking, men vil raskt forsvinne ved temperaturer på eller over 200°C.

## **Strukturelle endringer**

Ved gjenbruk av trevirke som har stått i brann stilles det spørsmål ved hvilke endringer som oppstår og om det vil være trygt å anta at det holder på samme måte som før. Termiske deformasjoner i form av ekspansjon kan bli neglisjert da vanntapet som vil skje vil resultere i krymping av trevirket. Det er fortsatt usikkert hvor kritisk endringene i treverkets egenskaper vil bli observert og litteraturen som er til stede nå er motstridende.

## **Konklusjon**

Det konkluderes med at det burde bli gjort mer forskning innen brannodynamikk, lavtemperaturforbrenning, thermo-mekaniske egenskaper og strukturelle endringer. Forkulling og delaminering blir sett på som godt forstått, men med visse uforutsigbare faktorer som burde belyses.

## 4.3 Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions

I 2005 beskriver Andrea Frangi og Mario Fontana (5) flere tester som undersøkte brannsikkerheten i høye trekonstruksjoner, i dette tilfellet hotellbygninger. Hovedfokuset i testene var å verifisere at konstruksjoner i tre ikke har lavere brannsikring enn konstruksjoner i andre materialer under naturlige brann tilstander. Det ble utført seks tester som er listet i tabellen under.

Brann test	Sikkerhetstiltak	Brann type	Modul	Vindu	Overflate
1	Sprinkleranlegg	Før overtenning	H1	Lukket	Brennbar
2	Sprinkleranlegg	Før overtenning	H1	Åpent	Brennbar
3	Sprinkleranlegg	Før overtenning	H1	Åpent	Brennbar
4	Strukturelt	Etter overtenning	Et.1: G1 Et.2: H2	Åpent Lukket	Beskyttet Brennbar
5	Strukturelt	Etter overtenning	Et.1: H1 Et.2: H2	Åpent Lukket	Brennbar Brennbar
6	Strukturelt	Etter overtenning	Et.1: G2 Et.2: H2	Åpent Lukket	Beskyttet Brennbar

**Tabell 4.1:** Oversikt over oppsett brukt i testene (5)

### Testoppsett

Testene ble utført i moduler med dimensjonene 6.6 x 3.1 x 2.8 m<sup>3</sup>, hvor de lengste veggene ikke hadde åpninger, mens de korte hadde en dør og et vindu med dimensjonen 1,5x1,7 m<sup>2</sup>. Døren ble holdt lukket gjennom alle testene. Veggene i modul H1 og H2

hadde kledning med OSB-plater, og i modulene G1 og G2 var veggene dekket med et eller to lag gipsplater. Gulvet var i alle modulene laget av tre og dekket med et tynt lag linoleum. Alle modulene hadde installert brannalarmsystem med fire sensorer, og to sprinklersystem hvorav et var montert i taket og det andre på veggen.

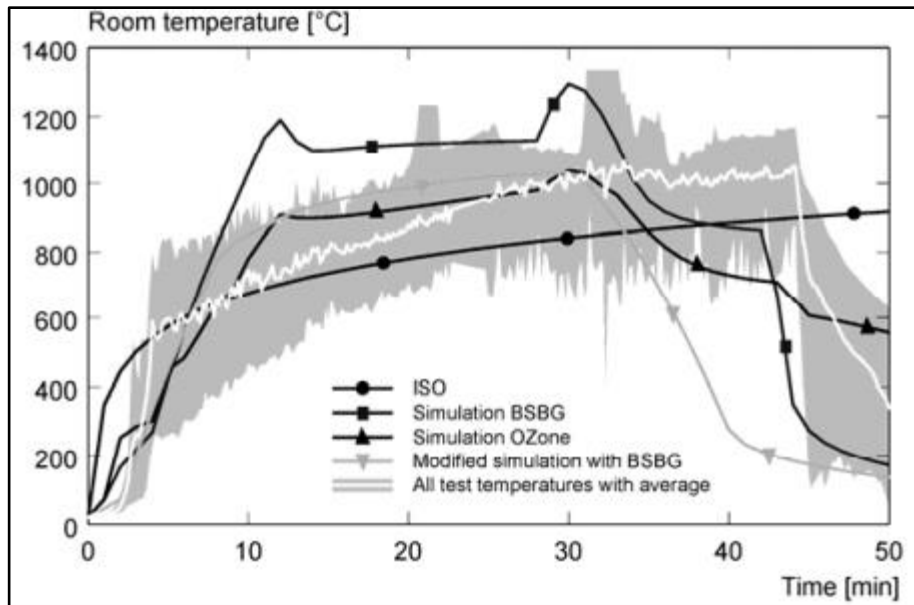
Aktiveringstemperaturen for sprinkleranlegget var satt mellom 57°C og 68°C i taket, og 68°C på veggen. Hver modul var utstyrt med 11 trepaller og en madrass for å simulere brannlast. Veggene dekket med gips hadde en spesifikk brannenergi mellom 363 MJ/m<sup>2</sup> og 366 MJ/m<sup>2</sup>, mens modulene med brennbare overflater hadde en spesifikk brannenergi på 855 MJ/m<sup>2</sup>.

Test 1-3 hadde som hensikt å teste ut tekniske tiltak slik som sprinkleranlegget og brannalarmsystem hvor en madrass ble antent for så å undersøke eventuell spredning av brann til andre overflater eller inventar før tekniske tiltak slo inn. Test 4-6 hadde som hensikt å undersøke muligheter og begrensninger av strukturelle branntiltak.

## Resultat

I de første tre testene var sprinkleranlegget og brannalarmene aktivert og madrassen var antent på undersiden. I løpet av 2 minutter ga brannalarmsystemet utslag, og i løpet av 3 minutter ga sprinkleranlegget utslag. Brannen ble derfor hindret i disse testene uten videre skade på konstruksjonen eller inventaret.

I de neste tre testene var det tatt i bruk to moduler hvor den ene var plassert over den andre. I disse testene var sprinkleranlegget deaktivert og overtenning oppstod etter fire minutter med høy temperaturstigning i modulen med brennbare overflater, og etter seks til syv minutter i modulen med gipsplater. Her var det tilstrekkelig tilgang på oksygen da vinduet var åpent i den laveste modulen. Temperaturmålingene oversteg ISO-kurven ved sammenligning med to forskjellige programmer som vist i figuren.



**Figur 4.1:** Temperaturmålinger sammenlignet med standards ISO-834 brann (5)

## Konklusjon

Testene bekrefter at et fungerende sprinkleranlegg vil lede til slokking av brannen, men dersom dette ikke slår ut vil brannen gå ut av kontroll innen få minutter. Den øverste modulen i de tre siste testene var i større grad intakt uten merkbar temperaturøkning, hvilket tilsier at brannen ble kontrollert innenfor branncellen.

## 4.4 Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels

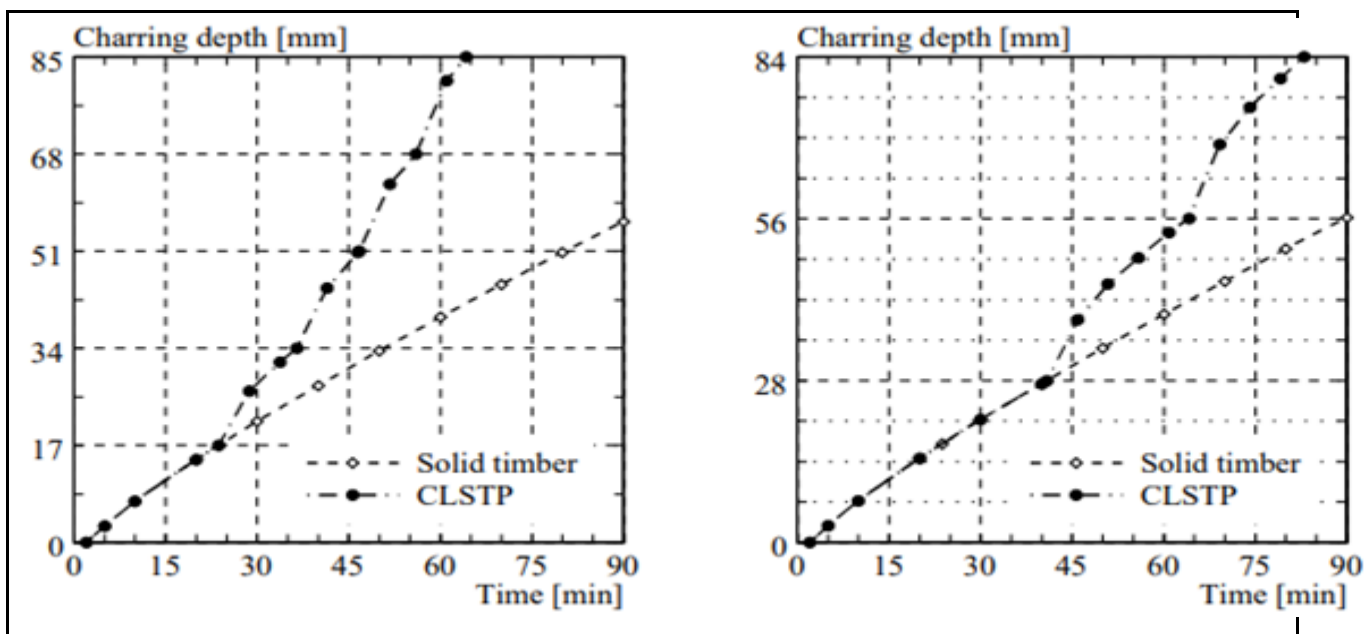
I 2008 tok Institute of Structural Engineering i Zurich (6) for seg å undersøke hvordan KLT-elementer står imot brann, kontra homogene dekker med fokus på forkullingsdybde og forkullingshastighet. Det ble utført to individuelle tester for å undersøke forkullingsegenskapene hos KLT-elementer, en hvor det ble utført en simulering via numeriske modeller, og en som tok for seg en branntest.



## Testoppsett

### Simulering

I simuleringen ble to sammensetninger av et KLT-element satt opp mot hverandre i en ISO-834 brann. Modellen var kontrollert opp mot branntester utført på ensidig brann av treverk av gran. Begge elementene var av tykkelse 84 mm hvor en var sammensatt av 3x28mm lameller, og den andre av 5x17mm lameller. Testen fulgte retningslinjene satt ned av EN 1995-1-2 og EN 1991-1-2 og antok at lamellene ville falle av når de ble fullstendig forkullet og temperaturen nådde 300°C i grensesjiktet for neste lamell. Utviklingen av forkullingsdybden blir gjengitt i grafene under hvor begge sammenlignes med et homogent trepanel. Det kommer frem av grafene at massivtreelementet med tykkere lameller har større motstand mot forkulling og derfor lavere kapasitetsreduksjon over tid.



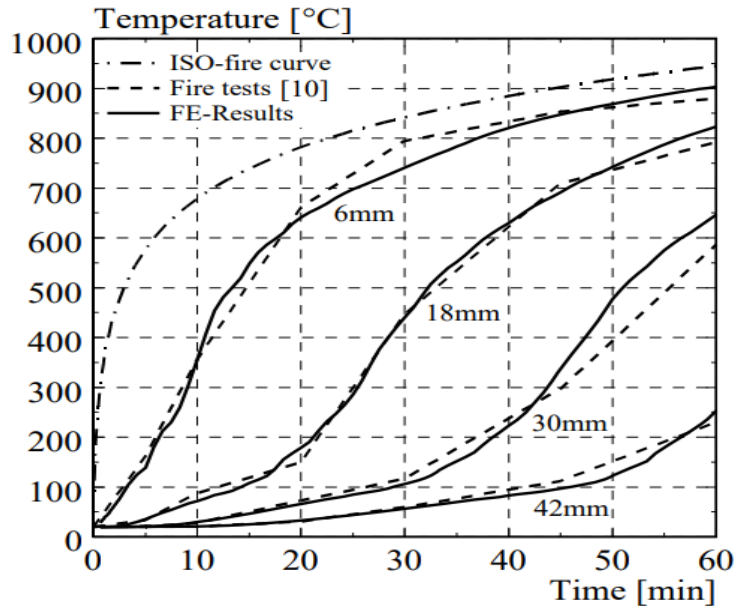
**Figur 4.2:** Sammenligning av simulering resultat for massivtre 5 x 17 mm (venstre) og 3 x 28 mm (høyre) med homogent trepanel (6)

## Branntest

Videre ble det utført to branntester i en ovn gitt ved dimensjonene 1,0x0,8m. Første test tok for seg sammenligning mellom et 54mm tykt homogent trepanel og et KLT-element med dimensjonene 3x18mm. Den andre testen sammenlignet istedenfor to 27 mm tykke homogene trepanel og to 3x9mm KLT-elementer. Begge testene viste samme resultat som i simulering at flere sjikt i konstruksjonen fører til økt fare for raskere og dypere forkulling. Resultatet er gjengitt i tabellen og temperaturen i de forskjellige sjiktene fra både simulering og branntest er vist i grafen under.

Test	Tid (min)	Panel	Tid per panel (min)	Forkullingsdybde (mm)	Forkullingshastighet (mm/min)
1	38	54 mm homogent trepanel	38	25.0	0.66
		54 mm 3-lags trepanel	38	32.0	0.84
2	28	2 x 27 mm homogent trepanel	Panel 1: 28 Panel 2: -	Panel 1: 17.3 Panel 2: -	Panel 1: 0.62 Panel 2: -
		2 x 27 mm 3-lags trepanel	Panel 1: 25.5 Panel 2: 2.5	Panel 1: 27.0 Panel 2: 3.5	Panel 1: 1.05 Panel 2: 1.40

**Tabell: 4.2:** Forkullingsresultater av branntest (6)



**Figur 4.3:** Temperaturkurve for de forskjellige tverrsnittene for både simulering og branntest ved ISO-brann på en side (6)

## Konklusjon

Det konkluderes med at tykkelsen på lamellene påvirker sterk om delaminering skjer som konsekvens av forkulling over lamellene. Tykkere lameller vil forsinke denne prosessen og kollaps av forkullingsoverflaten burde være tatt med i beregninger.

## 4.5 REAL-SCALE FIRE TESTS ON TIMBER CONSTRUCTIONS

Artikkelen som ble utgitt i forbindelse med konferansen WCTE 2016 (7), beskriver 10 tester som tar for seg hvordan KLT-elementer oppfører seg og motstår en naturlig brannsituasjon sammenlignet med bindingsverk av stål og tre. Det ble satt fokus på romtemperatur, varmeavgivelsesrate, forkulling, bidrag til brannvekst fra konstruksjonen og forskjellige isolasjonsløsninger.

## Testoppsett

Testen ble utført ved å konstruere moduler gitt ved dimensjonene  $3.5 \times 4.5 \times 2.5\text{m}^3$ , med en døråpning gitt ved  $1.1 \times 2.0\text{m}^2$ . Som brannisolasjon ble det tatt i bruk et eller to lag 12

mm tykke gipsplater. Det ble først utført to tester med propan som referanse for resten av prosjektet med spesifikk brannenergi på 753 MJ/m<sup>3</sup>. Deretter ble de resterende testene utført med inventar bestående av en stor seng, to nattbord, en kommode og et skap fullt med klær og bøker i modulene med spesifikk brannenergi 550 MJ/m<sup>2</sup> inkludert gulv av lønn.

Test	Overflate	Brensel
1	Fult eksponert	Propan
2	Beskyttet	Propan
3	Fult eksponert	Inventar
4	Beskyttet	Inventar
5	To normale vegger eksponert	Inventar
6	To parallelle vegger eksponert	Inventar
7	En sidevegg eksponert	Inventar
8	Beskyttet bindingsverk av tre med to lag 12.7 mm gips	Inventar
9	Beskyttet bindingsverk av tre med et lag 12.7 mm gips	Inventar
10	Beskyttet bindingsverk av tre med et lag 12.7 mm gips	Inventar

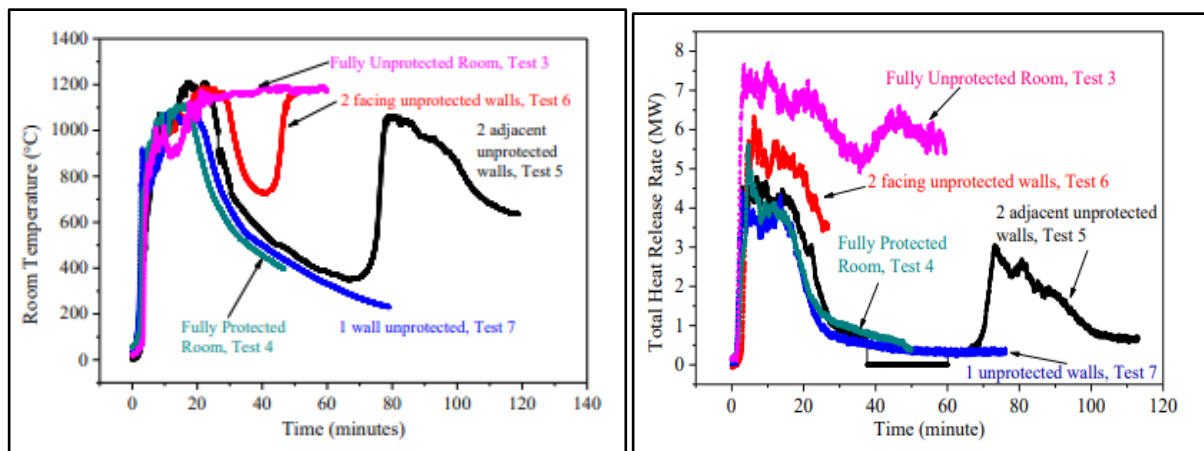
**Tabell 4.4:** Oversikt over antall eksponerte overflater og type brensel (7)

## Resultater

I alle testene økte temperaturen raskt opp til 1000°C innen 10 minutter og overtenning oppstod. Temperaturen nådde sitt maksimum innen 25 minutter før den sank hurtig. Etter 30 minutter var temperaturen betydelig lavere enn ISO-834 kurven på grunn av mangel på brennbart materiale i de fleste av testene. Alle testene viser at det er store forskjeller mellom naturlige og standardiserte brannforløp hvor temperaturen oversteg 1000°C, noe

som vil ta langt over en time ifølge ISO-834 kurven. ISO-834 kurven viser også en konstant temperaturvekst som ikke blir gjengitt i testene. Varmeavgivelsesraten (HRR) ble målt både på innsiden og utsiden av modulen som en samlet verdi. Det ble påvist at testene uten isolasjon hadde gjennomsnittlig dobbelt så høy HRR som testene med fullstendig isolasjon. Resten av testene fikk avtagende HRR med avtagende prosentvis eksponering av treverket. Testen med kun en eksponert overflate hadde lignende HRR med testen med fullstendig isolasjon. Delaminering ble observert dersom minst to overflater var eksponert og en sekundær overtenning oppstod.

Det ble observert at over 60% av energiutstrålingen kom fra selve konstruksjonen i testene uten isolasjon. Hvis to av de eksponerte veggene var orientert parallelt, var situasjonen mer kritisk enn dersom de ble stående normalt på hverandre. Testen med bare en eksponert overflate viste seg å håndtere brannen på lik måte som testen med fullstendig isolasjon. Dette ble gitt ved tilnærmet lik energiutstråling etter 26 minutter og temperaturutvikling. Gipsplatene viste seg å kunne forsinke forkullingsprosessen med minst 20 minutter per plate hvorefter krymping førte til svikt i platene på grunn av tap av vann. Forkullingsratene viste seg å være på linje med EC5 i kontrolltesten og hadde en gjennomsnittsverdi på 0.63mm/min sammenlignet med den standardiserte verdien 0.65mm/min. Det viste seg allikevel at forkullingen var større i testene med eksponerte overflater, mens det ikke oppstod forkulling i testen med fullstendig isolasjon via to lag med 12mm gipsplater. I Test 3 hvor treoverflatene ikke var brannbeskyttet ble det målt en total forkullingsdybde på 24mm, og etter 60 minutter var forkullingshastigheten målt til 1 mm/min.



**Figur 4.4:** Temperatur og varmeavgivelsesrate (HRR) over tid ved bruk av KLT-elementer (7)

## Konklusjon

Prosjektet konkluderer med at eksponerte overflater av KLT-elementer i varierende grad vil føre til videre brannutvikling basert på antall eksponerte overflater, tilførsel av luft og delaminering som funksjon av forkulling. De isolerte modulene oppnådde selvslukking, men med økende eksponert areal bidro konstruksjonen til videre brannutvikling.

## 4.6 Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics

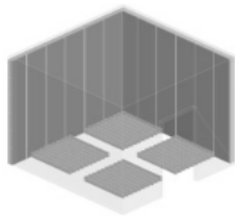
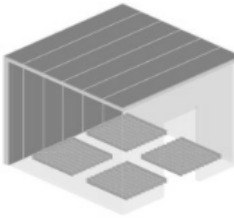
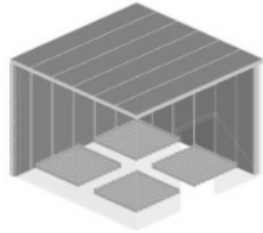
I artikkelen som er publisert i Fire Safety Journal (8) blir det beskrevet forsøk som undersøkte i hvilken grad eksponerte overflater av tre medvirker til videre brannutvikling og varmeavgivelse i fleretasjes trehus. Det ble utført fem tester med varierende antall eksponerte overflater i moduler gitt ved de interne dimensjonene  $2.72 \times 2.72 \times 2.77 \text{ m}^3$  med en dør gitt ved  $1.84 \times 0.76 \text{ m}^2$ .

## Testoppsett

Testene ble delt inn, basert på antall eksponerte overflater angitt i tabellen under, hvor det ble tatt i bruk massivtre med fem uniforme lameller gitt ved 20 mm tykkelse av hovedsakelig gran. For de beskyttede overflatene ble det tatt i bruk to lag av 12.5 mm tykke gipsplater og i alle testene bortsett fra alpha-1 ble det tatt i bruk ytterligere et ekstra lag gipsplate med 25 mm steinull mellom treverket og de eksisterende gipsplatene.

Gulvet var isolert med 50 mm steinull.

Det ble tatt i bruk fem krybber av tre som brannlast med en total brannenergi på 980 MJ og en spesifikk brannenergi på 132 MJ/m<sup>2</sup>

	Alpha	Beta	Gamma
			
<b>Exposed surfaces</b>	Back wall and side wall	Back wall and ceiling	Back wall, ceiling, and side wall
<b>Number of experiments</b>	2	2	1
<b>Exposed timber area, m<sup>2</sup></b>	15	14	22
<b>Area averaged thermal inertia, Jm<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> s<sup>-1/2</sup></b>	314	315	319

Figur 4.5: Testoppsett og andel eksponert trevirke (8)

## Resultat

### Alpha-1

I den første testen, alpha-1, ble det observert brannspredning til den ene overflaten etter 4.25 minutter og overtenning 20 sekunder senere. Varmeavgivelsen ble målt til 5300 kW etter 6.27 minutter og stabiliserte seg på 2200 kW etter 31.7 minutter før den igjen økte til 4000 kW på grunn av ventilasjonsbidraget. Brannen ble slukket manuelt etter 61.3

minutter, da hadde hele treoverflaten blitt eksponert for brannen og 99 kg av gipsoverflaten hadde falt av fra 22.6 minutter inn i testen.

### ***Alpha-2***

I de resterende testene var de beskyttede overflatene tilstrekkelig isolert og videre brannutvikling på disse overflatene hendte ikke. Temperaturen nådde maks 70°C i treverket bak isolasjonen. Overtenning skjedde som i alpha-1 raskt etter 5.1 minutter og varmeavgivelsen ble målt til 4700 kW etter 5.5 minutter. Varmeavgivelsen utviklet seg på samme måte som i alpha-1 fra 2000 kW etter 32.4 til 3500 kW etter 60 minutter ved manuell slokking. Her falt 105 kg av gipsmassen av fra 25 minutter inn i testen.

### ***Beta***

I beta-testene ble det observert overttenning ved henholdsvis 8.6 og 4.2 minutter for beta-1 og beta-2. Varmeavgivelsen ble først målt til 6200 kW for test 1 ved 8.8 minutter og 5200 kW for test 2 ved 7.8 minutter. For beta-1 sank varmeavgivelsen stadig og brannen selvslukket med få isolerte områder av forkulling og gipstap. Beta-2 var mer kritisk med varierende varmeavgivelse mellom 1500 kW og 3900 kW og 8 kg tap av gipsmasse fra 23 minutter inn i testen. Brannen ble manuelt slukket etter 62.5 minutter ved varmeavgivelse målt til 2200 kW.

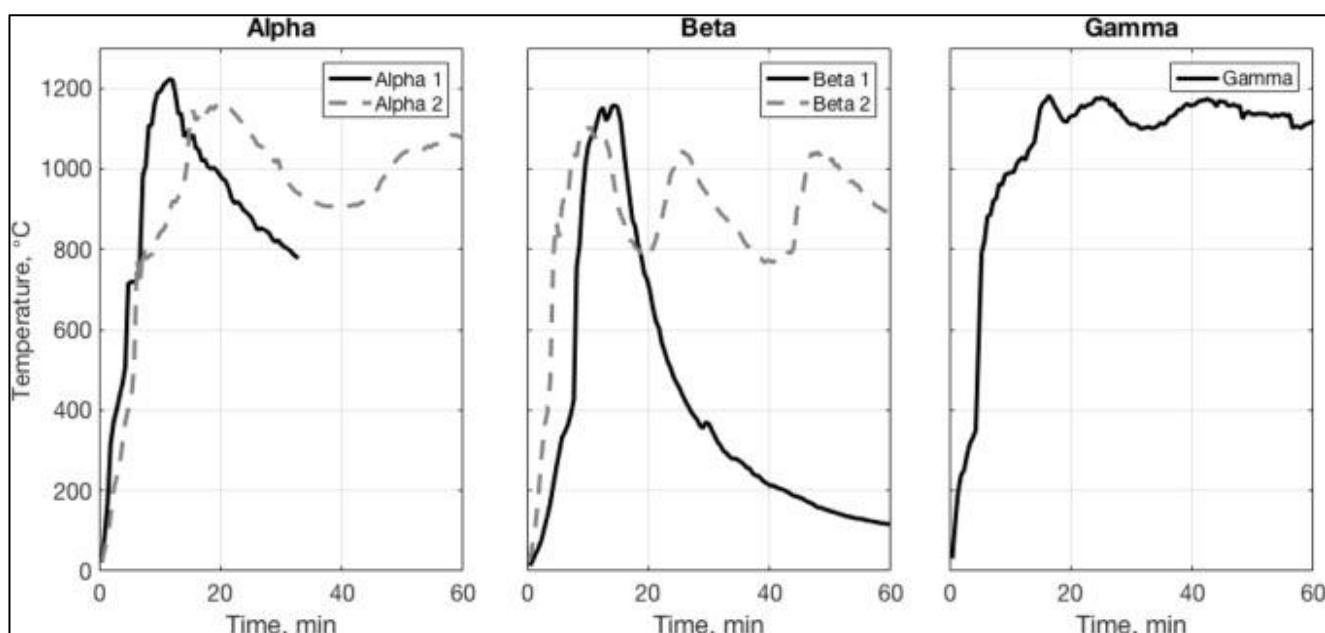
### ***Gamma***

I den siste testen skjedde overttenning etter 5.4 minutter og varmeavgivelsen nådde 6700 kW etter 5.6 minutter. Varmeavgivelsen sank så til 3700 kW der den stabiliserte seg mellom 3100 kW og 4000 kW til testen avsluttet etter 78.0 minutter ved manuell slokking. Ved slukking var modulen nedbrent og gipstap kunne ikke bli målt.



Experiment	Time to flashover [min]	Total HRR at flashover [kW]	Time to peak HRR [min]	Peak total HRR [kW]	Maximum char depth in exposed timber after 60 min [mm]
Alpha-1	4.56	1709	6.27	5267	53
Alpha-2	5.13	1448	5.50	4677	53
Beta-1	8.55	1551	8.75	6213	11
Beta-2	4.23	1463	7.78	5248	44
Gamma-1	5.35	1171	5.55	6679	58

Tabell 4.5: Forkulling og HRR resultater (8)



Figur 4.6: Temperaturutvikling i de forskjellige testene (8)

## Konklusjon

Det konkluderes med at selvslukking vil kunne skje ved to eksponerte overflater så lenge delaminering og tap av forkullingsoverflaten ikke oppstår. Dersom flere overflater er eksponerte vil selvslukking ikke kunne inntreffe og brannen vil gå ut av kontroll.

## 4.7 Self-extinguishment of cross-laminated timber

I 2016 (9) i forbindelse med WCTE 2016 ble det utført to sett med tester som hadde som hensikt å undersøke mulig selvsløkking av KLT-elementer ved forskjellige varmekfluksverdier. Det ble også undersøkt til hvilken grad delaminering vil oppstå og hvordan forkullingen i en konstruert modul utarter seg.

### **Testoppsett**

#### **Sett 1**

Tolv småskålatester via konkalorimeter på prøvestykker av KLT-elementer gitt ved dimensjonene  $100 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$  ble utført for å undersøke eventuell selvsløkking. Prøvestykket ble eksponert for en varmekfluks på  $75 \text{ kW/m}^2$  og ble antent. Etter prøvestykket hadde forkullingsdybde på 20mm ble testen avsluttet og omstartet med varmekfluks varierende mellom 0 og  $10 \text{ kW/m}^2$ . Testen ble ansett som fullført etter prøvestykket slukket eller brant gjennom. De tolv ulike oppsettene er oppsummert i tabellen under.

Sett 1		
Test	Sekundær varmekraft (kW/m <sup>2</sup> )	Ytterligere lufttilførsel (m/s)
1.1, 1.2	0	-
1.3, 1.4	5	-
1.5, 1.6	10	-
1.7, 1.8	8	-
1.9, 1.10	6	-
1.11	6	0,5
1.12	6	1,0

**Tabell 4.6:** Testoppsett for småskala tester med konkalorimeter (9)

## Sett 2

I det sekundære settet ble det utført fem tester på små rom gitt ved dimensjonene 500x500x500mm<sup>3</sup>, med en åpning gitt ved 180x500mm<sup>2</sup> (bredde x høyde). Det ble tatt i bruk to forskjellige elementtykkelser gitt ved 100 mm (20/20/20/20/20 mm) og 120 mm (40/20/20/20/20/40 mm). Hensikten med testene var å undersøke selvslokking, delaminering og forkullingsegenskaper under brann med konstant 41 kW varmeavgivelsesrate via propanbrennere. Denne brannen ble manuelt slukket etter KLT-elementene tok fyr for å simulere at brannlasten ble oppbrukt etter dette. De fem ulike oppsettene er oppsummert i tabellen under.

Sett 2		
Test	Eksponert KLT-element	Lamell tykkelse (mot brann) (mm)
2.1	Bakvegg	20
2.2	Bakvegg og sidevegger	20
2.3	Sidevegger	20
2.4	Sidevegger	20
2.5	Sidevegger	40

**Tabell 4.7:** Testoppsett for branntester (9)

## Resultat

### Sett 1

I det første settet ble prøvestykkene antent innen 10 sekunder og temperaturen nådde 700°C, hvor den gradvis økte på sitt høyeste til 880°C. Varmeavgivelse raten nådde 237 kW/m<sup>2</sup> med massetap på 0,18 g/s etter 20 sekunder, før den stabiliserte seg etter 5 minutter ved 73k W/m<sup>2</sup> varmeavgivelse rate og 0,05 g/s massetap. Det ble observert delaminering når temperaturen i sjiktet nådde 300°C men dette hadde ingen innvirkning videre i testene på grunn av prøvenes orientering. Etter 20 minutter og 40 sekunder ble prøvene flyttet og brannen slukket innen 1 minutt. Prøvestykkene fikk til slutt forskjellige resultater basert på den sekundære varmekraften gitt i tabellen under.

Test	Resultat
1.1, 1.2	Selvslukket
1.3, 1.4	Selvslukket
1.5, 1.6	Brent gjennom
1.7, 1.8	Brent gjennom
1.9, 1.10	Selvslukket
1.11	Selvslukket
1.12	Brent gjennom

**Tabell 4.8:** Resultat fra småskala tester (9)

Ved varmekraft 6 kW/m<sup>2</sup> ble det observert videre forkulling 10 mm lengre ned i treverket med forkullingshastighet 0.15 mm/min. Prøvene med varmekraft 8-10 kW/m<sup>2</sup> hadde igjen forkulling 10 mm lengre ned og ved tilgang på ventilasjonshastighet på 1 m/s var forkullingshastigheten på 0.48 mm/min og 0.56 mm/min for henholdsvis 30 og 40 mm dybde.

## Sett 2

I det andre settet tok elementene fyr innen 2 minutter og varmeavgivelsesraten økte fra 164 kW/m<sup>2</sup> som bidrag fra propanbrennerne til 354 kW/m<sup>2</sup>. Temperaturen økte raskt til 900°C før den gradvis økte til 1000-1170°C på sitt høyeste. Forkullingsoverflaten startet å kollapse før forkullingsdybden nådde limet i test 2.2, 2.3 og 2.4. Resultatene er oppsummert i tabellen under.

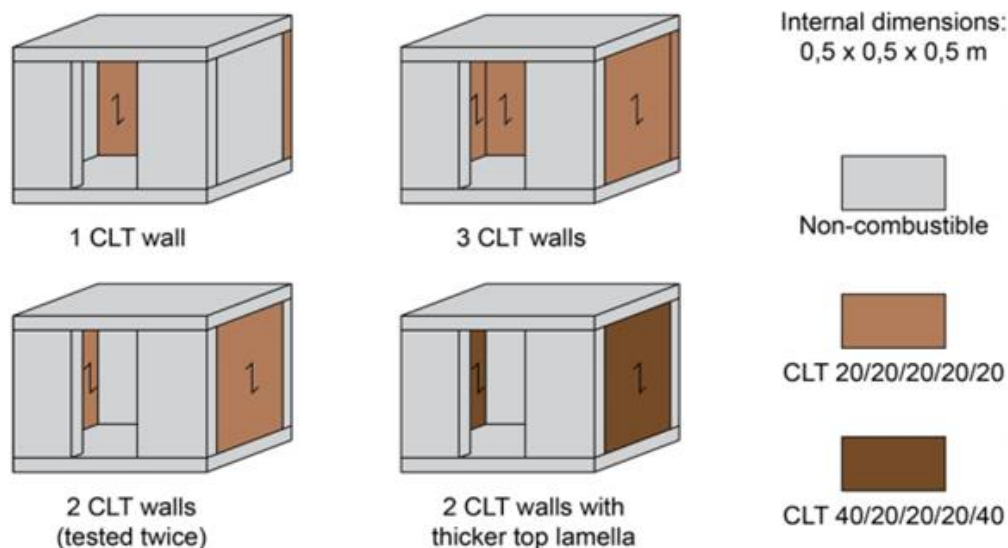
Test	Resultat	Avgitt brannenergi for KLT-elementer (MJ)
2.1	Selvslukket	57
2.2	Brent gjennom	309
2.3	Brent gjennom	185
2.4	Selvslukket	121
2.5	Selvslukket	71

**Tabell 4.9:** Resultat fra branntester (9)

Under test 2.1 og 2.4 skjedde det seg ikke noen videre brannutvikling til tross for at forkullingsoverflaten kollapset grunnet delaminering. Det blir gjengitt at den lave temperaturen og varmefluksen bidro til dette og kun mindre flammer og lavtemperaturforbrenning ble observert ved delaminering.

Under test 2.2 og 2.3 skjedde delaminering ved høye temperaturer opp mot 900°C og friskt treverk ble antent som konsekvens. I test 2.2 utviklet det seg en kontinuerlig brann og i test 2.3 oppstod det en sekundær overtenning.

Under test 2.5 ble det ikke observert noe videre brannutvikling eller kollaps av forkullingsoverflater.



**Figur 4.7:** Geometri for modulene i branntestene (9)

## Konklusjon

Artikkelen konkluderer med at selvslokking kan oppstå ved varmekraft under  $6 \text{ kW/m}^2$  og at en ventilasjon på over  $0,5 \text{ m/s}$  kan bidra til videre brannutvikling. Et lavere antall eksponerte overflater og større lamelltykkelse nærmest brannen vil kunne bidra til selvslokking.

## 4.8 Branntest av massivtre

I 2014 ble det gjennomført to storskala branntester av RISE Fire Research for studentskipnaden i Trondheim (10). Testene hadde som hensikt å undersøke hvordan et fullstendig brannforløp utvikler seg i massivtrebygg i forbindelse med konstruksjon av nye hybelleiligheter. Test 1 ville kartlegge aktiveringstiden til tekniske tiltak i form av sprinkleranlegg og brannalarmsystem og hvordan sprinkleranlegget ville begrense en raskt voksende brann. Den neste testen hadde som mål å observere strukturelle endringer via forkullingshastighet, spredning av brann til andre brannceller, temperaturforløpet og varigheten av brannen.

## Testoppsett

Testen tok for seg en hybelleilighet gitt ved dimensjonene  $5.75 \times 2.3 \times 2.75 \text{ m}^3$  og tilliggende korridor. Hybelleiligheten inkluderte også en åpen dør ut mot korridoren gitt ved dimensjonene  $0.9 \times 2.0 \text{ m}^2$  og et vindu med dimensjoner  $1.2 \times 1.6 \text{ m}^2$  på motsatt side. Overflatene var konstruert av 100 mm tykke KLT-elementer med 20 mm lameller. En av veggene som grenset mot naborom var isolert med 13 mm standardgips og 15 mm branngips, og resten var isolert med kun 13 mm standardgips. Taket og gulvet var beskyttet med 30 mm trinnlydplate og 40 mm påstøp med linoleum dekke over gulvet. Brannlasten ble satt til 8708 MJ basert på Rambøll Norge AS sine beregninger om en brannlast på 8735 MJ. Under test 1 ble sprinkleranlegget bestående av 6 sprinklerhoder delt med 4 hoder i korridoren og 2 i hybelen installert og tatt i bruk.

## Resultat

Under test 1 aktiverte røykvarslerne seg etter 1 minutt og sprinklerhodet seg etter ca. 2 minutter da lufttemperaturen nådde  $130^\circ\text{C}$ . Brannen hadde ingen videre utvikling og de andre sprinklerhodene aktiverte seg ikke da lufttemperaturen sank raskt. Etter 9 minutter ble sprinkleren stengt av og de resterende flammene som ikke var innen rekkevidde for sprinkleranlegget ble slukket.

I den neste testen var sprinkleranlegget deaktivert inne i hybelen, men fortsatt aktivert i korridoren. Brann gikk raskt ut av kontroll og spredte seg til korridoren innen 8 minutter og 30 sekunder. Deler av konstruksjonen begynte å falle sammen og manuell demping av brannen startet ved å øke trykket på sprinkleranlegg og via vanntilførsel etter 12 minutter. Brannen fortsatte og det ble påført vann regelmessig i jevnlige intervaller. Til tross for dette steg temperaturen inne i hybelen og brannen ble slukket manuelt etter 1 time og 45 minutter. Det ble observert full gjennombrenning av de ubeskyttede overflatene og forkullingsdybden på veggen mot korridoren nåde 6 cm hvorav gjennomsnittet var 2 cm. Dette kan ha vært påvirket av sprinkleranlegget i korridoren som kan ha kjølt ned veggen og kan gi et mer konservativt resultat. I løpet av testen ble det



observert at store deler av de forkullede veggene begynte å kollapse og at nytt trevirke ble eksponert for ilden. Det var ikke mulig å si noe om hvor lenge brannen varte da den ble manuelt slokkes da den var fullt utviklet brann og takket kollapse. Gjennomsnittlig forkullingshastighet var på 1.1 mm/min og varierte mellom 0.7 mm/min til 1.4 mm/min.

## Test 1

Hendelse	Tidspunkt (min)	Temperatur i hybel (°C)
Røykvarsler i hybelen aktiveres	1:06	61
Røykvarsler i korridoren aktiveres	1:10	59
Sprinkler nærmest brannen i hybel løser ut	1:59	131
Sprinkler stengt av	9:00	22
Resterende brann slokkes	9:30	51

**Tabell 4.10:** Hendelsesforløp og temperaturmålinger under test 1 (10)

## Test 2

Hendelse	Tidspunkt (min)	Temperatur i hybel (°C)
Røykvarsler i hybelen og korridoren aktiveres	1:10 - 1:24	59 - 71
Sprinkleranlegg i korridoren slår ut	2:50 - 4:00	243 - 638
Overtenning i hybel	4:10	822
3 lag med glass knuser i vinduet og flammene står ut av modulen	4:30 - 4:55 - 5:45	803 - 712 - 770
Sprinkleranlegg over himlingen løser ut og himlingen faller ned	6:05 - 8:30	741 - 891
Trykket på sprinkleranlegget øker og manuell innsats for å hindre spredning blir satt i gang	12:00 - 12:30	947 - 960
Første gipsen faller av	25:00	1000
Ubeskyttet treverk brenner	47:00	1025
Gjennombrenning blir observert på to overflater	1:00:00 - 1:10:00	975 - 1025
Ubeskyttet vegg er fullstendig gjennombrent	1:25:00	980
Brannen slokkes	1:36:00 - 1:45:00	-

**Tabell 4.11:** Hendelsesforløp og temperaturmålinger under test 2 (10)

## **Konklusjon**

Under test 1 ble det påvist at ved funksjonerende sprinkleranlegg vil en raskt voksende brann kunne bli kontrollert og stoppet. De mindre flammene som var tilstede på slutten ble antatt å kunne slukkes med skumapparat eller husbrannslange. Test 2 derimot viste at dersom sprinkleranlegget ikke aktiveres vil brannen kunne spre seg og overtenning vil oppstå. Det ble registrert en temperatur og vekst som var mer kritisk enn ISO-834 kurven ville gitt, og det ble konkludert at utviklingen av brannen ville fortsette til utbrenning og kollaps.

## Oppsummering

Tittel	Problemstilling	Metode	Variabler	Resultat	Konklusjon
Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions	Vil konstruksjoner i tre kunne motstå et fullstendig brannforløp	Et sett med tre tester i modul med sprinkleranlegg og et sett med tre tester i modul med varierende brannisolasjon	Temperatur, selvslukking, brannenergi	Selvslukking vil kun oppstå ved bruk av sprinkleranlegg	Ved svikt i sprinkleranlegg vil en brann raskt gå ut av kontroll i et bygg av tre
Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels	Hvilke forskjeller i forkulling vil oppstå mellom KLT-elementer og homogene dekker	En simulasjon for å undersøke forkulling og branntest i ovn for å undersøke forskjeller i lamelltykkelse	Forkulling	Ved bruk av KLT-elementer vil forkullingsdybden øke sammenlignet med homogene dekker	KLT-elementer vil få en dypere forkulling som resultat av delaminering og tap av forkullet overflate
REAL-SCALE FIRE TESTS ON TIMBER CONSTRUCTIONS	Hvordan vil bæresystem av KLT-elementer sammenlignes med bindingsverk av stål og treverk	10 tester i modul med varierende grad av isolasjons og bæresystem	Romtemperatur, HRR, forkulling, branndynamikk, isolasjon	Temperaturen økte raskt over hva ISO-834 kurven vil tilsi er mulig og HRR fordoblet seg i den fullt eksponerte modulen	Ved bruk av isolasjon over minst 3 overflater vil brannen bli tilbakeholdt. Dersom 2 eller flere overflater er eksponert vil brannen raskt gå ut av kontroll

Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics	Hvor stort bidrag vil en konstruksjons av tre ha i en fullt utviklet brann	5 tester i modul med varierende antall eksponerte overflater	Branndynami kk, HRR, forkulling	Det ble observert betydelige mengder tap av gips og modulen ble manuelt slukket etter 60 minutter	Selv ved bruk av gipsplater er det fare for fullstendig gjennombrenning av konstruksjonen
Self-extinguishment of cross-laminated timber	Til hvilken grad vil trevirke kunne selvslukke og delaminering og forkullings i modulbrann	Et sett med 12 tester i brannovn og et sett med 5 tester i modul med varierende antall eksponerte overflater og lameltykkelse	Branndynami kk, forkulling, selvslukking, varmfluks, delaminering	Ved varmefluks under 5 kW/m <sup>2</sup> oppstod selvslukking i sett 1. Under test 2.2, 2.3 og 2.4 kollapset hele konstruksjonen	Selvslukking kan oppstå ved lav nok varmefluks, men modulene klarte ikke å stå imot brannen
Branntest av massivtre	Hvordan vil tekniske og strukturelle tiltak påvirke en brannutvikling	En test med sprinkleranlegg aktivert og en test uten sprinkleranlegg	Temperatur, spredning, forkulling, varighet,	Ved bruk av sprinkleranlegg oppstod ingen videre brann og flammene slukket. Når dette var deaktivert ble modulen gjennombrent	Sprinkleranlegg er nødvendig for å senke temperaturen og slukke flammene

**Tabell 4.12:** Oppsummering av testene utført i litteraturstudiet

## 5. Diskusjon

Hensikten med litteraturstudiet var å vurdere hvor egnet tidstemperaturkurven for en standardbrann (ISO-834) vil være til å dokumentere og branndimensjonere eksponerte bæresystem av KLT. Dette har vi gjort ved å sammenligne de mest relevante faktorene i en standardbrann med reelle brannforløp i KLT. Funnene som er gjort i litteraturstudiet diskuteres i dette kapittelet.

### 5.1 Forkulling:

Branndimensjonering av bærende konstruksjoner gjøres i henhold til NS-EN 1995-1-2. Denne standarden angir en forkullingsrate på 0,65 mm/min i limtre og KLT. Denne forkullingsraten stemmer godt overens med flere forsøk som er gjort i en ISO brann (37, 38).

I vår studie viser det seg at forkullingshastigheten er langt høyere og varierer sterk i rom med et naturlig brannforløp hvor KLT bidro med brannenergi (6-8, 10, 31).

Det er også funnet at forkullingshastigheten er sterkt avhengig av om det skjer en delaminering og av hvor mange eksponerte sider det er i brannrommet og posisjonen til disse i forhold til hverandre. Vi har også funnet ut at tykkere lameller i det ytterste laget forsinket en eventuell delaminering (6) og dermed forkullingshastigheten.

Disse funnene viser at det er store forskjeller i målte forkullingshastigheter som blir gjort ved bruk av ISO 834 og naturlige brannforløp i KLT og at dette kommer av større varmefluks og delaminering.

### 5.2 Brannenergi

I en ovn hvor man tester etter ISO 834 følger temperaturen en forhåndsbestemt kurve. Alt etter hva som testes og hvor mye denne konstruksjonen bidrar til temperaturutviklingen, så tilføres det varme i form av brennbare gasser slik at den forhåndsbestemte

temperaturutviklingen følges. Hensikten med dette er at alle produkter skal utsettes for samme temperatur over lik tid, slik at man på beste måte kan sammenligne produktene i ettertid. Dette er en velkjent metode å teste på, hvor brannforløpet har vist seg å være relativt likt med virkelige branner hvor man har en vekstfase, fullt utviklet brann og en avkjølningsfase. Avkjølningsfasen starter når alt brennbart inventar er brent opp og temperaturen har sunket til et visst nivå i forhold til maksimumstemperaturen.

I vår studie viser flere av testene (7-10, 31) at selve konstruksjonen i stor grad bidro med brannenergi som førte til en høyere forkullingsrate, og flere av testene avdekket at det var høy intensitet og at brannen utviklet seg selv etter at alt inventar var brent opp (9, 10). Dette er bekymringsfullt og viser at det er stor forskjell på en naturlig rombrann og en ISO brann hvor tilført energi blir styrt av temperaturutviklingen og ikke av mengden energi som virkelig finnes i rommet. Brannenergien som massivtrekonstruksjonene bidro med førte til høyere temperaturer, raskere temperaturutvikling og et lengre brannforløp enn det forløpet som en standardbrann presenterer.

### 5.3 Temperatur

I alle gjennomgåtte artikler om naturlige branner i KLT, hvor temperatur ble målt, ble det registrert høyere maksimumstemperaturer og varmeflukser enn det som en konstruksjon utsettes for ved en standardbrann. Dette er kritisk da varmefluksen utpekes som kanskje den viktigste faktoren når man ser på forkullingshastigheten (32).

Dette skaper usikkerhet rundt temaet om det er høyest mulig temperatur med påfølgende høy forkullingshastighet som er det mest kritiske, eller om det er kombinasjonen av tid og akkurat nok temperatur til at en pyrolyse kan skje.

En tredje faktor er at trevirkets mekaniske egenskaper endrer seg raskt i intervallet opp mot 100 °C og får varige svekkelser allerede fra 60°C (67). Dette kan føre til ytterligere reduserte egenskaper i forhold til standardbrannen, med tanke på at det i en reell rombrann i KLT måles høyere maksimumstemperatur og en mye raskere temperaturutvikling.

## 5.4 Selvslukking

En forutsetning for at en bygningskonstruksjon skal kunne stå gjennom et fullstendig brannforløp er at brannen går inn i en avkjølningsfase og selvslukker før resttverrsnittet til det bærende hovedsystemet i bygget er blitt for lite.

Selvslukking betyr at brannen dør ut selv, uten noe ytre påvirkning, og at dette skjer selv om ikke alt brennbart materiale er forbrent. I et rom med ubrennbare bærende konstruksjoner vil selvslukking kunne oppstå når alle brennbare overflater er utbrent.

Dette kan være sponplater på vegg, parkett og takplater.

Gjennomgått materiale (9, 39) peker på at dersom det er nok gjensidig stråling fra brennende KLT-flater i et rom, vil dette kunne opprettholde pyrolysen på et slikt nivå at selvslukking ikke vil inntreffe og varigheten på brannen blir "uendelig". Det konkluderes med at varmefluks må ligge under 5-6kW/m<sup>2</sup> for at selvslukking skal kunne skje.



## 6. Konklusjon og anbefalinger

Det er et overordnet og ufravikelig krav om at bygg i 5 etasjer eller mer som plasseres i brannklasse 3 og 4 skal kunne stå gjennom et fullstendig brannforløp slik at dette skal kunne modelleres. Veiledningen oppgir R90 som en preakseptert ytelse for dette, og tolker dermed et fullstendig brannforløp til å vare i 90 minutter. Dermed blir ofte komponenter som skal inngå i et bygg testet i ovn hvor tid og temperaturutviklingen er bestemt av ISO 834, i 90 eller 120 min.

Vårt arbeide har hatt som mål å undersøke hvor egnet en branntest som er gjennomført etter ISO-834 vil være for å gjøre en branndimensjonering av eksponerte bæresystem som skal inngå i et bygg i brannklasse 3 som er oppført av KLT-elementer.

### 6.1 Konklusjon

Vår litteraturstudie har avdekket at det kan være store og alvorlige forskjeller mellom et standard brannforløp og et naturlig brannforløp i KLT. Blant de vurderte faktorene fant vi den største forskjellen i forkullingshastigheten, og tiden til en eventuell avkjølningsfase oppstod. Bakgrunnen for denne forskjellen er KLT elementenes bidrag til den totale brannenergien, og hvor størrelsen på forskjellen mellom brannforløpene avhenger av flere variabler. Den viktigste og mest alvorlige av disse er om det oppstår delaminering og graden av denne. Delamineringen gjør at tiden på brannforløpet kan bli "uendelig" og at forkullingshastigheten varierer sterkt. I noen tilfeller ble det målt over dobbelt så høy forkullingshastighet som det standarden legger til grunn (10).

Det viser seg at antall eksponerte flater og hvordan disse er plassert i forhold til hverandre er avgjørende faktorer som påvirker varmeavgivelsesraten og dermed forkullingshastigheten. Orienteringen av overflatene vil også ha en påvirkning på når eller om en eventuell selvslukking vil oppstå. I (7) ble det i et naturlig brannforløp målt temperaturer på over 1000°C allerede 15 min etter start. Til sammenligning så tar det ifølge en ISO 834 brann ca. en time å oppnå denne temperaturen. Testene oppnådde

også markant høyere maksimal temperatur enn det som standardbrannen presenterer. Dette blir av flere pekt på som hovedkilden til økt forkullingshastighet.

Når det gjelder problemstillingen rundt reduserte mekaniske egenskaper til det resterende tverrsnittet på grunn av varmepåvirkning, anser vi dette som underordnet i forhold til andre mere kritiske faktorer.

ISO -834 ble opprinnelig utviklet for å teste stål og betongkonstruksjoner hvor hensikten var å teste om det var tilstrekkelig brannenergi i et rom til at stålet kunne nå kritisk temperatur før en avkjølningsfase eventuelt oppstår. Brannodynamikken og varmeoverføringen i en heltrekonstruksjon er imidlertid mye mer kompleks og sammensatt til at brann kan presenteres ved en tid-temperaturkurve.

Vi stiller spørsmål ved hvor relevant en dimensjonering basert på temperatur, slik som i standardiserte branner, vil være for konstruksjoner i treverk da en permanent kapasitetsreduksjon inntreffer ved en betydelig lavere temperatur enn ved stål og betongkonstruksjoner.

Vi mener at vi i ved å sammenligne resultatene fra de enkelte studiene vi har benyttet, med standard brannkurve definert i ISO-834 kan konkludere med at en standardbrann ikke gir et godt nok bilde av et reelt brannforløp hvor selve konstruksjonen bidrar med brannenergi. Ved å legge denne brannkurven til grunn ved dimensjonering av høye trekonstruksjoner utført av KLT-elementer, har man også akseptert en til dels stor usikkerhet ved bygget hvis det skulle oppstå en brann.

## 6.2 Videre arbeid

Bygging av høye bygg med bruk av KLT er en ny måte å bygge på, hvor den tilhørende forskningen og erfaringen på mange områder er mangelfull og umoden. Det var likevel overraskende å se hvor mye forskning og litteratur som allerede eksisterte. Dette gjaldt spesielt temaene som omhandlet konstruksjonens bidrag til den totale brannenergien og usikkerheten rundt delaminering og selvslukking.

I reelle storbranner er vind og naturlig trekk kritiske faktorer som alene kan sette premissene for brannforløpet og brannslukkingen, så vi hadde forventet at det skulle eksistere litteratur og forskning på temaet om hvilken påvirkning tvungen ventilasjon

hadde på innbrenningshastigheten og varmeproduksjonen. Det viste seg at dette temaet, uvisst av hvilken grunn var nesten helt fraværende i forskningslitteraturen. Vi anbefaler derfor at dette temaet undersøkes nærmere.

Usikkerhetene og konsekvensene rundt delaminering virker å være den største og oftest gjentakende faktoren i konklusjonene i forskningslitteraturen. Selv om det allerede finnes en del litteratur på dette så tenker vi at det gjenstår mye arbeid rundt dette temaet da ingen helt har konkludert med hvorfor dette skjer og hvordan man skal forholde seg til dette kritiske problemet.

Vi opplever også at det er usikkerhet rundt hva et fullstendig brannforløp er og hvor lenge dette egentlig varer. Og burde disse ytelseskravene være de samme for en heltrekonstruksjon som for en konstruksjon hvor det bærende hovedsystemet er i stål og betong? Vi mener at videre forskning bør søke å avklare nærmere dette svært relevante og viktige spørsmålet.

# Referanser

1. Løken E. Hvor brannfarlig er egentlig høye trehus? 2018.
2. byggkvalitet Df. Byggteknisk forskrift (TEK17). Risikoklasser2017.
3. byggkvalitet Df. Byggteknisk forskrift (TEK17). Brannklasser2017.
4. byggkvalitet Df. Byggteknisk forskrift (TEK17). Bæreevne og stabilitet2017.
5. Frangi A, Fontana M. Fire Performance Of Timber Structures Under Natural Fire Conditions2005. 279-90 p.
6. Frangi A, Fontana M, Knobloch M, Bochicchio G. Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels2009. 1279-90 p.
7. Li X, McGregor C, Medina A, Sun X-q, Barber D, Hadjisophocleous G. Real-scale fire tests on timber constructions2016.
8. Hadden RM, Bartlett AI, Hidalgo JP, Santamaria S, Wiesner F, Bisby LA, et al. Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics. Fire Safety Journal. 2017;91:480-9.
9. Crielaard R, van de Kuilen J-W, Terwel K, Ravenshorst G, Steenbakkens P. Self-extinguishment of cross-laminated timber. Fire Safety Journal2019. p. 244-60.
10. Hox K. Fullskala branntest av massivtre brukt i studentboliger. 2015. p. 20-1.
11. Moelven. Limtre [Available from: <https://www.moelven.com/no/no/limtre/>].
12. Sintef. Unngå skadekonstruksjoner i massivtre. 2017.
13. Bell K, Liven H, Norske limtreprodusenters f. Limtreboka. Bergen: John Grieg Norske limtreprodusenters forening; 2015.
14. Glasø G, Landrø H. Tre og brann. Oslo: TreFokus Norsk treteknisk institutt; 2012.
15. Deeny S, Bisby L. Needs for Total Fire Engineering of Mass Timber Buildings 2016 [Available from: <https://www.slideshare.net/SusanDeeny/fire-safety-needs-for-mass-timber-buildings-arupuo>].
16. Eurokode 1 : : Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Almenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann. = Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire. Oslo: Standard Norge; 2008.
17. Halvorsen K. Å forske på samfunnet : en innføring i samfunnsvitenskapelig metode. 5. utg. ed. Oslo: Cappelen akademisk forl.; 2008.
18. Pedersen GA. Litteraturstudie som metode. [https://www.youtube.com/channel/UCIdM-aK\\_sDMHitBmawZnmqw](https://www.youtube.com/channel/UCIdM-aK_sDMHitBmawZnmqw); NTNU; 2018.
19. moderniseringsdepartementet K-o. Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven) 2008 [Available from: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>].
20. byggkvalitet Df. Byggteknisk forskrift. Formål2017.
21. Byggkvalitet Df. Sikkerhet ved brann. 2017.
22. leksikon Sn, Nordal O. Brannmotstand 2017 [Available from: <https://snl.no/brannmotstand>].
23. Bell K. Dimensjonering av trekonstruksjoner. Bergen: Fagbokforl.; 2017.
24. Glasø G, TreFokus. Fleretasjes trehus. September 2008. ed. Oslo: TreFokus Norsk treteknisk institutt; 2008.
25. Skaug E. Trevirkets oppbygging og egenskaper : hovedprinsippet hos bartrær. Oslo: Norsk treteknisk institutt; 2007.
26. TreFokus. Massivtre [Available from: <http://www.trefokus.no/treveilederen/temaer/byggesystemer/massivtre>].
27. Aarstad KJ, Glasø G, Bunkholt A, TreFokus. Massivtre : egenskaper, byggemetoder, bruksområder, økonomi, ressursbruk. Rev. utg. ed. Oslo: TreFokus Norsk treteknisk institutt; 2008.
28. GmbH SEWP. Teknisk brosjyre. 2017.

29. Rønquist M. Branntekniske utfordringer og kompensierende tiltak i høye trehus. Høgskolen på Vestlandet; 2018.
30. Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics. Chichester, UK: Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011.
31. Lieblein ÅD, Landrø H. Brannsikkerhet i høye trehus. NTNU; 2016.
32. Bartlett A, Hadden R, Bisby L. A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. Fire Technology. 2019;55(1):1-49.
33. Hagen BC. Grunnleggende brannteknikk. Haugesund: Bjarne Christian Hagen; 2004.
34. Karlsson B, Quintiere JG. Enclosure fire dynamics. Boca Raton, FL: CRC Press; 2000.
35. Wiesner F, Bisby LA, Bartlett AI, Hidalgo JP, Santamaria S, Deeny S, et al. Structural capacity in fire of laminated timber elements in compartments with exposed timber surfaces. Engineering Structures. 2019;179:284-95.
36. Bartlett A, Wiesner F, Hadden R, Bisby L, Lane B, Lawrence A, et al. NEEDS FOR TOTAL FIRE ENGINEERING OF MASS TIMBER BUILDINGS. Vienna2016.
37. Andersen E. Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner. 2017.
38. Frangi A, Fontana M, Hugi E, Jübstl R. Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire. Fire Safety Journal. 2009;44(8):1078-87.
39. Emberley R, Do T, Yim J, Torero JL. Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber. Fire Safety Journal. 2017;91:252-8.

