

# Brannsikkerhet i høye trehus

**Åsmund Deraas Lieblein**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg, anlegg og transport





Oppgavens tittel: Brannsikkerhet i høye trehus	Dato: 13.06.2016		
	Antall sider (inkl. bilag): 97 (118)		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Åsmund Deraas Lieblein			
Faglærer/veileder: Harald Landrø			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere:			

Ekstrakt:

Denne masteroppgaven har tatt for seg brannsikkerhet i høye trehus. Menneskeskapte klimaforandringer har ført til et behov for en samfunnsomstilling hvor man etterstreber en mer bærekraftig miljøøkonomi. Denne omstillingen krever omstilling og nytenking på alle samfunnsområder, og i byggebransjen har bruk av treverk som konstruksjonsmateriale store miljøfordeler sammenlignet med andre tradisjonelle bygningsmaterialer. Disse miljøfordelene kombinert med innføringen av funksjonsbaserte forskrifter har ført med seg en trerenessanse de siste årene. Byggingen av trehus de siste hundre årene har vært begrenset av materialrestriktive byggeforskrifter, og dette har bremsert kunnskapsutviklingen innenfor dette området. Den nylige fremveksten av høye trehus særlig i det siste tiåret har dermed skjedd parallelt med utvikling av kunnskap om brannsikkerheten i slike bygninger. Nylig gjennomførte branntester har avdekket mulige svakheter ved prinsippene som legges til grunn for den branntekniske prosjekteringen av høye trehus. Den overordnede problemstillingen i denne oppgaven var derfor å kartlegge eksisterende kunnskap på området, og med dette som grunnlag vurdere den branntekniske prosjekteringsprosessen slik den er i dag.

I en litteraturstudie ble det undersøkt hvilke rettslige føringer man opererer innenfor ved brannteknisk prosjektering av høye trehus, samt hvilke branntekniske forhold som spiller en viktig rolle i denne prosjekteringsprosessen. Videre ble det gjennomført en egen litteraturstudie som kartla og vurderte eksisterende empiri fra laboratorieforsøk rundt temaet treverk brukt som konstruksjonsmateriale.

Med formål om å undersøke hva som ligger til grunn for brannsikkerhetsnivået i eksisterende høye trehus i Norge har tilgjengelige prosjekteringsrapporter fra tre aktuelle prosjekter blitt gjennomgått og vurdert fra et faglig ståsted.

Dette arbeidet har identifisert flere kunnskapshull og manglende testing av brannsikkerheten i høye trehus. Brannsikkerheten i byggene som har blitt studert avhenger av flere parametre som det på bakgrunn av manglende kunnskap er knyttet usikkerhet til, og dette medfører et sikkerhetsnivå med en lavere sikkerhetsmargin enn liknende bygg utført med ubrennbare materialer.

Videre er det funnet indikasjoner på at miljøhensyn er med på å påvirke brannsikkerheten i disse byggverkene.

Stikkord:

1. Brannsikkerhet
2. Høye trehus
3. TEK10
4. Brannteknisk prosjektering



## Forord

Denne rapporten er skrevet som avsluttende masteroppgave i emnet TBA4905 Bygnings- og materialteknikk ved Institutt for Bygg, Anlegg og Transport ved NTNU i Trondheim. Oppgaven utgjør det avsluttende arbeidet på det femårige masterprogrammet Bygg- og Miljøteknikk. Gjennom arbeidet med denne oppgaven har jeg fått ny kunnskap om temaet brannsikkerhet i høye trehus, og hvilke muligheter og utfordringer som eksisterer innenfor dette området. I tillegg til mye ny kunnskap har jeg også tatt stor interesse for dette tidsaktuelle temaet.

Jeg ønsker å takke min veileder Harald Landrø (NTNU) for hjelp og innspill underveis. Jeg ønsker også å takke Tor Olav Mittet (Fokus Rådgivning) for å ha hjulpet meg med å finne frem til dette meget spennende temaet, samt viktige innspill underveis.

Åsmund Deraas Lieblein

Trondheim, 13.juni 2016



## Sammendrag

Denne masteroppgaven har tatt for seg brannsikkerhet i høye trehus. Menneskeskapte klimaforandringer har ført til et behov for en samfunnsomstilling hvor man etterstreber en mer bærekraftig miljøøkonomi. Denne omstillingen krever omstilling og nytenking på alle samfunnsområder, og i byggebransjen har bruk av treverk som konstruksjonsmateriale store miljøfordeler sammenlignet med andre tradisjonelle bygningsmaterialer. Disse miljøfordelene kombinert med innføringen av funksjonsbaserte forskrifter har ført med seg en trerenessanse de siste årene. Byggingen av trehus de siste hundre årene har vært begrenset av materialrestriktive byggeforskrifter, og dette har bremsert kunnskapsutviklingen innenfor dette området. Den nylige fremveksten av høye trehus særlig i det siste tiåret har dermed skjedd parallelt med utvikling av kunnskap om brannsikkerheten i slike bygninger. Nylig gjennomførte branntester har avdekket mulige svakheter ved prinsippene som legges til grunn for den branntekniske prosjekteringen av høye trehus. Den overordnede problemstillingen i denne oppgaven var derfor å kartlegge eksisterende kunnskap på området, og med dette som grunnlag vurdere den branntekniske prosjekteringsprosessen slik den er i dag.

I en litteraturstudie ble det undersøkt hvilke rettslige føringer man opererer innenfor ved brannteknisk prosjektering av høye trehus, samt hvilke branntekniske forhold som spiller en viktig rolle i denne prosjekteringsprosessen. Videre ble det gjennomført en egen litteraturstudie som kartla og vurderte eksisterende empiri fra laboratorieforsøk rundt temaet treverk brukt som konstruksjonsmateriale. Med formål om å undersøke hva som ligger til grunn for brannsikkerhetsnivået i eksisterende høye trehus i Norge har tilgjengelige prosjekteringsrapporter fra tre aktuelle prosjekter blitt gjennomgått og vurdert fra et faglig ståsted.

Dette arbeidet har identifisert flere kunnskapshull og manglende testing av brannsikkerheten i høye trehus. Brannsikkerheten i byggene som har blitt studert avhenger av flere parametre som det på bakgrunn av manglende kunnskap er knyttet usikkerhet til, og dette medfører et sikkerhetsnivå med en lavere sikkerhetsmargin enn liknende bygg utført med ubrennbare materialer. Videre er det funnet indikasjoner på at miljøhensyn er med på å påvirke den branntekniske vurderingen og dermed brannsikkerheten i disse byggverkene.





## Abstract

The work in this thesis has focused on the fire safety in tall timber buildings. Anthropogenic climate change has led to a need for a societal change where one strives for a more sustainable environmental economics. This restructuring requires change and innovation in all areas of society. In the construction industry the use of wood as a construction material has large environmental benefits compared to other traditional building materials. These environmental benefits combined with the introduction of performance based regulations have led to a renaissance in the use of wood materials in recent years. The construction of wooden houses has the last hundred years been limited by material restrictive building regulations, and this has slowed down the development of knowledge in this area. The recent emergence of tall timber buildings, especially in the last decade, has thus taken place in parallel with the development of knowledge about fire safety in such buildings. Recently conducted fire tests have revealed possible weaknesses in the principles that form the basis for the fire safety design of tall timber buildings. The aim of this work was to identify existing knowledge in the area, and on this basis assess the fire safety design process as it is today.

A literature review was conducted with the aim of understanding what legal constraints the fire safety design of tall timber buildings operates within, as well as the fire mechanics which play an important role in this design process. Furthermore a separate literature review was conducted in order to map and assess existing empirical evidence from laboratory experiments regarding the use of wood as a construction material, and to uncover any important knowledge gaps. Fire safety design documents from existing tall timber buildings have been reviewed and assessed with the purpose of examining what forms the basis of the fire safety level in such buildings.

This work has identified several knowledge gaps and inadequate testing of fire safety in tall timber buildings. The fire safety level in the buildings that have been studied depends on several parameters. Based on the lack of empirical evidence these parameters are associated with uncertainty, and the resulting fire safety level may be one with a lower margin of safety than what is the case in similar buildings where non-combustible materials are used. Furthermore, there are indications that environmental considerations influence the fire safety design process of tall timber buildings.



# Innhold

<b>Figurer</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabeller</b>	<b>xv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn . . . . .	1
1.1.1 Fordeler med å bygge med tre . . . . .	4
1.1.2 utfordringer med å bygge med tre . . . . .	4
1.2 Problemutredning . . . . .	5
<b>2 Metode</b>	<b>7</b>
2.1 Litteraturstudie . . . . .	7
2.2 Innhenting av dokumentasjon fra aktuelle byggeprosjekter . . . . .	7
2.2.1 Treet i Bergen . . . . .	8
2.2.2 Moholt 50 50 . . . . .	8
2.2.3 Pentagon 2 . . . . .	9
2.3 Analyse av referanseprosjekter . . . . .	9
<b>3 Teoretisk grunnlag</b>	<b>11</b>
3.1 Lover og forskrifter som styrer byggeprosessen . . . . .	11
3.1.1 TEK10 - En funksjonsbasert forskrift . . . . .	12
3.2 Brannteknisk prosjektering . . . . .	14
3.2.1 Brannsikkerhetsstrategi . . . . .	14
3.2.2 Brannsikringstiltak: Aktive, passive og organisatoriske tiltak	15
3.3 Dokumentasjon av brannsikkerheten . . . . .	15
3.4 Brannforløp . . . . .	16
3.4.1 Vekststadiet . . . . .	17
3.4.2 Overtenning . . . . .	19
3.4.3 Fullt utviklet brann . . . . .	20
3.4.4 Avkjøling . . . . .	20
3.4.5 Brannkurver . . . . .	20
3.5 Brannenergi og branneksposering . . . . .	22

3.5.1	Ekvivalent branneksponeeringstid . . . . .	22
3.6	Klassifisering . . . . .	23
3.6.1	Klassifisering av bygningsdelers brannmotstand . . . . .	23
3.6.2	Klassifisering av bygningsmaterialers brannpåvirkning . . . . .	24
3.7	Tre som bygningsmateriale . . . . .	24
3.7.1	Limtre . . . . .	24
3.7.2	Massivtre . . . . .	25
3.8	Tre og brann . . . . .	26
3.8.1	Treets egenskaper ved høye temperaturer . . . . .	27
3.8.2	Forkullingshastighet . . . . .	28
3.8.3	Forkullingsdybde . . . . .	30
3.8.4	Bestemmelse av tverrsnittsegenskaper i Eurokode 5 . . . . .	32
3.9	Prosjektering av høye trehus . . . . .	34
3.9.1	Risikoklasser og brannklasser . . . . .	34
3.9.2	Tre brukt som bæresystem i høye trehus . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>37</b>
4.1	Introduksjon . . . . .	37
4.2	Gipsplater og trebaserte plater som passiv brannsikring . . . . .	37
4.2.1	Testoppsett . . . . .	37
4.2.2	Resultater . . . . .	38
4.3	Fullskala test av treetasjes bygning med bærende trekonstruksjon . . . . .	39
4.3.1	Testbeskrivelse . . . . .	39
4.3.2	Testresultater . . . . .	40
4.3.3	Konklusjoner . . . . .	40
4.4	Brennbare og ubrennbare konstruksjoner i en naturlig brannsituasjon . . . . .	42
4.4.1	Testbeskrivelse . . . . .	42
4.4.2	Testresultater . . . . .	43
4.5	Småskalatest: Forkulling av massivtre . . . . .	46
4.5.1	Testbeskrivelse . . . . .	46
4.5.2	Testresultater . . . . .	46
4.5.3	Testkonklusjoner . . . . .	48
4.6	Trekonstruksjoner i naturlig brannforløp . . . . .	48
4.6.1	Testoppsett . . . . .	48
4.6.2	Testresultater . . . . .	49
4.7	Brannegenskaper hos krysslagte massivtrepaneler . . . . .	50
4.7.1	Numerisk analyse . . . . .	50
4.7.2	Eksperimentell analyse . . . . .	51
4.8	Hakkarainen 2002 . . . . .	52
4.8.1	Testbeskrivelse . . . . .	52
4.8.2	Testresultater . . . . .	53
4.9	Branntest av massivtrekonstruksjoner i naturlig brann . . . . .	54

4.9.1	Testbeskrivelse . . . . .	54
4.9.2	Resultater test 1 . . . . .	57
4.9.3	Resultater test 2 . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Gjennomgang av aktuelle byggeprosjekter</b>	<b>63</b>
5.1	Studentboliger i Ås, Pentagon 2 . . . . .	63
5.1.1	Brannkonsept . . . . .	63
5.1.2	Fraviksanalyse . . . . .	66
5.2	Moholt 50 50 . . . . .	68
5.2.1	Brannkonsept . . . . .	69
5.3	§11-4: Bæreevne og stabilitet . . . . .	71
5.3.1	Krav til bærende hovedsystem . . . . .	72
<b>6</b>	<b>Diskusjon og forslag til videre arbeid</b>	<b>75</b>
6.1	Diskusjon av eksisterende empiri . . . . .	75
6.1.1	Bidrag til brannenergi . . . . .	75
6.1.2	Forkulling . . . . .	76
6.1.3	Gipsbeskyttelse . . . . .	77
6.1.4	Fullstendig brannforløp . . . . .	78
6.1.5	Naturlig brann vs. standardbrann . . . . .	79
6.2	Campus Ås - Pentagon 2 . . . . .	79
6.3	Moholt 50 50 . . . . .	84
6.3.1	Sprinklerpålidelighet . . . . .	85
6.3.2	Temperaturutvikling og brannenergi . . . . .	87
6.3.3	Fasadespredning . . . . .	89
6.3.4	Forkullingshastighet . . . . .	91
6.3.5	Brannforløpets varighet . . . . .	93
6.4	Åpenhet i brannteknisk prosjektering . . . . .	93
<b>7</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>95</b>
7.1	Videre arbeid . . . . .	96
	<b>Referanser</b>	<b>99</b>



# Figurer

1.1	Borgund Stavkirke i Lærdal, bygget på slutten av 1100-tallet [68] . . . . .	3
1.2	Montering av ferdige massivtreelementer på byggeplass [35] . . . . .	4
3.1	lover og forskrifter [8] . . . . .	11
3.2	De ulike nivåene for brannsikringsdokumentasjon [8] . . . . .	16
3.3	Vanlig beskrivelse av et brannforløp [72] . . . . .	17
3.4	Sonemodell [72] . . . . .	18
3.5	Vekstkurver for $t^2$ -brann, med brannvekstkoeffisienter gitt i tabell 3.1 [15]	19
3.6	Nominelle temperatur-tidkurver . . . . .	21
3.7	Ingbergs equal area-hypotese [15] . . . . .	22
3.8	Hovedtyper massive treelementer [9] . . . . .	25
3.9	Temperatursoner i brannekspontert tverrsnitt av tre [23] . . . . .	26
3.10	Variasjon i treets termiske konduktivitet ved temperaturendring [6] . . . . .	27
3.11	Variasjon i treets spesifikke varmekapasitet ved temperaturendring [6] . . . . .	28
3.12	Fuktinnholdet og tettheten sin innvirkning på forkullingshastigheten [23]	29
3.13	Beskyttete forkullingsrater . . . . .	30
3.14	Endimensjonal forkulling av tverrsnitt [58] . . . . .	31
3.15	Illustrasjon av endimensjonal og nominell forkullingsdybde [58] . . . . .	31
3.16	Illustrasjon av redusert tverrsnitt [58] . . . . .	33
4.1	Plantegning som viser testrommet med frittstående bindingsverksvegg og trekrybbe [43] . . . . .	38
4.2	Tverrsnitt som viser oppbygningen av vegger og etasjeskiller i testrommet [19] . . . . .	41
4.3	Omriss av testrommet fra testene beskrevet i Li et al. (2015) [49] . . . . .	42
4.4	Plassering av inventar i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49] . . . . .	43
4.5	Målt varmeavgivelsesrate i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49] . . . . .	44
4.6	Utvendig brannutvikling etter 7 minutter. Venstre: Modul med brennbare overflater, høyre: modul med ubrennbare overflater [20] . . . . .	50
4.7	Plantegning av korridor og hybelenhet som ble testet [31] . . . . .	55
4.8	Snittegning av hybelenhet som ble testet [31] . . . . .	55

4.9	Temperaturer målt i test 2, med høyde over gulvet i cm angitt i parentes. Temperaturmålinger i hybelen etter 30 minutter ble utelatt fra grafen grunnet feil i måleinstrumenter [31] . . . . .	58
4.10	Rester av den ubeskyttede veggen i test 2 [31] . . . . .	60
4.11	Temperatur i hybelen sammenlignet med ISO-834-kurve og HC-kurve[31]	60
5.1	Illustrasjonsbilde av 8-etasjes blokker i Ås [14] . . . . .	64
5.2	Studenttårn på Moholt 50 50, illustrasjonsfoto [31] . . . . .	69
6.1	Illustrasjon av prinsippet med kompensierende tiltak [60] . . . . .	81
6.2	Sammenligning av temperaturutviklingen i de to testene [31] . . . . .	85
6.3	Målte temperaturer i luften i hybelen og på baderommet i løpet av de første 10 minuttene av test 2 [31] . . . . .	88
6.4	Målte romtemperaturer sammenlignet med standardkurver [49] . . . . .	90
6.5	Illustrasjon som viser lastbærende (parallele) og ikke-lastbærende (tversgående) lameller i krysslaminert massivtre [42] . . . . .	92



# Tabeller

1.1	Karbonutslipp fra fremstillingen av vanlige bygningsmaterialer [7] . . . . .	2
3.1	$t^2$ -parametre [15] . . . . .	19
3.2	Ytelseskrav for bærende og skillende konstruksjoner [13] . . . . .	23
3.3	Euroklasser [34] . . . . .	24
3.4	Dimensjonerende forkullingsrater for ulike tretyper [58] . . . . .	29
3.5	Risikoklasser [48] . . . . .	35
3.6	Brannklasser [48] . . . . .	35
3.7	Brannklasse for byggverk [13] . . . . .	36
3.8	Krav til bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse [13] . . . . .	36
4.1	Estimert brannenergi i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49]. Spesifikk brannenergi er angitt pr. $m^2$ gulvflate . . . . .	43
4.2	Beskrivelse av prøvestykker i de ulike testene [21] . . . . .	46
4.3	Forkullingsresultater fra de ulike testene [21] . . . . .	47
4.4	Testresultater [22] . . . . .	52
4.5	Beskrivelse av testrommets oppbygning i de ulike testene [29] . . . . .	52
4.6	Brannenergi i testrommet [31] . . . . .	56
4.7	Oversikt over hendelser i test 2 [31] . . . . .	59
5.1	Fravik fra preaksepterte ytelser §11-4 . . . . .	72
6.1	Årsaker til svikt og ineffektivitet i sprinkleranlegg [30] . . . . .	86



# Kapittel 1

## Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Menneskelig aktivitet har siden den industrielle revolusjon ført med seg en stadig økning i konsentrasjonen av drivhusgasser i atmosfæren [52], og disse drivhusgassene bidrar til global oppvarming ved å absorbere solenergi som reflekteres fra jordas overflate. Dette har ført til en temperaturøkning på jorda, en temperaturøkning som forventes å aksellerere i fremtiden dersom verdens klimagassutslipp ikke reduseres betraktelig. Begrepet klimagasser, eller drivhusgasser, omfatter vanndamp ( $H_2O$ ), karbondioksid ( $CO_2$ ), metan ( $CH_4$ ), ozon ( $O_3$ ), lystgass ( $N_2O$ ) og klorfluorkarbon-gasser (KFK-gasser). Av disse er det  $CO_2$  som står for det største bidraget til den globale oppvarmingen som skyldes menneskeskapte utslipp, og følgelig er det  $CO_2$ -utslippene det anses som viktigst å redusere. Siden den industrielle revolusjon har konsentrasjonen av  $CO_2$  i atmosfæren økt med cirka 30%. Den viktigste årsaken til denne økningen er bruk av fossil energi samt avskoging.

I 2010 lanserte EU strategien “Europe 2020”, en strategi for smart, bærekraftig og inkluderende vekst i Europa. En sentral del av denne strategien er tre uttalte mål for å bremse klimaendringene og den globale oppvarmingen [16]:

- 20% utslippskutt sammenlignet med 1990-nivået
- 20% av all energi skal være fornybar
- 20% økning i energieffektivitet

Global oppvarming er en viktig utfordring for verdenssamfunnet, og Norge har forpliktet seg til å bidra til et grønt skifte - en omstilling til et samfunn som utvikler seg innenfor naturens tålegrenser [40]. I tråd med EUs strategi og forpliktelsene den fører med seg har Stortinget vedtatt klimamål med tilhørende tiltak for å nå disse

målene. Viktige mål er en 30% reduksjon av Norges drivhusgassutslippsnivå i 1990 innen 2020, og at Norge skal være karbonnøytralt innen 2050 [41].

Hovedfokuset i arbeidet med å redusere de menneskeskapte klimaendringene er rettet mot en endring i verdens energisystemer. Dette handler om å bevege seg fra fossile til fornybare energikilder, og å redusere verdens energiforbruk ved å øke energieffektiviteten [61]. Det er imidlertid flere strategier som kan tas i bruk i kampen mot utslippene, og en av disse er en endring i valg av bygningsmaterialer [28]. Bygningssektoren står i dag for i overkant av 30% av verdens  $CO_2$ -utslipp og rundt 40% av verdens primærenergiforbruk kommer fra bygninger [11]. Dette er mer enn både transport- og industrisektoren, og bygningssektoren spiller dermed en sentral rolle dersom man skal klare å oppnå en signifikant utslippsreduksjon.

Flere studier de siste årene har vist at bruk av trebaserte bygningsmaterialer fører med seg lavere energiforbruk og lavere  $CO_2$ -utslipp enn andre mye brukte bygningsmaterialer som betong, mur og stål [63]. Treverkets miljømessige fordeler som bygningsmateriale sammenlignet med andre alternativer har flere årsaker. Tre er et karbonnøytralt materiale. Trær “absorberer”  $CO_2$  ved å omdanne dette til biomasse, og er på denne måten en del av det naturlige karbonkretsløpet. Når treet senere forbrennes eller brytes ned biologisk, frigjøres den samme mengden  $CO_2$  som treet har absorbert i sin vekstperiode. Denne  $CO_2$ -lagringskapasiteten kan benyttes til å lagre  $CO_2$  i bygninger, og  $1m^3$  tre i et bygg vil medføre en lagring av 0.8 tonn  $CO_2$  i bygningsmassen [71]. I tillegg krever produksjonen av trebaserte bygningsmaterialer et lavere forbruk av fossile energikilder enn produksjonen av andre bygningsmaterialer som for eksempel betong, samt at biprodukter fra produksjonen kan brukes som biobrensel som kan være med på å erstatte fossilt brensel [63]. Tabell 1.1 viser forskjellen i  $CO_2$ -utslipp fra fremstillingen av flere vanlige bygningsmaterialer. Nettoutslippet fra treprodukter er negativt fordi mer  $CO_2$  er absorbert og lagret i materialet enn mengden  $CO_2$  som avgis fra produksjonsprosessen.

Bygningsmateriale	Karbon frigitt [ $kg/m^3$ ]	Karbon lagret [ $kg/m^3$ ]	Netto karbonutslipp [ $kg/m^3$ ]
Behandlet treverk	22	250	-228
Limtre	82	250	-168
Konstruksjonsstål	8132	15	8117
Armert betong	182	0	192
Aluminium	6325	0	6325

**Tabell 1.1:** Karbonutslipp fra fremstillingen av vanlige bygningsmaterialer [7]

Det er altså tydelige miljøfordeler knyttet til en mer utstrakt bruk av treverk i bygnin-

ger, og dette er et sentralt virkemiddel i arbeidet med å redusere bygningssektorens utslippsandel. I Norge har vi lange tradisjoner med å bygge med tre, men de siste hundre årene har det vært en tilbakegang for treverk som konstruksjonsmateriale. Bybranner i byer med en stor bygningsmasse av tre satte sine spor i forskriftene gjennom 1900-tallet, og etter brannen i Ålesund i 1904 ble det innført murtvang i alle norske byer. Materialer som tegl, stål og betong erstattet tre som det dominerende bygningsmaterialet i byene [18]. Utenfor byene var det fremdeles mulig å bygge hus i tre, men her var det stort sett snakk om bygging av bolighus med maksimalt to-tre etasjer. Senere kom det krav om maksimalt tre etasjer ved bruk av tre, også i distriktene.



**Figur 1.1:** Borgund Stavkirke i Lærdal, bygget på slutten av 1100-tallet[68]

De materialbegrensende forskriftene har gjennom 1900-tallet ført til at det ikke har blitt bygget fleretasjes hus i tre. Ved innføringen av Teknisk Forskrift 1997 gikk man fra en materialbegrensende forskrift (Byggeforskriften 1987 med forløpere) til en materialnøytral byggeforskrift som i stedet angir funksjonskrav for å ivareta sikkerheten ved brann. Kombinert med det økte fokuset på miljø og klimatiltak har denne forskriftsendringen gitt grobunn for en trerenessanse i norsk byggebransje.

En viktig del av bærekraftig byutvikling er fortetting av eksisterende bebyggelse [18]. En slik arealeffektiv utbyggingsstrategi innebærer blant annet å bygge mer i høyden for å håndtere et stadig økende boligbehov, framfor å legge beslag på urørt areal med småhus. Dette har bidratt til en økt interesse for å bygge høye hus i Norge, og kombinert med en byggeforskrift som åpner opp for en mer utstrakt bruk av treverk har dette ført til at det de siste årene har blitt bygget flere trehus i tre etasjer eller mer [24].

### 1.1.1 Fordeler med å bygge med tre

I tillegg til de tidligere nevnte miljørelaterte fordelene er det flere andre fordeler ved å bruke trebaserte bygningsmaterialer. De tradisjonelle bæresystemene av stål og betong brukt i høye hus er vesentlig tyngre enn bæresystem av tre, noe som medfører et mindre fundamenteringsbehov ved bruk av tre. Dette gjør det enklere å føre opp høye hus i områder med dårlige grunnforhold, samt at fundamenteringskostnadene blir lavere [24]. En annen kostnadsbesparende faktor ved bygging av tre er at byggetiden reduseres, spesielt ved bruk av massivtreelementer.



**Figur 1.2:** Montering av ferdige massivtreelementer på byggeplass [35]

Massivtreelementene produseres innendørs på fabrikk, og ankommer byggeplass som et ferdig “byggesett” som settes sammen [1]. Dette medfører en enkel og kontrollert byggeprosess, noe som legger til rette for gode HMS-forhold på byggeplass og rask byggetid. Videre gir treverk et behagelig innemiljø. Et trebygg oppfattes som levende, varmt og sunt, og en rekke psykologiske studier har funnet at et naturlig innemiljø gir en økt følelse av velvære og reduserer stress [59].

### 1.1.2 utfordringer med å bygge med tre

Selv om det er mange fordeler med å bygge høye trehus, er det også noen utfordringer. På grunn av de tidligere forskriftsbegrensningene er dette et relativt ferskt fagområde, og kompetansen og kunnskapen er naturlig nok fremdeles begrenset. Hundre år uten bygging med tre har begrenset kunnskapsutviklingen på dette området, mens kunnskapen rundt andre konstruksjonsmaterialer har økt.

To av hovedutfordringene knyttet til høye trehus er utfordringer knyttet til brann-sikkerhet og lydtekniske forhold [25]. Tre er et brennbart materiale, og en bygning hvor bærekonstruksjonen er av tre vil dermed være en brennbar bærekonstruksjon. Dette kan potensielt få dramatiske konsekvenser, og en må ta hensyn til både konstruksjonens bæreevne ved en eventuell brann og de brennbare overflatenes bidrag til

brannens utvikling. Flanketransmisjon, for eksempel gjennom dårlige tilslutningsløsninger, er en av de lydtekniske utfordringene knyttet til fleretasjes trehus. Dette er også et eksempel på sammenfallende lydtekniske og branntekniske utfordringer, hvor en vil eliminere både et brannsikkerhetsproblem og et lydproblem ved å benytte seg av en tilfredsstillende løsning.

## 1.2 Problemutredning

Det er en stadig voksende interesse for å bygge trehus med fem eller flere etasjer. Mangelen på preaksepterte brannsikkerhetsløsninger for slike byggverk medfører at oppfyllelse av forskriftens krav til brannsikkerhet må verifiseres på annet vis. Denne verifikasjonen gjøres i større grad ved hjelp av den branntekniske rådgivers egne vurderinger i de enkelte utbyggingsprosjekter enn hva som er tilfellet ved prosjektering av byggverk hvor preaksepterte ytelser benyttes. Dermed er det interessant å undersøke i hvilken grad mangelen på preaksepterte ytelser påvirker det branntekniske sluttproduktet ved prosjektering av slike byggverk, og hvorvidt dagens forskrift gjør det vanskelig å komme fram til et udiskutabelt tilfredsstillende sikkerhetsnivå.

Den viktigste forutsetningen for en forsvarlig bruk av treverk som bygningsmateriale er at brannsikkerheten er ivaretatt på tilfredsstillende vis [22]. Nylig gjennomførte laborietester [31] har avdekket et behov for en vurdering av sikkerhetsnivået i høye trehus, og en vurdering av kunnskapen og prinsippene dette sikkerhetsnivået baseres på. Resultatene fra disse branntestene har ført til at det er grunn til å stille spørsmål ved hvorvidt den raskt voksende trenden med å bygge med tre i høyden følges av den nødvendige kunnskapen rundt hva som skjer dersom disse byggverkene begynner å brenne.

Da det i det siste har blitt bygget flere høye trehus i Norge samtidig som det avdekkes et behov for mer kunnskap innenfor temaet brannsikkerhet i høye trehus, blir det naturlig å lure på hvorvidt disse byggene bygges før de grunnleggende forutsetningene er på plass. Er det slik at de positive aspektene skygger for utfordringene? Som beskrevet i delkapittel 1.1 er det vesentlige miljøgevinsten knyttet til en økt anvendelse av treverk som bygningsmateriale, miljøgevinsten som er viktige i omstillingen til et mer bærekraftig samfunn. I et miljø- og bærekraftperspektiv er det utvilsomt fordelaktig å legge til rette for en bygningsmasse som består av flere høye trehus. Men samtidig er det viktig at de positive aspektene ikke skygger for de utfordringer som også eksisterer.

Den overordnede målsetningen med dette arbeidet har vært å utforske i hvilken grad høye trehus bygges med et tilfredsstillende sikkerhetsnivå hva gjelder brann. I denne sammenheng har det også vært viktig å undersøke hvorvidt brannsikkerheten baseres på et tilstrekkelig empirisk kunnskapsfundament, samt i hvilken grad miljøhensyn

## 6 1. INNLEDNING

virker inn på den branntekniske vurderingen.



# Kapittel 2

## Metode

Denne oppgaven er et resultat av gjennomgang av relevant litteratur, innhenting av informasjon vedrørende aktuelle byggeprosjekter, samt en analyse av denne informasjonen. Disse ulike arbeidsprosessene blir beskrevet i dette kapitlet. Hensikten med dette metodekapitlet er å beskrive hvordan arbeidet med denne oppgaven er utført, og dermed øke arbeidets etterprøvbarehet og reproduserbarhet. En beskrivelse av oppgavens arbeidsmetodikk gir en objektiv fremstilling av hva som er gjort av arbeid i oppgaven, og rasjonalet bak de ulike metodevalgene som er blitt gjort.

### 2.1 Litteraturstudie

I kapittel 3 presenteres resultatene fra en litteraturstudie. Formålet med denne litteraturstudien var å undersøke rammeverket og de viktigste forutsetningene for brannteknisk prosjektering av høye trehus i henhold til det norske lovverk, samt å undersøke branntekniske prinsipper og mekanismer som spiller en viktig rolle ved prosjekteringen av slike byggverk.

I lys av oppgavens problemstilling kom det fram et behov for en grundig gjennomgang av litteratur som beskriver branntester som danner dagens empiriske kunnskapsgrunnlag vedrørende en brannsituasjon i trekonstruksjoner. Resultatene fra dette litteraturstudiet er oppsummert i et eget kapittel, kapittel 4. Videre er disse resultatene anvendt i analysen av den branntekniske prosjekteringen av aktuelle byggeprosjekter.

### 2.2 Innhenting av dokumentasjon fra aktuelle byggeprosjekter

For å gjøre en faglig vurdering av brannsikkerheten i eksisterende høye trehus ble det nødvendig å hente inn den relevante dokumentasjonen fra disse prosjektene. Da dette er en prosess som hadde vesentlig innvirkning på oppgavens fremdrift, i

tillegg til at det er en prosess som reiser viktige spørsmål rundt tilgjengeligheten av brannsikkerhetsdokumentasjon fra disse byggene, beskrives prosessen her i detalj. Av hensyn til personene involvert er det valgt å anonymisere disse.

### **2.2.1 Treet i Bergen**

Det første forsøket på å få tak i brannsikkerhetsdokumentasjonen fra dette prosjektet ble gjort den 2.mars 2016. Prosjektsjef Person A i Bergen og Omegn Boligbygg (BOB) som var prosjektets byggherrefirma ble kontaktet gjennom epost med forespørsel om å få tilsendt prosjektets brannrapporter. Denne eposten ble samme dag videresendt av Person A til Person B, gruppeleder ved faggruppen Brann og Sikkerhet ved Sweco i Bergen, med forespørsel om han kunne bistå med å oversende denne dokumentasjonen. Da det ikke kom noe svar fra Person B ble det sendt en ny epost til Person A og Person B 15.mars, hvorpå Person A svarte umiddelbart med henvisning til Person B og en forklaring om at det var Person B som hadde tilgang til disse dokumentene. 30.mars sendte Person B en epost hvor han la ved en powerpoint-presentasjon av brannsikkerhetsprosjekteringen fra høsten 2014. Brannsikkerhetsdokumentasjonen fra prosjektet ble ikke nevnt i denne eposten, og 30.mars ble det sendt en ny forespørsel etter denne dokumentasjonen til Person B. 31.mars ble det sendt en epost til Person C i Sweco med forespørsel om å få tilgang til brannsikkerhetsdokumentasjonen fra prosjektet. Denne eposten ble videresendt internt i Sweco, og endte opp hos Person B. 4.april ble det mottatt svar fra Person B, som meddelte at Sweco ikke ønsket å sende ut prosjektets brannsikkerhetsrapporter.

### **2.2.2 Moholt 50|50**

2.mars ble Person A, prosjekt- og utviklingssjef hos SiT Bolig, kontaktet per epost for å få tilgang til brannsikkerhetsrapportene fra prosjektet Moholt 50|50. 11.mars oversendte Person A brannkonsept og branntegninger fra prosjektet. 15.mars ble det sendt en ny epost til Person A hvor risikoanalysen fra brannsikkerhetsdokumentasjonen ble etterlyst. I påvente av svar fra SiT ble Person B fra Rambøll kontaktet 25.mars, gjennom en epost hvor risikoanalysen ble etterlyst. 11.mai ble det sendt epost til vedlikeholdsleder hos SiT, Person C, som henviste videre til Person D som er prosjektutvikler ved SiT Bolig. 18.mai svarte Person D at hun ikke hadde kjennskap til denne risikoanalysen, og hun var usikker på om den var blitt laget. Hun henviste videre til Person B. 19.mai ble det sendt en ny epost til Person B, hvorpå han svarte at han ikke ønsket å sende ut risikoanalysen. Det ble avtalt et møte med Person B, og 25.mai ga han en kort gjennomgang av hvordan brannsikkerheten har blitt løst i de fem massivtrebyggene på Moholt.

### 2.2.3 Pentagon 2

Person A, administrerende direktør ved Studentsamskipnaden i Ås (SiÅs), ble kontaktet på epost den 2.mars med en forespørsel om tilgang til dokumentasjon fra den branntekniske prosjekteringen av prosjektet Pentagon 2. Denne eposten ble aldri besvart og 10.mars ble samme forespørsel sendt til assisterende direktør ved SiÅs, Person B. Person B svarte 14.mars at det ville bli gitt innsyn i dokumentasjonen, og at Person C, driftsjef ved Siås Bolig, skulle oversende dette. 16.mars, 8.april og 6.mai ble det sendt epost til Person C med forespørsel om overlevering av brannsikkerhetsdokumentasjonen, og 9.mai ble disse epostene besvart. I telefonsamtale med Person C 10.mai kom man fram til at det var mest praktisk å ta kontakt med Brann- og Sikkerhetsrådgivning AS (BSR), som hadde stått for den branntekniske prosjekteringen av de to massivtreblokkene. 10.mai ble det sendt epost til Person D hos BSR, og 13.mai ble alt av nødvendig dokumentasjon fra den branntekniske prosjekteringen mottatt på epost.

## 2.3 Analyse av referanseprosjekter

Informasjonen det lykkes å få tilgang til ble analysert kvalitativt med formål om å gjøre en vurdering av brannsikkerheten i eksisterende eller snart ferdigstilte høye trehus i Norge i dag. Denne kvalitative analysen ble gjennomført ved å sammenholde beskrivelser og vurderinger i brannsikkerhetsdokumentasjonen med byggteknisk forskrift (TEK10) med veiledning (VTEK), og således belyse brannsikkerheten ut i fra forskriftens angitte sikkerhetsnivå og teste samsvar mellom brannsikkerhetsrapport og forskrift. Det ble gjort en gjennomgang av brannsikkerhetsrapportene hvor vektlegging og argumentasjon ble vurdert, testet og kontrollert opp mot forskriften. Denne analysen tok hovedsakelig for seg de høye trehusene i Ås, Pentagon 2, da dette var det eneste prosjektet hvor all nødvendig dokumentasjon ble gitt ut.

I prosjektet Moholt 50|50 ble en viktig del av brannsikkerhetsdokumentasjonen tilbakeholdt, og her ble det i stedet gjennomført en analyse hvor resultater fra branntester funnet i litteraturen ble benyttet til å fremheve og diskutere konsekvensen av viktige branntekniske utfordringer som må hensyntas for å sørge for at brannsikkerheten ivaretas i dette prosjektet. Dette er en analyse som tar for seg utfordringer som anses som allmenngyldige for brannteknisk prosjektering av høye trehus, og den er derfor blitt inkludert som en del av oppgavebesvarelsen.

Alt av brannsikkerhetsdokumentasjon fra Treet i Bergen ble holdt tilbake, og dette prosjektet ble det derfor vanskelig å gjøre en faglig vurdering av.

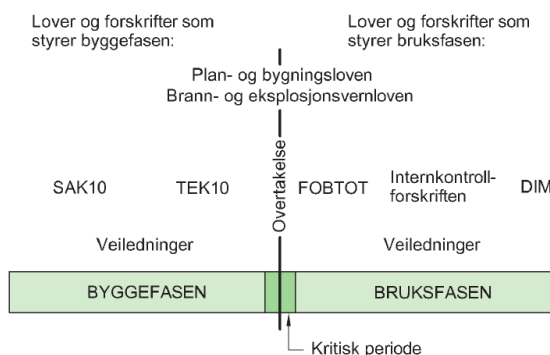


# Kapittel 3

## Teoretisk grunnlag

### 3.1 Lover og forskrifter som styrer byggeprosessen

Plan- og bygningsloven (PBL) er det øverste plandokumentet for byggesaker i Norge, og den gir rammeverket for hvordan alle byggesaker skal foregå [18].



**Figur 3.1:** Lover og forskrifter [8]

Plan- og bygningsloven har flere forskrifter som utfyller reglene gitt i Plan- og bygningsloven, og figur 3.1 viser hvilke lover og forskrifter som er aktuelle for brannrådgiveren i bygge- og bruksfasen av et bygg.

Byggesaksforskriften (SAK10) styrer selve byggeprosessen. Forskriften skal sørge for at man har en effektiv og forsvarlig saksbehandling og gjennomføring, blant annet gjennom å angi tiltaksklasser, stille krav om uavhengig kontroll, samt gi kvalifikasjonskrav for de involverte parter [47].

Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift, TEK10) angir funksjonskrav for bygninger. Disse funksjonskravene er minimumskrav som skal sikre at ulike hensyn er ivaretatt, blant annet sikkerhet ved brann [48].

Brann- og eksplosjonsvernloven stiller krav til arbeid som skal utføres for å verne mot brann og eksplosjoner. Dette er krav om forebyggende tiltak, internkontroll, systematisk HMS-arbeid og liknende [36].

Forkrift om brannforebygging er en forskrift som ivaretar/utfyller brann- og eksplosjonsvernloven for bygninger i bruksfasen. Forskriften angir krav og bestemmelser som skal sørge for vern av liv, helse, miljø og materielle verdier mot brann og eksplosjon [38].

Internkontrollforskriften angir krav til systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter, og danner rammeverket for kontinuerlig kontroll og oppfølging av sikkerheten i bygninger i bruk [2].

Dimensjoneringsforskriften, DIM regulerer hvordan brannvesenet dimensjoneres i kommunen ut i fra det gitte trusselbildet [37].

Forskrift om brannforebygging, Internkontrollforskriften og DIM er forskrifter som skal ivareta sikkerheten i bruksfasen, og gjelder fra bygningens første bruksdag. Disse er derfor mindre viktige i et prosjekteringsperspektiv. En kritisk fase i sikkerhetsarbeidet er i overgangen mellom byggefase og bruksfase, hvor rutiner og prosedyrer for bruk av bygningen ikke er innarbeidet. Det er derfor viktig med god opplæring før bygningen tas i bruk, og det må leveres god dokumentasjon for brannsikkerheten fra byggefasen [8].

### 3.1.1 TEK10 - En funksjonsbasert forskrift

TEK10 ble innført 01.07.2010, og erstattet den daværende byggetekniske forskriften, TEK97. Av viktige branntekniske endringer som kom med TEK10 var blant annet et økt fokus på en utforming som passer for alle mennesker uavhengig av funksjonsevne, universell utforming.

TEK97 var den første såkalte funksjonsbaserte forskriften som ble innført i Norge. Den erstattet den tidligere ytelsesbaserte forskriften Byggeforskriften av 1987. En funksjonsbasert forskrift er en mindre rigid forskrift som gir et større spillerom med tanke på valg av løsninger, materialer og lignende [26]. Forskjellen mellom en funksjonsbasert og en ytelsesbasert byggeforskrift er at den funksjonsbaserte forskriften fokuserer på hva man skal oppnå, mens den ytelsesbaserte forskriften fokuserer på hvordan dette skal oppnås. Der en ytelsesbasert (preskriptiv) forskrift angir absolutte krav til de ulike bygningstekniske løsningene angir en funksjonsbasert forskrift i stedet krav til hvilken funksjon de ulike bygningsdelene skal oppfylle, og disse kravene kan så oppfylles på ulike måter.

En funksjonsbasert forskrift kan beskrives som en resultatorientert eller målorientert

forskrift [50], og forskriftens overordnede hensikt i et brannsikkerhetsperspektiv er å imøtekomme og tilfredsstille målsetninger for brannsikkerheten. Oppfyllelse av forskriftskravene går ut på at den branntekniske prosjekteringen oppfyller fastsatte mål, slik at man ender opp med et resultat hvor samfunnets sikkerhet er ivaretatt. I TEK10 oppsummeres disse målene i §11-1, 1.ledd:

“ Bygverk skal prosjekteres og utføres slik at det oppnås tilfredsstillende sikkerhet ved brann for personer som oppholder seg i eller på byggverket, for materielle verdier og for miljø- og samfunnsmessige forhold [48]. ”

Dette hovedformålet kan brytes ned i tre målsetninger for brannsikkerheten: Person-sikkerhet, materiell sikkerhet og miljø- og samfunnsmessig sikkerhet. Person-sikkerhet handler om sikkerheten til de som oppholder seg i bygningen, samt sikkerheten til redningsmannskapene ved en brann [74]. Materiell sikkerhet omfatter selve bygnings-kroppen og bygningens innhold, samt mer sekundære verdiaspekter som uavbrutt drift av bygningen og beskyttelse av virksomhetens omdømme. Miljø- og samfunnsmessig sikkerhet handler om å unngå farlige utslipp som følge av en brann.

Sikkerheten for liv og helse kommer i første rekke, og ved å sørge for at denne sikkerheten ivaretas vil man vanlgivis også oppnå tilfredsstillende sikkerhet for materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold. Person-sikkerheten ivaretas ved at det gjøres materialvalg som ikke har en negativ innvirkning i en brannsituasjon, samt at bygningen utformes på en måte som ikke gir uakseptabel spredning av brannen. I tillegg til dette tar man i bruk aktive og passive brannsikkerhetstiltak som har som formål å øke tilgjengelig og redusere nødvendig rømningstid [48].

### **Veiledning til teknisk forskrift (VTEK)**

VTEK er myndighetenes tolkning av teknisk forskrift, hvor de angir “løsningsforslag” for å oppfylle funksjonskravene i teknisk forskrift, i form av preaksepterte ytelser. Dersom en følger VTEK er kravene i TEK10 tilfredsstilt, uten at dette må dokumenteres ytterligere. Her er det viktig å skille mellom krav i forskriften og krav i veiledningen. Funksjonskrav i forskriften er krav som må følges, mens ytelseskrav i veiledningen er krav som kan følges. Dersom man har manglende oppfyllelse av et krav i TEK10 oppstår det et avvik som må utbedres og lukkes før bygningen kan godkjennes, mens dersom man har manglende oppfyllelse av krav i VTEK oppstår det et fravik. Dersom man har et fravik må man dokumentere at den valgte løsningen som fraviker fra VTEK sine preaksepterte ytelser også oppfyller funksjonskravene gitt i TEK10 [13].

## 3.2 Brannteknisk prosjektering

Byggverk skal altså prosjekteres på en måte som sørger for at personer, materielle verdier og miljø- og samfunnsmessige forhold sin sikkerhet er ivaretatt i en eventuell brannsituasjon [48]. Dette gjøres ved at en prosjekterer bygget slik at det oppfyller funksjonskrav gitt i TEK10. Dette kan gjøres ved å følge ett av to hovedprinsipper: Prosjektering i henhold til preaksepterte ytelser (forenklet prosjektering) eller prosjektering ved analyse.

Prosjektering i henhold til preaksepterte ytelser går ut på at man følger de preaksepterte ytelsene angitt i VTEK for å oppfylle funksjonskravene. Prosjektering ved analyse innebærer at man velger ytelser og løsninger og verifiserer at sikkerheten tilfredsstillende forskriftskravene gjennom analyse.

Det er vanlig å benytte seg av en blandingsmodell, hvor man kombinerer preakseptert og analytisk prosjektering. Det velges preaksepterte løsninger så lenge dette er hensiktsmessig og mulig (kostnadmessig, ut i fra den gitte projektrammen osv.), og der man velger å fravike fra preaksepterte løsninger må det dokumenteres at sikkerheten som et minimum er like god som ved preakseptert løsning.

Den analytiske prosjekteringen kan i henhold til *NS 3901 - Krav til risikovurdering av brann i byggverk* [56] baseres på enten en komparativ analyse eller en risikoanalyse. I tillegg til å anvende denne standarden kan andre analyseteknikker benyttes for å påvise oppfyllelse av forskriftskrav, som for eksempel Computational Fluid Dynamics (CFD)-analyser. Mens analysemetoder angitt i NS 3901 er komparative eller risikobaserte analyser er en CFD-analyse en konsekvensbasert analyse hvor man ved hjelp av numeriske simuleringer modellerer brannforløp i byggverket og analyserer konsekvensen av de simulerte brannforløp [67].

### 3.2.1 Brannsikkerhetsstrategi

For å oppnå de fastsatte målene (personsikkerhet, materiell sikkerhet og miljø- og samfunnsmessig sikkerhet) utarbeides det en strategi for brannsikkerheten. Denne brannsikkerhetsstrategien er en overordnet plan for hvordan bygningens brannsikkerhet skal ivaretas. Den består av en kombinasjon av aktive, passive og organisatoriske tiltak som samlet skal sørge for at sikkerheten i en brannsituasjon er på et akseptabelt nivå [74]. Ved utarbeidelse av brannsikkerhetsstrategien tar man utgangspunkt i avgjørende faktorer som byggets utforming, plassering, bruk og brukere, og utarbeider en brannteknisk hovedutforming som tilfredsstillende funksjonskravene i TEK10 [8].



### 3.2.2 Brannsikringstiltak: Aktive, passive og organisatoriske tiltak

Brannsikringstiltak benyttes for å øke tilgjengelig rømningstid og redusere nødvendig rømningstid, og dermed sørge for tilfredsstillende sikkerhet ved brann. Brannsikringstiltakene skal også bidra til å sikre bygningstekniske verdier. Man kan velge å bruke aktive brannsikringstiltak, passive brannsikringstiltak, eller en kombinasjon av disse.

#### Aktive brannsikringstiltak

Aktive brannsikringstiltak er tiltak som må aktiveres av personer eller som er automatiske systemer for å hindre eller kontrollere en brann, varsle brann og lede personer til sikkert sted [6]. Eksempler på aktive brannsikringstiltak er sprinkleranlegg, vanntåkesystem, røykventilasjon, ledesystem og brannalarmanlegg.

#### Passive brannsikringstiltak

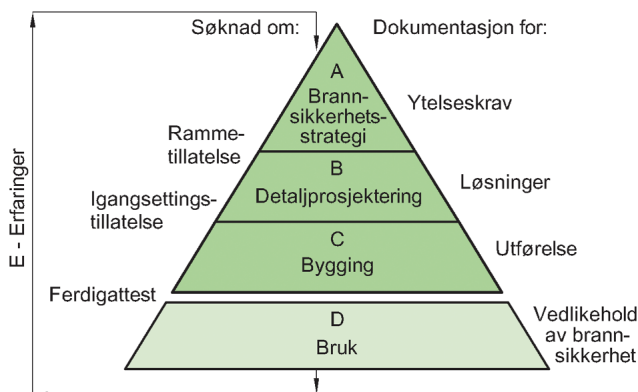
Passive brannsikringstiltak er tiltak som alltid er til stede, og som ikke krever aktivering av personer eller automatikk [6]. Dette er iboende brannsikringstiltak, som for eksempel inndeling av bygninger i brannceller, hensiktsmessig materialvalg og en god planløsning som legger til rette for effektiv rømning ved brann.

#### Organisatoriske tiltak

Organisatoriske tiltak er interne eller eksterne drifts-, vedlikeholds- og beredskapsmessige brannsikringstiltak som skal bidra til at brannsikkerheten ivaretas [44]. Dette er for eksempel planlagte aktiviteter som rutinemessige brannøvelser og rutinemessig vedlikehold og kontroll av brannsikkerheten i bygget. Den branntekniske prosjekteringen anbefales ikke å basere seg på organisatoriske tiltak, da dette er forhold som lett kan endre seg i bygningens bruksfase [10].

## 3.3 Dokumentasjon av brannsikkerheten

Den branntekniske prosjekteringen skal sørge for at brannsikkerhetsnivået i bygningen er i henhold til de gjeldende lover og forskrifter. Dette innebærer oppfyllelse av funksjonskravene i TEK10, og oppfyllelsen av disse kravene må dokumenteres. TEK10 Kapittel 2: *Dokumentasjon av oppfyllelse av krav* gir rammeverket for denne dokumentasjonen. Dokumentasjonens hensikt er både å skape et kontrollsystem for å sikre at den branntekniske prosjekteringen utføres som den skal i alle byggeprosjekter, samt at den fungerer som en veileder for å opprettholde den prosjekterte brannsikkerheten i byggets bruksfase. Dokumentasjonen av brannsikkerheten forteller byggets brukere hvilke forutsetninger og premisser som er lagt til grunn for den branntekniske prosjekteringen, og dette er da forutsetninger og premisser som må være gjeldende



**Figur 3.2:** De ulike nivåene for brannsikkerhetsdokumentasjon [8]

dersom brannsikkerheten i bruksfasen skal være som tiltenkt. Det kan for eksempel dukke opp endringer i bygningens bruksområde som fører til at bruksforutsetninger fra prosjekteringen ikke lenger er gjeldende, og da vil en grundig og utfyllende dokumentasjon vise at nødvendige tiltak må gjøres [48]. Brannsikkerhetsdokumentasjonen kan deles inn i fire nivåer, se figur 3.2.

Der teknisk forskrift angir “ferdig tolkede” funksjonskrav i form av ytelseskrav skal disse kravene følges. Slike krav kan sammenlignes med kravene i de tidligere preskriptive byggeforskriftene. Der forskriften kun angir funksjonskrav kan verifikasjon av oppfylte forskriftskrav skje på én av to måter:

1. Ved at man benytter seg av preaksepterte ytelser i VTEK. Disse ytelsene representerer et minimumsnivå for oppfyllelse av forskriftens krav.
2. Ved at man fraviker fra VTEKs preaksepterte ytelser og verifiserer kravoppfyllelse gjennom fraviksanalyse

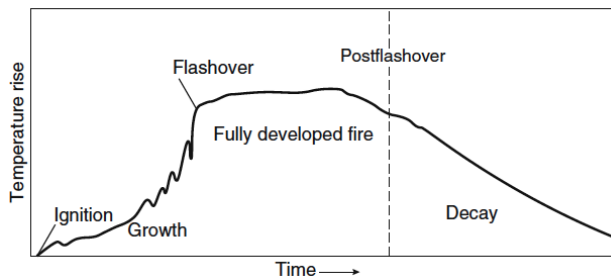
Dokumentasjonsbehovet er vesentlig større dersom man fraviker fra VTEK, da man må gjennomføre en analyse som viser at valgte løsninger er minst like gode som de preaksepterte ytelsene. Omfanget av denne analysen avhenger av fravikets omfang, og byggets kompleksitet [13].

### 3.4 Brannforløp

Brannsikkerhetsstrategien er en plan for hvordan man skal oppfylle brannsikkerhetsmålene for byggverket. Denne planen sier noe om hva som skal skje dersom det begynner å brenne, og man er dermed avhengig av å vite hvordan selve brannen vil

utarte seg dersom strategien skal fungere som planlagt. Et bygg med fem eller flere etasjer havner i brannklasse 3, og bæresystemet må dimensjoneres for et fullstendig brannforløp. I det følgende vil et vanlig brannforløp presenteres, samt ulike måter å simulere brannforløp på.

Figur 3.3 illustrerer hvordan en brann i et rom, for eksempel i en branncelle, vil arte seg dersom den får utvikle seg fritt. Det er vanlig å dele en slik rombrann inn i fem ulike stadier: Antennelse, vekst, overtenning, fullt utviklet brann og avkjøling [72]. Disse fem stadiene kan videre deles inn i to hovedstadier: Stadiet før overtenning og stadiet etter overtenning.



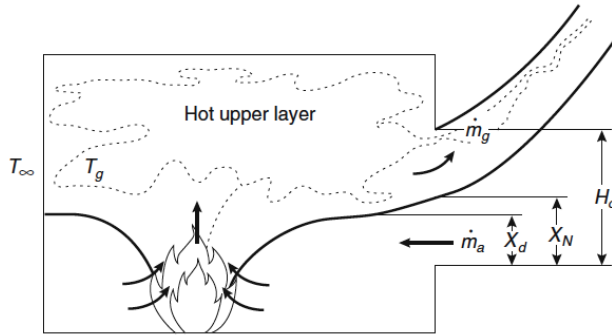
**Figur 3.3:** Vanlig beskrivelse av et brannforløp [72]

### 3.4.1 Vekststadiet

Etter antennelse vokser brannen i et tempo som avhenger av tilgangen på brennbart materiale i brannrommet, samt ventilasjonsforholdene og romgeometrien [5]. Dersom en brann har tilstrekkelig tilgang på oksygen til å opprettholde forbrenningsprosessen sier man at brannen er brenselkontrollert [72], da det er brannens tilgang på forbrenningsprodukter som er begrensende for videre utvikling. Dersom det er såpass mye brennbart materiale tilgjengelig at det ikke er nok oksygen til stede til å forbrenne det, sier man at brannen er ventilasjonskontrollert. I denne tidlige fasen er det hovedsakelig tilgangen på brensel (mengde, karakteristikk og geometri) som avgjør brannens forbrenningshastighet, og brannen er brenselkontrollert [39].

Perioden før overtenning er den delen av et brannforløp som er mest kritisk for personsikkerheten i en bygning [6]. Desto lenger denne perioden varer, desto mer tid får man til både personevakuering og slokking av brannen før den går til overtenning. Brannens veksthastighet og tiden fram til overtenning er derfor avgjørende for faren en brann utgjør, og da spesielt med tanke på personsikkerheten.

Det er vanlig å beskrive hva som skjer i en rombrann før overtenning (i vekststadiet) ved hjelp av en idealisert modell som deler rommet horisontalt inn i to soner: en “varm sone” og en “kald sone” [39], se figur 3.4. Denne modellen illustrerer



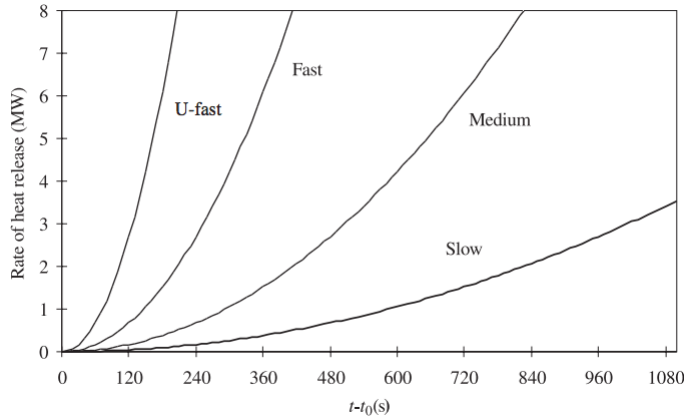
**Figur 3.4:** Sonemodell [72]

varmetransportmekanismene før overtenning, og den kan benyttes til å beregne temperaturen før overtenning. Denne såkalte *sonemodellen* kan forklares på følgende vis: Ved antenning i et rom oppstår det en forbrenningsprosess som avgir varme forbrenningsprodukter. Disse forbrenningsproduktene er varmere, og dermed lettere, enn omgivelsestemperaturen, og de stiger opp mot rommets himling i en røyksøyle. Røyksøylen brer seg ut under himlingen og danner et lag med varme gasser, og dette laget vokser seg tykkere etterhvert som det tilføres mer varme gasser fra brannens røyksøyle. Man har et markant skille mellom det øvre, varme laget og det nedre laget i rommet. Når det varme røyklaget under himlingen har vokst seg så tykt at det kommer i kontakt med ventilasjonsåpninger i rommet vil den varme lufta strøme ut av rommet, og kald uteluft vil strøme inn [15]. Denne modellbeskrivelsen kan brukes til å definere det varme laget som et kontrollvolum, og ved hjelp av energibevaring kan man sette opp en energibalanse og beregne temperaturutviklingen.

En metode for å karakterisere brannens utvikling i vekststadiet er å benytte en såkalt  $t^2$ -brannkurve. Dette gir en parabelformet vekstkurve for den raskt aksellererende varmeavgivelsesraten i brannens vekststadie, se likning 3.1 og figur 3.5.

$$\dot{Q} = \alpha_f(t - t_0)^2 [kW] \quad (3.1)$$

Varmeavgivelsesraten er altså proporsjonal med kvadratet av tiden, og proporsjonalitetskonstanten  $\alpha_f$  er en brannvekstkoeffisient som justerer kurven for å tilpasse den til ulike brannvekstscenarier [15]. Tabell 3.1 viser ulike verdier for  $\alpha_f$  med tilhørende brannscenarier.



**Figur 3.5:** Vekstkurver for  $t^2$ -brann, med brannvekstkoeffisienter gitt i tabell 3.1 [15]

Beskrivelse	Typisk scenario	$\alpha_f [kW/s^2]$
Slow	Tettpakkede papirprodukter	0.00293
Medium	Tradisjonell madrass, tradisjonell lenestol	0.01172
Fast	PU-madrass, PE-paller	0.0469
Ultrafast	PE-skumplast	0.1876

**Tabell 3.1:**  $t^2$ -parametre [15]

### 3.4.2 Overtenning

Dersom brannen får utvikle seg gjennom vekststadiet i figur 3.3 uten å slokke som følge av mangel på forbrenningsprodukter eller oksygen, eller ved aktiv slokking ved hjelp av sprinkleranlegg, brannsløkkingsapparat eller liknende, vil rommet etterhvert overtennes. Overtenning er definert som overgangen fra en voksende til en fullt utviklet brann hvor alt brennbart materiale er involvert i brannen [72]. I tillegg til denne generelle, kvalitative definisjonen har det blitt utviklet flere andre definisjoner på hva som karakteriserer overtenning. Det er blant annet funnet at i en vanlig rombrann inntreffer overtenning når temperaturen i det varme røyklaget i himlingen er ca. 600 °C, og varmestrålingsfluksen fra dette laget til gulvet er rundt 20  $kW/m^2$  [15]. For å estimere hvor stor varmeavgivelsesraten minimum må være for at overtenning skal inntreffe kan likning 3.2 benyttes:

$$\dot{Q}_{FO} = 7.8A_t + 378A_v\sqrt{H_v} \quad (3.2)$$

Her er  $A_t$  rommets totale indre overflateareal,  $A_v$  er arealet av ventilasjonsåpningen i rommet og  $H_v$  er høyden til ventilasjonsåpningen. Dersom alt brennbart materiale i

rommet kan beskrives gjennom en  $t^2$ -brannkurve, kan man dermed kombinere likning 3.1 og likning 3.2 for å få et grovt estimat på tiden fram til overtenning inntreffer [6].

### 3.4.3 Fullt utviklet brann

Etter overtenning er brannen fullt utviklet, og det er i dette stadiet at varmeavgivelsesraten fra brannen er på sitt største [72]. Hovedfokuset for brannsikkerheten flyttes fra personsikkerhet til å sikre konstruksjonens strukturelle integritet, og generell materiell sikkerhet [5]. Bygningsdelenes brannmotstand er derfor viktig i dette stadiet, for å forhindre både bygningskollaps og brannspredning. I den fullt utviklede brannen gjennomgår alle brennbare overflater pyrolyse, og det produseres vanligvis en større mengde brennbare gasser enn det som kan forbrennes med den tilgjengelige oksygenen i rommet [72]. Brannen er da ventilasjonskontrollert, og forbrenningsraten begrenses av mengden kald luft som kan tilføres rommet og mengden varm luft som kan ventileres vekk [17]. I en ventilasjonskontrollert, fullt utviklet brann i et rom vil overskuddsgasser (brennbare) transporteres ut gjennom åpninger i rommet (vinduer og lignende), og brenne utenfor rommet [72]. Dette kan føre til spredning av brannen.

### 3.4.4 Avkjøling

Etter hvert som brannen konsumerer det brennbare materialet i rommet går varmeavgivelsesraten, og dermed også temperaturen, ned [72]. Avkjølingsstadiet betegnes ofte som perioden etter at den gjennomsnittlige temperaturen har falt til 80% av den maksimale temperaturen som ble oppnådd i den fullt utviklede brannen, og at brannen går fra å være ventilasjonskontrollert til å være brenselkontrollert [15]. Avkjølingsraten avhenger av hva slags brennbart materiale som er tilgjengelig (geometri og materialegenskaper), størrelsen på ventilasjonsåpninger, samt overflatekledningenes termiske egenskaper [6].

### 3.4.5 Brannkurver

Ved prosjektering av konstruksjonselementer er det nødvendig å estimere branneksponeeringen konstruksjonen forventes å bli utsatt for i en brannsituasjon. Dette gjøres ofte ved å modellere forventet brannforløp ved hjelp av nominelle eller parametriske temperatur-tidkurver [29].

#### Nominelle kurver

De nominelle brannkurvene modellerer et brannforløp uten avkjølingsfase, og uten å ta hensyn til rommets geometri, ventilasjonsåpninger, brannlast eller skillekonstruksjonenes termiske egenskaper [39]. Den nominelle brannkurven som brukes mest i brannteknisk prosjektering av bygninger er standard temperatur-tidkurven [74], som er gitt ved likning 3.3. Ved testing av brannmotstanden til bygningsmaterialer

etter ISO 834-standarden er det standard temperatur-tidkurven som benyttes, og den angitte brannmotstanden til bygningsmaterialer korresponderer dermed til en branneksponering som følger denne kurven [6].

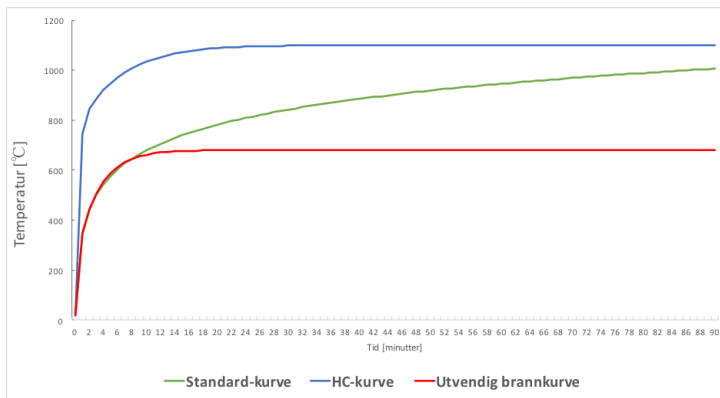
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.3)$$

I tillegg til standard temperatur-tidkurven angir NS-EN 1991-1-2 to andre nominelle brannkurver, brannkurve for hydrokarbonbrann (likning 3.5) og utvendig brannkurve (likning 3.4) [57].

$$\theta_g = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.4)$$

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.5)$$

I likning 3.3, 3.4 og 3.5 er  $\theta_g$  gasstemperaturen i branncellen, og  $t$  er tid. Figur 3.6 viser en grafisk fremstilling av de tre nominelle temperatur-tidkurvene.



**Figur 3.6:** Nominelle temperatur-tidkurver

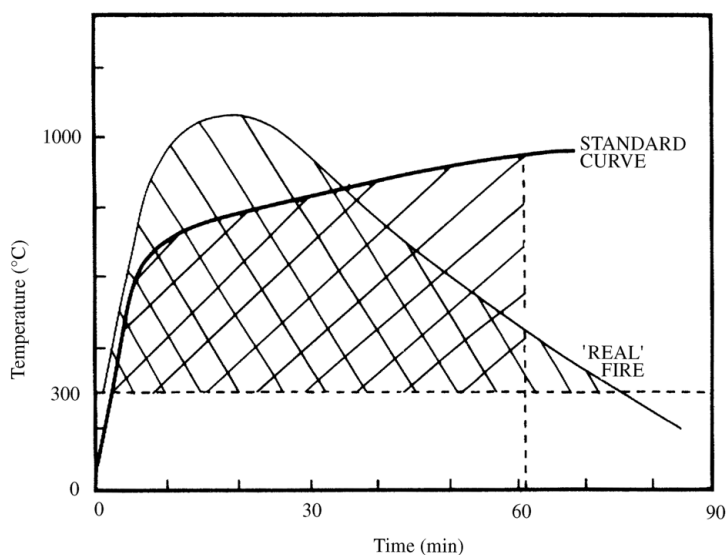
### Parametriske kurver

Parametriske brannkurver muliggjør modellering av brannforløp basert på situasjonsspesifikke parametre som brannlast, ventilasjonsåpninger og omhyllingsflatenes termiske egenskaper [6]. Parametriske brannkurver modellerer hele brannforløpet, inkludert avkjølingsfasen [74]. I henhold til NS-EN 1991-1-2 beregnes parametriske temperatur-tidkurver ved hjelp av én likning for oppvarmingsfasen, én likning for maksimumtemperaturen i oppvarmingsfasen og én likning for avkjølingsfasen [57].

## 3.5 Brannenergi og branneksporing

### 3.5.1 Ekvivalent branneksporingstid

På bakgrunn av en observert forskjell mellom branneksporing etter standard temperatur-tidkurven og en virkelig branneksporing utviklet Ingberg(1928) [33] konseptet om equal area [15], og selv om dette konseptet er både teknisk og teoretisk utilstrekkelig så illustrerer det hva som menes med ekvivalent brannalvorlighet [6]. Figur 3.7 viser dette equal area-konseptet, som går ut på at to branner har samme alvorlighetsgrad dersom arealet under de to brannkurvene over en gitt referansetemperatur er likt.



**Figur 3.7:** Ingbergs equal area-hypotese [15]

NS-EN 1991-1-2 Tillegg F angir en metode for å beregne ekvivalent branneksporingstid,  $t_{e,d}$  [57]:

$$t_{e,d} = (q_{f,d} * k_b * w_f) k_c \text{ med hensyn på gulvareal} \quad (3.6)$$

eller

$$t_{e,d} = (q_{t,d} * k_b * w_t) k_c \text{ med hensyn på totale omhyllingsflater} \quad (3.7)$$

$q_{f,d}$  og  $q_{t,d}$  er dimensjonerende spesifikk brannenergi med hensyn på henholdsvis gulvareal og areal av omhyllingsflater. De andre faktorene er korreksjonsfaktorer som justerer for ulike forhold:



- $k_b$  er en omregningsfaktor som tar hensyn til de termiske egenskapene til de omsluttende bygningsdelene: massetetthet, varmekapasitet og varmelednings-  
evne.
- $k_c$  er en faktor som justerer for materialbruk, ved å korrigere ekvivalent brann-  
eksponeringstid avhengig av analysens tverssnittsmateriale. For stål og armert  
betong settes denne faktoren lik 1.
- $w_f$  og  $w_t$  er ventilasjonsfaktorer som justerer den ekvivalente brannekspone-  
ringstiden etter om brannen er brenselkontrollert eller ventilasjonskontrollert.

### 3.6 Klassifisering

I TEK10 stilles det krav til bygningsmaterialers branntekniske egenskaper, samt bygningsdelers brannmotstand [48].

#### 3.6.1 Klassifisering av bygningsdelers brannmotstand

Det angis ytelseskriterier til bygningdelers brannmotstand, se tabell 3.2.

Symbol	Ytelsesevne
R	<b>Stabilitet:</b> En bygningsdels evne til å opprettholde sin lastbærende funksjon
E	<b>Integritet:</b> En skillende bygningsdels evne til å forhindre flammer og varme gasser i å trenge gjennom bygningsdelen fra eksponert til ueksponert side, og forhindre at det oppstår flammer på ueksponert side.
I	<b>Isolasjonsevne:</b> En skillende bygningsdels evne til å hindre temperaturøkning over et angitt nivå på ueksponert side.
M	<b>Mekanisk motstand:</b> Evnen til å motstå horisontalkrefter, eksempelvis fra kollapsende bjelker i en brannsituasjon

**Tabell 3.2:** Ytelseskrav for bærende og skillende konstruksjoner [13]

Disse ytelseskriteriene er brukt for å definere et mål for de mest sentrale egenskaper en bygningsdel må inneha for å oppnå en ønsket/påkrevd brannmotstand. For eksempel betyr et krav om REI90 at bygningsdelen skal bevare stabilitet, integritet og isolasjon i minimum 90 minutter.

### 3.6.2 Klassifisering av bygningsmaterialers brannpåvirkning

Bygningsmaterialer klassifiseres etter deres bidrag til/påvirkning på en eventuell brann. Det har blitt innført et felles europeisk klassifiseringssystem, Euroklassesystemet. Dette systemet skal gi et felles grunnlag for klassifisering av bygningsmaterialer innad i EØS, bl.a. for å legge til rette for handel på tvers av medlemsland [70]. Klassifiseringssystemet er basert på hvor raskt og hvor betydelig et materiale bidrar til brannen, samt hvilken røykproduksjon materialet gir. Euroklassesystemet deler inn produkter i klasser, hvor disse er A1, A2, B, C, D, E og F. A1 og A2 betyr at materialet har ingen påvirkning på brannen. I tillegg er det klasser som angir røykproduksjon, s1, s2 og s3, samt klasser for produksjon av brennende dråper, d0, d1 og d2 [34]. Se tabell 3.3 som oppsummerer euroklassene, og gir eksempler på produkter som havner i de ulike klassene.

Klasse	Ytelsesbeskrivelse	Produkteksempler
A1	Ingen bidrag til brann	Naturstein, betong, mur, stål
A2	Ingen bidrag til brann	Produkter som i A1, samt noen organiske komponenter
B	Svært begrenset bidrag til brann	Gipsplater med tynn overflatekledning, treverk med brannbeskyttende behandling
C	Begrenset bidrag til brann	Gipsplater med tykkere overflatekledning enn klasse B, fenolskum
D	Akseptabelt bidrag til brann	Treprodukter
E	Akseptabelt bidrag til brann	Plastprodukter
F	Ingen ytelseskrav	Ingen produkter testet

**Tabell 3.3:** Euroklasser [34]

I følge Euroklassesystemet vil vanlige trematerialer oppnå klasse D-s2,d0, mens brannimpregnet trevirke kan oppnå klasse B-s1,d0 [25].

## 3.7 Tre som bygningsmateriale

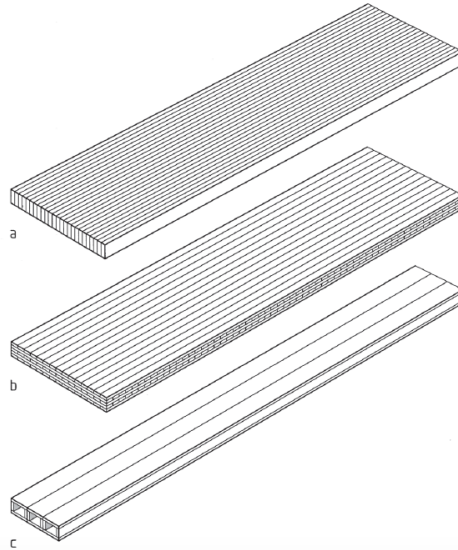
### 3.7.1 Limtre

Limtre er konstruksjonskomponenter som er bygget opp av sammenlimte heltrelameller med hovedsakelig parallell fiberretning. Limtre kan blant annet brukes som hovedbjelker og søyler i boligbygg, delstaver i fagverkskonstruksjoner og hoved- og/eller sekundærkonstruksjoner i større byggverk. I Norge produseres limtre for det

meste av gran- eller furulameller med en tykkelse på 40mm. Den totale tykkelsen og lengden på limtreelementer begrenses i all hovedsak av produksjonstekniske og transportmessige forhold [66].

### 3.7.2 Massivtre

Massivtreelementer består som limtreelementer av sammenføyde trelameller, men lamellene i massivtreelementer kan i tillegg til lim være sammenføydd av spiker, skruer, tredybler eller strekkstag. Massivtreelementer kan blant annet benyttes som veggkonstruksjon, etasjeskiller og takkonstruksjon, enten alene eller i kombinasjon med andre materialer og konstruksjonstyper [9]. Man skiller mellom tre hovedtyper massivtreelementer, illustrert i figur 3.8: Kantstilte elementer, krysslagte elementer og hulromselementer. Kantstilte elementer, eller bordstabelementer, produseres ved at lamellene føyes sammen i stående posisjon. I krysslagte flersjiktselementer er lamellene lagt i sjikt som sammenføydes på tvers, 90 grader i forhold til hverandre. Dette gir et tverrsnitt hvor fiberretningen i treverket ligger vekselvis parallelt og normalt på elementets lengderetning. Krysslaminerte massivtreelementer kan leveres med ulikt antall lamellsjikt, samt ulik tykkelse på lamellene [22]. Hulromselementer kan være sammensatt av krysslagte eller parallelle lamellsjikt, med et hulrom mellom det øvre og det nedre lamell-laget.



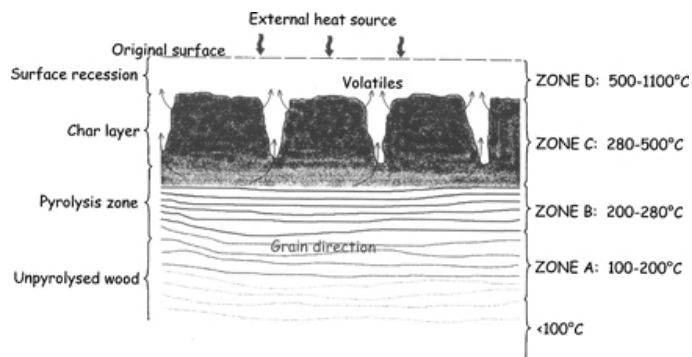
**Figur 3.8:** Hovedtyper massive treelementer [9]

Treverk har ulike mekaniske egenskaper avhengig av fiberretningen. Treverkets E-modul er vesentlig lavere vinkelrett på enn parallelt med fiberretningen, og i krysslagte massivtreelementer har lameller som er orientert vinkelrett på lastretningen derfor et

minimalt bidrag til elementets styrke og stivhet. Forenklet kan man anta at det er kun lamellene som har fiberretning parallelt med lastretningen som er lastbærende lameller [1].

### 3.8 Tre og brann

Tre er et brennbart materiale, men det brenner ikke direkte. Når treet eksponeres for varmeenergi brytes det ned gjennom en prosess kalt pyrolyse [23]. Pyrolyse er en kjemisk, anaerob (uten oksygentilgang) prosess som spalter organiske materialer og danner nye produkter [12]. Pyrolysen som finner sted i varmeeksponert treverk bryter ned treverket og danner tjære, kull og brennbare gasser. Det er ved at disse brennbare gassene transporteres til treet's overflate og reagerer med oksygen at treverket brenner med synlige flammer, samt at kull kan reagere med oksygen og gi ulmebrann [32].



**Figur 3.9:** Temperatursoner i brannekspontert tverrsnitt av tre [23]

Treverk som eksponeres for varme vil oppleve en temperaturøkning. Ved 100°C fordampes vannet, og rundt 110°C begynner såvidt den termiske nedbrytningen (pyrolysen) av treet's hovedbestanddeler, lignin, cellulose og hemicellulose [23]. Ved langvarig varmeeksponering kan denne pyrolysen i form av langtidspyrolyse begynne ved lavere temperaturer, rundt 70°C, og treverk eksponert for en varmekilde over lengre tid kan antennes ved 77°C [3]. Nedbrytningen av treverkets hovedbestanddeler aksellereres etterhvert som temperaturen øker. Mellom 280°C og 300°C dannes et kullag, og dette temperaturområdet gir et tydelig skille mellom bakenforliggende friskt treverk og et ytre forkullingslag. Etter hvert som temperaturen øker innover i tverrsnittet vil denne grensen mellom forkullet og gjenværende treverk forplante seg innover. Hvor raskt forkullingslaget propagerer innover i tverrsnittet beskrives av forkullingsraten, som er en sentral parameter ved brannteknisk dimensjonering av trekonstruksjoner [23].

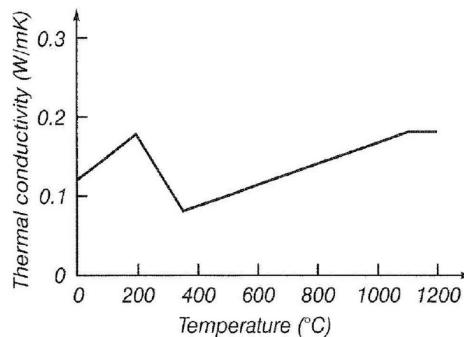
### 3.8.1 Treets egenskaper ved høye temperaturer

I brannteknisk prosjektering er analyse av konstruksjoners oppførsel ved høye temperaturer som følge av tilført varmeenergi i en brannsituasjon en sentral del av å bestemme konstruksjoners sikkerhet dersom en brann oppstår. For å kunne analysere konstruksjonens oppførsel er kjennskap til hvordan materialene oppfører seg når temperaturen øker viktig.

#### Termiske egenskaper

##### Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet,  $\lambda$ , beskriver materialers varmeledningsevne. Lav  $\lambda$  tilsvarer lav varmeledningsevne, eller god varmeisolerende evne. Treverk har en lav varmeledningsevne sammenlignet med mange andre vanlige konstruksjonsmaterialer som for eksempel stål. Figur 3.10 viser hvordan varmekonduktiviteten endrer seg med temperaturen. Fram til 200°C stiger  $\lambda$ , deretter faller den mellom 200°C og circa 350°C, før den stiger jevnt over 350°C. Treverkets lave varmekonduktivitet, selv ved høye temperaturer, gjør at man ved bruk av treverk får en konstruksjon hvor varmen bruker relativt lang tid på å forplante seg gjennom et tverrsnitt, forutsatt at man ikke har utettheter i konstruksjonen. Det er derfor viktig å sørge for at tilslutninger, gjennomføringer o.l. er godt utformet slik at man ikke får områder hvor varmen lett kan bevege seg gjennom konstruksjonen.

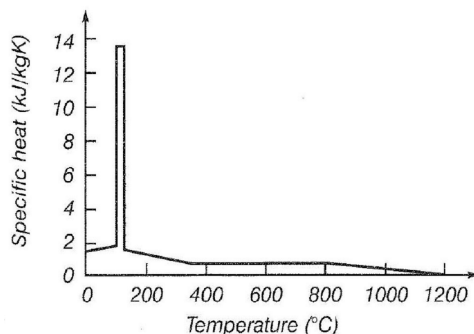


**Figur 3.10:** Variasjon i treets termiske konduktivitet ved temperaturendring [6]

##### Spesifikk varmekapasitet

Spesifikk varmekapasitet er et mål på forholdet mellom tilført varmeenergi og temperaturstigning i materialet, dvs. hvor mye energi som må tilføres for å få en temperaturøkning på én grad. En lav spesifikk varmekapasitet korresponderer altså til stor temperaturstigning ved lite tilført energi. Figur 3.11 viser et stort hopp i spesifikk varmekapasitet for tre ved 100°C, og dette kommer av at det her går med mye varmeenergi til å fordampe vanninnholdet i treverket, fordampingsvarme. Dette betyr at det kreves mye mer varmeenergi for å antenne fuktig treverk, fordi man

må fordampe fuktigheten i treet, og man må dermed innom dette hoppet i spesifikk varmeenergi.



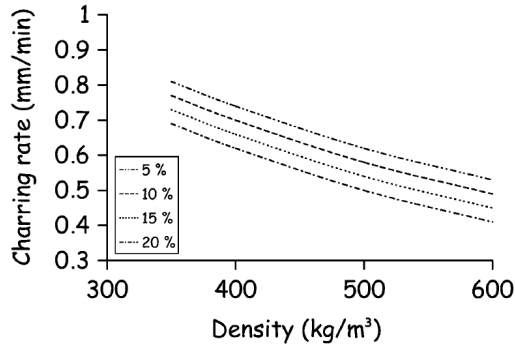
**Figur 3.11:** Variasjon i trets spesifikke varmekapasitet ved temperaturendring [6]

### 3.8.2 Forkullingshastighet

Som tidligere nevnt dannes det et ytre kullag når treverk brenner, og dette kullet isolerer det bakenforliggende treverket mot temperaturstigning. Treverk innenfor forkullingssonen antas å ha tilnærmet full styrke og stivhet, mens det forkullede treverket har null styrke. Plasseringen til denne grensesonen mellom friskt treverk og forkullet treverk gjennom et brannforløp er derfor en viktig del av den branntekniske dimensjoneringen av trekonstruksjoner. Hvor raskt forkullingslaget forplanter seg innover i tverrsnittet beskrives ved hjelp av treverkets forkullingsrate, angitt i mm/min. Det er flere faktorer som påvirker forkullingsraten. Blant disse er:

- Treverkets tetthet,  $\rho$  [ $kg/m^3$ ]: Med økende tetthet reduseres forkullingsraten. Dette kan forenklet forklares med at når tettheten øker blir det en økt masse som må brytes ned gjennom pyrolyse.
- Treverkets fuktinnhold: Konstruksjonstre har vanligvis et fuktinnhold mellom 12% og 16%. Fordamping av fuktinnholdet i treet er en nødvendig prosess forut for pyrolysen. Ved økt fuktinnhold i treet kreves det mer varmeenergi for å fordampe vannet, fordampingsvarme, slik at det er mindre igjen av den tilførte varmen til å bryte ned treet. Økt fuktinnhold gir dermed redusert forkullingsrate.

Noen andre faktorer som påvirker forkullingsraten er treverkets kjemiske sammensetning, varmeeksponeringen og tverrsnittsgeometrien [23].



**Figur 3.12:** Fuktinnholdet og tettheten sin innvirkning på forkullingshastigheten [23]

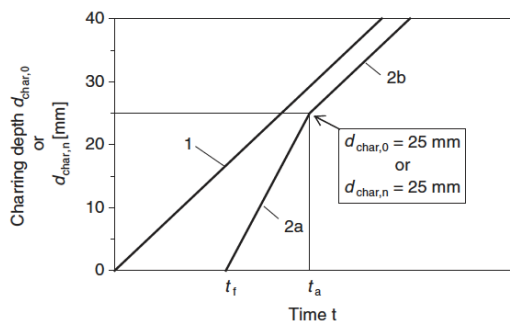
Treprodukt	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\beta_0$ [mm/min]	$\beta_n$ [mm/min]
<u>Bartre og bøk</u>			
-Limtre	$\geq 290$	0.65	0.7
-Heltre/massivtre	$\geq 290$	0.65	0.8
<u>Løvtre</u>	$\geq 290$	0.65	0.7
	$\geq 450$	0.5	0.55
<u>LVL</u>	$\geq 480$	0.65	0.7
<u>Panel</u>			
-Trepanel		0.9	-
- Kryssfinér		1.0	-
- Trebaserte produkter som ikke er kryssfinér		0.9	-

**Tabell 3.4:** Dimensjonerende forkullingsrater for ulike tref typer [58]

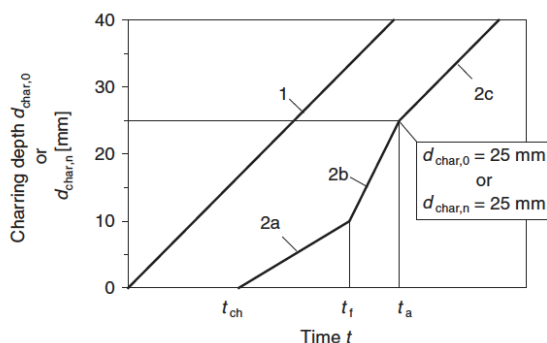
### Forkulling av beskyttet treverk

Ved brannekspnering av treverk med brannbeskyttelse, f.eks. gipsplater, utvikler forkullingshastigheten seg litt annerledes enn for ubeskyttet tre. Ved å beskytte treverket forsinkes man forkullingen, men denne forsinkelsen kan fortone seg ulikt, se figur 3.13. I figuren er kurve 1 forkullingskurven for ubeskyttet treverk, mens kurve 2 er forkullingskurven for initielt beskyttet treverk. Figur 3.13a viser hvordan brannbeskyttelsen forsinkes forkullingen fram til tiden  $t_f$ , hvor beskyttelsen svikter/-faller av. Etter  $t_f$  skjer forkullingen dobbelt så fort som for vanlig ubeskyttet treverk, fram til tiden  $t_a$ . Dette kommer av at man har fått en vesentlig temperaturøkning

mens treverket var beskyttet, uten at det har blitt etablert et kullag som gir varmeisolerende effekt. Ved tiden  $t_a$  har det blitt dannet et 25 mm isolerende kullag, og forkullingsraten blir lik som for ubeskyttet tre.



(a) Beskyttet forkullingsrate fram til  $t_f$  [58]



(b) Beskyttet forkullingsrate med forkulling før  $t_f$  [58]

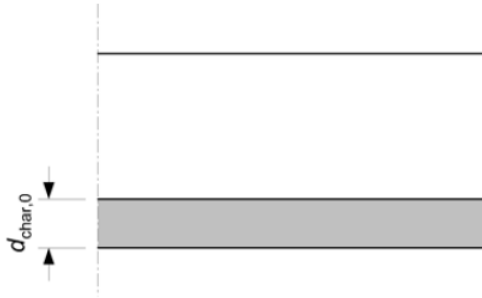
**Figur 3.13:** Beskyttete forkullingsrater

Figur 3.13b viser forkullingsraten i tilfeller hvor forkulling begynner før beskyttelsen faller av. Her gir beskyttelsen en varmeisolerende effekt, noe som gjør at forkullingsraten er lav fram til beskyttelsen faller av ved tiden  $t_f$ . Mellom  $t_f$  og  $t_a$  får man samme oppførsel som beskrevet over, og etter at det er dannet et 25 mm forkullingslag ved tiden  $t_a$  blir forkullingsraten lik som for ubeskyttet tre.

### 3.8.3 Forkullingsdybde

Som nevnt tidligere dannes det et forkullingslag på brannekspontert treverk, og grensen mellom dette forkullede laget og det bakenforliggende, friske treverket er lokalisert rundt  $300^{\circ}\text{C}$ -isoterme. I Eurokode 5 angis det to ulike mål på dybden til denne grensen: Endimensjonal forkullingsdybde og nominell forkullingsdybde [58].



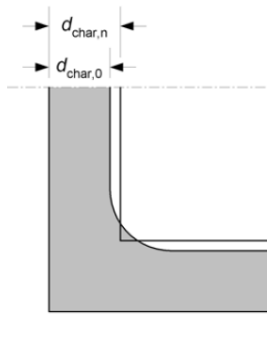


**Figur 3.14:** Endimensjonal forkulling av tverrsnitt [58]

Endimensjonal forkullingsdybde er produktet av den endimensjonale forkullingsraten til trematerialet og branneksponeeringstiden, se likning 3.8.

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad (3.8)$$

- $d_{char,0}$  er dimensjonerende forkullingsdybde for endimensjonal forkulling
- $\beta_0$  er endimensjonal forkullingsrate
- $t$  er branneksponeeringstiden



**Figur 3.15:** Illustrasjon av endimensjonal og nominell forkullingsdybde [58]

Nominell forkullingsdybde tar hensyn til effekter som kommer av hjørneavrundinger og sprekker i tverrsnittet, og her bruker man den nominelle forkullingsraten fremfor den endimensjonale forkullingsraten [58]:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (3.9)$$

- $d_{char,n}$  er dimensjonerende forkullingsdybde for nominell forkulling
- $\beta_n$  er nominell forkullingsrate
- $t$  er branneksponeeringstiden

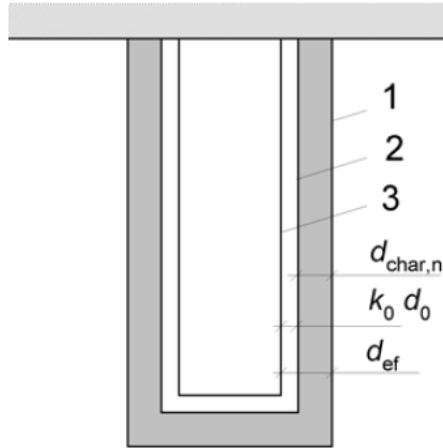
### 3.8.4 Bestemmelse av tverrsnittsegenskaper i Eurokode 5

Eurokode 5 angir to alternative metoder for å bestemme tverrsnittsegenskaper når man skal finne den lastbærende kapasiteten til bjelker og søyler i en brannsituasjon [58].

#### Redusert tverrsnittsmetoden

Ved bruk av denne metoden finner man et effektivt tverrsnitt ved å redusere det opprinnelige tverrsnittet med en effektiv forkullingsdybde,  $d_{ef}$ . Det resterende, effektive tverrsnittet beholder sine opprinnelige egenskaper ( $k_{mod,fi} = 1.0$ ), mens delen av tverrsnittet med tykkelse  $d_{ef}$  har null styrke og stivhet. Effektiv forkullingsdybde regnes ut ved hjelp av likning 3.10.

I Norge er det denne metoden som benyttes.



**Figur 3.16:** Illustrasjon av redusert tverrsnitt [58]

1. Opprinnelig tverrsnittsoverflate
2. Grensen for resterende tverrsnitt (tverrsnittet brukt i reduserte egenskapermetoden)
3. Grensen for effektivt tverrsnitt

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 d_0 \quad (3.10)$$

### Reduserte egenskaper-metoden

Ved bruk av reduserte egenskapermetoden finner man et redusert tverrsnitt ved å trekke fra forkullingslaget. Deretter gir man det gjenværende tverrsnittet reduserte egenskaper med hensyn på bøyestivhet, strekk-, trykk- og bøyefasthet og stivhet ved modifikasjonsfaktoren  $k_{mod,fi}$ . For  $t=0$  er  $k_{mod,fi} = 1.0$ , for  $0 \text{ minutter} \leq t \leq 20 \text{ minutter}$  finner man  $k_{mod,fi}$  ved lineær interpolasjon, og ved  $t > 20 \text{ minutter}$  benyttes likning 3.11, 3.12 og 3.13 for å bestemme  $k_{mod,fi}$ :

For bøyefasthet:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{200} \frac{p}{A_r} \quad (3.11)$$

For trykkfasthet:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{125} \frac{p}{A_r} \quad (3.12)$$

For strekkfasthet og E-modul:

$$k_{mod,fi} = 1.0 - \frac{1}{330} \frac{p}{A_r} \quad (3.13)$$

- $p$  er omkretsen til resterende tverrsnitt [m]
- $A_r$  er arealet til resterende tverrsnitt [ $m^2$ ]

### 3.9 Prosjektering av høye trehus

Overgangen fra preskriptiv/ytelsesbasert til funksjonsbasert forskrift har hatt en vesentlig innvirkning på bruken av tre som konstruksjonsmateriale i Norge. I følge Byggeforskriften av 1987 var bygninger med bæresystem av tre og andre brennbare materialer begrenset til tre etasjer [73], men ved innføringen av funksjonsbaserte forskrifter (TEK97) har man gått over fra materialbegrensning til krav om at brannsikkerheten skal være ivaretatt ved bygging av høyere konstruksjoner. Dette har altså gjort det mulig å bygge bygninger med mer enn tre etasjer med et bærende hovedsystem av tre, såfremt det kan dokumenteres at brannsikkerheten er tilstrekkelig.

#### 3.9.1 Risikoklasser og brannklasser

TEK10 angir ulike risikoklasser, hvor en bygning plasseres i en risikoklasse ut i fra hvilken trussel en eventuell brann vil utgjøre for liv og helse, se tabell 3.5. Risikoklassene baserer seg på hvordan bruken av byggverket innvirker på trusselen mot de som oppholder seg i bygget; for eksempel vil et bygg som er beregnet for sporadisk opphold få en lavere risikoklasse enn et byggverk beregnet for overnatting. Risikoklassen bygningen plasseres i legger grunnlag for alle etterfølgende krav til ytelsesnivå ved prosjekteringen av bygget [48].

Bygninger deles også inn i brannklasser, se tabell 3.6. Inndelingen i brannklasser baserer seg mer på hvilken konsekvens en eventuell brann vil ha for bygningskroppen og byggets omgivelser, altså verdisikkerhetsperspektivet. Høyere risikoklasse angir høyere risiko for liv og helse, og høyere brannklasse angir større konsekvens for verdier og miljø og samfunn [48].

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 3.5:** Risikoklasser [48]

Brannklasse	Konsekvens
1	Liten
2	Middels
3	Stor
4	Særlig stor

**Tabell 3.6:** Brannklasser [48]

En kombinasjon av antall etasjer og risikoklasse gir den aktuelle brannklassen for bygget, se tabell 3.7. Bygningens brannklasse avgjør hvilke krav som må oppfylles mtp. bæreevnen og stabiliteten til bygningens bærende hovedkonstruksjon. For bygninger i brannklasse 1 og 2 sier TEK10 at bæresystemet *“skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i minimum den tid som er nødvendig for å rømme og redde personer og husdyr i og på byggverket”* [48], mens for bygninger i brannklasse 3 og 4 skal bæresystemet *“dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres”* [48]. Hvis en da ser på tabell 3.7 ser en at bygninger i risikoklasse 5 med tre eller flere etasjer og alle bygninger i risikoklasse 2-6 med fem eller flere etasjer må dimensjoneres for fullstendig brannforløp. Dette forskriftskravet medfører en utfordring ved prosjektering av en massivtrekonstruksjon i brannklasse 3. Denne konstruksjonen skal i følge preaksepterte ytelser dimensjoneres for å bli stående etter et brannforløp på 90 minutter, noe som for en betongkonstruksjon eller en stålkonstruksjon er forutsigbart og kontrollerbart å beregne. Ved dimensjonering av en massivtrekonstruksjons bæreevne ved brann er konstruksjonens forkullingshastighet en variabel, og for å oppnå en forutsigbar og kontrollerbar bæreevne er man avhengig

av at verdier for forkullingshastighet som benyttes er korrekte.

Risikoklasse	Etasje			
	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 3.7:** Brannklasse for byggverk [13]

### 3.9.2 Tre brukt som bæresystem i høye trehus

Veiledningen til teknisk forskrift angir preaksepterte ytelsesnivåer for bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse, se tabell 3.8.

Bygningsdel	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R30	R60	R90 A2-s1,d0
Sekundære, bærende bygningsdeler	R30	R60	R60 A2-s1,d0
Trappeløp	-	R30	R30 A2-s1,d0
Utvendig trappeløp	-	R30 eller A2-s1,d0	A2-s1,d0

**Tabell 3.8:** Krav til bærende bygningsdelers brannmotstand avhengig av brannklasse [13]

Som tabell 3.8 viser er det krav om at det brukes ubrennbare materialer i det bærende hovedsystemet i bygninger som plasseres i brannklasse 3. Dette vil si at dersom man ønsker å bygge en bygning med fem eller flere etasjer med et bærende hovedsystem i tre finnes det ingen preaksepterte løsninger i VTEK som kan anvendes. Et slikt bygg krever dermed analytisk prosjektering som utførlig dokumenterer at brannsikkerheten minimum er på et tilsvarende nivå som ved bruk av et hovedbæresystem i for eksempel stål [25]. Hverken ubehandlet treverk med euroklasse D-s2,d0 eller brannbeskyttet treverk med euroklasse B-s1,d0 vil oppfylle VTEK sine materialkrav for bærende hovedsystem i brannklasse 3.

# Kapittel 4

## Litteraturstudie

### 4.1 Introduksjon

På bakgrunn av oppgavens problemstilling er det nødvendig å undersøke eksisterende empiri innenfor området brannsikkerhet i høye trehus. Det har derfor blitt gjennomført en litteraturstudie hvor aktuell forskningslitteratur er gjennomgått og vurdert. Resultater fra denne studien presenteres i dette kapitlet.

### 4.2 Gipsplater og trebaserte plater som passiv brannsikring

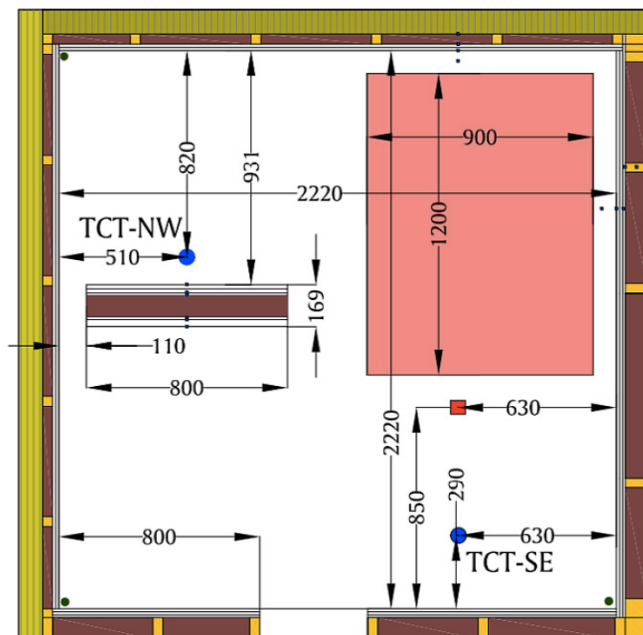
Kolaitis et al. [43] beskriver en fullskala branntest som ble gjennomført med hensikt å vurdere gipsplater og trepanelplater sin evne til å beskytte bindingsverk- og massivtrekonstruksjoner i en brannsituasjon, det vil si en vurdering av gipsplater og trebaserte plater sin funksjonsytelse som passive brannsikkerhetstiltak.

#### 4.2.1 Testoppsett

Testrommet hadde indre dimensjoner 2.22m\*2.22m\*2.11m. Testen ble gjennomført med et vindu i åpen stilling for å sørge for tilstrekkelig ventilasjon, og en branddør som var satt i lukket stilling gjennom hele testen. For å direkte sammenligne oppførselen i en massivtrekonstruksjon og en bindingsverkkonstruksjon i en og samme test var to av veggene i rommet bindingsverkkonstruksjoner og to av veggene samt gulvet var massivtrekonstruksjoner. Bindingsverket var konstruert med 85mm tykke trestendere, med 85mm steinullisolasjon i hulrommene. Denne konstruksjonen var kledd med 10mm kryssfinér samt to lag 12.5mm branngips. Massivtreveggene var bygd opp av 95mm tykke krysslagte massivtrelementer med et 40mm tykt bindingsverk med steinullisolasjon innenfor. Massivtreelementene bestod av fem 19mm tykke lameller Disse veggene var også kledd med to lag 12.5mm branngips. For å kunne sammenligne branngips med trebasert panelbeskyttelse ble det bygget en frittstående bindingsverksvegg inne i rommet. Denne veggen hadde også 85mm stendere med steinullisolasjon i hulrommene, og den var dekket av 10mm kryssfiner. På den ene

siden var veggen kledd med to lag 16mm sponplater, og på den andre siden var det montert to lag 16mm MDF-plater.

For å simulere inventar i branncellen, og dermed simulere et naturlig brannforløp, ble det brukt trekrybber. Dimensjonerende brannlast,  $420MJ/m^2$ , ble estimert ved hjelp av Eurokode 1, med kontorlokale som referanserom. Figur 4.1 viser testrommet med plassering av måleinstrumenter, brensel og frittstående bindingsverksvegg.



**Figur 4.1:** Plantegning som viser testrommet med frittstående bindingsverksvegg og trekrybbe [43]

#### 4.2.2 Resultater

Testen varte i 45 minutter, og i denne tiden fikk brannen utvikle seg fritt inne i rommet. Etter antenning steg gasstemperaturen inne i rommet raskt opp til  $750^{\circ}\text{C}$ , men etter cirka 9 minutter fikk man underventilerte forhold inne i rommet. Det var ikke tilstrekkelig oksygen til stede til å reagere med den raskt voksende konsentrasjonen av forbrenningsprodukter, og det ble registrert et midlertidig temperaturfall. Oksygentilførsel gjennom vinduet førte til at temperaturen inne i rommet begynte å stige igjen etter 11 minutter, og etter 17 minutter var temperaturen  $831^{\circ}\text{C}$  og brannen var fullt utviklet fram til testen ble stoppet etter 45 minutter ved  $700^{\circ}\text{C}$ .



Testen viste at gipsplater gir bedre brannbeskyttelse enn trebaserte plater. Det ble ikke registrert noe forkulling av de gipskleddede konstruksjonene gjennom hele testen, mens den frittstående bindingsverksveggen ble tydelig forkullet etter delvis kollaps av MDF-platen.

Gasstemperaturene som ble målt i det øvre laget i rommet samsvarte bra med ISO-834-kurven, og de viste at ISO-kurven gir en konservativ estimering av temperaturen i den brannsituasjonen som ble skapt i testen. Brannen ble sloknet etter 45 minutter mens den fremdeles var fullt utviklet, og en kan derfor ikke si noe om brannens videre utvikling.

### 4.3 Fullskala test av treetasjes bygning med bærende trekonstruksjon

Frangi et al. (2008) [19] beskriver en fullskala branntest som ble gjennomført i en treetasjes trebygning ved Building Research Institute, Tsukuba University i Japan. Forsøkets formål var å undersøke de branntekniske konsekvensene av å bruke krysslågt massivtre som bærende konstruksjon i bygninger. Forsøket var en del av forskningsprosjektet SOFIE, som fokuserer på konstruksjonsoppførselen til krysslågte massivtreelementer. Dette forskningsprosjektet har som mål å bidra til en økt bruk av treverk i fleretasjes boligbygg ved å produsere dokumentasjon og informasjon om bruk av krysslågt massivtre som konstruksjonselementer. Ved å gjennomføre en slik fullskala test i en treetasjes konstruksjon fikk man muligheten til å se på den globale konstruksjonsoppførselen i en brannsituasjon.

#### 4.3.1 Testbeskrivelse

Testbygningen var en 10 meter høy, treetasjes bygning med bærevegger av krysslågte massivtreelementer og krysslågte massivtreelementer som etasjeskillere. Alle innervegger i bygget var kledd med ett lag vanlig gips og ett lag branngips, se figur 4.2 som viser oppbyggingen av vegger og etasjeskillere. Brannen ble startet i et rom med dimensjonene 3.34m\*3.34m\*2.95m i byggets 2.etasje, med to delvis åpne vinduer. Veggene i rommet var bygget opp av tre 85mm tykke massivtrevegger og en 142mm tykk massivtrevegg. Døren til brannrommet hadde 60 minutter brannmotstandsklassifisering, og var lukket gjennom hele testen. For å simulere brannlast i en boligbygning ble brannrommet innredet med to madrasser og flere trekrybber. I tillegg ble det antatt at gulvet hadde et 50% bidrag til brannlasten, og at vegger og tak ikke bidro i det hele tatt. Dette resulterte i en beregnet total brannlast på 8299MJ, noe som gir en brannlasttetthet på  $790MJ/m^2$ .

### 4.3.2 Testresultater

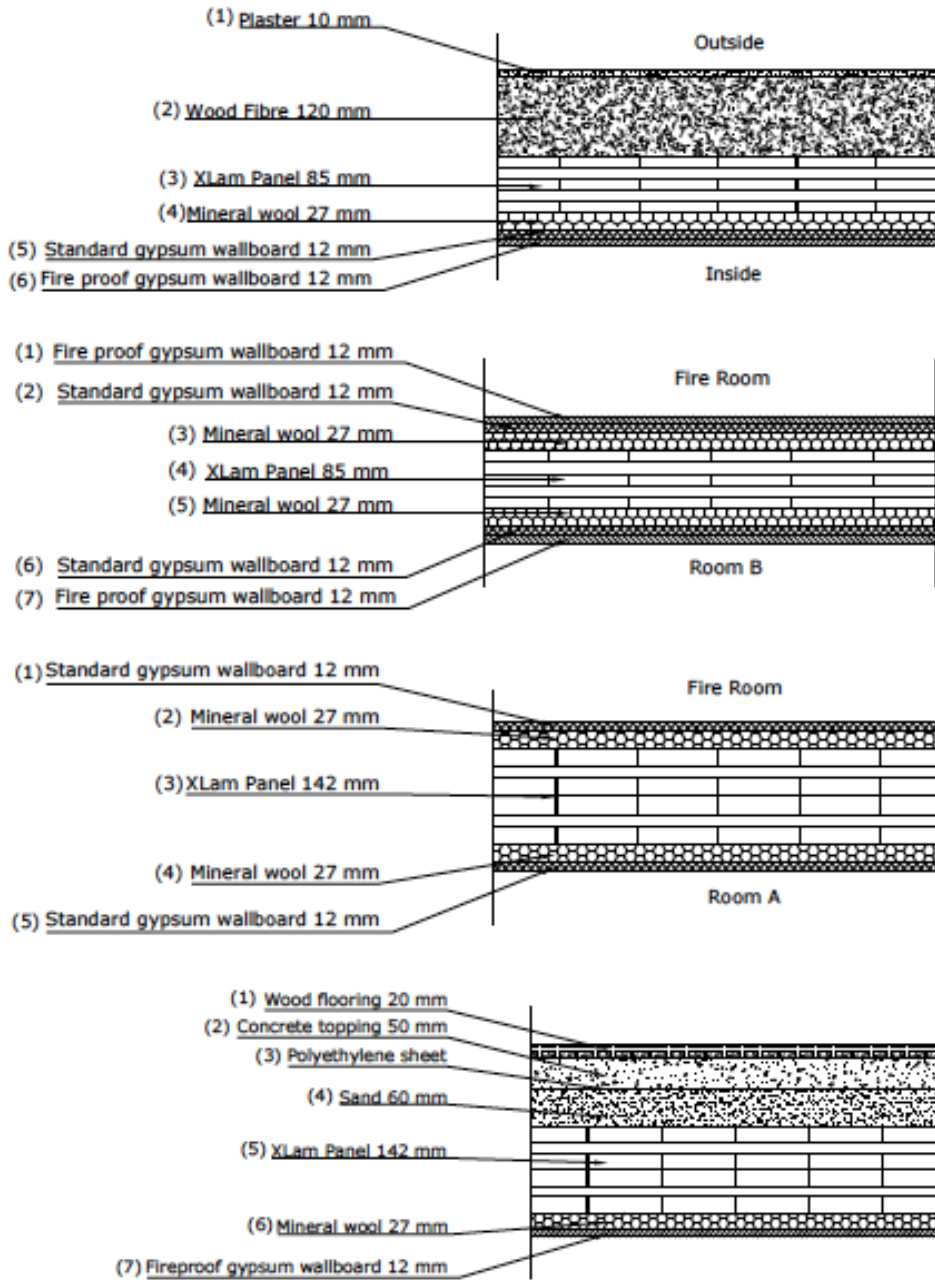
Etter antennelse vokste brannen tregt grunnet lite ventilasjon i brannrommet, fram til vinduene kollapset etter 36 minutter og brannen fikk bedre ventilasjonsforhold. Brannens intensitet økte, og overtenning ble observert etter 40 minutter. Etter 53 minutter falt døren ned på tross av en 60 minutters brannklassifisering, og man fikk røykutvikling over til naborommet. Brannens størrelse gikk ned etter 55 minutter, og etter 60 minutter ble testen avsluttet gjennom manuell slokking av brannen. Vinduene i etasjen over holdt stand gjennom hele brannen, og man fikk ingen brannspredning til etasjen over. Temperaturmålinger i rommet viste en temperaturfordeling med høyest temperaturer under himlingen og lavest temperaturer ved gulvet, fram til overtenning etter 40 minutter hvor temperaturen i hele rommet steg drastisk.

Basert på temperaturmålinger på baksiden av gipsplatene ble det antatt at disse begynte å svikte etter 47-50 minutter, og at både det ytterste og det innerste gipslaget falt av etter henholdsvis 53 og 57 minutter. Etter testen ble det bekreftet at all gips hadde falt fullstendig av, mens bare deler av isolasjonen hadde falt av. Det ble målt forkullingsdybder i massivtreet mellom 5 og 10mm.

### 4.3.3 Konklusjoner

Denne testen viste at det er mulig å begrense brannspredning til ett rom uten bruk av aktive brannsikkerhetstiltak, gitt at andre tiltak treffes. Dersom man har få ventilasjonsåpninger i rommet (delvis lukkede vinduer og lukket dør) vil brannens vekst være treg. Videre viste testen at ved å bruke gipsplater til å beskytte massivtreet ble skadene på den bærende konstruksjonen små. Hvorvidt en på bakgrunn av denne testen med det gitte testoppsettet kan trekke noen konklusjoner rundt massivtreets branntekniske egenskaper er usikkert, da massivtreet var lite involvert i brannen. Testen dokumenterer gipsens brannbeskyttende egenskaper, men hvor mye massivtrekonstruksjonen virket inn på disse egenskapene kan diskuteres. At en slik dokumentasjon også kunne blitt gjort med en bakenforliggende konstruksjon bestående av andre materialer er derfor ikke utenkelig.

4.3. FULLSKALA TEST AV TREETASJES BYGNING MED BÆRENDE  
TREKONSTRUKSJON 41



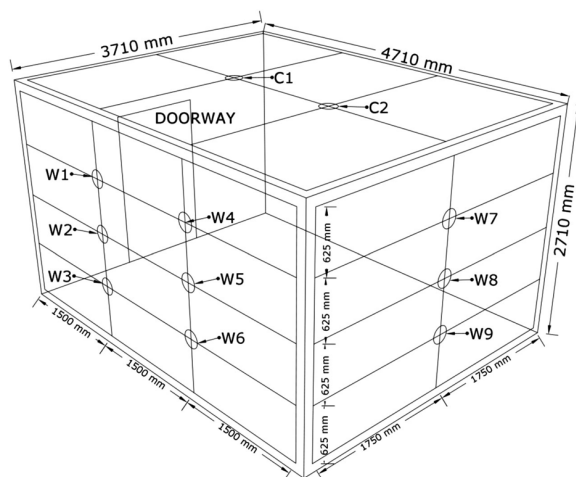
**Figur 4.2:** Tverrsnitt som viser oppbygningen av vegger og etasjeskiller i testrommet [19]

## 4.4 Brennbare og ubrennbare konstruksjoner i en naturlig brannsituasjon

Det ble gjennomført fullskala branntester ved Carleton University i Canada for å undersøke forskjellene mellom brennbare og ubrennbare konstruksjoners brannoppførsel. Testene ble bygd opp for å representere reelle soveromsbranner med ulike konstruksjonssystemer: krysslågt massivtre, bindingsverk og stålramme. Testenes målsetning var å studere brannforløp og varmeavgivelsesrate i rom bygget opp av de ulike konstruksjonssystemene, med fokus på gipssvikt og forkullingsoppførselen til de brennbare konstruksjonene. Disse testene med tilhørende analyse av de brennbare konstruksjonenes brannbidrag er beskrevet i Li et al. (2015) [49].

### 4.4.1 Testbeskrivelse

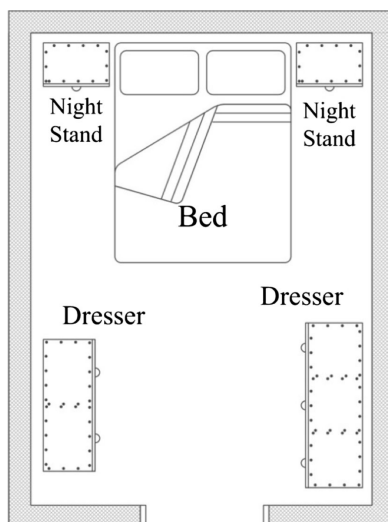
I test 1-3 var testrommet bygd opp med 105mm tykke krysslågte massivtreelementer, med 3x35mm lameller. Rommet hadde en indre størrelse på 4.5m\*3.5m\*2.5m, samme størrelse som i testene beskrevet i Hakkarainen (2002) [29]. Figur 4.3 viser testrommets dimensjoner. I test 1 og 2 var massivtreet kledd med to lag gips, mens test 3 ble gjennomført med eksponerte massivtreflater. I test 4-6 ble det bygget lette rammekonstruksjoner inne i massivtrekonstruksjonen, noe som førte til at størrelsen på disse rommene ble noe mindre enn i test 1-3. Test 4 og 5 ble gjennomført med bindingsverk av tre med henholdsvis to og ett lag gipskledning. Test 6 ble det benyttet en stålramme kledd med ett lag gips. Brannlasten, vist i tabell 4.1, ble valgt for å



**Figur 4.3:** Omriss av testrommet fra testene beskrevet i Li et al. (2015) [49]

simulere en reell soveromsbrann. Rommet var innredet med en seng, to nattbord og to kleskap, og det ble benyttet likt inventar i alle de seks testene. Plassering av

inventaret i testrommet er vist i figur 4.4. Tregulvet ble inkludert i brannlasten, men ikke de brennbare massivtreelementene eller bindingsverket.



**Figur 4.4:** Plassering av inventar i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49]

	Test 1 og 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Total brannenergi [MJ]	8552	8332	8318	8368.4	8458.4
Spesifikk brannenergi [MJ/m <sup>2</sup> ]	557.3	529	613.75	609.16	600.9

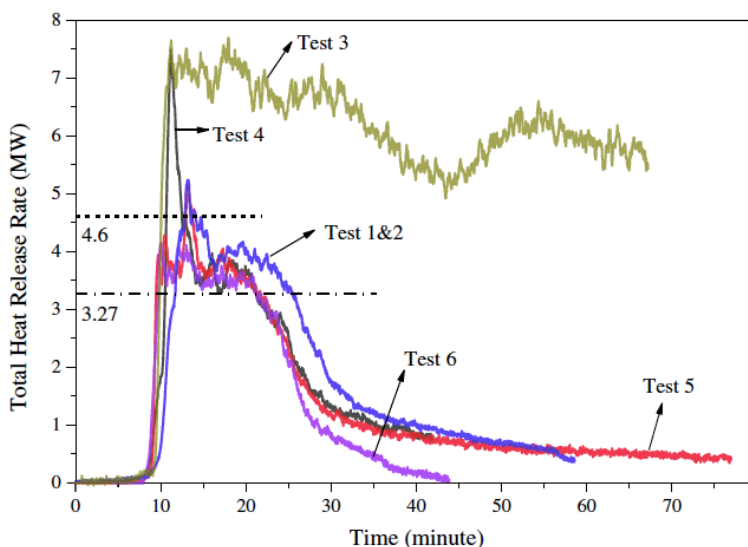
**Tabell 4.1:** Estimert brannenergi i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49]. Spesifikk brannenergi er angitt pr. m<sup>2</sup> gulvflate

#### 4.4.2 Testresultater

Grunnet en systemkrasj ble temperaturmålingene i test 1 tapt, men man fikk varmeavgivelsesratemålinger fra denne testen. Figur 4.5 viser varmeavgivelsesratene i de seks testene. Av denne figuren kan en se at test 1, 2, 4, 5 og 6 fulgte fasene i et vanlig brannforløp: vekst, overtenning, fullt utviklet brann og avkjøling. Den fullt utviklede brannen var underventilert, og varte i rundt 15 minutter. I test 3 med eksponerte massivtreflater ble det ikke registrert noen avkjøling i løpet av testens varighet.

#### Gipsplatenes oppførsel

Tiden fram til gipsplatene faller av i en brannsituasjon er både en parameter som er en viktig del av dimensjoneringsprosessen og en parameter det er knyttet mye



**Figur 4.5:** Målt varmeavgivelsesrate i testene beskrevet i Li et al. (2015) [49]

usikkerhet til. To lag med gips viste gode evner til å beskytte veggen i alle testene, mens ett lag gips viste seg å avhenge av hva slags konstruksjon den var festet til. I test 5 (med bindingsverkskonstruksjon og ett lag gips) holdt gipsen seg på plass i over 60 minutter, mens gipsplatene i test 6 (med stålrammekonstruksjon) kollapset etter 25 minutter. Det ble observert at knekking av stålrammen var årsaken til at gipsen falt av såpass tidlig i denne testen.

To lag gips ga tilfredsstillende beskyttelse av veggen. Det ble målt 60°C i sonen mellom gips og massivtre på slutten av test 2 (etter 53.5 minutter). I test 4 var temperaturen mellom gips og bindingsverk mye høyere, og man målte 80°C etter cirka 15 minutter. Temperaturen mellom gips og stender var rundt 100°C gjennom resten av testen, men det ble målt temperaturer opp til 400°C i hulrommene i bindingsverket. Dette kommer av varmegjennomgang gjennom gipsskjøtene. Det ble observert en jevnt over bedre gipsoppførsel i massivtrekonstruksjonen enn i bindingsverkkonstruksjonen, grunnet en tettere konstruksjon uten varmegjennomgang i skjøter.

Det var tydelige forskjeller mellom de to testene hvor ett lag gips var brukt, test 5 og 6. I bindingsverksrommet falt gipsplatene av etter 60 minutter, mens i rommet med ubrennbar stålkonstruksjon kollapset gipsen etter 23 minutter. I test 5 med bindingsverk og ett lag gips ble den samme varmepenetrasjonseffekten gjennom gipsskjøtene som i test 4 registrert, og man fikk høyere temperaturer i overgangen mellom gips og hulrom enn i overgangen mellom gips og trestender.

## Forkulling

Forkullingsrater i testene ble beregnet basert på temperaturmålinger inne i trekonstruksjonene, og man benyttet 300°C-isotermen til å markere forkullingsgrensens posisjon. Det var kun i test 3 og 5 at forkulling av trekonstruksjonene ble registrert. I test 1, 2 og 4 ga dobbelt lag med gips tilstrekkelig konstruksjonsbeskyttelse, og i test 6 var konstruksjonen ubrennbar (stålramme).

Basert på en 24mm forkullingsdybde etter 40 minutter ble den samlede gjennomsnittlige forkullingsraten i test 3 0.85mm/min. De krysslagte massivtreelementene bestod av tre 35mm tykke lameller, og denne forkullingen foregikk dermed i den ytterste lamellen. Ved å måle forkullingslagetets dybde etter testen fant man at forkullingsraten over 60 minutter var 1.0mm/min, og denne økningen fra de første 40 minuttene kommer av delaminering av massivtreelementene. Den mest intense forkullingen skjedde i himlingen, hvor branneksoneringen var kraftigst. Metoden i NS-EN 1995-1-2 Tillegg A for å forutsi forkullingsrater og dybder i ubeskyttet tre utsatt for ikke-standardbranner ble anvendt for å forutsi forkullingsratene i test 3. Ved å bruke denne metoden kom man fram til mye høyere forkullingsrater enn det som ble målt i testen, noe som indikerer at metoden gir et konservativt estimat. Denne metoden er utviklet for ubeskyttede treelementer av mindre størrelser, og ikke for tunge massivtrekonstruksjoner. I tillegg er det uvisst hvorvidt metoden kan predikere effekten av delaminering på forkullingen, og metodens anvendelighet i situasjonen som testen simulerer er usikker.

I test 5 holdt gipsen seg på veggen i mer enn 60 minutter ut i testen, men forkulling av trestenderne ble registrert allerede etter 22.2 minutter. Den gjennomsnittlige forkullingsraten basert på 30mm forkullingsdybde var 1.22mm/min. I EC5 oppgis en gjennomsnittlig forkulling  $\beta = 0.65\text{mm}/\text{min}$ , se tabell 3.4. EC5 bruker en reduksjonsfaktor for  $\beta$  mens gipsen beskytter treverket, og en faktor som gir dobbel forkulling, altså 1.3mm/min, etter at gipsen faller av. Test 5 indikerer at denne "doble forkullingen" også finner sted mens gipsen er på plass.

## Brennbare konstruksjoners bidrag til brannforløpet

Som figur 4.5 viser var varmeavgivelsen i test 3 med ubeskyttet massivtrekonstruksjon høyere enn i de andre testene, og det ble ikke registrert en merkbar reduksjon i brannens intensitet i løpet av testen. Dette indikerer et tydelig bidrag fra den brennbare konstruksjonen til brannen, men samtidig ble det målt noe lavere romtemperaturer i denne testen enn i de andre testene. Ved å benytte den målte varmeavgivelsen ble det i Li et al. (2015) gjennom energibalanseregninger funnet at mesteparten av varmeavgivelsen i test 3 skjedde i form av ekstern forbrenning utenfor rommet hvor det var rikelig med oksygen til å reagere med overskuddet av pyrolyseprodukter.

## 4.5 Småskالاتest: Forkulling av massivtre

Frangi et al. (2009) [21] beskriver eksperimentell analyse av krysslagte massivtreelementers brannoppførsel, med spesielt fokus på forkulling. Prøvestykker av krysslagt massivtre med ulikt antall og tykkelse på lamellene ble testet i en 1.0m\*0.8m stor ovn, hvor de ble utsatt for ensidig branneksponeering i henhold til standard brannkurve (ISO 834-kurve). Testene ble brukt til å sammenligne krysslagt massivtre med homogene trepaneler, samt å se på hvilken innvirkning lamelltykkelse- og antall har på brannoppførselen.

### 4.5.1 Testbeskrivelse

Det ble gjennomført 11 småskala branntester, alle med testobjekter med total tykkelse 60mm. Tabell 4.2 viser oppbyggingen av massivtreelementene i de ulike testene. Testobjektene var produsert med ulike typer lim for å undersøke hva valg av sammenføyningsmiddel har å si for massivtreelementers brannoppførsel. Alle testene ble kjørt fram til man nådde 300°C på baksiden av testobjektet, det vil si til den siste lamellen var forkullet og man hadde fullstendig gjennombrenning av testobjektet.

Branntest	Antall lameller	Lamelltykkelser [mm]	Lim
V1	5	10/10/10/10/20	MUF
V2	5	10/10/10/10/20	PU 1
V3	5	10/10/10/10/20	PU 1
V4	2	30/30	PU 1
V5	2	30/30	MUF
V6	5	10/10/10/10/20	PU 2
V7	5	10/10/10/10/20	PU 3
V8	3	20/20/20	PU 4
V9	5	10/10/10/10/20	PU 4
V10	3	20/20/20	PU 4
V11	3	20/20/20	PU 5

**Tabell 4.2:** Beskrivelse av prøvestykker i de ulike testene [21]

### 4.5.2 Testresultater

I elementene hvor MUF-lim var brukt holdt lamellene seg på plass gjennom hele testen uten å falle av, selv etter at de var fullstendig forkullet. I disse elementene ble det registrert en konstant forkullingsrate på 0.6mm/minutt. I elementene med PU-lim falt lamellene av etterhvert som de ble fullstendig forkullet, og man fikk ikke den samme konstante forkullingsraten. Det ble observert en tydelig økning i forkullingsraten når beskyttende, forkullede lameller falt av og eksponerte friskt treverk. Videre ble det



Branntest		Forkullingsdybde [mm]				
		10	20	30	40	60
V1	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	19	36	55	71	104
	$\beta_{lamell}$	0.53	0.58	0.54	0.61	0.60
	$\beta_{element}$	0.53	0.55	0.55	0.56	0.58
V2	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	18	27	36	43	64
	$\beta_{lamell}$	0.56	1.10	1.12	1.34	0.98
	$\beta_{element}$	0.56	0.74	0.83	0.92	0.94
V3	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	14	24	32	40	55
	$\beta_{lamell}$	0.74	0.95	1.23	1.24	1.35
	$\beta_{element}$	0.74	0.83	0.93	0.99	1.09
V4	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	-	-	46	-	75
	$\beta_{lamell}$	-	-	0.65	-	1.04
	$\beta_{element}$	-	-	0.65	-	0.80
V5	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	-	-	53	-	98
	$\beta_{lamell}$	-	-	0.56	-	0.67
	$\beta_{element}$	-	-	0.56	-	0.61
V6	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	18	28	36	43	67
	$\beta_{lamell}$	0.55	1.01	1.22	1.39	0.85
	$\beta_{element}$	0.55	0.71	0.83	0.92	0.90
V7	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	16	25	34	41	60
	$\beta_{lamell}$	0.61	1.19	1.08	1.50	1.03
	$\beta_{element}$	0.61	0.81	0.88	0.98	1.00
V8	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	-	34	-	54	71
	$\beta_{lamell}$	-	0.59	-	0.98	1.22
	$\beta_{element}$	-	0.59	-	0.74	0.85
V9	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	17	26	34	41	56
	$\beta_{lamell}$	0.58	1.19	1.15	1.48	1.37
	$\beta_{element}$	0.58	0.78	0.88	0.98	1.08
V10	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	-	34	-	51	67
	$\beta_{lamell}$	-	0.59	-	1.20	1.21
	$\beta_{element}$	-	0.59	-	0.79	0.89
V11	$t_{300^{\circ}\text{C}}$	-	35	-	57	79
	$\beta_{lamell}$	-	0.57	-	0.89	0.94
	$\beta_{element}$	-	0.57	-	0.70	0.76

**Tabell 4.3:** Forkullingsresultater fra de ulike testene [21]

funnet at antall lameller og tykkelsen på lamellene påvirket forkullingshastigheten. I elementene som var bygget opp av fem lameller var forkullingshastigheten betraktelig høyere enn i elementer framstilt med den samme limtypen men med tre lameller i stedet for fem.

Der man fikk delaminering ble det observert en liknende utvikling som ved initielt beskyttet treverk (f.eks. gipskledd), og den forenklede bilineære modellen i NS-EN 1995-1-2. Ved å sammenligne resultatene med beregningsmodellen fra NS-EN 1995-1-2 ble det funnet at standarden gir en konservativ beregning av forkullingsdybden i elementene som var satt sammen med temperatursensitivt lim (PU-lim).

### 4.5.3 Testkonklusjoner

Testanalysene viste at limet som brukes i krysslagte massivtreelementer har en vesentlig innvirkning på elementenes oppførsel når de eksponeres for brann. Prøvestykkene som var framstilt med temperatursensitivt lim hadde en høyere forkullingsrate enn prøvestykkene med et mindre temperatursensitivt lim. Dette kommer av at i prøvestykkene med temperatursensitivt lim falt lamellene av etter at de var forkullet, mens med mindre temperatursensitivt lim holdt lamellene seg på plass omtrent gjennom hele testen. Denne observasjonen viser effekten delaminering har på forkullingsforløpet i krysslagte massivtreelementer, og dette ble ytterligere illustrert gjennom sammenligningen av prøvestykker med få, tykke og flere, tynnere lameller. Ved flere og tynnere lameller falt lamellene av og eksponerte friskt treverk for høye temperaturer oftere, og man fikk en høyere forkullingsrate. Alle testene ble gjennomført med horisontale prøvestykker, og man kan derfor ikke trekke noen direkte konklusjoner fra testene vedrørende vertikale massivtreelementer (veggelementer).

## 4.6 Trekonstruksjoner i naturlig brannforløp

Frangi et al. (2005) [20] beskriver fullskala branntester som ble gjennomført for å undersøke effektiviteten av passive og aktive brannsikringstiltak i trebygninger som utsettes for en naturlig brannsituasjon. Det ble gjennomført seks tester, hvor tre av testene var rettet mot å undersøke virkningen av sprinkleranlegg og brannvarslingsanlegg. De tre andre testene fokuserte på muligheter og utfordringer knyttet til passive brannsikringstiltak i trebygninger.

### 4.6.1 Testoppsett

Eksperimentene ble utført på moduler med bindingsverkskonstruksjon. Hver modul var et rom med dimensjonene 6.6m\*3.1m\*2.8m. To av modulene var kledd innvendig med brennbare treplater (OSB-plater), mens de to andre modulene var kledd med ett eller to lag gipsplater. Alle modulene var bygd med tregulv kledd med linoleum. Det

var installert automatisk brannvarslingssystem med fire sensorer i alle modulene, samt to sprinklersystemer med uavhengig vanntilførsel. Den ene sprinkleren var montert i himlingen, og hadde en aktiveringstemperatur som ble variert mellom 57°C og 68°C. Den andre sprinkleren som var montert på veggen hadde en aktiveringstemperatur på 68°C.

En madrass og 11 trepaller representerte brannlasten i hver enkelt modul. I tillegg til denne mobile brannlasten ble de brennbare OSB-platene inkludert i den totale brannlasten, men ikke selve bindingsverkskonstruksjonene. I de to modulene kledd med gipsplater ble det beregnet en total brannenergi på 7260MJ og 7320MJ, noe som tilsvarer en spesifikk brannenergi på henholdsvis 363MJ/m<sup>2</sup> og 366MJ/m<sup>2</sup> pr. m<sup>2</sup> gulvflate, og i modulene med brennbare overflater ble den totale brannenergien cirka 17100MJ (spesifikk brannenergi 855MJ/m<sup>2</sup>).

#### 4.6.2 Testresultater

Den første serien med tester ble gjennomført for å undersøke brannvarsling- og sprinkleranleggenes evne til å oppdage og kontrollere brannen. Det ble gjennomført tre tester på modulkonstruksjonen med brennbare overflatekledninger og aktivert sprinkler- og brannvarslingsanlegg. Testene ble gjennomført på én modul, uten noen ekstra påført last.

Videre ble det gjennomført tre tester med deaktivert sprinkleranlegg for å undersøke passive brannsikkerhetstiltak, og se på konstruksjonens oppførsel dersom brannen fikk utvikle seg fritt. Testene ble gjennomført med en modul plassert oppå modulen hvor brannen ble startet.

##### Test av sprinkleranleggets funksjon

I alle de tre testene viste sprinkleranlegget god evne til å kontrollere brannen på et tidlig tidspunkt. Det ble observert en rask brannutvikling, men sprinkleranlegget grep tidlig inn (mellom to og tre minutter etter antennelse) og slokket brannen før overtenning av rommet. Testene demonstrerte hvordan et velfungerende sprinkleranlegg kan sørge for at brannsikkerheten ivaretas i tilfeller hvor konstruksjoner og overflater er utført i brennbare materialer. Det ble ikke registrert noen forskjell mellom aktiveringen av sprinkleranlegget i himlingen og på veggen.

##### Tester med deaktivert sprinkleranlegg

I testene med deaktivert sprinkleranlegg vokste temperaturen inne i rommet raskt etter antennelse. Modulen med brennbare kledninger på vegger og himling var overtent etter 4 minutter, og overtenning i modulene med ubrennbare overflater skjedde etter 6-7 minutter. Alle testene ble gjennomført med åpent vindu i brannrommet og

lukket vindu i modulen over. I testen med brennbare overflater inne i rommet ble det observert en betydelig større flammespredning ut av det åpne vinduet etter overtenning enn i testene med ubrennbare overflater. De brennbare overflatenes innvirkning på den utvendige forbrenningen er illustrert i figur 4.6. Temperaturmålinger fra de ulike testene viste at romtemperaturen var relativt lik for modulene med brennbare og ubrennbare overflater. Dette kommer av at store deler av pyrolysegassene fra treoverflatene ikke brant inne i rommet, men at de strømmet ut av vinduet hvor det var rikelig med oksygen de kunne reagere med. Dette førte til en mye kraftigere forbrenning utenfor vinduet, som tidligere nevnt.

Temperaturmålingene fra testene ble sammenlignet med ISO standard-brannkurven, og det ble vist at de målte temperaturene var høyere enn ISO-kurven.



**Figur 4.6:** Utvendig brannutvikling etter 7 minutter. Venstre: Modul med brennbare overflater, høyre: modul med ubrennbare overflater [20]

## 4.7 Brannegenskaper hos krysslagte massivtrepaneler

Frangi et al. (2008) [22] presenterer resultater fra numerisk og eksperimentell analyse av brannegenskapene til krysslagte massivtreelementer, med spesielt fokus på forkulling og sammenligning med homogene tretverrsnitt.

### 4.7.1 Numerisk analyse

Numeriske modeller ble brukt til å simulere temperaturutviklingen i krysslagt massivtre eksponert for en ISO-834-brann, og modellere forkullingen ved hjelp av de simulerte temperaturutviklingene. Simuleringsmodellen ble verifisert ved å vise at resultatene stemte godt overens med temperaturmålinger fra branntester hvor prøvestykker av heltre ble utsatt for ensidig ISO-834-branneksponering. I simuleringene ble det antatt at lameller falt av når temperaturen i grensesjiktet mellom to lameller nådde 300°C, det vil si ved fullstendig gjennombrenning av den ytterste lamellen. Det

ble gjennomført simuleringer av to ulike krysslagte massivtrettversnitt: ett tversnitt satt sammen av fem 17mm tykke lameller, og ett tversnitt bestående av tre 28mm tykke lameller.

Simuleringsresultatene viser at mens forkullingshastigheten er konstant i et homogent trettversnitt, så får man en økt forkullingshastighet når gjennombrente lameller faller av og eksponerer friskt treverk for høye temperaturer. Denne delamineringseffekten fører videre til at antall lameller og tykkelsen på lamellene påvirker forkullingshastigheten, og elementet med flere og tynnere lameller (5x17mm) var fullstendig gjennombrent 19 minutter før elementet med færre og tykkere lameller (3x28mm). Den gjennomsnittlige forkullingshastigheten i det 84mm tykke massivtreelementet med 5x17mm lameller var cirka 1.3mm/min, og det var fullstendig gjennombrent etter 64 minutter. I det 84mm tykke massivtreelementet med 3x28mm lameller skjedde delaminering med tilhørende hopp i forkullingshastigheten sjeldnere, og her var den gjennomsnittlige forkullingshastigheten cirka 1.0mm/min. Dette elementet var fullstendig gjennombrent etter 83 minutter.

#### 4.7.2 Eksperimentell analyse

Frangi et al. (2008) [22] beskriver videre to småskala branntester hvor man sammenlignet homogene trepaneler og krysslagte massivtrepaneler. I de to testene ble homogene og krysslagte prøvestykker utsatt for samtidig ISO-834-eksponering i en 1.0m\*0.8m horisontal testovn, slik at man fikk en direkte sammenligning av deres brannegenskaper. I den første testen bestod prøvestykkene av et 54mm tykt homogent trepanel og et 54mm tykt krysslagt trepanel som var bygd opp av 3x18mm lameller. I den andre testen ble to homogene paneler med tykkelse 27mm testet sammen med to krysslagte paneler bestående av 3x9mm lameller.

Testene viste en høyere forkullingsrate i de krysslagte elementene enn i de homogene, grunnet delaminering. I test 2, med flere tynnere lameller, fikk man en høyere forkullingshastighet enn i test 1, noe som bekrefter at lamelltykkelsen påvirker forkullingen av krysslagte massivtreelementer. Testresultatene er oppsummert i tabell 4.4

Branntest	Testvarighet [min]	Prøvestykke	$\beta$ [mm/min]
1	38	54mm homogent trepanel	0.66
1	38	3x18mm krysslågt trepanel	0.84
2	28	2 stk. 27mm homogene trepaneler	1.panel: 0.62, 2.panel: -
2	28	2 stk. 3x9mm krysslågte trepaneler	1.panel: 1.05, 2.panel: 1.40

**Tabell 4.4:** Testresultater [22]

På bakgrunn av test- og simuleringsresultatene anbefales det i Frangi et al. (2008) [22] at effekten på forkullingshastigheten som følger av delaminering tas hensyn til ved beregning av krysslågte massivtreelementers forkullingsdybde.

## 4.8 Hakkarainen 2002

Som en del av forskningsprosjektet Brandsäkra Trähus – Massivtre ble det gjennomført fire fullskala branntester for å undersøke temperaturutviklingen og forkullingsoppførselen i trekonstruksjoner. Resultatene fra disse testene presenteres i Hakkarainen (2002) [29]. I tillegg presenteres beregninger som ble gjort for å studere trekonstruksjonenes bidrag til brannlasten og for å vurdere gipsplaters evne til å beskytte treverk mot brann.

### 4.8.1 Testbeskrivelse

Det ble gjennomført fire tester på rom med dimensjonene 4.5m\*3.5m\*2.5m. I den ene testen var testrommet bygget med bindingsverk med mineralullisolasjon, og i de tre andre testene var det benyttet massivtrekonstruksjoner. I alle fire tester var det et åpent vindu med dimensjonene 2.3m\*1.2m, og en fasadeplate montert over veggen hvor vindusåpningen var plassert. Tabell 4.5 viser konstruksjonstype og antall lag med gipsbeskyttelse i de ulike testene.

Test nr.	Konstruksjon	Antall lag gipsplater
1	Massivtre	Ingen
2	Massivtre	1 lag
3	Massivtre	2 lag
4	Bindingsverk	2 lag

**Tabell 4.5:** Beskrivelse av testrommets oppbygning i de ulike testene [29]

I testene hvor to lag gips ble brukt var dette ett lag vanlig gips innerst med ett lag branngips utenpå, og i testen med ett lag gips var dette vanlig gips. Trekrybber representerte den mobile brannlasten i testene. Denne brannenergien ble estimert til å være cirka 11340MJ, noe som gir en spesifikk brannenergi på  $720MJ/m^2$ , beregnet med hensyn på gulvarealet.

#### 4.8.2 Testresultater

I test 1 med massivtrekonstruksjon uten gipsbeskyttelse ble det registrert relativt lave temperaturer i testrommet, rundt  $700^{\circ}C$  etter overtenning. Årsaken til disse lave temperaturene var at pyrolyseproduktene fra de brennbare veggene og himlingen forbrukte mye energi til oppvarming og forgassing, og hindret oksygentilførselen til rommet. Man fikk dermed en underventilert brann inne i rommet, og brennbare gasser som strømmet ut av vindusåpningen og reagerte med tilgjengelig oksygen på utsiden. Dette resulterte i mye forbrenning utenfor vinduet, og kraftig varmefluks mot fasadeplaten montert over vindusåpningen. Ved hjelp av energibalanseregninger ble det vist i Hakkarainen (2002) at cirka 50% av brannen fant sted utenfor rommet i test 1, mens i testene med gipskledd konstruksjoner utgjorde utvendig forbrenning kun cirka 15%. Etter at mesteparten av den mobile brannlasten i rommet hadde brent opp begynte temperaturen i rommet å stige. Mengden og produksjonen av pyrolysegasser gikk ned, og det strømmet oksygen inn i rommet. Ventilasjonsforholdene i rommet ble bedre, og da testen ble avsluttet etter 50 minutter på grunn av for kraftig brann var temperaturen fremdeles stigende. Det ble ikke registrert noen begynnende avkjølingsfase i test 1.

I test 2 hvor trekonstruksjonen var beskyttet av ett lag gips ble det gjort lignende observasjoner som i test 1. Her var gasstemperaturen rundt  $800^{\circ}C$ , og man fikk temperaturøkning etter at mobil brannlast hadde brent opp og fram til testen ble avsluttet etter 45 minutter grunnet funksjonssvikt i røykventilasjonssystemet. Gipsplatene falt av etter cirka 13 minutter, noe som førte til pyrolyse i vegger og himling, udnerventilerte forhold og vesentlig forbrenning utenfor rommet.

I test 3 og 4 var trekonstruksjonene beskyttet av det doble laget med gips gjennom perioden hvor det var mest intens forbrenning av den mobile brannlasten, fram til 25-30 minutter etter overtenning. Selv om disse brannene også var ventilasjonskontrollerte var ventilasjonsforholdene bedre, og temperaturene var vesentlig høyere enn i test 1 og 2. Brannen foregikk hovedsakelig inne i rommet, og det ble målt maksimumstemperaturer rundt  $1200^{\circ}C$  i den fullt utviklede fasen. I begge disse testene ble det registrert en avkjølingsfase. Test 4 ble stoppet etter 48 minutter som følge av gjennombrenning av taket, men i test 3 varte avkjølingsfasen helt fram til testen ble stoppet etter 169 minutter grunnet svikt i overgangen mellom vegg og tak.

### Sammenligning med parametriske kurver i EC1

I tillegg til testene ble det i Hakkarainen (2002) gjennomført beregninger for å sammenligne den reelle temperaturutviklingen med parametriske temperatur-tidkurver angitt i NS-EN 1991-1-2. I beregningene ble bare sponplategulvet inkludert i rommets brannlast, selv om det var vist at vegger og tak bidro til brannen i testene så lenge de ikke var beskyttet med to lag gips. Dersom brannen i testene med ett eller ingen gipslag hadde fått utvikle seg lenge nok ville man fått ukontrollerte ventilasjonsforhold grunnet gjennombrenning og kollaps av trekonstruksjonene. Dette er en brannsituasjon hvor modellering ved hjelp av de parametriske kurvene fra NS-EN 1991-1-2 ikke er gjeldende, og det ble derfor valgt å fokusere på tidsperioden i testene hvor den mobile brannlasten var involvert i brannen. Dersom massivtrekonstruksjonene hadde blitt inkludert i brannlasten ville dette medført en vesentlig lengre fullt utviklet fase, og en økning i beregnet maksimumstemperatur.

De målte temperaturene i test 1 og 2 var vesentlig lavere (300-500°C) enn temperaturene som ble estimert ved hjelp av Eurokode 1. for de to testene med to lag gipskledning (test 3 og 4) stemte Eurokode-temperaturene bedre overens med de målte temperaturene, men også her ga beregningene konservative temperaturanslag.

### Forkulling og gipsens beskyttelsesevne

Branntestene viste at gipsbeskyttelse forsinket begynnende forkulling betraktelig. Det ble funnet at forkullingen ble utsatt med 20 minutter per gipslag. I testen med ubeskyttet massivtre (test 1) var forkullingshastigheten tilnærmet konstant gjennom hele testen. Disse testene var gjennomført med homogene massivtrevernsnitt, og man fikk dermed ikke delamineringseffekten med økt forkulling som har blitt observert i tester med krysslåte massivtrevernsnitt.

## 4.9 Branntest av massivtrekonstruksjoner i naturlig brann

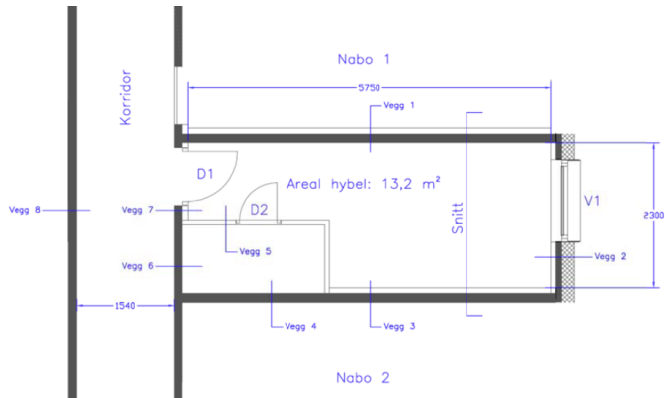
I desember 2014 utførte SP Fire Research to fullskala branntester på oppdrag fra Studentsamskipnaden i Trondheim (SiT) i forbindelse med byggingen av Moholt 50|50. Testene ble gjennomført for å få bedre kunnskap om et fullstendig brannforløp i bygg med bærende og avstivende vegger av massivtre [31]. Hox (2015) [31] beskriver disse testene.

### 4.9.1 Testbeskrivelse

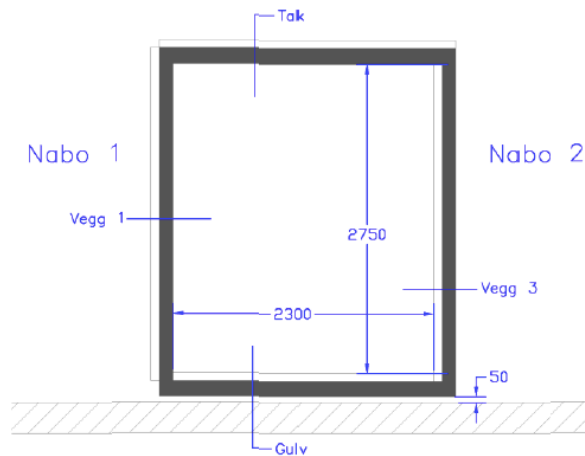
Det ble bygget en fullskala kopi av én hybelenhet med tilstøtende korridor i store forsøkshall ved SP Fire Research i Trondheim. I denne hybelenheten ble det gjennomført to tester: én test med aktivt sprinkleranlegg i korridor og hybel, og én med deaktivert



sprinkleranlegg i hybelen. Figur 4.7 og 4.8 viser mål på korridor og hybelenhet som utgjorde testrommet i de to testene.



**Figur 4.7:** Plantegning av korridor og hybelenhet som ble testet [31]



**Figur 4.8:** Snittegning av hybelenhet som ble testet [31]

Totalt gulvareal inne i testhybelen var

$$A_f = 5.75m * 2.3m = 13.2m^2$$

Det totale arealet av alle omhyllingsflatene inne i hybelen var

$$A_t = 2 * A_f + 2 * A_{langvegg} + 2 * A_{kortvegg}$$

$$A_t = 2 * 13.2m^2 + 2 * (5.75m * 2.75m) + 2 * (2.3 * 2.75m)$$

$$A_t = 70.7m^2$$

Hybelen og korridoren ble bygget med vegger og tak av 100 mm tykke krysslagte massivtrelementer med 5 lameller à 20 mm. Den ene langveggen i hybelen var ubeskyttet, mens de andre veggene var beskyttet av branngips og/eller standardgips. Et vindu med 3-lags glass var installert på kortveggen i motsatt ende av utgang til korridor. Døren mellom hybel og korridor ble satt i åpen stilling i begge testene, da dette representerer det verste scenarioet. En lukket dør vil bremse brannspredning til korridoren mer enn en åpen dør vil. Testkonstruksjonen var ikke påført noen last for å simulere egenlast fra overliggende etasjer.

Temperaturutviklingen i testene ble registrert ved hjelp av termoelementer plassert flere steder i testmodellen. Både gasstemperatur og romtemperatur ble målt, ved hjelp av henholdsvis kapslete termoelementer og platetermoelementer. Det ble installert to sprinklerhoder inne i hybelen, to sprinklerhoder i korridoren over himlingen og to sprinklerhoder i korridoren under himlingen.

Testhybelen ble innredet med diverse inventar for å simulere en typisk brannlastsituasjon i en studenthybel, se tabell 4.6. Brenselet som ble plassert ut var basert på Rambøll sin estimerte karakteristiske brannbelastning som ble beregnet i forbindelse med den branntekniske prosjekteringen av studentblokkene ved Moholt 50|50.

Brensel	Brennverdi	Antall	Sum brannlast [MJ]
Skumgummimadrass	170 MJ/stk	4	680
Pult av tre	17.5 MJ/kg	28.4 kg	497
Seng av tre	17.5 MJ/kg	23.6 kg	413
Heptan	30 MJ/l	5 l	150
Trekrybber	112 MJ/stk	20 stk	2240
<b>SUM</b>			<b>8708</b>

**Tabell 4.6:** Brannenergi i testrommet [31]

Den totale brannlasten gir en spesifikk brannenergi på  $659.7MJ/m^2$  per  $m^2$  gulvareal, eller  $123.2MJ/m^2$  per  $m^2$  omhyllingsflate.

### Test 1 - med aktivert sprinkler i hybelen

Testen ble gjennomført med sprinkleranlegget i både hybelen og korridoren aktivert. Testens formål var å undersøke hvorvidt sprinkleranlegg vil være i stand til å kontrollere en raskt voksende brann, samt at man ønsket å verifisere tid til aktivering av røykvarsler og sprinkleranlegg i hybel og korridor.

### Test 2 - med deaktivert sprinkler i hybelen

I denne testen var de to sprinklerhodene i hybelen deaktivert, mens sprinklerhodene i korridoren var aktivert. Også denne testen ble gjennomført med dør ut til korridoren i åpen stilling. Formål med testen var å undersøke et fullstendig brannforløp, og herunder registrere følgende parametre:

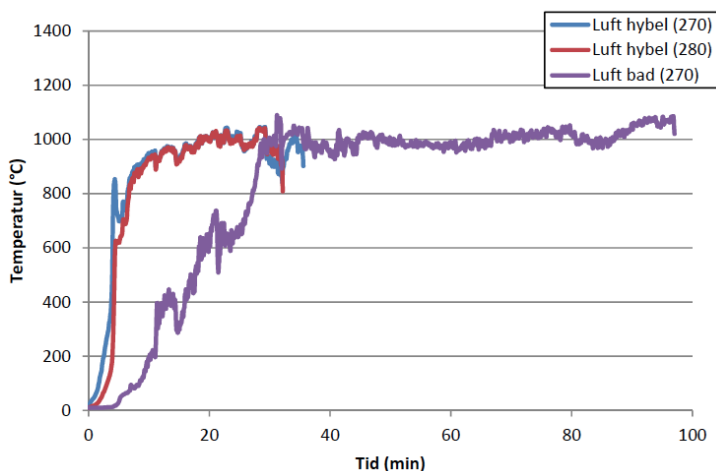
- Forkullingshastighet på ubeskyttet og beskyttet massivtre
- Brannforløpets varighet
- Temperaturforløp, inkludert tid til glassene i vinduet knuser og tid til overtenning
- Brannsmitte ut av startbranncellen

#### 4.9.2 Resultater test 1

I test 1 ble sprinkleranleggets evne til å kontrollere og slokke brannen undersøkt. Sprinklerhodet nærmest brannen ble utløst etter 1 minutt og 59 sekunder, ved en registrert lufttemperatur på ca. 130°C. Etter dette stoppet temperaturøkningen, og sprinklerhodet lengst unna brannen ble aldri utløst. Temperaturen falt, og etter 9 minutter og 30 sekunder ble de siste restene av brannen som sprinklervannet ikke traff slukket manuelt.

#### 4.9.3 Resultater test 2

Tabell 4.7 gir et sammendrag av vesentlige hendelser som inntraff i test 2, med tilhørende tidspunkt og målt temperatur. Mens test 1 demonstrerte sprinkleranleggets gode evne til å kontrollere brannen på et tidlig tidspunkt, så viser resultatene fra test 2 hvor kritisk situasjonen blir dersom sprinkleranlegget ikke fungerer som tiltenkt. Etter antennelse vokste brannen inne i hybelen raskt, og overtenning inntraff etter 4 minutter og 10 sekunder. Kort tid etter overtenning knuste vindusglassene, og brannen stod ut av vinduet. Da det ikke var montert brennbar fasadekledning på utsiden av vinduet fikk man ikke vurdert utvendige brannspredningsmekanismer som følge av uforbrente forbrenningsprodukter som forlot hybelen gjennom vinduet. Brannen spredde seg etterhvert til korridoren, og himlingen i korridoren falt ned etter 8 minutter og 30 sekunder. 1 time og 36 minutter etter antennelse kollapset taket inne i hybelen, og testen ble stoppet gjennom manuell slokking etter dette. Som figur 4.9 og tabell 4.7 viser ble det målt høye temperaturer inne i hybelen gjennom hele testen, og det var ingen indikasjon på en avkjølingsfase innen testen ble stoppet.



**Figur 4.9:** Temperaturer målt i test 2, med høyde over gulvet i cm angitt i parentes. Temperaturmålinger i hybelen etter 30 minutter ble utelatt fra grafen grunnet feil i måleinstrumenter [31]

### Forkullingshastighet

Forkullingshastigheter i test 2 ble beregnet ut i fra temperaturmålinger i ulike målepunkter i veggene. I den ubeskyttede massivtreveggen ble det målt en svært rask forkullingshastighet fram til den første lamellen var forkullet, og deretter falt forkullingshastigheten noe. Gjennomsnittlig forkullingshastighet mellom de to målepunktene som var plassert 25mm og 50mm inn i veggen var 1.4mm/min., og mellom målepunktene 50mm og 75mm inn i veggen var forkullingshastigheten cirka 0.7mm/min. I snitt var forkullingshastigheten i den ubeskyttede veggen cirka 1.1mm/min. Store deler av den ubeskyttede veggen ble fullstendig gjennombrent, se figur 4.10. Etterhvert som lamellene i massivtreet ble forkullet falt de av, og denne delamineringen førte til raskere forkulling av friskt treverk som ble eksponert for de høye temperaturene i rommet.

I den gipskledde langveggen ble det etter testen målt en gjennomsnittlig forkullingsdybde på 20mm, og en maksimal forkullingsdybde på 60mm. Gipskledningen forsinket forkullingsstart, men den falt etterhvert av. Det antas at dersom ikke testen var blitt stoppet etter at taket kollapset, så ville også den beskyttede veggen blitt fullstendig gjennombrent.

I tillegg til den ubeskyttede massivtreveggen ble også det ubeskyttede massivtretaket fullstendig gjennombrent, og testen måtte avsluttes da taket kollapset.

Det ble gjort observasjoner som indikerte at termoelementene som var montert i

Hendelse	Tidspunkt	Temperatur i hybel [°C]
Røykvarsler i hybelen aktiveres	1:10	59
Røykvarsler i korridoren aktiveres	1:24	71
Første sprinkler under himling løser ut	2:50	243
Andre sprinkler under himling løser ut	4:00	638
Overtenning hybel	4:10	822
Første vindusglass knuser	4:30	803
Tredje og siste vindusglass knuser	5:45	770
Første sprinkler over himling løser ut	6:05	741
Andre sprinkler over himling løser ut (usikker på tid)	6:05-8:30	
Himling i korridor faller ned	8:30	891
Gipsen rundt badet faller av	25:00	1000
Første observasjon av at deler av gipskledd vegg brenner	47:00	1025
Observasjon viser gjennombrenning mellom gulv og vegg på badet	1:00:00	1025
Første observasjon av gjennombrenning på ubeskyttet massivtrevegg nærmest vinduet	1:10:00	1025
Store deler av ubeskyttet massivtrevegg er gjennombrent	1:25:00	980
Taket kollapser	1:36:00	1072
Brannen er slokket	1:45:00	

**Tabell 4.7:** Oversikt over hendelser i test 2 [31]

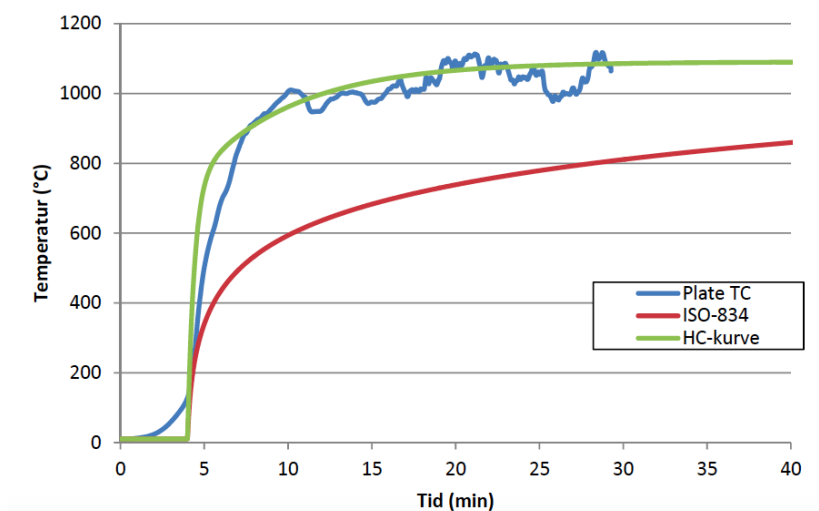
veggen hindret kull i å falle av, og at de dermed ble isolert av kullet. Derfor er det en viss usikkerhet knyttet til hvor pålitelige de målte forkullingshastighetene er. Dersom man fikk en isoleringseffekt på termometerne kan det hende at de målte temperaturene var lavere enn de faktiske temperaturene i veggen, noe som betyr at forkullingshastighetene kan ha vært enda høyere enn det som ble målt.

### Temperaturutvikling og brannenergi

Figur 4.11 viser den målte temperaturutviklingen i test 2 sammenlignet med temperaturutviklingen i en brann som følger en ISO-834 brannkurve og temperaturutviklingen i en hydrokarbonbrann (HC-kurve). Etter cirka 30 minutter falt platetermoelementet i hybelen ned, og de målte temperaturene etter dette tidspunktet er derfor ikke inkludert i grafen. Av denne grafen og av temperaturene oppgitt i tabell 4.7 ser man at etter overtenning vokste temperaturen i hybelen raskt opp til 1000°C. Temperaturen



**Figur 4.10:** Rester av den ubeskyttede vegg i test 2 [31]



**Figur 4.11:** Temperatur i hybelen sammenlignet med ISO-834-kurve og HC-kurve[31]

stabiliserte seg deretter rundt  $1000^{\circ}\text{C}$ , og holdt seg rundt dette fram til brannen ble slokket manuelt. Det ble ikke registrert noen tegn på en begynnende nedkjølingsfase med temperaturfall i løpet av de 96 minuttene fram til brannen ble slokket grunnet kollaps av taket.

Som figur 4.11 viser var temperaturgradienten i test 2 svært bratt, og den var vesentlig brattere enn ISO-834-kurven. Temperaturen etter overtenning lå flere  $100^{\circ}\text{C}$  over ISO-kurven. Både før og etter overtenning fulgte test 2 temperaturutviklingen i en hydrokarbonbrann, og branneksporingen fram til 30 minutter ut i testen

var tilnærmet ekvivalent med branneksporingen fra en hydrokarbonbrann. Dette kommer av massivtrekonstruksjonenes bidrag til rommets brannenergi, og det viser at ved bruk av brennbare overflater får man en vesentlig større total brannenergi og en raskere og kraftigere branneksporing enn ved bruk av ubrennbare overflater. Denne observasjonen er også en indikasjon på at massivtrekonstruksjonen bidrar til brannutviklingen på et tidlig tidspunkt. Videre viser disse resultatene at det er behov for å undersøke begrensninger i ISO-834-kurvens bruksområde, og hvorvidt denne kurven gir en reell klassifisering av produkters brannegenskaper dersom disse produktene benyttes i en brennbar konstruksjon.





# Kapittel 5

## Gjennomgang av aktuelle byggeprosjekter

### 5.1 Studentboliger i Ås, Pentagon 2

Den 27. august 2013 åpnet Studentsamskipnaden i Ås (SiÅs) to åtteetasjes høyblokker med bærekonstruksjon av massivtre [62], se figur 5.1. De to blokkene rommer totalt 254 studenthybler, og prosjektkonseptet med en sterk vektlegging av miljø var utviklet av 5B Prosjekt AS i samarbeid med BAS Arkitekter [14]. Dette massivtreprosjektet har av noen blitt brukt som et foregangsprosjekt for høye trehus i Norge, og det har gitt inspirasjon til andre liknende prosjekter i ettertid [69]. Brann- og Sikkerhetsrådgivning AS (BSR) var ansvarlig for den branntekniske prosjekteringen, og i det følgende vil denne prosjekteringen bli gjennomgått. Dette er gjort for å undersøke hvordan høye trehus prosjekteres i Norge i dag, og hvordan manglende preaksepterte ytelser for denne typen bygg håndteres ved bruk av fravikskompenserende tiltak med tilhørende analyse.

Sommeren 2014 ble ytterligere fire studentblokker, hver med fem etasjer, i massivtre ferdigstilt på Pentagon [27]. På grunn av denne oppgavens tidsmessige begrensninger har det ikke blitt anledning til å studere disse byggene.

#### 5.1.1 Brannkonsept

Byggene er altså oppført i åtte etasjer pluss kjeller. Byggenes bruksområde er studenthybler, og i henhold til §11-2 tabell 1 i VTEK plasseres de dermed i risikoklasse 4, mens tekniske rom i byggene er plassert i risikoklasse 2. Med risikoklasse 4 og åtte tellende etasjer havner byggene i brannklasse 3. Vaskerom er lokalisert i kjelleretasjen, og dette ble skilt ut som en egen brannseksjon for å unngå at dimensjonerende etasjetall ble ni etasjer. Ni tellende etasjer i stedet for åtte ville medført noe strengere preaksepterte ytelser og krav. Blant annet er preakseptert ytelse for trapperom i bygg i risikoklasse 4 med mer enn åtte tellende etasjer minst to Tr 3-trapperom, mens ved risikoklasse 4 og høyst åtte etasjer er to Tr 1-trapperom tilstrekkelig [13].



**Figur 5.1:** Illustrasjonsbilde av 8-etasjes blokker i Ås [14]

I de to studentblokkene er både hoved- og sekundærbæring dimensjonert som R60 B-s1,d0. Det oppgis i den branntekniske sluttrapporten at massivtrekonstruksjonene forkuller 40mm i timen, noe som indikerer at forkullingsraten som er lagt til grunn for dimensjonering av R60 brannmotstand er omtrent 0.67mm/minutt. Tilfredsstillende brannsikkerhetsnivå er dokumentert i form av en komparativ fraviksanalyse [53]. Hvert av byggene har ett invendig trapperom, utført i tre med brannmotstand R60.

Det er 12 meter avstand mellom de to byggene, og minimumsavstanden på 8 meter for å unngå brannspredning mellom byggverk [13] er dermed ivaretatt. De to byggene er koblet sammen med en forbindelsesbro i 3.etasje, og denne er utført i betong.

Spesifikk brannbelastning i byggene ble beregnet til maksimum  $270MJ/m^2$ , og i henhold til tabell VTEKs §11-7 tabell 1 var det dermed ikke behov for seksjonering av etasjene i byggene, da disse ikke overstiger største bruttoareal i  $m^2$  pr.etasje uten seksjonering.

Det oppgis at alle hybelenheter i praksis er bygget som egne brannceller, men strategisk er hver etasje delt opp i tre brannceller. I alle etasjer er halve fellesarealet og 7 av hybelenheter én branncelle, trapperommet er én branncelle, og det resterende fellesarealet med resterende 9 hybelenheter er én branncelle. Disse tre branncellene er delt opp ved hjelp av branncellebegrensende konstruksjoner med klassifiseringen EI60 B-s1,d0. Preakseptert ytelse for branncellebegrensende bygningsdel i brannklasse 3 er EI60 A2-s1,d0 [13]. Bygningsdelene som omslutter tekniske rom er utført som EI60 A2-s1,d0. Etasjeskillere er utført i EI60 B-s1,d0. Trapperom i massivtre er kledd med 15mm branngips på begge sider, og heissjakt er kledd innvendig med

13mm standardgips og utvendig med 15mm branngips. Det er oppgitt at cirka 50% av veggflatearealet er kledd med gips for lydisolering, og at vegg mellom hybler er kledd med to lag 13mm gips. Det er derfor naturlig å anta at hver hybel har én innervegg kledd med to lag gips, da dette gir lydisolering mellom alle hybelenhetene. Videre oppgis det at massivtre er testet for REI60 uten gips, og at gips hindrer forkullingsstart i lang tid. I hvert av byggene er det ett innvendig trapperom, og dette er utført som et Tr 2-trapperom. Dette vil si at trapperommet og branncellen det rømmes fra er separert av et rom som er utført som en egen branncelle. Forebygging av brannspredning mellom brannceller i ulike plan i de to byggene er håndtert gjennom installering av automatisk slokkeanlegg, og dette er oppgitt som en preakseptert ytelse i VTEK [13].

I følge TEK10 §11-12 skal alle byggverk i risikoklasse 4 hvor det er krav til heis ha installert automatisk slokkeanlegg, og TEK10 §12-3 sier at det skal installeres heis i alle byggverk med 3 etasjer eller mer. Dermed er det krav om heis og automatisk slokkeanlegg i de to byggene. I de to blokkene er det benyttet boligsprinkler NS-INSTA 900 type 2, og sprinkleranlegget er installert og utført i henhold til *NS-INSTA 900 Boligsprinkler Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold*. Dette er også sprinkleranlegget som er angitt som preakseptert ytelse for bygninger utformet som boliger med høyst åtte etasjer og én kjelleretasje i VTEK §11-12 tabell 1. Sprinkleranlegget har tosidig vanntilførsel, noe som øker sprinkleranleggets operasjonelle pålitelighet ved en redundans i vanntilførselsystemet. Dersom det skulle oppstå en situasjon som gjør at det ikke leveres vann fra den ene vannledningen, så vil fremdeles den andre vannledningen kunne levere vann til sprinkleranlegget. I henhold til preakseptert ytelse angitt i VTEK §11-12 tabell 3 er det installert brannalarmanlegg kategori 2 i de to byggene. Dette er heldekkende brannalarmanlegg med optiske røykdetektorer i alle områder. Brannalarmanlegget har direkte alarm til døgnbemannet alarmsentral.

Utgang til sikkert sted fra branncelle i de to byggene er lagt til rette for ved hjelp av ett innvendig Tr 2-trapperom, samt en utvendig rømningstrapp av stål. Krav om rømningstvindu kommer som følge av at det er forskriftsmessig med kun ett trapperom i bygget dersom det er sprinklet. Da man har både ett trapperom og en utvendig rømningstrapp er rømningstvindu vurdert til å ikke være nødvendig.

TEK10 §11-17 stiller krav til utforming og plassering av byggverk på en måte som legger til rette for at rednings- og slokkemannskap har tilgjengelighet til hele bygget for effektiv rednings- og slokkeinnsats. Brannvesenets stigemateriell kan ikke benyttes til evakuering over 3.etasje i de to byggverkene, og over disse etasjene er det i den branntekniske prosjekteringen vurdert dithen at utvendig tilgang for brannvesenet for slokking og evakuering ivaretas gjennom utvendig ståltrapp.

### 5.1.2 Fraviksanalyse

En fraviksanalyse ble utarbeidet for å påvise at man hadde oppnådd et likeverdig sikkerhetsnivå ved de valgte løsningene som dersom VTEK sine preaksepterte løsninger var blitt fulgt til det fulle [53]. I det følgende blir denne fraviksanalysen oppsummert, og interessante momenter diskuteres i kapittel 6. Fraviksanalysen er gjennomført som en komparativ analyse i henhold til *NS 3901 - Krav til risikovurdering av brann i byggverk* [56]. I en komparativ analyse sammenlignes det aktuelle byggverket, analysebyggverket, med et referansebygg. Referansebygget er et bygg som er likt utført som analysebyggverket så langt det lar seg gjøre, men uten noen minus- eller plussfravik fra VTEK. Dette er altså et bygg som er utført utelukkende i henhold til VTEKs preaksepterte ytelser, og det representerer dermed minimumsnivået for brannsikkerheten i følge teknisk forskrift. Hensikten med den komparative analysen er å påvise forskriftsoppfyllelse gjennom å vise at analysebyggverket har minst samme sikkerhetsnivå som referansebygget. For å lukke fravikene i §11-4 og påvise et likeverdig sikkerhetsnivå må analysen altså demonstrere at analysebyggverkets hoved- og sekundærbæresystem utført som R60 brennbart vil ha en lik sannsynlighet for å motstå et fullstendig brannforløp som i et liknende byggverk med R90 ubrennbart hovedbæresystem og R60 ubrennbart sekundærbæresystem.

Fraviksanalysen begynner med å beskrive analysebygget, og identifisere plussfravik i dette bygget. Slike plussfravik, eller kompenserende tiltak, er tiltak som benyttes for å kompensere for fravik fra preaksepterte ytelser, og opprettholde et tilfredsstillende sikkerhetsnivå [46]. Det oppgis at sprinkleranlegg er et kompenserende tiltak for R60 brennbart bæresystem. Videre oppgis det at ved å seksjonere vekk vaskeromdelen får bygget åtte etasjer i stedet for ni. Utvendig trapp i stål, innvendig trapp utført som Tr 2-trapperom med ubrennbar kledning, samt at bygget er utført uten søyler eller dragere og at dekkeelementer spenner fra yttervegg til yttervegg er flere av de kompenserende tiltakene som listes opp. Andre plussfravik som identifiseres er at alle hybelrom i praksis bygges som EI60-brannceller, at bygget oppføres uten loft, utbygg og karnapper, at massivtrekonstruksjonen er uten hulrom hvor brannen kan spres mellom brannceller, og at det er prosjektert med en bedre brannslange- og slokkeutstyrdekning enn hva som er angitt i VTEK. Boligsprinklerutførelsen oppgis som et plussfravik da denne er bedre enn minimumskrav i INSTA 900, og dette gir en bedre pålitelighet. Hybelrom, som er del av branncelle fellesareal, har uavhengig tiltang til to trapper. Dette er utover minimumskrav til utgang fra branncelle. Av lydisoleringshensyn kles ca. 50% av massivtreflatene på vegg med gips, og dette medfører en forsinket forkulling av massivtreet som er testet for REI60 uten gips.

Referansebygget som danner sammenligningsgrunnlaget for analysen er beskrevet med R90 A2-s1,d0 hovedbæresystem og R60 A2-s1,d0 sekundærbæresystem, universell utforming i maksimalt 20% av alle etasjer, installert heis og boligsprinkler INSTA-900

type 2, én trapp og automatisk brannalarmanlegg kategori 2.

Det oppgis forutsetninger som legges til grunn for hvordan bruken av treverk påvirker sikkerheten i bygget. Dette er viktige forutsetninger, da de danner grunnlaget for vurderinger som gjøres i analysen. Trekonstruksjonene forventes ikke å ha et vesentlig bidrag til brannforløpet før brannen er fullt utviklet, og fram til overtenning er det byggets inventar som anses som avgjørende for både antennelse og utvikling av en brann. Dersom sprinkler fungerer som forventet unngås overtenning fullstendig. Dersom startbrannen er stor nok kan eksponerte treflater bidra til brannspredning, men punktantennelse av treverk anses som mindre sannsynlig enn punktantennelse av inventar og tekniske anlegg. Tiden fram til overtenning påvirkes ikke av trekonstruksjonene, da det er temperaturen i røyksjiktet som bestemmer tidspunkt for overtenning. Etter overtenning bidrar trekonstruksjonene til langvarig brann dersom åpningsfaktoren er høy nok. Videre fremgår det i rapporten at ved bruk av bæresystem i tre er det fare for at man får kollaps av bæresystemet ved et fullt brannforløp, men at faren for kollaps i stålkonstruksjoner er større, og at det er større fare for en tidlig kollaps av et bæresystem i stål. Trekonstruksjoner anses å brenne forutsigbart og ikke å gi en tidlig eller uventet konstruksjonssvikt. Brannisolerte stålkonstruksjoner vurderes til å ha en dårligere pålitelighet enn trekonstruksjoner, da brannisolasjonen kan være dårlig eller feil utført.

Dimensjonerende spesifikk brannenergi er beregnet til å være mellom  $186MJ/m^2$  og  $247MJ/m^2$  for hybelenhetene og mellom  $194MJ/m^2$  og  $270MJ/m^2$  for fellesarealene, avhengig av hvilken forbrenningsfaktor som benyttes. Rapporten påpeker at ved at det fastsettes at en brannmotstand på R90 er en preakseptert ytelse for å tilfredsstille bæreevne og stabilitet i et fullstendig brannforløp ved spesifikk brannbelastning på inntil  $400MJ/m^2$ , så medfører det at ved en spesifikk brannbelastning på  $270MJ/m^2$  er ekvivalent branntid mindre enn 90 minutter. Likning 5.1 benyttes til å beregne ekvivalent branntid, og dette gir en ekvivalent branntid på 81 minutter for den maksimale brannenergien,  $270MJ/m^2$ .

$$T_{eq} = 0.3 * \text{spesifikk brannbelastning} \quad (5.1)$$

Videre påpekes det at dersom en brannmotstand på R90 er tilstrekkelig for en brannenergi på  $400MJ/m^2$  så vil en brannmotstand på  $270MJ/m^2$  være tilstrekkelig når brannenergien reduseres til  $270MJ/m^2$ . Dermed konkluderes det med at for alle de spesifikke brannbelastninger man har kommet fram til er R60 tilstrekkelig brannmotstand for byggverkets bæresystem.

I fraviksrapporten diskuteres deretter tanken bak VTEK sine preaksepterte ytelser for brannmotstanden til hoved- og sekundærbæresystem i brannklasse 3, og

hvorvidt det å ha et hovedbæresystem som skal kunne stå i 30 minutter lengre enn sekundærbæresystemet har noen betydning for person- og verdisikkerheten i byggverket.

Brannsikkerheten i bygget deles opp i 4 barrierer: Egeninnsats, branncelleinndeling, installert sprinkleranlegg og lokalt brannvesen. Her legges godt slokkeutstyr som muliggjør slokkeinnsats fra beboerne til grunn for brannsikkerheten, samt omfattende branncelleinndeling som forsinker brannutviklingen, sprinkleranlegg med en estimert pålitelighet på 90%, og lokalt brannvesen som vil ha mulighet til å gjennomføre rednings- og slokkearbeid i alle byggets etasjer.

Sprinklerinstallasjon i bygget tillegges kompenserende virkning på bakgrunn av at forskriftskravet om automatisk brannslukkeanlegg er et forskriftskrav som er rettet mot å øke den tilgjengelige rømningstiden. Dette forskriftskravet er gitt i §11-12 *Tiltak for å påvirke rømnings- og redningstider*, og det sier at i byggverk i risikoklasse 4 hvor det er krav om heis skal det installeres automatisk brannslukkeanlegg. I fraviksrapporten argumenteres det derfor med at det ikke er krav om sprinkleranlegg som tiltak for å bevare konstruksjonens bæreevne, og dermed kan sprinkleranleggets virkning på bæresystemets bæreevne i en brannsituasjon tillegges kompenserende virkning. Denne konklusjonen medfører at faktoren  $\delta_{n1}$  kan settes lik 0.6, og krav til hovedbæresystem kan reduseres til R60 på bakgrunn av dette.

Analysebygget og referansebyggets brannsikkerhetsnivå sammenlignes i en tabell hvor hendelser som må inntreffe for at en brann skal oppstå og komme ut av kontroll listes opp med tilhørende sannsynligheter for de to byggene. For 5 av de 8 hendelsene som listes opp kommer analysebygget best ut, og det konkluderes med at analysebygget har en bedre personsikkerhet enn referansebygget. I denne sammenligningen settes sannsynligheten for at sprinkleranlegg i referansebygget ikke fungerer som forutsatt lik 100%.

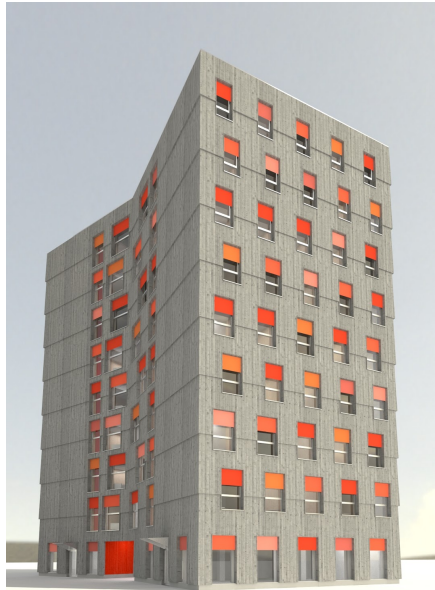
Rapporten påpeker at forskjellen mellom en brennbar og en ubrennbar konstruksjon ikke diskuteres i analysen. Bortsett fra at et brennbart bæresystem kan antenne vurderer rapporten det dithen at innenfor det som diskuteres i analysen er et brennbart bæresystem like godt som et ubrennbart bæresystem.

Rapporten avsluttes ved at det konkluderes med at analysebyggverket har et bedre personsikkerhetsnivå enn referansebyggverket.

## 5.2 Moholt 50|50

I fobindelse med at Moholt studentby i Trondheim fylte 50 år i 2014, samt et stadig behov for nye studentboliger, satte Studentsamskipnaden i Trondheim (SiT) i gang et utbyggingsprosjekt med miljøfokus [55]. En del av dette utbyggingsprosjektet

er byggingen av 5 studentboligtårn, hver på 9 etasjer, hvor bærekonstruksjonen er i massivtre. Inspirasjonen til dette materialvalget kom blant annet fra byggingen av studentblokkene på Pentagon i Ås [69]. Studentboligene er planlagt ferdigstilt i november 2016.



**Figur 5.2:** Studenttårn på Moholt 50|50, illustrasjonsfoto [31]

### 5.2.1 Brannkonsept

De fem høyblokkene har en gesimshøyde på 27.11 meter, med en avstand fra terreng til åpningsbart vindu i 9.etasje på 24.2 meter. Fire av de fem blokkene har ni tellende etasjer pluss kjeller, og den femte blokka har ti tellende etasjer grunnet sokkeletasje i stedet for ren kjelleretasje. I henhold til VTEK §11-2 tabell 1 er 2.-9. etasje, som rommer hybelleiligheter med fellesområder, i de fem blokkene plassert i risikoklasse 4. Basert på etasjetall og risikoklasse er byggene plassert i brannklasse 3. En brannsituasjon i et av byggene er ikke vurdert til å kunne få særlig stor konsekvens for liv, helse eller samfunns- og miljømessige interesser, og byggene er derfor ikke plassert i brannklasse 4.

I de fem 9-etasjes studenttårnene som bygges på Moholt i Trondheim er hoved- og sekundærbæresystem dimensjonert som R90 brennbart, og innvendig trappeløp er utført i massivtre med brannmotstand R30. Disse fravikene er dokumentert i en egen risikoanalyse som Rambøll ikke har ønsket å gi tilgang til. Det har derfor

ikke vært mulighet til å sette seg inn i og få en forståelse for hvordan likeverdig sikkerhet ved disse fravikene fra VTEK er oppnådd og dokumentert i dette prosjektet. I samtale med Rambøll ble det informert om at forkullingshastigheten som ble benyttet i prosjekteringen var på omtrent 1.0mm/min, men da det ikke har blitt gitt tilgang til risikoanalysen hvor fravik fra preaksepterte bæresystemytelser er behandlet blir det vanskelig å gjøre noen ordentlig vurdering av dette. I den branntekniske konseptrapporten oppgis det at RIB (rådgivende ingeniør byggeteknikk) har oppgitt at alle bærende konstruksjoner kan motstå 84mm forkulling [51].

Avstanden mellom byggene er over 10 meter, og det er derfor ikke nødvendig med ekstra tiltak for å redusere sannsynlighet for brannspredning mellom byggverk.

Det største etasjearealet i byggene er  $380m^2$ , og total brannenergi som er forventet å bidra i et brannforløp er mindre enn  $400MJ/m^2$ . Det er dermed ikke behov for å dele byggene inn i brannseksjoner.

Vegg mellom hybelenheter og fellesarealer (kjøkken og stue) i 2.-9.etasje bygges av massivtre, og disse veggene antas å ha god brannmotstand. Dør mellom fellesareal og hybelenhet skal ha klassifisering som tilfredsstiller EI30- $S_a$ . Branncelleinndeling er beskrevet i ytterligere detalj i risikoanalysen, og i denne analysen dokumenteres det at funksjonskrav i TEK10 er tilfredsstilt. Innvendig trapperom er utført som Tr 1, noe som vil si at det kan være direkte tilknytning mellom trapperom og bruksenhet uten et rom imellom som er egen branncelle. Trapperommet er utført med branncellevegg EI60, med dør til trapperom som tilfredsstiller EI<sub>2</sub>60- $CS_a$ . Trapperommet bygges i massivtre, og klassifiseringen B-s1,d0 oppnås ved å brannmale treoverflatene. Dette medfører fravik fra VTEK, hvor preakseptert ytelse for kledning i branncelle som er rømningsvei er A2-s1,d0. Dette fraviket er behandlet i risikoanalysen. Sannsynlighet for utvendig brannspredning mellom brannceller i ulike plan er redusert ved at byggene er sprinklet. I tillegg reduseres denne sannsynligheten ved at fasaden utføres med horisontale EI60 hulromsventiler og vertikale lekter, noe som gjør at hulrom bak fasadekledningen deles opp i avgrensede områder. Vinduer er utført uten spesifisert brannmotstand.

Grunnet krav om heis i byggverk med 3 eller flere etasjer og krav om automatisk slokkeanlegg i byggverk med heis er det krav om automatisk slokkeanlegg i de fem blokkene, og alle blokkene er fullsprinklet. Utover minimumskravet til sprinkleranlegget i henhold til NS-EN 12845 er det valgt å stille ekstra krav til utførelsen av sprinkleranlegget, ved at det skal tilfredsstille NS-EN 12845 Tillegg F - Spesielle krav til personsikringssystemer. Dette gir økte krav til sprinkleranleggenes pålitelighet i forhold til preaksepterte ytelser i VTEK, noe som er brukt som kompenserende tiltak i risikoanalysen. I tillegg til sprinkleranlegg er det installert brannalarmkategori 2 i byggene, med varsling til døgnbemannet vaktsentral.



Krav om to uavhengige utganger fra branncelle til sikkert sted er ivaretatt ved at boenhetene i 2.-9.etasje har utgang til innvendig Tr 1-trapperom og utvendig trapp. I tillegg er rømming ut av vinduer ved hjelp av brannvesenets høydemateriell muliggjort gjennom åpningsbare vinduer i fellesarealene.

Brannvesenets høydemateriell har kapasitet til å nå de øverste etasjene i byggene, og derfor gjøres VTEKs ytelser knyttet til tilrettelegging for rednings- og sløkkemannskaper som er angitt for byggverk med høyst åtte etasjer gjeldende for disse byggene.

### 5.3 §11-4: Bæreevne og stabilitet

Fravik fra bærende hovedsystem er et viktig fravik i de to prosjektene, og dette blir gjennomgått i det følgende. Når det kommer til bygningers bæreevne og stabilitet i en brannsituasjon sier TEK10 at

“ §11-4, 1.ledd: 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 [48] ”

Dette forskriftskravet har til hensikt å sørge for at byggverket ikke styrter sammen i en brannsituasjon, og at man har tilstrekkelig tid til rømming og redning. Videre må konstruksjonene ha en tilstrekkelig bæreevne slik at byggets brannskillende deler opprettholder sin tiltenkte funksjon. Trappeløp må inneha tilstrekkelig brannmotstand til at rømming og redning kan foregå på trygt vis, både for personer som oppholder seg i bygget og for rednings- og sløkkemannskap.

Forskriftskravet presiseres ytterligere for byggverk i brannklasse 3 i §11-4, 4.ledd:

“ Bærende hovedsystem i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. ”

For å tilfredsstille dette kravet angir veiledningen til teknisk forskrift (VTEK) preaksepterte ytelser, disse er oppsummert i tabell 3.8. For byggverkene på Moholt 50|50 og Ås oppstår det fravik fra følgende preaksepterte ytelser, se tabell 5.1:

Konstruksjonsdel	Preakseptert ytelse	Valgt utførelse	
		Ås - Pentagon 2	Moholt 50 50
Innvendig trappeløp	R30 A2-s1,d0	R30 B-s1,d0	R30 [B30]
Bærende hovedsystem	R90 A2-s1,d0	R60 B-s1,d0	R90 [B90]
Sekundære, bærende bygningsdeler	R60 A2-s1,d0	R60 B-s1,d0	R90 [B90]

**Tabell 5.1:** Fravik fra preaksepterte ytelser §11-4

I følge brannkonseptet for Moholt 50|50 er det oppnådd brannmotstand R90 i hovedbæresystem og sekundære, bærende bygningsdeler, etasjeskillere og takkonstruksjoner som ikke er en del av hovedbæresystem eller stabiliserende. For innvendig trappeløp i massivtre er det oppgitt brannmotstand R30. Fraviksanalysen som skal vise at konstruksjonen gir en brannsikkerhet som er minimum like god som ved å benytte de preaksepterte ytelsene er dokumentert gjennom en risikoanalyse.

På Pentagon 2 er det dimensjonert for en brannmotstand på R60 i bærende hovedsystem og sekundærbæring. Innvendig trappeløp er utført med brannmotstand R30. Likeverdig sikkerhet ved disse fravikene er dokumentert i en komparativ fraviksanalyse.

### 5.3.1 Krav til bærende hovedsystem

Ved at man benytter seg av treverk i byggets hovedbæresystem oppstår det altså et fravik fra VTEK sine preaksepterte ytelser, da vanlige trematerialer og brannimpregnert trevirke oppnår brannpåvirkningsklassene D-s2,d0 eller B-s1,d0. Oppfyllelse av funksjonskravet i §11-4, 4.ledd må dermed verifiseres på annet vis, gjennom en fraviksanalyse. Dette betyr at man må ta i bruk alternative metoder for å dimensjonere et bæresystem som gir likeverdig sikkerhet som de preaksepterte ytelsene i en brannsituasjon, og demonstrere at dette bæresystemet vil opprettholde den nødvendige bæreevnen og stabiliteten gjennom et fullstendig brannforløp.

Det overordnede forskriftskravet som stilles til byggverkets hovedbæresystem er som tidligere nevnt at det skal ha en bæreevne og stabilitet som sikrer at det ikke styrter sammen ved en brann. Da dette kravet konkretiseres for byggverk i brannklasse 3 med at bæreevnen og stabiliteten skal opprettholdes gjennom et *fullstendig brannforløp* virker det naturlig å tolke dette kravet dithen at man må sørge for en tilstrekkelig bæreevne i en alvorlig brannsituasjon, og at man ikke kan kompensere for dette kravet ved å redusere sannsynligheten for at en brann oppstår. Videre indikerer både kravet om R90 og det faktum at forskriftskravet baserer seg på de store

konsekvensene en bygningskollaps vil ha at bæreevne gjennom fullstendig brannforløp ikke kan vurderes under forutsetninger om brannsikkerhetstiltak som kontrollerer eller slokker brannen på et tidlig tidspunkt. Fullstendig brannforløp kan defineres som Brannens utvikling fra antennelse til den har sloknet [45], men å dokumentere at hovedbæresystemet vil bevare bæreevne og stabilitet fram til sprinkleranlegget kontrollerer og slokker brannen vil ikke gi et sikkerhetsnivå som kan sies å være 100% betryggende. Det kan oppstå brannsituasjoner hvor sprinkleranlegget ikke fungerer som tiltenkt, og hvis man da har lagt til grunn for bygningens bæreevne og stabilitet at sprinkleranlegget slokker brannen på et tidlig tidspunkt vil dette kunne få katastrofale følger. Det oppfattes som at oppfyllelse av kravet burde foregå ved at man dimensjonerer hovedbæresystemet for å motstå et slags verst tenkelig, men realistisk, fullstendig brannforløp. Dermed dukker det opp et sentralt spørsmål: Hva er et *fullstendig brannforløp*? Og er et fullstendig brannforløp i et bygg utført med brennbart materiale forskjellig fra i et bygg med ubrennbart materiale?

Et sentralt spørsmål knyttet til fullstendig brannforløp i trebygninger er hva som er en realistisk og relevant varighet. Det er funnet gjennom litteraturgjennomgang i kapittel 4 at ved eksponerte massivtreflater får man et vesentlig brannlastbidrag fra massivtreet, og man får en større varmeavgivelsesrate. Dette resulterer ikke nødvendigvis i høyere maksimumstemperaturer i en kortere periode, men en høyere varmeavgivelsesrate over lengre tid som medfører et lengre brannforløp. Det kan virke som om det man må se på er et brannforløp som varer lengre enn 90 minutter. Man får en brann med høy intensitet lenge etter at det brennbare innholdet i rommet er brent opp.

Forskriften sier at byggverk i brannklasse 3 og 4 skal kunne opprettholde tilfredsstillende bæring og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. Hva et fullstendig brannforløp innebærer kan være vanskelig å definere. Som preakseptert ytelse for dette kravet oppgir veiledningen R90, dermed har veiledningen tolket forskriftsteksten om fullstendig brannforløp til å være 90 minutter. Dette representerer også minimumsnivået for sikkerheten. Etter gjennomgang av ulike branntester med eksponert treverk er det funnet flere indikasjoner på at brannforløpets varighet i slike konstruksjoner er lengre enn i konstruksjoner uten eksponert treverk. Dermed vil det være naturlig å tenke at modelleringen av et fullstendig brannforløp i en slik bygning burde være minst 90 minutter, hvertfall ikke mindre. Alt tyder på at i et bygg hvor selve konstruksjonen bidrar til byggets brannlast vil brannforløpet ha en lengre varighet, og dermed en større total intensitet. Dersom konstruksjonen er ubrennbar kan man med god sikkerhet si at brannen slutter å brenne når alt brennbart inventar er forbrukt, men dette kan ikke sies dersom konstruksjonen er brennbar. En treg brannutvikling med lav temperatur kan tenkes å være et ugunstig scenario i en trekonstruksjon, da man ikke trenger mer enn 300°C for å forkulle treverket. Hensikten med å stille brannsikkerhetskrav til bæresystemet er at dette

skal inneha en evne til å motstå en brann etter at sprinkleranlegget har forsøkt å slokke brannen. Å ha et bæresystem som kan motstå et fullstendig brannforløp i brannklasse 3 kan tenkes å være ønskelig grunnet de store konsekvensene en kollaps av et bygg i brannklasse 3 kan ha. Dette er da en sikkerhet som skal ligge der som en absolutt sikkerhet, selv dersom sprinkleranlegget eller andre tiltak feiler. Det kan da virke som lite fordelaktig å redusere kravet til bæresystemet på bakgrunn av at sprinkleranlegg er installert.

# Diskusjon og forslag til videre

## 6.1 Diskusjon av eksisterende empiri

Hensikten med litteraturgjennomgangen i kapittel 4 var å undersøke og kartlegge eksisterende kunnskap om de branntekniske konsekvensene av å bruke treverk i høye trekonstruksjoner, med fokus på massivtrekonstruksjoner.

### 6.1.1 Bidrag til brannenergi

Trekonstruksjonenes bidrag til brannlasten oppleves som et spørsmål som er lite besvart i eksisterende forskning, og i litteraturen som er gjennomgått var det et fåtall eksperimenter som undersøkte dette. I Hakkarainen (2002) [29] og Li et al. (2015) [49] beskrives tester med eksponerte treflater, og i begge artiklene kommer det fram at treverket påvirket brannforløpet. I testene ble det observert tidligere overtenning enn ved gipskledde overflater, samt en høyere total varmeavgivelsesrate, lavere romtemperaturer og en vesentlig forbrenning utenfor testrommets ventilasjonsåpninger. I Hakkarainen (2002) [29] ble det estimert at i testen uten gipsbeskyttelse brant cirka 50% av pyrolysegassene utenfor ventilasjonsåpningen, mens med to lag gipsbeskyttelse var denne andelen bare 15%. Videre ble det observert en høy brannintensitet og fortsatt brannutvikling også etter at rommets brennbare inventar var konsumert av brannen, og det var ingen indikasjon på en avkjølingsfase fram til testene ble stoppet. Også i Frangi (2005) [20] ble tester med eksponerte treflater beskrevet. Dette var bindingsverkskonstruksjoner og ikke massivtrekonstruksjoner, men de samme trendene som beskrevet i Hakkarainen (2002) [29] og Li et al. (2015) [49] ble observert i disse testene også; raskere overtenning ved brennbare konstruksjoner og mye ekstern forbrenning. Dette er observasjoner som indikerer at konstruksjonen påvirker brannforløpet ved å bidra til rommets brannenergi, samt at det er en økt fare for brannspredning ved bruk av brennbare konstruksjoner.

Disse resultatene, samt den begrensede mengden testresultater, viser et behov for ytterligere testing for å skape en bedre forståelse av eksponert treverks bidrag til

en brannsituasjon. Det er et behov for å ikke bare undersøke grundigere hvorvidt massivtrekonstruksjonene faktisk bidrar til brannen, men også å undersøke hvor vesentlig dette bidraget er og hvilke konsekvenser det har for brannsituasjonen. Alle testene som er gjennomgått ble av ulike grunner stoppet mens brannen fremdeles var fullt utviklet, og uten at det ble observert noen avkjølingsfase. En mangler derfor et helhetlig bilde av dette bidraget til brannlasten. Etter å ha gjennomgått alt som ble funnet av relevant litteratur oppleves det som at man ikke har noen eksperimentelle resultater som viser hvordan et forventet fullstendig brannforløp med eksponerte treoverflater utarter seg.

Beregningene som ble gjort for å kvantifisere bidraget fra det eksponerte treverket inneholdt flere forenklinger og approksimasjoner, noe som medfører at det knyttes en viss usikkerhet til beregningsresultatene. Ved å gjennomføre flere tester, og ved å gjennomføre tester hvor brannen får utvikle seg fritt gjennom et fullstendig brannforløp, vil man få et større datagrunnlag å basere slike beregninger på, slik at det kan gjennomføres beregninger med en større nøyaktighet. Med dagens eksisterende kunnskap, eller snarere mangelen på dette, kan det virke uklokt å tillate eksponerte treoverflater i bygg med mer enn 4 etasjehøyder, fram til brannbidraget fra eksponert treverk kan kvantifiseres og forstås på en bedre måte.

I testen beskrevet i Hox (2015) [31] er det vist at en stor andel brennbare overflater og kledninger med stor tykkelse (massivtre) gir et betydelig bidrag til brannutviklingen, brannens størrelse og varighet. Det ble målt høyere temperaturer og en raskere temperaturutvikling enn hva de klassifiserte produktene som skal anvendes i bygget er testet og godkjent for. Indikasjoner på et vesentlig bidrag fra massivtrekonstruksjonene fremhever et behov for at fravik fra preaksepterte ytelser knyttet til bærende og skillende konstruksjoner også reflekteres i krav som stilles til øvrige ytelser i bygget. Dette gjelder alt fra dører, vinduer og gjennomføringer til innfesting av sprinkleranlegg.

### 6.1.2 Forkulling

Et av formålene med litteraturgjennomgangen var å undersøke omfanget av empiriske forkullingsdata fra trekonstruksjoner eksponert for et naturlig brannforløp. Som beskrevet i kapittel 4 ble det i testene gjennomført i forbindelse med prosjektet Moholt 50|50 målt forkullingshastigheter som var vesentlig høyere enn hva som angis i NS-EN 1995-1-2. Disse funnene gjorde det aktuelt å undersøke hvorvidt målinger gjort i denne testen samsvarer med resultater fra liknende tester, og å undersøke hvorvidt brannmotstander som beregnes ved å benytte NS-EN 1995-1-2 til å finne forkullingsdybder kan anses som gyldige og pålitelige i en virkelig brannsituasjon.

I Li et al. (2015) [49] ble det målt forkullingshastigheter opp i 1.0mm/min, noe som samsvarer bra med målingene oppgitt i Hox (2015) [31]. På den annen side er det

funnet flere forsøk som ble gjennomført med standard branneksponeering (ISO-brann) hvor målte forkullingsrater stemte godt overens med forkullingsrater oppgitt i NS-EN 1995-1-2. Frangi et al. (2009) [21] rapporterer forkullingshastigheter på 0.65mm/min, og også noe lavere enn dette, ved branntesting av krysslågt massivtre eksponert for ISO 834-brannkurven. Basert på dette er det nærliggende å stille spørsmålstegn ved hvorvidt bruk av forkullingshastigheter oppgitt i NS-EN 1995-1-2 ved beregning av forkulling i eksponerte massivtrekonstruksjoner gir en forkullingsdybde som kan betegnes som forventet forkullingsdybde i en virkelig brannsituasjon. Det empiriske utvalget er for øyeblikket begrenset, og hvor mye som burde legges i den eksisterende empirien er tvilsomt. Samtidig kan den begrensede mengden testresultater anvendes, slik at man kommer fram til et konservativt resultat fremfor et utrygt resultat. Det empiriske datagrunnlaget burde økes, men i mellomtiden er det kanskje mer forsvarlig å benytte seg av for høye enn for lave forkullingsverdier.

Det er funnet at utførelsen av krysslågte massivtreelementer har innvirkning på deres forkullingsoppførsel. Dersom det benyttes temperatursensitivt lim oppgir Frangi et al. (2009) [21] at forkullingshastigheten blir høyere enn ved bruk av et mer temperaturrestant lim, da lamellene faller av ettersom limet mister sin funksjon som følge av høye temperaturer. Videre er det funnet at færre og tykkere lameller er mer fordelaktig enn flere tynne, da delaminering av elementene forekommer hyppigere når lamellene er tynnere og blir raskere fullstendig gjennombrent. Det er tydelig at lamelltykkelsen har en innvirkning på forkullingshastigheten og kullsjiktets egenskaper, noe som betyr at det er behov for et systematisk og omfattende testprogram hvor ulike lamellvariasjoner- og kombinasjoner studeres. På den måten kan man komme fram til tydelige konklusjoner som kan bidra til et regelverk med tilhørende beregningsmodeller som danner et korrekt grunnlag for prosjektering av slike konstruksjoner.

### 6.1.3 Gipsbeskyttelse

I alle testene hvor det ble undersøkt fremkom gipsbeskyttelse som et svært godt brannsikkerhetstiltak ved bygging av trekonstruksjoner. I Li et al. (2015) [49], Hakkarainen (2002) [29], Kolaitis et al. (2014) og Frangi et al. (2008) [19] demonstreres gipsplaters gode beskyttelsesevne, og i alle testene som ble utført med to lag gipskledning ble de bakenforliggende trekonstruksjonene tilfredsstillende beskyttet gjennom hele testforløpet. Ved testing av ett lag gips i [49] holdt gipsplatene seg på plass i lang tid (60 minutter), men de beskyttet ikke treverket mot varmeeksponering fra brannen like godt som ved bruk av to lag gips. Forkulling av treverket begynte etter cirka 22 minutter, noe som er sammenfallende med Hakkarainen (2002) som konkluderte med at hvert lag gips forsinket forkullingsstart med 20 minutter. Hakkarainen (2002) beskriver den eneste virkelig langvarige testen som ble funnet i litteraturen, og her ble de to lagene med gipsplater værende på veggen i de 169

minuttene testen varte. Videre er det funnet i Kolaitis et al. (2014) at gipsplater gir en vesentlig bedre beskyttelse enn trebaserte paneler, og Kolaitis et al. (2014) viste også at NS-EN 1995-1-2-metoden for å beregne tiden hvor beskyttelsen svikter og tiden hvor forkulling begynner i initielt beskyttede trelementer stemte godt overens med testresultatene.

Ved å beskytte trekonstruksjoner med gips er det vist at man begrenser skadene på trekonstruksjonene, og disse skadene blir svært små ved bruk av to lag gips. Dette er gunstig med tanke på trekonstruksjonenes bæreevne i en brannsituasjon, og også med tanke på kostnadene ved reparasjon og rehabilitering av trekonstruksjoner etter brann. Videre er det vist at gipsplatenes beskyttelse begrenser trekonstruksjonenes mulighet til å bidra til brannforløpet, og at man dermed kan begrense både brannutvikling og brannspredning ved å ta i bruk gipskledning. Dette ble godt illustrert i flere av testene, hvor man i tester med gipsbeskyttelse fikk et vanlig brannforløp med antennelse, overtenning, fullt utviklet brann og avkjølingsfase. Det ble ikke registrert en avkjølingsfase i noen av testene hvor trekonstruksjonene var ubeskyttede.

En forutsetning for at gipsbeskyttelsen fungerer som tiltenkt er naturligvis at denne er utført korrekt og at gipsen er av god kvalitet. Det er derfor viktig at man sørger for god kvalitetssikring av gipsbeskyttelsen i byggverk hvor dette inngår som en del av byggets brannsikkerhetsstrategi.

#### **6.1.4 Fullstendig brannforløp**

Noe det har vært vanskelig å finne eksperimentelle resultater på er hvordan et fullstendig brannforløp i trekonstruksjoner utarter seg. En av problemstillingene som dukker opp ved brannteknisk prosjektering av høye trehus er hva et fullstendig brannforløp i slike konstruksjoner er, og hvordan dette kan modelleres. Et av formålene med denne litteraturgjennomgangen var derfor å undersøke hva som eksisterer av kunnskap rundt fullstendig brannforløp i trekonstruksjoner, og spesielt i trekonstruksjoner med eksponerte treoverflater. I litteraturen som har blitt gjennomgått ble de fleste testene stoppet på et relativt tidlig tidspunkt, enten grunnet for store brannskader eller andre praktiske årsaker, eller fordi testens varighet var forhåndsbestemt. I den fullskala branntesten beskrevet i Frangi et al. (2008) [19] ble brannen slokket som planlagt etter 60 minutter. På dette tidspunktet ble det observert at brannens intensitet begynte å avta, men brannen ble uansett slokket manuelt. Man kan derfor ikke med sikkerhet vite om brannen etterhvert ville slokket av seg selv, hvor lang tid dette eventuelt ville tatt, eller hva som ville skjedd i mellomtiden. I alle testene der eksponerte treoverflater ble undersøkt var brannen fremdeles fullt utviklet ved testavslutning, og kunnskap om fullstendige brannforløp i slike situasjoner oppleves som svært begrenset. Dette er også et område flere av artiklene som er gjennomgått anbefaler at det fokuseres på i videre forskning.



Dersom det oppstår en brannsituasjon i et høyhus kan personer som befinner seg i etasjene over brannen bli fanget uten rømningsmuligheter. Dersom huset er høyt nok kan brannvesenets muligheter for slokking og evakuering være begrensede, og det kan oppstå situasjoner der man er avhengig av at konstruksjonen tåler at brannen får utvikle seg fritt fram til den slokker av seg selv for at personsikkerhet skal være ivaretatt. Ved at det bygges stadig høyere hus øker sannsynligheten for at det oppstår en brannsituasjon hvor brannen oppstår høyt nok oppe til at brannmannskapene ikke kommer til, og at det samtidig er etasjer med personopphold over brannetasjen. I slike situasjoner kan man være nødt til å være fullstendig avhengig av bygningens brannmotstand fram til brannen slokker av seg selv. Tester hvor man lar brannen utvikle seg uten ytre påvirkning kan gi en bedre kunnskap om hvorvidt den etter hvert slokker av seg selv, samt at man gjennom slike tester kan lære mer om trekonstruksjonenes bidrag til brannen.

### 6.1.5 Naturlig brann vs. standardbrann

I alle branntester som er funnet i litteraturen der eksponerte trekonstruksjoner ble utsatt for en naturlig brann ble det målt temperaturer og varmeflukser som var vesentlig større enn hva ISO 834-standarden gir som belastningskurve. ISO-kurven er en klassifiseringskurve som har etablert seg som en allment akseptert testkurve lenge før man begynte å bygge fleretasjes trehus. Dette er en testkurve som det ved tidligere byggeskikk ikke har vært grunn til å stille spørsmål ved, men det kan virke som at de siste årenes utvikling i byggeskikk burde følges av en utvikling i eksisterende testmetoder.

Flere av branntestene i den gjennomgåtte litteraturen er gjennomført med en brann-eksponering som følger ISO-kurven. Da dette er en testkurve som virker å komme til kort hva gjelder testing av sammensatte systemer med utstrakt bruk av brennbare materialer kan det stilles spørsmål ved relevansen av slike tester.

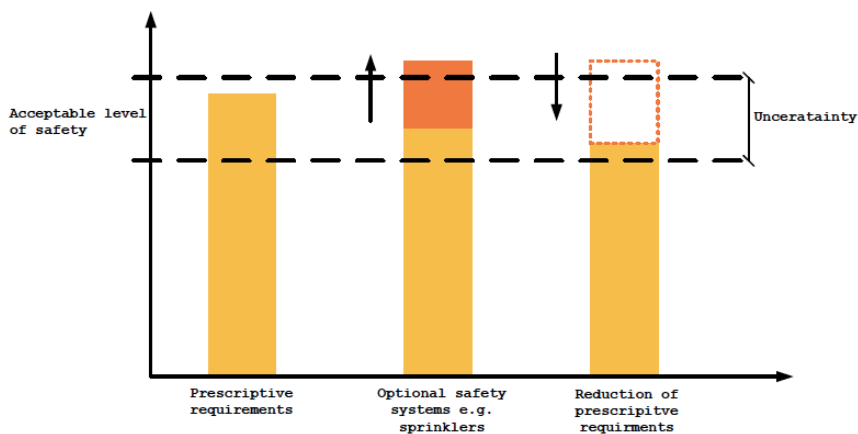
## 6.2 Campus Ås - Pentagon 2

Den branntekniske sluttrapporten for Pentagon 2 begynner med et kapittel hvor prosjektets grunnlag og forutsetninger beskrives. Store deler av dette kapitlet går med til å beskrive byggeprosjektets miljøprofil, og det er dedikert et eget avsnitt til å beskrive de miljømessige og tekniske fordelene ved å bygge med tre. Her beskrives fotosyntesen og skogens funksjon som en “ $CO_2$ -støvsuger”, mens de brann- og lydtekniske utfordringene ved bruk av tre knapt nevnes. Disse utfordringene omtales som en oppfatning som gjennom ny kunnskap og nye tekniske løsninger ikke lenger stemmer. De miljømessige fordelene ved å bygge med tre er ikke koblet til hvordan brannsikkerheten i bygget er ivaretatt. Introduksjonen i rapporten framstår som en irrelevant blanding av fagområder. Valget av tre som bygningsmateriale i de to studentbyggene

er naturlig nok knyttet til treverkets miljøgevinster, og dette er et sentralt aspekt ved dette byggeprosjektet. Men etter at dette valget av bygningsmaterialer er lagt inn som en del av prosjektets rammer skal den branntekniske prosjekteringen sørge for at teknisk forskrifts krav til brannsikkerhet er oppfylt innenfor de gitte prosjektrammene. Materialfordeler som ikke angår brannsikkerheten er derfor lite relevant i en slik rapport. Det å skille mellom fagområder og hva som er relevant kan oppleves som pirkete, og at det brukes noen sider på å diskutere klima i en slik rapport er kanskje bare en bagatell. Men dersom en brannteknisk rapport innledes med å beskrive positive aspekter ved tre som bygningsmateriale og de branntekniske utfordringene avfeies som misoppfatninger, så kan dette oppfattes som en indikasjon på at andre temaer enn brannsikkerhet har vært med på å styre den branntekniske prosessen.

I både den branntekniske sluttrapporten og den branntekniske fraviksanalysen for Pentagon 2 oppgis det at installering av automatisk sløkkeanlegg (sprinkleranlegg) er et kompenserende tiltak. Hensikten med å legge til kompenserende tiltak i en bygnings brannsikkerhetssystem er at de skal kompensere for tiltak som fjernes fra systemet, slik at det helhetlige brannsikkerhetsnivået fremdeles er på et tilfredsstillende nivå [60]. Dette prinsippet er illustrert i figur 6.1. Men kan et tiltak som allerede er til stede i byggets brannsikkerhetssystem kompensere for at andre deler av brannsikkerhetssystemet degraderes? I følge TEK10 §11-12 (1) a) skal ethvert byggverk i risikoklasse 4 hvor det er krav om heis utstyres med automatisk brannsløkkeanlegg, og i følge TEK10 §12-3 (2) er det krav om heis i alle byggverk med tre eller flere etasjer og boenhet. Dermed er altså automatisk sløkkeanlegg et ufravikelig forskriftskrav i alle bygg i risikoklasse 4 med 3 eller flere etasjer. Dersom sprinkleranlegg benyttes til å kompensere for fravik i et bygg i risikoklasse 4 og brannklasse 3 kan det derfor argumenteres for at man tar vekk komponenter fra byggets sikkerhetssystem uten at man legger til nye komponenter i dette systemet. I sum nedjusterer man dermed sikkerheten, og byggets helhetlige sikkerhetsnivå blir lavere enn det preaksepterte sikkerhetsnivået.

I fraviksrapporten pekes det på at krav om automatisk sløkkeanlegg er et funksjonskrav som har til hensikt å øke den tilgjengelige rømningstiden i bygget, og at det ikke er noe krav i TEK10 til automatisk sløkkeanlegg for å bevare byggverkets bæreevne og stabilitet. Det stemmer at dette funksjonskravets hovedformål er å øke tilgjengelig rømningstid, men hvorvidt det er klokt å gå “to hakk” ned i sikkerhet fra R90 ubrennbart til R60 brennbart hovedbæresystem og kompensere for dette med et brannsikkerhetstiltak som uansett er til stede i bygget ved R90 ubrennbart hovedbæresystem er utvilsomt diskutabelt. På bakgrunn av at sprinkleranlegget tillegges kompenserende effekt konkluderer fraviksanalysen med at R60 kan anses som preakseptert ved at reduksjonsfaktoren  $\delta_{n1}$  ved beregning av spesifikk brannenergi i henhold til NS-EN 1991-1-2 Tillegg E kan settes lik 0.6. Denne 40% reduksjonen i brannlast medfører at R90 kan reduseres til R60, da en reduksjon på 30 minutter er



**Figur 6.1:** Illustrasjon av prinsippet med kompensierende tiltak [60]

mindre enn 40% reduksjon av 90 minutter brannmotstand. Faktoren  $\delta_{n1}$  er en faktor som tar hensyn til virkningen av automatisk vannslokkesystem på brannenergien i bygget. I følge det nasjonale tillegget i NS-EN 1991-1-2 kan faktoren  $\delta_{n1}$  settes lik 0.6 såfremt dette inngår som en del av byggverkets brannsikkerhetsstrategi. I risikoklasse 4 og 6 er ikke automatisk slokkeanlegg en del av brannsikkerhetsstrategien men snarere et forskriftskrav. Dermed kan ikke faktoren  $\delta_{n1}$  settes lik 0.6, R90 kan ikke reduseres til R60, og R60 kan ikke anses som en preakseptert løsning for bygget.

I sammenligningen av en alvorlig brannsituasjon i analysebygget og referansebygget listes det opp et hendelsesforløp som vil føre til en slik alvorlig brannsituasjon, med tilhørende sannsynlighet for de ulike hendelsene i de to byggene. Her settes sannsynligheten for at sprinkleranlegg i referansebygget ikke fungerer som forutsatt lik 100%, noe som tilsvarer et referansebygg uten installert automatisk slokkeanlegg. I henhold til NS3901 - Krav til risikovurdering av brann i byggverk skal referansebyggverket som benyttes i en komparativ analyse være det preaksepterte alternativet til analysebyggverket [56]. Dermed skal dette være et bygg som har samme antall etasjer, samme risikoklasse og samme brannklasse som analysebyggverket. Referansebyggverket er dermed et bygg hvor det er krav om automatisk slokkeanlegg, og en sammenligning med et bygg uten automatisk slokkeanlegg er ikke relevant for denne fraviksanalysens formål. Dette blir en sammenligning som gjennomføres på feil grunnlag, og den kan ikke brukes til å vurdere hvorvidt brannsikkerheten i det aktuelle byggverket er bedre eller dårligere enn i et byggverk uten fravik fra VTEK.

I brannsikkerhetsdokumentasjonen stilles det spørsmål rundt hensikten med å ha et hovedbæresystem som har en bedre brannmotstand, og som dermed vil kollapse på et senere tidspunkt, enn sekundærbæresystemet. Forskjellen mellom bærende

hovedsystem og sekundære konstruksjoner i byggverk i brannklasse 3 kommer fram i TEK10 §11-4 4. og 5.ledd hvor det stilles ulike funksjonskrav for hoved- og sekundærbæresystem. Bærende hovedsystem skal dimensjoneres slik at det opprettholder bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, mens sekundære konstruksjoner og konstruksjoner som bare er bærende for én etasje eller for tak skal dimensjoneres slik at de opprettholder tilstrekkelig bæreevne og stabilitet i tiden som er nødvendig for rømning fra bygget [48]. Krav til bærende hovedsystem går altså direkte på å unngå en global konstruksjonskollaps, mens kravet til sekundære konstruksjonsdeler handler om å sørge for at personer og husdyr som oppholder seg i byggverket kommer seg ut i tide. En kollaps av det bærende hovedsystemet medfører en global konstruksjonskollaps, mens kollaps av sekundære konstruksjoner kun gir lokal kollaps. En slik lokal kollaps vil ikke utgjøre en trussel for liv eller miljø såfremt den ikke medfører en dominoeffekt som gir global kollaps eller for eksempel samtidig sammenrasing av alle underliggende etasjeskillere, og såfremt den skjer etter at rømning har funnet sted. Dersom ett dekke kollapse skal byggets bærende hovedsystem fremdeles ha kapasitet til å bære de resterende dekkene, og unngå en plutselig og katastrofal progressiv kollaps.

Et av de kompensierende tiltakene som angis i fravikrapporten er at alle hybelrom bygges i praksis som brannceller EI60. Samtidig oppgis det at et annet kompensierende tiltak er at alle hybelrom har uavhengig tilgang til to trapper fra hver branncelle, da hybelrom er en del av branncelle fellesareal. Her er det naturlig å stille spørsmål rundt hvorvidt man kan oppnå disse to plussfravikene samtidig. En hybelenhet skal i henhold til preakseptert ytelse i VTEK kun regnes som egen boenhet, og dermed være egen branncelle, dersom den innehar alle nødvendige funksjoner. Da hybelenhetene på Pentagon 2 ikke innehar eget kjøkken regnes disse dermed ikke som boenheter, og de trenger ikke å utføres som egne brannceller. Dersom man likevel velger å utføre hybelenhetene som egne brannceller stilles det krav i §11-13 til utgang fra disse. Fra branncelle skal man ha utgang direkte til enten to uavhengige rømningsveier eller én utgang til rømningsvei med to alternative rømningsretninger som fører videre til uavhengige rømningsveier eller sikre steder [48]. Rømningsvei skal utføres som egen branncelle, og dersom hybelenhetene i de to byggverkene var utført som egne brannceller ville utgang fra disse ført ut til branncelle fellesareal. Dette er ikke en rømningsvei utført som egen branncelle, og krav til utgang fra branncelle hybelenhet ville dermed ikke være oppfylt. Ved at hybelenhetene inkluderes i branncelle fellesareal er derimot krav til utgang fra branncelle oppfylt, da dette medfører at man får direkte tilgang fra branncelle til innvendig Tr 2-trapperom og utvendig ståltrapp. Men kan man regne dette som et pluss-fravik samtidig som man sier at hver hybelenhet i praksis er en branncelle, og regner også dette som et pluss-fravik? Hva legger man i så fall i at hybelenhetene *i praksis* er egne brannceller?

Gjennom å beregne ekvivalent branntid ble det vist at R60 bærende hovedsystem

er tilstrekkelig for en maksimal brannenergi på  $270MJ/m^2$ , da R90 angis som tilstrekkelig for en brannenergi helt opp til  $400MJ/m^2$ . Dette er korrekt, men hvor mye gjenværende fleksibilitet og sikkerhetsmargin sitter man igjen med etter denne brannmotstandsreduksjonen? Det preaksepterte ytelseskravet som angir R90 brannmotstand for byggverk med en spesifikk brannenergi mindre eller lik  $400MJ/m^2$  er et ytelseskrav som også gjelder for byggverk hvor den spesifikke brannenergien er lavere enn  $400MJ/m^2$ , og selv i situasjoner hvor brannenergien er  $400MJ/m^2$  er det en sikkerhetsmargin bygget inn i dette ytelsesnivået. Det kan tenkes at ved å gå fra R90 ubrennbart bærende hovedsystem til R60 brennbart bærende hovedsystem reduseres denne innebygde sikkerhetsmarginen. Selv om man på bakgrunn av ekvivalent branntid kan gjøre en slik reduksjon, hvor stor sikkerhetsmargin sitter man egentlig igjen med etter denne reduksjonen? Og hvor stor kan den gjenværende sikkerhetsmarginen forventes å være dersom man tar i betraktning usikkerheten som er knyttet til input-parametrene som benyttes for å beregne ekvivalent branntid og bærende konstruksjoners brannmotstand? Det har blitt gjennomført en grundig litteraturgjennomgang, oppsummert i kapittel 4, og kunnskapen rundt eksponerte trekonstruksjoner i en brannsituasjon er funnet å være mangelfull. Det empiriske grunnlaget for å vurdere omfanget av trekonstruksjonenes bidrag til byggets brannenergi, samt den reelle forkullingshastigheten i slike byggverk, er for øyeblikket utilstrekkelig. Det må derfor forventes at det er usikkerhet knyttet til den beregnede brannenergien i slike bygninger, noe som betyr at det burde være en sikkerhetsmargin til stede som veier opp for denne usikkerheten. Videre er det funnet at mye tyder på en forkullingshastighet i treverk som er høyere enn hva man tidligere har trodd, og høyere enn hva som er angitt i NS-EN 1995-1-2. Det er funnet at forkullingshastigheten påvirkes av flere faktorer, noe som gir en kompleks situasjon med flere usikkerheter. For eksempel vil man få en høyere forkullingshastighet dersom massivtreelementene er utført med et lim som gjør at lamellene slipper og faller ned på et tidlig tidspunkt. I Pentagon 2-prosjektet er det forutsatt at treverket forkuller 40mm på én time, noe som tilsvarer en forkullingshastighet på  $0.67\text{mm}/\text{min}$ . Dette er en veldig lav forkullingshastighet sammenlignet med forkullingshastigheter målt i eksperimenter, det ble for eksempel målt en gjennomsnittlig forkullingshastighet på  $1.1\text{mm}/\text{min}$  i branntest av massivtre gjennomført i Trondheim [31]. Dersom man benytter en forkullingshastighet på  $0.67\text{mm}/\text{min}$  og den virkelige forkullingshastigheten viser seg å være  $1.1\text{mm}/\text{min}$ , så betyr dette at man har en differanse på  $0.43\text{mm}/\text{min}$  mellom antatt og virkelig forkullingshastighet. Med denne differansen vil treverket forkulles cirka  $0.43\text{mm}/\text{min} * 60\text{min} \approx 26\text{mm}$  mer i løpet av én time enn hva man har lagt til grunn for dimensjonering av konstruksjonsdelenes brannmotstand. Da kan det stilles spørsmål rundt hvorvidt den reelle brannmotstanden er R60, eller om den med 25mm ekstra forkulling er vesentlig lavere. Dette viser hvordan et robust sikkerhetssystem avhenger av input-parametre med en liten grad av usikkerhet, og hvordan sikkerhetsmarginen i systemet reduseres dersom beregninger gjøres med usikkert datagrunnlag.

Burde man med dagens tydelig mangelfulle empiriske kunnskapsgrunnlag og de usikkerheter dette fører med seg kanskje heller legge inn en økt sikkerhetsmargin ved bygging av høye trehus, i stedet for å redusere den sikkerhetsmarginen som VTEK sine preaksepterte ytelser fører med seg?

Det kan virke som at en tydeligere definering i forskriften av fullstendig brannforløp i trekonstruksjoner kunne vært fordelaktig. Som beskrevet i kapittel 4 så var det ikke tegn på en begynnende avkjølingsfase i noen av testene hvor det var benyttet ubeskyttede treflater, og grunnet trekonstruksjonens bidrag til brannenergien var det indikasjoner på at et fullstendig brannforløp i trekonstruksjoner kan være svært langvarig. Det ble ikke funnet litteratur på noen tester hvor trekonstruksjoner med eksponerte treflater gjennomgikk et fullstendig brannforløp. Dersom forskriften med veiledning da åpner opp for at man kan tolke begrepet *fullstendig brannforløp* i høye trekonstruksjoner til å være kortere enn 90 minutter uten at denne tolkningen er empirisk underbygget, kan dette være uheldig. Dersom man inkluderer bidrag fra brennbar konstruksjon i brannlasten vil dette resultere i et mer langvarig parametrisk brannforløp [29], noe som vil si at ved brennbare konstruksjoner hvor konstruksjonen deltar i brannen får man et mer langvarig brannforløp. Da kan det stilles spørsmålsteget ved en dokumentasjon som argumenterer for det motsatte.

I den branntekniske sluttrapporten for Campus Ås [14] står det under §11-4 at krav til bæring er at denne skal utføres slik at byggverket bevarer sin stabilitet og bæreevne i den tid som er nødvendig for rømning og redning. Men i følge TEK10 skal bæresystemet i brannklasse 3 og 4 dimensjoneres for å opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. Det kan dermed virke som at i den branntekniske prosjekteringen har funksjonskravet i TEK10 som sier at byggverk i brannklasse 3 og 4 skal bevare tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp blitt tolket til å være et krav som har til hensikt å sørge for at en har tilstrekkelig tid til rømning og redning i en brannsituasjon, altså at dette kravets formål er å ivareta personsikkerheten. Dersom dette er tilfellet, hvor riktig er egentlig denne tolkningen av forskriften? Hva er forskriftens hensikt med å differensiere mellom hoved- og sekundærbæresystem i brannklasse 1 og 2, og hoved- og sekundærbæresystem i brannklasse 3 og 4? Er innskjerpingen av krav til bæresystem i brannklasse 3 og 4 kun et resultat av at det i denne typen bygninger må stilles strengere krav til personsikkerheten, eller er det også fordi en kollaps av et hus med fem eller flere etasjer får vesentlig større konsekvenser enn for eksempel et toetasjes hus?

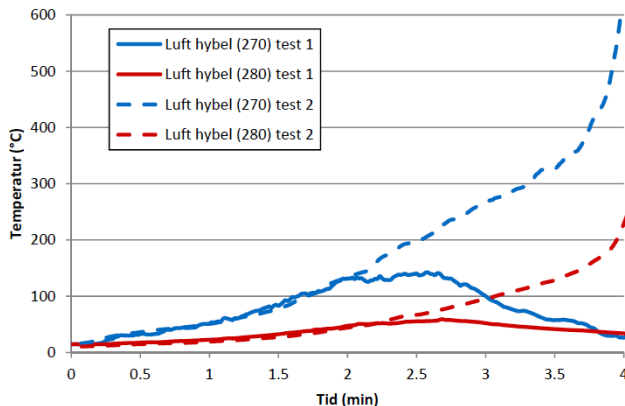
### 6.3 Moholt 50|50

Som tidligere nevnt ønsket Rambøll ikke å gi ut risikoanalysen fra den branntekniske prosjekteringen av de fem studenttårnene som bygges i forbindelse med prosjektet

Moholt 50|50. Denne risikoanalysen dokumenterer hvordan likeverdig sikkerhetsnivå er oppnådd ved de fravik som er beskrevet i kapittel 5, og konseptrapporten alene gir lite informasjon om hvordan fravikene er behandlet. Det har derfor ikke vært mulig å sette seg inn i hvordan disse fravikene er håndtert i dette prosjektet, og derav er det ikke mye grunnlag for å diskutere dette. Det velges derfor i stedet å diskutere forhold som denne risikoanalysen burde ta for seg dersom et tilfredsstillende sikkerhetsnivå skal oppnås, med bakgrunn i sentrale problemstillinger som dukket opp i forbindelse med branntest av massivtre [31]. De to branntestene ble gjennomført spesifikt med hensyn på dette prosjektet, og det ble etterstrebet å gjenskape en reell brannsituasjon i disse byggene. Resultatene fra de to testene er dermed svært relevante for dette prosjektet. Uten risikoanalysen oppleves det som lite hensiktsmessig å drøfte brannkonseptet alene, da dette uansett ikke gir et fullstendig bilde av brannsikkerheten i prosjektet.

### 6.3.1 Sprinklerpålidelighet

I test 1 viste sprinkleranlegget seg å være et effektivt og tilstrekkelig brannsikkerhets-tiltak for å kontrollere brannen på et tidlig tidspunkt. Med aktivert sprinkleranlegg inne i hybelen ble brannen kontrollert på en tilfredsstillende måte, og temperaturene og brannskadene i hybelen var relativt små. Resultatene i test 2 illustrerer viktigheten av et fungerende sprinkleranlegg inne i hybelen. I denne testen, hvor man simulerte en situasjon hvor sprinkleranlegget i hybelen er defekt, ble resultatet ganske annerledes. Figur 6.2 viser at brannforløpet var likt i de to testene fram til sprinkleranlegget løste ut i test 1, og hvordan temperaturutviklingene etter dette var vidt forskjellige.



Figur 6.2: Sammenligning av temperaturutviklingen i de to testene [31]

Utløsningen av sprinklerhodene i korridoren hadde ingen innvirkning på brannforløpet i hybelen, og i og med at hybelbrannen gikk til overtenning i test 2 var det gode

forhold for brannspredning til tilstøtende rom når sprinkleranlegget i startbranncellen ikke løste ut[31].

Sprinkleranlegg er et anbefalt aktivt brannsikkerhetstiltak, og påliteligheten til slike systemer er funnet å være svært god. Sannsynligheten for at sprinkleranlegg i et bygg fungerer som det skal er rundt 95% [54]. Tabell 6.1 gir en oversikt over årsaker til sprinklersvikt og sprinklerineffektivitet i branner i sprinklede bygg i USA i perioden 2007-2011.

Årsak	Aktiveringssvikt	Ineffektivitet	Kombinert
Systemfeil	1638 42%	0 0%	1638 42%
Manuelle systeminngrep	568 14%	114 3%	682 17%
Brann utenfor vannforsynings rekkevide	0 0%	516 13%	516 13%
Ikke tilstrekkelig vannforsyning	0 0%	385 10%	385 10%
Manglende vedlikehold	196 5%	54 1% 251 6%	
Skade på komponenter	183 5%	67 2%	250 6%
Feil sprinklersystem for brannsituasjonen	161 4%	64 2%	225 6%
Total	2746 70%	1200 30%	3946 100%

**Tabell 6.1:** Årsaker til svikt og ineffektivitet i sprinkleranlegg [30]

Som tabellen viser innebærer sprinklersvikt mer enn at sprinkleranlegget ikke fungerer grunnet strømbrytning, manglende vannforsyning eller andre hendelser som gjør at sprinkleranlegget aldri aktiveres i en brannsituasjon. Selv om sprinkleranlegget aktiveres er det ikke gitt at dette betyr at det fungerer som tiltenkt. For å sørge for et velfungerende sprinkleranlegg er det derfor viktig at dette dimensjoneres slik at det både aktiveres på et tidlig tidspunkt dersom en brannsituasjon oppstår, og at det er utformet slik at ved aktivering vil det kontrollere brannsituasjonen raskt og effektivt. Det er grunn til å stille spørsmål ved sprinklerpålitelighet som begrunnelse for at sikkerheten er ivaretatt, så lenge denne ikke er lik 100%. Dersom en dør med gitt brannmotstand blir stående åpen ved brann så er branncellens egenskaper helt annerledes enn om den var lukket ved brannstart. I en slik situasjon spiller det liten rolle om påliteligheten til dette tiltaket bare er 70% [60], og brannen bryr seg lite om at det bare var 30% sannsynligheten for at døren stod i åpen stilling. Slik vil det også være med sprinklerinstallasjonene, og sprinklersvikt burde vurderes som en viktig parameter i den totale analysen og det totale sikkerhetssystemet, uavhengig av sprinklerinstallasjonenes pålitelighet.

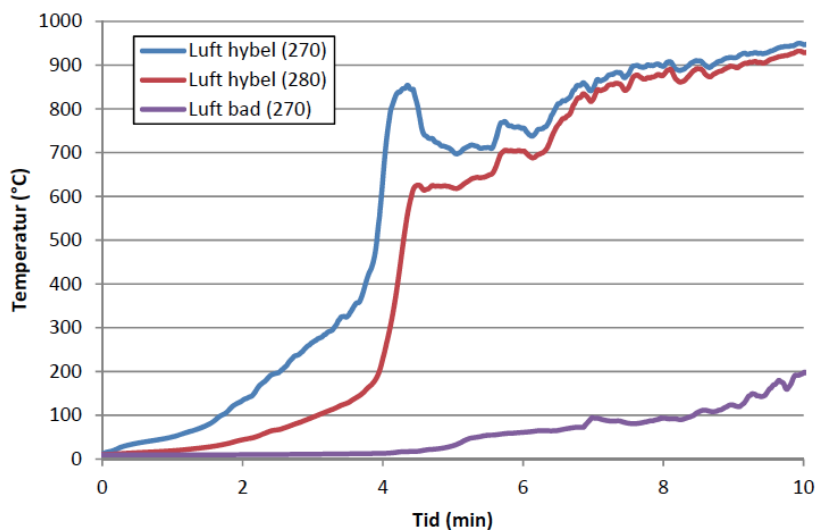


### 6.3.2 Temperaturutvikling og brannenergi

Test 2 som simulerte en brannsituasjon med defekt sprinkleranlegg fremhevet både viktigheten av et velfungerende sprinkleranlegg og en brannsikkersprosjektering som vektlegger byggverkets brannsikkerhet dersom sprinkleranlegget ikke fungerer som tiltenkt. I en brannsituasjon i en hybelenhet hvor sprinkleranlegget inne i hybelen ikke kontrollerer brannen tidlig vil den raskt gå til overtenning, og man får en temperaturgradient som følger temperaturgradienten til en hydrokarbonbrannkurve. Selv om sprinkleranlegget i korridoren fungerer vil ikke dette ha noen innvirkning på hybelbrannens utvikling, og en fullt utviklet brann i hybelen vil kunne spres videre til korridoren. På det tidspunkt hvor brannen sprer seg til korridoren har denne brannen blitt såpass stor at sprinkleranlegget i korridoren ikke klarer å kontrollere den.

Figur 6.3 viser temperaturer målt i forskjellige høyder over gulvet i hybelen i løpet av de første 10 minuttene av test 2, hvor tallene i parentes angir høyde i cm over gulvet. Målingene som ble gjort av termoelementet plassert 280cm over gulvet ble påvirket av taket på testrommets overflatetemperatur, og er derfor lavere enn temperaturmålingene som ble gjort 270cm over gulvet. Temperaturkurven fra termoelementet som var plassert 270cm over gulvet indikerer en viktig mekanisme som kan inntreffe i en rombrann hvor himlingen er utført med ubeskyttet treverk, nemlig at himlingen involveres i brannens vekstfase og bidrar til raskere overtenning av rommet. Etterhvert som røyksjikttemperaturen i øvre del av rommet stiger blir treverket i himlingen eksponert for stadig høyere temperaturer, og figur 6.3 viser at himlingen ble eksponert for temperaturer over 300°C før overtenning av rommet inntraff. Ved en overflatetemperatur på 350 – 360°C skal det bare en liten gnist til for at treverk antennes [23], og dette kan også skje ved lavere temperaturer [4]. Rundt tidspunktet hvor 300 – 350°C ble målt 270cm over gulvet ser man av figur 6.3 at temperaturgradienten blir større fram til overtenning inntreffer, noe som indikerer at himlingen antente og bidro til raskere brannutvikling med økt varmestråling fra røyksjiktet, raskere brannspredning og økt temperaturvekst fram til overtenning. Dette kan ha medvirket til den raske overtenningen av rommet og den raskt voksende temperaturkurven med maksimaltemperaturer langt over hva som ble forventet. Åpen dør har også bidratt til at ventilasjonsbetingelsene i rommet var bedre enn dersom døren hadde vært lukket. En slik himlingsinvolvering med raskere overtenning ville ikke inntruffet dersom himlingen var beskyttet av for eksempel gipsplater, eller dersom den var utført i brennbare materialer som for eksempel betong. Følgelig er dette en mekanisme som ikke burde overses, men som man burde ta hensyn til når mulige brannforløp i bygg med ubeskyttet trehimling vurderes.

Figur 4.11 viser temperaturene målt inne i hybelen sammenlignet med standard temperatur-tidkurven (ISO-834) og kurven for en hydrokarbonbrann (HC-kurve). Som figuren viser var temperaturgradienten etter antennelse i test 2 svært bratt,



**Figur 6.3:** Målte temperaturer i luften i hybelen og på baderommet i løpet av de første 10 minuttene av test 2 [31]

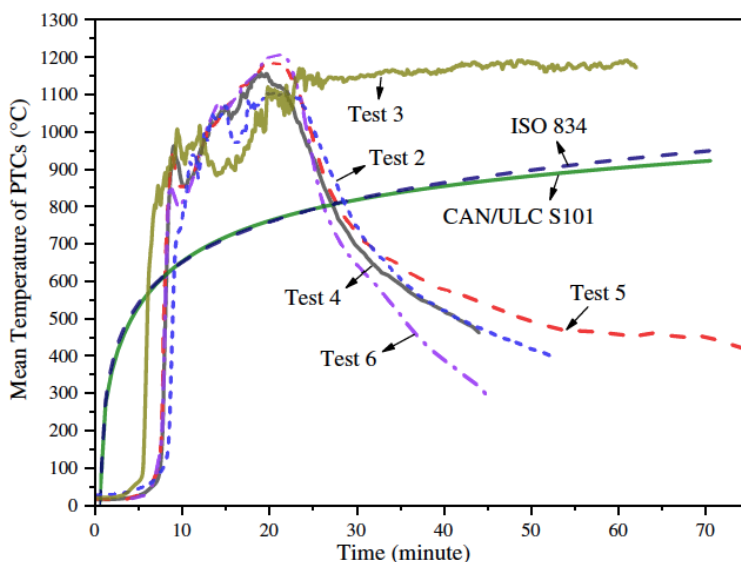
og den fulgte HC-kurvens temperaturgradient. Dette betyr at brannen vokste mye raskere enn en brann som følger standard temperatur-tidkurven, og etter overtenning var temperaturene mye høyere enn denne kurven. Etter overtenning og fram til 30 minutter ut i testen var branneksporingen tilnærmet ekvivalent med branneksporingen fra en hydrokarbonbrann, og den lå flere 100°C over ISO-kurven. Denne temperaturutviklingen indikerer et vesentlig bidrag fra de brennbare konstruksjonene til rommets brannenergi, noe som illustrerer en vesentlig forskjell mellom brannsituasjonen i en brennbar og en ubrennbar konstruksjon. I en ubrennbar konstruksjon begrenses brannen av tilgjengelig mengde brennbart inventar. Når dette er forbrent er det ikke mer tilgjengelig brensel til å opprettholde brannen, og den vil slokke. I en brannsituasjon i en brennbar konstruksjon er det ikke lenger bare det brennbare inventaret som er den begrensende brenselfaktoren, da også bygningens konstruksjonsdeler bidrar til den totale brannenergien i bygget. Dette skaper en situasjon hvor mengden brannenergi er større, noe som gir en både mer intens og mer langvarig brann. Lignende observasjoner ble også gjort i Li et al. (2015) [49] og Hakkarainen (2002) [29], hvor brannforløp i beskyttede og ubeskyttede trekonstruksjoner ble undersøkt og sammenlignet. I testene som beskrives i Li et al. (2015) [49] ble total varmeavgivelsesrate målt i de ulike testene, som vist i figur 4.5. Den totale varmeavgivelsesraten i testen med eksponerte massivtreflater var omtrent det dobbelte av i de andre testene, og som figuren viser var det ingen indikasjon på en avkjølingsfase i løpet av testens varighet. I testene beskrevet i Hakkarainen (2002) [29] fikk man tidligere overtenning i testrommene som var utstyrt med eksponerte treflater eller

utilstrekkelig gipsbeskyttelse (ett lag standard gips) enn i testrommene med to lag gipsbeskyttelse, og ingen begynnende avkjølingsfase. Denne temperaturutviklingen som ble observert i test 2 og testresultatene som beskrives i Hakkarainen (2002) [29] og Li et al. (2015) [49] viser at det er nødvendig å gjøre gode og realistiske vurderinger av trekonstruksjonenes bidrag til brannenergien ved beregning av byggets totale brannenergi, spesielt i situasjoner hvor disse er ubeskyttet eller utilstrekkelig beskyttet.

Videre illustrerer temperaturutviklingen i test 2 en usikkerhet knyttet til hvor hensiktsmessig bruken av standard temperatur-tidkurven ved klassifisering av bygningsmaterialer er. Ved klassifisering av bygningsmaterialer i henhold til ISO 834 skal gjennomsnittstemperaturen i testovnen følge temperaturutviklingen for en standard nominell branneksponeering gitt av likning 3.3, men som figur 4.11 viser så var temperaturen som testhybelen ble eksponert for vesentlig høyere enn temperaturene som benyttes ved ISO-834-testing. Temperaturmålinger fra testene beskrevet i Li et al. (2015) [49], fremstilt i figur 6.4, viser også en slik differanse mellom virkelig branneksponeering og ISO 834-eksponering. Disse observasjonene gjør det nødvendig å stille spørsmålsteget ved hva den reelle brannmotstanden til bygningsprodukter som er klassifisert etter ISO 834-standarden er dersom de plasseres i en bygning med massivtrekonstruksjoner. Hvor lenge vil for eksempel en dør som gjennom ISO-testing er funnet å motstå 60 minutter branneksponeering klare å motstå en branneksponeering som er flere 100°C mer intens enn branneksponeeringen i testsituasjonen? Det kan for eksempel også tenkes at gjennomføringer i brannskillende konstruksjoner som tettes med tetteprodukter klassifisert etter ISO-834 svekker konstruksjonens brannskillende evne dersom tetteproduktene reelle brannmotstand ikke samsvarer med den klassifiserte brannmotstanden. Det er dermed grunn til å betvile den standardiserte branntesten i ISO-834 sin relevans i forbindelse med bygninger som har bærende og skillende konstruksjoner utført i treverk, og hvorvidt de preaksepterte ytelsene i VTEK som omhandler bygningselementer og bygningsdelers brannmotstand tilfredstillende forskriftens sikkerhetsnivå i bygninger med massivtrekonstruksjoner er noe som burde undersøkes.

### 6.3.3 Fasadespredning

I test 2 knuste det siste vindusglasset i hybelenheten etter 5 minutter og 45 sekunder, cirka 1.5 minutt etter overtenning, og flammene stod ut av vindusåpningen. Utvendig kledning var ikke montert utenfor vinduet, og det ble derfor ikke mulig å gjøre en empirisk vurdering av mulighetene for fasadespredning. Men basert på visuelle observasjoner under testen av flammer som sto ut av vinduet er det rimelig å anta at det ville vært gode betingelser for fasadespredning dersom det var montert trekledning utenfor vinduet. Denne antagelsen underbygges av Li et al. (2015) [49] og Hakkarainen (2002) [29] som fant at en vesentlig andel av forbrenningen



**Figur 6.4:** Målte romtemperaturer sammenlignet med standardkurver [49]

foregikk utenfor testrommenes ventilasjonsåpninger i testene som ble gjennomført med eksponerte treflater. I disse testene bidro vegger og tak til produksjonen av pyrolysegasser, og man fikk underventilerte forhold inne i rommet grunnet et høyt brensel/oksygen-forholdstall. Dermed forlot store mengder uforbrente pyrolysegasser rommet gjennom ventilasjonsåpningene, og brant på utsiden hvor det var rikelig med oksygen.

En stor grad av utvendig forbrenning gir en økt risiko for at brannen sprer seg til andre brannceller [29]. Denne risikoen øker ytterligere ved at fasadekledningen er utført i treverk, som den er både på Pentagon 2 og Moholt 50|50. Det er derfor viktig å gjøre gode tiltak for å redusere denne risikoen i en brannsituasjon. Et mulig tiltak for å redusere denne risikoen kan være å velge vinduer med brannmotstand. Dersom man for eksempel installerer vinduer med 60 minutter brannmotstand vil dette både forsinke tiden det tar fram til vinduet knuser i brannens opprinnelsesrom, og det vil forsinke brannens mulighet til å spre seg til andre brannceller gjennom deres vindusåpninger.

I høye hus kan skorsteinseffekten ha en innvirkning på brannspredningen, og føre til økt fasadespredning i byggets øvre etasjer. Skorsteinseffekten er et fenomen som skyldes forskjeller i lufttettheten mellom varm inneluft og kald uteluft, og dermed en trykkforskjell mellom bygningens inneluft og omgivelsenes uteluft. Denne trykkforskjellen medfører at bygget fungerer som en skorstein, hvor luftstrømmer gjennom

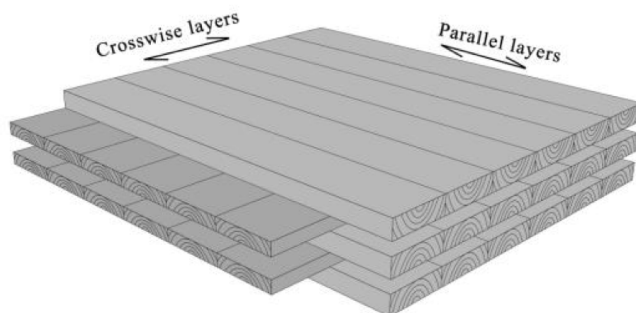
bygget hvor kald uteluft strømmer inn i de nedre deler av bygget, beveger seg oppover i bygget, og strømmer ut av åpninger i de øvre deler av bygget. Spesielt på vinteren hvor temperaturdifferansen mellom inneluft og uteluft er stor kan skorsteinseffekten medføre at flammer fra brannrommet spres i horisontal retning ut av vinduet [65]. Dette er et fenomen som ikke ble studert i testene beskrevet i Hox (2015) [31], da disse var utført innendørs i et testrom på bakkenivå.

### 6.3.4 Forkullingshastighet

I test 2 som beskrives i Hox (2015) [31] ble det målt vesentlig raskere forkulling av massivtreet enn hva man får ved å benytte verdiene for forkullingshastighet som angis i NS EN 1995-1-2. Den gjennomsnittlige forkullingshastigheten som ble målt i den ubeskyttede massivtreveggen var cirka 1.1mm/min, mens den endimensjonale og den nominelle forkullingshastigheten for massivtre i NS EN 1995-1-2 er henholdsvis  $\beta_0 = 0.65\text{mm/min}$  og  $\beta_n = 0.8\text{mm/min}$ , se tabell 3.4. Det faktum at forkullingshastighetene som måles når massivtreet eksponeres for en naturlig brannsituasjon ikke stemmer overens med prosjekteringsstandardens forkullingstall er problematisk, da dette er verdier som benyttes ved beregning av konstruksjonenes bæreevne i en brannsituasjon. Dersom en forutsigbar forkulling av trekonstruksjonene antas og forkullingshastighetene fra tabell 3.4 legges til grunn for beregning av denne forkullingen så indikerer disse testresultatene at man vil ende opp med en konstruksjon hvor bæreevnen i en brannsituasjon svekkes raskere enn man har dimensjonert for. Det er ikke blitt gitt innsyn i hvilken forkullingshastighet som har blitt benyttet ved beregning av R90 hoved- og sekundærbæring på Moholt 50|50, men for at man skal ha en 90 minutters brannmotstand som kan forventes å virkelig være 90 minutter burde forkullingshastigheten være satt til 1.1mm/min.

Som i flere av branntestene som er gjennomgått i kapittel 4 så ble det i test 2 observert delaminering av massivtreelementene. En slik delaminering hvor forkullede lameller faller av og eksponerer friskt treverk for høye temperaturer er funnet å før til økt forkullingshastighet, da isoleringseffekten fra forkullet treverk reduseres. Dersom massivtreelementene er utført med et temperatursensitivt lim som mister sin klebeevne når det eksponeres for høye temperaturer ble det funnet i blant annet Frangi et al. (2009) [21] at dette øker muligheten for delaminering. Det ble også funnet at færre og tykkere lameller reduserte delamineringsfrekvensen, og ga en tregere forkulling. Det er derfor viktig å vurdere utførelsen av massivtreelementene, da dette har en innvirkning på konstruksjonens brannoppførsel. Som nevnt i kapittel 3 har lamellene i krysslagte massivtreelementer et ulikt bidrag til elementets lastbærende evne, avhengig av lamellenes orientering i forhold til lastretningen. Figur 6.5 viser oppbyggingen av et krysslagt massivtreelement, hvor det er de parallelle lamellene som har lastbærende kapasitet. Dette gir en ujevn reduksjon av krysslagte massivtreelementers bæreevne ved forkulling og delaminering. Dersom man i en brannsituasjon får delaminering av

en lamell som er orientert parallelt med lastretningen så medfører dette en vesentlig reduksjon av bæreevnen sammenlignet med forkulling og delaminering av den neste, ikke-lastbærende lamellen [64]. Dette er det viktig å ta hensyn til ved dimensjonering av krysslagte massivtreelementer.



**Figur 6.5:** Illustrasjon som viser lastbærende (parallele) og ikke-lastbærende (tversgående) lameller i krysslaminert massivtre [42]

Det er en usikkerhet knyttet til forkullingsmålingene fra test 2, blant annet grunnet indikasjoner på at termoelementene som målte temperaturer inne i massivtreveggen forhindret kull fra å falle av. Dette kan ha ført til en isolerende effekt på termoelementene, noe som betyr at den virkelige forkullingshastigheten kan ha vært enda høyere enn hva som ble målt. Testen er ikke en klassifiserende test, og man kan ikke benytte disse resultatene som dokumentasjon av forkullingshastigheter. Samtidig viser differansen mellom målte verdier i testen og forkullingsverdier angitt i NS EN 1995-1-2 et tydelig behov for videre undersøkelser av virkelig forkullingshastighet i massivtre som eksponeres for en naturlig brannsituasjon.

Mangelen på belastning av konstruksjonene i testene beskrevet i Hox (2015) [31] medfører ytterligere usikkerhet knyttet til forkullingshastigheten i konstruksjonene, samt konstruksjonenes resterende bæreevne i en virkelig brannsituasjon. Følgende spørsmål rundt testens anvendelighet kan stilles:

- Vil en belastning på konstruksjonene gi en ytterligere økning i forkullingshastigheten?
- Vil en belastning på konstruksjonene som tilsvarer vekten av åtte overliggende etasjer fremskynde tid til kollaps og således kreve en større restkjerne for bæring i et fullstendig brannforløp?

### 6.3.5 Brannforløpets varighet

I testen med deaktivert sprinkleranlegg i hybelenheten (test 2) ble store deler av den ubeskyttede massivtreveggen og taket fullstendig gjennombrent, og taket kollapset. Det var ingen tegn på en avtagende brannintensitet i løpet av de 96 minuttene testen varte, og det er rimelig å anta at også den beskyttede veggen ville blitt gjennombrent dersom brannen ikke hadde blitt slokket manuelt. Denne testen kan ikke brukes til å si noe om varigheten til et fullstendig brannforløp i trekonstruksjoner, da den grunnnet kollaps av taket ble avbrutt. Det ble ikke registrert noen avkjølingsfase i testen, akkurat som i testene med eksponerte trekonstruksjoner beskrevet i Li et al. (2015) [49] og Hakkarainen (2002) [29]. Man kan dermed ikke si noe om hvorvidt massivtrekonstruksjoner kan dimensjoneres for et fullstendig brannforløp basert på disse testene, og det eksisterer et svært begrenset empirisk grunnlag for en konklusjon rundt dette. Hvorvidt det burde bygges fleretasjes trehus med eksponerte massivtreflater i forkant av utvidelsen av dette empiriske grunnlaget er utvilsomt en viktig diskusjon.

Hybelenheten som ble testet var uten påført last som kommer fra vekten av øvrige etasjer, og man fikk dermed ikke en realistisk simulering av en brannsituasjon i for eksempel en hybelenhet i første etasje hvor tak og vegger er påført last fra etasjer over. I en slik situasjon kan det for eksempel forventes at taket ville kollapset på et tidligere tidspunkt, og pålastede vegger ville oppført seg annerledes etterhvert som forkullingsdybden i veggene økte. En fullstendig kollaps av hybelenheten i løpet av testen er ikke urimelig å anta.

## 6.4 Åpenhet i brannteknisk prosjektering

I arbeidet med å få tilgang til brannsikkerhetsdokumentasjon fra aktuelle byggeprosjekter dukket det opp flere utfordringer underveis, som beskrevet i kapittel 2. Brannrapportene fra Treet i Bergen ble tilbakeholdt på tross av at prosjektets byggherre (BOB) var positiv til å gi innsyn i disse. Risikoanalysen fra Moholt 50|50 ble også tilbakeholdt, slik at en fullstendig gjennomgang av dette prosjektets brannsikkerhet ikke var mulig. Årsaken til at disse rapportene ble tilbakeholdt er ikke kjent, men det er relevant å stille spørsmål om det er forhold ved den branntekniske prosjekteringen som det ikke er ønskelig at blir gransket. Selv om det ikke ble gitt innsyn i vesentlige deler av dokumentasjonen fra Treet i Bergen er det registrert at dette bygget er utført uten gipsbeskyttelse av konstruksjonen. I epost fra Sweco 30.mars ble det oppgitt at grunnnet store dimensjoner var beskyttelse av treverket med for eksempel gipskledning funnet å være unødvendig, samt at konstruksjonenes brannmotstandstid var oppnådd ved å benytte forkullingsdata fra NS EN 1995-1-2. Hvordan det vesentlige bidraget fra de eksponerte massivtrekonstruksjonene som dette fører med seg er kompensert for, samt hvorvidt man ved anvendelse av

forkullingsdata fra NS-EN 1995-1-2 har tatt høyde for konstruksjonenes bidrag til brannenergien, ville vært interessant å undersøke. Brannsikkerhet er en svært sentral del av et byggverk, og en transparent og åpen prosjekteringsprosess oppleves som en viktig forutsetning for at brannsikkerheten kan anses som ivaretatt.

Denne oppgavens formål har vært å undersøke brannsikkerheten i høye trehus, og på denne måten bidra til økt kunnskap rundt dette temaet. En bedre kunnskap om hvordan man sørger for at brannsikkerheten er ivaretatt i slike byggverk vil muliggjøre byggingen av flere slike byggverk basert på et adekvat kunnskapsgrunnlag med hensyn til brannsikkerhet. Tilbakehold av informasjon knyttet til dagens høye trehus hemmer utviklingen av en brannfaglig vurdering, og dermed bruken av treverk som bygningsmateriale. Dersom man kan utvikle et mer kunnskapsbasert beslutningsgrunnlag for den branntekniske prosjekteringen vil dette føre til at skepsisen rundt byggingen av høye trehus kan reduseres. Dersom risikoen knyttet til disse byggverkene kommuniseres til allmennheten på et mer kunnskaps- og forskningsbasert grunnlag vil dette muliggjøre mer informerte beslutninger vedrørende brannsikkerheten i høye trehus. En bedre risikokommunikasjon som baserer seg på all relevant informasjon fremfor antagelser eller ufullstendig informasjon uten empirisk underbygging vil være positivt for videre vekst innenfor dette området. utfordringene knyttet til brannsikkerheten, uansett hvor ubeleilige de er i et miljøperspektiv, er fremdeles reelle. Den eneste måten å håndtere disse utfordringene på er å opparbeide en økt kunnskap om dem, samt arbeid med å bringe denne kunnskapen inn i prosjektering på en funksjonell måte.



# Kapittel 7

## Konklusjon

Dette arbeidet har hatt som formål å undersøke hvorvidt brannsikkerheten kan anses å være ivaretatt på tilfredsstillende vis i høye trehus slik de bygges i dag. I sum ble det gjort følgende funn. Det helhetlige sikkerhetsnivået i byggene som har blitt studert er funnet å være et sikkerhetsnivå med en lavere iboende sikkerhetsmargin sammenlignet med et byggverk utført i henhold til de preaksepterte ytelser hvor fravik har oppstått. Når disse fravikene kompenseres for med tiltak som også er på plass i liknende byggverk uten fravik så ender man opp med et resultat hvor sikkerhetsmarginen er redusert. Det legges til usikre momenter grunnet manglende håndfast empiri vedrørende de branntekniske konsekvensene av å bygge med treverk, og man kompenserer for dette på utilstrekkelig vis. Dermed ender man opp med et sikkerhetssystem med en økt usikkerhet hva gjelder byggverkets brannsikkerhet.

Ved å angi en brannmotstandstid for bæresystemet til et bygg så angir man et tidsrom hvor man kan regne med bygningens konstruksjonsintegritet. Dersom beregningen av denne tiden er basert på grunnlagstall som ikke nødvendigvis er gyldige, kan dette resultere i feilaktig angivelse av motstandstid. I en brannsituasjon kan dette avvike og få alvorlige konsekvenser

Arbeidet har avdekket usikkerhet og mangelfull empiri knyttet til brannsituasjoner hvor treverk er brukt som konstruksjonsmateriale i høye trehus. Det empiriske kunnskapsfundamentet er fremdeles preget av at slike byggverk er et nytt fenomen, og mye arbeid gjenstår før man har et fullstendig bilde av slike brannsituasjoner. Gjennomgåtte testresultater viser store variasjoner i massivtreets forkullingshastighet. Slike variasjoner i en avgjørende variabel ved dimensjonering av massivtrekonstruksjoner gjør at det vanskelig kan trekkes en enkel og entydig konklusjon med hensyn til brannsikkerheten i massivtrekonstruksjoner, og det gjenstår fremdeles flere ubesvarte spørsmål. Spørsmålet i dag oppleves ikke å være rundt hvorvidt det er trygt å bygge høyt med tre, men snarere om man med sikkerhet kan trekke en endelig konklusjon på dette området. Utfordringen er hvordan man skal komme fram til et endelig svar på dette spørsmålet: Et dramatisk scenario er at dette svaret vil komme gjennom en

katastrofal ulykke. Mangelen på tilpassete klassifiseringssystemer og grunnleggende kunnskap rundt et naturlig brannforløp i et bygg med eksponerte massivtrekonstruksjoner fører til at det må stilles spørsmål ved hvorvidt utviklingen av høye trehus går for raskt.

- Er man for tidlig ute med høye trehus, og burde konstruksjonene kles med gips fram til den nødvendige kunnskapen er på plass?
- Er det ønskelig at det i byggenes bruksfase oppdages at de bærende konstruksjonene i en brannsituasjon kan få en tverrsnittsreduksjon på i overkant av 0.4mm i minuttet mer enn hva som ble lagt til grunn for dimensjoneringen av disse konstruksjonene, eller er dette noe som burde være avdekket før de ble bygget?
- Vil det være viktig å ta i bruk føre-var-prinsippet i arbeidet med byggingen av høye trehus?

Gjennom de undersøkelser som er gjort i dette arbeidet har det kommet fram indikasjoner på at miljøgevinstene knyttet til treverk som bygningsmateriale har hatt en innvirkning på den branntekniske vurderingen av høye trehus. Utviklingen av en bioøkonomi i bygningssektoren med mer bruk av trematerialer, også i bærekonstruksjoner, for å høste miljøgevinster må ikke gå på bekostning av brannsikkerhet. Det er ønskelig å dra nytte av fordelene knyttet til bruken av treverk i bygninger, men dette forutsetter at man har gode løsninger på de utfordringene som er knyttet til det branntekniske. Gjennom arbeidet er det funnet at det fremdeles er sentrale utfordringer og uavklarte spørsmål knyttet til det branntekniske i fleretasjes massivtrekonstruksjoner. En bærekraftig bygningsmasse må i tillegg til å være miljøvennlig være robust, slik at det ikke får katastrofale følger dersom en brann oppstår. Dette må ikke overses eller marginaliseres i et bærekraftig utviklingsperspektiv.

## 7.1 Videre arbeid

Videre arbeid innenfor temaet brannsikkerhet i høye trehus burde fokuseres mot videre testing for å bygge ut empirien som danner kunnskapsfundamentet ved prosjektering av slike bygg. Det burde gjennomføres branntester hvor testoppsettet er slik at faktorer som fasadespredning, laster på konstruksjonen og konstruksjonens plassering i høyden fanges opp av testene. Tester hvor brannen får lov til å utvikle seg fritt gjennom et fullstendig brannforløp vil gi en bedre forståelse av fullstendig brannforløp i konstruksjoner med eksponerte massivtreflater.

Det burde arbeides videre med å forstå konsekvensene av å bygge med eksponerte massivtreflater på branndynamikken i en rombrann. Dette innebærer både å gjøre

videre undersøkelser av om treverket bidrar i en betydelig grad, samt å kvantifisere dette bidraget og hvilken innvirkning dette bidraget har på andre bygningskomponenter. I forbindelse med dette burde det også arbeides videre med å undersøke ISO 834-kurvens anvendelighet dersom bygningskomponenter som klassifiseres etter denne kurven plasseres i et byggverk med eksponerte massivtreflater.

De store variasjonene i målte forkullingshastigheter indikerer et behov for videre undersøkelser. Lamellenes tykkelse, antall og orientering har vist seg å ha en innvirkning på massivtreelementers forkullingshastighet, og denne innvirkningen burde studeres videre.



# Referanser

- [1] Aarstad, J. and Glasø, G. [2011], ‘Massivtre’, *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (20).
- [2] Arbeids- og sosialdepartementet [1997], ‘Internkontrollforskriften’.
- [3] Babrauskas, V. [2001], ‘“pyrophoric carbon” and long-term, low temperature ignition of wood’, *Fire Arson Investig* 52(2), 12–14.
- [4] Babrauskas, V. [2002], ‘Ignition of wood: A review of the state of the art’, *Journal of Fire Protection Engineering* 12(3), 163–189.  
**URL:** <http://jfe.sagepub.com/content/12/3/163.abstract>
- [5] Buchanan, A. H. [2000], ‘Fire performance of timber construction’, *Progress in Structural Engineering and Materials* 2(3), 278–289.
- [6] Buchanan, A. H. [2009], *Structural Design for Fire Safety*, John Wiley and Sons, Ltd.
- [7] Buchanan, A. H. and Honey, B. G. [1994], ‘Energy and carbon dioxide implications of building construction’, *Energy and Buildings* 20(3), 205 – 217.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778894900248>
- [8] *Byggforskblad 321.025: Brannsikkerhet: Dokumentasjon av prosjektering, utførelse og kontroll - oversikt* [2013], SINTEF Byggforsk.
- [9] *Byggforskblad 520.205: Massive treelementer. Typer og bruksområder* [2001], SINTEF Byggforsk.
- [10] *Byggforskblad 520.385: Nødvendig rømningstid ved brann* [2016], SINTEF Byggforsk.
- [11] Costa, A., Keane, M. M., Torrens, J. I. and Corry, E. [2013], ‘Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit’, *Applied Energy* 101, 310 – 316. Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191100691X>

- [12] Dinesh Mohan, Charles U. Pittman, J., and Steele, P. H. [2006], ‘Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review’, *Energy & Fuels* 20(3), 848–889.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1021/ef0502397>
- [13] Direktoratet for byggkvalitet [2011], ‘Veiledning til teknisk forskrift (VTEK)’.
- [14] Drivdal, A. [2013], ‘Brannteknisk sluttrapport - Ås studentboliger, pentagon 2’.
- [15] Drysdale, D. [2011], *An Introduction to Fire Dynamics*, Wiley.
- [16] European Commission [2010], ‘Communication from the commission - europe 2020 - a strategy for smart, sustainable and inclusive growth’.  
**URL:** <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF>
- [17] Feasey, R. and Buchanan, A. [2002], ‘Post-flashover fires for structural design’, *Fire Safety Journal* 37(1), 83 – 105.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711201000261>
- [18] Fiskaa, H. [2012], *Fysisk detaljplanlegging - kompendium*, Institutt for byforming og planlegging, NTNU.
- [19] Frangi, A., Bochicchio, G., Ceccotti, A. and Lauriola, M. P. [2008], ‘Natural full-scale fire test on a 3 storey xlam timber building’, *Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering* .  
**URL:** <http://support.sbcindustry.com/Archive/2008/june/Paper074.pdf>
- [20] Frangi, A. and Fontana, M. [2005], ‘Fire performance of timber structures under natural fire conditions’, *Fire Safety Science - Proceedings of the Eighth International Symposium* .  
**URL:** <http://www.iafss.org/publications/fss/8/279/view/fss8-279.pdf>
- [21] Frangi, A., Fontana, M., Hugi, E. and Jübstl, R. [2009], ‘Experimental analysis of cross-laminated timber panels in fire’, *Fire Safety Journal* 44(8), 1078 – 1087.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711209001118>
- [22] Frangi, A., Fontana, M., Knobloch, M. and Bochicchio, G. [2008], ‘Fire behaviour of cross-laminated solid timber panels’, *Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium* .  
**URL:** <http://www.iafss.org/publications/fss/9/1279/view/fss9-1279.pdf>
- [23] Friquin, K. L. [2011], ‘Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber’, *Fire and Materials* 35(5), 303–327.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1002/fam.1055>
- [24] Glasø, G. [2011], ‘Fleretasjes trehus’, *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (32).
- [25] Glasø, G. and Landrø, H. [2012], ‘Tre og brann’, *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (37).

- [26] Gloslie, S. [2003], *Håndbok 51 Fleretasjes trehus*, SINTEF Byggforsk.
- [27] Grønset, M. [2014], Undersøkelse av innemiljø i studentboliger på Ås - et casestudie, Masteroppgave, NMBU.
- [28] Gustavsson, L., Joelsson, A. and Sathre, R. [2010], ‘Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building’, *Energy and Buildings* 42(2), 230 – 242.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002126>
- [29] Hakkarainen, T. [2002], ‘Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments’, *Journal of Fire Sciences* 20(2), 133–175.  
**URL:** <http://jfs.sagepub.com/content/20/2/133.abstract>
- [30] Hall, J. R. [2013], ‘U.s. experience with sprinklers’, *National Fire Protection Association* .
- [31] Hox, K. [2015], ‘Branntest av massivtre’, *SP Fire Research AS* .
- [32] *Håndbok 53 Trehus, 9.utgave* [2010], SINTEF Byggforsk.
- [33] Ingberg, S. H. [1928], ‘Fire loads’, *Quarterly Journal of the National Fire Protection Association* .
- [34] InnoFireWood (internettside) [sitert 8.juni 2016], ‘EUROCLASS system’.  
**URL:** <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateofheart/database/euroclass/euroclass.html>
- [35] *iTre AS: Fremtiden bygges i tre, nettside* [2013]. Sitert 20.mai 2016.  
**URL:** <http://www.itre-as.no/?p=91>
- [36] Justis- og beredskapsdepartementet [2002a], ‘Brann- og eksplosjonsvernloven’.
- [37] Justis- og beredskapsdepartementet [2002b], ‘Forskrift om organisering av brannvesen’.
- [38] Justis- og beredskapsdepartementet [2016], ‘Forskrift om brannforebygging’.
- [39] Karlsson, B. and Quintiere, J. G. [2000], *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press.
- [40] Klima- og miljødepartementet [2014a], ‘Grønt skifte - klima- og miljøvennlig omstilling - nettartikkel’. Lest 5.juni 2016.  
**URL:** <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/gront-skifte/id2076832/>
- [41] Klima- og miljødepartementet [2014b], ‘Klimaforliket - nettartikkel’. Sitert 29.mai 2016.  
**URL:** <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/klimaforliket/id2076645/>
- [42] Klippel, M., Leyder, C., Frangi, A. and Fontana, M. [2014], ‘Fire tests on loaded cross-laminated timber wall and floor elements’, *Fire Safety Science* 11, 626–639.

- [43] Kolaitis, D. I., Asimakopoulou, E. K. and Founti, M. A. [2014], ‘Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test’, *Construction and Building Materials* 73, 163 – 170.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814010435>
- [44] Kollegiet for brannfaglig terminologi [Sitert 25.mai 2016 c], ‘Organisatorisk brann-sikringstiltak - internettside’.  
**URL:** <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=4277>
- [45] Kollegiet for brannfaglig terminologi [Sitert 28.mai 2016 a], ‘Fullstendig brannforløp - internettside’.  
**URL:** <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=4873>
- [46] Kollegiet for brannfaglig terminologi [Sitert 9.juni 2016 b], ‘Kompenserende tiltak - internettside’.  
**URL:** <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=3776>
- [47] Kommunal - og moderniseringsdepartementet [2010], ‘Byggesaksforskriften (SAK10)’.
- [48] Kommunal- og moderniseringsdepartementet [2010], ‘Byggteknisk forskrift (TEK10)’.
- [49] Li, X., Zhang, X., Hadjisophocleous, G. and McGregor, C. [2015], ‘Experimental study of combustibile and non-combustibile construction in a natural fire’, *Fire Technology* 51(6), 1447–1474.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-014-0407-4>
- [50] Lundin, J. [2005], Safety in Case of Fire - The Effect of Changing Regulations, PhD thesis, Lund University.
- [51] Magnusson, B. [2015], ‘Brannkonsept studenttårn a, b, c, d, e - moholt 50|50’.
- [52] Miljødirektoratet [2015], ‘Klimagasser - internettside’. Sitert 8.juni 2016.  
**URL:** <http://www.miljostatus.no/tema/klima/klimagasser/>
- [53] Moe, J. H. [2012], ‘Brannteknisk fraviksanalyse - Ås studentboliger, pentagon 2’.
- [54] Mostue, B. A. and Opstad, K. [2002], ‘Effekt av brannverntiltak - vegger og sprinkler’, *SINTEF - Norges branntekniske laboratorium AS*.
- [55] Norske Arkitekters Landsforbund [sitert 31.mai 2016], ‘Moholt 5050 - nettartikkel’.  
**URL:** <http://www.arkitektur.no/moholt-5050>
- [56] *NS 3901: Krav til risikovurdering av brann i byggverk* [2012], Standard Norge.
- [57] *NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008, Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann* [2008], Standard Norge.



- [58] *NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010, Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner, del 1-2: Brannteknisk dimensjonering* [2010], Standard Norge.
- [59] Nyrud, A. Q. and Bringslimark, T. [2012], ‘Opplevelse av trematerialer i innemiljø’, *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (54).
- [60] Nystedt, F. [2011], *Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings*, PhD thesis, Lund University.
- [61] Nässén, J., Hedenus, F., Karlsson, S. and Holmberg, J. [2012], ‘Concrete vs. wood in buildings – an energy system approach’, *Building and Environment* 51, 361 – 369.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311003957>
- [62] Opheim, I. O. [2013], ‘Nye spennende studentboliger åpnet - nettartikkel’. Lest 10.mai 2016.  
**URL:** <http://www.as.kommune.no/nye-spennende-studentboliger-aapnet.5285626-125470.html>
- [63] Sathre, R. and Gustavsson, L. [2009], ‘Using wood products to mitigate climate change: External costs and structural change’, *Applied Energy* 86(2), 251 – 257. {IGEC} {IIISpecial} Issue of the Third International Green Energy Conference (IGEC-III), June 18–20, 2007, Västerås, Sweden.  
**URL:** <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908000998>
- [64] Schmid, J., König, J. and Köhler, J. [2010], Fire-exposed cross-laminated timber-modelling and tests, *in* ‘World Conference on Timber Engineering’.
- [65] Shi, W. X., Ji, J., Sun, J. H., Lo, S. M., Li, L. J. and Yuan, X. Y. [2014], ‘Experimental study on influence of stack effect on fire in the compartment adjacent to stairwell of high rise building’, *Journal of Civil Engineering and Management* 20(1), 121–131.  
**URL:** <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2013.802729>
- [66] Solli, K. H. and Glasø, G. [2011], ‘Trebaserete konstruksjonselementer’, *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (27).  
**URL:** <http://treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-27.pdf>
- [67] Statens Bygningstekniske Etat [2007], ‘Temarettleiing ho-3/2007 prosjektering - brannsikkerhetsstrategi (rettleiing for tilsyn i byggjesaker)’.
- [68] *Store Norske Leksikon: Borgund Stavkirke* [2015].  
**URL:** [https://www.snl.no/borgund\\_stavkirke](https://www.snl.no/borgund_stavkirke)
- [69] Studentsamskipnaden i Trondheim [sisert 31.mai 2016], ‘Moholt 5050 - informasjonshefte’.  
**URL:** <http://moholtfemtifemti.blogspot.no/2014/09/infohefte-om-moholt-5050.html>

- [70] Sundström, B. [2007], The Development of a European Fire Classification System for Building Products - Test Methods and Mathematical Modelling, PhD thesis, Lund University.
- [71] Svanæs, J. [2004], 'Tre og miljø', *Norsk Treteknisk Institutt: Fokus på tre* (8).
- [72] Walton, W. D., Thomas, P. H. and Ohmiya, Y. [2016], *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Springer New York, New York, NY, chapter Estimating Temperatures in Compartment Fires, pp. 996–1023.  
**URL:** [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0\\_30](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_30)
- [73] Östman, B., König, J., Mikkola, E., Stenstad, V., Carlsson, J. and Karlsson, B. [2002], *Brandsäkra trähus: Nordisk kunskapsöversikt och vägledning, 2.utgave*, Trätek, Institutet för träteknisk forskning.
- [74] Östman, B., Mikkola, E., Stein, R., Frangi, A., König, J., Dhima, D., Hakkarainen, T. and Bregulla, J. [2010], *Fire Safety in Timber Buildings - Technical Guideline for Europe*, SP Trätek.