



# Høgskulen på Vestlandet

## Master Thesis

ING5002D

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	22-11-2018 15:37	<b>Termin:</b>	2018 HØST
<b>Sluttdato:</b>	03-12-2018 14:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Masteroppgave		
<b>SIS-kode:</b>	203 ING5002D 1 MOPPG 2018 HØST		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

**Kandidatnr.:** 2

### Informasjon fra deltaker

**Tittel \*:** Bruk av trekonstruksjoner i høye boligblokker - betydning for brannsikkerhet

**Antall ord \*:** 32011

**Engelsk tittel \*:** Use of wood-based constructions in high residential buildings - meaning for fire safety

**Navn på veileder \*:** Torgrim Log

**Tro- og loverklæring \*:** Ja **Inneholder besvarelsen Nei**  
**konfidensiell materiale?:**

**Jeg bekrefter at jeg har Ja**  
**registrert oppgavetittelen**  
**på norsk og engelsk i**  
**StudentWeb og vet at**  
**denne vil stå på**  
**vitnemålet mitt \*:**

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min \*

Ja

## **MASTEROPPGAVE**

Bruk av trekonstruksjoner i høye boligblokker – betydning for brannsikkerhet

Use of wood-based constructions in high-rise residential buildings – meaning for fire safety

**Mikhail Antonov**

Master i Brannsikkerhet

Torgrim Log

03.12.2018

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 10.

# BRUK AV TREKONSTRUKSJONER I HØYE BOLIGBLOKKER – BETYDNING FOR BRANNSIKKERHET



MIKHAIL ANTONOV  
HØGSKOLEN PÅ VESTLANDET  
Masteroppgave i Brannsikkerhet

Haugesund  
[Desember 2018]



## BRUK AV TREKONSTRUKSJONER I HØYE BOLIGBLOKKER – BETYDNING FOR BRANNSIKKERHET

### Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Mikhail Antonov	Forfatter sign.
Oppgaven uttatt: Høst 2017	Open oppgave
Veileder: Torgrim Log	
Stikk ord: Trehus, massivtre, brannforsøk, risikoanalyse	Antall sider: 110  Haugesund, 03.12.2018 Sted/Dato/År
Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten(e) står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.	

## Sammendrag

Urbanisering og utvikling av miljøvennlige løsninger driver fram bruk av trevirke som konstruksjonsmateriale i form av krysslaminert massivtre. Denne framveksten medfører at krysslaminert massivtre benyttes aktivt som bærende konstruksjoner i høye byggverk brukt til boliger og kontorer. Utviklingen foregår til tross for at dette strider med preaksepterte løsninger angitt i veiledningen om tekniske krav til byggverk (VTEK 17). Det mangler retningslinjer for løsninger som kan kompensere for brennbarheten av bærende konstruksjoner, og det er begrenset med erfaring og kunnskap om brannforløp i høye byggverk av massivtre. Samlet gir dette en stor usikkerhet knyttet til brannhendelser i framtida.

Formålet med denne oppgaven var å samle kunnskap og erfaringer, gjennom litteraturstudie, om hvordan massivtre kan påvirke brannodynamikken i en rombrann, samt å utføre en risikovurdering av brann i en boligblokk på 8 etasjer.

Litteraturstudien viser at eksponerte overflater av massivtre i et brannrom øker den totale mengden av brennbare gasser som avgis av materialer ved brann. I flere brannforsøk ble det registrert at total varmeavgivelseshastighet er høyere og overtenning oppstår tidligere i rom med eksponert massivtre sammenlignet med gipskledd overflater. Når alle overflater av massivtre er eksponerte, i et rom med gode ventilasjonsforhold, vil brannen utvikle seg raskt til en fullt utviklet brann med ingen tegn på avkjøling. Ved å begrense arealet av massivtre som er eksponert kan temperaturen reduseres frem til delaminering oppstår og forkullet lamell faller av, så det friske trevirket blir eksponert og sekundær overtenning kan oppstå. Plassering av eksponerte massivtreflater i forhold til hverandre kan ha en stor betydning for brannodynamikken i rommet, f. eks. motstående massivtrevegger medfører høyere bidrag til brannen enn tilstøtende vegger på grunn av gjensidig strålingspåvirkning. Dersom arealet av eksponert massivtre begrenses til en vegg som utgjør mindre enn 16 % av omhyllingsflate, kan brannen oppnå avkjølingsfase og selvslukking. Analyserte brannforsøk indikerer at bruk av lameller med tykkelsen over 35 mm er fordelaktig, med tanke på delaminering. Tildekning av massivtre med branngipsplater fungerer godt som brannsikringstiltak for å beskytte trevirke mot forkulling. Det er også identifisert at det er mangel på brannforsøk med ulikt fuktinnhold i massivtre. Fuktinnholdet kan variere med årstid og vil påvirke brannutviklingen i et byggverk av massivtre.

Den gjennomførte risikoanalysen konkluderte at bruk av eksponerte og bærende elementer av massivtre i en åtteetasjes boligblokk kan medføre katastrofale konsekvenser for mennesker og materielle verdier ved en eventuell brann. Dersom analysebyggverket utstyres med sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 og tillegg F i denne standarden, lukket trapperom type Tr2, samt andre forutsetninger som er lagt til grunn for utforming av analysebyggverket, vil brannrisikoen være akseptabel. Når brannrisikoen vurderes i et langsiktig perspektiv, f.eks. for tusentalls av byggverk designet som analysebyggverket vil samlet sannsynlighet for katastrofale konsekvenser økes, og brannrisikoen vil ikke være tolerabel.

Med mindre hel, eller delvis konstruksjonskollaps i et langsiktig risikoperspektiv, kan aksepteres, tilsier resultatene av risikoevalueringen at det er nødvendig å benytte tildekning med gipsplater som beskyttelse av bærende trekonstruksjoner.

## Abstract

Urbanization and development of environmentally friendly solutions drive the use of timber as a construction material in the form of cross-laminated timber (CLT). This trend makes that CLT is actively used as load-bearing structural elements in high-rise apartments and office buildings. The development takes place despite the fact that this contradicts pre-accepted solutions as specified in Norwegian building regulations (VTEK 17). There are no guidelines for solutions which describe how to deal with the combustibility of load-bearing structures. Experience and knowledge are limited about fire dynamics within an enclosure of combustible construction in high-rise buildings. Overall, this represents an uncertainty about fire safety perspective.

The purpose of this thesis is, through a literature review, to gather knowledge about how cross-laminated timber can affect the fire dynamics in a fire compartment and, based on that, evaluate fire risks in 8-storey residential building.

The literature shows that exposed linings of CLT influence the development of a fire by increasing total amount of gases emitted by materials in an enclosure. It was recorded, in several fire tests, that the total heat release rate is higher, and flashover occurs earlier in enclosures with exposed CLT compared with gypsum lined. In a room with good ventilation conditions, exposed CLT will cause quick-fire growth to a fully developed fire with no signs of cooling. The fire and the temperature in the room can be reduced by limiting the area of exposed CLT, but, at the same time, delamination can cause increase in temperature and secondary flashover can occur. In addition, position of exposed CLT walls can affect the impact on the fire dynamics in the room. Facing walls can cause higher contribution to the fire than adjacent walls due to mutual radiation. If the area of exposed CLT is limited to a wall which constitutes a less than 16% of the room surface area, the fire can achieve decay phase and self-extinction. The literature indicates that it is advantageous in view of delamination to use CLT with a lamella layers over thirty-five mm thickness. Encapsulation of CLT with gypsum boards works well as fire protection to delay the onset charring formation. It has also been identified that there is a lack of fire tests with different moisture contents of CLT. The moisture content may vary with the season and will affect the fire development.

The conducted fire risk analysis shows that use of exposed CLT, as load-bearing elements in an 8-storey residential building, can lead to high consequences. If designed building is equipped with sprinklers according to NS-EN 12845 with Appendix F, enclosed stairwell, and other assumptions that are used for the building design, the probability of these events can be acceptable. But in a long-term perspective, for example for thousands of residential buildings with that design, will combined fire risk not be acceptable. The results of fire risk evaluation indicate that there is a need to use encapsulation as passive fire protection of load-bearing structural elements, unless the probability of structural failure due to a fire can be accepted.

## Forord

Oppgaven representerer avslutningen i studiet Master i Brannsikkerhet ved Høgskolen på Vestlandet (HVL) i Haugesund. Oppgaven har hatt fokus på brannsikkerhet i boligblokker av krysslaminerte massivtre med 8 etasjer. Temaet for oppgaven ble valgt i samråd med kolleger ved RJ AS som har også bidratt med gode innspill.

Arbeidet med denne masteroppgaven har vært lærerik, og har gitt meg ny kunnskap om massivtre som konstruksjonsmateriale og hvordan massivtre kan påvirke brannsikkerheten i et byggverk. Det er spennende å se hvordan bruk av trekonstruksjoner i høye byggverk vil utvikle seg og hvilke løsninger, knyttet til brannsikkerhet, vil være angitt som preaksepterte.

Jeg ønsker å takke min veileder Torgrim Log, Professor ved HVL for verdifulle kommentarer, gode ideer og innspill underveis. Jeg vil også takke mine kolleger ved RJ AS for faglig innspill og konstruktive diskusjoner.

For daglig støtte og oppmuntring vil jeg takke min familie og venner som var behjelpelige og tålmodige med meg de siste årene. En særlig takk til venner, Are og Artjom for nøye korrekturlesing av teksten. Jeg vil også takke min arbeidsgiver RJ AS for all støtte jeg har fått.

Takk til alle bidragsytere som har hjulpet til med råd, støtte og innspill underveis i arbeidet med oppgaven.

Mikhail Antonov  
Hønefoss, 3. desember 2018.





## Innholdsfortegnelse

Sammendrag .....	iv
Abstract .....	v
Forord .....	vi
Bildetekstliste .....	xi
Forkortelser og definisjoner .....	xii
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	2
1.2 Problemstilling.....	4
1.3 Målsetting.....	4
2. Teoretisk bakgrunn.....	5
2.1 Brannutvikling.....	5
2.1.1 Faser ved brann .....	5
2.1.2 Varmetransport ved brann.....	7
2.2 Tre som byggemateriale.....	7
2.2.1 Byggeteknikk .....	8
2.3 Egenskaper av trevirke ved brann .....	10
2.4 Brannprosjektering.....	11
2.4.1 Lov om planlegging og byggesaksbehandling (Plan- og bygningsloven) .....	12
2.4.2 Forskrift om tekniske krav til byggverk og veiledning .....	12
2.4.3 Veiledning om teknisk krav til byggverk (VTEK) .....	13
2.4.4 Analytisk brannteknisk prosjektering .....	14
2.5 Klassifisering av materialer og bygningsdeler .....	18
3. Metode .....	19
3.1 Litteraturstudie.....	19
3.2 Kvalitativ og kvantitativ analyse .....	19
4. Del 1 – litteraturstudie .....	21
4.1 Li et al. (2016).....	21
4.2 Hasburgh et al. (2016).....	25
4.3 Kolaitis et al. (2014).....	26
4.4 Frangi og Fontana (2005) .....	28
4.5 Frangi et al. (2008).....	29

4.6	Hakkarainen (2002) .....	32
4.7	Hadden et al. (2017) .....	33
4.8	Emberley et al. (2017) .....	37
4.9	Oppsummering av resultater .....	41
5.	Risikovurdering .....	44
5.1	Datagrunnlag for analyse .....	44
5.1.1	Vurdering av kompensierende tiltak .....	44
5.1.2	Bruttoareal og antall boenheter .....	46
5.1.3	Menneskelig atferd ved brann .....	47
5.1.4	Antall omkomme ved brann .....	47
5.1.5	Brannfrekvens .....	48
5.1.6	Aktive og passive brannsikringstiltak .....	49
5.2	Problem og målformulering .....	55
5.3	Risikoanalyse .....	56
5.3.1	Beskrivelse av analysebyggverk .....	56
5.3.2	Valg av analysemetoder .....	58
5.3.3	Fastsetting av akseptkriterier .....	58
5.3.4	Fareidentifikasjon .....	60
5.3.5	Analyse av årsaker og brannfrekvens .....	60
5.3.6	Brannscenarier - generelt .....	61
5.3.7	Modellering av brannforløp .....	67
5.3.8	Beregning av sannsynligheter for delscenarier .....	69
5.3.9	Analyse av konsekvenser .....	71
5.3.10	Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse .....	75
5.3.11	Beskrivelse av risiko .....	76
5.4	Risikoevaluering .....	77
5.4.1	Identifisering av mulige tiltak .....	80
5.5	Konklusjon .....	82
6.	Diskusjon .....	83
6.1	Diskusjon-litteraturstudie .....	83
6.1.1	Forkullingshastighet og bidrag til brannforløpet .....	83
6.1.2	Beskyttelse med gipsplater .....	86
6.1.3	Avkjøling .....	86

6.2	Diskusjon-risikovurdering.....	88
7.	Konklusjon .....	92
8.	Fremtidig arbeid .....	93
10.	Referanser .....	94

## Bildetekstliste

Figur 1. Skjematisk illustrasjon av brannforløp [12].....	5
Figur 2. Eksempler på spredning av varme gjennom veggen via ventilasjonskanal .....	7
Figur 3. Massivtre av krysslagte lameller [18].....	8
Figur 4. Forskjellige metoder for sammenføring av elementer [20] .....	9
Figur 5. Gran - forkullingshastighet som funksjon av densitet og fuktighet [25].....	11
Figur 6. Modell for oppfyllelse av krav til brannsikkerhet i TEK 17 .....	13
Figur 7: Probabilistisk risikoanalyse - generell fremgangsmåte [35].....	16
Figur 8. Eksempel på utforming av hendelsestre .....	17
Figur 9. Skisse av testrommet [38] .....	21
Figur 10. Total varmeavgivelseshastighet Test 3-7 [38].....	23
Figur 11. Temperatur i brannrommene [38] .....	23
Figur 12: plantegning viser plassering av vegger. Frittstående vegg i midten [40].....	26
Figur 13. Massivtre er beskyttet med steinull og to gipsplater [40] .....	27
Figur 14: Temperatur i øvre del av røyklaget sammenlignet med ISO 834 og EN 1991-1-2 [40] .....	27
Figur 15. Rom med OSB kledning til vestre og gipskledning til høyre.....	28
Figur 16. Bildet ble tatt etter 7 min. Rom med brennbare overflater til venstre, ubrennbare til høyre ....	29
Figur 17. Fasade øst og vest [43] .....	30
Figur 18. Planløsning 2. etasje [43] .....	30
Figur 19. Vegger i brannrommet – horisontal snitt [43] .....	31
Figur 20. Etasjeskille – vertikal snitt [43].....	31
Figur 21: Brannutvikling 32 minutter (venstre) og 40 minutter (høyre) etter brannstart [43].....	32
Figur 22: eksponerte overflater i brannforsøkene [45].....	34
Figur 23: Temperatur i rommet var målt 220 cm over gulv .....	36
Figur 24: Massetapsrate fra trevirke eksponert mot varmestrålingsfluks [46].....	37
Figur 25: fasade, plan tegning og vertikalsnitt av gulvet [46] .....	38
Figur 26: Bilder av brannforsøket viser forskjellige faser [46] .....	39
Figur 27: Gjennomsnittstemperatur i løpet av 60 min [46] .....	40
Figur 28: Måling av varmestrålingsfluks øverst og nederst i rommet [46] .....	40
Figur 29. Diagrammet viser antall bruksenheter med forskjellig BRA i boligblokk. ....	46
Figur 30. Fordeling av branner ved brannvesenets ankomst basert på statistikk fra 2016 [61].....	53
Figur 31. Sannsynlighet for vellykket slokking som funksjon av brannstørrelse i et lagerbygg [60].....	54
Figur 32. Planløsning av analysebyggverk med symbolforklaring.....	57
Figur 33. Brann starter i en leilighet ved siden av trapperommet .....	61
Figur 34. Brannutvikling - ulike brannscenarier .....	64
Figur 35. Brannscenarier for materielle verdier .....	65
Figur 36. Frekvenser for brannscenarier S4K og S4Ka .....	69
Figur 37. Frekvens for brannscenariene S4T (røykspredning til trapperom) og S4Ta (mislykket brannvesenets innsats) .....	70
Figur 38. Risiko ved en forutsetning at brannen oppstår minst 1 gang pr. år i analysebyggverket.....	78
Figur 39. Risikomatrix for materielle verdier.....	80

## Forkortelser og definisjoner

Definisjoner knyttet til brannfaget er hentet fra [www.kbt.no](http://www.kbt.no) (Kollegiet for brannfaglig terminologi).

ETA – event tree analysis

HRR – Heat Release Rate (varmeavgivelseshastighet)

KLT – krysslaminert trevirke (CLT – cross laminated timber)

TEK 17 – Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift).

THRR – Total Heat Release Rate (totalt varmeavgivelseshastighet innvendig og utvendig).

Tr 1 – trapperom med dør direkte fra trapperommet til bruksenhet.

Tr 2 – trapperom med et rom utformet som egen branncelle mellom trapperommet og bruksenhet.

VTEK17 – veiledning om tekniske krav til byggverk.

## 1. Innledning

Høye trehus har blitt populære jorden rundt. Noen eksempler fra nyere tid er Treet i Bergen med 14 etasjer, Mjøstårnet i Brumunddal med 18 etasjer, Stadthaus i London med 9 etasjer, Forte i Australia med 9 etasjer, Brock Commons – tallwood house i Canada oppført med 18 etasjer. I tillegg er det flere byggverk med over 18 etasjer i planleggingsfase for nærmeste framtid.

Konstruksjoner som benyttes i høye trehus er basert på massive trekonstruksjoner. Det er en eksplosiv vekst i bruk av massive trekonstruksjoner i Europa, og det samme gjelder fabrikker som satser på produksjon og leveranse. I en analyse [1] utført av Trebruk AS vises det til at forbruk av massivtre vil dobles i 2024 sammenlignet med forbruket i 2018.

Krysslaminert trevirke (KLT) som brukes til vegg og dekker er konkurransedyktig sammenlignet med stål og betong til bruk i bygninger. Fordeler med å bygge i tre er miljøvennlighet og kort byggetid. Utvikling av prosjekter som oppføres i massivtre og limtre vil betraktelig redusere CO<sub>2</sub> emisjon.

Den største bekymringen i høye trehus er branntekniske forhold. Brennbare konstruksjoner vil bidra til brannen og kan opprettholde forbrenningen selv om all variabel brannenergi er utbrent. Hvis automatisk og manuell slokking mislykkes kan brannen medføre konstruksjonskollaps.

Følgende utfordringer ble nevnt av Andrew H. Buchanan [2] i et symposium om Brannvitenskap og Teknologi:

- Effekt av eksponerte treoverflater i et tidlig brannforløp.
- Utvendig og vertikal brannspredning via brennbare fasader og hulrom.
- Fullstendig brannforløp og evne til selvslukking.

I denne oppgaven utføres det en litteraturstudie av storskala forsøk og forskingsartikler om brannsikkerhet i høye trehus for å samle kunnskap om brannforløp og kartlegge hvilke konsekvenser en brann i trehus kan medføre, og hvilke branntekniske løsninger som kan benyttes for konsekvensreduksjon slik at risikonivået ved brann er akseptabel. Løsningene implementeres i et analysebyggverk, og brannsikkerhet vurderes i sin helhet gjennom en risikovurdering av brann i analysebyggverket.

Formålet med denne oppgaven er å undersøke, ved hjelp av en analyse, om brannsikkerhetsnivå i høye boligblokker med 8 etasjer, og eksponerte treoverflater i leiligheter kan være akseptabel.

## 1.1 Bakgrunn

Parisavtalen, klima- og miljøpolitikk i EU er innlemmet i norsk lovgivning, og har en intensjon om å begrense klimaendringer ved å redusere utslippene med 20 % mot 2020 sammenlignet med referanseåret 1990, og reduksjon på 40 % mot 2030 [3]. Reduksjon av klimagasser i atmosfæren gjelder først og fremst reduksjon av karbondioksid ( $CO_2$ ). Ifølge data fra Statistisk sentralbyrå var utslippene i Norge 2,4 % høyere i 2017 sammenlignet med 1990 [4].

I en forskningsartikkel [5] beskrives det at energiforbruk og utslipp er høyere fra bygningssektoren sammenlignet med transport- og industrisektoren. Bygningssektoren utgjør ca. 30 % av  $CO_2$  utslipp og ca. 40 % energiforbruk på globalt nivå [5]. Utslippene kan reduseres ved bruk av miljøriktige bygningsmaterialer, for eksempel trebaserte materialer som vil redusere energiforbruk og medføre lavere  $CO_2$ - utslipp enn andre bygningsmaterialer som stål og betong.

Trevirke er en fornybar ressurs som kan motvirke drivhuseffekten, gjenbrukes og gjenvinnes. Gjennom fotosyntesen omdanner voksende tre karbondioksid til biomasse. Dermed kan tre fungere som karbonlager og redusere årlig  $CO_2$  - utslipp. Økt bruk av skog vil øke effektiviteten i skogens karbonlagring ved at gamle trær avvirkes til treprodukter, mens ung skog etableres og absorberer  $CO_2$ . 1  $m^3$  tre brukt som byggemateriale vil medføre lagring av 0,8 tonn  $CO_2$  [6]. Bruk av trevirke bidrar med andre ord positivt til norsk miljøpolitikk.

Utviklingen av miljøeffektive byggemetoder i Europa på 1990-tallet førte til framgang av byggesystemer med krysslaminert trevirke (Cross Laminated timber), også kalt massivtre eller KLT [7]. KLT er en innovativ måte å bruke trevirke på. På grunn av sine gode styrke- og stivhetsegenskaper kan massive treelementer benyttes i høye byggverk. Denne byggemetoden kan bidra til betraktelig reduksjon av  $CO_2$ - utslipp og energieffektivisering i byggesektoren. I tillegg til miljørelaterte gevinster er det flere andre fordeler med høye trehus i massive trekonstruksjoner, for eksempel [7]:

- gode styrke egenskaper i forhold til egenvekt
- kort byggetid og drift av byggeplass
- mindre fundamenteringsbehov på grunn av lavt vekt sammenlignet med tyngre bæresystemer i stål og betong
- mindre støv og bedre arbeidsmiljø på byggeplass
- godt inneklima.

Til tross for de mange fordelene med høye trehus, finnes det flere utfordringer relatert til brann- og lydtekniske egenskaper. Trehus er en tradisjonell måte å oppføre byggverk på, som i begynnelsen av 1900-tallet ble begrenset i byområder som følge av bybranner. Gjennom historien har Norge opplevd flere store bybranner. Brannen i Ålesund 23. januar 1904 førte til endelig beslutning om en generell murtvang for bebyggelse i byene. Trevirke som bygningsmaterialet ble erstattet med tegl, stål og betong. Boligbygg i tre ble begrenset til to-tre etasjer som følge av murtvängen.

Kunnskap om brannsikkerhet og byggemetoder har utviklet seg betraktelig i de siste årene. Aktive og passive brannsikringstiltak implementeres i byggverk gjennom byggeforskriftene som før 1997 var ytelsesbaserte, disse stilte konkrete krav i en detaljert form som bestemte materialbruk. I samsvar med Byggeforskrift 1987 skulle høye byggverk ha bygningsdeler av ubrennbare materialer med brannmostand

R 90. Dette var et absolutt krav som ikke kunne fravikes. Byggverk over 4 etasjer kunne ikke bygges med bærende konstruksjoner i tre uten dispensasjon.

I 1997 ble det innført en funksjonsbasert forskrift som var materialnøytral, og dermed ga vekstmuligheter for bruk av trekonstruksjoner. Dette ble gjort for å fremme nye byggemetoder og løsninger. Funksjonen kunne oppfylles ved bruk av preaksepterte ytelser og/eller analyse. Ytelseskrav til bærende konstruksjoner R 90 A2-s1,d0 [A 90] fra Byggeforskrift 1987 ble erstattet med et funksjonskrav som angir at bærende konstruksjoner skal motstå fullstendig brannforløp. Ifølge veiledningen [8] skyldes innføring av begrepet fullstendig brannforløp blant annet at det kreves mer tid til rømning i høye byggverk, og for å ta hensyn til sikkerhet for rednings- og slokkemannskapene.

Selve definisjonen om fullstendig brannforløp kan tolkes slik at en brann kan brenne fritt og vil slukne uten aktiv slokkeinnsats. Det har gått mer enn 20 år siden 1997, men funksjonskravet til bærende konstruksjoner har ikke forandret seg for byggverk over 4 etasjer, til tross for innført ytelseskrav i 2010 om automatiske brannslukkeanlegg for boligbyggverk over 3 etasjer med krav om heis.

For eksempel stiller tekniske regler til byggverk i Sverige [9] krav om brannmotstand (R) til bærende konstruksjoner slik at kollaps ikke skal inntreffe under en viss tidsperiode. Kravet om brannmotstand er uavhengig av materialets brennbarhet, for eksempel R90 tilsier ikke at bærende konstruksjoner skal være av ubrennbare materialer. Regelverket i Finland åpner for bygging av boligbygg med 8. etasjer og høyde på maks 28 m i trekonstruksjoner, når det installeres automatisk slukkeanlegg og bærende konstruksjoner tildekkes [10].

Krav om at bærende konstruksjoner skal tilfredsstillere bæreevne og stabilitet ved fullstendig brannforløp vil i praksis medføre at alle bærende KLT i byggverk må tildekkes, og det må dokumenteres at brennbare, bærende konstruksjoner vil stå imot fullstendig brannforløp og at brannen vil slukkes av seg selv. En slik fullstendig tildekning av overflater medfører ekstra kostnader og begrenser estetiske kvaliteter av trevirke som arkitekter gjerne vil vise fram. Dermed kan trevirke bli mindre attraktivt for byggherrer. I brannsikkerhet bør man fokusere på hvordan sannsynlighet for og konsekvenser av brann kan reduseres slik at risikoer for individ og samfunnet er akseptable. Det at bærende konstruksjoner tilfredsstiller bæreevne gjennom fullstendig brannforløp betyr ikke at konsekvenser av brann for mennesker er akseptable. Det er f.eks. preakseptert å bygge byggverk på opptil 8 etasjer med et trapperom, hvor alle boenheter har direkte tilgang til trapperommet [11]. Brann i en av boenhetene har potensiale til å blokkere rømningsveien (trapperommet) for hele byggverket. Derfor kan denne utformingen medføre store konsekvenser for mennesker, til tross for at bærende konstruksjoner kan motstå fullstendig brannforløp. Derfor ønskes det i oppgaven å se på brannsikkerhet som en helhet, og vurdere hvilke brannrisikoer er forbundet ved bruk av massivtre som bærende konstruksjon i høye boligblokker.

Per dags dato finnes det ingen veiledninger eller retningslinjer som angir løsninger for beskyttelse av bærende konstruksjoner i høye trehus i Norge, til tross for at det bygges høyt. Mangel på preaksepterte ytelser i veiledningen til byggteknisk forskrift medfører at bruk av trekonstruksjoner må dokumenteres ved hjelp av analyse, hvor det må verifiseres at funksjonskravet er oppfylt. Verifikasjon utføres av en branningeniør som vurderer brannsikkerhet basert på egne erfaringer. Dette medfører at kompensierende tiltak som foreslås av branningeniører kan ha store variasjoner fra bygg til bygg. Noen av disse tiltakene er ikke alltid nødvendige, og kan medføre økte byggekostnader som resulterer i at det er



mer attraktivt å bygge i tradisjonelle bygningsmaterialer. I andre tilfeller kan prosjekteringen være for enkel og at brannsikkerhetsnivået ikke blir ivaretatt.

## 1.2 Problemstilling

Oppgaven vil ikke fokusere på fullstendig brannforløp, men undersøke gjennom litteraturstudie hvordan massivtre påvirker brannforløpet i et rom, og vurdere hvilken risiko kan en brann representere for mennesker og materielle verdier i boligblokk av massivtre.

Kapittel 1.1 gir grunnlag for følgende problemstilling:

- Kan brannrisikoen i høy boligblokk av massivtre på opptil 8 etasjer være akseptabel?

## 1.3 Målsetting

Formålet med oppgaven er å kartlegge eksisterende kunnskap om brannforløp i et rom av massivtre, og å benytte kunnskapen videre for å identifisere brannrisikoer knyttet til bruk av massivtre i høye boligblokker, samt vurdere aktuelle risikoreduserende tiltak.

Omfanget av oppgaven begrenses til følgende tema:

- Oppgaven omfatter høye boligblokker av krysslaminert massivtre med opptil 8 etasjer.
- Litteraturstudie begrenses til storskala forsøk utført på krysslaminert massivtre.
- Brannrisikoen vurderes for mennesker og for materielle verdier. Konsekvensene ved brann relatert til miljø vurderes ikke i oppgaven.

## 2. Teoretisk bakgrunn

Kapitlet danner grunnlaget for å kunne tolke resultater fra litteraturstudiet og analysen. Teorien i oppgaven vil bestå av følgende komponenter:

- Teori om brannforløp og hvordan trevirke oppfører seg ved brann.
- Byggeteknikk i massivtre.
- Regelverk og standarder som benyttes ved brannprosjektering.
- Annalistisk brannteknisk prosjektering.

### 2.1 Brannutvikling

En brann er en ukontrollert forbrenningsprosess som med tilstrekkelig brensel og oksygen, vil spre seg raskt i brannrommet og til både andre rom og etasjer.

I dag kan man kontrollere brannomfang ved å redusere mengden av brennbare materialer og konstruksjoner som byggverk består av, styre ventilasjon ved brann, benytte automatiske slokkesystemer, sette krav til overflater og kledninger, benytte produkter med begrenset brennbarhet og antennelighet, og dermed redusere brannstørrelsen.

I dette kapitlet beskrives faser ved brannutvikling og mekanismer for brannspredning.

#### 2.1.1 Faser ved brann

Brannforløp i et rom består av flere faser: antennelses- og vekstfase, fullt utviklet brann og nedkjølingsfase. Hvordan en brann vil utvikle seg er svært avhengig av brensel, oksygen, varme og rommets geometri. I et ideelt perspektiv vil en rombrann gå gjennom alle fasene [12]. Skjematisk illustrasjon av brannforløp er presentert i Figur 1.



Figur 1. Skjematisk illustrasjon av brannforløp [12].

**Antennelse:** En brann starter ved at et brennbart materiale blir antent. Materialer kan antennes med og uten tennkilde. Når tennkilde er tilstede kalles antennelse for en pilotantennelse. Antennelse uten tennkilde kan skje når eksterne kilder varmer opp et materiale – spontanantennelse, eller ved selvantennelse, når et stoff produserer så mye energi at temperaturen øker og stoffet antenner. Temperaturutviklingen kan ta lang tid før et material spontanantenner, men kan foregå hurtig når brennbare væsker og gasser blir antent [12].

**Vekstfase:** Brannutvikling i vekstfasen er avhengig av tilgangen til brennbare materialer og egenskapene til disse. Utviklingen kan foregå på forskjellige måter. En brann kan gå direkte til utbrenningsfase hvis brannen konsumerer mer brennbare gasser enn det den kan produsere. Dersom brannen produserer mer brennbare gasser enn den er i stand til å forbruke, vil brannen utvikle seg. Utviklingen kan foregå hurtig i et rom som består av lett antannelige materialer med tilstrekkelig brannenergi og oksygen [12].

Når temperaturen i rommet har økt tilstrekkelig går vekstfasen over til en fullt utviklet brann. Overgangen mellom fasene kalles overtenning. Den karakteriseres med varmestrålingsnivå i brannrommet er over  $20 \text{ kW/m}^2$  og temperaturer på over  $600 \text{ °C}$  [13]. Dette medfører at alle brennbare overflater som er eksponert for stråling oppnår sin antennelsestemperatur og antenner samtidig. Brannen sprer seg hurtig og involverer hele rommet i brannforløpet [14]. Denne overgangen til en fullt utviklet brann kan også foregå uten at overtenning oppstår.

**Fullt utviklet brann:** Energiproduksjonen og temperaturen i rommet når sitt maksimum ved en fullt utviklet brann. Temperaturen i brannrommet kan variere mellom  $700^\circ$  og  $1200 \text{ °C}$  [13].

Alle brennbare materialene i rommet blir involvert i brannen. Faren for brannspredning til andre brannceller er størst i denne fasen [13]. Det kan ofte observeres at røyken, som strømmer ut av brannrommet gjennom åpninger, antennes på utsiden [15]. Dette oppstår på grunn av at vinduer og dører ikke slipper inn tilstrekkelige oksygenmengder til at produkter fra pyrolyse kan brenne opp inne i brannrommet. Begrenset lufttilgang medfører ufullstendig forbrenning og gasser som kommer ut av rommet gjennom åpninger vil antenne utenfor når de reagerer med oksygen [15].

Strukturelle skader i bærende konstruksjoner kan oppstå i denne fasen, og kan medføre konstruksjonskollaps eller delvis sammenbrudd av byggverket [13]. Temperaturen ved fullt utviklet brann og varigheten av den er avgjørende ved vurdering av brannbeskyttelse av bærende konstruksjoner.

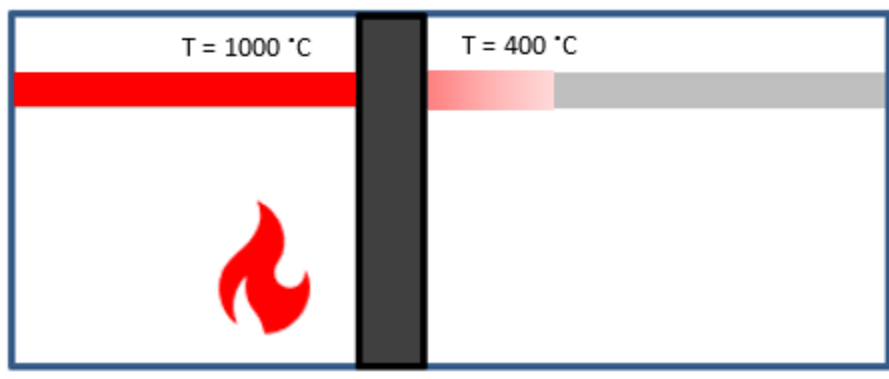
**Utbrenningsfase:** Når mengden av brennbare materialer og energiproduksjonen er redusert vil temperaturen i rommet synke. Forbrenning vil foregå som en glødebrann, uten åpen flamme. Gløding kan foregå ved lite oksygentilførsel. For å opprettholde gløding bør strålingen være ca.  $8 \text{ kW/m}^2$  [13]. Uten tilstrekkelig strålingsintensitet vil gløding ikke klare å opprettholde seg selv [16], [17]. Temperaturen av forkullet lag vil fortsatt være høy og kan være rundt  $300 - 500 \text{ °C}$ . Utbrenningsfase kan foregå over lang tid og kan medføre skader på konstruksjoner.

## 2.1.2 Varmetransport ved brann

Varmen ved brann transporteres via varmeledning, konveksjon og varmestråling.

Varmeledning foregår når energi [W] transporteres gjennom et legeme fra et punkt med høy temperatur til et punkt med lavere temperatur. Hvert materiale har en egen varmeledningsevne. Trevirke har lav spesifikk varmeledningsevne 0,1 – 0,2 [W/mK], mens stein har 2 – 4 og jern har 80 [W/mK] [13]. Det er både fordeler og ulemper med lav varmeledningsevne. Trevirke akkumulerer mye energi på overflaten, og dermed avgir det store mengder av brennbare gasser, samt at lav varmeledningsevne gir en isolerende effekt og temperaturen på ueksponert side holdes lavt.

Brannspredning via varmeledning kan foregå via tekniske installasjoner, for eksempel ventilasjonskanaler som bryter branncellebegrensende konstruksjoner og leder varmen til andre brannceller [15]. Dermed må kanaler og andre gjennomføringer isoleres mot varmeledning.



Figur 2. Eksempler på spredning av varme gjennom veggen via ventilasjonskanal

Konveksjon er en form for varmetransport som oppstår når energi transporteres med varme gasser. Ved brann vil det for eksempel være varm røyk som strømmer fra ett sted til annet [15]. Den varme strømmen forvarmer brennbare materialer slik at materialene lettere vil antenne.

Den dominerende varmetransporten ved en fullt utviklet brann vil være varmestråling [15].

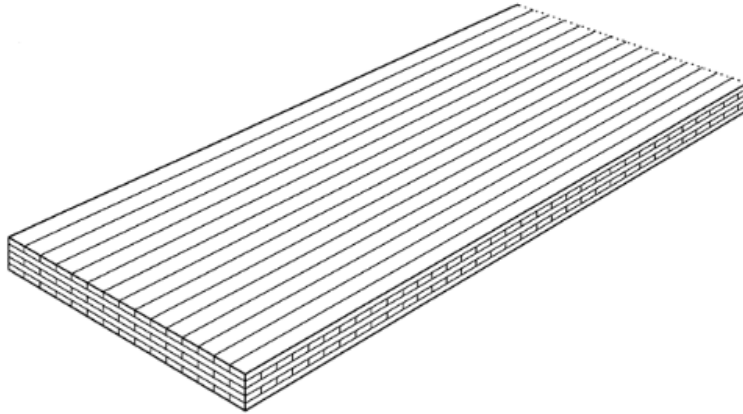
Varmestrålingen er en varmetransport via elektromagnetiske bølger kalt for fotoner som transporterer energi med lysets hastighet [13]. Både flammer og røyklaget kan sende ut varmestråling som øker i intensitet med brannutviklingen [15]. Strålingen mot brennbare materialer kan være så kraftig at materialene kan spontanantenne.

## 2.2 Tre som byggemateriale

Massivtre er et produkt av lameller eller planker som er skrudd, spikret eller limt sammen. Massivtre er en relativt ny og innovativ måte å benytte trevirke på som startet ved bruk av kantstilte lameller som ble lagt inntil hverandre og forbundet med en stålstang. Konstruksjonen ble benyttet for tverrspente brodekker i Canada omkring 1975, og spredte seg til Europa omkring 1990. Videreutvikling av forskjellige

metoder for sammenføring av lameller ble utviklet på tekniske høgskoler i Sveits på 1990 - tallet. Et av de første byggverkene i massivtre i Norge er en enebolig i Asker fra 1998 [7].

Hovedsakelig deles massivtreelementer inn i tre typer kantstilte, krysslagte og hulromselementer. Krysslagte (cross-laminated - CLT) benyttes mest i byggverk.



*Figur 3. Massivtre av krysslagte lameller [18]*

Krysslaminert massivtre består av lameller som er limt sammen vinkelrett i forhold til hverandre. Det benyttes vanligvis tre til ni lag lameller. Hver lamell har normal tykkelse på mellom 2,4 cm og 7 cm. Elementene kan leveres med en lengde på mellom 3 m og 16 m, og en bredde 0,6 m og 3 m [18]. For å oppnå lyd- og brannegenskaper kan elementene utfylles med isolasjon, kledninger, himlingsplater og påstøp.

Bjelker og søyler av limtre benyttes ofte sammen med KLT elementer i store byggverk, og ivaretar hoved- og sekundær bærende funksjon. Limtre består av flere lameller som er limt i parallell fiberretning. Limtrekonstruksjoner har stor styrke i forhold til sin vekt, og kan dermed benyttes som bærende konstruksjoner i byggverk med lange spennvidder [19].

### 2.2.1 Byggeteknikk

Oppføring av byggverk i massivtre er en rask og effektiv byggemetode. Massivtreelementer kan bearbejdes på byggeplass eller leveres ferdig produsert med nødvendige utsparinger og spor for føringer [7].

Byggverket deles tradisjonelt i bygningsdeler som fundament, yttervegger, etasjeskillere/gulv, innervegger og tak.

#### **Bæresystem**

Et byggverk kan i sin helhet bygges med bærende elementer i massivtre, hvor bærende konstruksjoner er vegger og etasjeskillere, eller det kan benyttes bærende systemer basert på søyler og bjelker, eller kombinasjonsløsninger [7].

Søyler og bjelker av limtre kan kombineres med vegger og etasjeskillere i massivtre. Søylene kan være gjennomgående, og bjelkene kan festes direkte på søyler. Vegger og etasjeskillere kan fungere som stabiliserende elementer.

For å opprettholde stabilitet forankres vegger og etasjeskillere horisontalt eller vertikalt. Veggene bindes sammen i alle hjørner og veggkryss, samt mellom vegger og etasjeskillere slik at byggverket fungerer som en stiv boks.

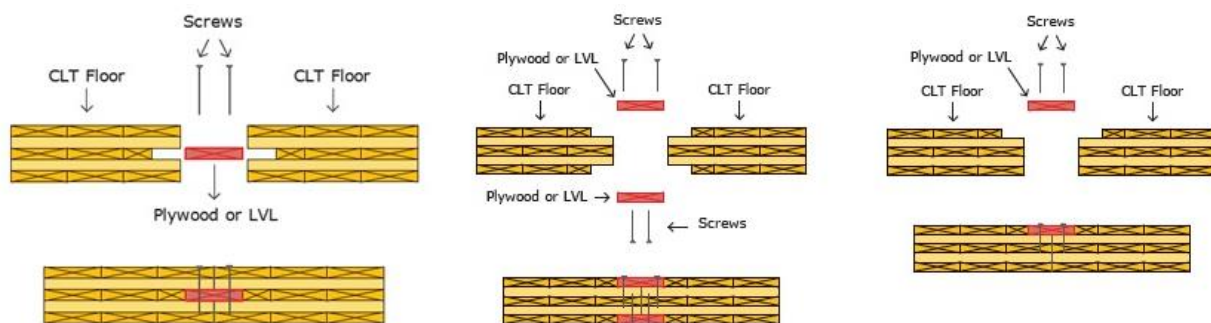
Konstruksjoner kan festes sammen, for eksempel ved bruk av vinkelplater, spesielt tilpasset konstruksjonsskruer og lignende.

Bærende trekonstruksjoner kan dimensjoneres for å tilfredsstille kravet om 90 minutters brannmotstand og høyere.

## Vegger

Vegger og etasjeskillere med branncellebegrensende funksjon kan utføres i KLT. Brannmotstand EI 60 og høyere kan oppnås, og avhengig av konstruksjons tykkelse. Brannmotstanden kan økes ved tilleggskonstruksjon med isolasjon og kledninger, eller ved økt tykkelse av KLT.

KLT elementer sammenføres med ett eller flere kryssfinerbord. Se eksempler i figur 2. I hjørnene kan elementene festes sammen med konstruksjonsskruer [20].



Figur 4. Forskjellige metoder for sammenføring av elementer [20]

Innervegger mellom brannceller kan settes opp som to separate vegger med hulrom på 100 mm for å oppnå tilstrekkelig lydisolasjon, hulrommet isoleres med mineralull. For konstruksjoner med én enkel skillevegg kan utføring av frittstående gipsplatevegg benyttes [7].

## Etasjeskille

Når ytterveggene er kontinuerlige, monteres bjelker eller konsoller horisontal på yttervegger og etasjeskiller legges på. Ved etasjehøye elementer kan etasjeskille legges på vegger. Etasjeskille kan festes til underliggende konstruksjoner ved bruk av konstruksjonsskruer [7].

Det er nødvendig med isolasjon på over- eller/og underside av etasjeskille for å tilfredsstille krav om lydisolasjon. Rørføringer og ledninger kan føres i hulrom ved oppbygd golv eller nedforet himling [7].

### ***Installasjoner og gjennomføringer***

Utsparinger for installasjoner og føringer kan tilpasses ved produksjon av elementene basert på tegningsgrunnlag fra arkitekt og andre prosjekterende som tegner detaljer for sine installasjoner. Kanaler kan festes ved bruk av spesielle opphengssystemer for å unngå lydtransmisjon gjennom kanaler. På grunn av krymping og svelling av trevirke må installasjoner og føringer som bryter massivtre konstruksjon monteres med klaring og være fleksible [7].

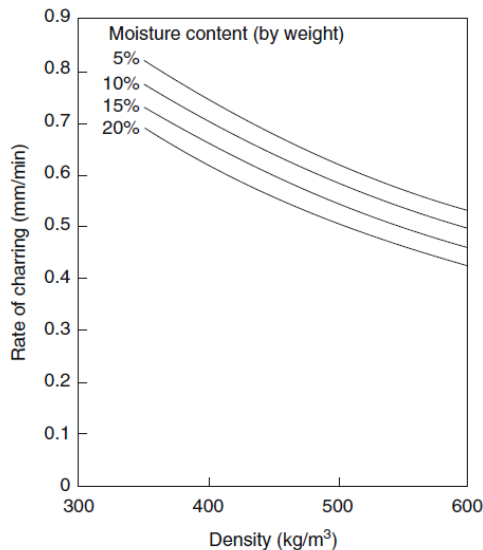
## **2.3 Egenskaper av trevirke ved brann**

Trevirke er et brennbart materiale som inneholder vann og tørrstoff, et levende trevirke består av 50 % vann og 50 % tørrstoff. Karbon (C), hydrogen (H) og oksygen (O) danner grunnlag for tørrstoffer i trevirket [21].

Ved oppvarming vil fuktigheten i trevirke fordampe. Termisk nedbryting av trevirke starter ved relativt lave temperaturer på ca. 110 °C – 230 °C, overflate får en mørkfarving [22]. Når temperaturen av materialet økes til 280 - 300 °C dannes forkullet lag [23]. Frigjøring av brennbare gasser oppnår sitt maksimum ved 300 °C. Brennbare gasser blandes med oksygen og danner en brannfarlig blanding som kan antennes ved pilot-antennelse [22]. Spontanantennelse av trevirke kan oppstå når temperaturen er over 600 °C [15]. Kritisk varmestrålingsfluks for pilot-antennelse av trevirke er 12 kW/m<sup>2</sup>, og 28 kW/m<sup>2</sup> for spontanantennelse (unpiloted ignition) [13].

Ved forbrenning dannes hovedsakelig karbondioksid CO<sub>2</sub> og hydrogenoksid H<sub>2</sub>O. Når tørrstoffet brenner, utskiller det varme og lys, og energi akkumulert i trevirke frigjøres. Trevirke kan frigjøre opp til ca. 17 MJ energi ved forbrenning av 1 kg [13].

Trevirkets struktur har lav varmeledningsevne. Dermed er overflaten lett antennelig, men har langsom oppvarming av de innerste lagene i materialet. Trevirke brenner forutsigbart, og dermed kan dimensjonene til konstruksjonen tilpasses i forhold til brannmotstanden. Det er resttverrsnitt som er avgjørende for bæreevne og stabilitet av konstruksjonen [22]. For å beregne resttverrsnitt over tidsintervall benyttes verdier for forkullingshastighet som er avhengig av type tre og densitet. Generelle verdier for forkullingshastighet vil variere mellom 0,65 mm/min til 0,8 mm/min ved endimensjonal standard branneksponeering [24]. I praksis vil forkullingshastighet variere med brannforløp, og vil være avhengig av densitet og fuktinnholdet [25]. Forkullingshastighet reduseres med økt densitet i trevirke og med økt fuktinnhold i trevirke, se Figur 5:



Figur 5. Gran - forkullingshastighet som funksjon av densitet og fuktighet [25].

Trevirke med høyere fuktinnhold vil ha lavere forkullingshastighet og mindre bidrag til brannen. I en bacheloroppgave utført av Gunnarshaug og Schei [26] ble det registrert at fuktnivået i trevirke kan påvirke tid til overtenning. Det nevnes blant annet at tiden til overtenning ble redusert fra 10 til 3 min ved redusert fuktinnholdet i treverk [26]. I løpet av et år vil fuktinnholdet i trevirke variere sammen med variasjoner i omgivelses fuktighet over året [27]. Kald og tørr vinter kan medføre lavt relativ fuktighet inne i byggverket, og dermed vil fuktinnholdet i massivtreet reduseres. Log [28] har funnet ut at det kan være en sammenheng mellom kald, tørr vinter og branner med alvorlige konsekvenser som oppsto i Norge i 2014. Dette tilsier at risiko for brann å oppstå og å spre seg kan være høyere når fuktighetsinnholdet i trevirker er redusert, dette kan også medføre økt forkullingshastighet.

Forkullet lag, som dannes ved forkullingen, er porøs, har lavt densitet og lavt termisk treghet som fører til høy overflatetemperatur og varmeavgivelseshastighet fra overflate. Kull oppnår overflatetemperatur 500 – 700 °C. Trelag som ligger bak det forkullede laget varmes opp til 300 °C og brytes ned. Tykkelsen av det forkullede laget kan være opp til 2,5 cm og vil være stabil under forbrenningen, hvor forbrenningshastigheten av trekull er tilnærmet lik til oppvarmings- og nedbrytningshastigheten av det innerste laget. Under ideelle forhold vil dette fortsette til hele brenselet til stedet i trevirket er frigjort [29]. For å opprettholde forbrenningen må det være tilstrekkelig med varmestrålingsfluks i rommet som er en drivkraft for forkullingen og pyrolyse av treverket. Det er observert i flere forsøk at forbrenningen av tømmer ikke vil foregå hvis varmestrålingsfluks reduseres eller fjernes [13].

## 2.4 Brannprosjektering

Hvert byggverk som oppføres i Norge skal tilfredsstillere funksjonskravene angitt i forskrift om tekniske krav til byggverk [11]. Forskriften angir krav til utforming av bygget, energikrav, konstruksjon- og brannsikkerhet m.m.

For å oppfylle relevante kravene i forskriften involverer tiltakshaver en prosjekteringsgruppe som vanligvis består av flere rådgivende ingeniører innen arkitektur (ARK), byggeteknikker (RIB),



brannsikkerhet (RIBr), elektroteknikk (RIE) og andre ingeniører. Størrelsen av en prosjekteringsgruppe er avhengig av kompleksiteten i prosjektet. Småhus kan prosjekteres av mindre prosjekteringsgruppe, mens i store bygg er det behov for en hel prosjekteringsgruppe med rådgivere innenfor hvert fag. Rådgiverne må sørge for at forskriftskravene i TEK blir oppfylt.

Når prosjekteringen er ferdig sørger entreprenørene for at den fysiske utformingen av tekniske løsninger og materialvalg er i samsvar med prosjekteringsunderlaget som er utarbeidet av prosjekteringsgruppen.

#### 2.4.1 Lov om planlegging og byggesaksbehandling (Plan- og bygningsloven)

Lov om planlegging og byggesaksbehandling (PBL) er den sentrale loven for byggevirksomhet. Loven gjelder alle byggeprosjekter og virksomheter i landet. Lovens formål er å fremme bærekraftig utvikling, sikre at byggetiltak utføres i samsvar med loven, og at hver enkelt byggesak behandles iht. byggesaksreglene m.m. [30].

PBL angir overordnede krav til brannsikkerhet i byggverk. Når prosjektet oppfyller de tekniske kravene til byggverk angitt i TEK anses loven som tilfredsstilt.

#### 2.4.2 Forskrift om tekniske krav til byggverk og veiledning

Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift – TEK 17) er en av forskriftene til PBL, og er den viktigste forskriften for prosjektering av brannsikkerhet. § 11 i TEK 17 beskriver generelle krav til sikkerhet ved brann for personsikkerhet, materielle verdier, miljø- og samfunnsmessige egenskaper.

Forskriften stiller krav til et minimum av egenskaper byggverk må besitte for å kunne bygges lovlig i Norge [11]. Bestemmelsene i TEK presenteres i form av funksjonskrav og ytelseskrav:

1. Funksjonskrav i forskriften angir overordnet formål eller funksjon som må oppfylles. Funksjonskrav fortolkes av myndighetene i form av preaksepterte ytelser.

Eksempel til funksjonskrav fra TEK 17, §11-4 angir krav til brannmotstand for bærende konstruksjoner i byggverk over 4. etasjer:

*«Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres», §11-4, TEK 17 [31].*

Forskriftskravet fortolkes til at bærende konstruksjoner skal opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom hele brannforløpet, det vil si fra antennelse finner sted og frem til brannen slukker av seg selv på grunn av mangel på brensel. Varighet av brannforløpet vil være avhengig av flere faktorer som brannenergi og størrelsen av branncellen, og ventilasjonsforhold.

2. Ytelseskrav i forskriften angir konkrete ytelser som må oppfylles.

Eksempel til ytelseskrav i TEK 17, §11-12 første ledd, bokstav a):

«a) Byggverk eller del av byggverk i risikoklasse 4 hvor det kreves heis, skal ha automatisk brannsløkkeanlegg. Deler av et byggverk med og uten automatisk brannsløkkeanlegg skal være ulike brannseksjoner» [31].

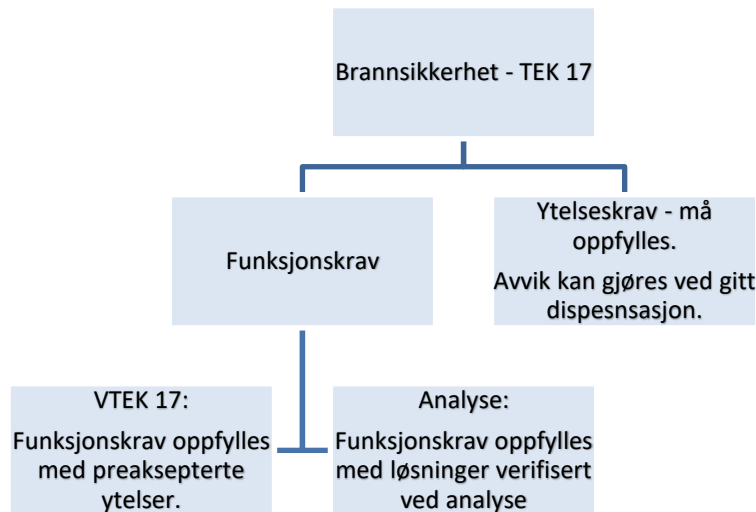
Med sløkkeanlegg mener man sprinkler, vanntåke eller andre typer sløkkeanlegg som kan prosjekteres etter relevante standarder (NS, NS-ISO, NS-INSTA, NS-EN).

Ytelseskrav kan avvikes dersom den aktuelle kommunen har gitt dispensasjon, § 2-2 i VTEK 17 [11].

De fleste kravene i forskriften i §11 angis i form av funksjonskrav. Oppfyllelse av disse skal dokumenteres på en av følgende måter:

- Ved å følge preaksepterte ytelsene angitt i veiledningen til teknisk forskrift, se kap. 2.4.3.
- Ved å benytte ytelsener verifisert ved analyse som beviser at funksjonskravet i forskriften er oppfylt.

Modell for oppfyllelse av krav i TEK 17 oppsummeres i figur 2:



Figur 6. Modell for oppfyllelse av krav til brannsikkerhet i TEK 17

Når man følger preaksepterte ytelsener kalles dette for en forenklet brannprosjektering som er godt egnet for de fleste byggverkene med en konvensjonell utforming. For kompliserte bygg med en spesielt arkitektonisk utforming og utradisjonelle løsninger følges preaksepterte ytelsener så langt som mulig, og analyse utføres for de ytelsene som fravikes [11].

### 2.4.3 Veiledning om teknisk krav til byggverk (VTEK)

Veiledning om tekniske krav til byggverk angir anbefalte løsningsprinsipper som må benyttes for å tilfredsstille ytelsesnivå i funksjonskravet. Disse løsningene kalles for preaksepterte ytelsener som er en måte for myndighetene å tolke og forklare funksjonskravene. Preaksepterte ytelsener er et praktisk hjelpemiddel som fungerer som et eksempel for brukeren til hvordan han kan fortolke forskriften [11].

noen tilfeller gir preaksepterte ytelser flere valgmuligheter. Prosjekteringsgruppe velger ytelser som passer best for det aktuelle prosjektet.

Veiledningen angir ikke konkrete detaljer, men henviser i stedet til norske standarder, Byggforskserien og andre publikasjoner som viser til dokumenterte løsninger og beregningsmetoder [11].

Preaksepterte ytelser til bærende konstruksjoner er beskrevet i veiledningen til teknisk forskrift §11-4. Det som er relevant for oppgaven er ytelser for byggverk i brannklasse 3.

*VTEK 17, §11-4. Bæreevne og stabilitet:*

*Tabell 1. Preaksepterte ytelser for brannmotstand til bærende konstruksjoner [11]*

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

Tabell 1 viser hvordan myndighetene tolker funksjonskrav i TEK 17, §11-4 (4). Ifølge tabellen vil bærende konstruksjoner med angitt brannmotstand oppfylle funksjonskravet og vil tilfredsstillende bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp. For byggverk over 4 etasjer skal bærende konstruksjoner bestå av ubrennbare materialer [A] med brannmotstand R 90 og R 60, se tabell 1. Bærende konstruksjoner i massivtre vil oppnå nødvendig brannmotstand, men ikke oppfylle ytelser om brennbarhet angitt i tabell 1.

#### 2.4.4 Analytisk brannteknisk prosjektering

Analytisk brannteknisk prosjektering kan gi et godt, strukturert grunnlag for beslutning når det foreligger en usikkerhet. Det finnes flere forskjellige definisjoner og modeller av analytisk prosjektering, terminologi er ikke prinsippfast eller konsekvent.

Framgangsmåte og definisjon for risikoanalyse er angitt i *NS 3901 Risikovurdering av brann* [32] :

«Risikoanalyse er en systematisk fremgangsmåte for å beskrive eller beregne risiko. Risikoanalysen utføres ved kartlegging av uønskede hendelser, og årsaker til og konsekvenser av disse».

NS 3901 [32] angir to analysemodeller for utførelse av analytisk brannteknisk prosjektering:

- Risikoanalyse.
- Komparativ analyse.

Risikoanalyse er en analysemodell under absolutte akseptkriterier, hvor risikoen sammenlignes med hjelp av statistikk, erfaringer o.l. [32]. Et eksempel på et absolutt akseptkriterium kan være risiko for å omkomme i brann pr. år eller pr. antall eksponerings timer, eller kritisk strålingsintensitet som personer utsettes for ved rømning.

Når komparativ analysemodell benyttes vil risikonivå i referansebyggverket, som er i henhold til preaksepterte løsninger, representere akseptkriterium [32]. Brannsikkerhet i analysebyggverk må være bedre eller lik referansebyggverket.

Generelt for begge modellene er at man skal kartlegge uønskede hendelser som potensielt kan oppstå, årsaker og sannsynligheter for at disse hendelsene vil oppstå, samt konsekvenser som hendelsene kan medføre. På bakgrunn av dette kan risiko beskrives eller beregnes for mennesker, miljø og materielle verdier. Resultatet sammenlignes med de fastsatte akseptkriterier.

Bruk av massivtre i høye byggverk er en ny byggemetode. Det er lite erfaring og kunnskap med brann i slike byggverk. Derfor ønskes det i denne oppgaven å fokusere på analysebyggverket av massivtre og å finne hvilke brannrisikoer kan en boligbyggverk av massivtre representere, og ikke sammenligning av forskjellene mellom et preakseptert byggverk og analysebyggverk. Dermed er det aktuelt å utføre en risikoanalyse framfor en komparativ analyse.

### **Risikoanalyse**

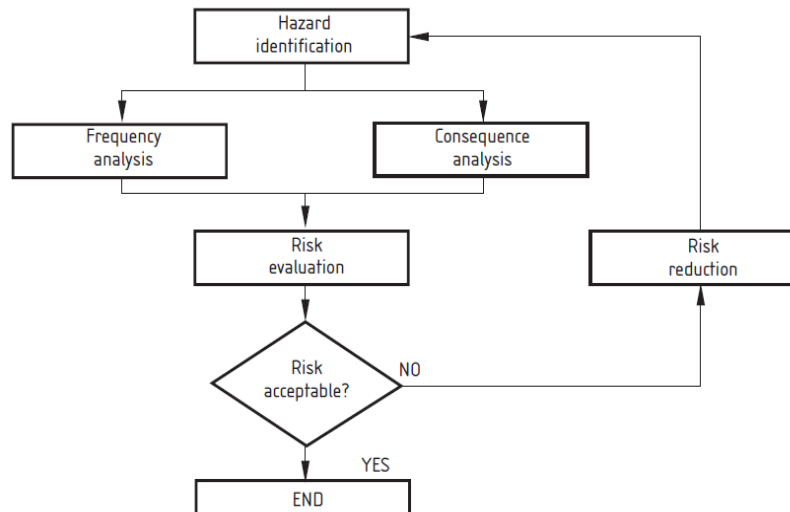
Framgangsmåte for utførelse av risikoanalyse finnes i NS 3901 [32]. Risikoanalyse kan utføres ved bruk av følgende analysemetoder:

- Kvalitativ analyse.
- Hendelsestreanalyse

En kvalitativ analyse er en analysemetode hvor man benytter en logisk tilnærming for å vurdere brannscenarioer som er relevante for byggverket basert på statistikk og erfaringer. Risikoen kan beskrives med ord uten bruk av avanserte beregninger. En rent kvalitativ analyse kan benyttes i enkle tilfeller med ukompliserte problemstillinger og vil gi tilstrekkelig grunnlag for vurdering av branntekniske løsninger, eller foreslå nødvendig tiltak. Uavhengig av kompleksitetsgrad bør alle analyser starte med en kvalitativ vurdering som vil danne et beslutningsgrunnlag for videre valg av analyseteknikker [32], [33] [34].

Hendelsestre (ETA – event tree analysis) er en av metodene for utførelse av probabilistisk analyse [35]. Probabilistisk risikoanalyse (PRA) baserer seg på statistiske data om bygningsbranner, data for funksjonssvikt av aktive eller passive tiltak, og pålitelighet til disse [35]. Analyse utgår fra hendelseskjeder der inngangsdata og sannsynligheter tillates å variere. Ved hjelp av PRA kan frekvens for et potensielt brannscenario beregnes. Konsekvenser kan angis som frekvens for å omkomme i brann, eller økonomiske tap i MNOK pr. år [35].

Teknikkene som benyttes i PRA beskriver risiko som en funksjon av konsekvenser og frekvenser/sannsynligheter ved en hendelse. Generell fremgangsmåte ved probabilistisk tilnærming vises i figur 2.



Figur 7: Probabilistisk risikoanalyse - generell fremgangsmåte [35].

Fordelen med bruk av statistikk ved analyse er at den er basert på virkelige hendelser og resultater er lett å implementere. Ulempen ved bruk av PRA er mangelfull data, dette gjelder spesielt hendelser med store konsekvenser og lav frekvens.

Probabilistisk risikoanalyse kan være mest brukbar i følgende tilfeller:

- input data er varierende;
- alternative løsninger fungerer på en annen måte sammenlignet med standardiserte, preaksepterte løsningene;
- der svikt av branntekniske løsninger kan medføre store konsekvens.

I denne oppgaven vil probabilistisk analyse være godt egnet for å vurdere risiko analysebyggverket.

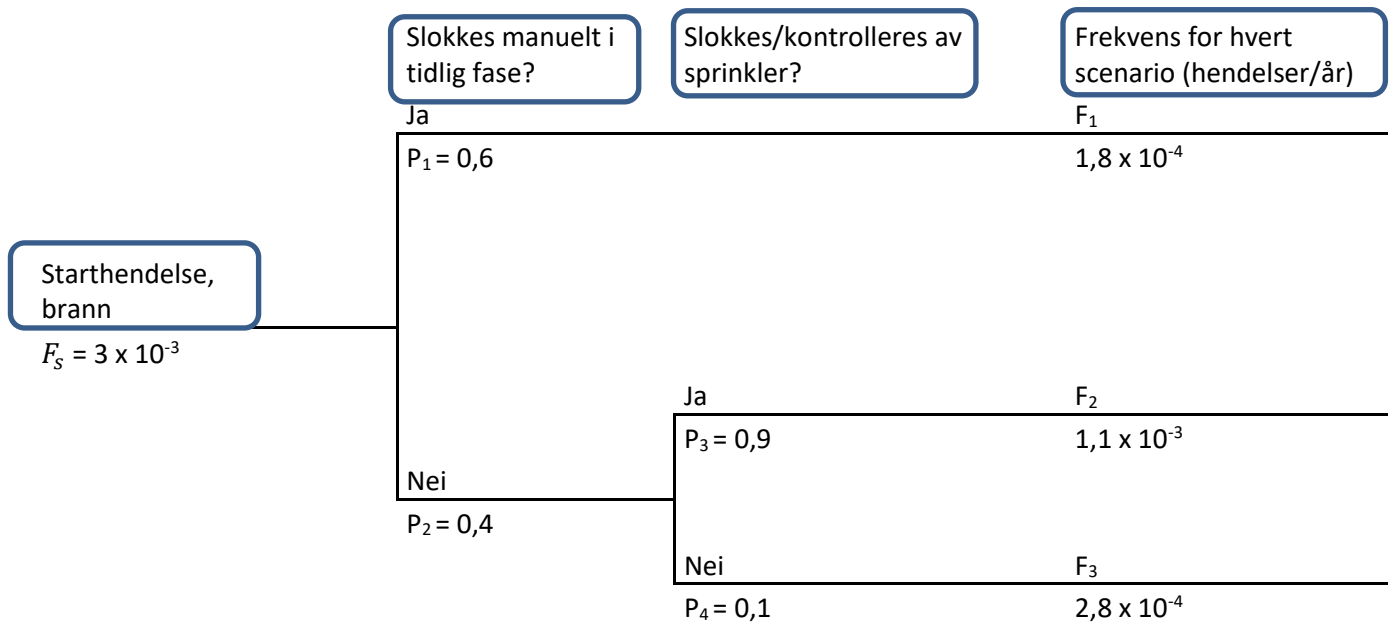
### **Hendelsestre og risikoberegning**

Hendelsestreanalyse kan benyttes for å beregne frekvenser og sannsynligheter for ulike brannscenarier [35]. Et hendelsestre deler opp en starthendelse i flere delscenarier, der hver komponent har en viss sannsynlighet ( $P$ ) for pålitelig funksjon eller svikt. Sannsynligheter og frekvenser baseres på brannstatistikk.

Frekvensen til hvert enkelt delscenario beregnes ved å multiplisere startfrekvens ( $F_s$ ) med sannsynligheten til hver komponent i scenarieret [35]. For eksempel frekvens for delscenario 2 i figur 4 kan finnes:

$$F_2 = F_s \times P_2 \times P_3$$

Figur 8 viser eksempel på utforming av en hendelsestre. Sannsynligheter og frekvens for brannstart i bolig er tatt fra *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings* [35].



Figur 8. Eksempel på utforming av hendelsestre

Frekvens ( $F_1$ ) for scenario 1 viser at hendelsen kan oppstå 0,0018 ganger pr. år eller 1,8 ganger pr. 1000 år i ett boligbyggverk. Dette betyr at ei gruppe på 1000 boligbyggverk kan ha 1,8 branner som blir slokkes manuelt i løpet av ett år.

Risiko for hvert enkelt brannscenario kan beregnes gjennom en kombinasjon av frekvens og konsekvens som brannscenarioet medfører [35]. I *SPFE Engineering Guide to Performance - based Fire Protection Analysis and Design of Buildings* [36] angis følgende metode for kvantifisering av risiko:

$$\sum Risk_i = \sum (Loss_i \times F_i)$$

$Risk_i$  = Risiko assosiert med scenario  $i$ .

$Loss_i$  = Tap assosiert med scenario  $i$ .

$F_i$  = frekvens for scenario  $i$  å oppstå.

Konsekvens (Loss) eller alvorlighetsgrad for hvert utfall kan estimeres analytisk basert på utfall fra hendelsestre [37].

Alvorlighetsgrad kan kartlegges kvalitativt, for eksempel:

- Med håndslukker, brannslange og annet manuelt slokkeutstyr kan en brann håndteres i tidlig fase når temperaturen er lav, og brannareal er lite. En slik brann vil ha lite skadeomfang.

Pris pr. kvadratmeter kan være et godt utgangspunkt for estimering av konsekvens for materielle verdier ved brann i en branncelle, etasje eller bygning.

## 2.5 Klassifisering av materialer og bygningsdeler

Produkter og bygningsdeler som benyttes i byggverk skal ha dokumentasjon om at de oppfyller de nødvendige egenskapene som er angitt i veiledningen om tekniske krav til byggverk. Følgende egenskaper er vesentlige for materialer, produkter og bygningsdeler [11]:

- brannmotstand til bygningsdeler, angis i minutter;
- egenskaper til materialer og produkter ved brann.

Brannmotstand til bærende bygningsdeler angis med bokstav *R* og angir hvor mange minutter en bærende konstruksjon kan opprettholde sin bæreevne ved brann [11]. Brannmotstand kan beregnes i samsvar med standard *NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008: Eurocode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann* [11]. Produsent og/eller leverandør må ha dokumentasjon til sine produkter og må angi brannmotstand som produktene oppnår [11]. Brannmotstand angis i minutter, henholdsvis 30, 60, eller 90 min. Brennbare bærende konstruksjoner betegnes med [*B*] og ubrennbare med [*A*]. Eksempel på skrivemåte kan være *R 90 [B 90]*.

For branncellebegrensende konstruksjoner angis brannmotstand som *EI*. *E* står for integritet og *I* for isolasjonsevne [11]. Konstruksjonen kan hindre brannspredning i 30, 60 eller 90 min, og kan bestå av både brennbare [*B*] og ubrennbare materialer [*A*]. Vanligvis vil vegger og etasjeskillere mellom ulike bruksenheter ha branncellebegrensende funksjon som skal hindre brannspredning mellom ulike brannceller i den tiden det er nødvendig for rømning og redning.

Egenskaper til materialer og produkter ved brann klassifiseres utfra bidraget til brann og røykproduksjon. Hovedklassene for overflater og kledninger er *A1*, *A2*, *B*, *C*, *D*, *E* og *F*. Produkter som er klassifisert som *A2* er ubrennbare eller begrenset brennbare ved brannpåvirkning, mens produkter brannklassifisert som *F* har ikke noen ytelser ved brannpåvirkning og bidrar til brannen [11].

Underklasser for materialer er *s1*, *s2* og *s3* for røykproduksjon og *d0*, *d1*, *d2* for brennende partikler og dråper. Materialer klassifisert som *s1* og *d0* har liten røykproduksjon og ingen brennende dråper, *s3* og *d2* betyr at materialer har ingen begrensning i røykproduksjon og brennende partikler.

Kravet om brannklassifisering f.eks. *B-s1,d0* kan stilles til overflate – det ytterste siktet eller konstruksjonen i sin helhet. Trevirke vil generelt oppnå kravet *D-s2,d0*, brannbehandlet trevirke kan oppnå kravet *B-s1,d0*.

### 3. Metode

I dette kapitlet beskrives og begrunnes valg av metoder som er brukt til å belyse problemstillingen i oppgaven. For å etablere bedre innsikt om brannforløp i bygg av trekonstruksjoner utføres en studie av relevant litteratur. På bakgrunn av empirien fra litteraturstudie utføres kvalitativ og kvantitativ analyse hvor sikkerhetsnivå i høye trehus vurderes.

#### 3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie baserer seg på en systematisk innsamling av data fra utvalgte studier som beskriver brannforløp i et rom av massive trekonstruksjoner. Dette er relevant fordi det finnes lite kunnskap i forhold til brannodynamikk i rom av massivtrekonstruksjoner, og nesten ingen erfaring med branner i høye trehus.

Relevante studier er stor- og småskala forsøk utført i rom bestående av massivtre, eller rom med innvendig trekledning. Studier søkes via databaser og fagressurser som er tilgjengelig ved HVL, hovedsakelig benyttes Fire Reserach Engine, ScienceDirect, SpringerLink og Web Of Science.

Det benyttes kombinasjon av søkeord som: fire+massive timber, fire+cross laminated timber, charing rate, contribution to fire, protection of wood, compartment fires, combustible linings., wood+fire, encapsulation. Søket er avgrenset til artikler som beskriver storskala brannforsøk, og forsøk av beskyttelses metoder av massivtre utført i mindre skala.

Hensikten med litteraturstudie er følgende:

1. Få en bred forståelse hvordan massivtre kan påvirke brannodynamikken i et rom.
2. Kartlegge hvilke bidrag har eksponerte treoverflater til brannforløp.
3. Kartlegge hvilke passive brannsikringstiltak kan benyttes for å redusere bidraget fra massive trekonstruksjoner.
4. Benytte empirien fra utførte forsøk i en risikoanalyse av brann i byggverk av massivtre.

Bidraget til brannforløpet kan vurderes gjennom registrert temperatur i rommet, forkullingsdybde, varmeavgivelseshastighet (heat release rate) og utvendig forbrenning. Empirien fra litteraturstudium benyttes videre for å identifisere eventuelle tiltak for å redusere konsekvenser av brann, og å vurdere mulige brannscenarier som er aktuelle for byggverk av massivtre.

#### 3.2 Kvalitativ og kvantitativ analyse

Litteraturstudie gir et grunnlag for aktuelle tiltak som kan kompensere bruk av brennbare konstruksjoner, og empiri om hvordan en brann kan utvikle seg i et byggverk av massivtre. Denne kunnskapen som man får fra litteraturstudien benyttes for utførelse av en risikovurdering som består av to en risikoanalyse og risikoevaluering. I risikoanalysen identifiseres brannrisikoer som byggverk med eksponerte, brennbare bærende konstruksjoner innebærer for mennesker og for materielle verdier. I risikoevalueringen vurderes og om denne risikoen kan være akseptabel.



For å avdekke mulige hendelseskjeder som kan lede til store, eller katastrofale konsekvenser benyttes hendelsestreanalyse. Valg av denne teknikken er begrunnet i kap. 2.4.4.

Som veiledning for utførelse av risikovurdering benyttes følgende standarder:

- NS 3901: Krav til risikovurdering av brann i byggverk
- Application of fire safety engineering principles to the design of buildings —Part 7: Probabilistic risk assessment.

Svakheter ved bruk av denne metoden:

- Statistikk er ikke alltid representativ.
- Forenklinger og antagelser i analysen.

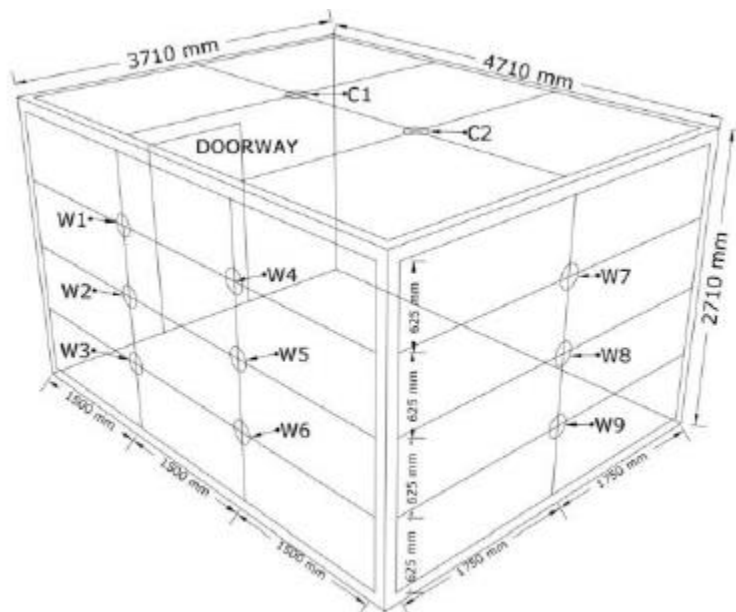
Styrker med denne metoden:

- Gjennom helhetsbildet identifiserer man farer som er knyttet til analysebyggverket.

## 4. Del 1 – litteraturstudie

### 4.1 Li et al. (2016)

I en artikkel om storskala brannforsøk beskriver Li et al. [38] resultater fra 10 ulike tester som representerte et naturlig brannforløp i brannrom av trekonstruksjoner. Testene nr. 3-7 ble utført i et rom bygget av massivtre med vegger og tak av 105 mm tykke massivtreelementer med 3 lameller på 35 mm. Formålet med forsøkene var å undersøke bidrag fra massivtre og prestasjon av beskyttelse med gipsplater. Brannrommene i alle forsøkene hadde gulvareal 3,5 x 4,5 m<sup>2</sup> og høyde 2,5 m. Åpningsareal var 1,069 x 2,0 m<sup>2</sup>.



Figur 9. Skisse av testrommet [38]

I test 3 var massivtre eksponert i alle vegger og himling, mens i test 4 var massivtreet tildekket med 2x12,7 mm branngipsplater.

Test 5-7 var himlingen i alle testene var tildekket med 2x12,7 mm branngipsplater. I test 5 var massivtreet eksponert i to tilstøtende vegger, mens test 6 ble gjennomført med to motstående eksponerte vegger av massivtre. Øvrige vegger var kledd med 2x12,7 mm branngipsplater. I test 7 var en sidevegg av massivtre eksponert.

Tabell 2. Beskrivelse av testene

Test nr.	Beskrivelse
Test 3	Massivtreet er eksponert i alle vegger og himling.

Test 4	Alle overflater er tildekket med 2x12,7 mm branngips.
Test 5	To motstående vegger (20 m <sup>2</sup> ) av massivtre er eksponert.
Test 6	To tilstøtende vegger (22,5 m <sup>2</sup> ) av massivtre er eksponert.
Test 7	En sidevegg (11,25 m <sup>2</sup> ) av massivtre er eksponert.

For å representere brann i et soverom, bestod variabel brannenergi av en seng, madrasser, kommode o.l. De eksponerte overflatene av massivtre var ikke inkludert i beregning av variabel brannenergi, men tregulvet ble inkludert. Den variable brannenergien i forsøkene varierte fra 529 – 624 MJ/m<sup>2</sup> gulvareal.

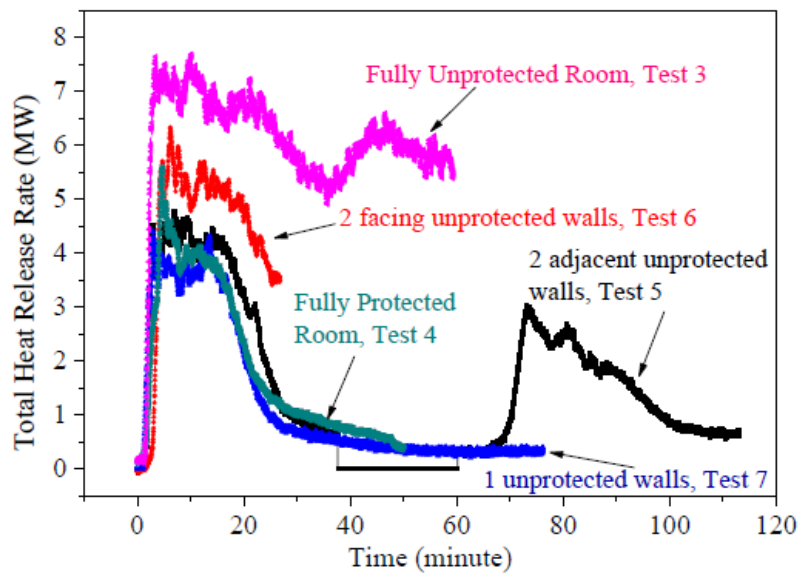
I brannforsøkene ble det fremstilt et naturlig brannforløp. Varmeavgivelseshastigheter, temperaturer ble målt i forsøkene, og forkullingshastighet beregnet. Total varmeavgivelseshastigheten ble målt som samlet varmeavgivelseshastighet inne i brannrommet og utenfor brannrommet.

### **Testresultater**

I test 3 medførte eksponerte overflatene av massivtre stort bidrag til brannutviklingen, dette ble registrert som følge av intensiv utvendig forbrenning, høy total varmeavgivelseshastighet og ingen tegn på avkjøling i brannrommet. Temperaturen i brannrommet steg til 1000 °C etter 15 min, og videre varierte mellom 1000 – 1200 °C fram til at brannen ble slokket manuelt. Den totale varmeavgivelseshastigheten var omtrent 80 % høyere i test 3 sammenlignet med test 4 hvor alle overflatene var kledd med gipsplater. Det var ingen bidrag til brannforløpet i test 4. Se **Feil! Fant ikke referanseilden.** og Figur 11.

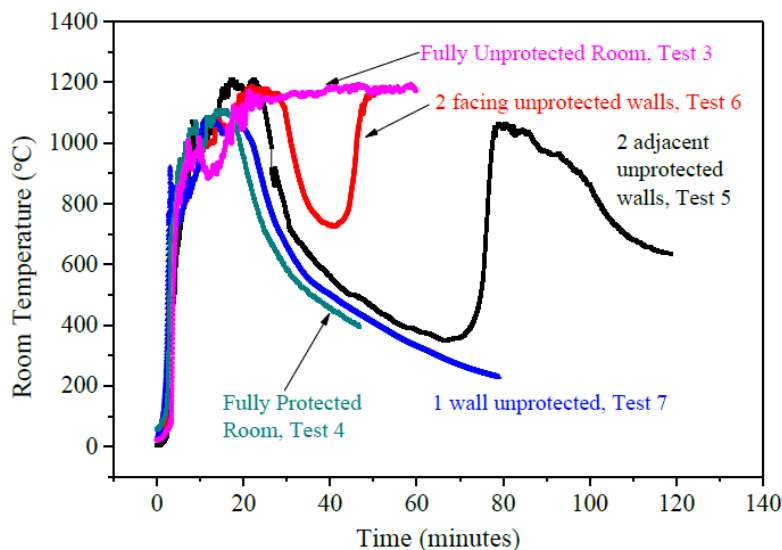
I Test 5-7 ble det registrert at ulik plassering og andel av eksponert areal av massivtre hadde en stor betydning for varmeavgivelseshastigheten. I test 6, med to eksponerte motstående vegger, ble det registrert maks total varmeavgivelseshastighet 6,33 MW, mens i test 5, med to eksponerte tilstøtende vegger, ble det registrert maks total varmeavgivelseshastighet 4,79 MW.

I test 7, med en eksponert overfalte av massivtre, var varmeavgivelseshastigheten tilnærmet lik test 4 hvor overflatene var kledd med gips. Bidraget til brannen i test 7 var neglisjerbar. Etter 20 min ble varmeavgivelseshastighet redusert og brannen gikk i avkjølingsfase, se Figur 11.



Figur 10. Total varmeavgivelseshastighet Test 3-7 [38].

Data for test 6 etter 20 min ble ikke registrert på grunn av tekniske problemer. Som det kommer frem fra figur 10, ble varmeavgivelseshastigheten i test 6 og 5 redusert etter 20 min, men økte igjen etter ca. 70 min i test 5. Økningen i varmeavgivelseshastigheten skyldes delaminering av massivtreet. De første eksponerte lamellene falt av og friskt trevirke ble eksponert. Dette medførte sekundær overtenning i brannrommene både i test 5 og 6. Temperaturøkningen som følge av sekundær overtenning kan observeres på Figur 11.



Figur 11. Temperatur i brannrommene [38]

Sekundær overtenning i test 6 oppsto tidligere enn i test 5. Dette skjedde på grunn av at to motstående vegger sendte ut mye varmestråling mot hverandre. Det ble også observert dypere forkulling enn i test 5.

### **Effekt av gipsplater**

2x12,7 mm branngipsplater montert direkte på massivtre viste gode evner til å hindre forkulling av bakenforliggende massivtreet.

I test 3, med gipskledde overflater, var det ingen tegn på forkulling av massivtreet bak branngipsplatene etter at den variable brannenergien var forbrent. Bruk av branngipsplatene i denne testen har vist seg til å være en effektiv metode for å beskytte trekonstruksjonene. Basert på brannforsøkene ble det observert at en 12,7 mm branngipsplate kan utsette start av forkullingen i minst 20 min. Den høyeste temperaturen som ble målt mellom gipsplatene og massivtreet var 133 °C. Testen ble avsluttet etter 56 minutter.

To lag gips i himlingen beskyttet bakenforliggende krysslaminert trevirke mot forkulling i 80 minutter i test 5, mens i test 6 ble massivtreet beskyttet i ca. 50 minutter. Temperaturen i test 6 var høyere og sekundær overtenning oppsto tidligere enn i test 5. Derfor oppstod forkullingen i test 6 tidligere enn i test 5.

### **Forkullingshastighet**

For å beregne forkullingshastigheter ble termoelementene plassert inne i massivtreet. Når termoelementene indikerte 300 °C ble det antatt at forkullingsfronten kom fram til en vis dybde hvor termoelementet var plassert. Videre ble forkullingshastighet beregnet.

I løpet av første 40 min ble det målt 24 mm forkulingsdybde i test 3. Basert på dette ble det beregnet gjennomsnittlig forkullingshastighet 0,85 mm/min. I løpet av 60 min ble den gjennomsnittlige forkullingshastigheten 1,0 mm/min som er mye høyere enn i løpet av de første 40 min. Økningen i forkullingshastigheten oppstod på grunn av delaminering av massivtreelementene.

I test 5 ble det registrert en forkullingshastighet 0,6 mm/min i løpet av de første 15 min. Videre begynte forkullingshastigheten å stige og oppnådde maks 1,1 mm/min. I test 6 ble det registrert en forkullingshastighet 0,6 mm/min i begynnelse av brannforsøket, men har raskt endret seg til 1,0 mm/min. Posisjonering av eksponerte massivtrevegger i test 6 medførte optimal varmestråling mellom to overflatene. Dette førte til at temperaturen i brannrommet var høy i lang tid, og dermed var forkullingshastigheten høyere enn i test 5.

I test 3 ble det registrert lavere forkullingshastighet enn i test 5 og 6. Dette var et resultat av en liten andel av eksponert massivtre sammenlignet med de andre testene. Delaminering oppstod ikke i test 3. Derfor holdt forkullet lag seg på massivtreveggen i lang tid, og fungerte som en termisk barriere med isolerende funksjon som bremsset bevegelsen av forkulling innover massivtreveggen.

### **Bidrag til brannforløpet**

Som følge av test 5-7 ble det funnet ut at plassering av eksponerte vegger i forhold til hverandre var avgjørende for temperaturen og den totale varmeavgivelseshastigheten. Motstående vegger i test 6 bidro mer til den totale varmeavgivelseshastigheten og temperaturen var høyere sammenlignet med test 5.

En eksponert massivtrevegg i test 7 hadde neglisjerbart bidrag til brannen. Den totale varmeavgivelseshastigheten og temperaturen i brannrommet var tilnærmet likt test 4 med gipskledde

overflater. Det ble konkludert at en viss prosent av massivtre kan være eksponert uten å medføre stort bidrag til brannen.

Det ble observert at bidrag fra massivtre til brannenergi økes med brenselets areal som er eksponert. Større eksponeringsflate medførte økt mengde av gasser som ble frigjort. Disse gassene opprettholdt forbrenningen i brannrommet, selv om den variable brannenergien ble brukt opp. I test 3 ble den totale varmeavgivelseshastigheten omtrent 80 % høyere enn i test 4 med gipskledde overflater. I denne testen, ifølge Li et al. [38], har mesteparten av varmeavgivelsen skjedd utenfor brannrommet hvor det var tilstrekkelig med oksygen for forbrenningen.

## 4.2 Hasburgh et al. (2016)

Hasburgh et al. [39] beskriver 23 brannforsøk som ble utført på prøvestykker av krysslaminert trevirke med ulike innkapslingsmetoder. Målsetning med forsøkene var å studere hvordan ulike tildekningsmetoder av massivtre kan beskytte massivtreet mot forkulling.

Prøvestykker besto av krysslaminert massivtre med dimensjoner 1140 mm x 1970 mm x 105 mm, og 914 mm x 914 mm x 135 mm. Disse var montert horisontalt i en forbrenningsovn. Temperaturen i ovnen fulget standardbrannkurve i henhold til ASTM E119 og CAN/ULC-S101. Termoelementene var installert i hvert prøvestykke for å måle temperatur i forskjellige dybder, og benytte temperaturmålinger for beregning av forkullingshastigheter.

Det er av interesse å undersøke resultater fra følgende forsøk:

1. En branngipsplate montert direkte på KLT.
2. En branngipsplate og 100 mm uisolert hulrom mellom gipsplate og KLT.
3. En branngipsplate og hulrom isolert med 13 mm glassull.
4. En branngipsplate og hulrom isolert med 51 mm mineralull.
5. En branngipsplate og hulrom isolert med 76 mm mineralull.
6. En branngipsplate og hulrom isolert med 100 mm mineralull.
7. Beskyttelse med to lag branngipsplater.

I forsøkene over ble benyttet en 16 mm branngipsplate type X som er ekvivalent til branngips type F klassifisert etter europeisk standard EN 520 [39].

### **Resultater**

Innkapslingstid i brannforsøkene representerer tiden som hindrer forkulling av massivtreet, og dermed hindrer bidrag til brannforløpet. Innkapslingstid var determinert som økning i gjennomsnittstemperatur til 250 °C, eller økning til 270 °C i et punkt på overflate av massivtre.

16 mm branngipsplate montert direkte på underside av prøvestykke beskyttet trevirke i 26,5 minutter mot forkulling, 100 mm hulrom bak branngipsplate medførte ingen endring. I neste forsøket ble hulrommet mellom branngipsplate og massivtre redusert til 13 mm, og isolert med 13 mm glassull. Dette beskyttet massivtreet mot forkullingen i 31 minutt. 51 mm steinull i hulrom økte beskyttelsestiden til 42,6 minutter, 76 mm steinull økte beskyttelsestiden til 57,3 minutter, hulrom isolert med 100 mm

steinull beskyttet mot forkulling i 75 minutter. To branngipsplater beskyttet mot forkulling i 70,7 minutter.

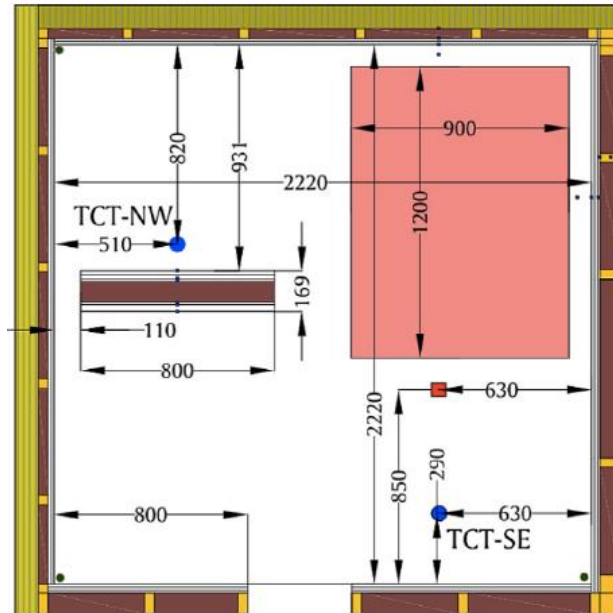
Det var forventet at en branngipsplate kan beskytte mot forkulling i 30 minutter, beskyttelse med to gipsplater 60 minutter. Forventningene stemte med resultatene fra forsøk. Bruk av 76 mm steinull doblet beskyttelsestiden i forhold til bruk av 16 mm branngipsplate.

### 4.3 Kolaitis et al. (2014)

Kolaitis utførte [40] brannforsøk i et rom bestående av to massivtrevegger, og to bindingsverkvegger isolert med mineralull. Hensikten med forsøket var å vurdere prestasjon av branngipsplater og trebaserte plater for å beskytte massivtre- og bindingsverkskonstruksjon mot brann.

To vegger besto av 95 mm tykke krysslagte massivtreelementer. Disse var beskyttet med 40 mm steinull og 2x12,5 mm branngips type DF. De andre to veggene var konstruert av bindingsverkskonstruksjon med 85 mm trestendere. Hulrommet mellom trestenderne var isolert med 85 mm steinull. Denne konstruksjonen var tildekket med 10 mm kryssfiner og 2x12,5 mm branngips.

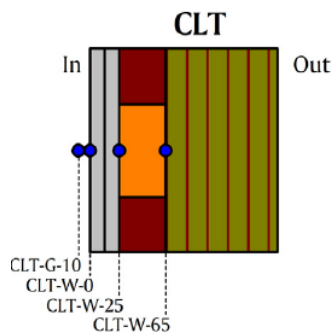
For å sammenligne funksjonsytelse av branngipsplater og trebaserte plater ble det bygd en frittstående vegg midt i rommet med trebasert kledning. Denne veggen var konstruert av 85 mm trestendere isolert med steinull og tildekket med 10 mm kryssfiner. I tillegg til dette var veggen kledd med 2x16 mm MDF-plater på den ene siden, og 2x16 mm sponplater på den andre siden.



Figur 12: plantegning viser plassering av vegger. Frittstående vegg i midten [40]

Brannrommet hadde innvendige dimensjoner 2,22 m x 2,22 m x 2,11 m. Vinduet med åpningsareal 0,43 x 0,98 m<sup>2</sup> var åpent under forsøket. Dør til rommet var brannklassifisert. Døren var lukket under forsøket. Brannenergi ble beregnet iht. Eurokode 1 [41] og tilsvarte spesifikk brannenergi på ca. 420 MJ/m<sup>2</sup> gulvflate.

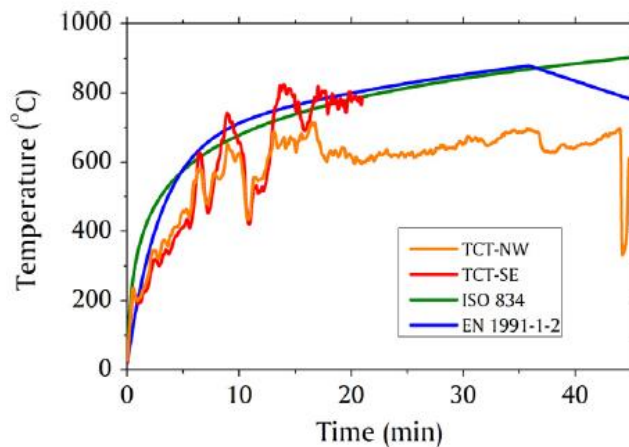
Termoelement CLT-W-65 ble plassert mellom massivtre og steinull, CLT-W-25 var plassert mellom gipsplater og steinull, se Figur 13.



Figur 13. Massivtre er beskyttet med steinull og to gipsplater [40]

### Resultater

Brannen utviklet seg fritt i rommet og etter 45 min ble brannen sløkket manuelt. Etter 9 min var gjennomsnittstemperatur i rommet ca. 750 °C. I perioden mellom 9 og 11 min ble oksygenivå i rommet redusert, da falt gjennomsnittstemperatur ned til 420 °C. Dette tydet på et ventilasjonskontrollert brannforløp. I senere fase fikk brannen tilgang på mer oksygen og temperaturen begynte å stige igjen. Etter 17 min var gjennomsnittstemperaturen i rommet ca. 830 °C. Fullt utviklet brann ble observert fra 17 til 45 min med en gjennomsnittstemperatur i rommet på 600 °C. Temperaturutviklingen i røyklaget gjennom hele forsøket var målt med termoelement TCT-NW og var tilnærmet lik standard brannkurve iht. ISO 834.



Figur 14: Temperatur i øvre del av røyklaget sammenlignet med ISO 834 og EN 1991-1-2 [40]

Temperaturen mellom branngipsplater og trelekter var lavere enn 120 °C, temperatur bak steinull var i gjennomsnitt lavere enn 90 °C gjennom brannforløp. Det ble ikke observert tegn på forkulling av massivtre og bindingsverk som var tildekket med 2x12,5 branngips. Kledning av MDF-plater på den frittstående veggen falt av delvis, og det ble observert at bindingsverk ble tydelig forkullet. Brannforsøket viste at branngipsplater har bedre egenskaper for brannbeskyttelse enn trebaserte plater.



#### 4.4 Frangi og Fontana (2005)

Frangi og Fontana [42] beskriver storskala brannforsøk som ble utført i brannrom av bindingsverkskonstruksjon. Brannrommene representerte et hotellrom. Det ble utført tre brannforsøk med aktivt sprinkleranlegg, og tre brannforsøk uten sprinkleranlegg, men med ulike kledninger og overflater i brannrommet. To av rommene hadde gipskledning innvendig, mens de andre to rommene hadde OSB-plater (trebasert produkt) innvendig. Hensikten med studie var å undersøke virkningsgrad av aktive og passive brannsikringstiltak i et hotellrom.

Testoppsett besto av to rom (moduler) som var plassert oppå hverandre for å modellere vertikal brannspredning ved brannstart i det nederste brannrommet. Hvert brannrom hadde dimensjoner 6,6 m x 3,1 m x 2,8 m. Vinduer i brannrommene hadde åpningsareal 1,5 x 1,7 m<sup>2</sup>.



Figur 15. Rom med OSB kledning til vestre og gipskledning til høyre

Det var installert sprinkleranlegg i de tre første brannforsøkene. Sprinkleranlegget besto av sprinklerhoder som var montert i himlingen og på veggen. Utløsningstemperatur varierte mellom 57-68 °C for sprinklerhoder i himlingen, og 68 °C for sprinklerhodet montert på veggen.

Som variabel brannenergi ble det benyttet trepaller og en madrass. Spesifikk brannenergi var beregnet til 366 MJ/m<sup>2</sup> gulvflate i brannrommene med gipskledning, og 855 MJ/m<sup>2</sup> gulvflate i brannrommene med OSB-plater.

##### **Resultater**

De første tre brannforsøkene ble utført i brannrom med brennbare overflater og installert sprinkleranlegg. Sprinklerhoder i hvert brannforsøk ble utløst mellom to og tre min etter antennelse. Brannen ble slokket i tidlig utviklingsfase. Til tross for rask brannutvikling, var det ingen skader på OSB kledningen. Forsøkene bekreftet at brennbar kledning kan kompenseres med sprinkleranlegg med hurtigutløsende (QR-quick response) sprinklerhoder.

For å observere hvilke forskjeller for brannforløp utgjør bruk av brennbare og ubrennbare overflater, ble det utført brannforsøk uten sprinkleranlegg. Den ene brannforsøket ble utført i et rom med OSB-plater, mens det andre brannforsøket ble utført i et rom med gipskledning. Det ble registrert at overtenning oppsto tidligere i brannforsøket med brennbare enn i brannforsøket med gipskledd brannrom. Det ble observert at trebasert kledning medfører stor produksjon av branngasser som forbrenner intensivt utenfor åpningen.



Figur 16. Bildet ble tatt etter 7 min. Rom med brennbare overflater til venstre, ubrennbare til høyre

I brannforsøket med OSB kledning i brannrommet var utvendig forbrenning så intensivt at brannen har spredd seg til rommet over etter ca. 7,5 min. Mens i brannforsøket med gipskledde konstruksjonen tok det ca. 40 min før vinduene i rommet over ble knust.

Følgende forskjeller ble observert mellom rom med brennbare og ubrennbare kledninger:

Tabell 3. Hendelsesforløp i brannforsøkene uten sprinkleranlegg

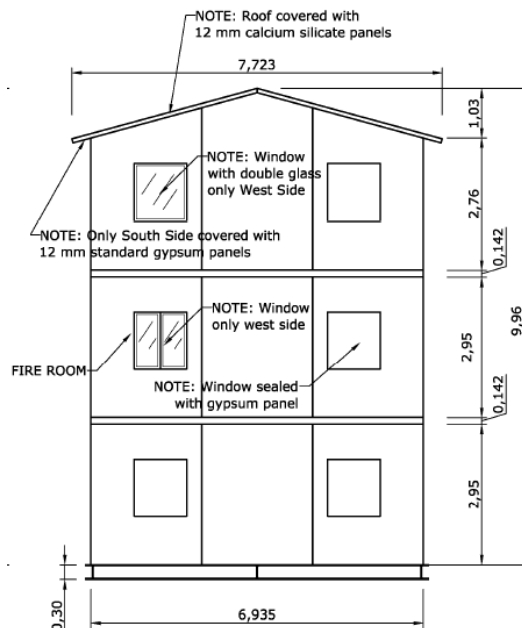
Hendelser	Kledning i vegg/himling	
	OSB (brennbare overflater)	Gipskledning
Tid til overtenning	4 minutt	6-7 minutt
Tid til knuste vinduer i nederste modul	6 minutt	14 minutt
Tid til knuste vinduer i øverste modul	7,5 minutt	40 minutt

Frangi et al. [42] konkluderte at OSB-plater medfører økning i varmeavgivelseshastighet, og dermed økes intensitet for utvendig forbrenning som fører til økt risiko for vertikal brannspredning.

#### 4.5 Frangi et al. (2008)

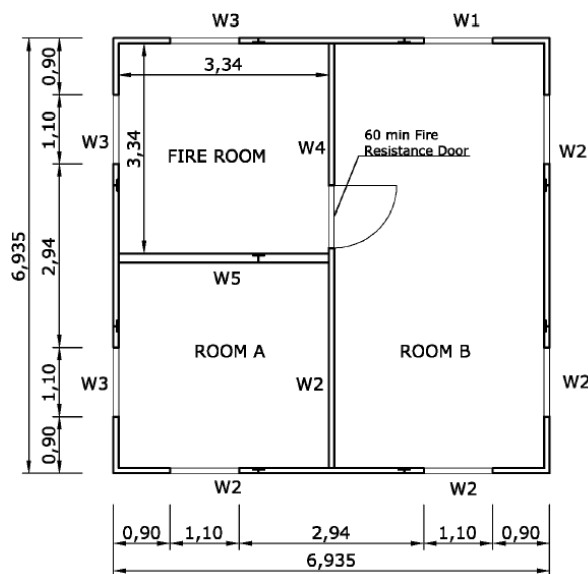
Som en del av forskingsprosjektet SOFIE ble det gjennomført storskala brannforsøk i et 3 etasjes byggverk med krysslaminerte massivtrekonstruksjoner. Hensikten med forskningsprosjektet var å undersøke oppførsel av bærende krysslaminerte massivtreelementer under et naturlig brannforløp. Resultatene fra brannforsøket ble presentert av Frangi et al. [43].

Byggverket med grunnflate på 7 x 7 m<sup>2</sup> og høyde 10 m ble konstruert av 85 mm og 142 mm tykke krysslaminerte trekonstruksjoner. Brannforsøket ble gjennomført i 2. etasje, i et rom med gulvflate på 10,9 m<sup>2</sup>.



Figur 17. Fasade øst og vest [43]

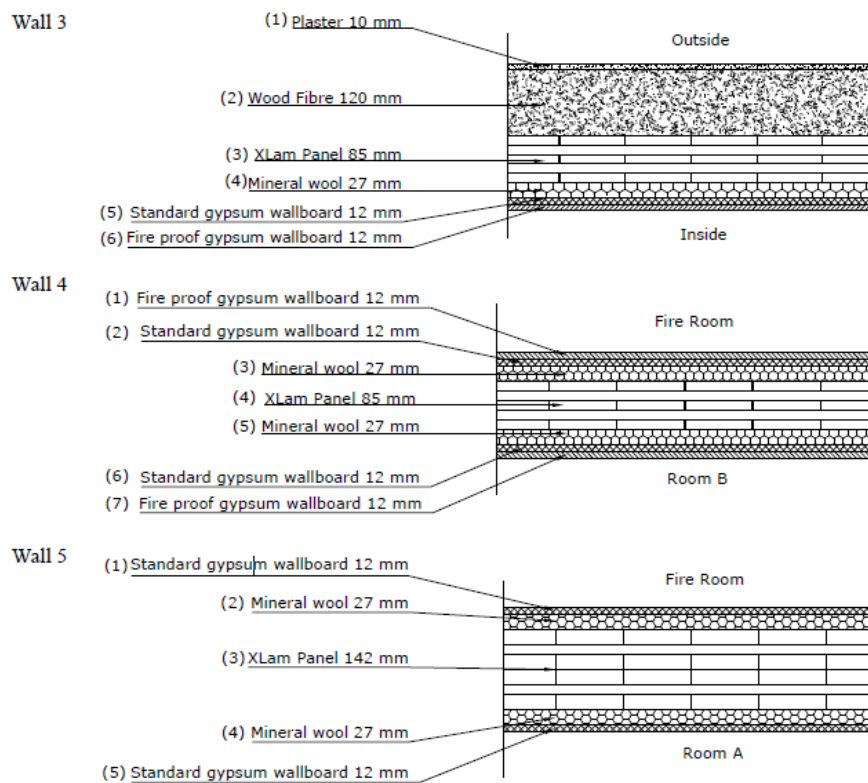
Brannrommet representerte et typisk soverom med to vinduer og en dør, se Figur 18. Hvert vindu hadde åpningsareal på  $1,1 \text{ m}^2$ . For å begrense lufttilførsel var vinduene i brannrommet delvis åpne under brannforsøket. I etasjen over var vinduene lukket.



Figur 18. Planløsning 2. etasje [43]

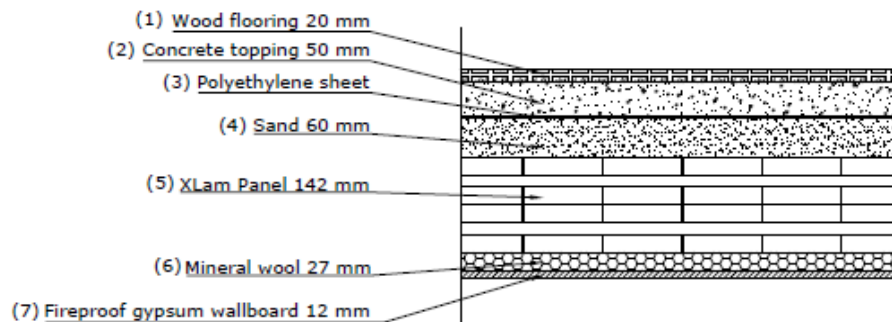
Dør til brannrommet var brannklassifisert som EI 60, og var lukket under forsøket. Omsluttende vegger til brannrommet er betegnet som W3, W4 og W5 besto av krysslaminert trevirke som var beskyttet med 1 eller 2 lag 12,5 mm branngipsplater, eller 12 mm standard gipsplate, og isolert med 27 mm steinull. Massivtre i W3 og W4 var dekket til med 12 mm branngips og 12 mm standard gipsplate og 27 mm steinullisolasjon, mens W5 var beskyttet med 12 mm standard gips. Det er viktig å legge merke til at

branngips var montert utenpå standard gipsplate. Oppbygningen av veggene til brannrommet vises på figuren under.:



Figur 19. Vegger i brannrommet – horisontal snitt [43]

Etasjeskille besto av 142 mm tykk krysslaminert massivtre som var isolert på underside med 27 mm steinullisolasjon og kledd med 12 mm branngips.



Figur 20. Etasjeskille – vertikal snitt [43]

Brannrommet representerte et vanlig soverom og ble innredet med madrasser og trepaller. Gulvet var inkludert i beregning av brannenergien i rommet som ble 790 MJ/m<sup>2</sup> gulvflate.

## Resultater

Det ble observert en langsom brannvekst på grunn av begrenset lufttilførsel til brannrommet, da vinduene var kun delvis åpne. Vinduet i fasade sør startet å falle av etter ca. 20 min, mens vinduet i fasade vest etter ca. 30 min. Samtidig som vinduene fikk mer skade ved brann økte brannens intensitet i rommet og utvendig forbrenning ble mer alvorlig. Vinduene falt fullstendig av etter ca. 36 min.

Temperaturen i brannrommet steg gradvis. Etter 35 min ble temperaturen i rommet ca. 800 °C. Det ble observert raskt temperatur stigning etter 35 min. Dette oppsto da standard gipsplate og isolasjon montert på vegg W5 falt av. På dette tidspunktet ble temperaturen i vegg W5 bak isolasjonen ca. 300 °C. Massivtreet som lå bak ble eksponert og bidro til brannforløpet. Overtenning oppsto 40 minutter etter brannstart. Overskudd på brennbare gasser i rommet førte til en tydelig utvendig forbrenning.



Figur 21: Brannutvikling 32 minutter (venstre) og 40 minutter (høyre) etter brannstart [43]

To gipsplater sammen med isolasjon på vegg W3 og W4 beskyttet trekonstruksjonen i 50 minutter før temperaturen bak isolasjonslaget steg til 300 °C.

Dør til brannrommet sviktet etter 53 min, og røyken spredde seg til andre rom. Avkjølingsfase ble observert etter 55 min, og brannen ble manuelt slokket etter 60 min. Vinduer i overliggende plan hadde ikke sviktet under forsøket. Det ble registrert ingen brann og røykspredning til etasjen over brannrommet. Vertikal avstand mellom vinduer var ca. 2 m.

Frangi et. al [43] konkluderte at brannspredning kan begrenses til ett rom ved bruk av passivbrannbeskyttelse når rommet har få åpninger som begrenser oksygentilførsel og resulterer en langsom brannutvikling. Denne testen viste også at massivtreet, beskyttet med to gipsplater, får relativt små skader.

## 4.6 Hakkarainen (2002)

I en forskningsartikkel i 2002 [44] presenterte Hakkarainen resultater fra tre fullskala brannforsøk utført i et rom av massivtrekonstruksjoner med forskjellige tildekningsmetoder, og et forsøk utført i et rom av

bindingsverk. Rommene hadde innvendige dimensjoner 3,5 m x 4,5 m x 2,5 m, åpningen var 2,3 m x 1,2 m. Variabel brannenergi i rommet var 720 MJ/m<sup>2</sup> gulvareal.

Massivtre i vegger og himling hadde følgende beskyttelse:

Tabell 4: Beskrivelse av tester

Test nr.	Tildekning
1	Ingen, eksponert massivtre
2	Et lag standardgipsplate 12,5 mm
3	Et lag standard gipsplate 12,5 mm, og et lag branngipsplate type F 15,4 mm ytterst.

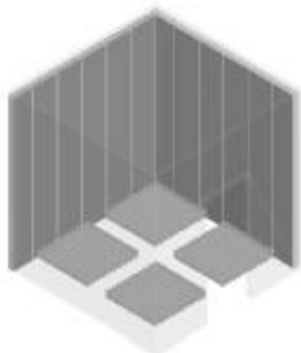
Gasstemperatur ble målt i rommet, og temperatur inne i vegg- og himlingskonstruksjon ble målt for å estimere forkullingshastigheter.

Det ble registrert lave temperaturer i test 1 og 2, for det meste rundt 700 °C. Standardgipsplate i test 2 falt av etter ca. 13 min. Dermed ble resultatene relativt like i disse forsøk. Det ble påstått at brannen var ventilasjonskontrollert. Avkjølingsfase ble ikke observert, brannen ble stoppet etter 50 min på grunn av synlig, overflødig flamme utenfor åpningen. Hakkarainen beregnet at 50 % av forbrenningen foregikk utenfor rommet.

Det ble registrert signifikant forskjell i temperatur i test 3 sammenlignet med test 1 og 2, maksimum ble det registrert rundt 1200 °C. Gipsplater holdt seg gjennom fullstendig brannforløp. Brannen avtok brannen i intensitet og temperaturen ble redusert, noe som tydet på start av en avkjølingsfase. Brannen ble slokket manuelt etter 169 min. Hakkarainen konkluderte at veggen og himlingen ikke bidro til brannen når den var fult utviklet i test 3.

#### 4.7 Hadden et al. (2017)

Hadden et.al. [45] har utført en serie av storskala forsøk for å studere effekt av eksponert KLT på rommets brannodynamikk. Det ble gjennomført fem forsøk med forskjellige kombinasjoner av eksponert trevirke. Rommets geometri var 2,72 m x 2,72 m x 2,77 m. Følgende konfigurasjoner av tildekningsgrad ble brukt:

**Alpha**

**Beta**

**Gamma**

*Figur 22: eksponerte overflater i brannforsøkene [45]*
*Tabell 5: Beskrivelse av forsøkene*

Test navn	Forsøk nr.	Eksponerte treoverflater	Eksponert areal (m <sup>2</sup> )	Tildekning
Alpha	1	To tilstøtende vegger: bakvegg og sidevegg.	15	To lag med 12,5 mm branngips
	2			To lag branngips 12, 5 mm og hulrom isolert med steinull 50 mm.
Beta	1	Bakvegg og himling	14	To lag branngips 12, 5 mm og hulrom isolert med steinull 50 mm.
	2			
Gamma	1	Bakvegg, sidevegg og himling	22	To lag branngips 12, 5 mm og hulrom isolert med steinull 50 mm.

KLT hadde tykkelse 100 mm og besto av fem lameller på 20 mm. Dør med dimensjoner 1,84 x 0,76 m<sup>2</sup> ble benyttet som åpning for ventilering. Trekrybber ble benyttet som initierende brannenergi. Det ble valgt en liten mengde av brannenergi 132 MJ/m<sup>2</sup>, men tilstrekkelig for å få overtenning i rommet. Hensikten med dette var å få en fullstendig forbrenning av variabel brannenergi på en kort tid, for da kunne undersøkes om eksponerte massivtreoverflater har evne til å opprettholde forbrenning og selvslukking.

I forsøk Alpha 1 ble overtenning observert etter 4,56 min med varmeavgivelse 1709 kW. Rett etter overtenning har varmeavgivelsen økt til 5300 kW etter 6,27 min. Etter hvert ble varmeavgivelsen redusert til ca. 2200 kW etter 31,7 min. Videre begynte HRR å øke gradvis, etter 43,5 min ble registrert overgang til ventilasjonskontrollert brann med flammer utenfor åpningen. HRR hold seg under

stasjonære forhold på 4000 kW fram til brannen ble manuelt slokket etter 61,3 min. Gipsplatene falt av under brannforløpet, dermed var beskyttet trevirke involvert i brannen.

Tildekning i Alpha 2 holdt seg gjennom hele brannforløpet, ingen eksponert treoverflater ble observert. Maksimal temperatur bak tildekningen var målt 70 °C. Forløpet tilnærmet lik med Apha 1. Avkjølingsfase varte til 32,4 min da HRR har oppnådd sitt minimum på 2000 kW, og gradvis begynte å øke igjen opp til 3500 kW. Brannen ble manuelt slokket etter 60 min.

Beta-1 hadde lengst tid til overtenning som oppsto etter 8,6 min. Som følge av overtenning økte HRR til 6200 kW, og videre ble gradvis redusert. I mindre deler av rommet ble selvsløkking registrert. Forkulling ble begrenset til første lamell.

Overttenning i beta-2 oppsto etter 4,2 min, og maks. HRR 5200 kW registrert etter 7,8 min. Etter hvert ble varmeavgivelse gradvis redusert og etter 19,6 min ble 1800 kW. En slik reduksjon medførte en skarp økning i varmeavgivelse til 3900 kW etter 26 min som bel igjen redusert til 1500 kW etter 40,5 min, og videre økt igjen til 3600 kW etter 49,3 min. Brannen ble slokket manuelt etter 62,5 min.

Gamma-2 hadde mest eksponert areal blant forsøkene. Overttenning oppstå etter 5,4 min, og maks. HRR 6700 kW etter overtenning. HRR ble skarp redusert, og etter 21, 3 min var 3700 kW. Resten av tiden var HRR mellom 3100 - 4000 kW. Brannen ble manuelt slokket etter 78 min.

*Tabell 6: Resultater fra forsøkene*

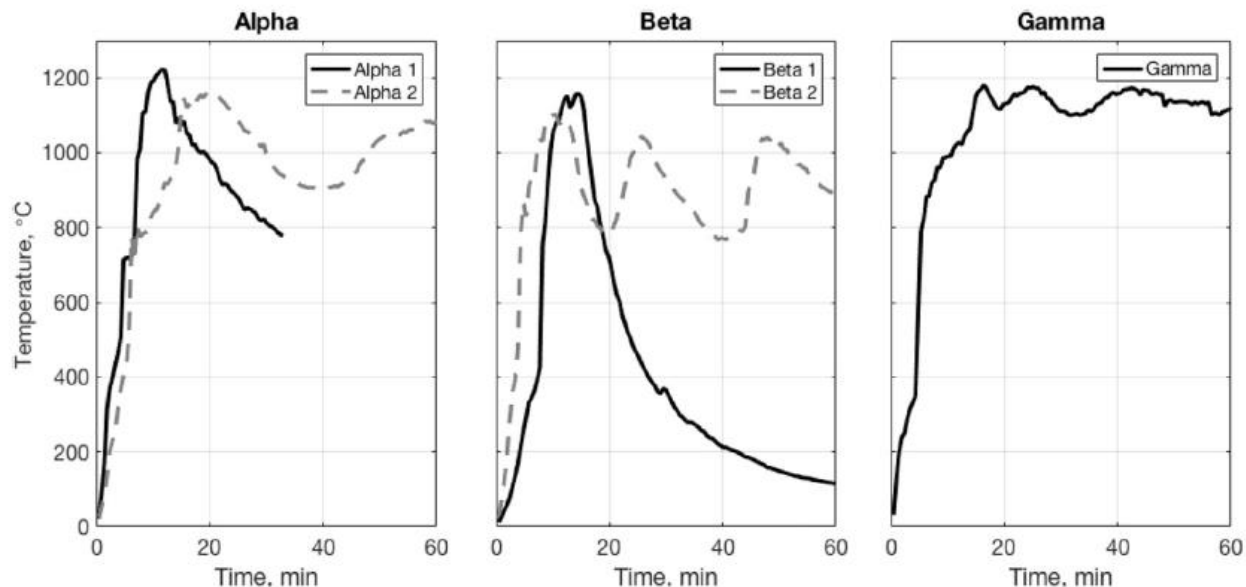
Test nr.:	Tid til overtenning (min)	Total HRR (kW) ved overtenning	Tid til maks HRR (min)	Maks. total HRR	Maks. forkullingsdybde etter 60 min
Alpha-1	4.56	1709	6.27	5267	53
Alpha-2	5.13	1448	5.50	4677	53
Beta-1	8.55	1551	8.75	6213	11
Beta-2	4.23	1463	7.78	5248	44
Gamma-1	5.35	1171	5.55	6679	58

Tid til overtenning i alle tester var omkring 5,0 min, unntatt Beta-1. THRR varierte mellom 1171 – 1709 kW med liten avhengighet til eksponeringsgrad av trevirke.

Økt eksponert areal av trevirke medførte raskere forbrenning av trekrybber. Forfatteren konkluderte at årsaken til dette var varmestråling fra brennende treoverflater mot trekrybber.



Temperatur i forsøkene fulgte samme trenden som HRR, maksimum gjennomsnittstemperatur målt i alle forsøkene ble 1174 °C, se Figur 23. Forfatteren konkluderte at brennbare overflater påvirker temperatur i rommet i liten grad.



Figur 23: Temperatur i rommet var målt 220 cm over gulv

Sammenheng mellom forkullingsdybde og temperatur i rommet viste at rom med høyere gjennomsnittstemperatur hadde dypere forkulling.

Det ble oppdaget betydelig forskjell i forkullingsdybde mellom Alpha og Beta. I test Beta-1/2 ble det registrert lavere forkullingsdybde i himlingen. Dette ble begrunnet med lavere oksygenkonsentrasjon under himlingen, og dermed saktere pyrolyse.

Det ble registrert følgende mekanismer som forhindrer selvsløkking:

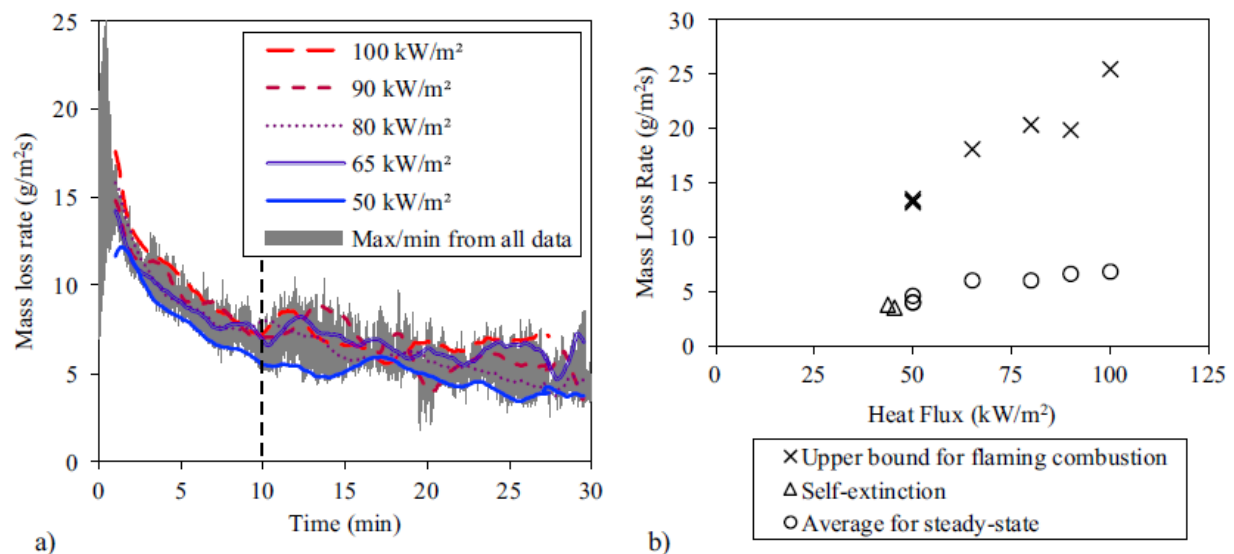
- Når forkullet lag falt av ble nytt, ferskt trevirke eksponert. HRR ble økt. HRR forble en funksjon av området som falt av og tykkelse av lamell.
- Pyrolyse foregikk med høy hastighet da kritisk varmestråling ( $>30 \text{ kW/m}^2$ ) ble oppretthold mellom veggens overflater. HRR var en funksjon av tilgjengelig oksygen for å opprettholde pyrolyse.
- Tap av integritet av tildekningen medførte at flere overflater ble eksponert.

Det ble observert selvsløkking i test Beta-1 med eksponert himling og bakvegg. Selvsløkkingen var svært avhengig av forkullet lag som holdt under avkjølingsfase. Selvsløkking i andre tester var ikke registrert.

#### 4.8 Emberley et al. (2017)

I en artikkel beskriver R. Emberley et al. [46] resultater fra storskala forsøk i et rom konstruert av KLT. Veggene var tildekket med gipsplater unntatt en vegg og himling som var eksponert. Variabel brannenergi i rommet ble begrenset til 80 kg trekrybber som var tilstrekkelig for å oppnå overtenning og stasjonære forhold ved forbrenning av eksponerte overflater. Ventilasjonsåpning ble tilpasset slik at maksimal temperatur oppnås i rommet. Da trekrybber var utbrent ble det registret hurtig avkjøling av KLT og selvslukking.

Parallelt med storskala forsøk ble det utført småskala forsøk, hvor prøvestykke ble usatt for varmestrålingsfluks fra 50 kW/m<sup>2</sup> til 100 kW/m<sup>2</sup>. Prøvestykke hadde overflate 120 x 120 mm<sup>2</sup>, og besto av massivtre av fem lameller med tykkelse 45 x 20 x 20 x 20 x 45 mm. Massetapsrate fra et prøvestykke ble målt ved hjelp av konkalorimeter. Resultatene viste at antennelse inntreffer raskere ved høy varmestrålingsfluks, og maks massetapsrate oppstår i tidlig oppvarmingsfase, se Figur 24. Etter hvert ble massetapsrate redusert. Dette var på grunn av dannelse av forkullet lag. Reduksjon av massetapsrate i tidlig fase foregikk forttere i forsøk med høyt varmestrålingsfluks, noe som tyder på raskere dannelse av forkullet lag. Det ble konkludert at massetapsrate var stabil etter ca. 10 min. Figur 24 b) viser maks og stabilisert massetapsrate ved utsettelse mot forskjellig strålingsintensitet.

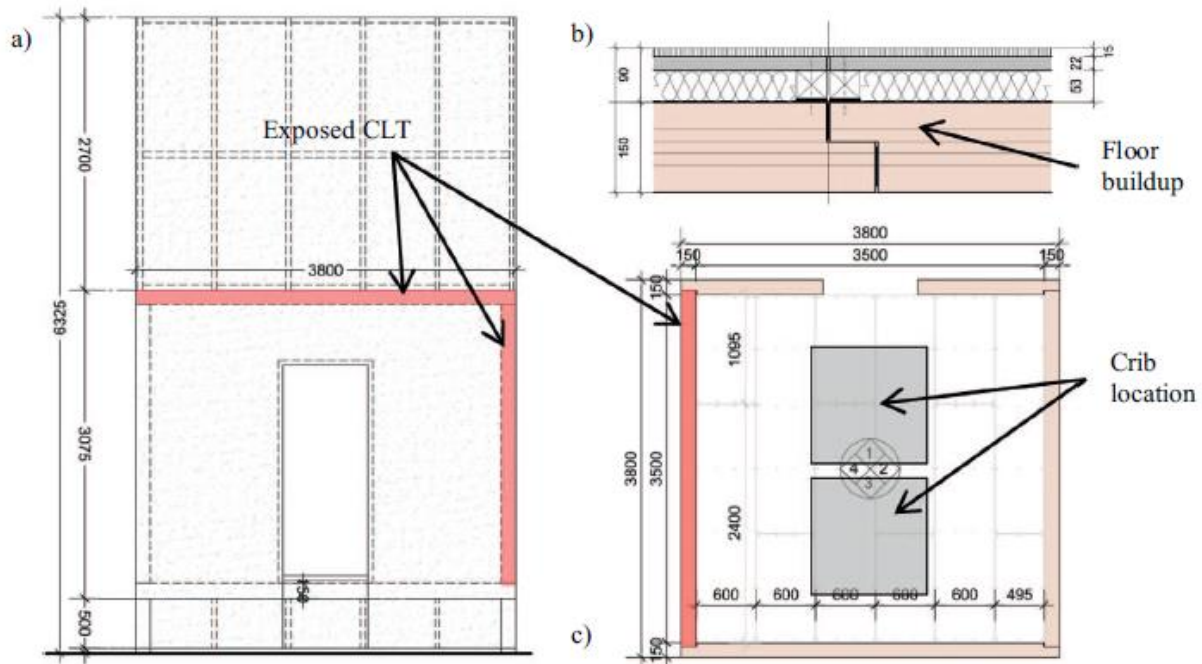


Figur 24: Massetapsrate fra trevirke eksponert mot varmestrålingsfluks [46]

Kritisk massetapsrate for å opprettholde flammene ble målt som  $3,7 \pm 0,2$  g/m<sup>2</sup>s og kritisk varmestrålingsfluks  $45 \pm 1$  kW/m<sup>2</sup>.

Stor-skala forsøk ble utført i et rom med dimensjoner 3,5 x 3,5 x 2,7 m<sup>3</sup>. Rommet ble ventilert gjennom en typisk døråpning 0,85 x 2,1 m<sup>2</sup>. KLT besto av lameller med tykkelse 40 x 20 x 20 x 20 x 45 mm. En vegg og himling i rommet var eksponert. Øvrige vegger var beskyttet med branngips 2 x 13 mm.

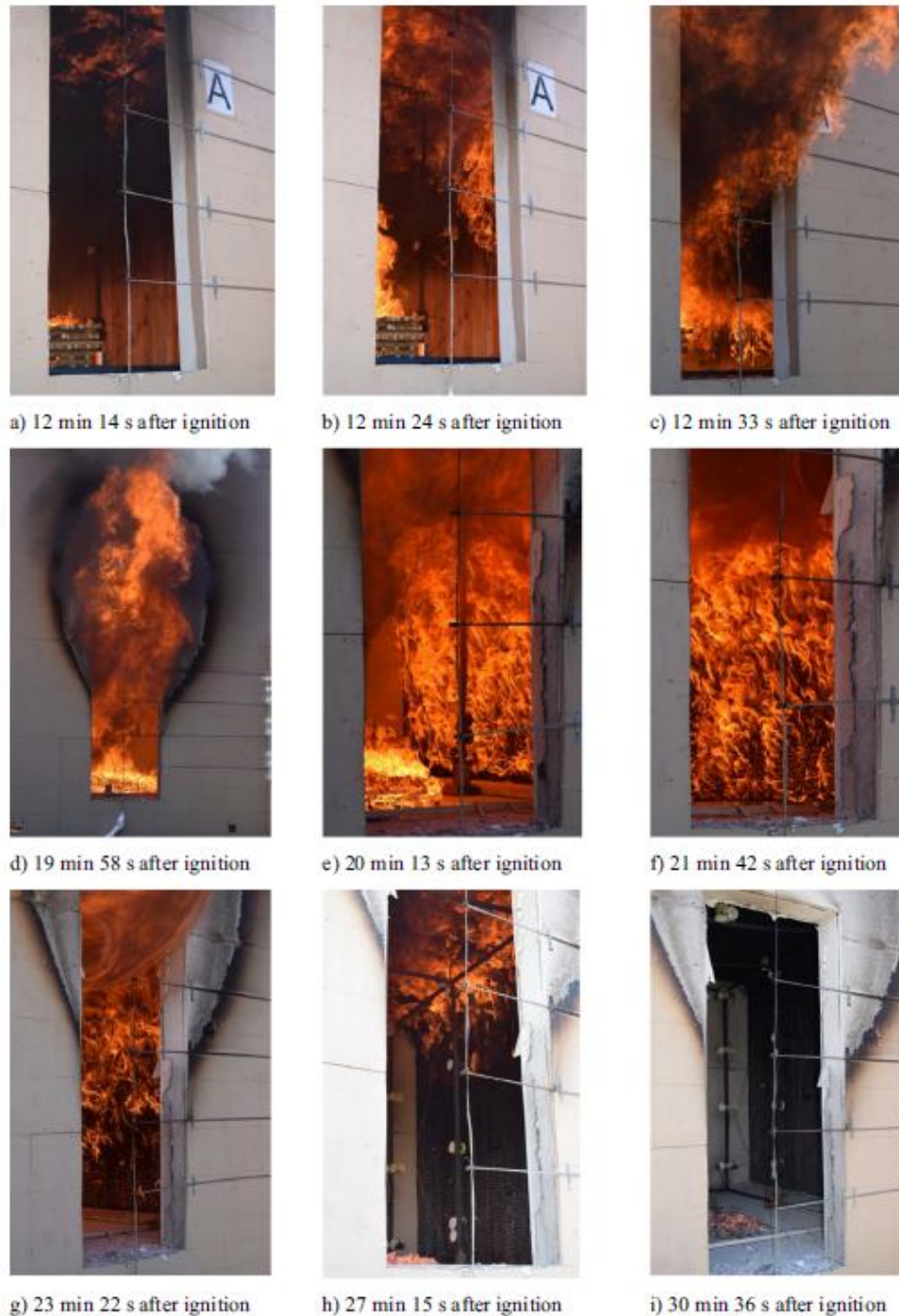
For å simulere flere etasjer ble frontfasade utvidet med 2,7 m oppover, og tildekket med 2x13 mm branngips. Termoelementer og TSCs (Thin Skin Calorimeters) var plassert både innvendig og utvendig.



Figur 25: fasade, plan tegning og vertikalsnitt av gulvet [46]

Gjennom visuelle observasjoner, temperatur og varmeavgivelsesmålinger ble følgende registrert:

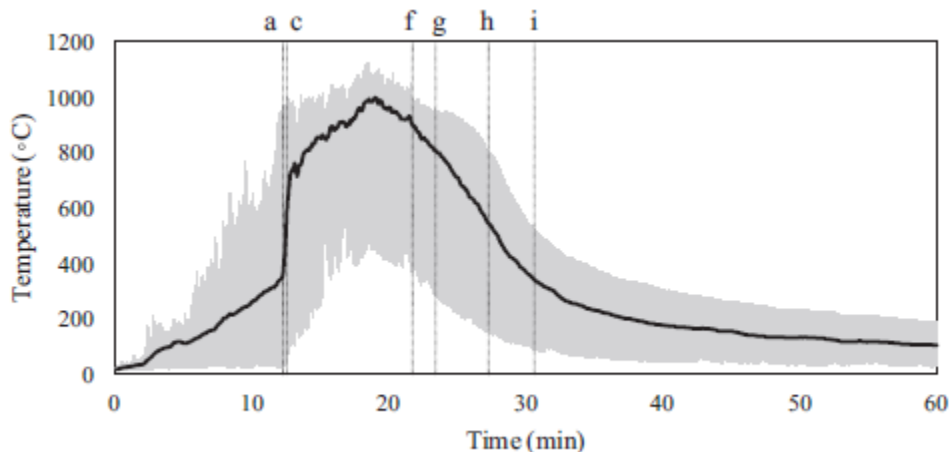
- a) Antennelse av himlingen etter 12 min 14 s;
- b) Hurtig flammespredning nedover av eksponert KLT vegg etter 12 min 24 s;
- c) Flammen har spredt seg til KLT vegg etter 12 min 33 s.
- d) Helle rommet er involvert i brannforløpet etter 19 min 58 s;
- e) Visuell reduksjon av flammer i KLT vegg etter 20 min 13 s;
- f) Bemerkelsesverdig reduksjon av flammelengde på KLT vegg etter 21 min 42 s;
- g) Signifikant reduksjon av flammer etter 23 min 22 s;
- h) Flammer observert kun lokalt i himlingen og på toppen av KLT vegg etter 27 min 15 s;
- i) Flammene selvslokker etter 30 min 36 s;



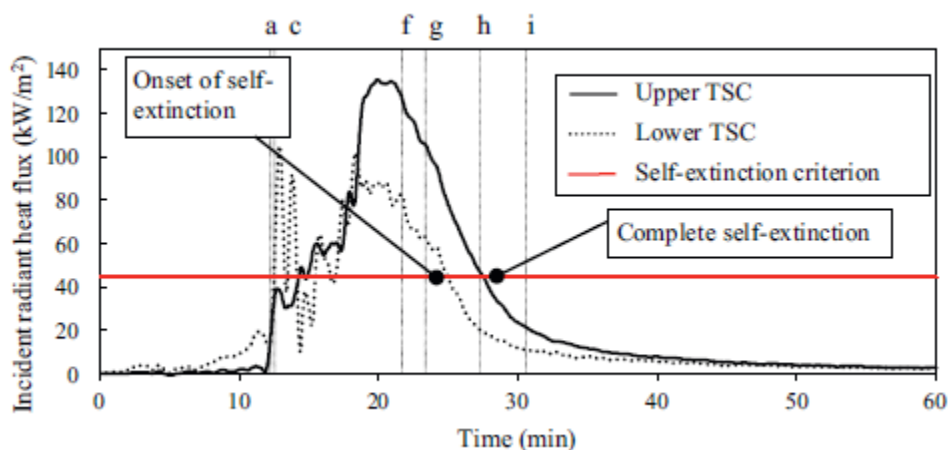
Figur 26: Bilder av brannforsøket viser forskjellige faser [46]

Passiv brannbeskyttelse opprettholdt sin integritet i løpet av brannforløpet og selvsløkking oppsto.

Brannforløpet i rommet har gått gjennom alle fasende fra antennelse til avkjøling, se Figur 27. Etter 63 min falt gjennomsnittstemperatur i rommet under 100 °C, etter 126 min var temperaturen i under 50 °C, og 26 °C etter 5 timer 32 min.



Figur 27: Gjennomsnittstemperatur i løpet av 60 min [46]



Figur 28: Måling av varmestrålingsfluks øverst og nederst i rommet [46]

Varmestrålingsfluks lavere enn  $45 \text{ kW/m}^2$  medførte at selvsløkking av flammer oppsto innen 30 s. Dette stemte overens med resultatene fra småskala forsøk. Selvsløkking startet først i nederste delen av KLT vegg og utviklet seg sakte oppover til dekke.

Observert forkullingsdybde var ca. 20 mm. Avløsning (debonding) av forkullet lag eller lameller ble ikke observert. Første lamell hadde tykkelse 45 mm. Delaminering ble ikke observert. Det ble konkludert at hvis avløsning av lameller eller av det forkullede laget kan minimaliseres kan selvsløkking oppnås i løpet av stabil forbrenning av KLT.

## 4.9 Oppsummering av resultater

For å etablere en god oversikt over resultatene fra litteraturstudie oppsummeres alle resultatene i Tabell 7. Det som er verdt å nevne er gulvareal, tildekningsmetoder, åpningsfaktor, initierende brannenergi i brannrommet, tid til overtenning, varmeavgivelses- og forkullingshastighet. For å beregne åpningsfaktor benyttes formel for ikke standard brannforløp angitt i SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [47]:

$$A_0 * \frac{\sqrt{H_0}}{A_t}$$

hvor  $A_0$  er åpningens areal,  $H_0$  er høyde til åpningen og  $A_t$  er areal av omhyllingsflate.

Tabell 7: Oppsummering av data fra forsøkene

Forfatter	Test navn i referanse	Gulv (m <sup>2</sup> )	Tildekning / kledning	Vent. faktor	Variabel brann-energi (MJ/m <sup>2</sup> )	Tid til overtenning (min)	HRR (gjennomsnitt) (MW)	Forkullings-hastighet gjennomsnitt (mm/min)	Varighet (min)
Li et al.	Fully protected	15,75	2 x 12,7 mm branngips	0,042	533	7,30	4,0	-	53
	Fully unprotected	15,75	Ingen tildekning. Massivtre er eksponert	0,042	529	5,0	7,1	0,85	40
	Test 1	15,75	2 x 12,7 mm branngips 20 m <sup>2</sup> (27,9 %) eksponert tilstøtende overflater	0,042	532	4,0	4,8	0,69	120
	Test 2	15,75	2 x 12,7 mm branngips 22,5 m <sup>2</sup> (31,5 %) eksponerte motstående overflater	0,042	532	5,0	6,3	0,77	56
	Test 3	15,75	2 x 12,7 mm branngips 11,25 m <sup>2</sup> (15,7 %) eksponert sidevegg	0,042	532	6,0	4,4	0,71	81
Kolaitis et al.	-	4,93	2 x 12,5 mm branngips	0,015	420	-	-	-	49
Fragni et al. 2005	BU nbb	18,04	18 mm standard gips	0,041	234	6,0 -7,0	-	-	-
	BU bb	18,04	18 mm OSB	0,041	211	4,0	-	-	-
Fragni et al. 2008	-	11,16	12 mm standard gips + 12 mm branngips En vegg med 12 mm standard gips + isolasjon	0,032	790	35,0	-	-	-

Hakkarainen 2002	Test 1	15,75	Ingen	0,042	900	4,50	-	0,8	50
	Test 2	15,75	12,5 mm gips type A	0,042	900	4,30	-	0,6 (himling)	46
	Test 3	15,75	12 mm gips type A og 15,4 mm branngips	0,042	900	6,0	-	-	169
Hadden et al.	Alpha-1	7,4	2 x 12,5 branngips; 15 m <sup>2</sup> eksponert KLT	0,043	132	4,56	-	0,86 <sup>a</sup>	60
	Alpha-2	7,4	2 x 12,5 branngips + 50 mm steinull 15 m <sup>2</sup> eksponert KLT	0,043	132	5,13	-	0,86 <sup>a</sup>	60
	Betta-1	7,4	2 x 12,5 branngips + 50 mm steinull 14 m <sup>2</sup> eksponert KLT	0,043	132	8,55	-	-	-
	Betta-2	7,4	2 x 12,5 branngips + 50 mm steinull 14 m <sup>2</sup> eksponert KLT	0,043	132	4,23	-	0,73 <sup>a</sup>	60
	Gamma-1	7,4	2 x 12,5 branngips + 50 mm steinull 22 m <sup>2</sup> eksponert KLT	0,043	132	5,35	-	0,96 <sup>a</sup>	60
Emberley et al.	-	12,25	2 x 13 branngips 21,7 m <sup>2</sup> (15,1 %) eksponert KLT en vegg og himling.	0,042	111 <sup>b</sup>	12 <sup>c</sup>	-	-	332

<sup>a</sup> - forkullingshastighet er beregnet fra registrert forkullingsdybde og testvarighet. Resultatet representerer ikke gjennomsnittsforkullingshastighet, men vil dog være høyere enn gjennomsnittsverdi i disse forsøkene.

<sup>b</sup> -brannenergi er beregnet forutsatt effektiv forbrenningsvarme 17 MJ/kg for trevirke [13].

<sup>c</sup> - tid til overtenning observert fra grafer og bilder [46].



## 5. Risikovurdering

Som en del av oppgaven utføres en casestudie med en risikovurdering av brannsikkerhet i en høy boligblokk med 8 etasjer bygd av massivtre, med eksponerte treoverflater i leiligheter/boenheter.

Risikovurderingen omfatter risikoanalyse og risikoevaluering [37]. Risikoanalysen og risikoevalueringen utføres i henhold til standard NS-EN 3901:2012 Risikovurdering av brann i byggverk [32].

Kapittelinnholdingen i NS 3901 følges, unntatt enkelte kapitler som gjelder mandat, organisering og datagrunnlag. Disse beskrives generelt, siden analysen ikke er knyttet til et spesifikt prosjekt.

### 5.1 Datagrunnlag for analyse

Analysebyggverk er en boligblokk med 8 etasjer som skal bygges med bærende konstruksjoner av massivtre. I dette kapitlet beskrives tiltak som kan benyttes i analysebyggverket, brannstatistikk og pålitelighet til ulike aktive og passive brannsikringstiltak som videre benyttes i risikoanalysen.

#### 5.1.1 Vurdering av kompenserende tiltak

Litteraturstudie indikerer på at brannforløpet ikke vil gå i avkjølingsfase når massivtre er eksponert. I følge Li [38] vil brannen gå i avkjølingsfase når andel av eksponert massivtre er maks 15 % av omhyllingsflate. Emberley [46] og Hadden [45] påpeker at når varmestrålingsfluks og temperatur i brannrommet reduseres vil flammene selvslukke på eksponerte deler av massivtre selvslukkes. Disse forholdene kan oppstå i avkjølingsfase når all variabel brannenergi er konsumert. Derfor kan man si at det er tilstrekkelig med tiltak som kan beskytte massivtre fram til avkjølingsfase. Forsøkene beskrevet av Li [38] og Hakkarainen [44] viser at tildekning av massivtre med 2 x 12,7 mm branngipsplater, eller 12 mm standardgips + 15 mm branngips kan være tilstrekkelig for å hindre at massivtre blir involvert i brannforløpet i rom med normal brannenergi (>400 MJ/m<sup>2</sup> omhyllingsflate). Tildekning av massivtre er en av tiltakene som kan benyttes.

Som litteraturstudie tilsier vil tildekning med branngipsplater være en veldig effektiv løsning for beskyttelse av massivtre. Denne løsningen er lite fleksibel, da alle brennbare konstruksjoner må tildekkes. Når man velger denne løsningen vil analysen være av begrenset omfang og liten kompleksitetsgrad, fordi byggverket er sprinklet og alle brennbare overflater av massivtre er tildekket. Derfor velges det å vurdere alternative kompenserende tiltak i risikoanalysen.

Oppbygging av etasjeskillere og vegger er avhengige av lydkravene i tillegg til brannmotstand. For å tilfredsstille lydkravene må etasjeskillere av massive trekonstruksjoner ha en tilleggskonstruksjon på over eller underside, eller på begge sider. Disse løsningene består ofte av mineralull 50-150 mm og 2x13 mm gipsplater [48]. For å redusere bidraget til brannforløpet bør løsninger med tilleggskonstruksjon på underside prioriteres. Løsningen med 2 x 13 mm og 100 mm steinull kan håndtere både brann og lydkravene. Basert på småskala forsøk utført av Hasburgh et al. [39], vil 16 mm branngipsplate kombinert med 100 mm steinull beskytte mot forkulling i 70,7 min ved temperaturutvikling etter standardbrannkurve. Ifølge addisjonsmetoder [47] kan to vanlige 13 mm gipsplater beskytte en

konstruksjon like bra som en 16 mm branngipsplate type X. Derfor kan det antas at tilleggskonstruksjon med 100 mm steinull og 2 x 13 mm standard gipsplater kan beskytte etasjeskille av massivtre i 70 min mot forkulling når temperaturen utvikler seg i henholdt til standardbrannkurve. Det vurderes å være konservativ å anta at i naturlig brannforløp kan tilleggskonstruksjonen beskytte etasjeskille av massivtre mot forkulling minst i 30 minutter.

For å oppfylle lydkravene mellom boenheter må vegg av massivtre ha tilleggskonstruksjon på en av sidene. Dette kan f.eks. være en frittstående gipsplatevegg med 2x13 mm gipsplater, 70 mm stålstendere og 70 mm steinull [49]. Ved å sammenligne denne løsningen med forsøkene utført av Hasburgh et al. [39] antas det at massivtrevegg vil være beskyttet mot forkulling minst i 30 min ved naturlig brannforløp. Beskyttelsestiden er redusert fordi i forsøkene av Hasburgh et al. benyttes standardbrannkurve som har lavere påkjenningsstemperatur enn temperatur ved naturlig brannforløp i brannrommet. Det forutsettes å være konservativ å anta at 2 x 13 mm og 70 mm steinull vil beskytte konstruksjonen minst i 30 min.

Tiltakene med tildekning av massivtre med tilleggskonstruksjonen for å oppfylle lydkravene vil ha en positiv bivirkning for brannsikkerhet. Tilleggskonstruksjonen vil begrense bidraget fra massivtre til brannen i første 30 minuttene. Tiltaket vil dekke kun 2/5 del av overflater i en branncelle (vegg mot nabo på en side og etasjeskille). Mye av massivtre i en branncelle vil fortsatt være eksponert.

I en masteroppgave utført av Roenquist [50] ble det oppsummert hvilke kompenserende tiltak benyttes mest i høye trehus i Norge. Følgende tiltakene er avdekket:

- Slokkeanlegg i henholdt til NS-EN 12845 istedenfor boligsprinkler i henholdt til NS-INSTA 900.
- Ekstra vannforsyning for sprinkleranlegg.
- Bruk av gipsplater for å tildekke synlige treoverflater.
- Bærende konstruksjoner med høyere brannmotstand enn preaksepterte ytelser.
- Bruk av hulromsventiler for å redusere fare for vertikal brannspredning i hulrom.
- Krav til vertikal avstand mellom vinduer i ulike plan for å hindre brannspredning.

Høye boligblokker i Norge utføres med automatisk slokkeanlegg i form av boligsprinkler som har høy pålitelighet. Forskjellige studier om pålitelighet av sprinkleranlegg tyder på at sprinkleranlegget vil fungere etter forutsetningene i 90 - 97 % tilfeller [35], [51].

Scenario med svikt av sprinkleranlegg, samt mislykket brannvesenets innsats kan medføre konstruksjonskollaps. Spørsmålet er, hvor sannsynlig er det at automatisk slokkeanlegg, samt slokkeinnsats av brannvesenet svikter? Sannsynligheten for dette scenarioet kan reduseres ved å forbedre pålitelighet til automatiske slokkeanlegg, og forbedre tilgjengelighet av byggverket til brannmannskapet. Dette vil også redusere konsekvenser for mennesker ved brann.

Med forbedring av tilgjengelighet av byggverket til brannmannskapet menes det at byggverket må plasseres i urbane strøk hvor brannvesen har kasernert vakt, utrustet med stigebil, og området har sikker slokkevanttilførsel. Innsatstiden bør også være innenfor 10 min.

Pålitelighet av sprinkleranlegg med tanke på verdisikkerhet kan forbedres ved å prosjektere etter en standard NS-EN 12845 med tillegg F [50]. Standarden med tillegg F setter høyere krav til vannforsyning, vanntetthet, og dekningsgrad enn INSTA 900-1 boligsprinkler som i dag benyttes i boligbyggverk [52]. For

å ivareta personsikkerheten i samme grad som boligsprinkler, bør anlegg prosjektert etter NS-EN 12845 utstyres med hurtigtgløsende (QR-quick response) sprinkler.

I de tilfellene når brannvesenet ikke klarer å slokke en brann innenfor 90 minutter kan dette medføre en lokal eller fullstendig kollaps av byggverket. Derfor må personer i byggverk må ha en sikker rømningsvei. I byggverk inntil 8 etasjer er det er preakseptert å ha et trapperom type Tr 1, hvor boenheter har direkte tilgang til trapperommet [11]. Brann i en av boenhetene med åpen dør til trapperommet, eller røyklekkasje gjennom døren kan hindre bruk av trapperommet for personer i hele byggverket. Redningsmannskapet har da begrenset tid til redning, samt slokking før bærende konstruksjoner svekkes og medvirker byggverkets stabilitet. Dermed kan det være aktuelt å utforme trapperommet med en ekstra barriere. Trapperom type Tr 2 [11] med en sluse/korridor foran selve trappesjakten, og en selvlukkende dør til trapperom har bedre utforming, og kan i høyere grad ivareta personsikkerheten i trappesjakt.

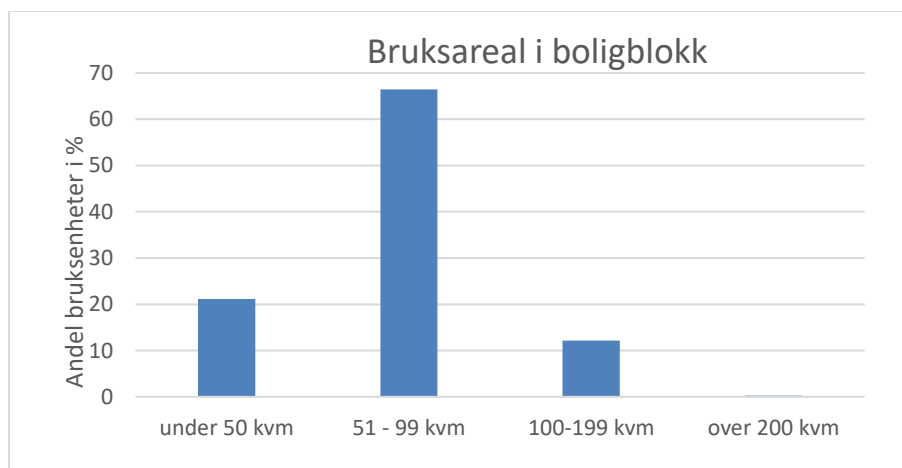
Kompenserende tiltak som vil benyttes i analysen oppsummeres fra ovennevnte:

- Forbedret sprinkleranlegg prosjektert etter NS-EN 12845 og tillegg F i denne standarden.
- Tilleggskonstruksjon dekker minimum 2/5 del av massivtre i en branncelle.
- Trapperom type Tr 2 istedenfor Tr 1.
- Kasernert brannvesen og innsattstiden er mindre enn 10 min.

### 5.1.2 Bruttoareal og antall boenheter

Statistisk Sentralbyrå (SSB) angir statistikk for antall boenheter i boligblokker og størrelse av dem. Denne statistikken kan benyttes for å vurdere et realistisk analysebyggverk og antall boenheter i bygget.

66,5 % av boenheter i boligblokker har et bruksareal mellom 50-99 kvm, 21,2 % har et bruksareal på under 50 kvm, og 12,1 % har et bruksareal på 100-199 kvm, og mindre enn 0,2 % har et bruksareal på over 200 kvm [53]. I figur 31 presenteres statistisk data fra 2017. Denne statistikken kan benyttes for å vurdere antall leiligheter i analysebyggverket.



Figur 29. Diagrammet viser antall bruksenheter med forskjellig BRA i boligblokk.

### 5.1.3 Menneskelig atferd ved brann

Menneskelig atferd ved brann i byggverk er svært avhengig av valgene de selv tar. Regelverket sørger for at boligbyggverk skal ha brannalarmanlegg slik at beboere får tidlig varsling ved brann i byggverk [11]. Men dette kan ikke garantere at alle beboere tar en beslutning om å evakuere ved brannalarm.

Rømningstid fra byggverket ved brann er avhengig av flere faktorer, mens følgende påvirkes av menneskelig atferd:

- Reaksjonstid og forflytningstid;

Reaksjonstid er tiden det tar for en person å oppfatte varslingen, ta en beslutning og starte evakuering. Reaksjons- og forflytningstid er situasjonsavhengig, samtidig kan tiden påvirkes av planløsning, type brannalarm, ledesystem, personegenskaper, organisatoriske forhold, lengde på rømnings- og fluktvei. I tilfeller når en person eller flere personer ser en brann vil reaksjonstiden være 1 min [54]. I andre tilfeller forutsetter man at reaksjonstid er den tiden når brannalarm varsler alle [54]. For å varsle alle ved brann må en røykdetektor først registrere røykpartikler, eller alle kan varsle ved hjelp av manuell melder. I en leilighet med vanlig takhøyde (2,4 m) vil en røykdetektor oppdage røykutvikling etter 1 min [55]. Brannalarm utløst i leiligheten som ikke er kvittert ut i løpet av 2 min varsler alle beboere i byggverket [11]. Det vil si at det vil ta ca. 3 min etter brannstart i en leilighet før alle blir varslet. Reaksjonstid ved en brannalarm om natten kan ta flere minutter.

Når en rømningsvei fylles med røyk, reduseres sikt lengden, konsentrasjon av giftige gasser økes og kan være dødelig, men evakuering ved røykfylte rømningsveier er ikke uvanlig. Dette er en av årsakene til at flere omkomne blir funnet utenfor boenheten. I følge en analyse av dødsbranner i Norge er 6 % av de omkomne blitt funnet utenfor boenheten [56].

Røyk i rømningsveien stopper ikke mennesker til tross for kunnskap om røykens giftighet. Når sikten i rømningsvei reduseres til 3 meter, reduseres også sannsynlighet for at en person vil benytte rømningsveien [57]. I et slikt scenario kan mennesker ende opp med å være inne i bygget istedenfor å rømme via røykfylte rømningsveier.

### 5.1.4 Antall omkomne ved brann

I en rapport utført av RISE [56] ble antall dødsbranner analysert i perioden mellom 2005 og 2014. Det ble registrert 517 dødsbranner og 571 omkomne. 31 % av omkomne er beboere i blokk/leilighet, mens 54 % omkommer i enebolig, 15 % i andre typer småhus. I boligblokker bor ca. 16,7 % av befolkningen, så dødsbranner i boligblokker er overrepresentert [58].

Dødsbranner oppstår hyppigst på stue 37 %, kjøkken 18,8 % og soverom 12,7 %. Antall personer som omkommer mest ved en brann er dokumentert fra politirapportene. Statistikken viser at dødsbranner oppstår oftest når det kun er en person tilstede, 71,1%. I en dødsbrann omkommer vanligvis 1 person i 92,6 % av tilfellene, 2 personer i 5,7 % av dødsbranner [56].

Tabell 8: Statistikk over dødsbranner. Data hentet fra [56]

<b>Antall personer tilstede</b>	1 pers. 71,1 %	2 pers. 15,2 %	3 pers. 5 %	≥4 8,7 %
<b>Antall omkomme</b>	1 pers. 92,6 %	2 pers. 5,7 %	3 pers. 1,2 %	>4 pers. 0,5 %
<b>Omkommet funnet</b>	Arnestedsrom 40,1 %	Naborom til arnested 11,3 %	Annet rom i boenhet 42,7 %	Utenfor boenhet 5,9 %

Største årsaken for dødsbrannene var åpen ild i 39 % av tilfellene, 24 % ukjent, 14 % feil bruk og 11 % elektrisk årsak [56].

I 2017 har DSB registrert 26 omkomne i brann, som er laveste antallet siden 1979, mens antall personer med fysiske skader var 472. Verdien av et statistisk liv (VSL) i Norge var foreslått 30 mill. kroner i 2012 [57].

Antall bygningsbranner som brann- og redningsvesenet rykket ut til, var 3061, og 2112 av dem var branner i bolig [58]. 26 omkomne i boligbranner utgjør frekvens å omkomme i en bygningsbrann på 1,2 % i 2017.

Sannsynlighet for at en tilfeldig person ville omkomme i brann i 2017 er tilnærmet lik:

$$\frac{\text{antall drept}}{\text{antall eksponert}} = \frac{27}{5\,312\,343} \approx 5,08 \times 10^{-6}$$

Resultatene betyr at av 1 000 000 tilfeldig valgte personer, vil i gjennomsnitt 5 omkomme i brann pr. år.

### 5.1.5 Brannfrekvens

Det benyttes data fra Statistisk Sentralbyrå (SSB) [53] for å beregne brannfrekvens i boligbyggverk for siste 3 år. SSB deler ikke statistikken for branner mellom boligblokk og småhus, men angir generelt for boligbyggverk.

Tabell 9: Antall boligbranner og frekvens for antall branner pr. bolig

	2015	2016	2017	Gjennomsnitt antall branner pr. boligbygg/år
<b>Antall boliger i Norge</b>	2456304	2485353	2515589	7,31 x 10 <sup>-4</sup>
<b>Antall boligbranner</b>	1796	1827	1831	

Dette betyr at i en gruppe av 10 000 tilfeldig utvalgte boligbyggverk, vil i gjennomsnitt i 7,31 brenne pr. år.

### 5.1.6 Aktive og passive brannsikringstiltak

Boligblokker med inntil 8 etasjer skal ifølge veiledningen om byggteknisk forskrift utstyres med følgende aktive og passive brannsikringstiltak [11]:

- Brannalarmanlegg;
- Sprinkleranlegg;
- Branncellebegrensende konstruksjoner og dører;
- Manuelt slukkeutstyr;
- Røykventilasjon av trapperom;
- Ledesystem;
- Ett trapperom i byggverk inntil 8 etasjer hvor fasade er tilgjengelig for brannmannskapet, og to trapperom i tilfeller hvor fasadene ikke er tilgjengelige.

#### **Brannalarmanlegg**

Brannalarmanlegg består av flere røykdetektorer plassert i hver boenhet og tilkoblet til en brannsentral. Ved røykdeteksjon i en boenhet varsles beboere lokalt, alarm som ikke er kvittert ut i løpet av 2 minutter varsler alle og sender signal til brannvesen, eller vaktsselskap.

Responstid for røykdetektor er avhengig av brannveksttid, plassering av røykdetektor i forhold til brannstart og romhøyde. I et rom med takhøyde under 3 m og normalbrannveksttid vil responstid for optisk røykdetektor være 1 min [55].

Fungerende brannalarmanlegg og røykvarslere vil redusere antall omkomne i samme brann, da personer får tidlig varsling og kan evakuere før kritiske tilstander oppstår. Statistikken fra branner i Norge viser at røykvarslere var installert kun i 47,7 % av tilfeller med dødsbranner i perioden 2005-2014 [56]. Det er ukjent hvor mange disse var fungerende.

I en Sintef rapport [59] angis driftspålitelighet av brannalarmanlegg/røykdetektorer i boligbyggverk på 77,8 %. Brittisk standard for probabilistisk risikovurdering [35] angir driftspålitelighet for brannalarmsentral mellom 95 – 100 %, og 75 % for røykdetektor.

Brannalarmanlegg består av flere røykdetektorer som er knyttet til en brannsentral i et seriesystem. Brannalarmanlegget funksjonerer når minst 1 røykdetektor og brannsentral funksjonerer. Røykdetektorer er knyttet til hverandre i et parallelsystem som funksjonerer når minst en av detektorene funksjonerer.

Detektorer i en boenhet må dekke områdene kjøkken, stue og sone utenfor soverom [11]. Det kan forutsettes at det er tre røykdetektorer ( $P_{1,2,3}$ ) pr. boenhet. Sannsynligheten for at brannalarmanlegget ( $P_{ABA}$ ) funksjonerer ved brann i en leilighet blir da følgende:

$$P_{ABA} = (1 - (1 - P_1) \times (1 - P_2) \times (1 - P_3)) \times P_s = (1 - (1 - 0,75) \times (1 - 0,75) \times (1 - 0,75)) \times 0,95 = 0,94$$

$P_5$  – er sannsynlighet 95 % for at brannsentral fungerer.

$P_{1-3}$  – er sannsynlighet for at røykdetektor fungerer.

Sannsynlighet 0,94 for at brannalarmanlegg fungerer etter forutsetningene benyttes i analysen.

### **Sprinkleranlegg**

En oppdatert statistikk om driftspålitelighet og effekt av sprinkleranlegg beskrives i en rapport utført av Hall [51] i 2009. Statistikken er samlet fra mange branner i USA, i perioden 2003 – 2007 og omfatter forskjellige bygningskategorier og ulike type sprinkleranlegg.

For oppgaven er det av interesse å se på statistikken av våtanlegg som benyttes i høy boligblokk. Sprinkleranlegg basert på våtrørssystem fungerte etter forutsetningene, og var effektiv i 96 % av boligbyggbrenner [51]. Med ordet «effektiv» menes i det at branner var under kontroll, eller ble slokkt.

Driftspålitelighet som angis i den britiske standarden utgitt i 2003 [35] er følgende:

*Tabell 10: driftspålitelighet for sprinkleranlegg angitt i PD7974-7*

Sannsynlighet for funksjon av våtanlegg	
Maksimum	0,95
Verdisikkerhet	0,9
Personsikkerhet	0,8
Minimum	0,75

I oppgavens analyse er det mer relevant å benytte statistikken angitt av J.R. Hall [51], da undersøkelser beskriver våtsprinkleranlegg og utført av nyere tid, mens i den britiske standarden er statistikken generell for sprinkleranlegg.

Årsakene til svikt eller feil i sprinkleranlegg skyldes flere faktorer. Hovedårsaken til svikt er stengt av vanntilførsel til sprinkleranlegg når brannen oppsto. Hall [51] har oppsummert årsakene til feil i boligbygg, disse presenteres i [Tabell 11](#).

*Tabell 11: Årsaker til feil i våtsprinkler i boligbyggverk*

	Type feil, angitt i (%)				
	Stengt av vanntilførsel	Feil system installert i forhold til branntype	Mangel på vedlikehold	Manuelt inngrep i systemet før brannen ble slokkt	Skade på systemkomponenter
Bolig inkl. leiligheter	57	18	3	19	5

Vanntilførsel var stengt av som følge av ombygging, rehabilitering, lekkasjer i systemet o.l. Feil som oppstår i automatiske slokkeanlegg er for det meste knyttet til menneskelig feil. Hvis disse kan reduseres vil driftspålitelighet av sprinkleranlegg økes til 99 %. Overvåkning av ventiler og god merking kan redusere feil knyttet til stengt av vanntilførsel [51].

Statistikken viser at sprinkleranlegg reduserer antall omkomne med på 83 % sammenlignet med boligbyggverk uten sprinkleranlegg [51]. Sjansen til å overleve for personer i initialt brannrom økes med installert sprinkleranlegg, men hovedfunksjon for sprinkler er å hindre at mange omkommer i samme brann.

I boligbygg med sprinkleranlegg vil kostander ved brann i gjennomsnitt være på \$5 000, mens byggverk uten sprinkleranlegg kostnader på \$16 000, kostnadsreduksjon er på 68 %, tallene er fra USA [51]. Ifølge statistikken fra SSB var erstatning for bygningsbranner 4 128 296 000 kr i 2017.

### **Pålitelighet for branncellebegrensende konstruksjoner**

Branncellebegrensende konstruksjoner skal hindre brann og røykspredning i 60 minutter. Disse konstruksjonene består av dører, vegger, golv/himlinger og branntettingsystemer av tekniske installasjoner som penetrerer i konstruksjoner. Åpne branndører, manglende branntetting rundt gjennomføringer kan være en årsak for røyk- og brannspredning mellom forskjellige brannceller.

Den britiske standarden PD 7974-7 [35] angir pålitelighetsverdier for dører og vegger som benyttes i analyse.

*Tabell 12: Sannsynlighet for brannskillende vegger [35]*

	Sannsynlighet for branncellebegrensende konstruksjon å oppnå minst 75 % av klassifisert brannmotstand
Brannvegg (murvegg)	0,75
Branncellebegrensende vegger	0,65
Glassvegg	0,4

*Tabell 13: Sannsynlighet for brannklassifiserte dører [35]*

	Sannsynlighet
Branndør er åpen/ikke lukkes igjen	0,3
Branndør med dørpumpe lukker ikke	0,2



Inngangsdør fra boenhet til korridor vil som regel være lukket. Det forutsettes at døren står åpent som resultat av at en person fra leilighet rømmer ved brann og ikke lukker døren igjen.

I byggverk inntil 8 etasjer kan brannklassifiserte dører til trapperom utføres uten dørpumpe. Analysebyggverk med 8 etasjer i avhandlingen skal ha en korridor foran trapperom og selvlukkende dør inn til trapperom. Mens dør fra boenhet til korridor er uten dørpumpe.

### ***Manuel slokking av brann***

Ifølge §11-17 i veiledning til byggt teknisk forskrift [11] skal alle boenheter utstyres med minst et håndlokkeapparat som er pulver- eller skumbasert. Håndslukkere for bruk i bolig kan håndtere mindre branner i porøse materialer, væsker og oljer.

Om en brann vil slokkes med en håndslukker er avhengig av at en person oppdager og slokker en brann i tidlig fase. Statistikken fra DSB for 2017 viser at andelen av branner som oppstår mellom kl 15-22.59 er 41,6 % [58]. Det er tidspunkter når en person kan sannsynligvis være tilstede, og har en sjanse til å hindre brannspredning ved egen innsats. I en Sintef rapport utarbeidet av Mostue og Oppstad [59] angis det at brannspredning ble stoppet ved hjelp håndslukkere i 12 % av tilfellene.

Når person i brannleilighet er våken, eller blir varslet av brannalarmanlegg vil brannen være i tidlig utviklingsfase, og person har høy sannsynlighet til å slokke brannen. I «Fire Protection Handbook» [60] vises det at en gjennomsnittlig person vil slokke brannen på ca. 1 m<sup>2</sup> med sannsynlighet på 90 -95 %, se Figur 31.

### ***Brannslkking ved brannvesenets innsatts***

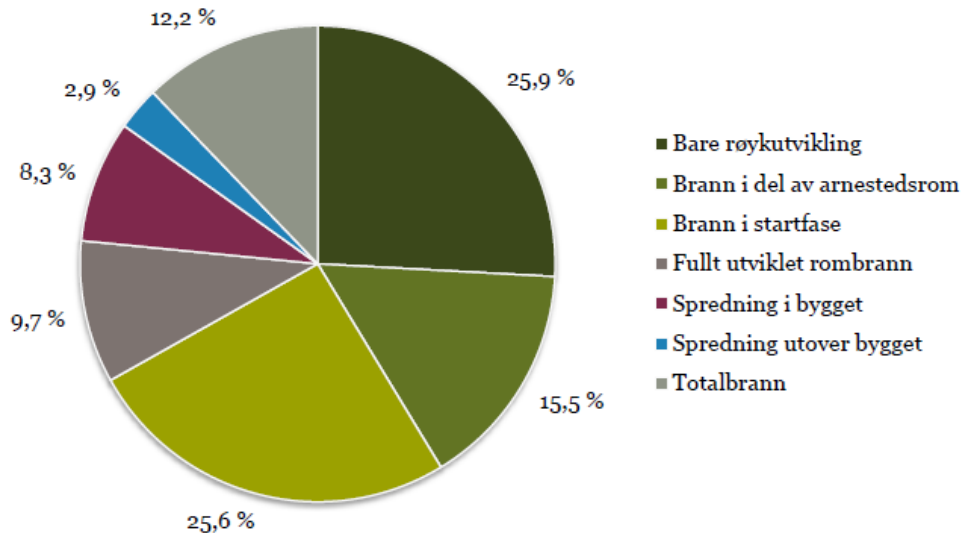
Det er to forskrifter som er avgjørende for hvor fort brannmannskapet kan slokke en brann. Disse er Forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen og Byggt teknisk forskrift.

Forskrift om dimensjonering av brannvesen skal sikre at hver kommune har organisert, utrustet og bemannet brannstasjon som kan ivareta lovpålagte oppgaver. Bemanning av brannstasjon, innsatstid og tilgjengelig utstyr er avhengig av risiko og sårbarhet som et tettsted representerer. Tettsteder med mer enn 20 000 innbyggere organiseres med kasernert vaktlag.

Byggt teknisk forskrift sørger for at nye byggverk tilrettelegges for rednings- og slokkemannskaper. Det skal være kjørbart atkomst til byggverket, oppstillingsplass for høyderedskap og tilgjengelighet til fasader for høye byggverk med et trapperom, minst en brannkum/hydrant plassert maks 50 m fra inngangspartiet, og brukbar tilgjengelighet i byggverket [11].

Muligheten for brannmannskapet å slokke en brann er avhengig av tilgjengelighet til og i byggverket, innsatstid, innsatstyrke og erfaring fra slokkingsarbeid, valg av slokketaktikk og utrustning av brannstasjon. Det er også avgjørende at en brannstasjon får en tidlig varsling om en brann via brannalarmanlegg eller noen som oppdager en brann. Brannen oppdages oftest ved at noen så eller luktet røyk eller flammer, en av tre branner varsles av automatisk slokkeanlegg [58].

I en rapport [61] utarbeidet av RISE fire research analyseres status for brannen ved brannvesenets ankomst. Statistikken er tatt fra branner i 2016. Røykutvikling ved ankomst ble registrert i 25,9 % av tilfeller, 25,6 % av branner var i startfase ved brannvesenets ankomst, og totalbrann i 15,5 %. Statistikken gjelder alle bygningsbranner. Totalbrann tolkes som en brann hvor hele byggverket er involvert i brannforløpet, dette er relevant for eneboliger, og andre byggverk som består av en branncelle.



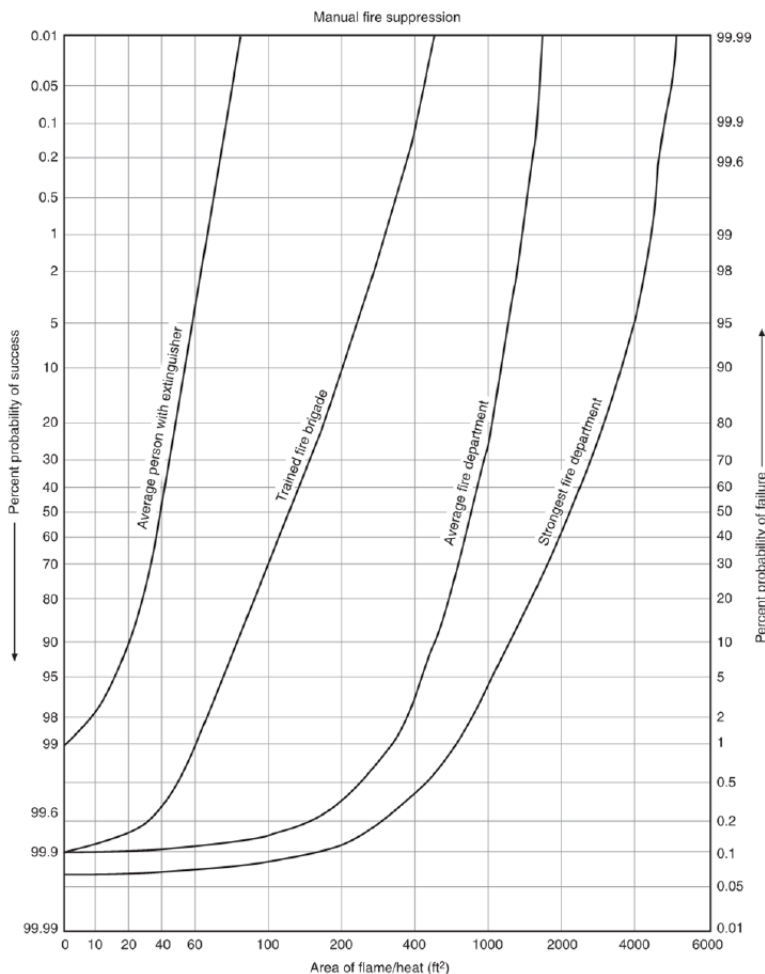
Figur 30. Fordeling av branner ved brannvesenets ankomst basert på statistikk fra 2016 [61].

Utrykningstid i 51 % av bygningsbranner var mindre enn 9 minutter. Brannen ved ankomst var i del av objektet. I 25 % av bygningsbranner var utrykningstid 16 minutter, objektet var overtent ved ankomst [61].

Når brannvesen ankommer tidlig er det høyere sjanse til å begrense brann til startrommet eller branncelle, og dermed redusere kostnader ved brann både med tanke på personskader og skadeareal.

Det finnes lite dokumentasjon om effektivitet av brannmannskapets slokkeinnsats og sannsynlighet for vellykket slokking, hvor brannen ikke sprer seg utenfor startbranncelle. En viktig komponent for slokking er tilstrekkelige vannforsyning. I tilfeller når det er manglende vannforsyning, eller annet problem knyttet til vannforsyning, kan brannmannskapet benytte tankbil med 10 000 l vann for slokking. I en Sintef rapport om slokkevannsmengder [62] vises statistikk at tankbil ble benyttet i halvparten av brannene, i 23 % tankbil ble benyttet i kombinasjon med kum eller hydrant, og i kombinasjon med åpen vannkilde i 5 %. Det vises også til flere forskjellige brannforsøk, hvor en brann på 10 MW i enebolig slokkes med vannpåføringsmengde 500 l/min i løpet av 3 min 19 s. Vannmengde som ble brukt var mindre enn 2000 l vann. For å slokke en brann i en enebolig med grunnflate på 80 m<sup>2</sup> og totalareal på 160 m<sup>2</sup> kan det være tilstrekkelig med en tankbil. Ved større brann innenfor en brannseksjon kan det være behov for vannmengde på 2500 – 3500 l/min [62].

I Fire Protection Handbook [60] vises sannsynligheter for vellykket brannslokking i lagerbygg som er avhengig av brannstørrelse og brannmannskaps kompetanse til slokking og utrusting av brannstasjon, se figur under.



Figur 31. Sannsynlighet for vellykket slokking som funksjon av brannstørrelse i et lagerbygg [60]

Figur 31 angir sannsynligheter for brannslukking i lagerbygg. En gjennomsnittlig brannstasjon vil slokke en brann på 37 m<sup>2</sup> (400 ft<sup>2</sup>) med sannsynlighet 98 % i et lagerbygg. Godt utrustet brannstasjon med erfarne brannmenn har sannsynlighet 95 % å slokke en brann på 92 m<sup>2</sup>. Disse tallene er egnet for brann i et lagerbygg som vanligvis består av store arealer, der brannstørrelse er avgjørende for videre brannspredning. Økt brannareal reduserer sannsynlighet vellykket brannslukking.

Boligblokker består av mange små brannceller. Brann i boligblokk er lettere å håndtere enn brann i lagerbygg på grunn av mindre areal, der hver boenhet utformes som egen branncelle, begrenset bruk av brennbar isolasjon og ingen fare for konstruksjonskollaps innenfor 90 minutter. Dermed vurderes det akseptabelt å benytte sannsynlighet for brannslukking 95 % i boligbyggverk ved tidlig varsling.

I de tilfellene når brannmannskapet ikke klarer å håndtere brannen på grunn av brannens størrelse, manglende vann, eller andre tekniske utfordringer, kan brannmannskapet benytte høyderedskap med redningskurv som kan ha plass for 5 pers.

Byggverkene som vurderes i analysen er i brannklasse 3 som tilsier at brann har potensiale for store konsekvenser. Dermed forutsettes det at de analysebyggverkene plasseres i bystrøk med velutviklet infrastruktur, der innsatstiden er mindre enn 10 minutter.

## 5.2 Problem og målformulering

Analysebyggverket av massivtre har to fravik fra preaksepterte ytelser angitt i veiledning til teknisk forskrift § 11-4 og § 11-8 [11].

Tabell 14. Fravik fra preaksepterte ytelser

Nr.	Forskrift om teknisk krav til byggverk (TEK 17)	Preaksepterte ytelser i veiledningen til TEK 17.	Fravik
1	<p>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.</p> <p>Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres.</p>	<p>Bærende hovedsystem skal ha brannmotstand R 90 A2-s1,d0 [A90].</p> <p>Sekundære, bærende bygningsdeler skal ha brannmotstand R 60 A2-s1, d0 [A60].</p> <p>Trappeløp skal ha brannmotstand R 30 A2-s1,d0 [A30].</p>	<p>Analysebyggverk prosjekteres med bærende hovedsystem R 90 [B 90], og sekundære bærende bygningsdeler R 60 [B 60].</p> <p>Trappeløp med brannmotstand R 30 [B30].</p>
2	<p>Brannceller skal være utført slik at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tiden som er nødvendig for rømning og redning.</p>	<p>Brannceller skal være av ubrennbare materialer og ha brannmotstand EI 60 [A60].</p>	<p>Analysebyggverk består av branncellebegrensende konstruksjoner av brennbare materialer EI 60 [B 60]</p>

Formålet med forskriftskrav nr. 1 er å sikre tilstrekkelig bæreevne og stabilitet som er nødvendig for rømning, redning og slokking.

Formålet med forskriftskrav nr. 2 er å hindre at branncellebegrensende konstruksjoner bidrar til brannforløpet, dermed utføres disse i ubrennbare materialer.

Problemstillingen fra funksjonskravene over, kan formuleres som følger:

- Det er stor usikkerhet knyttet til tiden det tar for rømning, redning og slokking i høye byggverk. Derfor stilles det krav om at bærende konstruksjoner skal opprettholde sin stabilitet gjennom fullstendig brannforløp.
- Bruk av brennbare bærende og branncellebegrensende konstruksjoner kan bidra til forbrenning selv om variabel brannenergi er utbrent. Dette kan vanskeliggjøre både rednings og slokingsarbeid. Ved svikt av aktive og passive brannsikringstiltak, og uten innblanding av brannvesenet kan konstruksjonskollaps oppstå.

Hva er frekvensen for konstruksjonskollaps ved brann og hvilke konsekvenser vil dette medføre? Kan man akseptere høyere brannrisiko for konstruksjonskollaps når hendelsen er svært lite sannsynlig, eller når konsekvensen for personsikkerhet er akseptable? Formålet med risikoanalysen og risikoevalueringen er å bringe saken under diskusjon.

## 5.3 Risikoanalyse

I risikoanalyse identifiseres brannscenarier som kan medføre store konsekvenser, og det finnes frekvenser/sannsynligheter for disse brannscenariene.

Analysen består av kvantitativ vurdering av frekvenser og kvalitativ vurdering av konsekvenser. Frekvenser beregnes ved hjelp av en hendelsestre som består av mange hendelseskjeder med ulike utfall.

Datagrunnlag for pålitelighetsverdier benyttes fra standard BS PD 7974-7 [35] og data som er angitt i kap. 5.1 i denne oppgaven. For klassifisering av sannsynligheter og konsekvenser benyttes tabeller angitt i «Risikoanalyse-teori og metoder» [37].

Eksterne rammebetingelser for utforming av byggverk med tanke på brannsikkerhet settes av Forskrift om tekniske krav til byggverk med veiledning, TEK 17/ VTEK 17.

Analysen inneholder forenklinger når det gjelder årsaker og plassering av brann, og sannsynligheter for driftspålitelighet av ulike tiltak som vurderes til å være identiske med brannstatistikk. Konsekvensene i analysen vurderes kvalitativt, og dermed innebærer grove betraktninger for antall omkomne ved brann.

### 5.3.1 Beskrivelse av analysebyggverk

Preaksepterte ytelser som angis for høye byggverk i VTEK 17 [11] kan kategoriseres i to grupper, det er ytelser for byggverk til og med 8 etasjer, og for byggverk med 9-16 etasjer. Denne analysen utføres som en casestudie av brannsikkerhet i byggverk bestående av åtte tellende etasjer.

Analysebyggverket er beregnet for boligformål, risikoklasse 4 og plasseres preakseptert i brannklasse 3 som betyr at byggverket kan potensielt medføre for store skader ved brann.

Analysebyggverket prosjekteres etter VTEK 17 så langt det passer. Brennbare bærende og branncellebegrensende konstruksjoner kompenseres med følgende tiltak:

- Automatisk slokkeanlegg i form av sprinkler prosjekteres etter standard NS-EN 12845 og tillegg F.
- Byggverkene plasseres i urbane strøk med brannvesenets innsatstid mindre enn 10 minutter.
- Trapperom type Tr 2 som innebærer at det må være en sluse/korridor mellom trapperom og boenheter. Dette er ikke et direkte kompenserende tiltak for brennbarhet, men et konsekvensreducerende tiltak for personsikkerhet i analysebyggverket.

I henholdt til VTEK 17 [11] skal analysebyggverket utstyres med følgende aktive og passive brannsikringstiltak:

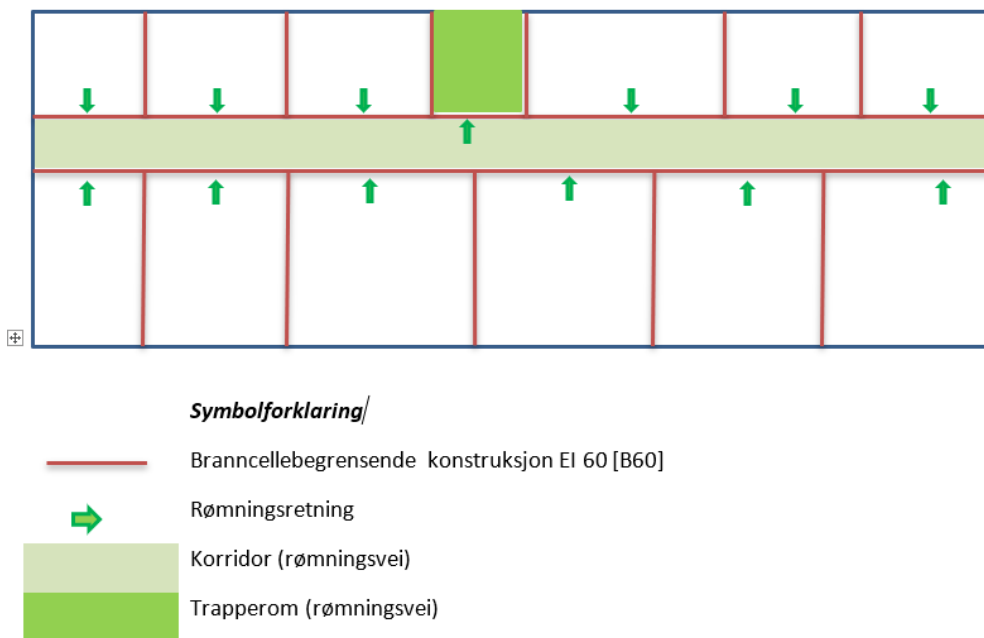
- Ubrennbar isolasjon A2-s1, d0, jf. §11-9.

- Brannalarmanlegg kategori 2 prosjekteres og utføres i henholdt til NS 3960:2013, jf. §11-12.
- Ledesystem i rømningsveier prosjekteres i henholdt til NS 3926, jf. §11-12.
- Avstand fra dør til en boenhet til trapperom kan ikke overstige 15 meter i byggverk med ett trapperom, jf. §11-14.
- Manuelt slukkeutstyr i form av håndslukkeapparater i hver boenhet, jf. §11-16.

Bærende og branncellebegrensende konstruksjoner i analysebyggverket skal ha følgende brannmotstand:

- Bærende hovedsystem med brannmotstand R 90 [B 90], og sekundære bærende elementer med brannmotstand R 60 [B60].
- Branncellebegrensende konstruksjoner EI 60 [B 60].

Det er også en begrensning for lengde av en korridor når byggverket prosjekteres med ett trapperom. Det skal ikke være mer enn 15 m fra dør til en boenhet til trapperommet [11]. Derfor skal korridor i analysebyggverket være 30 m lang. Hvis hver leilighet har bredde 5 meter kan det plasseres 6 leiligheter på hver side av korridoren. Et realistisk analysebyggverk med ett trapperom kan bestå av 12 leiligheter pr. etasje, se Figur 32. Statistikken viser at de fleste leilighetene har et areal på 50-100 m<sup>2</sup> [53]. Dermed er det rimelig å anta at byggverket har BTA 1200 m<sup>2</sup> pr. etasje.



Figur 32. Planløsning av analysebyggverk med symbolforklaring

Det kan forutsettes at det er 24 personer pr. etasje, og totalt 192 pers. i byggverket.

Hver boenhet, trapperom, teknisk rom og sjakter utføres som egne brannceller med brannmotstand EI 60 [B 60] for å begrense brann og røykspredning i den tiden som er nødvendig for rømning og redning, og for å lette slukkearbeidet.

Himlinger og skillevegger av massivtre mellom i boenheter tildekkes på minst en side med steinull 50-100 mm og to gipsplater 2x12,5 mm klassifisert som A2-s1,d0 [48], [49]. Denne løsningen er aktuell med tanke på lydisolasjon, og vil ha positiv effekt for reduksjon av eksponert overflater i boenhet. Totalt vil 1/4 av skillevegger og himling være tildekket med gipsplater.

Alle overflater og kledninger i rømningsvei og i bruksenheter prosjekteres i henholdt til §11-9 i VTEK 17 [11]. Overflater/ kledninger i boenheter inntil 200 m<sup>2</sup> skal være klassifisert minst som D-s2,d0/K<sub>2</sub>10 D-s2,d0, ubehandlet trevirke kan benyttes. Mens brannceller over 200 m<sup>2</sup> skal ha begrenset brennbare overflater/kledninger type B-s1,d0 / K<sub>2</sub>10 B-s1,d0 [K1], gipsplater eller brannbehandlet trevirke.

Sjakter, hulrom og rømningsveier skal ha ubrennbar kledning type K<sub>2</sub>10 A2-s1, d0 [K1-A] og overflater B-s1,d0 [In 1], jf. §11-9 i [11]. Utvendige overflater og overflater i ytterveggskonstruksjoner skal være begrenset brennbare og klassifisert som B-s3, d0 [Ut 1].

Rednings- og slokkemannskapet forutsettes å ha god tilgjengelighet til analysebyggverkene, alle fasadene må være tilgjengelige for slokking og redning i A8. Analysebyggverkene A8 og A16 forutsettes å være plassert i urbane strøk med god infrastruktur, området dekkes av godt utrustet, kasernert brannstasjon.

### 5.3.2 Valg av analysemetoder

I denne analysen benyttes probabilistisk tilnærming som utføres ved hjelp av hendelsestreanalyse. I hendelsestreet beskrives barrierer og hendelser som kan påvirke utviklingen av hendelseskjedene og konsekvensene av en brann. Konsekvensene for hvert scenario vurderes kvalitativt.

### 5.3.3 Fastsetting av akseptkriterier

All virksomhet medfører en viss risiko. Det å bo i en høy boligblokk innebærer en risiko, for eksempel å bli eksponert mot røykgasser i korridor eller i trapperom.

Når det gjelder akseptkriterier, er det grunnleggende å vurdere hvilken risiko kan anses som akseptabel, og om det er mulig å definere et akseptabelt risikonivå.

På grunn av menneskelige handlingsmønstre, kombinert med byggverkets mange brannceller er det svært vanskelig å anslå nøyaktig antall omkomne ved brann. Derfor bør konsekvensene deles i grupper i forhold til antall omkomne, for eksempel 1-3 omkomne, 3- 10 og flere enn 10 omkomne. Denne metoden for å måle risiko er angitt i «Risikoanalyse- teori og metoder» [37]. Frekvens og konsekvens fordeles i grove grupper, se Tabell 15 og Tabell 16.

Tabell 15: Sannsynligheter og frekvenser [37]

<b>Klasser</b>	<b>Sannsynlighet</b>	<b>Frekvens</b>
1	Svært lite sannsynlig	Hendelse kan oppstå mindre enn 1 gang pr. 1000 år
2	Lite sannsynlig	1 gang pr. 100 – 1000 år

3	Sannsynlig (moderate)	1 gang pr. 10 - 100 år
4	Meget sannsynlig	1 gang pr. 1-10 år
5	Svært sannsynlig	Mer enn 1 gang pr. år

Tabell 16: Klassifisering av konsekvenser [37]

Klasse	Konsekvens	For mennesker	For materielle verdier
1	Liten	Små personskader ifm. brannslukking eller evakuering behov for førstehjelp.	< 0,2 millioner kr.
2	Middels	Alvorlige personskader	0,2 – 2 millioner kr.
3	Stor	1-2 døde	2 – 20 millioner kr.
4	Svært stor	3-10 døde	20 – 200 millioner kr.
5	Katastrofalt	Mer enn 10 døde	>200 millioner kr.

Risikoen som en kombinasjon av sannsynlighet og konsekvens kan representeres i en risikomatrix. Hvert scenario fra hendelsestre plasseres i risikomatrixe.

Tabell 17: Risikomatrixe [37]

Frekvens	Konsekvens				
	1 – liten	2 – middels	3 – stor	4 – svært stor	5 – katastrofalt
5 – svært sannsynlig					
4 – ganske sannsynlig					
3 – sannsynlig					
2 – lite sannsynlig					
1 – svært lite sannsynlig					

	[Grønt område] Hendelser med liten risiko. Risikoreducerende tiltak er ikke nødvendig.
	[Gult område] Hendelser med liten eller moderat risiko. ALARP prinsippet benyttes for vurdering av ytterligere utbedringstiltak.
	[Rødt område] Hendelser med høy risiko. Risikoreducerende tiltak er nødvendig



### 5.3.4 Fareidentifikasjon

Under brannforløpet vil brennbare konstruksjoner representere følgende farer:

- Ved svikt av automatisk slokkeanlegg, og ingen respons fra brannvesenet kan en brann i byggverk med eksponerte brennbare konstruksjoner medføre at konstruksjonskollaps etter 90 branneksposering.
- Fare for brannspredning. Ved svikt av automatisk slokkeanlegg og forsinket respons fra brannmannskapet kan det oppstå fare for omfattende vertikal brannspredning mellom vinduer i ulike plan.
- Svikt av branncellebegrensende konstruksjoner, f.eks. dører mot korridor kan hindre rømning via en korridor og trapperom.

Faremomenter for personsikkerhet er brann- og røykspredning til korridor og til trapperom som kan hindre rømning, samt mislykket innsats av brannmannskapet innen 90 minutter. Nødvendig rømningstid vil være lengst om natta, da det tar lengre tid for en person å reagere på brannalarm.

### 5.3.5 Analyse av årsaker og brannfrekvens

Eksponerte massivtreoverflater trenger å oppnå overflatetemperatur over 110 °C for å starte termisk nedbryting. Det trenges en høy ekstern varmestråling for å antenne massivtre [46]. Derfor vil eksponerte massivtre ikke være en årsak for rask brannutvikling i tidlig brannfase, men vil være avgjørende når forholdene i rommet nærmer seg overtenningskriterier.

Brannårsakene i analysebyggverket forutsettes å være identiske med brannårsaker i bolig. Halvparten av boligbranner skyldes komfyrbranner, resten oppstår på grunn av bruk av åpen ild, feil bruk av elektriske utstyr, påtenning o.l. Brannårsakene er ofte knyttet til menneskelige feil ved bruk av elektrisk utstyr, manglende oppmerksomhet, uforsiktighet og uaktsomhet. Branner starter ofte ved at møblering, tekstiler eller andre brennbare materialer eksponeres mot antennelseskilde.

Sannsynlighet for sikker funksjon og svikt av aktive og passive brannsikringstiltak er beskrevet i kap. 5.1. Disse benyttes videre i hendelsestrær som viser hendelseskjeder til mulige utfall.

#### **Personsikkerhet**

Hva hvis en brann oppstår i analysebyggverk f.eks. 1 gang pr år? Det er dette spørsmålet man vil svare på når konsekvensene vurderes for personsikkerhet. I analysen tas det utgangspunkt i en initiert brann i en av leilighetene, der frekvensen for brann i analysebyggverket er antatt å være 1 gang pr. år.

Hendelsen kan oppstå på ulike tidspunkter. Person i brannleilighet kan være våken eller sovende. Gitt at gjennomsnittlig person sover 8 timer i døgnet, vil sannsynlighet for å være våken ved brann være  $16/24=0,67$ , 67 %. Når personen er våken, eller brannalarmanlegg fungerer som forventet, er det stor sannsynlighet for at brannen slokkes manuelt i tidlig fase. Derfor er det interessant å se på et brannscenario som oppstår mens personen sover (33 %) i brannleilighet.

### **Materielle verdier**

Generell brannfrekvens ( $7,3 \times 10^{-4}$  ganger/år pr. byggverk) benyttes for å analysere konsekvenser for materielle verdier, se kap. 5.1.5. Om en person er tilstede, våken eller sovende, er også avgjørende for vurdering av sannsynlighet for manuell brannslukking. Det forutsettes at en person er tilstede 16 av 24 timer, da vil sannsynlighet for å være tilstede tilsvare 0,66. Når en person ikke er tilstede eller brannalarmen feiler, vil dette resultere i forsinket varsling av brannvesenet; brannen kan bli større og dermed vanskeligere å håndtere. Derfor forutsettes sannsynlighet for vellykket slokking til å være 0,9.

Når brannvesenet får varsling via brannalarm, eller av en våken person, vil sannsynlighet for vellykket slokking være 0,95.

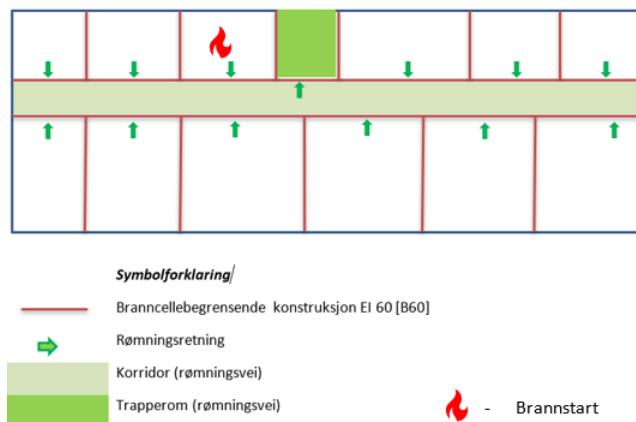
### 5.3.6 Brannscenarier - generelt

NS 3901:2012 presenterer fire brannscenarier som må vurderes:

1. Et alvorlig brannscenario med rask utvikling og høy effekt som representerer det verste scenarioet i bygningen.
2. Brann som oppstår i et rom som normalt er uten personer, og som kan true et større antall personer i andre deler av bygningen. Dette scenarioet kan utelukkes i byggverk med automatisk brannslukkeanlegg og brannalarmanlegg.
3. Brann som utvikler seg langsomt og som ikke vil utløse et automatisk slukkeanlegg. Dette scenarioet er aktuelt å benytte i byggverk for overnatting hvor personer er avhengige av assistert evakuering.
4. Andre representative scenarier som analyseres for å avdekke svakheter i byggverket.

Høye boligblokker av trekonstruksjoner representerer høy brannenergi, og vil ha høy branneffekt med rask brannutviklingshastighet når overflatene er eksponerte. Et alvorlig brannscenario som starter i en av leilighetene vil være representativt for byggverket med tanke på brennbarhet av bærende og branncellebegrensende konstruksjoner.

Det forutsettes at brannen starter i en leilighet ved siden av trapperommet i 4. etasje.



Figur 33. Brann starter i en leilighet ved siden av trapperommet

Brann i denne etasjen har potensiale for store konsekvenser på grunn av at overliggende etasjer ligger høyt over terrenget, og personer kan ikke benytte vinduer/balkonger som rømningsvei. Scenarioet er også representativt for vertikal brannspredning og kan medføre store materielle skader, og vil være utfordrende for brannvesenet på grunn av høyde.

Brann som utvikler seg i en leilighet og ikke sprer seg til andre boenheter er ikke av interesse. Da kan personer fra andre leiligheter benytte korridor og trapperom for rømning.

Korridor er et kritisk element for personsikkerhet i høye byggverk. Brann- og røykspredning til en korridor kan hindre rømning for hele etasjen, mens brann- og røykspredning til trapperom kan hindre rømning for beboere fra flere etasjer. For at denne hendelsen skal kunne oppstå må manuell slokking mislykkes, sprinkleranlegget svikte, samt døren fra brannleilighet til korridoren må være åpen. Dette scenarioet kan medføre store konsekvenser for personer i byggverket. Når brannmannskapet ikke klarer å håndtere brannen kan konsekvensene være katastrofale, da bærende konstruksjoner kan bryte sammen. Disse scenarioene med store og katastrofale konsekvenser er aktuelle for vurdering i denne analysen.

Brannscenarioer som kan medføre svært store, eller katastrofale konsekvenser kan oppstå når alle beboere er tilstede i sine leiligheter og aktive og passive brannsikringstiltak svikter, og når brannmannskapet ikke klarer å håndtere brannen.

Scenario med katastrofale konsekvenser for materielle verdier kan oppstå når byggverket bryter sammen og medfører materiell kostnad over 200 mill. kr. Konsekvens for materielle verdier er direkte avhengig av sannsynlighet for manuell slokking, slokking ved hjelp av automatiske slokkeanlegg og brannvesenets innsats.

Det er mange ulike hendelsesforløp som kan føre til røykfylt trapperom og konstruksjonskollaps. Derfor deles brannscenarioer i kategorier for personsikkerhet og materielle verdier. For å kunne uttrykke scenarioene mer nøyaktig konstrueres hendelsestrær i kap. 5.3.6.1. Hendelser med potensiale for størst konsekvens vurderes i konsekvensanalysen.

Scenarioene med brann i rømningsvei (korridor og trapperom) er ikke vurdert i analysen, da disse er lite sannsynlige når rømningsveier har begrenset mengde av brennbare materialer, ingen lagring, ubrennbare overflater og kledninger. Brannscenarioene når brannmannskapet ikke kommer for redning og slokking er ikke vurdert.

### 5.3.6.1 Valg av brannscenarier

#### **Personsikkerhet**

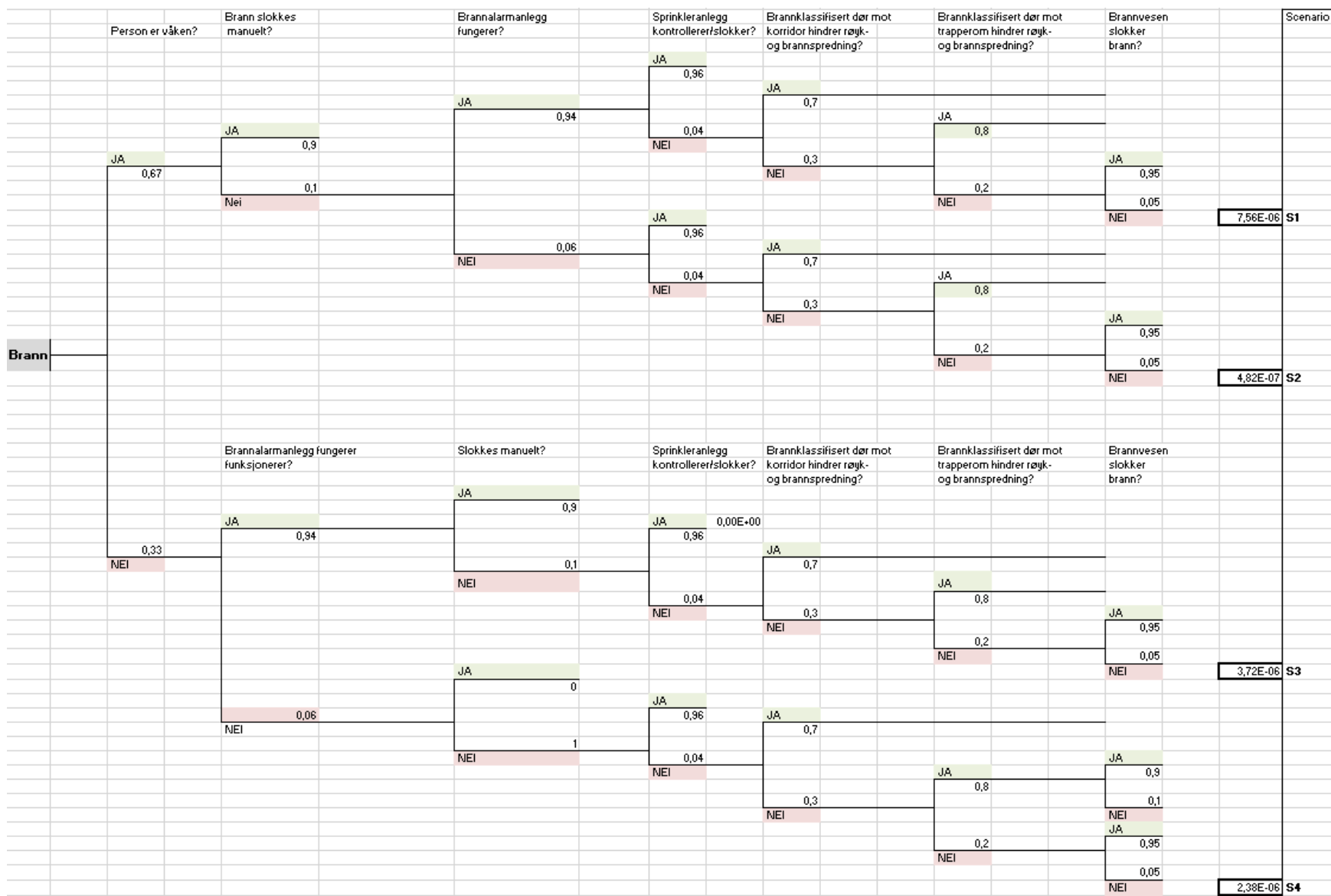
Figur 34 viser ulike brannscenarier S1, S2, S3 og S4 som kan oppstå i analysebyggverk. For å kunne analysere konsekvensene nærmere, velges det et av fire brannscenarier med potensiale for svært store, eller katastrofale konsekvenser, det vil si 10 eller flere omkomne og konstruksjonskollaps.

Hendelse S1 har høyest sannsynlighet. Forskjellen i sannsynlighet mellom disse scenarioene S1, S3 og S4 er liten, mens forskjellen i konsekvensene kan være betydelig.

I brannscenarioene S1 og S3 fungerer brannalarmanlegg. Brannalarmanlegg er ikke et tiltak som kan hindre røykspredning til korridor, men et risikoreduserende tiltak som kan varsle en person i startbranncelle ca. 1 min etter at brannen har oppstått, og dermed øke sjansen for å slokke en brann i tidligfase med sannsynlighet 90-95 %. Brannalarmanlegg varsler andre beboere i byggverket etter 3 min ved brann i leilighet, eller med en gang når døren mot korridoren er åpen. Det vil ta noen minutter før kritiske forhold oppstår i korridoren, og åpen dør mot korridoren vil trolig lukkes igjen av andre beboere for å hindre røykspredning til korridoren. Derfor kan rømningen gjennomføres før kritiske forhold oppstår i korridoren. Disse scenarioene kan medføre stor konsekvens med noen omkomne.

Brannalarmanlegget fungerer ikke i brannscenarioene S2 og S4. Dette kan medføre at beboerne i analysebyggverket får forsinket varsel, som igjen vil føre til røykfylt korridor og trapperom ved eventuell evakuering, så beboerne blir nødt til å bli igjen i sine leiligheter og vente på brannvesenets håndtering av brannen. Dersom brannmannskapet mislykkes med håndtering av brannen kan disse scenarioene medføre svært store, eller katastrofale konsekvenser for samfunnet. Frekvensen for at brannscenariet S4 å oppstå er høyere enn for S4.

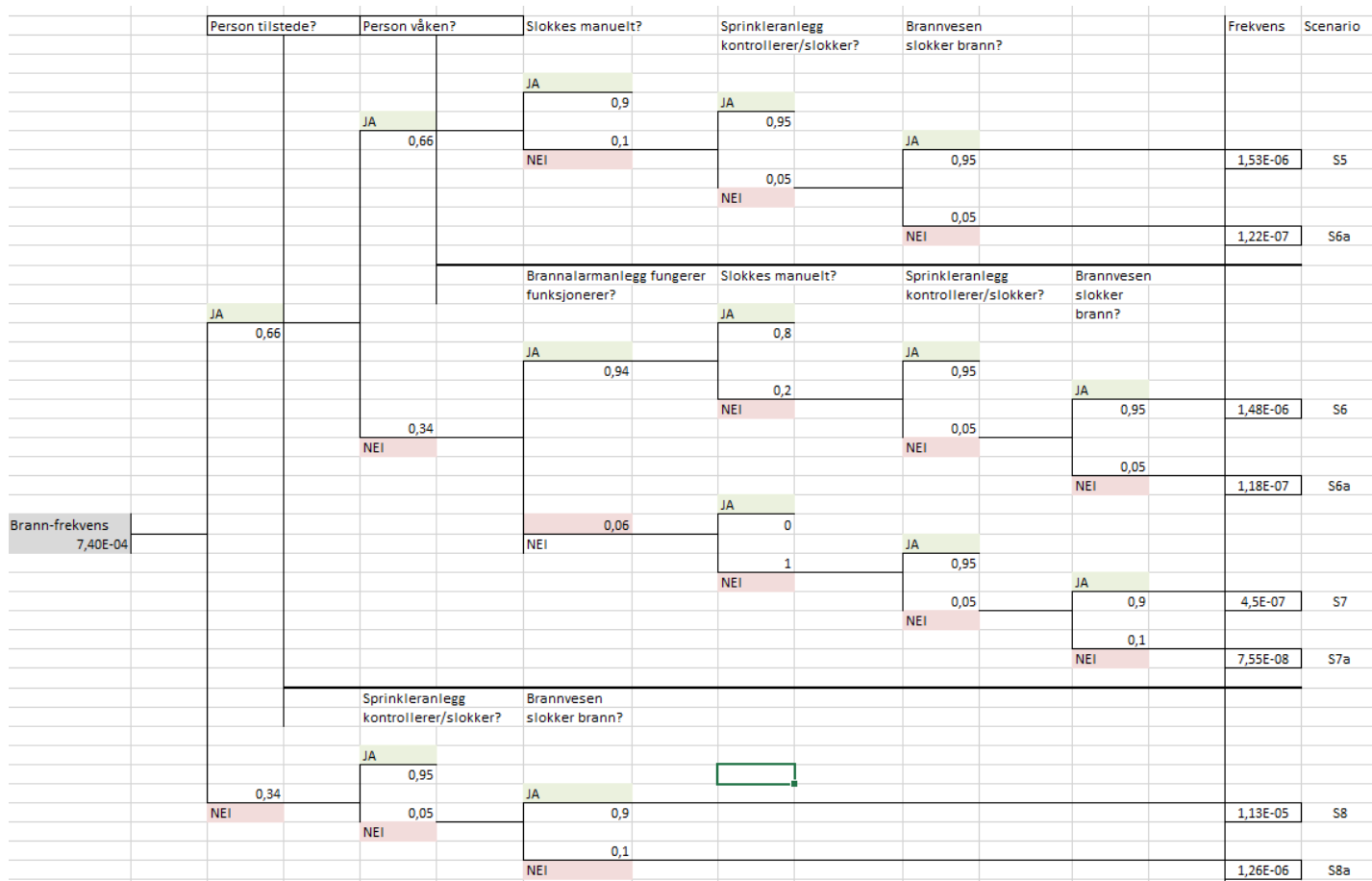
Scenario S4 med sovende person i en leilighet, svikt av brannalarmanlegget, svikt av sprinkler og røykspredning til korridor/trapperom, samt mislykket brannsløkking av brannmannskapet representerer størst konsekvens sammenlignet med andre brannscenarioene. Frekvensene for disse brannscenarioene har marginale forskjeller. Derfor velges det å evaluere nærmere brannscenariet S4. Denne brannscenariet fordeles videre i delscenarier og konsekvensene av disse vurderes.



Figur 34. Brannutvikling - ulike brannscenarioer

### Materielle verdier

Det er avgjørende for konsekvenser av materielle verdier i hvilken hendesskjede brannen blir slokkes. Når en eller flere personer er tilstede er det høyere sannsynlighet for at brannen kan bli slokkes. Derfor vurderes scenarier med og uten personer tilstede. Brannscenarioene når brannmannskapet ikke slokker brann er merket med bokstaven «a».



Figur 35. Brannscenarioer for materielle verdier

### 5.3.6.2 Valg av delscenarier

#### **Personsikkerhet**

Det utvalgte brannscenarioet S4 deles opp delscenarier.

Tabell 18. Beskrivelse av delscenarier

Nr.	Beskrivelse av delscenario	Delsenario, ID.
<b>S4</b>	<p>Person i brannleilighet sover. Derfor ganges brannfrekvens (brannen har oppstått) med sannsynlighet for sovende person i brannleilighet.</p> <p>Brannalarmanlegg og sprinkleranlegg fungerer ikke. Derfor har en person i startbranncelle lav sannsynlighet til å overleve ved brann om natten. Det forutsettes at personen foretar rømningsforsøk og åpner døren til korridoren, men omkommer på grunn av inhalering av kritiske mengder CO.</p> <p>Åpen dør medfører røykspredning til korridoren, og korridoren blir røykfylt etter kort tid, noe som fører til dårlig sikt i korridoren og høye konsentrasjoner av giftige gasser. Personer i leilighetene som er forbundet med korridoren, kan ikke benytte korridoren som rømningsvei på grunn av begrenset sikt. Enkelte bosatte vil forsøke å rømme via røykfylt korridor og kan utsettes for kritiske forhold. Dette delscenarioet er aktuelt for å vurdere individrisiko i korridoren. Delscenarioet betegnes som S4K (K-korridor) og har mulig utfall at brannmannskapet ikke slokker brannen.</p> <p>Når brannmannskapet ikke klarer å håndtere brannen kan brannen medføre katastrofale konsekvenser. Delscenario betegnes som S4Ka. Svikt av brannalarmanlegget kan medføre lengre tid for brannvesenets varsling og dermed lengre innsatstid. På grunn av at brannalarmen ikke fungerer reduseres sannsynligheten for vellykket slokking til <math>P_{\text{slokking}} = 0,9</math>.</p> <p>Røykspredning fra korridor til trapperom kan oppstå når døren mellom korridoren og trapperommet er åpen, eller hvis døren ikke lukkes på grunn av feil i dørpumpe, eller på grunn av bruk av kile. Røykspredning til trapperommet vil hindre rømning for personer fra 4 etasje og oppover. Personer i overliggende etasjer må vente på brannvesenets håndtering av brannen, mens brannen sprer seg mellom vinduer i ulike etasjer uten brannmostand. Enkelte personer forsøker å rømme via røykfylt korridor. Scenarioet betegnes som S4T (T-trapperom).</p> <p>Når brannmannskapet ikke klarer å slokke brannen og røyken har spredd seg til trapperommet betegnes dette scenarioet som S4Ta.</p> <p>Personer i byggverket har lagt merke til lukten av røyk, eller har sett flammer på utsiden og varslet brannvesenet. Det er forutsatt at det har gått ca. 7-8 min</p>	<p>S4K – røykspredning til korridor;</p> <p>S4Ka – brannvesen slokker ikke brannen.</p> <p>S4T – røykspredning til trapperom;</p> <p>S4Ta – brannvesen slokker ikke brannen;</p>

	etter brannstart, da brannvesenet ble varslet. Brannmannskapet ankommer ca. 17 minutter etter brannstart.	
--	---	--

### **Materielle verdier**

Alle brannscenarier for materielle verdier er avhengig av om brannvesenet slokker brannen eller ikke.

Derfor er det ikke relevant å dele brannscenarier for materielle verdier i mindre delscenarier.

### 5.3.7 Modellering av brannforløp

Dette kapitlet gir en generell beskrivelse av hvordan brannforløp kan foregå i analysebyggverket. Resultater fra ulike brannforsøk, som er beskrevet i kap. 4, viser at en brann kan ha rask brannutviklingshastighet og høy branneffekt i et rom med eksponerte treoverflater.

På bakgrunn av studerte forsøk, kan det forutsettes at brannen vil utvikle seg etter  $\alpha t^2$ -kurve, med brannveksthastighet  $0,047 \text{ kW/s}^2$ , noe som kan forventes i et rom med eksponerte treoverflater. Når døren mellom brannleiligheten og korridoren er åpen vil en slik brannutvikling medføre rask røykfylling av korridoren, og trapperommet når døren til trapperommet.

Ved fullt utviklet brann vil energiproduksjonen ved forbrenning i rommet begrenses av ventilasjonsåpningen som tilfører oksygen. Treoverflater vil medføre overflødig produksjon av brennbare gasser i forhold til tilgjengelig oksygen i brannleiligheten. Derfor vil det oppstå en intensiv forbrenning på utsiden, hvor branngasser blandes med oksygen, av byggverket.

Avkjølingsfase kan oppstå når all variabel brannenergi er utbrent, og konstruksjonen ikke bidrar til brannforløpet. Li et al. [38] har ikke observert avkjølingsfase i rommet med normal brannenergi og flere vegger av eksponert massivtre.

For å kunne estimere tid til at korridoren eller trapperommet blir røykfyllt når dørene er åpne, bør det utføres modellering/beregning av brannforløpet, alternativt kan man studere oppgaver med utførte brannmodelleringer.

H. Bjelland [63] utførte (i sin masteroppgave) modellering av røykspredning til korridor og trapperom i boligblokker med forskjellige utforminger og mange ulike brannscenarier. Brannen hadde en branneffekt på maks 20 MW som var begrenset av ventilasjonsåpningen. Brannen utviklet seg etter  $\alpha t^2$ -kurve, med rask utviklingshastighet  $0,047 \text{ kW/s}^2$ , med brannareal på  $8 \text{ m}^2$  og effekt på  $2,2 \text{ MW/m}^2$  [63].

Utviklingshastighet og branneffekt i simuleringene utført av Bjelland [63] er representative for analysebyggverket. Utformingen av byggverket i simuleringene er også passende for analysebyggverket. Brannleilighet hadde areal på ca.  $70 \text{ m}^2$ , ventilasjonsåpning på  $9,6 \text{ m}^2$ . Brannleiligheten var plassert i 2. etasje og forbundet med korridoren og trapperommet. Korridoren i forsøkene hadde lengde på 60 m, noe som er lengre enn i vårt analysebyggverk. Trapperommet hadde en høyde som tilsvarer 7 etasjers bygning [63].



Røykspredning til korridoren ble modellert i simulering nr. 31. Døren mellom brannleilighet og korridoren ble åpnet etter 60 s. Røykspredning til trapperommet ble modellert i simulering nr. 32. Døren til trapperommet ble åpnet etter 120 s. Simuleringene ble utført uten aktive sprinkleranlegg [63].

Simulering nr. 31 viste at siktlengde i korridoren var mindre enn 4 m ved høyde 1,4 m etter ca. 160 s fra brannstart. Temperaturmålingene viste at gjennomsnittstemperatur var lavere enn 100 °C etter 800 s. Kritisk akkumulert dose av CO kunne oppnås ved oppholdt i korridoren i ca. 360 s. Simuleringen nr. 32 viste at siktlengde i trapperommet var mindre enn 4 m etter ca. 400 s. Temperaturmålingene i trapperommet viste at gjennomsnittstemperatur i trappen ved brannetasjen var ca. 100 °C. Giftigheten i røyken var relativt lav. Kritisk akkumulert dose av CO kunne oppnås ved opphold i trapperommet i ca. 540 s [63].

Siden korridoren i analysebyggverket har to ganger mindre volum enn i simuleringene utført av Bjelland [63], kan det forutsettes at ved tilsvarende røykgassproduksjon vil korridoren røykfylles to ganger fortere. Det vil si at siktlengden i korridoren vil være mindre enn 4 m etter 110 s fra brannstart (forutsatt at døren åpnes etter 60 s), og siktlengde i trapperommet vil være mindre enn 4 m etter ca. 300 s.

### 5.3.8 Beregning av sannsynligheter for delscenarier

#### **Scenarier med betydning for personsikkerhet**

I dette kapittelet beregnes sannsynligheter for hvert delscenario.

Figur 36. Figur 36 viser frekvens for brannscenarioene S4K og S4Ka. I scenario 4K kan en person bli utsatt for røykgasser i korridoren. I scenario S4Ka svikter flere aktive og passive brannsikringstiltak, og brannvesenets slokking mislykkes.

	Person sover i brannleilighet	Brannalarm fungerer?	Sprinkleranlegg kontrollerer/slokker?	Brannklassifisert dør mot korridor hindrer røyk- og brann spredning?	Brannvesen slokker brann?	Scenario	Frekvens					
Brann	0,33	JA	0,96	0,7	0,9	S4K	2,38E-04					
		0,94										
		NEI						0,06	JA	0,1		
		0,06						0,7				
		NEI						0,04	NEI		S4Ka	2,38E-05
		0,04						0,3				
NEI	0,3	NEI										
0,3	0,9	NEI										
NEI	0,1	NEI										

Figur 36. Frekvenser for brannscenario S4K og S4Ka

Hendelsen S4K kan oppstå 2,4 ganger pr. 10 000 år i analysebyggverket. Ved en forutsetning at det bygges 10 000 analysebyggverk vil denne hendelsen oppstå 2,4 ganger pr. år.

Figur 37 viser hendelseskjeden og sannsynligheten for røykspredning i trapperommet, samt sannsynligheter for at flere av aktive og passive tiltak feiler og at brannmannskapets innsats mislykkes.

	Person sover i branneilighet	Brannalarm fungerer?	Sprinkleranlegg kontrollerer/slokker?	Brannklassifisert dør mot korridor hindrer røyk- og brannspredning?	Brannklassifisert dør mot trapperom hindrer røyk- og brannspredning?	Brannvesen slokker brann?	Scenario	Frekvens
		JA						
		0,94						
			JA					
			0,96					
<b>Brann</b>	0,33			JA				
		0,06		0,7				
		NEI						
			0,06					
			NEI		JA			
					0,8			
				0,3				
				NEI		JA		
						0,9		
					0,2			
					NEI		S4T	7,13E-05
						0,1		
						NEI	S4Ta	7,13E-06

Figur 37. Frekvens for brannscenarioene S4T (røykspredning til trapperom) og S4Ta (mislykket brannvesenets innsats)

### Scenarioer med betydning for materielle verdier

Brannmannskapet slokker brann i brannscenarioene S5-S8. Siden utfallet av disse scenarioene er likt kan kumulativ frekvens beregnes:

$$F_{S5-S8} = F_{S5} + F_{S6} + F_{S7} + F_{S8} = 1,5 \times 10^{-5}$$

Kumulativ frekvens for brannscenarioene S5a-S8a:

$$F_{S5a-S8a} = F_{S5a} + F_{S6a} + F_{S7a} + F_{S8a} = 1,6 \times 10^{-6}$$

### 5.3.9 Analyse av konsekvenser

Først analyseres konsekvensene for hver hendelseskjede. Deretter konstrueres et hendelsesforløp med tidsmarginer, og konsekvensene for hvert enkelt scenario vurderes.

Svikt av brannalarmanlegget kan oppstå når alle røykdetektorene i brannleilighet og i korridoren svikter, eller selve brannsentralen svikter. Byggverket består av mange detektorer og svikt av en røykdetektor vil ikke medføre svikt av hele anlegget. Mens ved svikt av brannsentralen kan hele systemet svikte. Sannsynligheten for at brannalarmanlegget svikter er 0,06. En svikt av brannalarmanlegget vil medføre lang varslings tid for beboere, samt sovende person(er) i leiligheten hvor brannen starter kan omkomme.

Svikt av sprinkleranlegget i høye byggverk kan medføre store, eller katastrofale konsekvenser. Ved svikt av sprinkler vil en brann spre seg raskt innenfor branncelle, og vertikalt mellom ulike etasjer. Som resultat av dette kan flere leiligheter få store materielle skader, og liv til flere personer utenfor brannleiligheten kan trues. Svikt av sprinkler vil også vanskeliggjøre brannvesenets innsats.

For en person i startbranncelle vil svikt av brannalarmanlegg og sprinkleranlegget representere et kritisk scenario hvor sannsynligheten for å overleve er svært liten.

Når en brannklassifisert dør mot korridoren er åpen, vil dette føre til røykfylling av korridoren. Eksponerte massivtreoverflater vil bidra til overflødig produksjon av brennbare gasser som vil fort fylle korridoren med røyk. Frekvens for at korridoren i analysebyggverket vil fylles med røyk er  $1,76 \times 10^{-7}$  ganger pr. år.

Dør mot trapperom har påmontert dørpumpe, og har dermed bedre pålitelighet enn dør uten Pumpe. Svikt i dørens funksjon kan medføre røykfylling av trapperom.

Siste barriere er brannvesenets håndtering av brannen. I byggverk med brennbare bærende konstruksjoner kan mislykket slokkeinnsats medføre konstruksjonskollaps. Personer som har valgt til å bli igjen i sine leiligheter kan omkomme. Dette scenario har potensiale for katastrofale konsekvenser.

Konsekvensene for brannscenarioene vurderes kvalitativt. På grunn av et komplisert menneskelig handlingsmønster ved brann, er det utfordrende å vurdere nøyaktig det antallet personer som kan omkomme i de forskjellige scenarioene. Det benyttes statistikk for dødsbranner i Norge, for å kunne vurdere antall omkomne. I 92,6 % av dødsbranner omkommer 1 person, 6 % av de omkomne ble funnet utenfor boenhet [56].

Hendelsesforløp i konsekvensanalyse fordeles på tidsintervaller for å kunne avgrense omfanget av analysen og medta kun de nødvendige aspekter som gjelder personsikkerhet. For klassifisering av konsekvens benyttes følgende marginer for personsikkerhet og materielle verdier [37]:

- 1-2 døde, skade for materielle verdier 2 – 20 mill kr. – stor konsekvens.
- Mindre enn 10 døde, skade for materielle verdier 20 – 200 mill kr. – svært stor konsekvens
- Flere enn 10 døde, skade for materielle verdier mer enn 200 mill kr. – katastrofal konsekvens.

### **Konsekvenser for personsikkerhet**

Konsekvensene for personsikkerhet presenteres i Tabell 19.

Tabell 19. Vurdering av konsekvenser for personsikkerhet

Scenario	Vurdering av konsekvenser
S4K	<p><b>0-5 min i brannforløp</b></p> <p>Det brenner i en leilighet i 4. etasje. Person er sovende i brannleiligheten. Brannalarmanlegg og sprinkleranlegg fungerer ikke. Det er forutsatt at personen omkommer ved rømningsforsøk på grunn av inhalering av kritisk dose av CO.</p> <p><b>5-8 min i brannforløp</b></p> <p>Døren til korridoren er åpen/feiler, og det tar ca. 1 min til at korridoren blir røykfylt slik at siktlengde er mindre enn 4 m ved 1,4 m høyde.</p> <p>Brannforsøk beskrevet i litteraturstudie tyder på at temperaturen i brannrommet kan stige opp til 500-600 °C på ca. 6 minutt. Denne temperaturen er tilstrekkelig for at vinduene knuses i brannleiligheten og flammene er synlige på utsiden av byggverket, dette samsvarer med brannforsøk i moduler utført av Frangi et al. [42]. Det har gått ca. 7-8 min før noen av beboere oppdager brann (røyklukt, synlig lukt på utsiden, glassknusing) i byggverket og varsler brannstasjon og andre bosatte.</p> <p>Personer i 4. etasje denne etasjen oppdager røyk i korridoren, og ringer 110-sentralen. De vil trolig få beskjed om å vente i sine leiligheter for redningsmannskap, og ikke rømme via røykfylt rømningsvei. På dette tidspunktet vil siktlengde i korridoren være svært dårlig. Når korridoren er røykfylt og sikten er mindre enn 3 m, vil de fleste velge å bli i sine leiligheter [57]. Ifølge statistikken i Norge var 6 % av omkomne funnet utenfor boenhet [56].</p> <p>For å kunne vurderer antall omkomne i korridoren benyttes statistikk som viser at i Norge var 6 % omkomne funnet utenfor boenhet. Ved en forutsetning at 23 pers. har potensiale å omkomme i etasjen, vil 6 % utgjøre 1 pers i korridoren.</p> <p>Mens 22 pers som ikke er direkte truet av røykgasser, blir i sine leiligheter.</p> <p><b>8-15 min i brannforløp</b></p> <p>Store eksponerte overflater medfører overflødig produksjon av brennbare gasser som forbrenner intensivt på utsiden. Etter 8-9 min knuses vinduene i en leilighet i etasjen over (5. etasje), antagelsen er basert på forsøk utført av Fragni [43]. Beboere i denne leiligheten, vil trolig høre at vinduene i underliggende etasje ble knust. Derfor vil beboerne evakuere seg før kritiske forhold oppstår. Døren til leilighet lukkes igjen, da personer har bedre tid for å forlate sin leilighet.</p> <p>Brannen har spredd seg til leilighet i 5. etasje.</p>

	<p><b>15-25 min i brannforløp</b></p> <p>Rømningen fra 1-3 og 5-8 etasje er avsluttet. 22 pers. i 4. etasje venter på brannmannskapets redningsinnsats.</p> <p>Brannmannskapet ankommer 17 min etter brannstart. På dette tidspunktet kan brannen omfatte to brannceller (leiligheter). Hver branncelle har et begrenset areal opp til 100 m<sup>2</sup>. Røykdykkere kan starte redning- og slokkingsarbeid.</p> <p>Konsekvensene for dette scenarioet kan være følgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 omkom, en fra brannleilighet og en ved rømningsforsøk. Tre leiligheter fikk skader som følge av brannen. Flere leiligheter kan få vannskader som følge av brannslukkingen.</li> </ul>
<p><b>S4Ka</b></p>	<p>Samme hendelsesforløp som i S4K, men brannmannskapet mislykkes med brannslukking. Dette kan skyldes brannens størrelse og hurtig brannvekst, bruk av feiltaktikk for brannslukking eller manglende innsatsstyrke.</p> <p>Brannmannskapet kan da benytte høyderedskap for redning av personer i 4. etasje og røykdykkerinnsats. En redningskurv kan ha plass for 4 personer og en brannmann. Hvis det benyttes ca. 10 min for å redning av 4 personer, vil brannmannskapet klare å redde de fleste personene i byggverket. Det kan oppstå situasjoner når brannvesenet ikke har tilgang til alle leiligheter på grunn av begrenset rekkevidde, eller begrenset tilgang til byggverket.</p> <p>Når brannvesenet har ikke maskinstige med en redningskurv, eller den ikke fungerer kan røykdykkere prioritere redning fremfor slokking og begrenning av brannspredning. Mannskapene må komme opp i korridoren i 4. etasje, prøve å hindre røykspredning til korridoren ved å luke døren til branncelle eller ved å skape overtrykk i korridoren ved bruk av røykvifte. Dette vil øke muligheten for å kunne redde folk fra 4. etasje.</p> <p>Dette scenarioet innebærer at bærende konstruksjoner kan styre sammen, og flere personer i 4. etasje kan omkomme, samt kan scenario medføre at personer eller brannmannskapet utenfor byggverket påføres alvorlige skader ved konstruksjonskollaps.</p> <p>Konsekvensene for dette scenarioet kan være følgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bærende konstruksjoner svikter, noe som kan medføre konstruksjonskollaps og konsekvenser for personer utenfor byggverket og brannmannskapet.</li> <li>- Opptil 10 pers. kan omkomme, hvis brannvesen ikke har tilgang til alle leiligheter.</li> </ul>
<p><b>S4T</b></p>	<p>Samme hendelsesforløp som i S4K, men døren til trapperommet er åpen.</p> <p><b>5-15 min i brannforløp</b></p> <p>Røyken vil spres oppover etasjene, og dermed hindre rømning fra overliggende etasjer, 5-8 etasje. Rømningen fra 1-3 avsluttes før kritiske forhold oppstår. Vinduer og balkonger fra disse etasjene kan benyttes.</p>

	<p>Etter ca. 300 - 350 s vil sikten i trapperommet være mindre enn 4 m forutsatt at døren til trapperommet er åpen. Kritisk sikt lengde vil oppstå før personer i 5 – 8 etasje klarer å rømme. Derfor vil mange bosatte velge å bli igjen i sine leiligheter. Personer som ringer 100-sentralen vil trolig få beskjed om å vente i sine leiligheter fremfor rømning via røykfylte rømningsveier.</p> <p>Person som bor i leiligheter over brannleilighet kan rømme til korridor hvis brannen sprer seg fra underliggende leilighet til etasjene over.</p> <p><b>15-25 minutter i brannforløp</b></p> <p>Det er 96 personer som befinner seg fra 5.-8. etasje. Det er en potensial at alle kan omkomme. I tilfelle når alle omkommer, vil 6 % av omkomne utenfor brannleilighet utgjøre 6 pers. Det forutsettes at 6 personer omkommer i trapperommet som følge av inhalering av kritiske doser av CO. I tillegg omkom to personer i delscenario S4K.</p> <p>Brannmannskapet ankommer 17 min etter brannstart. På dette tidspunktet kan brannen omfatte to-tre leiligheter.</p> <p>Som modelleringene viser vil temperaturen i trapperommet vil ikke overstige 100 °C. Brannen kan slokkes ved røykdykkerinnsats og utvendig slokking.</p> <p>Konsekvensene for dette scenarioet kan være følgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Totalt kan opptil 10 pers omkomme.</li> </ul>
<p><b>S4Ta</b></p>	<p>Samme hendelsesforløp som i S4T, men brannmannskapet mislykkes med brannslukking. Dette kan skyldes brannens størrelse og hurtig brannvekst, bruk av feiltaktikk for brannslukking.</p> <p>Røykdykkerinnsats kan benyttes for redning av personer fra 5-8 etasjer. Røykdykkere kan lukke dør mellom korridor som er forbundet med brannleilighet, og trapperom. Dette vil hindre røykspredning til trapperom. Trapperommet kan røykventileres ved bruk av tilluftsvifte ved inngangsplan og røykluke i toppen av trapperommet. Dette vil medføre brukbare forhold for rømning via trapperommet, og personer fra 5 - 8 etasje kan reddes.</p> <p>Brannmannskapet kan også benytte høyderedskap for redning av personer i 4. etasje og røykdykkerinnsats. En redningskurv kan ha plass for 4 personer og en brannmann. Hvis det brukes ca. 10 min for å redning av 4 personer, vil brannmannskapet klare å redde 24 pers i løpet av 60 min. Det kan oppstå situasjoner når brannvesenet ikke har tilgang til alle leiligheter på grunn av begrenset rekkevidde, eller begrenset tilgang til byggverket.</p> <p>Mislykket slokkeinnsats vil medføre kollaps av byggverkets bærende konstruksjoner. Personer som ikke ble reddet av brannmannskapet i 4-8 etasje kan omkomme.</p> <p>Konsekvensene av dette brannscenarioet kan være følgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bærende konstruksjoner svikter, noe som kan medføre konstruksjonskollaps.</li> <li>- Antall omkomne ved rømningsforsøk er tilsvarende som i brannscenario S4T (6 pers) og S4K (2 pers). I tillegg til det kan flere personer omkomme ved konstruksjonskollaps.</li> <li>- Forventet konsekvens mer enn 10 omkomne.</li> </ul>

### **Vurdering av konsekvenser for materielle verdier**

Økonomisk tap for reparasjonsarbeider er avhengig av markedspris for kvm. For å kunne beregne økonomisk tap ved brann benyttes gjennomsnittspris 41 000 kr. pr. kvm. bolig i Norge [64].

For scenarioene S5-S8 når sprinkleranlegget svikter og brannmannskapet slokker brannen kan konsekvensene være følgende:

- Brannvesen får varsel om brann mellom 3-7 minutter. Dette er avhengig om funksjon av brannalarmanlegg og om person er tilstede eller ikke. Det vil trolig oppstå overtenning i løpet av 8 minutter i en leilighet med eksponert massivtre. Forsøkene tyder på at overtenning vil oppstå raskere i byggverk av massivtre og tiden til overtenning i et lite rom er ca. 5 min. På grunn av leilighetsstørrelse kan overtenning forsinkes til 6-7 minutter. Brannvesen har innsatstid maks 10 min. De ankommer ca. etter 17 min. Brannleiligheten på dette tidspunktet vil være overtent, og brannen vil trolig spre seg til overliggende etasje innenfor 15 minutter. Antagelsen er basert på forsøk utført av Fragni [42]. Det vil være konservativ å forutsette at brannen kan omfatte opp til tre leiligheter når brannvesen starter med slokkingsinnsats. Som resultatet av disse scenarioene vil leilighetene være totalskadd. Økonomisk tap for tre leiligheter med størrelse mellom 50-100 m<sup>2</sup> kan være mellom 2-20 mill. kr.

Når brannvesen mislykkes med brannslukking i scenarioene S5a-S8a, vil byggverket styre sammen. For byggverk i 8 etasjer med 1200 m<sup>2</sup> pr. etasje, vil disse scenarioene medføre katastrofale konsekvenser med økonomisk tap over 200 mill. kr.

### **5.3.10 Usikkerhets- og sensitivitetsanalyse**

Data som benyttes for driftspålitelighet av ulike barrierer i analysen er basert på statistikk som er samlet fra ulike byggverk og fra ulike land. For eksempel, sannsynlighet at en brannklassifisert dør er åpen – 30%. Dette er en generell sannsynlighet uansett byggverk. I kontorbygg, skoler, barnehager, butikker og lignende, er det mer sannsynlig at en brannklassifisert dør står åpen ved brann, enn det er i en leilighet. Antagelsen at brannklassifisert dør mot korridor kan svikte er konservativ.

For sprinkleranlegg ble det benyttet generell driftspålitelighet for vått anlegg. Sprinkleranlegg prosjektert og utført etter NS EN 12845 med tillegg F forventes å ha minst like høy pålitelighet som andre våte anlegg. I boligbyggverk er det preakseptert å benytte sprinkleranlegg etter standard NS-INSTA 900 [11]. Denne standarden tillater å ha inntil 37 m<sup>2</sup> pr. sprinklerhode [65], mens sprinklerhode etter NS 12845 kan dekke maks 12 m<sup>2</sup> [52]. Dette øker sannsynlighet at sprinkleranlegg prosjektert etter NS 12845 kan utløse tidligere enn boligsprinkler, og kan ha bedre treffsannsynlighet på grunn av flere sprinklerhoder pr. kvm. Dessuten utløser Tillegg F i NS-EN 12845 krav om forbedret vannforsyning. Det vil si at vannledning skal være forsynt fra minimum to sider, to uavhengige vannkilder [52]. I praksis bør driftspålitelighet være høyere for anlegg prosjektert etter NS 12845 enn boligsprinkler etter NS-INSTA 900. Dette er på grunn av høyere vanntetthet, bedre dekningsgrad pr. sprinklerhode, strengere krav til sprinklet og usprinklet område og tosidig vanntilførsel [52].



Det er stor usikkerhet når det gjelder menneskets handlingsmønster ved brann. Om en person velger å rømme via røykfylt korridor, eller blir i sin leilighet er det vanskelig å anslå. For å ivareta disse usikkerheter ble det antatt at 6 % av bosatte i etasjen, eller i byggverket kan omkomme i rømningsveien. Dette basert på statistikk fra dødsbranner i Norge [56]. I analysen forutsettes det at mange personer velger å bli igjen i sine leiligheter, om det er 30 eller 50 personer utgjør ikke en stor betydning for resultater, da anses konsekvensene som katastrofale når det er flere enn 10 omkomne [37]. Antall omkomne er grovt vurdert, med tanke på verste mulige brannscenarioet.

Det er også en usikkerhet knyttet til brannfrekvensen. Frekvens i brannstatistikk angis som antall branner i bolig. Det skilles ikke mellom eneboliger, rekkehus, boligblokker o.l. Analysebyggverk består av 96 leiligheter. Sannsynligheten for at en brann kan oppstå i en av disse leilighetene bør være høyere enn brannfrekvens for tomannsbolig. For å ivareta denne usikkerheten ble det brukt frekvens for at brann oppstår 1 gang pr. år. Denne brannfrekvensen ble benyttet i brannscenarioene hvor personsikkerhet vurderes. I brannscenarioene for materielle verdier ble det brukt statistisk brannfrekvens.

Det ble vurdert flere verst trolige scenarioer i analysen, og dermed kan man si at usikkerhetene er godt ivaretatt.

Når det gjelder sensitivitetsanalyse, vil endring i sannsynlighet for inngangshendelsene medføre endring av sannsynlighet/frekvens for hendelseskjede. Barrierene, som kan medføre store endringer for frekvens med katastrofale og store konsekvenser, er brannvesenets innsats og funksjon av sprinkleranlegg. Økt sannsynlighet for svikt av andre barrierer vil medføre mindre konsekvens.

For å vurdere hvilke endringer av sannsynlighet vil inngangssannsynlighet medføre, økes feilratene med 50 % for svikt av sprinkleranlegg og mislykket brannvesenets innsats. 50 % økning i feilratene vurderes som tilstrekkelig, da det anbefales 20 % eller større [37]. Resultatene representeres i beskrivelse av risiko.

### 5.3.11 Beskrivelse av risiko

I denne fasen sammenstilles frekvenser og konsekvenser for hvert brannscenario. Disse er presentert i tabell under. For scenarioene S5-S8 og S5a-S8a presenteres kumulativ frekvens.

*Tabell 20. Oppsummering av frekvenser og konsekvenser for hvert scenario, og akseptkriterier.*

Scenario	Frekvens (ganger pr. år)	Konsekvens
<b>S4Ta</b>	$7,1 \times 10^{-6}$ <sup>a)</sup>	Mer enn 10 omkomne.
<b>S4Ka</b>	$2,4 \times 10^{-5}$ <sup>a)</sup>	Opptil 10 omkomne.
<b>S4T</b>	$7,1 \times 10^{-5}$ <sup>a)</sup>	3-10 omkomne.
<b>S4K</b>	$2,4 \times 10^{-4}$ <sup>a)</sup>	1 – 2 omkomne.
<b>S5-S8</b>	$1,5 \times 10^{-5}$ <sup>b)</sup>	Store konsekvenser med økonomisk tap 2 – 20 mill. kr.

<b>S5a-S8a</b>	$1,6 \times 10^{-6}$ <sup>b)</sup>	Katastrofale konsekvenser med økonomisk tap mer enn 200 mill. kr.
----------------	------------------------------------	---

<sup>a)</sup> – inngangsstørrelse for brannfrekvens benyttes 1 gang pr. år.

<sup>b)</sup> – benyttes statistisk brannfrekvens for at en brann kan oppstå i et tilfeldig boligbyggverk i løpet av ett år.

Selv om konsekvensene i form av antall omkomne er grovt vurdert, viser analysen at hendelser med katastrofale konsekvensene kan oppstå.

For å ivareta usikkerheter og vurdere følsomhet av ulike barrierer kan sannsynlighet for mislykket brannmannskapets innsats økes med 50 %, og svikt for sprinkleranlegg økes med 50 %. Endring av sannsynligheter for svikt viser at sannsynlighet/frekvens for katastrofale konsekvenser er lik når feilrate for svikt av sprinkleranlegg økes, eller feilrate for mislykket brannvesenets innsats økes. Mens sannsynlighet for store konsekvenser (mindre enn 10 omkomne) er høyere når feilrate for svikt av sprinkleranlegget økes. Derfor vil økning i driftspålitelighet av sprinkleranlegget redusere frekvens for store og katastrofale konsekvenser, mens økt sannsynlighet for vellykket slokking har konsekvensreducerende effekt kun for katastrofale konsekvenser.

Brannscenario S4Ka med katastrofale konsekvenser for materielle verdier på grunn av konstruksjonskollaps har frekvens  $2,4 \times 10^{-5}$  pr. år i analysebyggverket. Dette betyr at dette scenarioet kan oppstå 2,4 ganger pr. 100 000 år i analysebyggverk hvis det brenner en gang pr. år i dette byggverket.

Brannscenarioet S4Ta med katastrofale konsekvenser for mennesker har frekvens  $7,1 \times 10^{-6}$  hendelser pr. år. Det vil si at dette scenarioet kan oppstå 7,1 ganger pr. 1 000 000 år i analysebyggverket hvis det brenner en gang pr. år.

## 5.4 Risikoevaluering

Identifisert risiko i analysen sammenlignes med på forhånd definerte akseptkriterier i en risikomatrise som lages for hver konsekvenskategori: materielle verdier og mennesker.

### ***Personsikkerhet***

Brannscenarioet S4Ka representerer svært store konsekvenser for mennesker, mens brannscenarioet S4Ta representerer katastrofale konsekvenser for mennesker.

Sannsynlighet for at disse hendelsene vil inntreffe, er lavere enn det som er svært lite sannsynlig i risikomatrise, og dermed ligger scenarioene utenfor risikomatrisen. Hvis en brann oppstår i analysebyggverket en gang pr. år vil hendelse S4Ka inntreffe  $2,4 \times 10^{-5}$  ganger pr. år, mens hendelsen S4Ta vil inntreffe  $7,1 \times 10^{-6}$  pr år.

Det må huskes at det ble lagt en forutsetning i analysen at brannen er blitt initiert i analysebyggverk, og frekvensen som ble benyttet er brann 1 gang pr. år i analysebyggverket, som er mye høyere enn det som brannstatistikk tilsier.

Frekvens	Konsekvens for mennesker				
	1 – liten	2 – middels	3 – stor	4 – svært stor	5 – katastrofal
5 – svært sannsynlig					
4 – ganske sannsynlig					
3 – sannsynlig					
2 – lite sannsynlig					
1 – svært lite sannsynlig			<b>S4K</b>		
Mindre enn 1 gang pr. 1000 år					
Analysebyggverk				<b>S4Ka, S4T</b>	
Mindre enn 1 gang pr. 10 000 år					
Analysebyggverk					<b>S4Ta</b>
Mindre enn 1 gang pr. 100 000 år					

Figur 38. Risiko ved en forutsetning at brannen oppstår minst 1 gang pr. år i analysebyggverket.

For brannscenarioene S4K og S4T er risikoen akseptabel for mennesker. Brannscenarioet S4Ta er plassert i gult området fordi det er en usikkerhet om risikoer med katastrofale konsekvenser for mennesker kan aksepteres når sannsynligheten for denne hendelsen er så lavt.

Frekvensen for at hendelsen S4Ta vil inntreffe er  $7,1 \times 10^{-6}$ . Hvis det bygges 1000 analysebyggverk i Norge, og det brenner i hvert av dem en gang pr. år vil frekvensen for hendelsen med katastrofale konsekvenser for personsikkerhet være 7,1 ganger pr. 1000 år. Hvis man benytter inngangsparameter for brannfrekvens fra historisk data for antall branner pr. år i boligbyggverk, vil hendelsen med katastrofale konsekvenser oppstå enda sjeldnere. Til sammenligning bygges det ca. 800 boligblokker med 5-9 etasjer pr. år uansett type bærende konstruksjon (brennbar eller ubrennbar) i perioden mellom 2010-2017 [53].

Dersom risikoen sammenlignes med preaksepterte byggverk med opptil 8 etasjer kan det konkluderes at analysebyggverk har lavere risiko for hendelser med store og svært store konsekvenser. Grunnet til dette er forsterket sprinkleranlegg, korridor mellom trapperom og leiligheter som ikke er et krav i preaksepterte byggverk.

Når analysebyggverket utføres med tiltakene nevnt i analysen, er sannsynlighet akseptabel for katastrofale konsekvenser for personsikkerhet, selv om man ser på risiko i langsiktig perspektiv.

### Materielle verdier

Risiko for materielle verdier vil ligge utenfor frekvensklassifiseringer i risikomatrix. En av brannscenarioene S5-S8 kan oppstå i analysebyggverk  $2,4 \times 10^{-5}$  ganger pr. år. En av brannscenarioene S5a-S8a kan oppstå  $1,6 \times 10^{-6}$  ganger pr. år.

Ifølge risikomatrixen kan risikoen vurderes som akseptabel for analysebyggverket. Dersom man ser på risiko i et langsiktig perspektiv når det bygges f.eks. flere tusen boligbyggverk i massivtre vil risikoen øke for disse hendelsene.

I gjennomsnitt bygges det ca. 800 høye boligbyggverk pr. år i Norge [53]. Data tar ikke hensyn til brennbarhet av konstruksjonen, men det kan forutsettes at mer enn 98 % av høye boligblokker bygges i ubrennbare konstruksjoner. Hvis denne utviklingen snur seg, og det vil bygges 200 (25%) høye boligbyggverk pr. år i massivtre, kan risikoen for 50 år framover aksepteres?

For å kunne vurdere risikoperspektiv kan det forutsettes at det bygges 10 000 analysebyggverk i løpet av 50 år, det vil si 200 høye boligbyggverk i massivtre pr. år. Frekvensen for at brannscenario med store konsekvenser for materielle verdier kan oppstå i et tilfeldig boligbyggverk av 10 000 er:

$$F_{S5-S8}(1 \text{ av } 10000) = F_{S5-S8} * 10000 = 1,48 \times 10^{-5} \times 10^4 = 1,5 \times 10^{-1} \text{ ganger pr. år}$$

Dette betyr at brannscenario  $F_{S5-S8}$  med store konsekvenser kan oppstå 1,5 ganger pr. 10 år i ett tilfeldig utvalgt byggverk av 10000 boligbyggverk.

Brannscenario med konstruksjonskollaps i et av 10 000 tilfeldig utvalgte analysebyggverkene vil være

$$F_{S5a-S8a}(1 \text{ av } 10000) = F_{S5a-S8a} * 10000 = 1,6 \times 10^{-2} \text{ ganger pr. år}$$

Dette betyr at en av brannscenarioene  $F_{S5a-S8a}$  kan oppstå 1,6 ganger pr. 100 år.

Frekvens	Konsekvens for materielle verdier				
	1 – liten	2 – middels	3 – stor	4 – svært stor	5 – katastrofal
5 – svært sannsynlig					
4 – ganske sannsynlig 1 gang pr. 1 - 10 år			<b><math>F_{S5-S8}(1 \text{ av } 10000)</math></b>		
3 – sannsynlig 1 gang pr. 10-100 år					<b><math>F_{S5a-S8a}(1 \text{ av } 10000)</math></b>
2 – lite sannsynlig					
1 – svært lite sannsynlig Mindre enn 1 gang pr. $10^3$ år					
Analysebyggverket Mindre enn 1 gang pr. $10^4$ år			<b>S5-S8</b>		

Analysebyggverket					<b>S5a-S8a</b>
Mindre enn 1 gang pr. 10 <sup>5</sup> år					

Figur 39. Risikomatrix for materielle verdier

Dersom risiko i et langsiktig perspektiv ikke kan aksepteres av samfunnet må kostnadseffektive risikoreducerende tiltak vurderes.

Dersom man velger å sammenligne risiko i analysebyggverket med et byggverk i henhold til preaksepterte ytelser, vil sannsynlighet være lavere for brann med store og svært store konsekvenser for materielle verdier i analysebyggverket. Dette skyldes forbedret sprinkleranlegg som har høyere driftspålitelighet. Dette betyr at brannen vil oftere være kontrollert i byggverk av massivtre sammenlignet med preaksepterte byggverk som har tradisjonelle boligsprinkler. Fare for vertikal brannspredning i analysebyggverket vil også være lavere enn i en preakseptert bygning, hvor leiligheter har trekledning innvendig. Når det gjelder sannsynlighet for katastrofale konsekvenser for materielle verdier, vil den være høyere i analysebyggverket enn i referansebyggverket som kan i teorien motstå fullstendig brannforløp.

#### 5.4.1 Identifisering av mulige tiltak

Dersom brannrisiko ikke kan aksepteres i et langsiktig perspektiv, må kostnadseffektive risikoreducerende tiltak vurderes. Følgende tiltak kan være konsekvensreducerende for brannscenarier med katastrofale konsekvenser for materielle verdier:

Tabell 21. Forslag for risikoreducerende tiltak

Tiltak	Beskrivelse av effekten	Fordeler	Ulemper
Økt pålitelighet av sprinkleranlegg	Halvparten av alle feilene i sprinkleranlegg skyldes stengt av vanntilførsel. Bedre merking av sprinklerventiler, krav om hyppigere kontroll av sprinkleranlegget og begrenset tilgang til sprinklerrommet kan redusere sannsynligheten for svikt av sprinkleranlegg [51].	Brannen vil slokkes/kontrolleres oftere. Statistisk driftspålitelighet og effektivitet av sprinkleranlegget prosjektert etter NS-EN 12845 kan økes til 98-100 %. Økt pålitelighet vil redusere sannsynlighet både for store, og katastrofale konsekvenser.	Tiltaket medfører veldig lite kostnader.
Sette krav om plassering av byggverket.	Risiko for mislykket innsats innenfor 90 minutter kan reduseres når byggverket plasseres i et tettsted med flere brannstasjoner som kan assistere hverandre ved innsats.	Brannen vil slokkes av brannvesen med sannsynlighet opp til 100 %.	Begrenser muligheter for bruk av byggverket i ulike deler av landet.

<p>Sette krav om kjølesoner:</p> <p>-Krav om vertikal avstand mellom vinduer/dører i ulike plan, eller</p> <p>-krav om annenhver fasade med brannmostand minst E30, eller</p> <p>-utkragede/inntrukne bygningsdeler 1,2 m fra fasadelivet.</p>	<p>Tiltakene gjelder for byggverk uten krav om sprinkleranlegg [11].</p> <p>Ved svikt av sprinkleranlegg vil et av tiltakene redusere sannsynlighet for en hurtig brannspredning mellom etasjer. Derfor vil det være lettere for brannvesen å håndtere brannen i tilfelle når sprinkleranlegget svikter.</p> <p>Tiltakene kan kombineres. Åpningsbare vinduer på soverom kan begrenses til en størrelse f.eks. 1,2 x 1,2 m<sup>2</sup> for å oppnå tilstrekkelig vertikal avstand mellom vinduer i ulike plan. I andre rom med store glassflater kan benyttes brannklassifiserte vinduer/dører.</p> <p>Forsøkene utført av Fragni [43] viser at brannen ikke har spredd seg til overliggende etasje når avstanden mellom vinduer i ulike plan var 1,8 - 2 m.</p>	<p>Begrenses brannstørrelse innenfor en leilighet i en viss tid, hindrer vertikal brannspredning, og dermed reduseres brannskader.</p> <p>Lettere for brannvesen å kontrollere og slokke brannen i en branncelle.</p> <p>Ingen økonomisk kostnad i byggverk uten store glassflater/vinduer.</p>	<p>Bruk av brannklassifisert glass E 30 i boligbyggverk kan være vanskelig på grunn av krav at brannklassifiserte vinduer skal ikke være åpningsbare.</p> <p>Kostnadsdrivende tiltak i boligbyggverk med høye vinduer/store glassflater.</p>
<p>Tildekning av treoverflater</p>	<p>Forsøkene studert i oppgaven viser at brann i et rom med normal brannenergi vil gå i avkjølingsfase når overflatene er tildekket.</p> <p>Ved tildekning av 85 % av overflatene med to gipsplater kan avkjølingsfase og selvslukking oppnås [38].</p> <p>Flere forsøk tyder på at det er tilstrekkelig med to lag branngipsplater med 12,5 mm for å hindre forkulling i massivtre [38].</p> <p>Forsøkene utført av Fragni [43] og Hakkarainen [44] viser branngipsplate 12 mm – 15,4 mm kan kombineres med standardgipsplate 12,5 mm for å beskytte massivtre gjennom fullt utviklet brann.</p>	<p>Massivtre vil ha minimalt bidrag til brannforløpet.</p> <p>Lettere for brannvesen å slokke brannen.</p> <p>Brannen vil gå i avkjølingsfase og selvslukke når brannvesen ikke kommer på grunn av problemer med brannbil, eller kjører ut fra veien på vinterstid, eller havner i en bilulykke, eller opptatt med andre oppdag.</p>	<p>Kan være vanskelig å regulere nøyaktig 85 %. Derfor bør kravet stilles at alle overflater tildekkes.</p> <p>Kostnadsdrivende tiltak.</p> <p>Tildekning begrenser arkitektoniske og estetiske muligheter for bruk av synlige treoverflater.</p>

Det finnes også tiltak som ikke har direkte konsekvensreducerende funksjon for materielle verdier, men vil redusere brannspredning eller redusere tiden for brannvarsling. F.eks. brannsentral som behandler

signaler fra røykdetektorer og manuelle meldere. Ved røykdeteksjon sendes signal videre til alarmklokke/sirener. Brannsentral er en viktig komponent og svikt av sentralen kan medføre svikt i hele anlegget. Hvis alarmklokker/sirener kan aktiveres manuelt, uavhengig av funksjonerende brannsentral, vil dette øke sannsynlighet for at alle blir varslet, og dermed redusere nødvendig rømningstid.

Det kan gjennomføres organisatoriske tiltak i form av rømningstrening ved brann og informering av bosatte i boligblokker. Følgende informasjon bør formidles av borettslaget i høye boligbyggverk:

- Utført analyse viser at det er bedre å bli igjen i sine leiligheter når rømningsveiene er røykfylt. Sjansene å overleve er høyere enn å rømme via røykfylt rømningsvei med begrenset siktlengde.
- Ved rømningsforsøk fra brannleilighet må bosatte huske på å lukke igjen døren som leder til korridor, trapperom. Andre bosatte i samme etasje kan lukke døren igjen til brannleilighet hvis forholdene tillater det.

Dersom man kan forutsette at brannmannskapet alltid vil komme for brannsløkking, kan man beskytte brennbare konstruksjoner slik at disse ikke bidrar til brannutvikling i den tiden som er nødvendig for innsatsstyrken til å igangsette slokkingsarbeid. Dette vil hindre hurtig brannutvikling og brannspredning til andre boenheter, samt vil gjøre lettere slokkingsarbeid.

Innsatstiden i tettbebyggelse skal ikke overstige 10 min [66]. Det vil si at ved tidlig varsling vil brannmannskapet være på brannstedet etter ca. 13-15 min. For å håndtere usikkerheter om varslingstid, føreforhold o.l. kan det benyttes en sikkerhetsmargin i form av beskyttelse av trevirke mot forkulling i lengre tid enn 15 min. Løsninger som benyttes for å ivareta lydkravene kan kombineres med tildekning av resterende vegger/himling. På grunn lydkravene bygges skillevegger og etasjeskillere med tilleggskonstruksjon. Disse konstruksjonene kan bestå av stål- eller trestenderverk med 2 x 13 mm standardgipsplater og isolasjon 50 – 150 steinull. Skillevegger kan dekke 2/5 del av omsluttende overflater i en boenhet. Resterende omsluttende vegger kan tildekkes med branngipsplater 15 mm eller 2x12,5 mm standardgipsplater type A montert direkte mot massivtre. Ifølge beregningsmetoder angitt i Eurokode 5 [24] kan 2x12,5 mm gipsplater type A beskytte trekonstruksjon mot forkulling i 29 min, mens 15 mm branngipsplate type F kan beskytte trekonstruksjon mot forkulling i 28 min. Innsatsstyrken vil ha 28 min tilgjengelige før bærende konstruksjoner av massivtre vil bidra til brannen i en leilighet.

## 5.5 Konklusjon

Utført risikoanalyse for analysebyggverket på 8 etasjer viser at byggverket av massivtre kan representere en akseptabel brannrisiko for mennesker. Det er fortsatt mulig at brannscenarioene med katastrofale konsekvenser oppstår, men sannsynlighet for disse er veldig liten i analysebyggverket.

Når det gjelder brannrisiko for materielle verdier, kan brannrisikoen være akseptabel for analysebyggverket. Den er dog ikke akseptabel i et langsiktig perspektiv, f.eks. for tusentalls av boligblokker designet som analysebyggverket. Derfor må flere tiltak vurderes for å håndtere usikkerhetene knyttet til framtidige hendelser. Nødvendige tiltak bør reguleres ved å innføre preaksepterte løsninger, i veiledningen om tekniske krav til byggverk, som gjenspeiler akseptabelt brannsikkerhetsnivå for høye byggverk av trekonstruksjoner.

## 6. Diskusjon

Hensikten med litteraturstudie var å undersøke hvordan en brann vil utvikle seg i et rom med eksponert massivtre og hvilke konsekvenser en brann kan medføre. Resultatene fra litteraturstudie drøftes i kapittel 6.1, mens i kapittel 6.2 drøftes resultater fra risikoanalysen sammen med funnene i litteraturstudie.

### 6.1 Diskusjon-litteraturstudie

#### 6.1.1 Forkullingshastighet og bidrag til brannforløpet

##### **Forkullingshastighet**

Analyserte forskningsartikler viser at forkullingshastigheten i naturlig brannforløp er lav i starten, så øker den i brannvekstfasen og holder seg mellom 0,8 – 1 mm/min ved full utviklet brann.

Gjennomsnittlige forkullingshastigheter i studerte brannforsøkene varierte mellom 0,69 og 1 mm/min, avhengig av prosent eksponert massivtre og initierende brannenergi i brannrommet. Li et al. [38] registrerte gjennomsnittlig forkullingshastighet 0,85 mm/min i løpet av 40 min, og 1 mm/min etter 60 min når massivtre var eksponert i alle vegger og himlingen.

Forkullingshastigheten er avhengig av antall eksponerte massivtre overflater i brannrommet, og posisjonering av overflater i forhold til hverandre.

Når to overflater av massivtre var eksponert i et brannrom, varierte temperaturen ved fullt utviklet brann mellom 800 – 1100 °C. Dette kommer fram fra forsøkene beskrevet av Li et al. [38] og Hadden et al. [45]. Følgende faktorer medførte temperaturendringer i brannrommene ved fullt utviklet brann [38], [45]:

- Brannene var ventilasjonskontrollerte.
- Dannet forkullet lag virket isolerende, og dermed var produksjon av brennbare gasser fra trevirke redusert. Dette førte til reduksjon i temperaturen.
- Forkullet lag falt av, eller delaminering oppstod noe som medførte at temperaturen ble økt i brannrommet.

Forkullingshastigheten i gjennomsnitt varierte mellom 0,69 – 0,86 mm/min når minst to overflater av massivtre var eksponerte. Li et al. [38] har registrert at gjennomsnittstemperatur var lavere, når det var eksponert to tilstøtende vegger sammenlignet med forsøk hvor to motstående vegger var eksponerte. Dette kan skyldes gjensidig strålingspåvirkning mellom motstående overflater. Delaminering og sekundær overtenning har oppstått tidligere når motstående massivtreflater var eksponerte.

I forsøkene med tre og flere eksponerte overflater var gjennomsnittstemperatur høyere i brannrommet sammenlignet med forsøk med to eksponerte overflater. Temperaturen i disse forsøkene varierte seg mellom 1100 – 1200 °C ved fullt utviklet brann. Nedkjølingsfase ble ikke registrert. Gjennomsnittlig forkullingshastighet var ca. 1,00 mm/min [38], [45].



Høy forkullingshastighet skyldes delaminering av massivtreet. Når lameller faller av blir nytt, ferskt trevirke eksponert og temperaturen i brannen økes og sekundær overtenning kan oppstå. Dette ble observert i forsøkene beskrevet av Hadden et al. [45] Hakkarainen [44] og Li et al. [38].

Hadden et al. [45] og Emberley et al. [46] beskriver brannforsøk som var utført under like forhold. Variabel brannenergi, ventilasjonsfaktor og antall eksponerte vegger var like i forsøk beta 1-2 og brannforsøk beskrevet av Emberley et al. [46]. Forskjellen mellom brannforsøkene var tykkelse av første lamell. Hadden et al. [45] hadde 20 mm tykke lameller, mens Emberley et al. [46] hadde første lamell på 45 mm. Avkjølingsfase og selvsløkking ble oppnådd ved bruk av tykkere lamell. Det er fordelaktig å benytte tykkere lameller for å redusere fare for delaminering og oppnå avkjølingsfase. Tykkere lameller vil beholde det forkullede laget på overflaten i lengre tid. Dette vil bremse innbrenningshastigheten i massivtreet.

Ovennevnte observasjoner fra ulike brannforsøkene kan drive oss fram til følgende antagelser:

- Forkullingshastighet er direkte knyttet til temperatur i rommet som er avhengig av variabel brannenergi og energi som avgis fra eksponerte treoverflater.
- I et rom med normal variabel brannenergi (under 400 MJ/m<sup>2</sup>) kan man operere med ulike verdier for gjennomsnittlig forkullingshastighet i løpet av 60 min brannforløp. Avhengig av prosent av eksponert overflate kan forkullingshastighet være:
  - o I rom med mindre enn 15 % eksponert massivtre kan det forventes at gjennomsnittlig forkullingshastighet ikke vil overstige 0,80 mm/min.
  - o I rom med mindre enn 30 % eksponert massivtre kan det forventes at gjennomsnittlig forkullingshastighet ikke vil overstige 0,90 mm/min.
  - o I rom med mer enn 30 % eksponerte overflater av massivtre kan det forventes at gjennomsnittlig forkullingshastighet ikke vil overstige 1,0 mm/min.

Eurokode 5 for brannteknisk dimensjonering av trekonstruksjoner angir en generell forkullingshastighet 0,65 – 0,8 mm/min som kan benyttes for branndimensjonering av bærende trekonstruksjoner [24]. Bærende konstruksjoner av massivtre med dokumentert brannmotstand (R) etter standard brannkurve (ISO 834) eller i henhold til Eurokode 5 [24] med gjennomsnittlig forkullingshastighet 0,65 – 0,8 mm/min, vil trolig ikke oppfylle brannmotstanden de er beregnet for. Temperaturen som massivtre utsettes for ved testene etter ISO 834 er lavere enn temperatur ved naturlig brannforløp. Dette medfører at forkullingshastigheten vil også være lavere når konstruksjoner testes etter standardbrannkurve. Derfor bør prosjekterende ingeniør innen konstruksjonsteknikk innhente informasjon hvilke metoder som ble brukt for beregning av det effektive tverrsnittet for brannmotstand (R), og vurdere om metodene er relevante for bruken av konstruksjonen i forhold til brannenergi i rommet og antall eksponerte flater.

Det er identifisert manglende forskning hvor det utføres storskala forsøk på massivtre med ulik fuktinnholdet. Ved lavere fuktinnhold i trevirke vil forkullingshastigheten være høyere [25]. Fuktinnholdet vil variere med årstiden, og brann om vinteren kan medføre høyere forkullingshastighet enn f.eks. brann om sommer da fuktnivået i omgivelsene er høyere. For å håndtere denne usikkerheten bør det innføres sikkerhetsmargin for beregning av forkullingshastighet for massivtre.

### ***Bidrag til brannutvikling***

Det kan observeres fra flere forsøk at overtenning skjer raskere i rom med eksponerte overflater enn i gipskledde rom. I brannforsøket med eksponerte overflater av massivtre har Li et al. [38] registrert tid til overtenning 5 min. Overteningen oppsto 33 % raskere enn i forsøk med gipskledde overflater. I forsøkene utført av Hakkarainen [44] var forskjellen 1 min og 10 s, ca. 19,4 % i tiden til overtenning mellom forsøk med eksponerte og gipskledde overflater. I forsøk utført av Frangi et al. [42] førte brennbare kledninger til raskere vertikal brannspredning til overliggende etasje. Når modulene var sprinklet hadde brennbare overflater ingen effekt på funksjon av sprinkleranlegget, skade på brennbar kledning var neglisjerbar.

Li et al. [38] beskrev at total varmeavgivelseshastighet (målt innvendig og utvendig) med eksponerte KLT i vegger og himlingen var 80 % høyere sammenlignet med gipskledde rom. Varmeavgivelseshastighet øker med økt eksponert areal av massivtre [38]. Bidraget fra eksponerte overflater av massivtre kan observeres tydelig ved fullt utviklet brann.

Store eksponerte overflater av massivtre medfører at brannrommet blir overfylt med produkter fra pyrolyse og ufullstendig forbrenning som medfører til intensiv utvendig forbrenning [38], [44]. Når eksponert areal begrenses til 15-30 % av omhyllingsflate, vil varmeavgivelseshastighet være tilnærmet lik med rom av ubrennbare materialer med normal brannenergi [38]. Dette kan observeres i brannforsøk med to eksponerte tilstøtende massivtrevegger, og i brannforsøk med en eksponert massivtrevegg.

Det er funnet ut at fall av forkullet lag og delaminering kan medvirke til sekundær overtenning og høye temperatur variasjoner. Sekundær overtenning som følge av delaminering oppstår i brannforsøk med eksponerte trekonstruksjoner beskrevet av Li et al. [38].

Bruk av tykkere lameller kan redusere fare for delaminering og fall av forkullet lag, dermed redusere bidrag fra KLT til brannforløpet. Dette gjelder spesielt den første lamellen som utsettes for brannpåkjenning. Effekten av ulike lamellstykkelser kan godt observeres i forsøkene utført av Hadden et al. og Emberley et al. Hadden et al. [45] benyttet KLT med 20 mm tykke lameller, mens Emberley et al. [46] hadde KLT med 45 mm tykkelse til første lamell som var eksponert. Forsøkene hadde likt oppsett, tilnærmet lik brannenergi og lik åpningsfaktor. I begge forsøkene var en vegg og himling eksponert. Nedkjølingsfase ble oppnådd i forsøk utført av Emberley et al. [46]. Hadden et al. [45] utførte to forsøk med samme oppsett, men nedkjøling ble oppnådd bare i en av dem.

Det er tydelig at eksponerte overflater av massivtre har innvirkning på brannforløpet, bidrar med brannenergi, øker varighet av fullt utviklet brann og medfører fare for hurtigere vertikal brannspredning sammenlignet med gipskledde rom.

Som er nevnt tidligere er det mangel på brannforsøk hvor massivtre i brannrommet har ulikt fuktinnhold. Redusert fuktinnhold kan resultere at overtenning oppstår raskere i rommene av massivtre og at forbrenningen opprettholdes selv om eksponert areal av massivtre begrenses. Det er derfor vanskelig å trekke en entydig konklusjon at avkjølingsfase og selvslukking kan oppnås når eksponert areal begrenses.

### 6.1.2 Beskyttelse med gipsplater

For å beskytte massivtre ble det benyttet ulike kombinasjoner av branngipsplater, med forskjellig tykkelse, med og uten isolasjon. Beskyttelse med to branngipsplater 2 x 12,7 mm var tilstrekkelig for at massivtre ikke ble involvert i brannforløpet fram til avkjølingsfase i et rom med en vanlig variabel brannenergi [38], [44].

Frangi et al. [43] har registrert at branngipsplater 12 mm, kombinert med standard gipsplate 12 mm og isolasjon, kan beskytte massivtre ved naturlig brannforløp i ca. 50 minutter før temperaturen bak gipskledningen stiger til 300 °C. Hakkarainen [44] benyttet 12,5 standard gips + 15,4 mm branngipsplater for å beskytte trekonstruksjon. Trekonstruksjonen hadde ingen bidrag til brannen i løpet av hele brannforløpet som varte i 169 min.

Tildekning av massivtre med gipsplater fungerte godt som brannsikringstiltak for å beskytte trevirke mot forkulling, og dermed reduserte varmeavgivelseshastigheten og bidraget til brannen fra trekonstruksjoner. Beskyttelse av massivtre med gipsplater vil fungere som tiltenkt når gipsplatene er riktig montert.

Tildekning med gipsplater har flere ulemper og usikkerhetsfaktorer som kan være avgjørende for brannforløpet. En av usikkerhetene er knyttet til brannlasten i en leilighet. F.eks. noen har leiligheter fulle av møbler, bokhyller og annen innredning, mens andre har minimalistisk tilnærming. I tillegg til det kan en leilighet ha flere lettvegger av massivtre som ikke er bærende. Disse veggene kan medføre en betraktelig økning av brannlasten i branncellen, selv om bærende vegger tildekkes. Dersom formålet er å beskytte bærende konstruksjoner slik at disse opprettholder sin bæreevne gjennom fullstendig brannforløp, må brannenergi beregnes og antall gipsplater vurderes i hver enkelt tilfellet. For å unngå denne usikkerheten kan det f.eks. stilles krav at alle synlige overflater av massivtre tildekkes.

Det er også en usikkerhet knyttet til brukeren av en leilighet som f.eks. ønsker å ha synlige treoverflater og av den grunn demonterer gipsplatene som beskytter massivtreet. Dette vil medføre at brannsikringstiltak i byggverket ikke vil fungere som tiltenkt. Derfor må borettslag/sameier etablere regler som kan begrense innvendige arbeider slik at gipsplater på massivtre beholdes.

### 6.1.3 Avkjøling

Avkjølingsfase kan oppnås når eksponert areal begrenses. Dette er vist i forsøkene utført av Hadden et al. [45] og Emberley et al. [46]. Li et al. [38] beskriver at begrenset eksponert areal i form av en vegg som utgjør ca. 15 % av omhyllingsflate, medfører neglisjerbare endringer i varmeavgivelseshastighet sammenlignet med gipskledde rom. Avkjølingsfase ble oppnådd og flammene selvslukket i forsøket med en eksponert vegg av massivtre.

Hadden et al. [45] og Emberley et al. [46] benyttet lavt initierende variabel brannenergi i rommet for å oppnå overtenning. Når overtenning oppsto var det meste av den variable brannenergien forbrent, og evnen til massivtre til å opprettholde forbrenningen kunne bli vurdert. I forsøk G3 og H1 med himling og en vegg eksponert ble det oppnådd selvslukking. Forsøkene indikerte at det er tilstrekkelig å beskytte massivtre under forbrenning av variabel brannenergi. Når variabel brannenergi er utbrent kan

varmestrålingsfluks, som massivtre eksponeres for, reduseres under kritisk nivå som medfører at flammene dør ut og selvslukking oppnås.

Tykkelse av første lamell kan være avgjørende for å kunne oppnå avkjølingsfase. I forsøk beskrevet av Li et al. [38] hvor avkjøling ble oppnådd, var første lamell 35 mm tykk. I forsøk utført av Emberley et al. [46] var første lamell 45 mm tykk. Emberley et al. [46] konkluderte med at bruk av tynne lameller kan medføre delaminering eller raskere fall av forkullet lag som vil medføre involvering av ferskt trevirke i brann, og dermed opprettholde forbrenningen.

På bakgrunn av ovennevnte må alle overflater av massivtre tildekkes med minimum 2 x 12,5 mm branngipsplater for å oppnå avkjøling. Det kan tillates eksponert areal på maks. 16 % av omhyllingsflate uten å medføre store bidrag til brannen. Brannen kan gå i avkjølingsfase og selvslukke når eksponerte treoverflater er begrenset og første lamell har tykkelse min. 35 mm.

## 6.2 Diskusjon-risikovurdering

I henhold til veiledning om tekniske krav til byggverk [11] skal bærende konstruksjoner i byggverk ved brann opprettholde sin bæreevne og stabilitet i så lang tid som er nødvendig for rømning, redning og slokking. For boligbyggverk med over 4. etasjer gjelder i tillegg funksjonskrav §11-4 [31] som sier at bærende konstruksjoner skal opprettholde sin bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp. Byggverk med bærende konstruksjoner av synlige massive trelementer vil ikke tilfredsstille funksjonskravet om et fullstendig brannforløp med mindre alle brennbare overflater tildekkes med gipsplater. Det kommer tydelig frem av litteraturstudien at synlige treoverflater vil bidra betydelig til brannenergien, og brannen vil ikke gå til avkjølingsfase uten intervensjon fra brannvesenet eller andre aktive brannsikringstiltak, når to eller flere overflater (vegger, himling) er eksponerte. Dette bekreftes i studier utført av Hakkarainen [44], Li et al. [38] og Emberley et al. [46]. Sammenlignet med gipskledd overflater vil brann i et rom med eksponerte treoverflater medføre tidligere overtenning, høyere total varmeavgivelseshastighet, intensiv forbrenning utenfor åpningen og ingen avkjølingsfase. Til slutt vil et slik brannforløp medføre helt eller delvis konstruksjonskollaps, samt katastrofale konsekvenser for materielle verdier og mennesker.

Det finnes tydelige tegn på at en brann i et rom med treoverflater medfører økt fare for vertikal brannspredning. I forsøk utført av Hakkarainen [44] ble det estimert at 50 % av brennbare gasser ble forbrant utenfor åpningen når treoverflater var eksponert, og kun 15 % brant utenfor åpningen når rommet var kledd med gips. Li et al. [38] beskrev at 75 % av varmeavgivelse ble registrert utenfor brannrommet. Dette skyldes overflødig produksjon av brennbare gasser som ikke er i stand til å forbrenne inne i brannrommet på grunn av begrenset tilførsel av oksygen. Intensiv forbrenning utenfor åpningen vil medføre hurtigere brannspredning fra brannrommet til en boenhet i etasjen over. Sammenheng mellom bruk av treoverflater og vertikal brannspredning er godt beskrevet i brannforsøkene utført av Frangi og Fontana [42], hvor vinduene i etasjen over ble knust etter 7,5 min ved en brann i et rom med treoverflater. Ved brann i et gipskledd rom tok det 40 min.

Bruk av brennbare overflater i brannceller (f.eks. en leilighet) er ikke begrenset i høye boligbyggverk utført i henholdt til preaksepterte ytelser, så lenge bruksarealet i branncellen er mindre enn 200 m<sup>2</sup> [11]. Det kan benyttes f.eks. 14 mm innvendig panel i en leilighet. Brannforløp vil da være likt som byggverk med eksponert massivtre i en branncelle i løpet av de første 10 – 15 min. Det vil si at et brannscenario med hurtig brannspredning også kan oppstå i byggverk prosjektert i henhold til preaksepterte ytelser, og denne risikoen for hurtig brannspredning er akseptert.

Den enkleste måten å tilfredsstille funksjonskravene om et fullstendig brannforløp er å dekke til de bærende konstruksjonene med 2 x 12,7 mm branngipsplater, eller 12 mm standardgipsplate + 15 mm branngipsplate som vil beskytte de bærende konstruksjonene frem til avkjølingsfase. Li et al. [38] og Hakkarainen [44] skrev at branngipsplater direkte montert på massivtre vil være tilstrekkelig for å beskytte massivtre mot forkulling gjennom en fullt utviklet brann og frem til avkjølingsfasen i et brannrom med normal brannenergi. Det ble også observert at det ikke var noe bidrag fra massivtre til brannforløpet. Ifølge Li et al. [38] kan massivtre oppnå selvslukking når eksponert overflate er begrenset til ca. 15 % av omhyllingsflate i et brannrom. Emberley et al. [46] og Hadden et al. [45] har også dokumentert evne til selvslukking av massivtre når brannen starter med lavt initierende brannenergi og eksponert overflate var mindre enn ca. 20 % av omhyllingsflaten i et brannrom. Emberley et al. [46] fant

også ut at når ekstern varmestrålingsfluks var mindre enn  $45 \text{ kW/m}^2$  kan flammene selvslukke. Tildekning med gipsplater er et positivt tiltak for å redusere bidraget fra massivtre til brannen, men kan ikke garantere at massivtre blir beskyttet gjennom alle brannfasene mot forkulling, da varigheten av brannforløpet er avhengig av flere faktorer som f.eks. brannenergi og ventilasjonsforhold i brannrommet. Derfor bør antall gipsplater for tildekning av bærende konstruksjoner vurderes i hvert enkelt tilfelle, basert på brannenergi og ventilasjonsforhold. Løsningen med tildekning vil ikke gi noe garanti for reduksjon av sannsynlighet for brannhendelser med store (1-2 omkomne) eller svært store (3-10 omkomne) konsekvenser. Mens forbedret automatisk slokkeanlegg kan redusere sannsynlighet for slike hendelser. Preaksepterte byggverk kan heller ikke garantere 100 % sikkerhet mot brannhendelser med store eller svært store konsekvenser, og kan heller ikke gi garanti mot konstruksjonssvikt.

For å kartlegge hvilke andre tiltak, utenom tildekning av alle bærende konstruksjoner, som kan benyttes ble det utført en risikoanalyse av et analysebyggverk med eksponert bærende massivtre. Relevante kompenserende tiltak ble utvalgt fra oppgaven skrevet av Rønquist [50]. For å redusere sannsynlighet for at en brann vil utvikle seg, eller spre seg, ble det brukt kompenserende tiltak i form av sprinkleranlegg etter NS-EN 12845, og tillegg F i denne standarden i stedet for boligsprinkler etter NS-INSTA 900. For å øke personsikkerheten ble trapperommet i analysebyggverket prosjektert med en korridor mellom boenheter og trappesjakt. Disse tiltakene, og flere andre forutsetninger ble brukt for å redusere risikoen i analysebyggverket.

Det ble utført en hendelsestreakanalyse og kvalitativ vurdering av konsekvens basert på deduktive bevisføringer og resonnementer. Resultatene fra analysen viser at en brann med store konsekvenser for mennesker i analysebyggverket er svært lite sannsynlig. Det ble valgt en forutsetning om at en brann oppstår 1 gang pr. år i analysebyggverket. Ifølge statistikken vil en brann oppstå i et tilfeldig boligbyggverk  $7,3 \times 10^{-4}$  ganger pr. år. Dette tyder på at resultatene fra analysen er veldig konservative. Analysebyggverk med forbedret sprinkleranlegg og forbedret utforming av rømningsveier vil trolig ha lavere sannsynlighet for brannhendelser med store eller svært store konsekvenser enn f. eks. byggverk prosjektert i henholdt til preaksepterte ytelser med boligsprinkler etter NS – INSTA 900 og trapperom Tr1.

Når det gjelder konsekvenser for materielle verdier viser risikoanalysen at en brann kan medføre katastrofale konsekvenser for økonomiske tap i form av konstruksjonskollaps  $1,6 \times 10^{-6}$  ganger pr. år, eller 1,57 ganger i løpet av  $10^6$  år i analysebyggverket. Sannsynligheten for en slik hendelse kan anses som neglisjerbar for analysebyggverket. Dersom man ser på risiko i langsiktig perspektiv, f.eks. om det bygges 200 byggverk pr. år (25 % av alle høye boligblokker som bygges pr. år [53]) i løpet av 50 år, kan hendelsen med katastrofale konsekvenser for materielle verdier oppstå 1,57 ganger pr. 100 år i en tilfeldig utvalgt boligblokk av 10 000 boligblokker av massivtre. En slik hendelse kan kun oppstå når alle barrierer svikter og slokkingsinnsatsen fra brannvesenet mislykkes, eller hvis brannvesenet ikke kan komme på grunn av andre forhold. Om denne risikoen kan aksepteres i forhold til de miljøfordelene, arkitektoniske og estetiske fordeler som man får ved bruk av massivtre, eller bør risikoen reduseres ytterligere ved bruk av rimelige midler, er noe som må vurderes ved en kost/nytte-analyse.

Dersom analysebyggverket sammenlignes med et preakseptert byggverk vil sannsynligheten for store eller svært store konsekvenser være lavere i analysebyggverket som følge av forbedret utforming av trapperom, Tr 2 i stedet for Tr 1, og forbedret sprinkleranlegg. Mens risiko for konstruksjonskollaps vil være tilstede selv om det er svært lite sannsynlig for analysebyggverket, men sannsynlig i forhold til

risikoperspektiv for 10 000 analysebyggverk i løpet av 50 år eller mer. Ifølge [37] er store ulykker mindre akseptable i samfunnet enn mange små. Konstruksjonskollaps i analysebyggverk oppfattes av samfunnet som en storulykke, og er mindre akseptabelt i samfunnet enn mange enkelte branner med større sannsynlighet og mindre konsekvens som samlet sett kan medføre høyere økonomisk tap, og flere omkomne i løpet av samme tidsintervall.

Analysebyggverket består av mange leiligheter. Dersom en brann oppstår vil den bli med høy sannsynlighet som følge av manuell slokking, sprinkleranlegg eller av brannmannskapet. Konsekvensene vil som regel begrenses til en branncelle/leilighet. Mens en brann i enebolig, rekkehus o.l. kan slokkes manuelt, eller av brannmannskapet. En alvorlig brann vil ofte spre seg til flere rom før brannmannskapet kommer. Konsekvensen kan være store materielle verdier, da slike byggverk er ikke utstyrt med automatisk slokkeanlegg eller brannalarmanlegg. Denne risikoen kan samfunnet akseptere, til tross for at samlet sett konsekvenser pr. år i form av antall liv og økonomiske tap kan være høyere enn konsekvenser ved brann i analysebyggverket. Ifølge Rausand [37] mennesker oppfatter risikoen på forskjellige måter, og store ulykker med liten sannsynlighet oppfattes som farlige. Derfor kan mange være skeptiske til høye byggverk av massivtre, da dette er noe innovativt.

Erfaringer fra naboland, som har allerede implementert løsninger med brennbare konstruksjoner i sine veiledninger, viser at i Sverige [9] kan boligbyggverkene bygges av brennbare konstruksjoner som tildekkes med 12 mm standard gipsplate, dessuten er det ikke krav om sprinkleranlegg. I Finland [10] kan boligblokker bygges opptil 8 etasjer når bærende konstruksjoner beskyttes med brannklassifisert kledning K<sub>2</sub>30 A2-s1, d0 og byggverket utstyres med sprinkleranlegg.

Det vil alltid være usikkerheter knyttet til resultater av risikoanalysen. Ifølge Raustad et al. [37] er det umulig å måle en objektiv risiko. I gjennomførte risikoanalysen kan usikkerhetene være knyttet til beregning av frekvenser som basert på statistisk driftspålitelighet av ulike brannsikringstiltak. Data som ble benyttet er fra ulike land og noen av kildene er utdaterte. Sprinkleranlegg i Norge ble innført som krav i boligbyggverk over 3 etasjer siden 2010. Derfor er det lite erfaring med sprinkleranlegget i landet. Det er mulig at sprinkleranlegg fungerer bedre eller dårligere i Norge enn i andre land. Andre usikkerheter er knyttet til menneskelig handlingsmønster ved brann. Noen vil forsøke å rømme via røykfylte, mens andre blir igjen være i sine leiligheter. Det er også en usikkerhet knyttet til brannvesenets innsatstid og sansynlighet for vellykket slokkingsarbeid. Dette kan variere fra kommune til kommune og er avhengig av beredskapens utrusting, innsatsstyrken til innsatsstyrken. For i ivareta usikkerheter i risikoanalysen ble vurdert flere verst trolige scenarier, og frekvensen for brannscenarier ble antatt 1 gang pr. år ved vurdering av personsikkerhet, mens den statistiske frekvensen er  $7,3 \times 10^{-4}$ . Dermed vurderes det at usikkerhetene for personsikkerheten er ivaretatt. Når det gjelder materielle verdier er risikoen for store skader være avhengig av manuell slokking, automatisk slokkingsanlegg og brannvesenets slokkingsarbeid. Derfor vil usikkerhetene være knyttet til påliteligheter av disse aktive brannsikringstiltakene.

Dersom risikoen for konstruksjonskollaps i langsiktig perspektiv anses som urimelig, og ikke kan aksepteres bør det innføres krav om tildekning av brennbare bærende konstruksjoner med minst 2 x 12,7 mm branngips type F eller 12,5 mm standardgips og 15 mm branngips type F. Boligsprinkler etter §11-12 i VTEK 17 og etter NS-INSTA 900 bør kunne benyttes kombinert med tildekning av bærende trekonstruksjoner. Tildekning av alle brennbare overflater har noen ulemper. Det vil begrense arkitektoniske muligheter og estetiske tradisjoner knyttet til synlige treoverflater. Tildekning av alle

overflater kan også være kostandsdrivende, og dermed redusere attraktivitet for bruk av miljøvennlige løsninger. Derfor bør kravet om tildekning kun innføres for bærende konstruksjoner. Det bør være tillat å ha eksponerte, ikke bærende konstruksjoner så lenge den variable brannenergien i en branncelle er under  $600 \text{ MJ/m}^2$  golvflate, jf. i brannforsøk beskrevet av Li et al. [38]. Eksponerte trekonstruksjoner bør tas med ved beregning av brannenergi.

Dersom det kan forutsettes at brannmannskapet alltid vil komme ved brann, kan man tildekke brennbare konstruksjoner med gipsplater slik at disse ikke bidrar til brannutviklingen i den tiden som er nødvendig for innsatsstyrken til å igangsette slokkingsarbeid. Dette vil hindre tidlig involvering av massivtre i brannforløpet, hindre hurtig brannutvikling og brannspredning til andre boenheter, samt vil slokkingsarbeid være lettere. Etter beregningsmetoder i henhold til Eurokode 5 [24] kan man oppnå beskyttelse mot forkulling i 28 min ved bruk av 2 x 12,5 mm gipsplater type A, eller 15 mm branngisplate type F. Denne løsningen vil gi bedre sikkerhet for personer i byggverket, og gi høyere sannsynlighet for innsatsstyrken å slokke brannen i startbranncelle.



## 7. Konklusjon

Litteraturstudien viser at en brann i et rom vil ikke oppnå en avkjølingsfase når flere overflater av massivtre er eksponert. Dersom eksponert areal av massivtre begrenses kan temperaturen reduseres og avkjølingsfase kan oppnås. Det viste seg imidlertid at delaminering av massivtreet kan oppstå i avkjølingsfase og kan medføre temperaturøkning og sekundær overtenning. For å redusere faren for delaminering kan det være en fordel å benytte lameller med tykkelsen over 35 mm.

Til tross for brennbarheten av massivtreet kan avkjøling og selvslokking oppnås når eksponert areal begrenses til en vegg som utgjør mindre enn 16 % av omhyllingsflate i rommet.

Analyserte brannforsøk viser at tildekning av massivtreet med gipsplater er et effektivt tiltak for å hindre forkulling og bidrag til brannen. Ved et naturlig brannforløp i et rom med normal brannenergi (<600 MJ/m<sup>2</sup> gulvareal) kan tildekning av massivtre med 2 x 12,7 mm branngips type F, eller 15 mm branngips + 12 mm standard gips, beskytte massivtreet mot forkulling gjennom en fullt utviklet brann, frem til avkjølingsfasen. I avkjølingsfasen kan gipsplater falle av, men temperaturen og varmestrålingsfluks i brannrommet vil ikke være tilstrekkelig for å opprettholde forbrenningen i brannrommet.

For å kompensere for brennbarheten av konstruksjoner ble det foreslått å utstyre analysebyggverk med forbedret sprinkleranlegg i henhold til NS-EN 12845 med tillegg F, og trapperom type tr 2 som vil være et konsekvensreducerende tiltak for personsikkerhet.

I risikoanalysen ble det konkludert at brannrisikoen for mennesker i analysebyggverket er lav, og kan anses som akseptabel. Når det gjelder materielle verdier, kan hendelser med katastrofale konsekvenser oppstå med svært liten sannsynlighet. Denne risikoen kan aksepteres i analysebyggverket. Dersom brannrisikoen vurderes i et langsiktig perspektiv, f. eks. for 10 000 analysebyggverk vil brannrisikoen være høy og ikke akseptabel. Derfor bør det innføres krav om tildekning av brennbare, bærende konstruksjoner. Denne løsningen vil også håndtere usikkerheter knyttet til bruk av massivtre i høye boligblokker.

## 8. Fremtidig arbeid

Det er mangel på studier og brannforsøk hvor massivtre beskyttes med 2x13 mm standardgipsplate kombinert med steinull. Disse løsningene benyttes ofte for å kunne tilfredsstille lydkravene i byggverk av massivtre [48], [49]. Derfor er det aktuelt å utføre brannforsøk i et rom hvor leilighetsskille av massivtre er tildekket med 2 x 13 mm standard gipsplater og 50 – 100 mm steinull, mens andre vegger er tildekket med branngipsplater type F eller flere lag med standardgipsplate type A.

Det bør gjennomføres brannforsøk hvor det benyttes ulike ventilasjonsfaktorer. Ventilasjonsanlegg i moderne byggverk utføres ofte etter «trekk-ut prinsippet» som medfører at ventilasjonsanlegget går ved brann og dermed tilfører luft til brannrommet. Denne løsningen kan påvirke forbrenningen og øke brannutviklingshastighet i rom med lav ventilasjonsfaktor. «Steng-inne prinsipp» med bruk av brannspjeld kan være fordelaktig i byggverk av massivtre som har store mengder av brannenergi akkumulert i sin konstruksjon.

I tillegg til overnevnte bør det utføres branntester på massivtre av ulikt fuktinnhold som endrer seg gjennom levetiden av konstruksjonen. Det hvordan fuktinnholdet vil påvirke antennelsestiden, forkullingshastigheter og bidraget til brannutvikling, ved naturlig brannforløp, bør studeres nærmere.

## 10.Referanser

- [1] P. A. Aasheim og B. Lier, «Markedsanalyse massivtre markedet i Norge 2017-2024,» Trebruk AS, Vestby, 2017.
- [2] A. H. Buchanan, «Fire Resistance of Multistorey Timber Buildings,» i *Fire Science and Technology 2015. The Proceedings of 10th Asia-Oceania*, K. Harada, K. Matsuyama, K. Himoto, Y. Nakamura og K. Wakatsuki, Red., Springer, 2017, p. 891.
- [3] F. O. Andersen, *Norges miljø- og klimasamarbeid med EU*, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/europapolitikk/tema/miljo-og-klima1/id686218/>. Funnet: 24.09.2018.
- [4] Statistisk sentralbyrå, *Utslipp av klimagasser*, 2017. [Online]. Hentet fra: <https://www.ssb.no/klimagassn/>. Funnet: 08.03.2018.
- [5] A. Costa, M. M. Keane, J. Torrens og E. Corry, «Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit,» *Applied Energy*, vol. 101, pp. 310-316, Januar 2013. [Online]. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191100691X>.
- [6] J. Svanæs, «Fokus på tre,» Treteknisk; Trefokus AS, Tre og miljø.
- [7] Norsk Treteknisk Institutt, *Håndbok - bygge med Massivtreelementer*, Oslo: Norsk Treteknisk Institutt, 2006.
- [8] Statens Bygningstekniske etat, «Ren veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven 1997, utgave 2,» Statens Bygningstekniske etat, 1997.
- [9] *Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*, BFS 2011:10, 2011. [Online]. Hentet fra: <https://rinfo.boverket.se/EKS/PDF/BFS2011-10-EKS8.pdf>.
- [10] *Ministry of the Environment Decree on the Fire safety of Buildings*, 2017. [Online]. Hentet fra: [file:///C:/Users/ma/Downloads/848\\_2017%20paloasetus%20EN%20.pdf](file:///C:/Users/ma/Downloads/848_2017%20paloasetus%20EN%20.pdf).
- [11] *Veiledning om tekniske krav til byggverk*, 2017. [Online]. Hentet fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [12] B. Karlsson og J. G. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press LLC, 2000.
- [13] D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics*. 3rd Edition, Chichester, United Kingdom: WILEY, 2011.
- [14] National Fire Protection Association, «NFPA 921 Guide for fire and explosion investigations,» NFPA, 2017.
- [15] B. C. Hagen, *Grunnleggende brannteknikk*, Haugesund: Hagens Forlag, 2004.

- [16] C. Beyler, M. T. Gratkowski og N. A. Dembsey, «Radiant smoldering ignition of plywood,» *Fire Safety Journal* 41, pp. 427-443, 2006. [Online]. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711206000312>.
- [17] J. Swann, J. Hartman og C. Beyler, «Study of Radiant Smoldering Ignition of Plywood Subjected to Prolonged Heating Using the Cone Calorimeter, TGA, and DSC,» *Fire Safety Science*, pp. 155-166, 2008. [Online]. Hentet fra: <http://iafss.org/publications/fss/9/155>.
- [18] T. Kristensen, «520.205 Byggedetaljer. Massive treelementer. Typer og bruksområder.,» SINTEF Byggforsk, 2001.
- [19] Norske Limtreprodusenters Forening, Limtreboka, Norske Limtreprodusenters Forening, 2015. [Online]. Hentet fra: [https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka\\_2015\\_el2.pdf](https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka_2015_el2.pdf).
- [20] M. Mohammad og W. Munoz, «Connection in cross-laminated timber buildings,» i *CLT Handbook*, S. Gagnon et al., red. Quebec, QC: FPInnovations, 2011, s.6-13.
- [21] Norsk institutt for bioøkonomi, Trevirkets brennverdi, 2017. Hentet fra: <https://nibio.no/tema/skog/bruk-av-skog/bioenergi/trevirkets-brennverdi>. Lastet ned: 10.05.2018.
- [22] G. Glasø, «Tre og Brann,» *Fokus på Tre*, vol. Norsk Treteknisk institutt, nr. 37, p. 7, 2005. [Online]. Hentet fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-37.pdf>.
- [23] V. Kodur og T. Harmathy, «Properties of Building Materials,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M.J. Hurley et al., red. New York: Springer, 2016, s.290-291.
- [24] *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*, EN 1995-1-2:2004.
- [25] American Society of Civil Engineers. Committee on Fire Protection., *Structural fire protection : manual of practice*, New York: New York, N.Y. : American Society of Civil Engineers, 1992.
- [26] A. Gunnarshaug og B. Schei, «Sammenheng mellom fuktighet i treverk og tiden til overtenning,» Bacheleroppgave i sikkerhet, brannteknikk, Høgskolen Stord/Haugesund, Haugesund, 2016. [Online]. Hentet fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2392511>.
- [27] S. Tronstad, «Trefuktighet - Tørking,» *Fokus på tre*, nr. 38, p. 8, 2000. [Online]. Hentet fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-38.pdf>.
- [28] T. Log, «Consumer Grade Weather Stations for Wooden Structure Fire Risk Assessment,» Haugesund, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3244/htm>.
- [29] P. Demidov, V. Shandyba og S. P. Gorenije i *svoystva goryuchikh veshchestv (Combustion and properties of combustibles substances)*, Moskva, 1981.
- [30] *Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven)*, 2008. [Online]. Hentet fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>.

- [31] *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*, 2017. [Online]. Henten fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>.
- [32] Standard Norge, *Krav til risikovurdering av brann i byggverk*, 2012.
- [33] T. F. Barry, «Introduction to fire risk analysis,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. J. Hurley et al., red. New York: Springer, 2016, s. 3183-3186.
- [34] *Analytisk brannteknisk prosjektering. Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk*, SN-INSTA/TS 950, 2014.
- [35] *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7: Probabilistic risk assessment*, PD 7974-7, 2003.
- [36] M. Quincy, «SFPE Engineering,» Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 2000.
- [37] M. Rausand og I. Utne, *Risikoanalyse - teori og metoder.*, Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS, 2009.
- [38] X. Li, C. McGregor, A. Medina, X. Sun, D. Barber og G. Hadjisophocleous, «Real-scale fire tests on timber constructions,» presentert på *WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering*, 2016. [Online]. Hentet fra: [https://www.researchgate.net/publication/308074365\\_Real-scale\\_fire\\_tests\\_on\\_timber\\_constructions](https://www.researchgate.net/publication/308074365_Real-scale_fire_tests_on_timber_constructions).
- [39] L. Hasburgh, K. Bourne, C. Dagenais, L. Ranger og A. Roy-Poirier, «Fire Performance of mass-timber encapsulation methods and the effect of encapsulation on char rate of cross-laminated timber,» ResearchGate, 2016. [Online]. Hentet fra: [https://www.researchgate.net/publication/311654224\\_Fire\\_Performance\\_of\\_Mass-Timber\\_Encapsulation\\_Methods\\_and\\_the\\_Effect\\_of\\_Encapsulation\\_on\\_Char\\_Rate\\_of\\_Cross-Laminated\\_Timber](https://www.researchgate.net/publication/311654224_Fire_Performance_of_Mass-Timber_Encapsulation_Methods_and_the_Effect_of_Encapsulation_on_Char_Rate_of_Cross-Laminated_Timber).
- [40] D. I. Kolaitis, E. K. Asimakopoulou og M. A. Fountia, «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*, pp. Pages 163-170, 2014. [Online]. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814010435>.
- [41] *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann*, NS-EN 1991-1-2, 2008.
- [42] A. Frangi og M. Fontana, «Fire Performance of Timber Structures under Natural,» Institute of Structural Engineering IBK, Zurich, Switzerland, 2005. [Online]. Hentet fra: [https://www.iafss.org/publications/fss/8/279/view/fss\\_8-279.pdf](https://www.iafss.org/publications/fss/8/279/view/fss_8-279.pdf).
- [43] A. Frangi, G. Bochicchio, A. Ceccotti og M. P. Lauriola, «Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey,» Institute of Structural Engineering, ETH Zurich, Switzerland, 2008. [Online]. Hentet fra: [https://www.researchgate.net/publication/289641118\\_Natural\\_Full-Scale\\_Fire\\_Test\\_on\\_a\\_3\\_Storey\\_XLam\\_Timber\\_Building](https://www.researchgate.net/publication/289641118_Natural_Full-Scale_Fire_Test_on_a_3_Storey_XLam_Timber_Building).

- [44] T. Hakkarainen, «Post-flashover fire in light and heavy timber construction compartments.,» *Journal of Fire Sciences*, pp. 133-175, March 2002.
- [45] R. Hadden et al., «Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics,» *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 480-489, 2017. [Online]. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711217301881>.
- [46] R. Emberley et al., «Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests,» *Fire Safety Journal*, vol. 91, pp. 327-335, 2017. [Online]. Hentet fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711217300954>.
- [47] R. H. White, «Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. J. Hurley et al., red. New York: Springer, 2016, s. 1981-1989.
- [48] A. Homb, «Etasjeskillere i massivtre,» Sintef, 522.891, 2009.
- [49] J. S. Lauvstad, «Lydkomfort i fleretasjes studentboliger i massivtre,» Masteroppgave i byggeteknikk og arkitektur, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Ås, 2016. [Online]. Hentet fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2398425>.
- [50] M. Rønquist, «Branntkniske utfordringer og kompensere tiltak i høye trehus,» Hovedoppgave i brannsikring, Høgskolen på Vestlandet, Haugesund, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2560127>.
- [51] J. Hall, «U.S Experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment,» National Fire Protection Association, Quincy, 2010. [Online]. Hentet fra: [http://www.tvsfpe.org/\\_images/us\\_experience\\_with\\_sprinklers.pdf](http://www.tvsfpe.org/_images/us_experience_with_sprinklers.pdf).
- [52] *Faste brannslukkesystemer - Automatiske sprinklersystemer - Dimensjonering, installering og vedlikehold*, NS-EN 12845, 2015.
- [53] Statistisk sentralbyrå, *Boliger*, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://www.ssb.no/statbank/list/boligstat/>. Lastet ned: 19.10.2018.
- [54] T. Øverby, «Nødvendig rømningstid ved brann,» Sintef, Norge, 520.385, 2016. [Online]. Hentet fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/322/noedvendig\\_roemningstid\\_ved\\_brann](https://www.byggforsk.no/dokument/322/noedvendig_roemningstid_ved_brann).
- [55] *Røykventilasjon. Temaveiledning*, Melding HO 3/2000. 2000. [Online]. Hentet fra: [https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere\\_regelverk/eldre\\_temaveiledere\\_og\\_rundskriv/2000ho-3-roykventilasjon.pdf](https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tidligere_regelverk/eldre_temaveiledere_og_rundskriv/2000ho-3-roykventilasjon.pdf).
- [56] C. Sesseng, K. Storesund og A. Steen-Hansen, «Analyse av dødsbranner i Norge i perioden 2005-2014,» RISE Fire Research, Norge, RISE-rapport A17 20176:1, 2017. [Online]. Hentet fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2017/a17-20176-1-analyse-av-dodsbranner-i-norge-i-perioden-2005-2014.pdf>.

- [57] G. Ploulx, «Playing with fire: understandig human behavior in burning buildings,» NRC, Canada, NRCC-46619, 2003. [Online]. Hentet fra:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.10.2387&rep=rep1&type=pdf>.
- [58] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, «Brannstatistikk 2017,» DSB, 2017. [Online]. Hentet fra:  
<https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/statistikk/brannstatistikk-2017/analysedokument-2017.pdf>.
- [59] B. A. Mostue og K. Opstad, «Effekt av brannverntiltak – Vegger og sprinkler,» Sintef, NBL A01118, 2002. [Online]. Hentet fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/nbl10-a01118.pdf>.
- [60] A. Cote, Fire Protection Handbook 20 th. edition, National Fire Protection Association. NFPA, 2008.
- [61] K. Storesund, K. Hox, A. Steen-Hansen, C. Sesseng og H. M. Ishol, «Utredning i forbindelse med brannvesenets dimensjonering,» RISE, A17 20323:2, 2017.
- [62] K. Storesund, K. Hox, A. G. Bøe og R. Winghus, «Slokkevannsmengder,» SINTEF NBL as; NBL A13126, 2013. [Online]. Hentet fra: [https://dibk.no/globalassets/brann-og-konstruksjoner/rapport-nbla13126-slokkevann\\_1.pdf](https://dibk.no/globalassets/brann-og-konstruksjoner/rapport-nbla13126-slokkevann_1.pdf).
- [63] H. Bjellaand, «Brannsikkerhetskonsepter for boligblokker – Tiltak med betydning for risiko,» Hovedoppgave i samfunnssikkerhet/sikkerhet, Universitet i Stavanger, Stavanger, 2009. [Online]. Hentet fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/181905>.
- [64] Krogsveen AS, *Boligprisstatistikk - Hele landet*, Krogsveen AS, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://krogsveen.no/Boligprisstatistikk>. Funnet: 3.11.2018.
- [65] *Boligsprinkler - Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold.*, NS-INSTA 900-1, 2013.
- [66] *Veiledning til forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen*, 2003. [Online]. Hentet fra: <https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/brann-og-redning-bre/veilorgdimensavbrannv2003.pdf>.