



Høgskulen på Vestlandet

Master Thesis

ING5002

Predefinert informasjon

Startdato:	25-05-2019 09:00	Termin:	2019 VÅR
Sluttdato:	03-06-2019 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Masteroppgave		
SIS-kode:	203 ING5002 1 MOPPG 2019 VÅR Haugesund		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Kandidatnr.: 109

Informasjon fra deltaker

Engelsk tittel *: DESIGN OF HIGH RISE BUILDINGS IN SOLID WOOD IN THE FUTURE - FIRE TECHNICAL CHALLENGES

Egenerklæring *: 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

Er masteroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

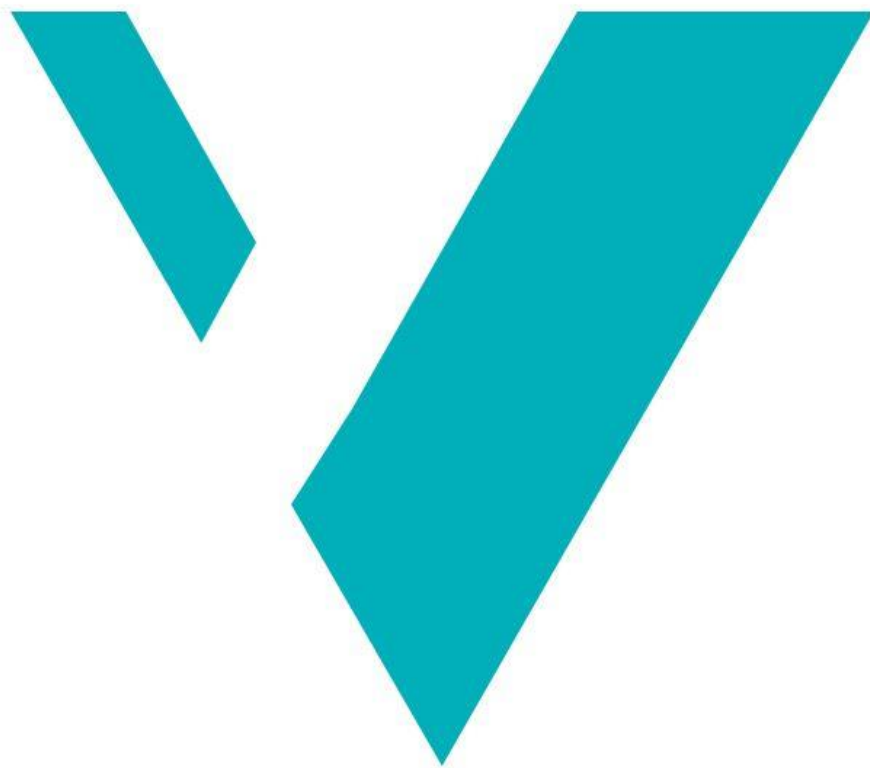
Nei

Er masteroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, Firesafe

BRANNTEKNISKE UTFORDRINGER VED PROSJEKTERING AV FREMTIDENS HØYHUS I MASSIVTRE

Masteroppgave i Brannsikkerhet



Thomas Sømme Vasstrand

Høgskulen på Vestlandet

Masteroppgave i Brannsikkerhet


Bergen
Juni 2019



Høgskulen
på Vestlandet

BRANNTEKNISKE UTFORDRINGER VED PROSJEKTERING AV FREMTIDENS HØYHUS I MASSIVTRE

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter:	Forfatter sign.
Thomas Sømme Vasstrand	
Oppgaven uttatt:	Åpen oppgave
Høst 2018	
Veileder: Torodd Lokna	
Ekstern veileder: Stein Kyrre Kvinge	
Stikkord: Massivtre, limtre, forkulling, regelverk, delaminering, fullstendig brannforløp, automatisk slokkeanlegg, bæreevne og stabilitet	Antall sider: 96 Bergen, 03.06, 2019 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.	

Forord

Denne oppgaven representerer avslutningen av mitt løp innen Master i Brannsikkerhet ved høgskolen på Vestlandet. Den fokuserer på hvilke utfordringer og hindringer som eksisterer med hensyn til effektiv prosjektering og dimensjonering av større konstruksjoner i massivtre og limtre. Oppgaven ble valgt i samråd med Stein Kyrre Kvinge i Firesafe.

Gjennom prosessen av å skrive denne oppgaven har jeg fått vesentlig dypere innsikt i hvilke begrensninger preaksepterte løsninger har når de gjelder å prosjektere større konstruksjoner utelukkende i massivtre. Denne måten å bygge høyhus på er relativt ny og det medfører en derfor noen kunnskapshull med tanke på gode hjelpemidler som kan benyttes til dokumentasjon av brannsikkerhet og oppfyllelse av funksjonskrav. Gjennom arbeidet har min interesse for utviklingen og bruken av massivtre blitt styrket. Jeg håper med denne oppgaven å sette fingeren på relevante problemområder som hemmer utviklingen av høyhus i massivtre.

Jeg vil takke min interne veileder Torodd Lokna for innspill knyttet til oppsett og struktur av oppgaven.

Jeg vil takke Stein Kyrre Kvinge for forslag til oppgave, og ikke minst hjelp underveis, med gode forslag til relevante artikler, aktører og svar på andre spørsmål knyttet til oppgaven.

Jeg vil også takke mine kjære foreldre som har hjulpet med gjennomlesning og korrektur. Dette har bidratt til å gjøre oppgaven betraktelig mer lesbar

Thomas Sømme Vasstrand

Bergen, 3. juni 2019.

Sammendrag

I Norge finnes nå de to høyeste byggene i verden konstruert i massivtre og limtre. Krav om drastiske kutt i utslipp av drivhusgassen CO₂ er en viktig pådriver for å redusere bruken av stål og betong. Det er derfor et overordnet mål å i større grad anvende miljøvennlig og kortreist trevirke til konstruksjon av nye bygg. Høye massivtrekonstruksjoner er et relativt nytt fenomen sammenlignet med konvensjonelle høyhus i stål og betong. I takt med denne utviklingen dukker det også opp nye utfordringer og problemer som må løses med hensyn til brannsikker utforming. I tillegg er regelverket som benyttes i dag i liten grad tilrettelagt for og tilpasset denne overgangen.

Norge har gjennom Parisavtalen forpliktet seg til å kutte i klimagassutslipp med 40% innen år 2030. Dette innebærer en omfattende omstilling som krever godt samspill mellom lovgivende myndighet som forvalter regelverket og utbyggere slik at denne prosessen og utviklingen skal foregå så effektivt som mulig. I dag kan regelverket som benyttes være til hinder for dette ettersom preaksepterte ytelser og ordlyden i gjeldende forskrifter i liten grad har åpnet for å benytte seg av massivtre i høye bygg.

Hovedmålsettingen med denne oppgaven er å kartlegge, belyse og drøfte problemområder knyttet til bruk av massivtre i høye bygg via gjennomgang av relevant forskning. I tillegg drøftes to konkrete byggeprosjekter knyttet til oppføring av høye bygg i massivtre. Ved gjennomgang av denne forskningen og disse byggeprosjektene skal det drøftes og belyses at det eksisterende kunnskapsnivået med hensyn dagens regelverk og løsninger kan være begrensende innen prosjektering av stadig høyere massivtrebygg.

Litteraturstudien viser at resultater fra standardiserte testmetoder av bygningsdeler ikke nødvendigvis er representative for fullskala tester hvor de samme bygningsdelene er benyttet. Det fremkommer avvik knyttet til brannforløp, temperaturer og forkullingshastigheter. Begrepet fullstendig brannforløp er benyttet i TEK17 i sammenheng med blant annet krav til bæreevne og stabilitet, men selve begrepet er ikke tydelig definert. Godkjente standarder for branntesting av materialer som NS-EN 1363 tar ikke hensyn til avkjølingsfasen i en brann. Branntester utført med veiledning fra denne krever derfor at det gjøres antagelser om hvordan en akseptabel avkjølingsfase utarter seg. Dette skaper usikkerhet og åpner for fortolkning av regelverk. Fenomener som delaminering og selvsløkking benyttes av produsenter som begrunnelse for at det blant annet er akseptabelt å konstruere bæresystemer utelukkende i limtre. Forskning og forsøk viser at det til nå ikke er nok kunnskap om mekanismene rundt dette til å dokumentere en iboende brannmotstand i massivtre.

I casestudiet blir det gjennomgått to brannkonsepter for henholdsvis Sørhauggata 100 i Haugesund og Moholt 50|50 i Trondheim. Begge disse var nytenkende prosjekter som hadde som mål å bygge bærekraftige boligblokker i massivtre for studenter. Her kommer det frem at sikkerhetsnivået i stor grad baseres på et operativt og velfungerende sprinklersystem og det benyttes flere kompenserende tiltak knyttet til sprinkleranlegget for å hindre feil og sikre høy operasjonssikkerhet. Ved å studere reelle byggeprosjekter og observere hvilke type problemer de prosjekterende må løse kan det konkretiseres på hvilke områder det er tydelige forbedringspotensialer med tanke på effektivisering av samspillet mellom prosjektering og regelverk.

I denne oppgaven konkluderes det at dagens veiledning til aktuelle forskrifter ikke er godt nok tilpasset en fremtidsrettet utvikling innen effektiv prosjektering av høye massivtrebygg. Dette bidrar til at utviklingen av løsninger for store massivtrebygg kan bli forsinket. Det kan gjøres flere forbedringer i veiledningen til forskriftene og tilhørende standarder som til sammen kan bidra til en mer effektiv og konsis prosjektering og dimensjonering av slike bygg.

I dag ser det ut til at det hovedsakelig er private aktører som er ledende i å utvikle brannsikre løsninger. Disse løsningene skal legge grunnlaget for å bygge stadig høyere i massivtre. Det er viktig å tilpasse regelverket slik at det fremmer en bærekraftig og miljøgunstig utvikling med bruk av tre som byggemateriale. Dette bør skje så raskt som mulig ettersom Norge som nasjon har forpliktet til å kutte klimagassutslippene sine med 40% innen 2030.

Abstract

In Norway the two tallest buildings in the world that are constructed in solid wood and glulam now reside. Requirements for drastic cuts in greenhouse gas emission such as CO₂ is an important drive for reducing the use of steel and concrete. There is an overall goal to use environmentally friendly and local wood for the construction of new buildings to a greater extent. Tall solid wood constructions are a relatively new phenomenon compared to conventional high-rise buildings in steel and concrete. In line with this development, new challenges and problems also arise that need to be resolved with regard to fire-resistant design. In addition, the regulations that are used today are to a small degree adapted for this transition.

Norway has through the Paris agreement committed to cutting greenhouse gas emissions by 40% before the year 2030. This entails a comprehensive restructuring that requires good interaction between the legislative authority that manages the regulations and developers so that this process and development will take place as efficiently as possible. Today, the regulations that are used can hinder this, since pre-accepted solutions and the wording of current regulations have to a small extent opened up to using solid wood in tall buildings.

The main objective of this task is to map, elucidate and discuss problem areas related to the use of solid wood in tall buildings through a review of relevant research. In addition, two specific building projects related to the construction of high-rise buildings in solid wood are discussed. When reviewing this research and these construction projects, it will be discussed and elucidated that the existing level of knowledge with regard to current regulations and solutions may be limiting in the design of even taller solid wood buildings.

The literature study shows that results from standardized test methods of building parts are not necessarily representative of full-scale tests where the same building parts are being used. There are deviations related to fire development, temperatures and charring speeds. The term complete fire course has been used in TEK17 in connection with requirements for load carrying capacity and stability but the concept itself is not clearly defined. Approved fire test standards for materials such as NS-EN 1363 do not take into account the cooling phase of a fire. Fire tests conducted with guidance from this therefore require that assumptions be made as to how an acceptable cooling phase emerges. This creates uncertainty and opens the way for interpretation of regulations. Phenomena such as delamination and self-extinguishing are used by manufacturers as a reason to why it is acceptable to construct load carrying systems solely in glulam. Research and experiments show that until now there is not enough knowledge about the mechanisms around this to document an inherent fire resistance in solid wood.

In the case study fire concepts are reviewed for Sørhauggata 100 in Haugesund and Moholt 50|50 in Trondheim, respectively. Both of these were innovative projects aimed at building sustainable housing blocks in solid wood for students. Here it emerges that the level of safety is largely based on an operational and well-functioning sprinkler system and several compensating measures are used in connection with the sprinkler system to prevent errors and ensure high operational safety. By studying real building projects and observing what types of problems the designers need to solve, it can be made concrete in which areas

there are clear potential for improvement with a scope of improving the interaction between design and regulations.

In this assignment, it is concluded that the current guidance to relevant regulations are not well adapted to a future-oriented development in the efficient design of tall solid wood buildings. This contributes to the fact that the development of solutions for large solid wood buildings can be delayed. Several improvements can be made to the guidelines for the regulations and associated standards, which together can contribute to a more efficient and concise design and dimensioning of such buildings.

Today, it seems that it is mainly private actors who are leading the way in developing fire-resistant solutions. These solutions will lay the foundation for building ever higher in solid wood. It is important to adapt the regulations so that it promotes sustainable and environmentally friendly development with the use of wood as a building material. This should happen as quickly as possible since Norway as a nation are committed to cutting their greenhouse gas emissions by 40% by 2030.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	IV
Bildetekstliste	IX
Definisjoner	XI
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål for oppgaven	2
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Metode	2
2 Teori.....	3
2.1 Tre som byggemateriale.....	3
2.1.1 Hva er massivtre(Cross laminated timber).....	3
2.1.2 Hva er limtre	4
2.2 Hvorfor bygge i massivtre og limtre	4
2.3 Parisavtalen – Det grønne skiftet	5
2.4 Brannutvikling.....	5
2.5 Fullstendig brannforløp	6
2.6 Selvløkking.....	7
2.7 Treets egenskaper under brann	8
2.8 Beregning av forkulling(Eurokode 5)[17]	10
2.8.1 Forkullingshastighet	10
2.8.2 Forkullingsdybde	13
2.9 Delaminering	14
2.10 Sprinkleranlegg.....	14
2.10.1 Våtsprinkler	17
2.10.2 Tørrsprinkler	17
2.11 Brannteknisk klassifiser og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter	17
2.12 Dokumentasjon av brannmotstand.....	21

3	Regelverk for Brannprosjektering	22
3.1	Plan og bygningsloven	22
3.2	Byggesaksforskriften (SAK10).....	22
3.3	Byggteknisk forskrift (TEK17).....	23
3.3.1	Funksjonskrav	23
3.3.2	Ytelser	23
3.3.3	Fravik	23
3.3.4	Fraviksanalyse.....	24
3.4	Brann og eksplosjonsvernloven.....	24
3.5	Internkontrollforskriften	24
3.6	Dimensjoneringsforskriften.....	24
3.7	Norsk standard(NS)	24
3.8	Risikoklasser og brannklasser	24
3.9	Bruk av tre som bæresystem.....	27
3.9.1	Nødvendig og tilgjengelig rømningstid.....	27
4	Litteraturstudie.....	29
4.1	Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner	29
4.1.1	Testoppsett.....	30
4.1.2	Swecos konklusjon.....	35
4.2	Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger.....	35
4.2.1	Brannutvikling.....	36
4.2.2	Forkulling	38
4.2.3	Selvslokking	38
4.2.4	Detaljøsninger	38
4.2.5	Brannsikkerhetsmessige utfordringer for bruk av CLT i bygning	39
4.3	Branntest av massivtre	40
4.3.1	Test 1 – Aktivert sprinkleranlegg med resultater og diskusjon	41
4.3.2	Test 2 – Deaktivert sprinkleranlegg.....	42
4.3.3	Sammenligning	44
4.4	Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of southern pine cross-laminated timber.....	44
4.5	Effekt av sprinkleranlegg	49

5	Branntekniske fraviksløsninger i eksisterende massivtrebygg.....	53
5.1	Sørhauggata 100(Analysebyggverk).....	53
5.1.1	Fraviksløsninger.....	54
5.2	Moholt 50 50(Analysebyggverk).....	62
5.2.1	Beskrivelse av referansebyggverk.....	63
5.2.2	Problem- og målformulering.....	65
5.2.3	Akseptkriterier.....	65
5.2.4	Analyse.....	66
5.2.5	Kortfattet fremstilling av analyser.....	66
5.2.6	Risikoevaluering.....	67
5.2.7	Fraviksanalyse.....	67
6	Diskusjon.....	70
6.1	Litteraturstudie.....	70
6.2	Branntekniske fraviksløsninger i eksisterende massivtrebygg.....	73
6.3	Branntekniske utfordringer.....	75
7	Konklusjon.....	77
8	Fremtidig arbeid.....	78
9	Referanser.....	79

Bildetekstliste

Figur 1-Massivtreelement[3].....	3
Figur 2-Limtrebjelker i Vikingskipet[5]	4
Figur 3-Varmebalanse og fenomener i forkullingsprosessen[6]	8
Figur 4-Endring i varmekonduktivitet[15]	9
Figur 5-Brennverdi propoersjonalt med densitet[16]	9
Figur 6-Forkullinghastighet og fuktinnhold[18].....	11
Figur 7-Forkullingsrate scenario 1[17].....	12
Figur 8-Forkullingsrate scenario 2[17].....	13
Figur 9- Endimensjonal og nominell forkullingsdybde[17].....	14
Figur 10-Sprinklereffektivitet[24]	15
Figur 11-Takmontert sprinklerhode og sprinklerampuller[25]	16
Figur 12-ISO 834 standard brannkurve og temperaturer[28]	18
Figur 13-Brannteknisk klassifisering[30]	19
Figur 14-Krav i byggefase og bruksfase[33].....	22
Figur 15-Tabell med veiledning til risikoklasse[35]	25
Figur 16-Brannklasser og konsekvens[35].....	25
Figur 17-Tabell med veiledning til brannklasse[35]	26
Figur 18-Nødvendig- og tilgjengelig rømningstid[41]	28
Figur 19-Temperaturforløp branntest[43]	31
Figur 20-Instrumentering av Søyler A og B/Montering av termoelementer	31
Figur 21-Limtresøyler C før montering	32
Figur 22-Søyler C med plassering a termoelementer	32
Figur 23-Montering i testovnMåleresultater og diskusjon	33
Figur 24-Oersikt over temperaturforløp for søyle A og B	33
Figur 25-Måleresultater søyle C	34
Figur 26-Testoppsett og dimensjoner[44].....	36
Figur 27-Sammenligning av branntester[42][44]	37
Figur 28-Spredningsveier for flamme og røyk.....	39
Figur 29-Skisse av hybel for branntest Moholt 50 50.....	40
Figur 30-Test 1 Moholt 50 50[49].....	42
Figur 31-Test 2 Moholt 50 50	43
Figur 32-Sammensetning av lameller.....	45
Figur 33-Plassering av termoelementer	46
Figur 34-Testopplegg.....	46
Figur 35-Montering av CLT plate	47
Figur 36-Time to failure	48
Figur 37-Forkullingshastigheter og sammensetning av CLT	48
Figur 38-Analyse av dødsbranner[56]	51
Figur 39-Døde i boligbranner i Norge etter kjønn og alder[57]	52
Figur 40-Sørhauggata 100. Foto Harald Nordbakken[66]	53

Figur 41-Fraviksanalyse brannklasse(Sørhauggata 100)	55
Figur 42- ISO 834 standardbrann	57
Figur 43-Nødvendig rømningstid Sørhauggata 100	62
Figur 44-Moholt 50 50[67]	63
Tabell 1-Densitet og brennverdi[16]	9
Tabell 2-Forkullingshastigheter for ulike tretyper[17]	11
Tabell 3-Forklaring av brannklassifisering[30].....	20
Tabell 4-Brannteknisk klassifisering av bygningsdeler[30].....	20
Tabell 5-Dokumentasjon av brannegenskaper[31]	21
Tabell 6-Egenskaper for bærende elementer[35]	27
Tabell 7-Målt forkullingsrater for søyle A og B[17][43].....	34
Tabell 8-Beskrivelse av vegger i branntest, Moholt 50 50	41
Tabell 9-Andre bygningsdeler.....	41
Tabell 10-Produktinformasjon.....	41
Tabell 11-Tid/temperatur	47
Tabell 12-Data fra branner i Scottsdale.....	50
Tabell 13-Dimensjonerende brannscenarioer.....	57
Tabell 14-Tid til kritiske verdier ved brann.....	58
Tabell 15-Beregnet forflytningstid for rømningsanalyse	61

Definisjoner

Brannmotstand	En konstruksjons evne til i en gitt tid å opprettholde bæreevne, stabilitet, integritet og varmeisolering slik at den tilfredsstiller angitte krav ved standardisert brannprøving
CLT	Cross laminated timber = Krysslaminert massivtre
Densitet	Massetetthet [kg/volum]
Eksoterm reaksjon	Kjemisk reaksjon som avgir varme.
Fire load density	Avgitt energi per kvadratmeter gulvareal
Forkullingsrate	Mål for hvor fort forkullingen beveger seg innover i treverket.
Forkullingssjikt	Skillet mellom forkullet tre og friskt tre.
Limtre	Glulam
Massivtre	Krysslaminert massivtre (CLT)
Preakseptert ytelse	Ytelse angitt av myndighet i veiledning til Byggeteknisk forskrift, som vil oppfylle, eller bidra til å oppfylle, ett eller flere funksjonskrav i forskriften
Pålitelighet	Sannsynlighet for at et system fungerer
Røykventilasjon	Tiltak for å fjerne røyk, mekanisk eller ved å utnytte røykens termiske drivkrefter
Tiltaksklasse	Inndeling av oppgaver i tiltaket basert på vanskelighetsgrad, kompleksitet og konsekvenser av mangler og feil

1 Innledning

Da denne oppgaven ble påbegynt stod Treet i Bergen som var oppført i 2014 som verdens til da høyeste byggverk konstruert i massivtre. Med sine 14 etasjer var den allerede banebrytende i sin konstruksjon. Men i mars 2019 bare fem år senere ble rekorden slått av enda et nytt norsk bygg, nå i Brumunddal. Mjøstårnet står nå 85,4 meter over bakkenivå med 18 etasjer hvor det er svømmehall, hotell og boliger i toppen. Det er tydelig at det går prestisje i å være nyskapende blant annet med tanke på bærekraftig utvikling hvor bruk av kortreiste materialer med lavt CO₂ avtrykk for å skåne miljøet.

Det er denne utviklingen som har som mål om å benytte utelukkende konstruksjonsdeler av massivtre som er hovedtemaet for denne masteroppgaven.

Til nå er allerede to eksisterende verdensrekorder nevnt satt på kort tid. I denne sammenheng må det også fremheves at det er flere massivtrebygg under planlegging eller oppføring hvor ambisjonen er å bygge verdens høyeste miljøvennlige konstruksjon i tre.

En finner ikke noen dekkende fellesbetegnelse for massivtre og limtre, og det er derfor er ofte begrepet massivtrebygg benyttet som samlebetegnelse for bygg konstruert i massivtre og limtre.

1.1 Bakgrunn

Bærekraftig bruk av miljøvennlige materialer har et stadig et økende fokus generelt i dagens samfunn. Dette fokuset omfatter også et økende krav til at nye konstruksjoner blir oppført på en slik måte at de vil være bærekraftig og samtidig miljøvennlige i tiden fremover. Gjennom Parisavtalen har Norge forpliktet seg til å redusere klimagassutslipp som CO₂ i et forsøk på å redusere den økende menneskeskapt globale oppvarmingen. Ettersom Norge er et av de ledende landene innenfor produksjon av fossilt brensel og baserer store deler av sin økonomi på inntekter fra denne virksomheten er det urealistisk å avvike denne på kort tid. Utslipp av CO₂ bør derfor også kuttes innenfor annen industriell virksomhet.

Bygder i utkant Norge fraflyttes i større grad og urbaniseringen er økende. Dette fører til plassmangel for beboere i byene og det må i økende grad fokuseres på å bygge i høyden. Når både problemer som klimautslipp og plassmangel må håndteres, har trevirke i årevis vist seg å være et solid byggemateriale med allsidige bruksområder. Tre lagrer like mye CO₂ som det frigjør ved brenning eller oksidering og kan derfor regnes som et klimanøytralt materiale. Tre som byggemateriale har også svakheter som ikke kan neglisjeres. Det er ikke i seg selv like sterkt som armert betong. I de senere år er det gjort fremskritt som kan føre til at trevirke likevel kan konkurrere med tradisjonell armert betong selv for høye konstruksjoner.

Høyhus i massivtre er et relativt nytt fenomen innen dagens byggeskikker. Erfaringer rundt reelle branner i slike konstruksjoner er minimal og dokumentasjonen av brannsikkerheten i bygget er i stor grad basert på småskala forsøk. I 2017 ble man påminnet de tragiske konsekvensene en storbrann i høyhus kan innebære. Her spredte en forholdsvis liten brann raskt i nyoppussete Grenfell Tower. Dette kostet har til nå kostet 77 mennesker livet. Bygget var konstruert i konvensjonelt ubrennbart materiale som armert betong og stål. Årsaken til den raske spredningen skyldtes i hovedsak feil bruk av ytterkledning og dårlig branntetting i fasade.[1] Denne tragedien er en vekker som viser hvor viktig det er vise stor årvåkenhet og

være nøye med bruk av riktig dokumentasjon når nivå av brannsikkerhet i høyhus skal vurderes. Slurv og enkle feil kan medføre skjebnesvangre konsekvenser for liv, helse, miljø og verdier.

1.2 Mål for oppgaven

Hovedmålsettingen med denne oppgaven er å kartlegge, belyse og drøfte problemområder knyttet til bruk av massivtre i høye bygg via gjennomgang av relevant forskning. I tillegg drøftes to konkrete byggeprosjekter knyttet til oppføring av høye bygg i massivtre. Ved gjennomgang av denne forskningen og disse byggeprosjektene skal det drøftes og belyses at det eksisterende kunnskapsnivået med hensyn dagens regelverk og løsninger kan være begrensende innen prosjektering av stadig høyere massivtrebygg.

1.3 Problemstilling

Hvilke branntekniske utfordringer kan være til hinder for effektiv, fremtidsrettet og miljøbevisst utvikling innen prosjektering av høye massivtrebygg?

1.4 Metode

Arbeidet med denne oppgaven har vært delt opp i fem faser:

1. Først ble det funnet aktuelle forskningsbaserte rapporter som kunne knyttes til problemstillingen. Med utgangspunkt i disse ble det drøftet hvordan kunnskapsgrunlaget basert på dagens forskning kan bidra innen prosjektering og dimensjonering av massivtrebygg.
2. Etter dette ble det gitt en fremstilling av aktuell teori som ble benyttet i forskningsreferansene i litteraturstudiet. Teorikapittelet er plassert tidlig i rapporten og har som hensikt å gi grunnlag for videre forståelse av innholdet i masteroppgaven.
3. Det ble så gjort en gjennomgang av prosessen knyttet brannprosjektering. Formålet med denne gjennomgangen er å vise hvordan det aktuelle regelverket i dag er bygget opp og hvordan det kan benyttes i prosjektering.
4. Som et case studium ble to aktuelle og konkrete byggeprosjekter i massivtre gjennomgått og drøftet for å undersøke hvilke reelle hindringer og utfordringer de prosjekterende støter på når brannsikkerheten rundt relativt høye massivtrebygg skal dokumenteres. Det ble også undersøkt og drøftet hvordan disse problemene løses i form av fraviksløsninger.
5. Diskusjonskapittelet bygger videre på og drøfter aktuelle funn med hensyn til problemstillingen gjort i henholdsvis litteraturstudiet og casestudiet. Avslutningsvis ble det gjort en oppsummering og drøfting rundt funnene av branntekniske utfordringer som ansees å være relevante for å kunne konkludere med hensyn til problemstillingen.

2 Teori

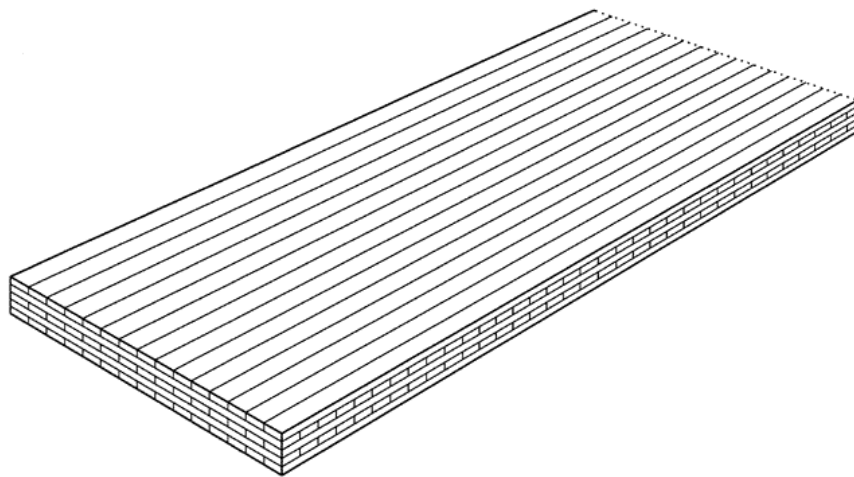
Dette kapitlet vil jeg gi en teoretisk bakgrunn for oppgaven. Ettersom jeg ikke er gjort noen egne forsøk omkring de temaområdene jeg behandler, vil kildematerialet i oppgaven være basert på andres forsøk og dokumentasjon. Dette er sammenholdt med fortløpende egen diskusjon om de temaene som gjennomgås. I oppgaven brukes betegnelse massivtre og limtre. Det er viktig å presisere at disse to konstruksjonsmaterialene deler mange likheter, men har ulike bruksområder i et bygg. I de neste underkapitlene skal ulikhetene defineres med tanke på konstruksjonsmåte og bruksområder.

2.1 Tre som byggemateriale

Bruk av tre i byggverk har mange positive sider med tanke på byggetekniske egenskaper. Det er sterkt, fleksibelt, og billig å produsere kontra stål og betong. Selve treet har i hovedsak 3 bestanddeler; cellulose $(C_6H_{10}O_5)_n$ ved 40%, hemicellulose $(C_5H_8O_5)_n$ ca. 25% og lignin $C_9H_{10}O_2(OCH_3)_n$ som til sist utgjør omtrent 15-20%. Både cellulose og hemicellulose kan omdannes til sukker og deretter etanol eller biodrivstoff. I samsvar med nevnte fordeling vil trets tørrstoff bestå av 50 % karbon, 43 % oksygen, 6 % hydrogen og 1 % nitrogen. Det er viktig å presisere at ulike treetyper har forskjellige sammensetninger og egenskaper. Treet vil også inneholde bestanddeler som harpiks og garvesyre og fett. Det er derfor viktig å velge riktig bruk av tresort, avhengig av bruken til materialet.[2]

2.1.1 Hva er massivtre(Cross laminated timber)

Den typen massivtre som er vanlig å benytte til bygging av trehus er krysslaminert massivtre forkortet CLT. Dette er flere sjikt med trelameller lagt 90 grader på hverandre og limt sammen under trykk og kan bestå fra i alt fra 3 til 9 lag. Disse kan både limes og spikres, men i industriell sammenheng limes de sammen. Disse danner så til sammen store plater som settes sammen og kan brukes som bærende vegg. Denne figuren viser et flersjiktet massivtreelement med 5 lag.



Figur 1-Massivtreelement[3]

Kilde: 520.205 Massive treelementer. Typer og bruksområde

Massivtreelementer har evne til å oppta store punktlaster, ettersom slike laster fordeles jevnt utover hele planet, på grunn av måten det er konstruert på. Slike elementer er ofte bestillingsvare og kan dermed prefabrikeres etter brukerens ønske, og sendes ferdigprodusert til byggeplassen, hvor de settes sammen som et byggesett.

2.1.2 Hva er limtre

Dette er i likhet med massivtre lameller av planker limt sammen på langs. Definisjonen er gitt i NS 3470-1 og skal være en "bærende komponent hvor tverrsnittet er bygd opp av minst fire lameller med tilnærmet parallell fiberretning, som ved hjelp av lim har full statisk samvirke".[4] Denne standarden er utgått og erstattet med Eurokode 5 del 2. Limtre er velegnet til å ta opp krefter parallelt med fiberretningen og benyttes derfor hovedsakelig som bærende bjelker, både rette og krumme samt rammer for å nevne noen bruksområder. Det er bygget veibroer der limtrebjelker inngår som bærende elementer. Vikingskipet på Hamar har også dragere med spenn på opp til 96 meter, hvor hver drager er dimensjonert for å opprettholde en midlertidig last på 10 tonn. Takflaten er på totalt 25 000 m². [5]

Bildet viser de nevnte dragerne som går på tvers av fagverket i taket, som også er konstruert i limtre.



Figur 2-Limtrebjelker i Vikingskipet[5]

2.2 Hvorfor bygge i massivtre og limtre

Massivtre som byggemateriale er blitt mer populært og har fått økt fokus de senere årene. Spesielt med tanke på det siste tiåret hvor et økt fokus på miljø og konsekvens av global oppvarming har blitt et tema med drivhusgassen CO₂ som hovedfokus. Sammen med bærekraftig skogsbruk regnes bruk av tre i seg selv som klimanøytralt med tanke på CO₂ utslipp. Produksjon av limtre krever lite energi, og biproduktene som sagflis og høvelspon kan også benyttes til energiproduksjon. Når trevirket har gjort sin nytte, kan det tilbakeføres til naturen uten tilskudd av drivhusgasser. Det positive med tre er at karbon fra CO₂ i luften gjennom fotosyntese bindes opp i trevirket og blir til byggeklosser, sammen med at oksygen frigjøres. Ifølge Store Norske Leksikon er 50 % av treets tørrstoff karbon. Dette karbonet vil ikke frigjøres til

atmosfæren før den eventuelt brennes, eller råtner bort. En kubikkmeter med limtre vil omtrentlig ha en evne til å lagre karbon tilsvarende 750 kg CO₂ [6] ifølge limtreboka og dokumentasjonen som Binderholz viser til, for sine egne BBS massivtreplater hevder at 1 kubikk av disse vil ha oppbevart karbon tilsvarende 667 kg CO₂ [7] etter produksjonen er over. Limet som benyttes derimot, fremstilles av ikke fornybare råvarer, og dette vil telle negativt på miljøregnskapet. Til gjengjeld er bare 1 % av massen til limtre, og 0,6 % av masse til BBS cross laminated timber, lim.[7] Utslipp fra produksjon og transport vil forekomme, men dette er betraktelig lavere enn for produksjon av stål og betong.

I Norge er det lange tradisjoner for bruk av tre som materiale til husbygging. Bruk av tre gir god styrke og fleksibilitet sammenlignet med egenvekt og kan sidestilles med stål, med hensyn til disse verdiene. Tre er også ett lettere materiale. Det finnes også forskning som viser at beboere opplever bruk av trevirke innendørs, både i form av byggemateriale og inventar som naturnært på en måte som fremmer trivsel, reduserer stress og har positiv effekt på mål som blodtrykk, puls, og muskelspenninger. Det er også gjort forsøk hvor kontorlokaler ble innredet med synlige og usynlige trematerialer. En fant ut at synlig tre hadde en positiv effekt på stressnivået til deltagerne. [8]

2.3 Parisavtalen – Det grønne skiftet

Norge har som et av totalt 175 land forpliktet seg til å begrense sine egne utslipp av klimagasser, hovedsakelig CO₂. Dette er for å begrense den forventede globale temperaturøkningen i årene som kommer. Intensjonen er å begrense klimautslippene med 20% frem mot 2020, sammenlignet med referanseåret 1990. Videre skal det gjøres en reduksjon på 40% til 2030. Dette som følge av at klimagassutslippene har steget jevnt etter 1990, og til sammenligning hadde Norge ifølge Statistisk sentralbyrå et totalt utslipp på 2,4% over 1990. [9]

Mye av utslippene kommer fra byggebransjen og har høyere utslipp enn transport og industrisektoren. Byggesektoren står for om lag 30% av CO₂ utslipp og 40% av energiforbruket globalt. [10]

Ettersom byggebransjen står for en så stor del av utslippene, vil dette også medføre at det er en del forbedringspotensiale her når det gjelder å senke utslipp, og behovet for innovasjon og nyskaping med tanke på bruk av bærekraftige materialer og energibesparelse med hensyn til frakt og oppvarmingskostnader. I Norge stiller tre veldig sterkt som råmateriale da vi har rikelig med skog, og tilveksten per nå er større enn det som blitt kuttet ned. Sammenlignet med stål og betong har tre et betraktelig renere CO₂ regnskap.

2.4 Brannutvikling

Hvordan en brann utarter seg er avhengig av flere faktorer:

- Tennkilde
- Tilgang på brensel
- Oksygentilgang med tanke på åpninger(tak/vinduer/vegger og størrelsen på disse
- Forbrenningsvarme til brensel dvs. type brensel
- Mengde brensel
- Overflater på vegger himling og gulv

- Brannbeskyttelse av konstruksjon
- Brennbarhet til konstruksjon

I start, eller vekstfasen er type brensel av særs viktighet da den avgjør hvor godt tak brannen får på omgivelsene. Nå flammene har fått tak, vil inventar i rommet være av betydning, som for eksempel gardiner, sofaer, ofte lettantennelige materialer. Etter hvert vil flammer og varm røyk spre seg og overflater på vegger og himling vil begynne å gi bidrag til flammene på grunn av påvirkning fra varmestråling. Etter hvert vil dette utvikle seg til en fullt utviklet brann hvor alle flater i rommet avgir varmer og det vil være en høy produksjon av brenselprodukter. På dette stadiet er oksygentilførsel av vesentlig betydning for hvor mye av de brennbare gassene som har potensiale for å bli antent. Dette er en sentral faktor knyttet til intensiteten av brannen. Brannen starter oftest som brenselstyrt og det er da mer enn nok oksygen til å antenne alle branngassene, mens den over tid vil gå over til ventilasjonsstyrt brann, hvor mengden på tilgjengelig oksygen vil avgjøre intensiteten. [11]

2.5 Fullstendig brannforløp

Dette er en betegnelse som er mye benyttet når det kommer til dimensjonering av brannsikkerheten i bygninger. Men et slikt begrep må defineres tydelig dersom det skal kunne brukes som et mål på om brannsikkerheten er tilfredsstillende eller ikke. I noen av kravene til dokumentasjon stilles det som kriterium spesielt for brannklasse 3 og 4 at diverse bygningsdeler skal kunne være bestandig gjennom et fullstendig brannforløp slik det kan modelleres. Et eksempel fra TEK17 §11-4 er[12]:

(4) Bærende hovedsystem 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.

Dette er et vesentlig krav ytelseskrav til dimensjonering og store deler av usikkerheten rundt brannsikkerheten i større bygg konstruert i massivtre beror på dette funksjonskravet. Det er problematisk å gjøre fullskala tester og ingen brannforløp vil heller være identiske. Det er derfor gjort en ingeniørfaglig tilnærming til problemet for å kunne fastsette om brannsikkerheten kan dokumenteres å være ivaretatt til et akseptabelt nivå. Dersom en brann får utvikle seg fritt uten at den aktivt slokkes, vil dette som regel kalles for et fullstendig brannforløp. Det typiske brannforløpet kan videre deles opp i 4 faser.

Antennelse → Vekstfase → Fullstendig utviklet brann → Utbrenningsfasen/Avkjøling[11]

Antennelse: Denne fasen kan forekomme på flere ulike måter og vil være svært varierende for ulike brannforløp. Her vil det forekomme antennelsesmåter som gnister, åpne flammer eller ulming som utvikler seg sakte. Det er problematisk å antenne CLT eller limtre, ettersom det vil kreves en del varmeenergi. I denne fasen vil det være andre materialer som antennes, for eksempel inventar som gardiner eller møbler.

Vekst: Brannen vil fortsette å avgi varme og utvikle seg så lenge den har tilstrekkelig med brensel og oksygen. En av de vanligste måtene å modellere brann på er en såkalt α^2 -brann. Her vil varmeavgivelsen bestemmes ut fra hvilket materiale som brenner, og det blir ut ifra dette gitt en vekstfaktor α . Denne er konstant og kan hentes fra tabeller. Materialene rangeres i 4 vekstfaktorkategorier fra slow – medium – fast – ultra fast. Dette er en enkel tilnærming, som det er kommet frem til etter årevis av testing. Om

vekstfasen utvikler seg til en fullstendig utviklet brann vil være avhengig av de termiske egenskapene til omliggende materialer, om det tilføres nok oksygen og om det er tilstrekkelig brensel i nærheten.

Fullstendig utviklet brann: Nå har brannen nådd sitt maksimalt varmeavgivende nivå. Den kan defineres på to måter. Enten er den brenselkontrollert, som betyr at alt brennbart materiale i rommet brenner og at den dermed ikke kan avgi mer varme ettersom mangel på brensel er den begrensende faktoren. På motsatt side er den ventilasjonskontrollerte brannen. Dette scenarioet kan være mer aktuelt for massivtrebygg ettersom store deler av konstruksjonen vil være i trevirke som igjen er brennbart. I en slik situasjon vil det være rikelig med brennbare gasser i området, men ikke nok tilgang på oksygen slik at en fullstendig forbrenning kan forekomme. En fullstendig forbrenning vil ideelt avgi kun H₂O og CO₂. Dette vil kunne forekomme under støkiometriske forhold med 100% forbrenningseffektivitet. Som følge av mangel på oksygen vil ikke fullstendig forbrenning være mulig i reelle branner. Det vil derfor dannes giftig og lettantennelig CO som varm røyk. Denne vil ofte antennes dersom den kommer ut av rommet, for eksempel ved at et vindu knuses av varme og trykk og tilstrekkelig oksygen tilføres fordi temperaturen er høy nok, samt at CO er ekstremt volatil, og ikke behøver store mengder oksygen for å antennes. Dette kan så føre til at flammene står ut fra vinduer og kan slikke oppover fasader mange meter og spre seg på denne måten. Rombranner starter oftest som brenselkontrollert, og går over til ventilasjonskontrollert når rommet er overtent.

Avkjøling: Dersom de brennbare materialene kjøles tilstrekkelig ved utlufting, vannslokking eller annet vil brannen dø ut av seg selv, selv om ikke alt det brennbare materialet er brent opp.

Tid-temperaturkurver er blitt utviklet for å kunne beskrive den forventede temperaturutviklingen i en branncelle basert på ulike brannlaster, åpningsfaktorer og termiske egenskaper. Dersom alle disse faktorene er kjent for en branncelle kan tid-temperaturkurven utvikles for dette spesifikke rommet. Å teste alle ulike bygningsdeler i forskjellige typer brannforløp vil ikke være praktisk gjennomførbart og gjort det alt for komplisert å dokumentere om en bygningsdel oppnår et gitt krav til brannmotstand. Derfor er det blitt en norm å teste disse bygningsdelene ut fra en standardisert tid-temperaturkurve. En av de vanligste kurvene for testing av bygningsdeler benyttet i Europa er ISO 834. Denne har ikke definert avkjølingsfase og vil stige kontinuerlig frem til testet avsluttes. Dette gir en begrensning på testregiment som gjør at det ikke er nødvendig å registreres hvordan et materiale oppfører seg i avkjølingsfasen.

2.6 Selvlokking

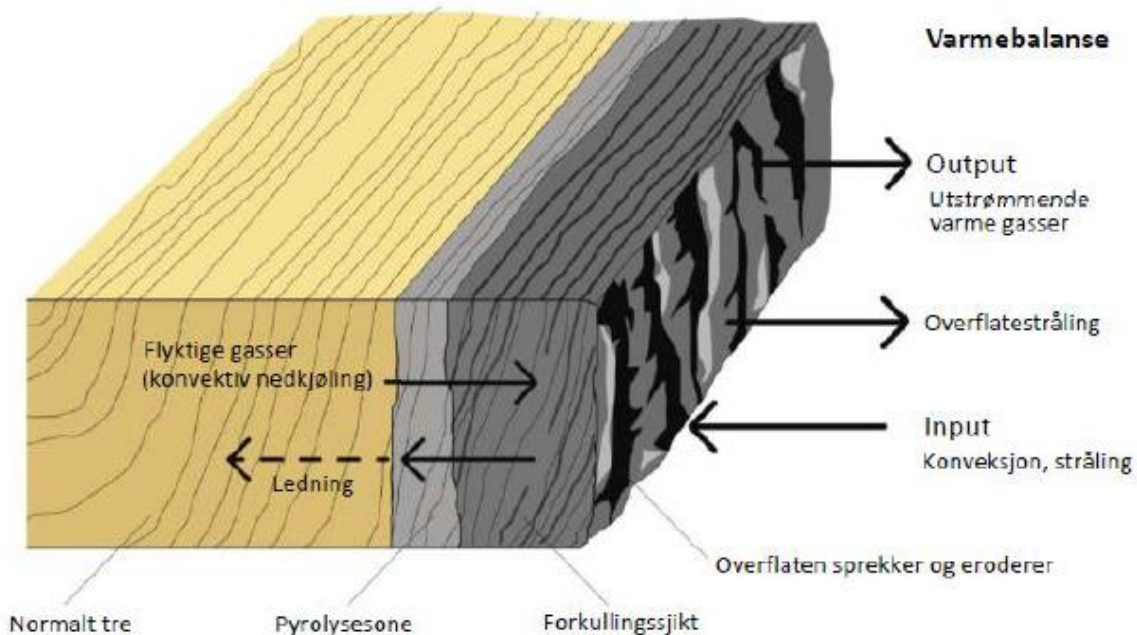
Dette er et begrep som benyttes når i noen sammenhenger når brannsikkerheten til massivtre beskrives. Det innebærer spørsmålet om flater med massivtre, som vegger og tak vil fortsette å brenne, selv etter at alt øvrig brensel i rommet er oppbrent. Om dette fenomenet inntreffer vil i en del tilfellene avhenge av hvilken definisjon de som utførte testingen bruker. Et eksempel benyttet av SP Fire research i en test om brannsikkerhet i massivtrebygg er: "*Selvlokking vil innebære at bidraget til brannen fra massivtrelementene avtar omtrent tilsvarende som bidraget fra øvrig brennbart inventar i rommet*". [13] Noen beskriver fenomenet med selvslokking som en årsak til at massivtre prinsipielt er brannsikkert. Men dette er ikke ennå ikke påvist med sikkerhet, og i noen tilfeller eller situasjoner er det påvist at selvslokking ikke alltid nødvendigvis finnes sted.

2.7 Treets egenskaper under brann

Tre er brennbart og brenner i seg selv på en forutsigbar måte. Dette er grundig beskrevet gjennom forsøk og forskning. Tre er et organisk materiale som inneholder vann. Ved økt temperaturpåkjenning vil først væskeinnholdet i treet fordampe og trevirket tørke ut. Etter hvert som væsknivået i minsker vil temperaturen i treet fortsette å stige. Mellom 110-230 °C vil det være en påbegynnende pyrolyse hvor det organiske faste materialet brytes ned til flyktige brennbare gasser. Når trevirket når en temperatur på rundt 300 °C, som er omtrentlig trevirkets brennpunkt oksiderer disse gassene og antennes slik at det oppstår en eksoterm reaksjon. Etter at brennpunktet er nådd, vil trevirket begynne å danne et forkullingslag som brer seg innover mot kjernen, på en hastighet mellom 0,5-1,0 mm/min. Dette forkullingslaget består av rester etter forbrenningen av cellulose og er i hovedsak karbonrike forbindelser. Kullaget er veldig porøst og innehar veldig lite mekanisk styrke.

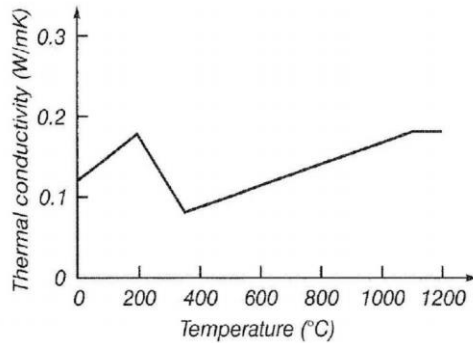
Et forkullingslag innehar veldig lite varmeledningsevne. Dette kan medføre en isolerende effekt, som beskytter bakenforliggende friskt trevirke fra store nok temperaturøkninger og dermed hindrer det fra å gjennomgå pyrolyse. Dette kullaget har som nevnt lav mekanisk styrke og under turbulente branner vil det ofte være mulig å observere at kullaget faller av, og igjen eksponerer friskt trevirke som kan gi bidrag til brannen. [14]

Figuren under viser en varmebalanse for treverk som har nådd en temperatur som tillater at det begynner å forkulle. Forkullings- og pyrolysesjikt vil bevege seg innover mot det friske trevirke over tid etter hvert som varmepåvirkningen utenfra vil bevege seg innover ved hjelp av konduksjon.



Figur 3-Varmebalanse og fenomener i forkullingsprosessen[6]

De termiske egenskapene til trevirke endrer seg med temperaturen i trevirket. Generelt sett har tre en lav varmeledningsevne sammenlignet med for eksempel stål, som også er mye benyttet. I neste figur ser vi at konduktiviteten når sitt høyeste punkt ved rundt 200 °C. Deretter faller den frem til ca. 370 °C for så å stige til nivået den var ved rund 200 °C frem til den 1100 °C.



Figur 4-Endring i varmekonduktivitet[15]

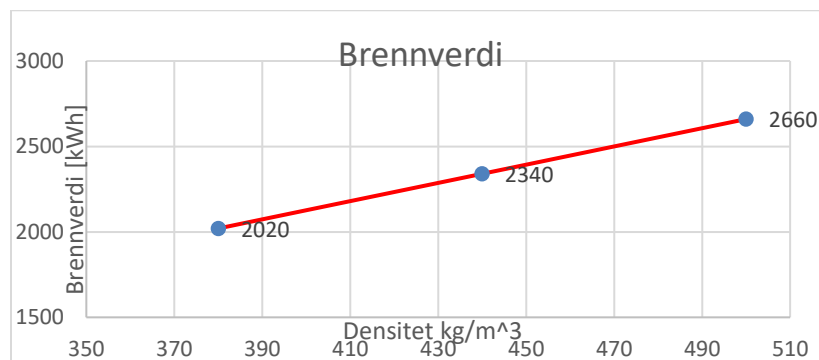
Den gjennomsnittlige lave konduktiviteten bidrar til at det er viktig å sørge for at ulike sammenføringer i konstruksjonen er tett, slik at slik at for eksempel stålbolter ikke får anledningen til å videreføre varme gjennom trevirket til nye uberørte områder.

Dersom vi sammenligner type trevirke, densitet og brennverdi ved optimale forhold vil vi observere at brennverdi er proporsjonal med densitet. Som igjen betyr at tyngre og mer solide tref typer innehar mer brannenergi, en mer porøse og lettere typer.

Tresort:	Densitet tørrmasse ved 0% fuktighet:	Brennverdi ved 100% forbrenning:
Gran	380 kg/m ³	2020 kWh
Furu	440 kg/m ²	2340 kWh
Bjørk	500 kg/m ³	2660 kWh

Tabell 1-Densitet og brennverdi[16]

Det som kan leses fra tabellen og en enkel graf viser at densitet i faststoff er proporsjonal med brennverdi uavhengig av type tresort.



Figur 5-Brennverdi proporsjonalt med densitet[16]

2.8 Beregning av forkulling(Eurokode 5)[17]

I kapitlet om treets egenskaper under brann, ble det gjennomgått en del om hvordan forkulling foregår. Eurokode 5 omfatter brannteknisk dimensjonering av trekonstruksjoner. Inkludert laminert trevirke. Den ble fastsatt som norsk standard i 2004. Eurokodeprogrammet har som mål å harmonisere tekniske spesifikasjoner for medlemslandene.

Standarden kan benyttes til å kalkulere brannmotstand for individuelle bygningsdeler eller hele strukturer. Den gir detaljerte beregningsmetoder for branneksponte elementer eksponert for en standardbrann. Formålet er å dokumentere om en branncelle eller enkeltelement har tilstrekkelig brannmotstand ut ifra hva som kreves i forhold til dimensjoneringen gitt i prosjekteringen.

Standarden fremviser metoder for å beregne blant annet forkullingshastigheter for beskyttet og ubeskyttet trevirke, samt forkullingsdybde for å vurdere om gitt dimensjonering i brannkonsept er akseptabel med tanke på krav til bygningsdelens egenskaper under brannpåvirkning. Den gir også metoder for bestemmelse av om tverrsnittsegenskapene til for eksempel et lastbærende element vil være ivaretatt under brannpåkjening over tid.

2.8.1 Forkullingshastighet

Forkullingshastighet er betegnelsen på hvor fort sjiktet mellom friskt trevirke og forkullet trevirke forflytter seg innover bygningsdelen fra den branneksponte siden. Som nevnt har kullet tilnærmet null mekanisk styrke og det er derfor viktig med tanke på brannteknisk dimensjonering å være klar over hvordan denne grensesonen beveger seg over tid i et brannforløp. Hvor fort dette sjiktet forflytter seg innover i trevirket er gitt som forkullingsrate og er oppgitt i mm/min. Forkullingsraten er et komplekst tema som kan være avhengig av mange faktorer. Eksempler på dette er:

-Densiteten til trevirket [kg/m^3] er av stor betydning ettersom ved høyere densitet vil det være økt masse å bryte ned gjennom pyrolyse og dermed vil forkullingen gå saktere. Dermed vil forskjellige tretyper forkulles med ulik hastighet dersom de utsettes for samme temperatur.

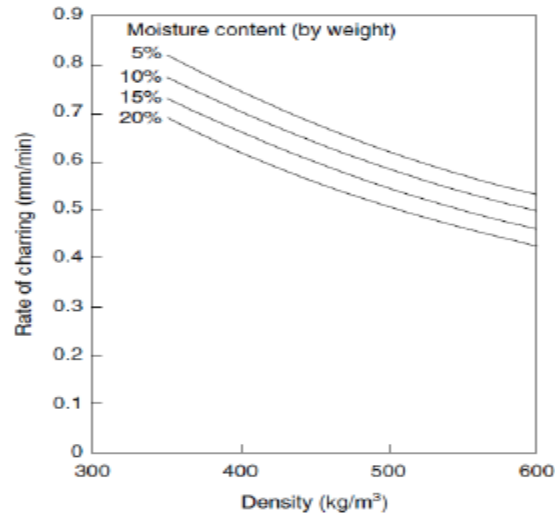
- Varmepåvirkning fra brann, som konveksjon og stråling

- Treets fuktinnhold endrer seg med årstidene. Det er vanlig at trevirke holder et relativt jevnt fuktinnhold på mellom 10-20%. Fordamping av vann krever mye energi. Det er nødvendig å fordampe ut væsken i trevirket før pyrolyse og forkullingsprosess kan begynne. Økt fuktinnhold vil dermed føre til at mer av varmeenergien som påvirker treverket vil gå til fordamping av væske i stedet for pyrolyse. Dermed vil økt væskeinnhold kort fortalt gi redusert forkullingsrate.

- Geometriske faktorer. Eksempler på dette kan være brann i et hjørne. Her vil de brennende tilstøtende veggene gi økt varmebidrag til hverandre og dermed vil mer av forbrenningsvarmen overføres til veggene. Et annet eksempel kan være en bjelke i taket hvor den kan brannpåvirkes fra 3 sider samtidig dersom den står fritt ned fra taket og ikke ligger beskyttet bakenfor himling. [14]

Densitet er definitivt den faktoren som betyr mest når forkullingsrate ved en eventuell brann skal vurderes. Men ettersom det er mange andre faktorer som vil ha ulik grad av påvirkning, er det essensielt å vurdere forkullingsrate i konservativ retning, slik at integriteten til et byggverk er sikret.

Neste figur viser forsøk gjort på gran og viser til forholdene mellom fuktinnhold, densitet og forkullingshastighet.



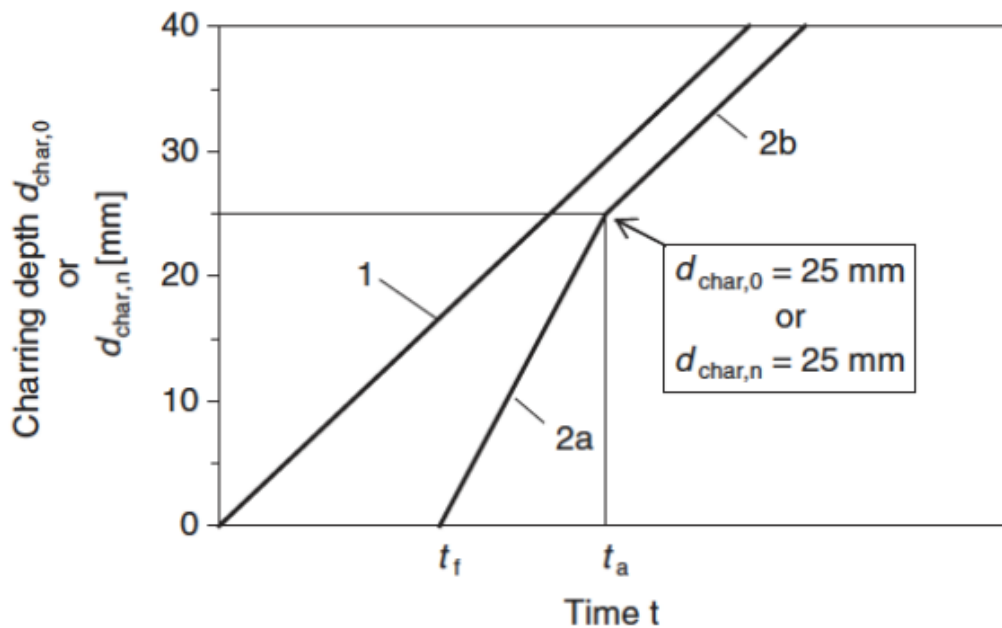
Figur 6-Forkullingshastighet og fuktinnhold[18]

Videre vil også et økt fuktinnhold også føre til økt tid til overtenning som vist i en bacheloroppgave av Schei og Gunnarshaug. Her klarte de å redusere tid til overtenning i et testrom fra 10 minutter til 3 ved å senke fuktinnholdet i trevirke som rommet var konstruert av. Disse forsøkene ble gjort med en pilotflamme av metanol på 2 kW i et ¼ isorom.[19] Neste tabell er tatt ut fra NS-EN 1995-1-2 og gir bruksverdier for endimensjonell og nominell forkullingshastighet, som benyttes ved beregninger med metoder gitt i standarden.

Produkt	ρ [kg/m ³]	β_0 [mm/min]	β_n [mm/min]
Bartre og bøk			
-Limtre	≥ 290	0,65	0,7
-Massivtre	≥ 290	0,65	0,8
Løvtré av type massivt tømmer, limtre eller massivtre	≥ 290 ≥ 450	0,65 0,5	0,7 0,55
Laminated veneer lumber	≥ 480	0,65	0,7
Panel	≥ 450 kg/m ³ og paneltykkelse større enn 20 mm		
-Trepanel		0,9	-
-Kryssfinér		1,0	-
-Andre typer trepaneler		0,9	-

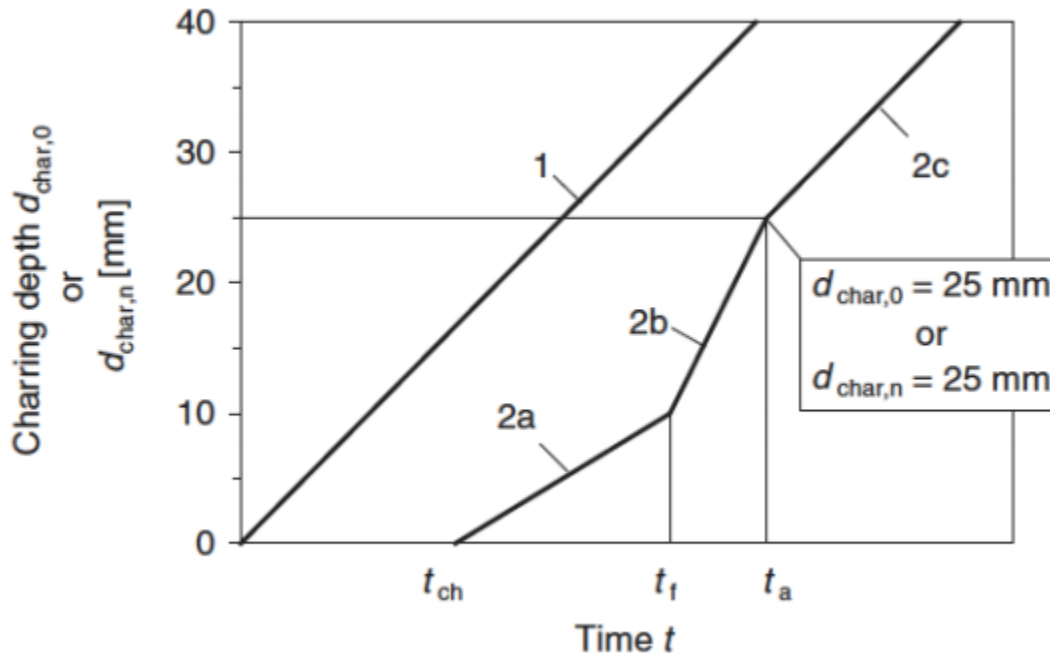
Tabell 2-Forkullingshastigheter for ulike tretyper[17]

Eurokode 5 tar også for seg forkullingsrater ved beskyttet treverk. Typen beskyttelser kan for eksempel være gipsplater eller brannisolasjon. Ved bruk av beskyttelse vil forkullingen utarte seg annerledes enn for ubeskyttet tre. Beskyttelsen kan skape en forsinkelse i forkullingen frem til den feiler vist ved $t_f = t_{failure}$ som er vist i neste figur. Her vil det bakenforliggende treverket være upåvirket av varmepåkjenningen frem til brannbeskyttelsen feiler ved t_f . Deretter vil det nå ubeskyttede treverket forkulles dobbelt så raskt som for vanlig ubeskyttet treverk. Dette fordi det nå er opparbeidet en mye høyere påkjenningstemperatur samtidig som det ikke har vært mulig å etablere et isolerende kullag på grunn av brannisolasjonen. t_o er punktet der det er dannet et 25 mm isolerende kullag og forkullingsraten er lik for brannisolert treverk og ubeskyttet treverk.



Figur 7-Forkullingsrate scenario 1[17]

Et annet scenario vil være når forkulling begynner i bakkant av isolasjonen selv om beskyttelsen ikke har feilet. I dette tilfellet gir beskyttelsen en varmeisolerende effekt, som igjen senker forkullingshastigheten frem til beskyttelsen feiler ved t_f . Deretter foregår forkullingen likt som beskrevet i forrige scenario frem til t_a , og etter dette punktet vil forkullingsraten være like for beskyttet og ubeskyttet trevirke.



Figur 8-Forkullingsrate scenario 2[17]

2.8.2 Forkullingsdybde

Eurokode 5 fremviser to ulike metoder for å fastsette hvor sjiktet mellom forkullet og friskt trevirke går. Dette skillet anslås å være lokalisert rundt 300 °C isotermeren, hvor alt trevirke med høyere temperatur regnes som forkullet. De to metodene er endimensjonal forkullingsdybde hvor trevirket bare er brannekspontert fra en side, og nominell forkullingsdybde hvor forkulling nært hjørner er tatt høyde for.

Endimensjonal forkullingsdybde er produktet av den gitte endimensjonale forkullingsraten til det aktuelle trevirket ganget med branneksponteringstiden. Formel gitt:

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad [(1)]$$

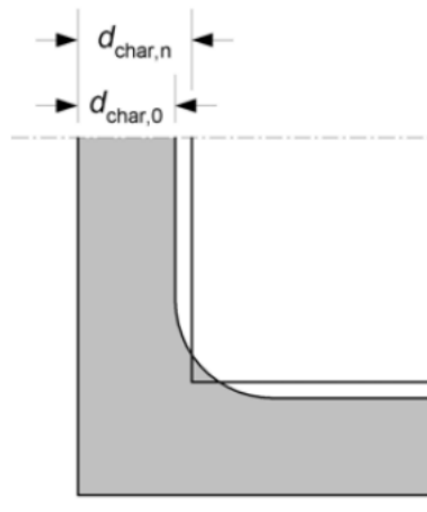
Hvor:

- $d_{char,0}$ er dimensjonerende forkullingsdybde for endimensjonal forkulling
- β_0 er gitt endimensjonal forkullingsdybde
- t er branneksponteringstiden i minutter

Nominell forkullingsdybde tar høyde for hjørneavrundinger ved forkulling i tverrsnittet, for eksempel ved eksponerte bjelker. Her tas den nominelle forkullingsraten i bruk i stedet for endimensjonelle. Forkullingsraten er da gitt ved:

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad (2)$$

Neste figur viser en illustrasjon og sammenligning med hvordan endimensjonal og nominell forkullingsdybde vurderes.



Figur 9- Endimensjonal og nominell forkullingsdybde[17]

2.9 Delaminering

At lameller løsner fra massivtreelementer i løpet av brannen kalles delaminering. Dette er en faktor som i hovedsak vil bidra til økt varmeavgivelse fra trevirket. Dette som følge av at et større overflateareal av tre påvirkes av varmen samtidig og dermed kan pyrolysere. Når dette skjer vil det ta lengre tid før en eventuell brann i massivtreelementet slokner, sammenlignet med om det ikke inntreffer. En slik type delaminering kan også føre til økt varmeavgivelse eller "second flashover" som beskrevet i Brandon og Östermans litteraturstudium[20]. Dette fenomenet er observert både ved delaminering eller når beskyttende gipsplater faller ned.[13]

Det er gjort tester som tyder på at type lim benyttet i limtre eller CLT har betydning for dette fenomenet. Disse testene ble gjort av SP Fire research i 2014.[21]

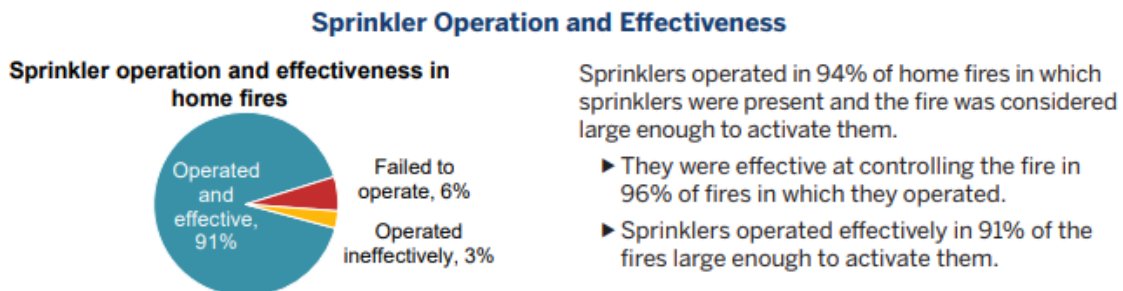
2.10 Sprinkleranlegg

Sprinkleranlegg er i mange tilfeller et svært effektivt aktivt tiltak for å begrense brannspredning og slokke branner. Bruk av sprinkleranlegg kan tilpasset bruk over alt hvor slokkeinnsats tillater vann som slokkemiddel. I Norge benyttes to standarder for dimensjonering av sprinkleranlegg. NS-EN 12845[22] omfatter dimensjonering, installering og vedlikehold av automatiske slokkesystemer for større og mer utsatte bygg, mens NS-INSTA 900-1 i hovedsak spesifikt omhandler boligsprinkler. Det er dermed ikke sagt at boligbygg ikke kan dimensjoneres etter NS-EN12845, ettersom denne har større krav til vannmengde

og av noen ansees som mer sikker, men mer kostbar. Forskjellen mellom sprinkleranlegg og boligsprinkler er i hovedsak vanntetthet. Boligsprinkler lener seg i større grad mot å øke tilgjengelig rømningstid ved å forsinke brannforløpet.

Sprinkleranlegg i seg selv har eksistert lenge, men har historisk sett vært mest benyttet på fabrikker, sykehus og andre større bygg. Etter hvert har også boligsprinkler blitt gjort så kostnadseffektivt at det er begynt å bli et attraktivt brannhemmende tiltak for privathjem. Tallenes tale for fullsprinklede bygg, dvs bygg med full sprinklerdekning viste at i ved 96% av branntilløpene, ble brannen kontrollert eller sloknet av sprinklerhoder alene.[24]

Tall fra National Fire Protection Association (USA) viser at sivile dødsfall i sprinklede bygg var 81% lavere enn i bygg uten. Tall fra samme rapport viser også at sprinkleranlegg gjorde det tryggere for redningsmannskap å gjøre jobben sin, med 79% lavere antall skader i sprinklede bygg. I 97% av branntilløpene forble brannen i samme rom som oppstart til sammenligning med 74% uten sprinkler. Til sist kan vi se hvor sikkert det er at sprinklene i seg selv fungerer:



Only one sprinkler head operated in 88% of home fires with operating sprinklers. In 98% of fires with operating sprinklers, five or fewer sprinkler heads operated.

In three out of five (62%) of fires in which sprinklers failed to operate, the system was shut off.

Figur 10-Sprinklereffektivitet[24]

Her fremkommer det tydelig at sprinkler har stor operasjonssikkerhet. Ved over 60% av tilfellene hvor sprinklerhoder ikke aktiverte var brukerfeil årsaken. Ved 51% av tilfellene hvor sprinkler var ineffektive, nådde ikke vannet frem til flammene. Tallene er tatt fra USA ettersom det ikke er mulig å fremvise slik statistikk fra Norge. NFPA regnes som en seriøs aktør innenfor brannsikkerhet og deres standarder er gyldige også for prosjektering i Norge.

Et sprinkleranlegg behøver en del komponenter for å kunne fungere. vanntilførsel med tilstrekkelig trykk og tilgjengelig vannmengde er nødvendig. Her kan et problem i noen områder være tilstrekkelig vanntilførsel. En løsning vil da være å ha et lagringsbasseng for vann samt en pumpe, slik at det alltid vil være vann tilgjengelig dersom en eventuell brann skulle oppstå. Neste steg er sprinklerhoder. Disse kan installeres i tak, på vegger, over himling basert på hva de skal dekke. Det finnes selvsagt mange flere typer til nisjebruk, og det utvikler fortsatt nye typer for å dekke nye behov og effektivisere bruken av dem. Avhengig av type vil disse ha ulik dekningsgrad, og vanddensitet. De neste figurene viser sprinklerhodet med en rødt glassampull installert, og neste figur fremstiller ulike typer ampuller og hvilken

temperaturpåvirkning som kreves for at de skal sprekke og dermed åpne for vannstrøm inn i sprinklerhodet. Det er viktig å merke at glasset på ampullene kan være av ulik tykkelse, som vil være med å bestemme hvor temperatursensitiv ampullene vil være ved raske temperatursvingninger. Det finnes for eksempel quick response hvor ampullene er tynnere og mer sensitiv, og standard response, som kan sees på bildet.



Figur 11-Takmontert sprinklerhode og sprinklerampuller[25]

I tillegg til sprinklerhoder og ampuller, behøves det også rør for å frakte vannet. Disse kan være i både plastikk eller metall. Problemet med metall er at det kan dannes kondens på utsiden og dermed forårsake rust og svekkelser i systemet. Det kan også ruste på innsiden, og dermed kan korrosjon forårsake hurtig degradering av metallet.

Det viktigste elementet i et sprinklingssystem er en operativ sprinklersentral. Denne har en flere viktige oppgaver. Blant annet skal den kunne detektere om et sprinklerhode er utløst, dersom det oppstår trykkendringer over denne. Den kan dermed varsle aktuelle aktører som brannvesen og utløse brannalarmer for gitt bygg. At sentralen fungerer som den skal er essensielt for at et sprinklersystem skal fungere. Det er også her de fleste brukerfeil ved sprinkleranlegg oppstår. Her kan vannet for hele systemet stenges av og dette har gjentatte ganger hendt. Eksempelvis ved at systemet er skrudd av for trykktesting, drenering eller problemer med alarm og hvor det etterpå har blitt glemt å skru på vanntilførsel igjen. Dermed dermed blir anlegget stående uten vann og trykk.

Valg av riktig type sprinkleranlegg vil være viktig for å få ønsket resultat og effektivitet. Feil valg kan føre til store ekstrakostnader da det kanskje må monteres på nytt eller kompromittert og ineffektiv verdisikring. [26][27]

2.10.1 Våtsprinkler

Våtsprinkler er den mest vanlige typen benyttet. Her er hele systemet trykksatt med vann slik at det til enhver tid skal være klart dersom det utløses. Dersom lave temperaturer kan føre til at vannet i rørene fryser og deretter at rør sprekker, kan de blandes inn glykol for å senke frysepunktet. Denne løsningen kan by på problemer ettersom glykolen kan antennes med en gang sprinklerhodet aktiveres og skape farlige situasjoner. Denne type løsning må dermed dimensjoneres nøye for å forhindre et slikt scenario. Det skiller også mellom vanlig anlegg og deluge. Deluge vil si at dersom et hode aktiveres, så aktiveres samtlige hoder. Denne typen anlegg er ikke vanlig, men kan benyttes på anlegg hvor utvikling av brann vil ha særs store konsekvenser. Et slikt anlegg vil også medføre vannskader i mye større grad enn et vanlig anlegg.[26][27]

2.10.2 Tørrsprinkler

Tørrsprinkling betyr at rørsystem er trykksatt med luft i stedet for vann. Dette fordi anlegget er installert i et område med fare for frost. For eksempel utendørs, på et kjølerom eller loft. Dersom rørene fryser med vann i seg kan de sprekke og medføre store kostnader som følge av vannskader. Tørranlegg krever spesiell montering. Her kan det kun benyttes stående eller liggende dyser og det må være fall fra det ytterste sprinklerhodet til selve sprinklerventilen som befinner seg i sentralen. I tillegg må rørene være syrefaste som et tiltak mot oksidering. Dersom en glassampull sprekker vil luften i systemet flyte ut fra sprinklerhodet og det blir trykkfall i rørene som igjen medfører at vann vil bevege seg gjennom sprinklersentralen, ut i rørene og til slutt spre seg ut fra dysen for å slukke brannen. Det er krav til at denne vannfyllingen maks skal ta 60 sekunder. [26][27]

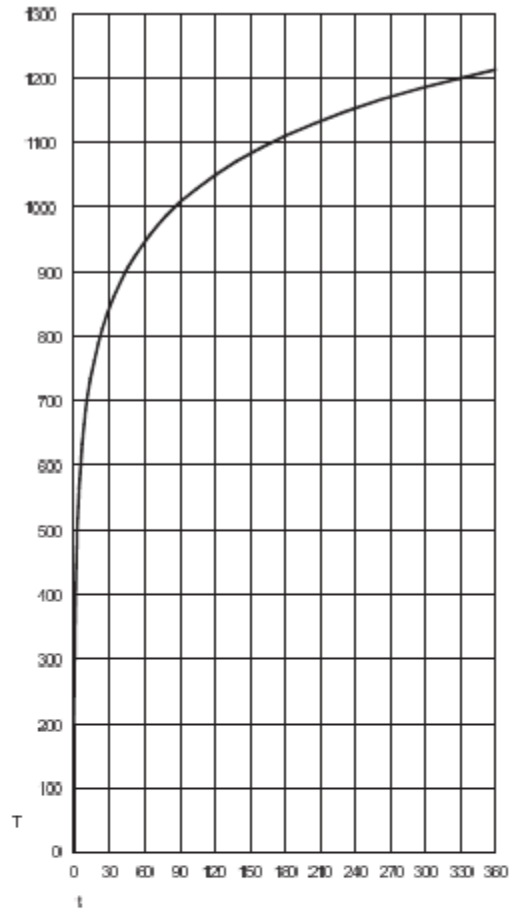
2.11 Brannteknisk klassifiser og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter

For å oppnå kravene i byggteknisk forskrift må bygningsmaterialer og bygningsdeler tilfredsstille bestemte branntekniske ytelser når det gjelder:

- Bygningsdelers brannmotstand
- Byggeprodukters egenskaper ved brannpåvirkning

Det er innført felles europeiske prøvingsmetoder og klassifiseringsregler i hele EØS området. NS-EN 1363-1 definerer temperatureksponering for bestemmelse av brannmotstand som et tid-/temperaturforløp, mens NS-EN 1363-2 angir alternative temperatureksponeringer og prosedyrer som kan benyttes under spesielle testforhold. [28]

Videre er klassifisering av materialers egenskaper under brannpåvirkning gitt i NS-EN 13501:2018 del 1 og 6 i form av euroklasser.[29] Dette systemet er harmonisert under EUs byggevaredirektiv. Klassene for bygningsdelers brannmotstand er gitt i del 2. Bygningsdelers brannmotstand uttrykker hvor lenge en bygningsdel kan opprettholde sine viktigste funksjoner ved brannprøving i henhold til en standard tid-/temperaturkurve som ser slik ut:



Key

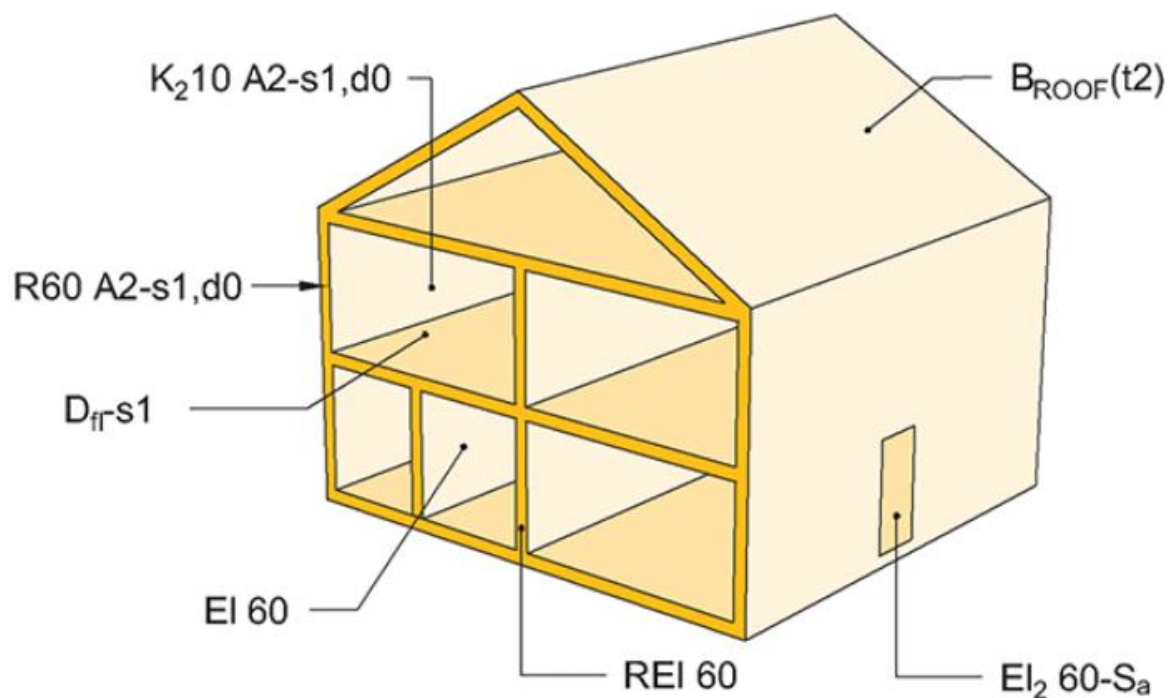
T temperature °C
t time minutes

Time min	Furnace temperature °C	Time min	Furnace temperature °C
0	20	90	1008
5	578	120	1049
10	678	150	1082
15	738	180	1110
20	781	210	1133
30	842	240	1153
45	902	300	1188
60	945	360	1214

Figure 7 — Standard temperature/time curve

Figur 12-ISO 834 standard brannkurve og temperaturer[28]

Neste figur viser ulike typer betegnelser og klassifisering på bygningsdeler med tanke på hvilken plassering og rolle de har i et bygg.



Figur 13-Brannteknisk klassifisering[30]

I neste tabell er de ulike forkortelsene benyttet i klassifiseringen forklart.

Benevnelse	Betydning	Forklaring
15, 30, 60, 90, 120, 180, 240	Tid i minutter	Hvor lenge den aktuelle bygningsdelen skal opprettholde sine viktigste funksjoner under brann.
R	Bæreevne	Bygningsdelens evne til å bevare tilstrekkelig bæreevne under mekaniske laster på en eller flere sider over gitt periode
E	Integritet	Evnen en bygningsdel har til å motstå branneksposering på en side uten at brannen overføres til den ueksposerte siden, som følge av gjennomgang av flammer eller varme gasser
I	Isolasjonsevne	Evnen til å motstå brannoverføring som følge av konduksjon gjennom bygningsdelen. Kriteriet er at den ueksposerte siden ikke skal overstige et gjennomsnitt på 140 °C i gjennomsnitt eller 180 °C i et punkt.
M	Mekanisk motstand	En bygningsdels evne til å motstå støt fra sammenstøtning av en annen bygningsdel som følge av konstruksjonssvikt ved brann.

C	Selvlukking	Evnen til en dør eller vindu å gå fra åpen stilling til lukket ved utløst brannalarm. Dette gjøres ofte ved elektromagneter som holder bygningsdel i åpen stilling frem til alarmen går og magneten blir deaktivert.
S	Røyktetthet	En bygningsdels evne til å forhindre gjennomtrenging av gass eller røyk. Klassifiseres i to ulike betegnelser. S _a , tar hensyn til røyktetthet ved normal omgivelsestemperatur. S ₂₀₀ tar hensyn til røyktetthet ved normal og 200 °C omgivelsestemperatur

Tabell 3-Forklaring av brannklassifisering[30]

NS-EN 13501-1 er gjeldende for totalt 34 land i Europa blant annet Norge. Den omhandler 3 kategorier:

1. Konstruksjonsprodukter ekskludert gulv
2. Gulv
3. Lineære rørs termiske isolasjonsprodukter

Ut ifra gitte definerte brannscenario utført som tester kan en produsent dokumentere brannmotstanden for sine produkter gitt at de følger prosedyrene anvist i denne standarden. Et eksempel på et produkts dokumentasjon kan være "A2-s1,d0". Hvor A2 sier noe om hvor brennbart produktet er, s1 om røykproduksjonen ved brannpåvirkning og til slutt d0 som anviser om materialet vil avgi brennende dråper. I neste figur er det gitt samtlige euroklasse samt tilleggsklasser for byggevarer.

A1				
A2-s1,d0		A2-s1,d1		A2-s1,d2
A2-s2,d0		A2-s2,d1		A2-s2,d2
A2-s3,d0		A2-s3,d1		A2-s3,d2
B-s1,d0		B-s1,d1		B-s1,d2
B-s2,d0		B-s2,d1		B-s2,d2
B-s3,d0		B-s3,d1		B-s3,d2
C-s1,d0		C-s1,d1		C-s1,d2
C-s2,d0		C-s2,d1		C-s2,d2
C-s3,d0		C-s3,d1		C-s3,d2
D-s1,d0		D-s1,d1		D-s1,d2
D-s2,d0		D-s2,d1		D-s2,d2
D-s3,d0		D-s3,d1		D-s3,d2
E		E-d2		F

Tabell 4-Brannteknisk klassifisering av bygningsdeler[30]

I neste figur fremvises en enkel fremstilling for hvordan en bygningsdel testes for å vurdere hvilken klassifisering av brannmotstand som kan dokumenteres. NS-EN 13501-1 vil videre henviser til ytterligere standarder som beskriver testkriteriene for hver enkelt klasse i større detalj.

Euroklasse	Ytelseskrav	Dimensjonerende brann	Varmeeksponering	Aktuelle standarder
A	Intet bidrag til brannutvikling	Fullt utviklet brann i rom	60 kW/m ²	EN ISO 1182 og EN ISO 1716
B	Svært begrenset bidrag til brannutvikling	Fullt utviklet brann i rom	60 kW/m ²	EN ISO 1182 eller EN ISO 1716 og EN 13823
C	Begrenset bidrag til brannutvikling	Brann i et objekt i rom	40 kW/m ²	EN 13823 og EN ISO 11925-2
D	Akseptabelt bidrag til brannutvikling	Brann i et objekt i et rom	40 kW/m ²	EN 13823 og EN ISO 11925-2
E	Akseptabel oppførsel ved branneeksponering	Eksposering for en liten flamme	20 mm flammehøyde	EN ISO 11925-2
F	Ingen krav til ytelse	-	-	EN ISO 11925-2

Tabell 5-Dokumentasjon av brannegenskaper[31]

For ordens skyld vil ubeskyttet trevirke plasseres i kategorien D, mens brannimpregnert trevirke kan oppnå klasse B.

2.12 Dokumentasjon av brannmotstand

I byggesaker er brannmotstanden et av områdene som må dokumenteres med tanke på ytelsesnivå. Dette kan gjøres ved at nødvendig dokumentasjon eller referanser til dokumentasjon er vedlagt i prosjekterings og anbudsdokumentene. Disse skal samtidig være tilgjengelig for innsyn fra myndighetene. Egenskapene kan dokumenteres etter Norsk Standard eller europeiske tekniske godkjenninger. Det kreves at av Byggteknisk forskrift at produkttegnisger av betydning for de grunnleggende kravene til byggverk skal være dokumentert før produktet kan omsettes og brukes. Dette gjøres i henhold til produktstandarder eller europeiske tekniske godkjenninger(ETA). SINTEF er en nøytral aktør som driver med slik godkjenning av dokumentasjon i Norge, både teknisk godkjenning og produktsertifikat.[31]

3 Regelverk for Brannprosjektering

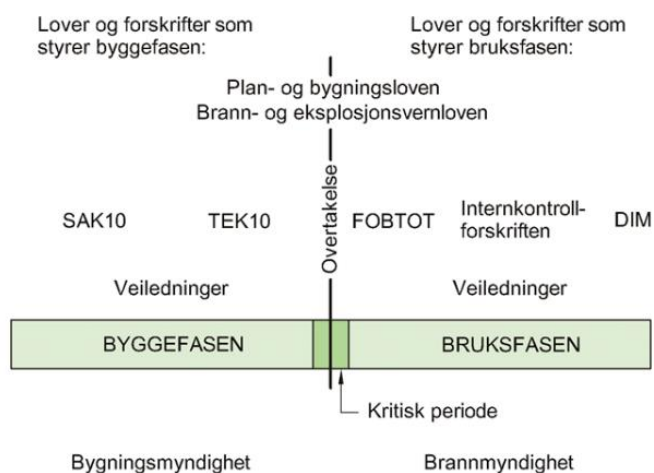
Alt som konstrueres i Norge skal oppføres slik at det tilfredsstillers funksjonskravene angitt i forskrift om tekniske krav til byggverk. Denne gir krav til utforming, energikrav og brannsikkerhet blant annet. Avhengig av kompleksiteten til bygget ansetter tiltakshaver en prosjekteringsgruppe bestående av ulike typer aktuelle ingeniører som på hvert sitt område skal sørge for å dokumentere at prosjekteringen blir utført i henhold til forskriftskravene i TEK17. Til slutt, når prosjekteringsfasen er over er det entreprenørens oppgave å sørge for den fysiske utformingen, samt at materialvalget tilfredsstillers de spesifikasjonene som er gitt angitt a prosjekteringsgruppen.

3.1 Plan og bygningsloven

Dersom man skal konstruere et bygg i Norge er man underlagt Lov om planlegging og byggesaksbehandling (PBL). Den er gjeldende for samtlige byggeprosjekter og virksomheter i landet. Formålet med loven er å fremme bærekraftig utvikling, sikre et byggetiltak utføres sikkert i samsvar med loven. Planlegging og vedtak skal sikre åpenhet, forutsigbarhet og medvirkning for alle berørte interesser og myndigheter. Det skal legges vekt på langsiktige løsninger og konsekvenser for miljø og samfunn skal beskrives. [32]

PBL angir krav overordnede krav til brannsikkerhet for byggverk. Dersom prosjektet oppfyller kravene til byggverk angitt i TEK, vil PBL ansees som tilfredsstillt.

Neste viser hvilke lover og forskrifter som det skal for holdes til både i byggefase og bruksfase.



Figur 14-Krav i byggefase og bruksfase[33]

3.2 Byggesaksforskriften (SAK10)

Denne forskriften styrer selve byggeprosessen. Den skal sørge for effektiv og forsvarlig saksbehandling og gjennomføring for eksempel i form an angivelse av tiltaksklasser for planlagte byggverk. Med dette kan det også stilles kvalifikasjonskrav for de involverte partene. Uavhengig kontroll eller tredjepartskontroll kan også fastsettes. [34]

3.3 Byggteknisk forskrift (TEK17)

TEK er en av forskriftene til PBL. Denne angir krav til tekniske installasjoner til byggverk. Dette er den mest sentrale forskriften når den kommer til brannsikkerhet, i hovedsak kapittel 11. Dette kapittelet beskriver generelle krav til sikkerhet ved brann for personer, materiell, og miljø- og samfunnsmessige egenskaper. Disse kravene kommer i form av funksjonskrav og ytelseskrav[35]

3.3.1 Funksjonskrav

Funksjonskrav er krav i TEK17 som beskriver hvilken funksjon et objekt skal tjene. Disse kravene kan ikke avvikes. Et eksempel på relevant funksjonskrav fra TEK17 er:

"Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendigbrannforløp, slik dette kan modelleres", §11-4, TEK 17.

Kravene er gitt på en generell basis og spesifiserer ikke hvilke typer materialer som må benyttes for å oppnå disse tilfredsstillende funksjon. Det er derfor viktig å kunne dokumentere at antagelsene gjort underprosjekteringen er rimelige, og at det er tatt hensyn forventer brannforløp med tanke på brannenergi, ventilasjon og størrelsen av branncellen. Dette er et av de strengeste kravene, og et vesentlig problem er å kunne dokumentere at stabiliteten vil være god nok for bygg konstruert i limtre og massivtre gjennom et aktuelt fullstendig brannforløp.

Oppfyllelse av funksjonskrav skal dokumenteres enten:

1. Ved å følge preaksepterte ytelser angitt i veiledning til TEK17.
2. Ved å benytte ytelser verifisert ved analyse som igjen beviser at funksjonskravet er oppfylt på en minst like god måte som ved bruk av preaksepterte ytelser. Kvalitativ eller kvantitativ analyse kan benyttes.

3.3.2 Ytelser

Ytelser som er angitt i forskrift er myndighetenes tolkning og konkretisering av nødvendige tiltak som skal til for å oppfylle funksjonskrav. Ytelsene angis som ytelseskrav dersom de er i forskriften og preaksepterte ytelser dersom de komme fra veiledning til aktuell forskrift. De fleste ytelser er angitt kvantitativt i den grad det lar seg gjøre.

Ytelser eller preaksepterte løsninger er forslag og anbefalinger til løsninger beskrevet i veiledningen til aktuelle funksjonskrav. Dersom disse følges, vil funksjonskravet regnes som oppfylt. For mange bygg spesielt kompliserte, vil ikke VTEK's preaksepterte løsninger alltid kunne være ideelle. Dette er fordi det er vanskelig å lage en mal som kan forutse alle problemstillinger og lage preaksepterte løsninger for disse. Ytelser kan ikke fravikes med mindre det er gitt dispensasjon fra aktuell kommune. [36]

3.3.3 Fravik

Fravik er dersom de prosjekterende velger løsninger som ikke følger de preaksepterte løsningene i VTEK. Slike løsninger krever at det dokumenteres at den nye løsningen er minst like god, som en preakseptert løsning ville vært for et referansebygg utført med VTEK's løsninger.

3.3.4 Fraviksanalyse

Dersom de prosjekterende velger løsningene utenom de preaksepterte ytelsene stilles det krav til dokumentasjon om at nye løsninger skal være minst like gode som de angitt i VTEK17. Slik dokumentasjon kan gjøres gjennom analyser, enten kvalitative eller kvantitative. En kvalitativ analyse utføres med vurderinger fra prosjekterende. Hvor det argumenteres for at løsningen er godt nok, basert på forskning og erfaringer. En kvantitativ analyse kan ofte være mer tidkrevende og kostbar ettersom en slik vil i mange tilfeller kreve at simuleringer benyttes som dokumentasjon.

3.4 Brann og eksplosjonsvernloven

"Loven har som formål å verne liv, helse, miljø og materielle verdier mot brann og eksplosjon, mot ulykker med farlig stoff og farlig gods og andre akutte ulykker, samt uønskede tilsiktede hendelser."

Den stiller blant annet krav til forebygging av brann og eksplosjon, og systematisk HMS arbeid i form av internkontroll for å sikre at kravene i loven er ivaretatt.[37]

3.5 Internkontrollforskriften

I forskriften er internkontroll definert som *"Internkontroll: Systematiske tiltak som skal sikre at virksomhetenes aktiviteter planlegges, organiseres, utføres, sikres og vedlikeholdes i samsvar med krav fastsatt i eller i medhold av helse-, miljø- og sikkerhetslovgivningen."*

Her stilles det krav til hvilke tiltak som skal gjennomgås for å bedre den aktuelle virksomhetens innenfor blant annet arbeidsmiljø, sikkerhet og forebygging av uønskede hendelser mm.

3.6 Dimensjoneringsforskriften

Ved brannprosjektering må man også forholde seg til dimensjoneringsforskriften og hva som gjelder for brannvesen i det aktuelle området. I denne forskriften stilles det blant annet krav til vaktlag på jobb, utstyr tilgjengelig samt inspeksjoner og tilsyn fra brannvesen. Det stilles krav til organisering av samarbeid mellom virksomhet og brannvesen.[39]

3.7 Norsk standard(NS)

Norsk standard er et betalingsalternativ som også kan benyttes for å dokumentere at ytelser er oppfylt, på lik linje med veiledninger gitt i VTEK. Dette omfatter både nasjonale (NS) og internasjonale standarder som gjelder i Norge. Eksempler på internasjonale standarder fastsatt i Norge er NS-ISO, NS-EN, NS-INSTA. I tillegg kan amerikanske standarder fra National Fire Protection Association (NFPA) benyttes og ansees som fullgode standarder. I en del tilfeller vil standarder bli angitt i forskriften, eller som preakseptert ytelse der de er angitt i veiledningen.[36]

3.8 Risikoklasser og brannklasser

TEK17 angir hvilken risikoklasse og brannklasse et nyoppført byggverk skal plasseres i. Med dette medfølger det også krav til brannmotstand og bestandighet for de bygningsdeler som benyttes.

Først fastsettes risikoklasse ut ifra gitt matrise i §11-2 TEK17, medfølgende funksjonskrav:

"Ut fra den trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse, skal byggverk eller ulike bruksområder i et byggverk plasseres i risikoklasser etter tabellen nedenfor. Risikoklassene skal legges til grunn for prosjekteringen og utførelsen for å sikre rømning og redning ved brann."

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

Figur 15-Tabell med veiledning til risikoklasse[35]

I tillegg til dette skal også brannklasse fastslås ut ifra hvilken konsekvens en eventuell brann kan innebære, med gitt funksjonskrav i TEK17 §11-3:

Ut fra den konsekvensen en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljøet, skal byggverk eller ulike deler av et byggverk plasseres i brannklasser etter tabellen nedenfor. Brannklassene skal legges til grunn for prosjekteringen og utførelsen for å sikre byggverkets bæreevne mv. ved brann.

Brannklasse	Konsekvens
1	Liten
2	Middels
3	Stor
4	Særlig stor

Figur 16-Brannklasser og konsekvens[35]

Her er det komplisert å fastslå nøyaktig grad av konsekvens ved brann, og det kan være lettere å benytte veiledningen til forskriften for å dokumentere brannklasse. Den benytter seg av en matrise mellom byggets risikoklasse og antall tellende etasjer.

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

Figur 17-Tabell med veiledning til brannklasse[35]

3.9 Bruk av tre som bæresystem

Det stilles strenge krav til bærende konstruksjon i alle bygg som oppføres. Hvilke egenskaper disse bærende elementene skal ha er gitt som preaksepterte ytelser i VTEK 17. I neste tabell er det gitt en oversikt over ytelsene til bestemte bygningsdeler i en konstruksjon basert på brannklasse.

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

Tabell 6-Egenskaper for bærende elementer[35]

Det er her et av hovedproblemene for høye bygg konstruert fullstendig i tre oppstår. brannmotstand A2-s1,d0 er ikke mulig å oppnå ved bruk av tre. Dette medfører at det per nå ikke eksisterer noen preaksepterte løsninger som kan benyttes dersom et bygg over 5 etasjer (Brannklasse 3) skal oppføres med bærende konstruksjon i tre. Dermed vil det alltid i slike tilfeller være nødvendig med analytisk prosjektering, enten som kvalitativ eller kvantitativ vurdering av sikkerhetsnivået. Den høyeste graden treverk kan oppnå i euroklasse er B-s1,d0 dersom det er brannbeskyttet. Uten, vil tre oppnå en klasse på D-s2,d0.

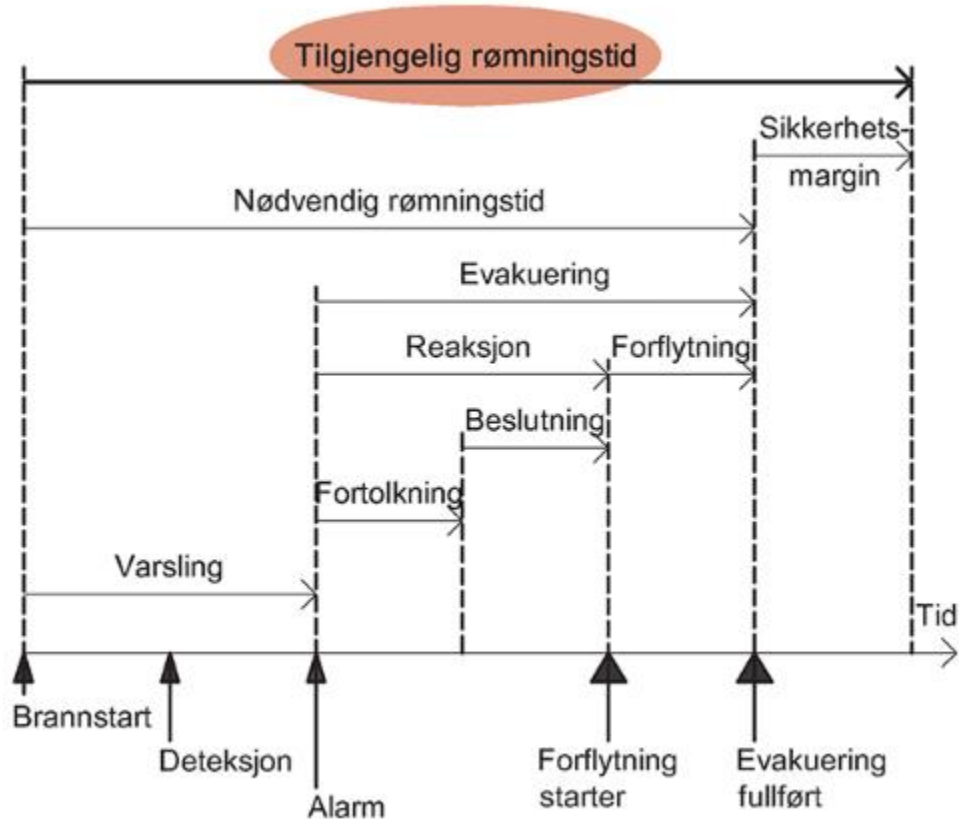
3.9.1 Nødvendig og tilgjengelig rømningstid

Nødvendig- og tilgjengelig rømningstid er nødvendige funksjonskrav som er gitt for at personsikkerheten i et bygg skal være ivaretatt i tilfelle brann.

Blant annet §11-11 første og andre ledd i TEK 17 beskriver funksjonskravene et byggverk skal ha med tanke på rømning og redning.

- (1) *Byggverk skal prosjekteres og utføres for rask og sikker rømning og redning. Det skal tas hensyn til personer med funksjonsnedsettelse.*
- (2) *Den tiden som er tilgjengelig for rømning, skal være større enn den tiden som er nødvendig for rømning fra byggverket. Det skal legges inn en tilfredsstillende sikkerhetsmargin.*

Byggforskeren 520.387[40] forklarer forholdet mellom variablene nødvendig og tilgjengelig rømningstid samt hvilke faktorer som påvirker de to. I tillegg viser den til en ekstra sikkerhetsmargin som er tilstede for å garantere for personsikkerheten med tanke på usikkerheter rundt rømningsanalyser og hva den nødvendige rømningstiden er konkludert med å bli. Det gjenspeiles ikke tydelig i figuren, men som en tommelfingerregel er det vanlig å benytte 2-3 ganger den nødvendige rømningstiden som sikkerhetsmargin.



Figur 18-Nødvendig- og tilgjengelig rømningstid[41]

Krav til en konstruksjons bæreevne og stabilitet står beskrevet i §11-4 i TEK17 med veiledning. Her er det for byggverk i brannklasse 3, som regel bygg med 5 tellende etasjer eller mer en preakseptert ytelse at for de bærende og stabiliserende bygningsdelene at de skal være ubrennbare. Dersom man i motsetning til dette ønsker å benytte bygningsdeler til disse formål som ikke oppnår dette ubrennbarhetsmålet, må det gjennom analyse verifiseres at de kan yte minst like god eller bedre ytelse gjennom et fullstendig brannforløp. Kravet er at de skal ha en brannmotstand på 90 minutter. Grunnen til at brennbare og ubrennbare må behandles ulikt er fordi de brennbare bygningsdelene kan gi ekstra bidrag til brannutviklingen, og dermed påvirke brannforløpet. Brannforsøk har vist at massivtreelementer kan oppnå høy brannmotstand spesielt med hensyn til bærende funksjon, R. [42]

4 Litteraturstudie

Det gjøres stadig forskning for å kunne dokumentere hvilket nivå av brannsikkerhet som kan dokumenteres. I takt med utviklingen og prestisjen som går i å bygge større og mer kompliserte konstruksjoner i limtre og CLT må også forskningen følge etter. Det er særlig viktig at funksjonskravene som stilles til byggverk, følges slik at person- og verdisikkerheten ved en eventuell brann blir ivaretatt. I verste fall, kan svak dokumentasjon føre til at brannkonseptet av hele bygget er basert på feilaktig dokumentasjon. Dette kan medføre personskader, tap av liv og verdier. Dette vil igjen ha store konsekvenser for leverandører av bygningsdeler og prosjekterende. Men også ikke minst de involverte i en eventuell uønsket hendelse. Tap av renommé, kontrakter, inntekter og arbeidsplasser for leverandører men også prosjekterende kan være noen av konsekvensene ved slike hendelser.

Mye av den generelle skepsisen til større bygg i tre handler om hvor trygt bygget vil være ved en eventuell brann. Den 14 juni 2017 brant det i Grenfell Tower i London. Her ble brannen raskt oppdaget av røykvarslere, og brannvesen varslet. Beboere som ikke var direkte involvert fikk instruks om å bli i leilighetene sine til de ble evakuert, da dette er standard prosedyre for slike høyhus. Det var prosjektert slik at hver leilighet var egen branncelle og skulle motstå spredning mellom leilighetene i minst 1 time. Dette kravet var dessverre ikke oppfylt, da fasaden nylig var pusset opp. Her var de nye vinduene, kledning og isolasjon av mye lavere brannmotstand enn det bygget var dimensjonert for. Denne mangelfulle kontrollen på hvilke materialer som ble benyttet og det brannegenskaper, sammen med andre feil førte til at 72 mennesker omkom i denne brannen, da flammen raskt spredde seg i fasaden fra 4 etasje til toppen av bygget i 24 etasje i løpet av 20 minutter. Dette var den verste boligbrannen siden andre verdenskrig i Storbritannia. Grenfell var ikke konstruert i massivtre, men var et konvensjonelt høyhus i stål og betong.[1] Denne hendelsen bidro i stor grad til å få økt fokus på konsekvenser ved brann i slike høye bygg. Men annen lærdom man kan ta fra denne hendelsen, er at bruk av feil materialtype enn det som bygget er dimensjonert for kan ha store konsekvenser. Det er dermed ikke nødvendigvis sagt at bygg i stål og betong skal være mer brannsikkert enn bygg konstruert i limtre og CLT. Det er her forskning spiller en viktig rolle ved å i størst mulig grad bidra til å underbygge eller tilbakevise at en viss type materiale er god nok eller ikke, til gitt bruk.

Å forske på brannutvikling er komplisert. Småskala forsøk vil ikke nødvendigvis være gjeldende og kan i mange tilfeller ikke overføres direkte til større konstruksjoner. Større forsøk er dyre, og ressurskrevende samt kompliserte. Slike forsøk krever god planlegging spesielt med tanke på hva som bør måles og hvordan det kan måles så presist som mulig. Videre i dette kapitlet skal det presenteres nyere forskning på områder som kan relateres til bygging av konstruksjoner limtre og CLT, og som har som formål å underbygge i hvilken grad brannsikkerheten kan dokumenteres å være ivaretatt. Bruk av sprinkleranlegg er ofte et kompensierende tiltak som benyttes for å dokumentere at sikkerheten er ivaretatt i massivtrebygg. Det er derfor tatt med et eget kapittel fra et unikt forskningsprosjekt i USA angående dette.

4.1 Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner

I 2017 gjorde SP-Fire research et storskala forsøk på henvisning fra Sweco for å undersøke hvorvidt funksjonskravet til hovedbæresystem for brannklasse 3 og 4 kunne overholdes ved bruk av limtrekonstruksjoner. Funksjonskravet i TEK17 §11-4 sier at:

(4) Bærende hovedsystem 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.

Den preaksepterte ytelsen til bæresystem i brannklasse 3 er R90 A2-s1,d0. Dette betyr at bæresystemet skal opprettholde bæreevnen i minimum 90 minutter under en standard ISO-brann og være ubrennbar. Det konkluderes av Sweco med at dersom man sammenlignet kravet i TEK opp mot den angitte ytelsen i VTEK vil DiBK ha definert at belastningen fra et fullstendig brannforløp ikke vil overstige 90 minutter ved påkjenning av en ISO-brann, forutsett at det aktuelle bæresystemet ikke tilfører brannen energi og at brannenergien ikke er unormalt høy.[43] Det stilles som forutsetning for at forsøket med brennbart bæresystem skal være godkjent at bæresystemet ikke skal bidra til et forlenget brannforløp og at forkullingen skal stoppe videre forbrenning av de bærende konstruksjonene. Flammene skal dø ut når annet brennbart materiale i rommet er utbrent. Det resterende konstruksjonstverrsnittet og forbindelsene til andre bærende elementer må ha tilstrekkelig bæreevne, slik at konstruksjonen ikke kollapser. Til slutt kreves det at bæresystemet må dimensjoneres slik at det evner å motstå et fullstendig brannforløp, uten å ta hensyn til et eventuelt automatisk sløkkeanlegg.

4.1.1 Testoppsett

Ettersom preakseptert ytelse for gitte bæresystem i brannklasse 3 er R 90 A2-s1,d0 ble det fastslått at testforløpet minimum skulle tilsvare R 90 før avkjølingsfase begynte. Det er komplisert og vanskelig å fastsette et nøyaktig avkjølingsforløp, samt kontrollere temperaturene inne i forbrenningsovnen. For å kompensere for disse usikkerhetene slik at testens gyldighetsområde skal være så dekkende som mulig ble testforløpet utført slik:

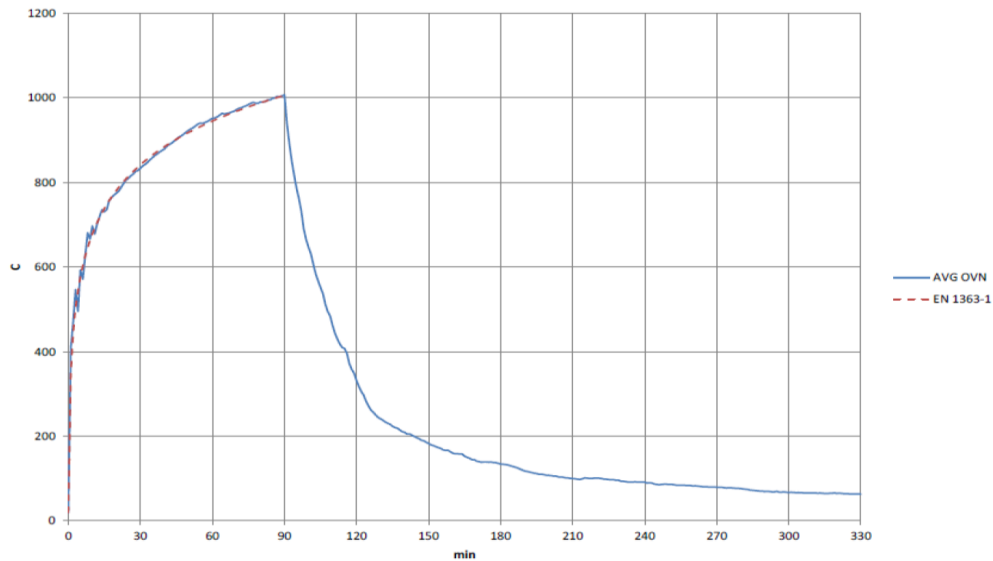
- Prøvestykke utsettes for brann tilsvarende ISO 834-kurven i 90 minutter (NS-EN 1363-1).
- Et prøvestykke løftes ut og avkjøles utenfor ovnen.
- Et prøvestykke med knutepunkt løftes ut og avkjøles utenfor ovnen.
- Et prøvestykke står igjen og avkjøles i ovnen.

Det ble benyttet standard tid/temperaturkurve iht. testytelser gitt i NS-EN 1363-1. Dette skulle tilsvare ytelseskrav til fullstendig brannforløp for ubrennbare konstruksjoner. For denne typen tester kreves det at gjennomsnittstemperaturen målt i ovnen av termoelementer skal følge forholdet:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (3)$$

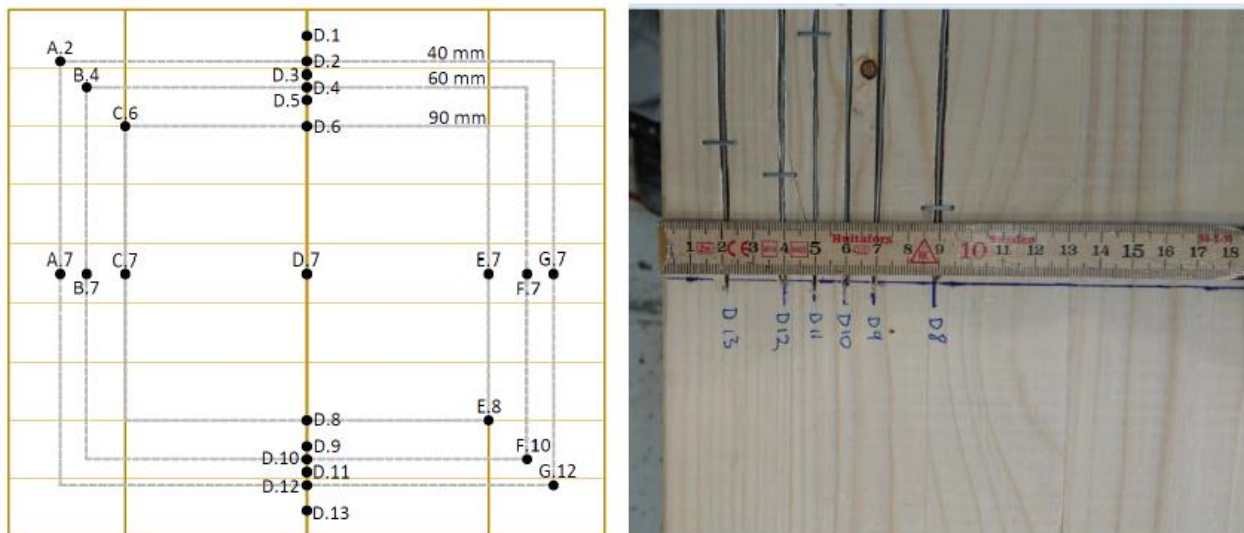
Hvor T er gjennomsnittstemperaturen i ovnen i Celsius og t er tid i minutter.

Figur 19 viser hvordan det testforløpet ble seende ut, hvor rød stiplet linje er formen til ISO-brann og den blå linjen er gjennomsnittstemperaturen i ovnen inkludert avkjølingsfasen.



Figur 19-Temperaturforløp branntest[43]

Prøvestykkene som ble plassert i ovnen bestod av limtresøyler med dimensjoner på 405 x 460 mm. Termoelementene var innlimt i disse, og søylene ble produsert iht. EN 14080 og Norske Limtreprodusenters vanlige metode. De individuelle limtresøylene bestod av 9 lameller og var limt sammen med Melamin Urea Formaldehyd (MUF) lim. Disse ble igjen limt sammen til 4 profiler med Fenol Resorcinol Formaldehyd (PRF). Det ble totalt laget 3 søyler kalt A, B og C. Hvor A og B var identiske og solide fra topp til bunn. De ble instrumentert med termoelementer plassert slik:



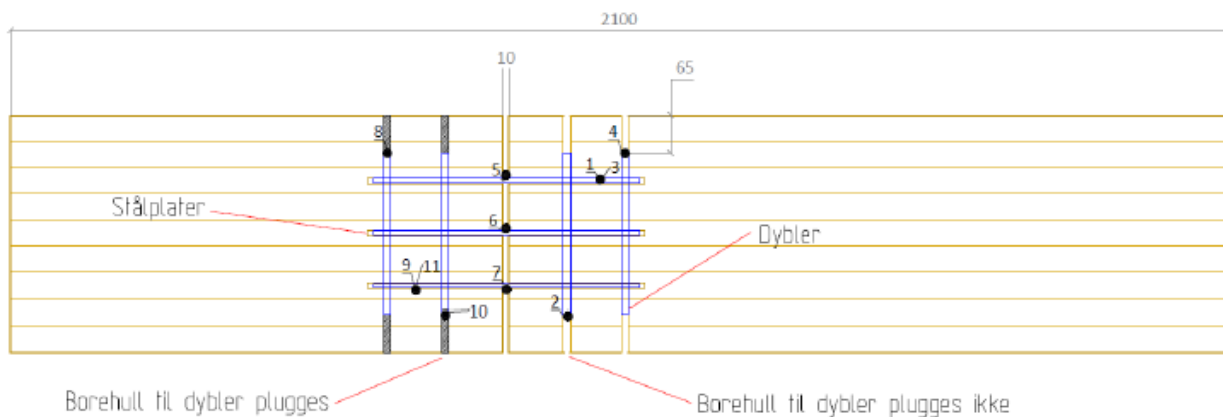
Figur 20-Instrumentering av Søyle A og B/Montering av termoelementer

Søyle C ble satt sammen av 2 identiske deler, som ble skjøtet sammen ved hjelp av plater og dybler i stål. Både platene og dyblene var instrumentert med termoelementer for å måle varmepåvirkning på stålet. I neste figur vises de to delene før montering.



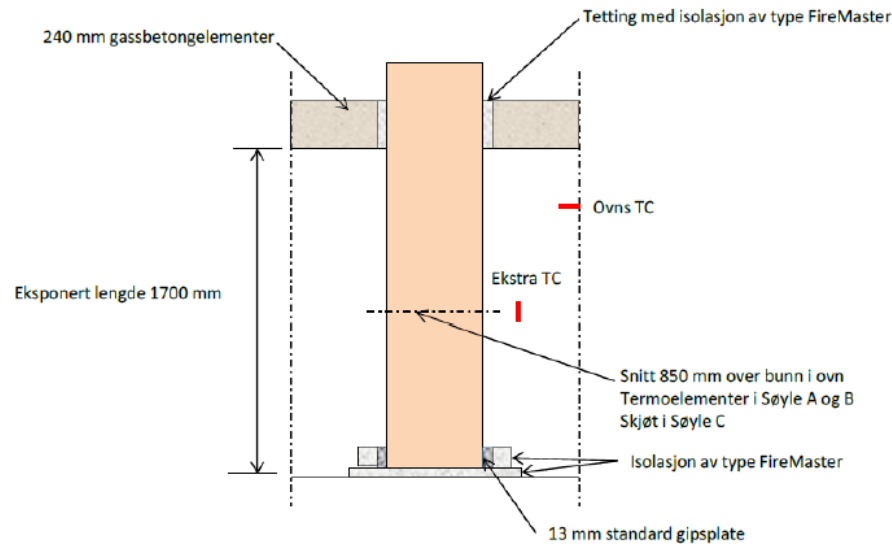
Figur 21-Limtresøyle C før montering

På ene siden av skjøten etter montering ble borehullene til dyblene tett med treplugger og slissene mellom stålplatene tett med varmeekspanderende materiale kalt Intumex L. Det ekspanderer ved rundt 150 °C. Neste skisse viser den komplette søylen, med hvilke borehull som var tettet og plassering av termoelementer.



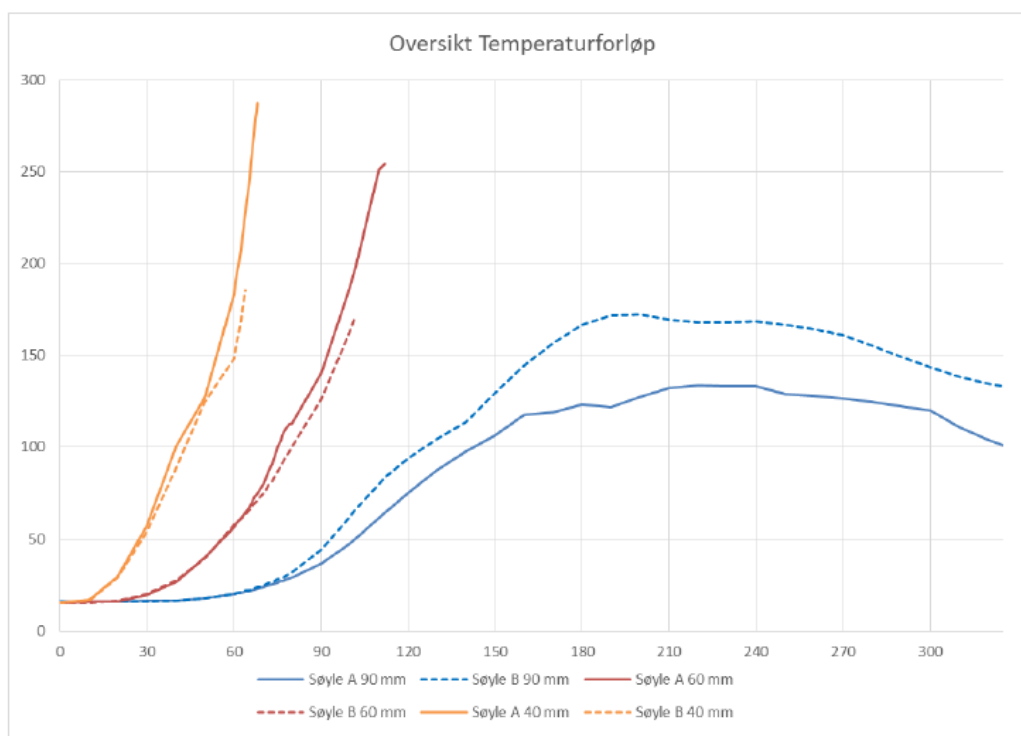
Figur 22-Søyle C med plassering a termoelementer

Til slutt ble søylene plassert individuelt stående i en testovn medfølgende isolasjon montert på toppen og bunnen av ovnen for å forenkle målinger av forkullingsdybden, og forhindre unødig varmepåvirkning av denne berøringen i avkjølingsfasen. Neste figur viser monteringen av søylene, og hvordan de var støttet opp av isolasjon, gipsplater og gassbetongelementer.



Figur 23-Montering i testovn Måleresultater og diskusjon

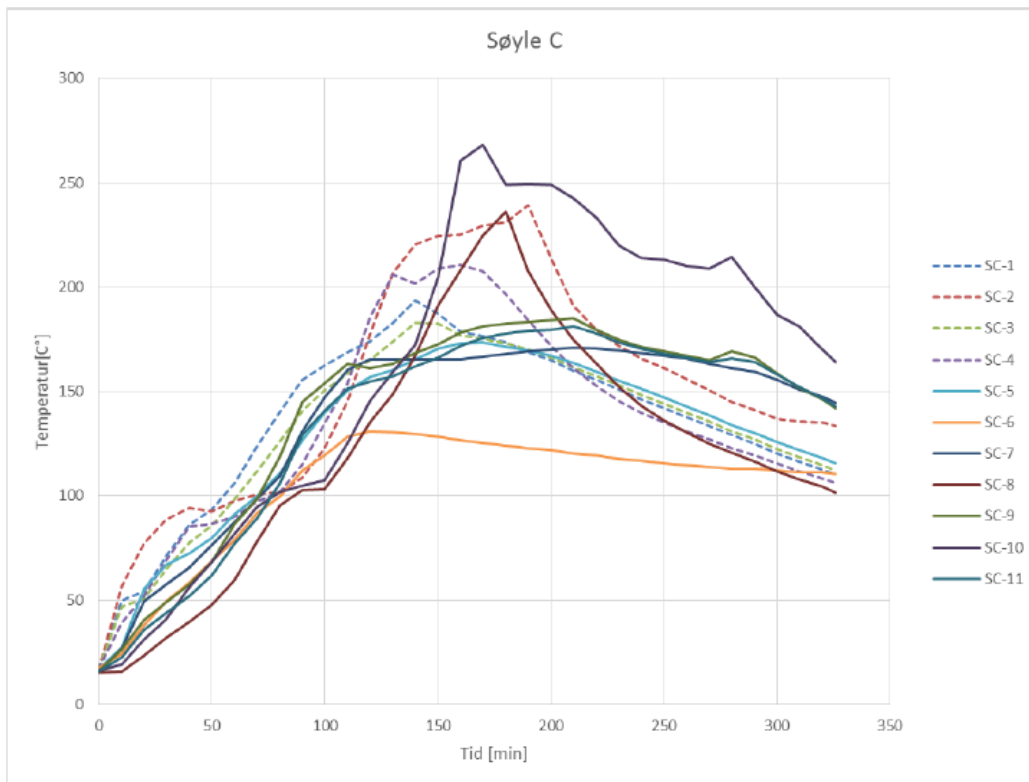
Måleresultater for søyle A og B ble forenklet og omgjort til mediantemperaturer ved måledybder på henholdsvis 40 mm, 60 mm, og 90 mm. Det er 4 målepunkter for hver av de respektive dybdene.



Figur 24-Oersikt over temperaturforløp for søyle A og B

Plottene avsluttes når 1 av de 4 målepunktene når 300 °C, ettersom dette vil tilsvare forkulling av treverket, som igjen medfører lav eller ingen bæreevne og at denne delen av tverrsnittet ikke lenger kan fungere som lastbærende.

En interessant observasjon fra målingene på søyle C er at om dyblene var dekket eller ikke med treplugger ble etter hvert irrelevant med tanke på temperatur da disse jevnet seg ut over tid. Dette var mest sannsynlig fordi at ettersom trevirket forkulles, utvider det seg også og tetter igjen borehullene, og hindrer varmpåkjønning i like stor grad, som før de ble tett.



Figur 25-Måleresultater søyle C

For forkulling ble det også gjort sammenligninger med forkullingshastigheter innenfor gitte måleintervaller innover i søylene. Denne hastigheten ble beregnet ut ifra gjennomsnittstiden det tar for målepunktene å nå 300 °C. Legger merke til at ved dypere målinger vil forkullingssjiktet bevege seg saktere. Dette har mest sannsynlig sammenheng med den varmeisolerende effekten til kullet, og at etter hvert som dette blir tykkere vil det isolere i større grad for bakenforliggende trevirke, som igjen medfører tregere forkulling.

Målepunkter	Søyle A	Søyle B	NS-EN 1995-1-2
0-20 mm	0,57 mm/min	0,59 mm/min	0,65 mm/min
20-40 mm	0,54 mm/min	0,49 mm/min	0,65 mm/min
40-50 mm	0,43 mm/min	0,51 mm/min	0,65 mm/min
50-60 mm	0,20 mm/min	0,17 mm/min	0,65 mm/min

Tabell 7-Målt forkullingsrater for søyle A og B[17][43]

Etter 95 minutters varmpåkjønning når 300 °C sjikteten dybde på 50 mm. Da er temperaturen i ovnen fortsatt 800 °C og den reduserte forkullingshastigheten menes derfor å ikke kunne tilskrives et eventuelt temperaturfall inne i ovnen. Legger også merke til at ved bruk av beregninger utført i henhold til NS-EN 1995-1-2 vil disse forkullingsdybdene være konservativ i sammenlignet med 2 reelle forsøk med ISO 834

brann. Det er viktig å presisere at søyle A ble avkjølt inne i ovnen, ved at betongdekket på toppen ble fjernet, mens søyle B ble avkjølt utenfor ovnen. Hvis vi ser på forkullingsratene antyder disse at avkjøling i eller utenfor ovnen ikke var av særskilt faktor, men heller at forkullingsdybde i større grad var avgjørende for den målte forkullingsraten.

Etter 330 minutter fra oppstart var det fortsatt noe røykutvikling og gløding for søyle A og B med hhv kjernetemperaturer og manuelt målt forkullingsdybde på 45 °C og 74 mm og 41 °C og 71 mm.

4.1.2 Swecos konklusjon

Med bakgrunn i de ovennevnte testresultatene konkluderer Sweco med at det er mulig å dimensjonere et hovedbæresystem i limtre for å motstå et fullstendig brannforløp uten at brannen må bli slokket av et sprinkleranlegg. Grove limtrekonstruksjoner vil i hovedsak ikke bidra til signifikant forlengelse av brannforløpet dersom de ikke lenger tilføres varme. Som følge av dette vil også forkullingen i hovedsak opphøre. Det ble observert glødende fuger hvor det var limt med PRF, men ikke for lameller limt med MUF. Dette tilsier at noe slokkeinnsats kan være nødvendig, men at det ikke er tidskritisk ettersom når temperaturen synker, vil også forkullingen i all hovedsak stanse.

Til slutt understrekes det at det er viktig å vise varsomhet når det skal dimensjoneres trekonstruksjoner i brannceller som kan utsette for lange brannforløp. Brannenergi som tilføres på grunn av brennbart bæresystem, må tas med i beregningene, og kan ikke neglisjeres ved dimensjonering. De resterende tverrsnittene for søylene er ikke lasttestet og det er derfor ikke dokumentert om bæresystemet opprettholder sin bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp.

4.2 Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger

Dette er en litteraturstudie som presenterer og tar for seg nyere forskning angående brannsikkerheten for bygg ved bruk av krysslaminert tre (CLT). Resultater gjort fra større brannekspesiment og andre lignende studier gjort mellom perioden 2010-2018 er forsøkt oppsummert. Hovedfokus for rapporten er:

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

Studien er hovedsakelig basert på byggverk i brannklasse 3, som vanligvis er over 5 etasjer, hvor det ikke per nå finnes preaksepterte løsninger med tanke på tekniske løsninger for å opprettholde et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Derfor må denne dokumentasjonen utføres gjennom analyser. Mangelfulle løsninger i slike bygg, kontra konstruksjoner i betong og stål kan føre til betraktelig større konsekvenser for liv og helse. Flere studier indikerer at blant annet eksponert CLT, eller CLT med utilstrekkelig beskyttelse kan medføre en raskere brannutvikling, med høyere intensitet og lengre varighet, kontra branner hvor det er kun inventar i brannrommet som bidrar.

Det brukes større ressurser på å undersøke hvilke forhold som kan ha innvirkning på brannutviklingen. Som forkullingshastigheter, delaminering og selvsløkking. Denne forskningen foregår både i Europa, Australia og Nord-Amerika. Det utføres dessverre svært få storskala forsøk på slike forhold ettersom det er kostbart og komplisert å utføre.

Metodikken benyttet under studien er oppsamlet gjennom søk i databaser for vitenskapelige tidsskrift, innhenting av dokumentasjon samt direkte kommunikasjon med aktører fra myndigheter, forskning og industri.

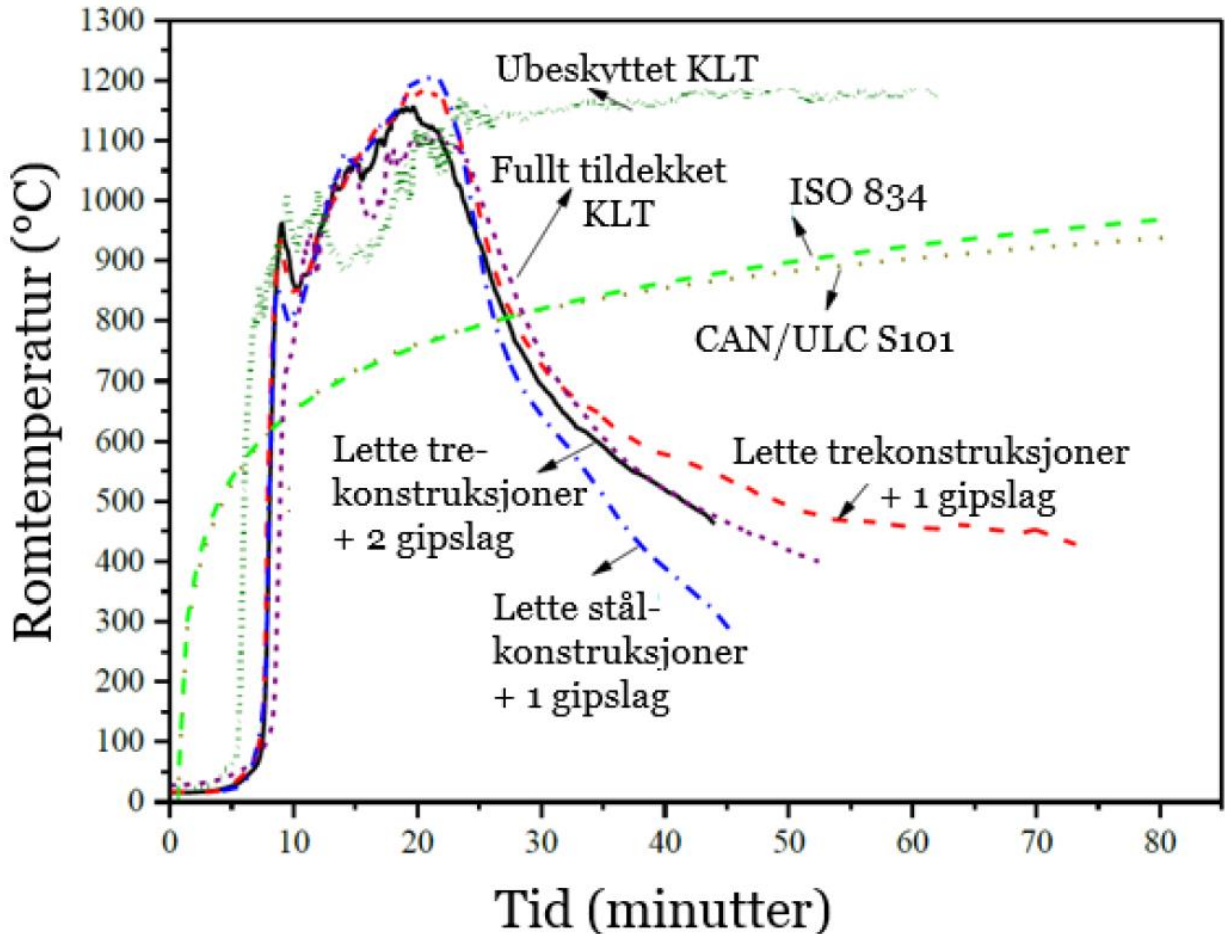
4.2.1 Brannutvikling

Tester gjort i et brannrom viser temperaturutviklingen for rom med forskjellig dekke av vegger. Det ble gjort i alt 10 tester med forskjellig oppsett, med bruk av møblement som brensel. Figur 26 viser oppsett og dimensjoner på rommet.



Figur 26-Testoppsett og dimensjoner[44]

Ikke alle testene som ble gjort var aktuelle for studiet angående CLT og det er tatt utdrag for de som er av betydning for dette litteraturstudiet. Et utdrag av 5 av de totalt 10 testene ble benyttet i et plott og satt i sammenligning med en standard ISO 834 kurve. Fire load density i rommet rangerte fra mellom 529 til 624 MJ/m², og det ble ansett som en typisk brannbelastning på i et vanlig soverom.[44]



Figur 27-Sammenligning av branntester[42][44]

Det observeres her en tregere vekst i begynnelsen av brannforløpet for samtlige av brannene sammenlignet med ISO 834 kurven. Men ved rundt 5-7 minutter vokser brannen og romtemperaturen raskt og overstiger den antatte temperaturen fra en ISO-brann. Ser at de fleste av brannene holder seg på omtrent samme nivå når det gjelder temperatur, men 4 av 5 branner avtar etter hvert som bidraget fra inventaret er oppbrukt. Det som er tydelig at romtemperaturen og brannen for testen med ubeskyttet CLT ikke avtar i noen grad. Dette tyder på at varmeutvekslingen fra dette trevirket mellom hverandre er nok til å opprettholde brannintensiteten i rommet lenge etter den skulle avtatt. Sammenlignet med de andre testene hvor det var implementert brannbeskyttelse i form av gips, og andre typer tildekninger samt gipsbeskyttet stål. Dette tyder på at ubeskyttet CLT vil bidra til ekstra brannbidrag men også kunne forlenge brannforløpet. I tillegg viste samtlige tester at dersom brannmotstanden til trevirket er dimensjonert ved bruk av en standard ISO 834 brann ikke stemmer over ens med reelle tilfeller. Det som mentes å være en reel soveromsbrann i testen hadde temperaturavvik på opptil 400 °C. Dette vil være av stor betydning med tanke på avgasser av brennbare stoffer. Dette kan vise at ISO 834 testmetode testmetoden ikke egner seg i særlig stor grad når brannmotstand for bygningsdeler i CLT skal dimensjoneres. Beskyttelse kan bidra til å forsinke brannforløpet, men når beskyttelsen er oppbrukt kan styrken på brannen øke betraktelig mer enn det som er forventet.

4.2.2 Forkulling

Forkulling og delaminering henger sammen når det kommer til krysslaminert limtre. Dette fordi at etter hvert som et forkullet lag når ned til det punktet for hvor flatene er limt sammen kan nytt, friskt trevirke komme i kontakt med flammene, pyrolyseres og danne nye brenngasser. Tverrsnittet til bygningsdelen reduseres så videre og bæreevnen til konstruksjonen reduseres, slik at laster kan omfordes og påvirke andre deler av konstruksjonen. Dette sammen med oppvarming kan føre til intern transport av fuktighet som påvirker strekk- og trykkstyrken til materialet, samt skjærkapasiteten til konstruksjonsdelene.[45]

CLT forkuller i og for seg sakte, og kan derfor ofte være ubeskyttet på grunn av den ideoende brannmotstanden, sammen med den varmeisolerende effekten et kullag vil ha. Men limlag og skjøter i CLT elementene kan også bidra negativt og medføre økt forkulling. Forkullingen kan påvirkes av mange ulike faktorer, som materialeegenskaper, romgeometri og geometrien til CLT-elementet med tanke på lamellers antall og tykkelser, beskyttelse, åpenrom mellom lameller, sprekker, sammenføyninger, bruk av metallinnfestninger og oksygentilgang m.m. [46]

4.2.3 Selvslokking

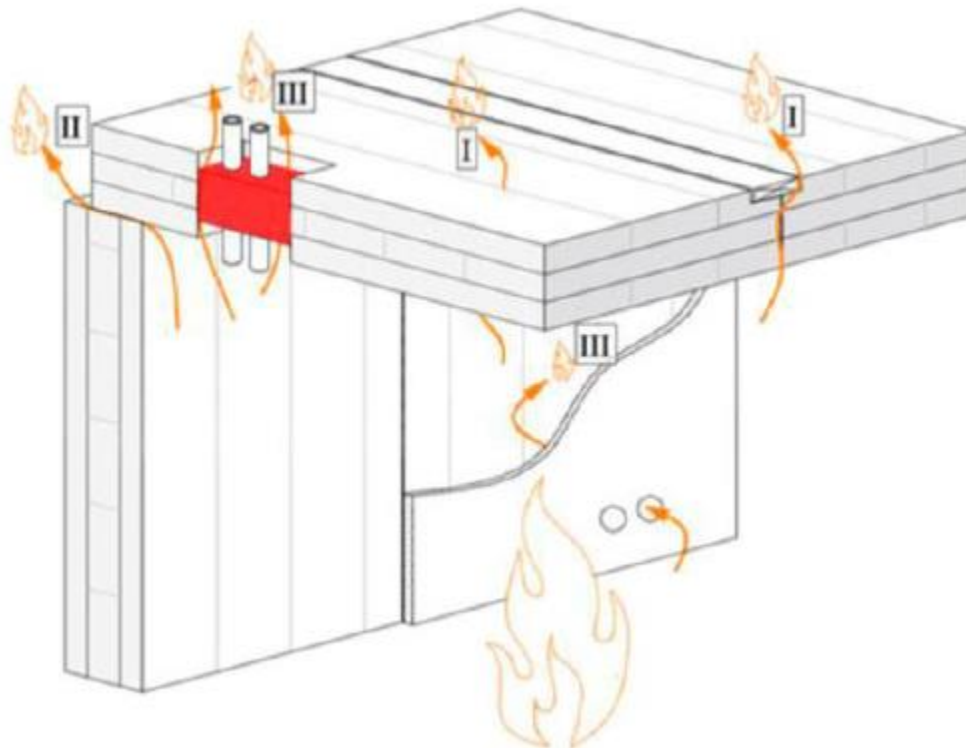
Dette er et fenomen som innebærer at brannen dør ut i massiv- eller limtre, når de andre brenselkildene i rommet er oppbrukt. Dette er et av argumentene som produsenter henviser til når de skal promotere for krysslaminert tre. Det er mange usikkerheter rundt hvilke faktorer som er av betydning for dette fenomenet er. Det er derfor en generell oppfatning at det foreløpig er for lite kunnskap om mekanismene til for å kunne konstatere hva som forårsaker selvslokking.

4.2.4 Detaljløsninger

Detaljløsninger har vist seg å være svake punkter for gjennomtrenging av brann og røyk. Disse kan være utført i tre eller stål. Stål som blir eksponert for høy varme kan raske miste sin lastbærende evne og samtidig bidra til å transportere varme videre til andre tilknyttede bygningsdeler. Det er derfor vanlig å beskytte stålet mot oppvarming. Gjennomføringer av serviceinstallasjoner som vannrør, ventilasjon og elektrisitet er uunngåelig og det er derfor viktig å få dokumentert grundig sikkerhet med tanke på løsning og gjennomføring. Her er tilstrekkelig brannbeskyttelse et særs viktig punkt for å unngå uventet hurtig brannspredning ut av branncellen. For konstruksjoner som inneholder CLT, er det hovedsakelig 3 potensielle flammespredningsveier som det må tas hensyn til ved prosjektering:[47][48]

1. Skjøter i og mellom planet i prefabrikkerte CLT-elementer
2. Hjørneskjøter mot andre bygningsdeler
3. Gjennomføringer som for eksempel serviceinstallasjoner

Her kan flammer spres via skjøter i planet videre til prefabrikkerte elementet (1), via skjøter mot andre CLT-elementer eller andre bygningsdeler(2), og via serviceinstallasjoner og gjennomføringer i CLT-elementene(3). Slik som vist på neste bilde:



Figur 28-Spredningsveier for flamme og røyk

Det finnes standardisert metode til testing av flammespredning mellom skjøter i planet (I), men ikke for flammespredning via skjøter mot andre CLT elementer eller bygningsdeler(II). Det nevnes at servicegjennomføringer slik som vise i figuren ovenfor av type (III) bør unngås i størst mulig grad. Det er til nå få godkjente løsninger tilgjengelig, men det er under utvikling og kommer over tid på markedet. Eksempler på slike gjennomføringer er brannklassifiserte kanaler, brannspjeld, enkle kabler eller kabelbunter, plast og stålrør. Per nå finnes det ingen enkel løsning som kan beskytte alle typer gjennomføringer mot brannspredning.

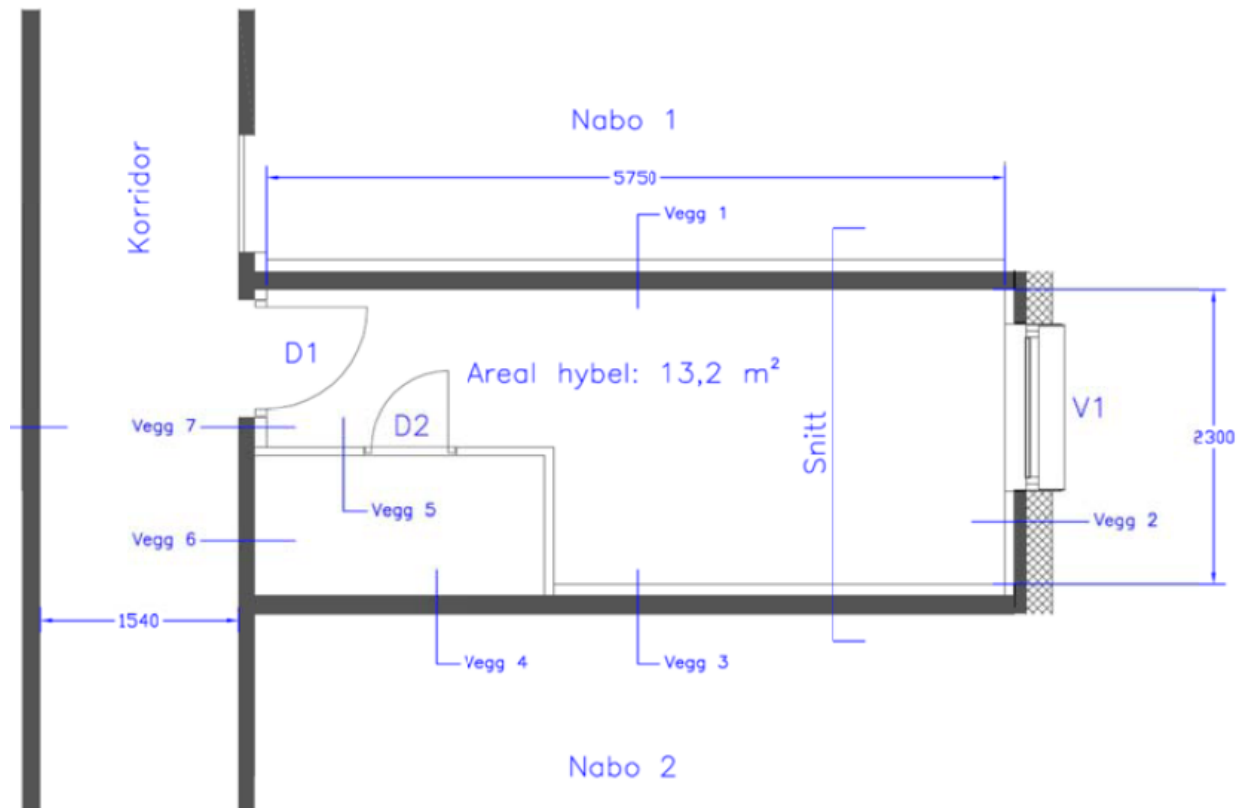
4.2.5 Brannsikkerhetsmessige utfordringer for bruk av CLT i bygning

Studien som skal gjennomgå i det følgende kapitlet har oppsummert flere punkter som fremheves som vesentlige å ta hensyn til brannsikkerheten i et bygg av massivtre skal vurderes. Først og fremst er selve konstruksjonen brennbar. Delaminering som følge av brannpåkjenning kan oppstå, og nedfall av isolerende kullskift kan inntreffe slike at nytt og frisk brennbart materiale pyrolyseres og bidrar videre til brannutviklingen. Skjulte og ubeskyttede eller delvis ubeskyttede hulrom i konstruksjonen kan bidra til uventet røyk og brannspredning i forhold til hva konstruksjonen var dimensjonert for. Gjennomføringer påpekes som mulig spredningsvei da det enda ikke er funnet opp fullgode løsninger for dette. Til slutt er det også påpekt at brannrådgivere ikke har de nødvendige verktøy og metoder for å blant annet bestemme gode scenarier til bruk ved dimensjonering av konstruksjoner med eksponerte CLT elementer. [43]

4.3 Branntest av massivtre

Dette er en rapport utført av SP Fire Research på oppdrag av studentsamskipnaden i Trondheim. [49] Her ble det gjennomført 2 fullskala tester på hybel med tilstøtende korridor i sammenheng med byggingen av studentboligene Moholt 50|50, som er gjennomgått i kapittel 5.2 i oppgaven. Her er det differensiert mellom 1 test hvor sprinklersystem var operativt i henhold til NS 12845, mens den andre med deaktiverte sprinkler. Test 2 ble benyttet til undersøkelse av innbrenning i ubeskyttede massivtrevegger, samt andre massivtrevegger som var beskyttet med gips og isolasjon, uten effekt av sprinkler.

Testoppsettet var en kopi av en hybel i den da foreslåtte byggingen av studentboligene Moholt 50|50. Neste tegning viser et utsnitt med dimensjoner av den delen av bygget som ble kopiert for branntesting:



Figur 29-Skisse av hybel for branntest Moholt 50|50

Brensel benyttet var vanlig innredning samt, heptan, europaller og trekrybber til en samlet brannlast på 8708 MJ. [49]

Vegg 1	Vegg 2	Vegg 3	Vegg 4	Vegg 5	Vegg 6	Vegg 7	Vegg 8
-100 mm massivtre(5x20 lameller) -10 mm hulrom -50 mm steinull mellom 75 mm stålstendere 13mm standardgips -15 mm branngips	-13 mm standardgips -100mm massivtre 5x20 lameller -200mm steinull -Kledning ikke tatt med	-15 mm branngips -13 mm standardgips -50 mm steinull mellom 75 mm stålstendere -10 mm hulrom -100 mm massivtre(5x20 mm lameller)	-100 mm massivtre (5x20 mm lameller)	-13 mm standardgips på en side av 75 mm stålstendere	- 100 mm massivtre (5x20 mm lameller)	-13 mm standardgips -100 mm massivtre (5x20 mm lameller)	-100 mm massivtre (5x20 mm lameller)

Tabell 8-Beskrivelse av vegger i branntest, Moholt 50/50

Andre bygningsdeler:

Korridor	Vindu 1	Dør 1	Dør 2
A-himling festet med bæreskiner langs vegg og på tvers i korridor.	1,2 x 1,6 m brystning 1,13 m 3 lags glass	0,9 x 2,0 m 40 dB EI30 Sa (satt i åpen stilling med kile på begge testene)	Standard innerdør 0,8 x 2,0 m Lukket ved begge testene

Tabell 9-Andre bygningsdeler

Produktinformasjon:

Isolasjon innvendig	Isolasjon utvendig	Stendere	Gips	Trinnlydplater
Rockwool Stålstenderplate 50mm	Rockwool 200 mm	Alle vegger var bygget med 75 mm stålstendere cc 450 mm.	Alle vegger er bygget med 900 mm brede gipsplater fra Gyproc	Paroc Trinnlydplate 30 mm

Tabell 10-Produktinformasjon

Ettersom det ovenfor i oppgaven er gjennomgått et lignende studie vil det her i litteraturstudiet bli rettet større fokus på drøfting av resultater og årsaker til disse, i stedet for drøfting av testoppsett. Et sentralt drøftingstema knyttet til disse to testene vil være forskjellen mellom aktivert og deaktivert sprinkleranlegg.

4.3.1 Test 1 – Aktivert sprinkleranlegg med resultater og diskusjon

Denne testen hadde som hovedmål å kartlegge om et sprinkleranlegg ville kunne kontrollere et brannscenario med rask brannvekst, med delmål å undersøke tid til aktivering av røykvarsler og sprinkleranlegg både i hybel og korridor.

Testresultatene for test 1 er kort oppsummert i tabell av SPFR. En ser at både røykvarsleranlegg og sprinkler raskt løser ut. Temperaturen i hybelen steg så vidt over 140 °C, etter måling av samtlige termoelementer:

Hendelse	Tidspunkt	Temperatur i hybel (°C)
Røykvarsler i hybelen aktiveres	1:06	61
Røykvarsler i korridoren aktiveres	1:10	58
Sprinkler nærmest brannen i hybel løser ut	1:59	131
Sprinkler stengt av	9:00	22
Resterende brann slokkt	9:30	51

Figur 30-Test 1 Moholt 50|50[49]

Dette forsøket viser hvor raskt og effektivt et aktivert sprinkleranlegg kan få kontroll og hindre vekst av en brann i et rom dekket med beskyttede og ubeskyttede massivtreoverflater. De eneste svakhetsområdene branner ikke ble fullstendig slokkt, var steder hvor vannet ikke kom i direkte kontakt med flammene, men disse brannene vil ikke utgjøre fare for bærende konstruksjon og kan enkelt etterslokkes med for eksempel husbrannslange eller håndslukker.

4.3.2 Test 2 – Deaktivert sprinkleranlegg

Denne testen hadde som formål å undersøke et fullstendig brannforløp i hybelenhet registrere følgende parametere:

- Forkullingshastighet gjennom hele brannforløpet på ubeskyttede og beskyttede massivtreelementer.
- Brannforløpets varighet.
- Temperaturforløp inkludert tid til glassene i vinduet sprekker og tid til overtenning.
- Brannsmitte ut av startbranncellen.

Test 2 gjennomgikk et helt annerledes brannforløp enn test 1, og viser et mye mer voldsomt hendelsesforløp, med høye temperaturer, overtenning, knusing av vinduer, spredning til korridor, gjennombranding av vegger og kollaps av tak:

Hendelse	Tidspunkt	Temperatur i hybel (°C)
Røykvarsler i hybelen aktiveres	1:10	59
Røykvarsler i korridoren aktiveres	1:24	71
Første sprinkler i korridor under himling løser ut	2:50	243
Andre sprinkler i korridor under himling løser ut	4:00	638
Overtenning i hybel	4:10	822
Første glass av vinduet knuser	4:30	803
Andre glass av vinduet knuser	4:55	712
Tredje og siste glass i vinduet knuser – flammene slår ut av rommet	5:45	770
Første sprinklerhoder over himling løser ut	6:05	741
Andre sprinklerhoder over himling løser ut (usikker på tid)	6:05-8:30	
Himlingen i korridoren faller ned	8:30	891
Trykket på sprinkleranlegget blir økt til ca. 2 bar (110 l/min/dyse)	12:00	947
Manuell innsats starter for å hindre spredning i korridoren	12:30	960
Gipsen rundt badet faller av	25:00	1000
Første observasjon av at deler av den beskyttede veggen brenner.	47:00	1025
Observasjon viser gjennombrenning mellom gulv og vegg på badet ⁴	1:00:00	975
Første observasjon på gjennombrenning på den ubeskyttede massivtreveggen nærmest vinduet.	1:10:00	1025
Observasjon viser at store deler av den ubeskyttede massivtreveggen er gjennombrent	1:25:00	980
Taket kollapser	1:36:00	1072
Slokkeinnsatsen intensiverer	1:36:10	
Brannen er slokkes	1:45:00	
Gipsvegg utenfor ubeskyttet vegg faller ned	1:55:00	
Etterslokking avsluttes	8:00:00	

Figur 31-Test 2 Moholt 50|50

Her når temperaturen i startbrannrommet mellom 1000 °C og 1100 °C. Forkullingshastigheten på de ubeskyttede veggene ble for de første målepunktene målt til en hastighet på 1,4 mm/min mellom dybde på 25 mm og 50 mm inn i massivtreet, og deretter en hastighet på 0,7 mm/min mellom 50 mm og 75 mm. Dette kan underbygge at forkullingslag vil hindre varmeledning og dermed at forkulling skjer tregere så lenge forkullingslaget er tilstede. For de beskyttede veggene var det i snitt en innbrenningshastighet på 1,1 mm/min som viser at beskyttelsen vil ha noe innvirkning på hastigheten til forkullingsfronten, men i begrenset grad, ettersom denne beskyttelsen ikke vil opprettholdes gjennom et fullstendig brannforløp. Til slutt bør også taket nevnes da dette etter hvert gjennomgikk full gjennombrenning ved 1 time og 36 minutter og kollapset. Det ble også observert at store flak med kull løsner fra vegger, som igjen tilfører

brannen nytt og friskt trevirke som brensel. Det er ut ifra denne testen også vanskelig å si noe om hvorvidt massivtre kan dimensjoneres for å opprettholde stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp ettersom brannen måtte slokkes manuelt etter at taket kollapset, og testen måtte avbrytes. I tillegg viste denne testen også at mangel på sprinkler etter hvert medførte brann- og røykspredning ut i korridoren som følge av den kraftige temperaturen fra overtenningen i hybelen. I korridoren var det heller ikke tilstrekkelig med sprinkler og tilleggsslokking måtte til for å hindre spredningen. Når det gjelder utvendig spredning som følge av vinduer som knuste, medfølgende flammer som bredte seg ut av hybelen gjennom disse åpningene var det ikke montert kledning på utside og hendelsesforløp av en slik type spredning ville derfor ikke kunne dokumenteres. Det bør legges til at for dette forsøket var døren mellom hybelen og korridoren kilt i åpen posisjon ettersom dette kunne regnes som verst tenkelig scenario. På grunn av vindu som knuser på et tidlig tidspunkt vil dette også sikre at brannen ha tilstrekkelig med lufttilførsel slik at alt tilgjengelig brensel etter hvert antennes og brenner opp. Dersom sprinkleranlegget ikke fungerer vil en eventuell brann etter hvert utvikle seg til overtenning, medfølgende store brannskader. Fungerende sprinkleranlegg utenfor rommet vil ikke kunne forhindre brannspredning ettersom det ikke får kontroll på samt dempe brannen i startbrannrommet. Et slikt rom med store treoverflate vil ha en hurtig brannutvikling, og raskt nå høye temperaturer. Disse forsøkene viser at temperaturen i startbrannrommet vil ligge over den standardiserte ISO 834 kurven som benyttes til å brannklassifisere materialet benyttet i denne storskala branntesten. Dersom sprinkler er deaktivert i startbranncellen vil dette medføre full gjennombrenning av samtlige overflater, selv om massivtreet i utgangspunktet er dekket og beskyttet. Brannen viste aldri tegn til å avta i temperatur eller selvslokke. Selvslokking er et sikkerhetsargument som noen har påpekt i sammenheng bruk av massivtre.

På en positiv side viser massivtreet gode varmeisolerende egenskaper, med dårlig varmeledning gjennom veggen. Dette underbygges ved at det er målt store temperaturforskjeller over korte tverrsnitt i treverket.

4.3.3 Sammenligning

Disse testene signaliserer tydelig signifikansen av et operativt og korrekt dimensjonert sprinklersystem, da utfallene av de to testene endte vidt forskjellig. Sprinkler viste seg å være et svært effektivt og nødvendig aktivt hjelpemiddel for å kontrollere brannen i startbranncellen, da de i test 2 viste seg at de passive brannsikkerhetstiltakene sammen med massivtre ikke medførte at brannen slokkes av seg selv.

4.4 Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of southern pine cross-laminated timber

Denne forskningsartikkelen er basert på 13 forsøk utført med ulike konfigurasjoner og 4 limtyper. Testene var på cross laminated timber (CLT) hvor furu var benyttet som trevirke.[50] De fire aktuelle limtypene var henholdsvis:

- MF, melanin formaldehyde. Gode egenskaper mot fukt og lys i fargen. Dyrere sammenlignet med PRF. Denne typen vil frigjøre formaldehyd ved brann.
- PRF, phenol resorcinol formaldehyde. Denne benyttes mye ved produksjon av GLULAM, og passer godt til CLT eksponert til vær og vind.

- PUR, polyuretan reaktiv. En mye benyttet limtype for CLT. Båndene i limtypen aktiveres ved hjelp av fuktighet. PUR er fri for formaldehyd, som gjør den attraktiv ettersom den ikke frigir giftige avgasser ved brann. Brannmotstand er generelt svakere enn for de andre typene.
- EPI, emulsion polymer isocyanate. For denne typen er tilstrekkelig blanding av komponentene særs viktig for klebeegenskapene. Denne typen er krevende og jobbe med og dyr sammenlignet med MF PRF.

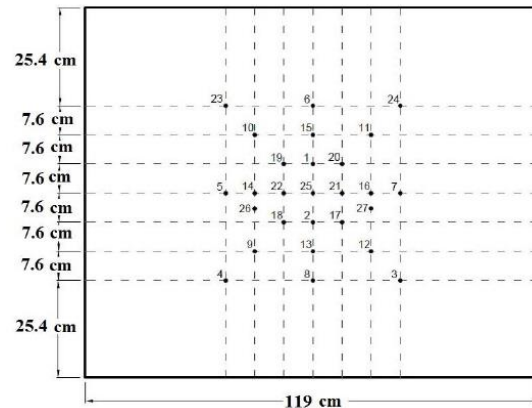
Elleve av testene bestod av 3 lag med tre, mens to ble gjort med 5 lag. Hvert lag var 35 mm tykt. Hvert testeksemplar var utstyrt med termoelementer på ulike dybder og plasseringer på flaten for å observere hvordan kullsjiktet beveget seg over tid.

Lamellene ble konfigurert på to ulike måter. Den røde linjen symboliserer den flammepåvirkede siden av CLT flaten. LCL(Long-cross-long) er den tradisjonelle metoden hvor lamellene legges 90 grader i forhold til hverandre for hvert lag. LLC (Long-long-cross) legges de to øverste lagene i parallelle lengderetning men forskjøvet i forhold til hverandre, og til slutt et vinkelrett lag. Long står for lengderetning. Flatene dekket et areal på



Figur 32-Sammensetning av lameller

Hvert av testeksemplar ble instrumentert med termoelementer ved ulike dybder for å beregne hastigheten til forkullingsfronten gjennom testene. Disse var type K-glass isolerte termoelement tråder(Omega Engineering: GG-K-24). De ble plassert innover i testeksemplarene ved å drille hull fra den siden som ikke skulle brannekspioneres, slik:



Figur 33-Plassering av termoelementer

Det ble til sammen utført 13 tester hvor de ulike testsammensetningene med lim og type laminering står beskrevet med forkortelser under i neste figur.

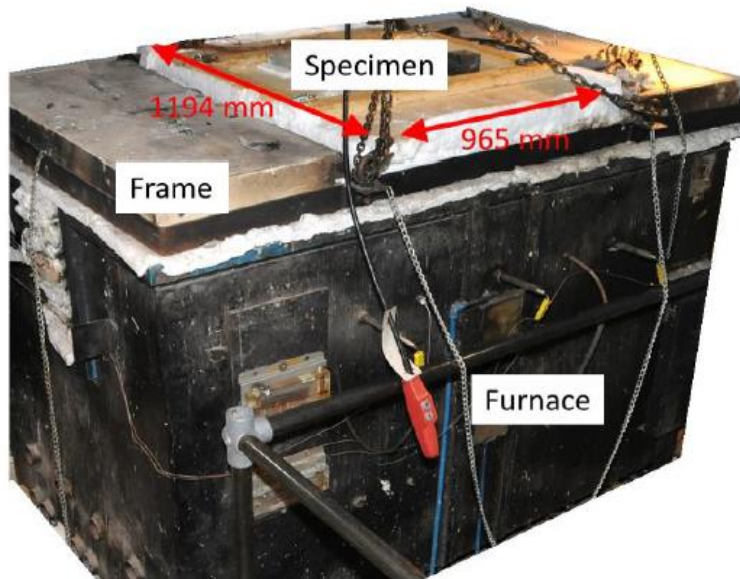
Specimen No.	Specimen Label
1	MF-LCL
2	MF-LLC
3	PRF-LCL
4	PRF-LLC
5	EPI-LCL
6	EPI-LLC
7	PUR-LCL
8	PUR-LLC
9	PUR-LCL
10	PUR-LLC
11	PUR-LCLCL
12	PRF-LCLCL
13	PUR-LCL+GB ¹

¹Gypsum board is 16 mm thick Type X fire rated, installed at FPL.

Figur 34-Testopplegg

Testprosedyren benyttet for brenning av eksemplarene er gjort ut ifra standarden ASTM E119, med noen få avvik fra selve standarden i form av redusert eksemplarstørrelser og mangel på ekstra last. Det største temperaturavviket målt over de samlede 13 testene av aldri høyere enn 1,3 % som er godt innenfor standardens testkrav. [51] Alle testeksemplarer var blitt lagret i et oppbevaringsrom med en temperatur på 21 ° med 50 % relativ luftfuktighet i minst 30 dager.

Selve testovnen er en horisontalbrenner med dimensjonene 1,83 m langt 1,09 m bredt og 1,27 m høyt. Det ble benyttet en ramme for å holde panelene i de innrammede ubrennbare oppholdssatsene på hver side somt vist i figur 35 med både ovn og oppholdssatser.



Figur 35-Montering av CLT plate

Hvert testeksemplar ble plassert horisontalt på toppen av ovnen hver for seg. Selve flammen var en diffusjonsflamme hvor all tilluft kom naturlig fra bunnen av ovnen. Gasstilførsel kunne kontrolleres slik at temperaturkurven ble fulgt som spesifisert i ASTM E119, med spesifikke temperaturer på henholdsvis:

Tid[min]	Temperatur[°C]
5	538 °C
60	927 °C
120	1010 °C
180	1052 °C

Tabell 11-Tid/temperatur

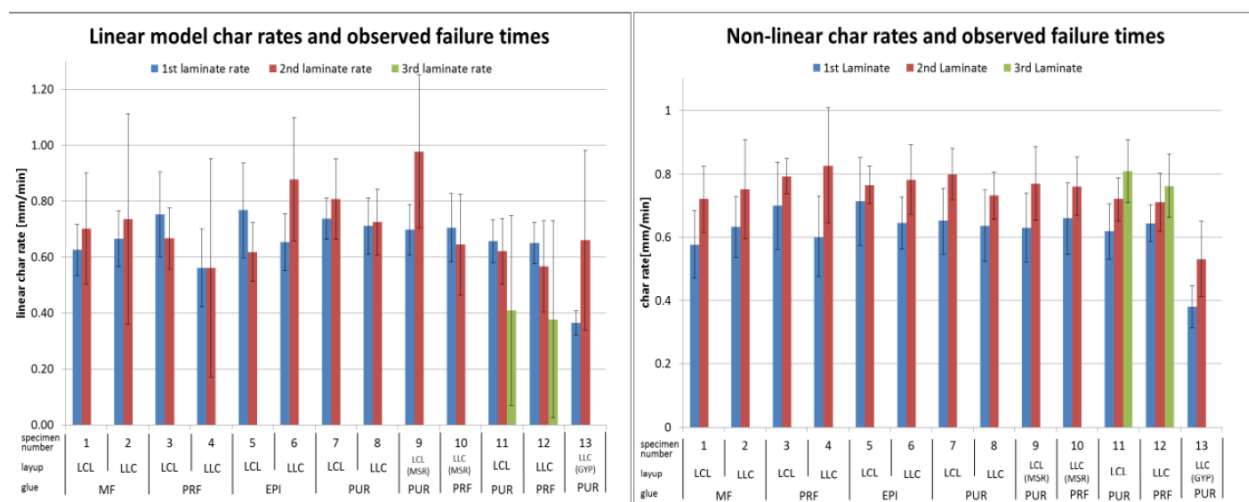
Testene ble avsluttet når den andre linjen med lim ble brutt fra den branneksponte siden for de 3 lags testede panelene og ved det tredje laget for 5 lags testelementene. Dette ble fastslått når temperaturen ved disse nådde 300 °C.[52] Denne temperaturen korrelerer som regel med den temperatur hvor forkullingssjiktet befinner seg , og treet mister sin lastbærende evne ettersom det forkalles. Et annet termineringskriterium, var dersom det ble observert visuelle flamme på den ueksponte siden. Testkravet var også at utprøvingen skulle avsluttes dersom 9 av termoelementer under isolasjonsplaten på den ueksponte siden nådde en gjennomsnittstemperaturøkning på over 139 °C, fra starttemperatur. [53]

Figur 36 viser time to failure og årsak for de 13 ulike testene:

Specimen	Flames	300°C	End
1	--	98	102
2	104	--	104
3	--	97	102
4	113	--	113
5	93	101	104
6	96	--	96
7	--	89	95
8	100	--	100
9	80	--	80
10	108	94	108
11	--	153	173
12	--	168	186
13	166	--	166

Figur 36-Time to failure

Det ble både målt lineær forkullingshastighet og non-linear forkullingshastighet med resultater hvor metode er beskrevet i kapittel 2.8.



Figur 37-Forkullingshastigheter og sammensetning av CLT

Det diskuteres om den nominelle forkullingsraten kan være påvirket av flere faktorer som inkluderer oppvarming, total oppvarmingstid og trespesifikke egenskaper som densitet. Delaminering ble visuelt observert for eksemplarer som benyttet PUR og EPI som bindemiddel, mens forkullingsraten ikke var nevneverdig forskjellig mellom de forskjellige limtypene. Resultatene viste at eksemplarer som benyttet MF og PRF viste liten grad av delaminering, mens EPI og PUR viste høy grad av delaminering. Det er også blitt påpekt at det er korrelasjon mellom delaminering og prematur gjennomtrengning av flammer i testeksemplarene.

Når det gjelder konfigurasjonen i måten trelamellene var limt sammen på med den tradisjonelle LCL sammenlignet med LLC viste disse testene at time to failure var 5 % lengre for LLC enn LCL. Årsaken til at

disse testeksemplarene feilet i samtlige av testene var gjennomtrengning av visuelle flammer. På en annen side var det kun 2 av 4 med LCL som feilet på grunn av flammegjennomtrengning.

For å konkludere ble det funnet ut at den generelle forkullingsraten for samtlige elementer når det gjaldt de to første lagene med lameller var på 0,70 mm/min. Dette er noe høyere enn den som er benyttet i US CLT handbook[72] ved 0,635 mm/min, og noe lavere enn den funnet av White[51] ved 0,75 mm/min. LLC konfigurasjonen medførte en ujevn forkullingsfront og dype spor i trevirket for det andre laget. Dette laget var med stor sannsynlighet var i samhandling med sømmene fra sammenlimingen av det første laget. Leddene mellom de krysslaminerte treelementene er i seg selv mest sannsynlig en kritisk faktor med tanke på failure criteria i ASTM E119 med tanke på penetreringen av flammer og for høye temperaturer på ueksponert side.

4.5 Effekt av sprinkleranlegg

I byen Scottsdale i Arizona, USA ble det gjort et prøveprosjekt med boligsprinkling. Siden 1.1.1986 har det vært krav til installasjon av sprinkler i de fleste nybygg som ble konstruert inkludert boligbygg, i tillegg til bygninger som gjennomgår omfattende ombygging eller oppussing. Byen har vært i stor vekst siden påbudet, og i 2015 var over halvparten av alle boligene i byen utstyrt med et boligsprinkleranlegg. Sprinkleranleggene i Scottsdale er installert i henhold til standarden NFPA 13, med tilleggene D(domestic-enebolig og tomannsbolig) og R(residential-leilighetskompleks).

Den første loven angående sprinkling kom allerede i 1974 i Scottsdale, etter gode erfaringer med allerede eksisterende sprinkleranlegg. En oppvekker var også rapporten "America Burning" som fastslo at mesteparten av omkomne i branner, dør i sine egne hjem. En innførsel av boligsprinkleranlegg i 1977 var opptakten til arbeidet som gjorde at det i 1982 ble utført 9 fullskala tester av sprinkler i to nye bolighus, med hovedmål å vurdere effektiviteten, som livreddende og skadereduserende tiltak sett opp imot hvor kostnadseffektivt tiltaket var. Resultatene fra de 9 testene var entydige både når det gjaldt å kontrollere flammene samt skadepotensialet vannet kunne ha på boligen. Samtlige sprinklerhoder ble utløst i løpet av 70-90 sekunder etter antennelse. Det ble aldri registrert kritiske forhold i startbrannrommet hverken med tanke på høy temperatur eller giftige avgasser. Vannskadene og brannskadene ble vurdert til minimale. Basert på blant annet disse erfaringene ble det i 1986 innført sprinkelpåbud i samtlige nybygg i Scottsdale.

Det er også senere utarbeidet en rapport over hvilke erfaringer som de har fått dokumentert ved branner i sprinklede bygg etter påbudet. Tallene er samlet inn over en 15-årsperiode fra 1986 til 2001. Videre er de systematisert og beskrevet i rapporten "A 15 Year Update on the Impact and Effectiveness of the Scottsdale Sprinkler Ordinance"[54] kalt 15 -års rapporten som er utarbeidet av Scottsdale Fire Department.

Dette er tallene registrert og gjengitt i rapporten per 2001:

Totalt antall etablerte branner i bygg med sprinkleranlegg		199
Branner fordelt på type bygning:	Næringsbygg	102
	Bygg med 2 eller flere boliger	48
	Enebolig	49
Antall omkomne ved brann i sprinklede bygg		0
Antall liv reddet		13
Total anslått verdi på bygninger hvor de 199 brannene forekom	\$767,334,000	6.537.915.880 NOK*
Totalt anslag på skadebeløp for de 199 aktuelle bygg basert på estimerte forsikringsutbetalinger	\$703,300	5.992.326 NOK*
Gjennomsnittlig skadebeløp for bygg med sprinkleranlegg	\$3,534	30.110 NOK*
Dersom Joshua Tree Apartments utelukkes ¹	\$2,276	19.392 NOK*
Gjennomsnittlig skadebeløp for bygg uten sprinkleranlegg	\$45,019	383.575 NOK*
Branner kontrollert/slokket med utløsning av 2 eller færre sprinklerhoder	183 av 199 (92%)	

Tabell 12-Data fra branner i Scottsdale

*Disse tallene er basert på dollarkursen fra DNB 01.03.2019 hvor 1 USD = 8,5 NOK

¹ Produksjonsfeil for sprinklerhode type Omega førte til at hode i brannrommet ikke løste seg ut og førte til at brannen spredte seg ut gjennom vinduet videre til loft. Brannen i selve leiligheten ble hindret å spre seg pga. andre sprinklerhoder. Hele serien av typen Omega ble tilbakekalt og i Scottsdale ble i alt 450 000 av denne typen byttet ut.

Pengebeløpene som er angitt er fra 2001 og det er viktig å huske på at disse tallene ville vært høyere i dag, grunnet inflasjon. Hovedpoenget med å vise frem denne tabellen er å gi et perspektiv på hvilke verdier som potensielt er utsatt for å gå opp i flammer. Rapporten har også konkludert at minst 13 liv har blitt reddet på denne basert på disse kriteriene:

- Samtlige oppholdt seg i startbrannrommet under hele brannforløpet
- Ingen var ute av stand til å rømme grunnet funksjonshemning eller andre grunner
- Sprinkleranlegget slokket brannen, hvorpå også de 13 også ble dynket i vann

Trolig er antall bergede høyere, men 13 er tallet som kan påvises jamfør kriteriene gitt i 15-års rapporten. En annen rapport utarbeidet for Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (DSB) av RISE Fire Research analyserer dødsbranner i Norge fra 2005 til 2014. Dette er en grundig rapport som kartlegger de mest vanlige faktorene som angår dødsbranner. Dette innebærer utsatte grupper, hvor brannen oppstår, utsatte fylker med mer. Først og fremst er det konstatert at 8 av 10 av dødsfall ved brann skjer i boligbrann.[55] Rapporten har blant annet et kapittel om hvilke brannsikringstiltak som var aktive under totalt 346 dødsbranner i perioden mellom 2005-2014.

Tabell 4-7 Brannsikringstiltak i boligen¹⁾ registrert for dødsbranner i perioden 2005 – 2014.

Røykvarsler installert	Nei 4,3 %	Ja 47,7 %	Ukjent 48,0 %	N 346
Røykvarsler hørt	Nei 19,4 %	Ja 30,3 %	Ukjent 50,3 %	N 346
Automatisk slokkeanlegg installert	Nei 91,0 %	Ja 0,9 %	Ukjent 8,1 %	N 347

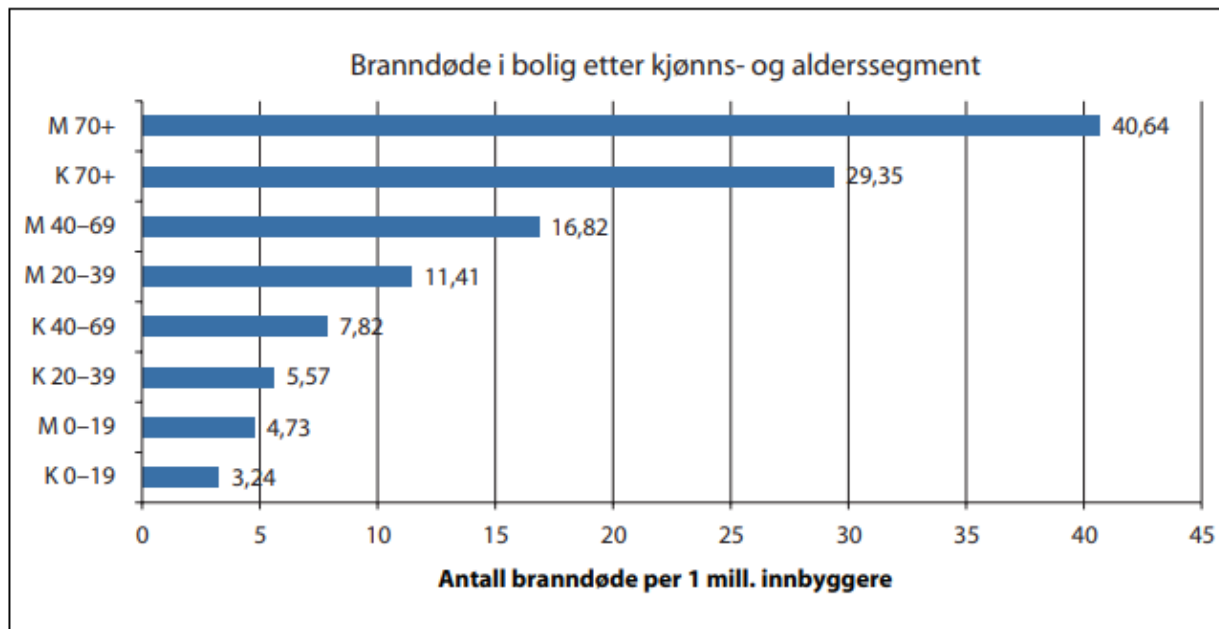
¹⁾ Institusjoner er også inkludert i dette grunnlaget

Figur 38-Analyse av dødsbranner[56]

Disse tallene er basert på politirapportene etter hendelsen. Det er store usikkerheter knyttet til hvorvidt brannalarm var installert, ettersom disse kan ha brent opp. Til sammenligning er det mye sikrere å bekrefte eller avkrefte et automatisk slokkeanleggs tilstedeværelse. Det som kan være nyttig å ta med seg videre fra denne statistikken er at det kun i 0,9% av tilfellene med dødsbranner med sikkerhet var installert automatisk slokkeanlegg. Samtlige av disse hendelsene skjedde under 3 dødsbranner hvor brannen ikke ble stor nok til å løse ut sprinklerhodene.

I TEK10 ble det fremsatt et krav om at nye boligbygg med krav til heis, også måtte ha installert automatisk sprinkleranlegg. Dvs bygg med over 2 etasjer over inngangsparti, samt at andre bygg beregnet for omsorg, pleie og overnatting. Denne forskriftsendringen er ment som en motvekt til tall som viser at risikoutsatte grupper er overrepresentert i dødsbranner. Sykehjemsplasser er kostbart og det er ofte ønskelig både for pasient og kommune at eldre bor hjemme så lenge som mulig. Risikoutsatte grupper vil også innebære rusavhengige og andre med nedsatt funksjonsevne. NOU's rapport "Trygg hjemme"[57] fra 2010 har forsøkt å sette fokus på de store mørketallene i dødsbranner.

Statistikk utarbeidet fra 1997-2008 er tydelig:



Figur 3.7 Antall brannøde i bolig per 1 mill innbygger etter kjønns- og alderssegment – gjennomsnitt 1996 – 2009

Kilde: DSB

Figur 39-Døde i boligbranner i Norge etter kjønn og alder[57]

Her er det stor overvekt av eldre som omkommer, og det er en tydelig trend at eldre har størst sannsynlighet for å omkomme dersom de er involvert i en boligbrann. Og det er bred politisk og faglig enighet både internasjonalt og nasjonalt, som for eksempel Scottsdale, om at et av det mest kostnadseffektive tiltakene for å forebygge dødsfall og materielle skader ved brann er automatiske sprinkleranlegg. Mye av brannsikkerheten på allerede konstruerte høyhus eller store bygg i massivtre hviler tungt på sikkerheten som et veldimensjonert sprinkleranlegg kan tilføre. Dette i kombinasjon med andre passive tiltak som for eksempel brannetting, brannhemming og automatisk brannalarm.

Scottsdale har vært en foregangs by med målrettede innsats for å gjøre byens innbyggere sikrere i sine egne hjem. Dette ga tydelige og positive resultater, som er viktigere å ta med seg videre med tanke at Norge skal oppnå sin nullvisjon i antall døde ved brann. [58]

5 Brann tekniske fraviksløsninger i eksisterende massivtrebygg

I dette kapittel skal to utvalgte brannkonsepter for nye studentboliger konstruert massivtrebygg i Norge sees nærmere på. Det skal undersøkes hvilke fravik de prosjekterende støter på og hvordan de har valgt å dokumentere at sikkerheten er ivaretatt når de benytter seg av fraviksløsninger. Byggene er henholdsvis Sørhauggata 100 i Haugesund, og Moholt 50|50 i Trondheim. Begge prosjektene er studentboliger, hvor Moholt er noe mer omfattende enn Sørhauggata, med tanke på høyde og antall leiligheter.

5.1 Sørhauggata 100 (Analysebyggverk)

Sørhauggata 100 ble åpnet 2015 i Haugesund. Bygget var i hovedsak ment som et tilbud for studentene ved Høgskulen på Vestlandet. Det er et kombinert bygg, 83 sengeplasser fordelt på 72 leiligheter, 3 konferanserom med plass til 60 personer i hvert samt en kantine. Bygget har 5 tellende etasjer og det er antatt en dimensjonerende brannenergi på 50-400 MJ/m². Det ble lagt til grunn at Haugesund brannvesen ville ha en innsatstid på 10 minutter frem til bygget. Alle materialer som ble benyttet i byggeprosessen skulle tilfredsstillende de brann tekniske egenskapene som er fastlagt i NS-EN13501 *Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler. Del 1: klassifisering ved bruk av resultater for prøving av materialers egenskaper ved brannpåvirkning*. Bygget ble plassert i allerede eksisterende bebyggelse i Haugesund sentrum og måtte derfor skilles fra de omliggende byggene med brannvegg. Bygget er fullsprinklet i henhold til NS-EN 12845 med krav om økt vanntilførsel sammenlignet med NS-EN 900-1 Boligsprinkler.



Figur 40-Sørhauggata 100. Foto Harald Nordbakken[66]

Dette var en ny type bygg som er ulik byggetradisjonene i Haugesund. En del løsninger i bygget er håndtert som fravik. Videre i kapittelet gjennomgås det hvilke preaksepterte ytelser som er fraveket i tillegg til fraviksløsningene som er benyttet for å dokumentere at brann sikkerheten i bygget er ivaretatt.

QRådgivning var ansvarlig for utformingen av brannkonseptet.[70] Bygget ble prosjektert som tiltaksklasse 3 i henhold til SAK10 §9-4 bokstav a) eller b) *Tiltaksklasse 3 omfatter, uavhengig av funksjon og fagområde, tiltak eller oppgaver av:*

a) middels kompleksitet og vanskelighetsgrad, men der mangler eller feil kan føre til store konsekvenser for helse, miljø og sikkerhet, eller

b) stor kompleksitet og vanskelighetsgrad.

Dette vil stille ekstra krav til utdanning og erfaring, med tanke på ansvarsretten til prosjekterende foretak.

5.1.1 Fraviksløsninger

Første etasje i bygget ble klassifisert som forsamlingslokale og hadde preakseptert løsning som risikoklasse 5. Studentbolig har preakseptert løsning som risikoklasse 4. Med fem gjeldende etasjer vil VTEK17's tabell for preaksepterte løsninger anbefale at bygget plasseres i brannklasse 3. Disse løsningene vil være dyrere og mer komplisert enn løsninger for brannklasse 2. Det stilles blant annet strengere krav til bæresystem.

En interessant observasjon av prosjekteringen for dette bygget var at selv om det hadde 5 tellende etasjer, ble det valgt å kun klassifisere første etasje av bygget som brannklasse 3. I denne etasjen befinner caféen og samtlige auditorium seg. De resterende 4 etasjene klassifiseres i brannklasse 2. For å dokumentere at sikkerheten var ivaretatt selv om noen av løsningene befant seg utenfor de preaksepterte ytelsene ble det benyttet analyser på samtlige fravik. Totalt 6.

En stor del av analysene var beroende på dimensjoneringen av sprinkleranlegget i bygget. Derfor ble det i tillegg til analyser også vedlagt relevante fakta før gjennomgang av selve analysene. Formålet med dett var å kunne underbygge at fraviksløsningene er adekvat, slik at funksjonskravene blir ivaretatt. Det ble argumentert for sprinklerpålidelighet på 80-95% [59][60] med tanke på evne til å slukke/kontrollere brannen. Det ble også implementert kompensierende tiltak som elektronisk overvåkning av sprinklerventil, slik at brukerfeil som avstengning av vann til sprinkleranlegg ville føre til feilmelding. Dette var med på å underbygge avgjørelsen om å legge til grunn høy pålidelighet for anlegget, ettersom avslått sprinklerventil erfaringsmessig er en vesentlig årsak til sprinklersvikt. Alle rom er fullsprinklet. Statistikk viser at kritiske forhold sannsynligvis ikke vil oppstå i andre rom enn startbrannrommet som følge av utformingen på branncellene soverommene er delt inn i. Sannsynlighetene for å overleve brann i startbrannrommet er i størrelsesorden 50-75% høyere i sprinklede boliger, sammenlignet med usprinklede.

5.1.1.1 Bygget utføres i brannklasse 2

Fravik:	Preakseptert ytelse:
Bygget utføres i brannklasse 2	§11-3: Bygg i risikoklasse 4 og 5 som har mer enn 4 tellende etasjer skal prosjekteres i brannklasse 3

Funksjonskravet i TEK17 §11-3 beskriver begrunnelsen for hvilken brannklasse et bygg skal defineres som. Den aktuelle brannklassen skal gjenspeiles i prosjektering og utførelse av blant annet bæresystem. Begrunnelsen for definering av brannklasse skal baseres "*Ut i fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø, skal byggverk, eller ulike deler av et byggverk, plasseres i brannklasser(...)*". For dette bygget sto dilemmaet mellom "Stor konsekvens"(Brannklasse 3) og "Middels konsekvens"(brannklasse 2). For de prosjekterende og byggherre var det mest ønskelig å få

dokumentert at sikkerheten er ivaretatt selv om bygg prosjekteres i brannklasse 2 og ikke brannklasse 3, slik som de preaksepterte ytelsene foreslår. Dette var for å unngå de ekstra kostnadene og komplekse løsningene det ville medført å føre opp hele bygget som brannklasse 3.

Den valgte løsningen ble derfor å føre opp første etasje som brannklasse 3 og de resterende etasjene hvor leilighetene befant seg som brannklasse 2. Denne vurderingen var basert på hvilken konsekvens de prosjekterende mente en eventuell brann kunne innebære med tanke på fare for liv og helse, samt samfunnsmessige interesser. Derfor ble rømningsveier fra de øvrige etasjene holdt separat fra byggets første etasje og den resterende konstruksjonen kunne prosjekteres uavhengig av den preaksepterte 1 etasjen. En rent kvalitativ komparativ analyse ble sammenlignet opp mot et preakseptert referansebygg med hensiktsmessig og akseptabelt sikkerhetsnivå. De gitte sammenligningene er beskrevet i figur 41. Det ble også lagt til grunn at bygget ble ansett som ukomplisert og at det aktuelle fraviket i liten grad påvirket personrisikoen.

Område	Analysebygg «Studentbolig» brannklasse 3	Referansebygg brannklasse 2
Brannklasse	3 (stor konsekvens)	2 (middels konsekvens)
Areal grunnflate (bolig)	530 m ²	10.000 m ²
Areal brutto	2120 m ²	40.000 m ²
Antall leiligheter	72	440
Persontal	83 (basert på antall sengeplasser)	1300
Antall etasjer	5(4 etasjer bolig)	4
Trapperom	Tr2	Tr1 + brannvesenets stigemateriell
Utgang / angrepsvei for brannvesenet	1.etasje	1. etasje

Figur 41-Fraviksanalyse brannklasse(Sørhauggata 100)

Vesentlige punkt for begrunnelsen i analysen var blant annet den store forskjellen mellom analysebygg og referansebygg i størrelsesorden for hva som er akseptabelt i bygg dimensjonert som brannklasse 2 med bruk av preaksepterte ytelser. Disse punktene omfattet arealgrunnflate, arealbrutto, antall leiligheter, persontall og type trapperom, ettersom det var forskjeller på opp til en faktor av 20 for de ulike parameterne. Dette ble sett i sammenheng med hvilken konsekvens de prosjekterende vurderte at en brann kunne ha. Det ble konkludert med at en brann i referansebygget i brannklasse 2 ville ha betydelig større konsekvens enn analysebygget. Dette ble gjort med den forutsetning at referansebygget var sprinklet og hadde like løsninger til rømningsvei som analysebygg. Det ble også lagt til grunn at referansebygget kunne utføres med trapperom Tr1 samt tilgang til brannvesenets stigemateriell. Dette medførte at referansebygget kun ville vært utstyrt med ett tilgjengelig trapperom for leiligheter i bygget. På den en annen side ville analysebygget utstyres med 2 trapperom Tr2. Dette førte til at analysebygget hadde større tilgjengelighet for brannvesenets innsats dersom en trapp var blokkert av røyk, eller branngasser. Dersom rømningsveien i referansebygget ble blokkert ville beboere måtte rømme via brannvesenets stigemateriell. Et aspekt som trakk ned for analysebygget sammenlignet med

referansebygget var at det ville ha noe lengre rømningsvei ettersom det måtte rømmes ned 5 etasjer dersom personen befant seg i øverste etasje, mens for referansebygget 4 etasjer. Til gjengjeld ble det konkludert med at sikkerhetsmargin og tilgjengelig rømningstid fortsatt var tilstrekkelig. Det var presisert i fraviksanalysen at den største risikoen ved å utføre andre til femte etasje som brannklasse 2 ville vært den økte rømningslengden som krevdes for å komme seg til grunnplanet via en ekstra trappeetasje. Rømning fra leilighetene var uavhengig av forsamlingslokalet i første etasje og dette planet ble utført som brannklasse 3. Det ble argumentert med at et operativt sprinkleranlegg er såpass effektivt at en brann i første etasje ikke ville påvirke rømning fra de øvrige etasjene i særlig grad. Til slutt ble det lagt til grunn at det ikke gjort vurderinger med hensyn til usikkerhet og pålitelighet til de tekniske tiltakene i analysebygget ettersom disse er tilsvarende de som er benyttet i referansebygg.

Konklusjonen som kommer frem er at det ved de overstående begrunnelsene er verifisert at konsekvensen ved en brann vil være middels grad og etasjene 2 til 5 kan dermed utføres som brannklasse 2.

5.1.1.2 *Kledning i rømningsvei utføres i K₂10 B-s1, d0 [K1]*

Fravik:	Preakseptert ytelse:
Kledning i rømningsvei utføres i K ₂ 10 B-s1, d0 [K1]	§11-9: Iht. preakseptert løsning skal kledning og overflater i rømningsvei tilfredsstillende hhv. K ₂ 10 A2-s1,d0 [K1-A] og B-s1,d0 [In1].

Funksjonskravet beskriver at materialer og produkter skal ha egenskaper som ikke gir uakseptable bidrag til brannutviklingen. Det skal legges vekt på muligheten for antennelse, hastigheten av varmeavgivelse, røykproduksjon, utvikling av brennende dråper og tid til overtenning. Den preaksepterte ytelsen beskriver en løsning som er mer brannsikker enn den som ønskes benyttet. Ved å benytte kledning i klasse B i stedet for A2 vil overflater og kledning i rømningsvei kunne bidra til et raskere brannforløp. Den øvrige klassifisering som for røyk og dråper vil forbli lik. Det ble gjort en risikovurdering ved bruk av ren kvalitativ analyse for å verifisere at denne endringen ikke førte til uakseptable bidrag for brannutviklingen. Dette var fordi det ble gitt et ønske om å utføre bygget slik at estetikken fra massivtre presenteres. Trevirke plasseres vanligvis i brannklasse D som er brennbar. Ved å brannimpregnere massivtreet kan det dokumenteres at de kan brannklassifiseres til B.

Det ble konkludert med at kledninger i klasse B er testet slik at minste tid til overtenning skal være 20 minutter. Ettersom bygget er fullsprinklet etter NS-EN 12845 som er mer robust med høyere krav til vannmengde enn NS-INSTA 900-1 vil brannen slokkes eller bli sterkt begrenset ved 80-95% av branntilfeller som følge av dette. Dersom brannen blir slokkes vil ikke kledningen ha anledning til å gi noe relevant bidrag til brannen og dermed ikke ha betydning for brannforløpet. Det vises også til et studie[73] som konkluderte med at sprinkleranlegg var av større betydning for brannforløpet enn kledningers brannmotstand. Det viste at personsikkerhet ikke er truet, selv med kledninger i klasse D i rømningsvei, dersom rømningsveien også er sprinklet.

Denne argumentasjonen og dokumentasjon verifiserer at bruk av B klassifiserte produkter på kledning i rømningsvei ikke vil gi uakseptabelt bidrag til brannforløpet. Dermed vil ikke brannforløpet påvirkes i slik grad at tilgjengelig rømningstid er mindre enn nødvendig rømningstid.

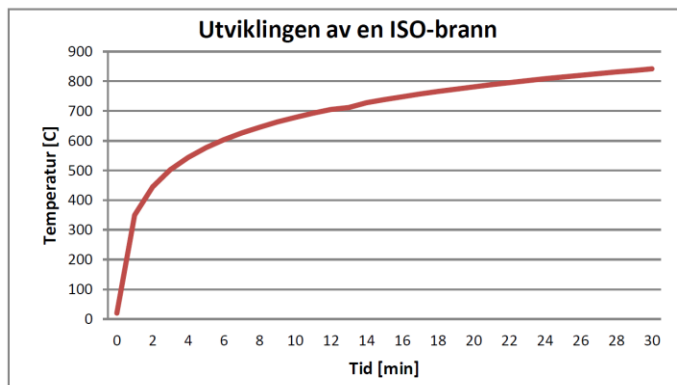
5.1.1.3 Ytterkledning utføres i D-s3, d0 [Ut 2]. I tillegg til B-s3, d0 [Ut 1] i utvendig rømningsvei.

Fravik:	Preakseptert ytelse:
Ytterkledning utføres i D-s3, d0 [Ut 2]. I tillegg til B-s3, d0 [Ut 1] i utvendig rømningsvei.	§11-9: Utvendig antennelse kan i senere faser av brann spesielt etter overtenning påvirke brannspredning. Utvendige overflate på byggverk i brannklasse 2 skal utføres med ytterkledning : B-s1,d0[Ut1]

For ytterkledning skal disse overflatene ikke gi uakseptabelt bidrag til brannutviklingen. Bruken av kledning med lavere brannmotstand enn de ytelse som er spesifisert for brannklasse 2 i VTEK17 kan bidra til raskere brannforløp. Det ble gjort en risikovurdering som hadde som mål å verifisere at byggverket var tilrettelagt for rask og sikker rømning for brukerne samt hadde god utforming av adkomst for rednings- og slokkmannskap til å utføre sitt arbeid raskt og effektivt. Formålet med risikoevalueringen var å vise hvordan endringen i materialtype vil påvirke brannforløpet. Dette ble gjort som scenaribasert analyse. For samtlige scenarier ble følgende ISO 834 -brannkurve:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + T_0 \quad (4)$$

Medfølgende graf:



Figur 42- ISO 834 standardbrann

Her regnes overtenning som, når rommet når en temperatur på 600 °C. Altså ved 6 minutter.

Det ble utarbeidet 4 brannscenario som omhandlet lokalisering av brann, branntype og operasjonelle betingelser. En kort oppsummering av scenariene var som følger:

Brannscenario:	
1	Raskt utviklet brann i leilighet
2-	Brann i rom uten personer
3-	Ulmebrann i leilighet
4-	Brann uten at sprinkler løser ut

Tabell 13-Dimensjonerende brannscenarioer

Scenario 4 ansees å ha størst påvirkning og konsekvens angående rask antennelse av fasade med størst konsekvenspotensial. Derfor ble dette scenariet analysert videre for å kunne verifisere at bruken av klasse D materialer i ytterkledning ville være akseptabelt.

Scenario 4 var basert på en normalt utviklende brann i leilighet i 4 etasje. For dette scenariet utløses automatisk brann alarm(ABA) etter 2 minutter og varsler brannvesen etter 2 nye minutter. Sprinkleranlegg neglisjeres. Det ble tatt høyde for at brannvesenet ville kunne gjøre en innsats i startbrannleilighet og hindre videre spredning av brann ut av leiligheten. Dersom leiligheten overtennes ble det antatt at brannen ville slå ut av startleiligheten og antenne kledning.

Det ble gjort en sammenligning mellom de best tenkelige og verst tenkelige scenariene med tanke på brannspredningstid gitt de foregående kriteriene. Dette ble gitt i form av en konservativ grovanalyse:

	Raskest	Senest
	Tid[min]	
ABA Deteksjonstid	2	2
+ABA Varslingsforsinkelse	2	2
+Utrykningstid	3	10
= Hvor lang tid før brannvesen ankommer	7	14
-Tid til overtenning/tid til brannen er spredd til fasade	6	6
= Hvor lenge brannen er i fasaden	1	8

Tabell 14-Tid til kritiske verdier ved brann

Når brannvesenet ankommer kommer brannen under kontroll. Da ville den mest sannsynlig ha spredd seg til fasaden mellom 4 og 5 etasje, med en liten tilleggsmulighet for at den kunne ha spredd seg til andre leiligheter i 4 etasje. Dette vil være lite sannsynlig med tanke på brannmotstand i konstruksjonen, dører og vinduer. Det er tilrettelagt muligheter for at beboere skal kunne starte tidlig slokking før brannvesenet har ankommet. Med denne begrunnelsen anslås det at det er liten, til moderat sannsynlighet for brannspredning i fasade.

Det ble henholdsvis en gjort konsekvens-, usikkerhets- og sensitivitetsanalyse. I usikkerhetsanalysen ble det reist spørsmål rundt gyldigheten til antagelsen om 80-95% operasjonssikkerhet for utløsningen av sprinklerhodene [62]. Dersom denne referansen ikke stemmer vil brann i fasade kunne inntreffe oftere og få større konsekvenser enn forventet. Kompenseringen for denne usikkerheten er at ABA automatisk varsler brannvesenet. Alle materialer er også gjort ved testing med ISO 834-brann. Dersom brannforløpene utarter seg annerledes vil dette også kunne påvirke brannforløpet og slokkeinnsatsen betraktelig. Som kompenserende tiltak er det blitt benyttet konservative antagelser som heller mot gode sikkerhetsmarginer.

Til slutt ble det konkludert med følgende gjennom en risikoevaluering:

Ved testing ble materialene klassifisert men hensyn til minste tid til overtenning ved påkjenning av ISO 834-brann. Her er minstekravet for klasse B, 20 minutter, og klasse D, 10 minutter. Denne forskjellen på 10 minutter kan spille inn til at brannforløpet vil få en noe raskere utvikling, enn dersom den preaksepterte ytelsen benyttes. Det ble argumentert med sprinkleranleggets høye pålitelighet som en viktig faktor for å bidra til å hindre eller forsinke brannspredning slik at overtenning unngås. Dermed blir konklusjonen at

klasse D produkter på overflate i ytterkledning ikke vil gi uakseptabelt bidrag til brannutvikling. Derfor vil bruk av slike overflater være tilfredsstillende for den tiden det tar å gjennomføre sikker rømning og redning.

5.1.1.4 Branncellebegrensende konstruksjoner mot rømningsvei mot vrimleareal utføres som EI 30

Fravik:	Preakseptert ytelse:
Branncellebegrensende konstruksjoner mot rømningsvei mot vrimleareal utføres som EI 30	§11-8: Branncellebegrensende konstruksjoner i brannklasse 2 skal være utført i EI 60.

Funksjonskravet til TEK17 §11-8, 2. ledd: *Brannceller skal være slik utført at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tid som er nødvendig for rømning og redning.*

For å verifisere at dette funksjonskravet var ivarettatt ble det benyttet rent kvalitativ analyse. Det henvises til rømningsanalysen som ble utført i. Den er her beskrevet i kapittel 5.1.1.6. Det ble gjort beregninger av nødvendig rømningstid. Analysen konkluderte med at samtlige boligetasjer ville blitt evakuert i løpet av 15 minutter. Det betyr at 30 minutters integritet(E) og isolasjon (I) vil være mer enn tilstrekkelig til å gi en komfortabel sikkerhetsmargin ved evakuering.

$$\frac{\text{Tilgjengelig rømningstid}}{\text{Nødvendig rømningstid}} = \text{Sikkerhetsmargin} \rightarrow \frac{30 \text{ min}}{15 \text{ min}} = 2 \quad (5)$$

Sikkerhetsmargin på med faktor på 2 ble ansett som tilstrekkelig, og god. For dette fraviket ble sprinklingen av bygget med tanke på fullsprinkling og vannforsyning brukt som argument for å dokumentere tilstrekkelig sikkerhetsnivå. Med hensyn til NS-EN 12845 med pålitelighet på 80-95%. I rapporten ble denne begrunnelsen fremhevet som kompenserende tiltak for flere av fravikene. På grunn av anleggets effekt vil ikke branncellebegrensende bygningsdeler bli utsatt for kritisk varmepåvirkning og dermed vil den bevare sin brannmotstand lengre enn tiden som er angitt i klassifiseringen av dem. I denne sammenheng ble det påpekt at et EI 30 glass vil kunne vare lengre enn 30 minutter dersom sprinkleranlegget utløses.

I Sørhauggata 100 ble det planlagt to uavhengige trapperom. Dersom et av trapperommene skulle bli utilgjengelig for evakuering som følge av svikt i det analyserte EI 30 glasset vil det være tilgang på et trappeløp til med brannmotstand på EI 60 A2-s1,d0. Dette trappeløpet er konstruert i henhold til preaksepterte løsninger. I tillegg kan også dette trapperommet benyttes til redning og slokkeinnsats av brannvesen. Dermed ble det konkludert med at den gitte utførelsen ovenfor er tilstrekkelig til at denne fraviksløsningen kunne verifiseres. Dette innebærer at trapperommet blir utført slik at det forhindrer spredning av brann og branngasser i den tid som er nødvendig for rømning og redning.

5.1.1.5 *Seksjoneringskille er utført med brannvegg REI 120-M A2-s1, d0 [A 120], mens vinduer utføres i EI 60 A2-d1, s0 [A60]*

Fravik:	Preakseptert ytelse:
Høye byggverk skal skilles med brannvegg med brannmotstand REI 120-M A2-s1,d0 [A 120] dersom avstanden mellom byggene er mindre enn 8 meter. Brannvegg skal føres 0,5 m over høyeste tilstøtende tak, alternativt kan taket utføres med brannmotstand REI 60 A2-s1,d0	§11-6: Bygget utføres med brannvegg REI 120-M A2-s1,d0 [A 120] mot nabobygg. Vinduer og dører i begge bygg i motstående fasade i smuget, samt i innvendig hjørne skal utføres med brannmotstand EI 60 A2-s1,d0 [A 60]. Der brannvegg ikke går 0,5 m over høyeste tilstøtende tak utføres taket med brannmotstand REI 60 [B 60]. Nabobygg mot sør er utført med brannvegg REI 120-M A2-s1,d0 [A 120], med unntak for vinduer som beskrevet i fravik.

Funksjonskravet i TEK17 § 11-6: *Høye byggverk skal ha minimum 8,0 m avstand til annet byggverk, med mindre byggverket er utført slik at spredning av brann hindres gjennom et fullstendig brannforløp.*

Det ble for dette fraviket gjort skildringer i rapporten når det gjelder utformingen av bygget sett i sammenheng med nærliggende bygg. Det har ikke lyktes å få tak i tegninger tilhørende brannkonseptet og det gjennomgås her derfor kun skriftlig argumentasjon benyttet rapporten for å verifisere fraviket slik at metoden kan fremvises.

Sørhauggata 100 skulle oppføres mellom eksisterende bebyggelse mot nord og sør. Med tanke på risiko for brannspredning mellom byggene i sør ble det prosjektert med brannvegger REI 120-M A2-s1, d0. Vinduer plassert mer enn 8 meter fra motstående vegg ble planlagt utført i EI 60 A2,s1-d0. Brann vil dermed ikke kunne spre seg mellom byggene før etter 120 minutter. Dette samsvarer med preakseptert løsning. Ettersom begge motstående vegger i sør har mekanisk motstand i 120 minutter er det neglisjert muligheten for at bygningsdeler faller ned og knuser motstående vinduer i en aktuell rømningsperiode.

Takkonstruksjonen der brannvegg ikke føres 0,5 m over høyeste tak, skal utføres i REI 60 A2-s1,d0. Eneste forskjell her er at takkonstruksjon skal utføres som REI 60 D-s1,d0. Her vil den motstå brannpåkjenning like lenge, men gi større brannbidrag enn den preaksepterte ytelsen tillater. I rømningsanalysen anslås bygget å være evakuert innen 15 minutter. I tillegg skal bygget utføres med sprinkleranlegg med en pålitelighet på 80-95%. Forutsett at sprinkler fungerer slik de vil det gi høy sikkerhet for at takkonstruksjonen ikke utsettes for kritisk brannpåvirkning.

For brannspredning til og fra bygg i nord er det ved aktuelle seksjoneringsvegg benyttet REI 120-M A2-s1,d0 i henhold til preakseptert ytelse. Unntak er et av vinduene som skal utføres med en brannmotstand på EI60 A2-s1,d0 og har en avstand til nabobygg på kun 4 meter. Vinduet er beskyttet fra gjenstander som kan falle ovenfra ved at ovenforliggende etasje dekker den som et tak og flammeskjerm. Dette vinduet er også lett tilgjengelig for brannvesenet å utføre slokking på dersom det skulle være nødvendig. Dette i kombinasjon med sprinkleranleggets pålitelighet til å slokke "egen brann" gjør at det antas at brannen ikke vil spre seg via dette vinduet over til nabobygg og vice versa.

Dermed ble det konkludert med at det er verifisert at byggverket er utført slik at brann ikke vil spre seg til andre bygg gjennom et fullstendig brannforløp.

5.1.1.6 Beregning av nødvendig rømningstid

Til beregning av nødvendig rømningstid ble forflytningshastigheter og strømningshastigheter gjennom åpninger hentet fra byggforsklad 520.835 *Nødvendig rømningstid ved brann*[63]. Deteksjonstid var innhentet fra *HO-3/2000 Røykventilasjon*[64]. Reaksjonstid ble hentet fra *Scenariotenkande vid brandsyn i samlingslokaler*. [65]

Det ble gjort en forenkling denne beregningen ved at det ble vurdert hvor lang tid det ville tatt for 20 personer å rømme fra 5. etasje i stedet for å beregne for hele bygget. Nødvendig rømningstid er beskrevet i oppgavens kapittel 3.9.1. Begge trapperom hadde tilstrekkelig fri bredde med minst 1 cm per rømmende slik at rømning fra to etasjer kunne sammenfalle. Derfor ble det kun sett på rømning fra øverste etasje i bygget(5.etasje).

Deteksjonstid ble satt til 2 minutter.

Reaksjonstid var anslått til 5 minutter, som ble ansett som konservativt anslag ettersom *Scenariotenkande ved brandsyn i samlingslokaler* angir 3 minutter[65]. Her var formålet å ta hensyn til eventuelt sovende beboere, da disse vil bruke lengre tid på å reagere.

Ved beregning av forflytningstid ble det antatt at samtlige personer ville benyttet samme trapperom. Leilighetene i femte etasje er tilnærmet like og disse ville hatt lengst forflytningsavstand for hele bygget. Den lengste målte avstanden var 30 meter til nærmeste rømningsvei, og dette ble benyttet som forflytningsavstand.

Verdiene som ble benyttet for rømningsanalysen er gjengitt i tabell 15 med verdier hentet fra de overnevnte kilder:

Forflytningstid til sikkert sted:	
Distanse	30 meter
Forflytningstid	1,0 meter/sekund
Nødvendig tid for forflytning ned trapp	30 sekund
Kapasitet trapp:	
Antall personer	20 personer
Personflyt	1,5 pers/sekund
Nødvendig tid for forflytning gjennom dør	15 sekunder
Forflytningstid i trapp:	
Distanse	80 meter
Forflytningstid	0,75 meter/sekund
Nødvendig tid for forflytning ned trapp	105 sekunder
Total forflytningstid:	
Forflytning til trapp	30 sekunder
Flyt gjennom dør	15 sekunder
Forflytning i trapp	105 sekunder
Total forflytningstid	150 sekunder

Tabell 15-Beregnet forflytningstid for rømningsanalyse

Ved bruk av de overnevnte verdiene i en rømningsanalyse, legges det til grunn følgende beregning av nødvendig rømningstid:

NØDVENDIG RØMNINGSTID	
Deteksjonstid	2 min
Reaksjonstid	5 min
Forflytningstid	2,5 min
Netto evakueringstid	9,5 min
Sikkerhetsmargin (50 %)	~5 min
Nødvendig rømningstid sikkerhetsmargin	pluss ~ 15 min

Figur 43-Nødvendig rømningstid Sørhauggata 100

Det ble lagt til grunn en sikkerhetsmargin på 50%. Det var også lagt til grunn at beboere vil ha varierende reaksjonstid, som vil føre til lavere sannsynlighet for oppstuvning i inngang til trappeløp. Analysert ble basert på ett trappeløp, slik at dersom det ene av de to trappeløpene i bygget ble blokkert, vil analysen fortsatt gjelde for det andre. Det ble anslått at det var lite sannsynlig at ett trappeløp vil bli blokkert av røyk- og branngasser ettersom bygget er fullsprinklet. Med bakgrunn i disse vurderingene ble forflytningstiden ansett å være konservativ.

Det ble konkludert med at overstående vurdering verifiserte at nødvendig rømningstid inkludert sikkerhetsmargin, kan beregnes til 15 minutter.

5.2 Moholt 50|50(Analysebyggverk)

Moholt 50|50 er en samling av studentboliger beliggende i Trondheim. Disse er fordelt på fem blokker hvor hver av disse er på 9 etasjer. Disse tårnene har til sammen 632 studenthybler hvor andre til niende etasje er lik for hver av blokkene, mens første- og kjelleretasje benyttes til ulike formål. For å dokumentere brannsikkerheten er det også gjort to fullskala branntester med en hybelenhet og korridor. Det er resultatene fra disse som er lagt til grunn for risikoanalysen med fraviksanalyser, som vil blir gjennomgått i dette kapittelet.

Kjeller og første etasje ble konstruert i betong mens andre til niende etasje ble bygget i massivtre. Blokkene har heldekkende brannalarmanlegg med direktevarsling til vaktsselskap samt et sprinkleranlegg dimensjonert etter NS-EN 12845 hvorav alt er fullsprinklet. Hver hybel ble konstruert som egen branncelle og følger preaksepterte ytelser. Det er minimum 2 rømningsveier via trapperom og i tillegg er det tilrettelagt for redning via brannvesenets høydemateriell. Selve massivtreet er dimensjonert for høy

brannmotstand i kombinasjon med sprinkleranlegget. I tillegg har dørene til trappene høyere brannmotstand enn minstekrav. Når det gjelder brannklasse ble byggene plassert i brannklasse 3. Dette skapte fravik med tanke på krav til bæresystem samt branncellebegrensende bygningsdeler. Disse skal i henhold til VTEK bygges i ubrennbare konstruksjoner i klasse A, hvilket ikke er oppnåelig med massivtre. Trapperom brannmales slik at overflate får klasse B-s1,d0, mens kledning vil ha klasse D-s1,d0, hvor det preaksepterte kravet egentlig er K₂10 A2-s1,d0. Fasade fra andre til niende etasje bygges med brennbar trekledning D-s1,d0 hvor preakseptert løsning ville vært B-s1,d0.

Figur 44 viser hvordan Moholt 50|50 ser ut i dag.



Figur 44-Moholt 50|50[67]

De branntekniske ytelseskravene ble dokumentert med preaksepterte ytelser angitt i VTEK. De fraviksløsninger som er benyttet er dokumentert i form av risikovurderinger utført i henhold til NS 3901[74].

Risikoanalysen som dokumenterer de ulike fravikene vil bli gjennomgått i det følgende underkapittel. Analysen er gjennomført av Rambøll.[71]

5.2.1 Beskrivelse av referansebyggverk

For å kunne sammenligne brannsikkerhetsnivået til den ønskede utformingen av Moholt blokkene er det satt sammen et referansebyggverk som kun er konstruert med aktuelle preaksepterte ytelser, slik at dette byggverket vil være i samsvar med funksjonskravene i TEK17. Oppsummert er det gjort avklaringer rundt henholdsvis; kapasitet og sikkerhet for slokkevannsforsyning tilgjengelig i området, beredskapsnivået til Trondheim Brannvesen, valg av materiell og utførelse av konstruksjonsdetaljer, aktuelle standarder, litteratur og statistikker over automatiske slokkeanlegg, samt fullskala branntest av aktuell hybelenhet utført av SP Fire Research i desember 2014. Hovedmålet for risikoanalysen var at det skulle kunne ut i en

brannstrategi som ga et sikkerhetsnivå som minimum tilsvarte referansebygget og samtidig skulle ivareta de interne rammebetingelsene for prosjektet. Gjennom kontakt med Trondheim Brannvesen kunne en legge til grunn at de hadde en plan for gjennomføring av redning via deres høyderedskaper. Bygget ble plassert i risikoklasse 4 på grunn av kontinuerlig opphold for bolig, samt brannklasse 3 på grunn av høyde på byggverk. Dette er fordi en brann kan innebære stor konsekvens for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Alle vegger er bærende, og det ble ikke skilt mellom hovedbærende og sekundærbærende vegger. Alt forankres i betongkonstruksjonen i de to nederste etasjene. Bygget skal stå solid selv om det tas bort en vegg og et dekke fordi krefter kan omlagres til tilstøtende konstruksjoner. Alle hybler ble utført med branncellebegrensende vegger opptil 90 minutter og med dører som holder i 30 minutter. Det ble også lagt til en utvendig sirkeltrapp som var skjermet for stråling, brann- og røykgasser. Hensikten med denne var å sikre tilgjengelighet for redningsmannskaper gjennom hele brannforløpet i de aktuelle scenariene. Innvendige trapperom er av type Tr1 med selvlukkende dører med motstand EI₂60-CS_a. Alle trapperom er fullsprinklet med installert trykksatt stigeledning og uttak i hver etasje. Fra laveste oppstillingsplass for brannvesenet er det 24,2 meter opp til øverste plan for alle fem byggene. Trondheim Brannvesen har garantert for en rekkevidde på minimum 25 meters høyde. Hvert tårn ble orientert på en slik måte at oppstillingsplass for brann og redningsvesenets høydeberedskap skulle kunne foreta redninger via vinduer uavhengig av årstid. Minimumskravet til sprinkler i et slikt bygg er boligsprinkler standard NS INSTA 900 type 3.[23]

Det ble gjort beregninger og antydninger angående sannsynlig brannenergi med utgangspunkt i reelle data i stedet for statistikker. Her var det tatt hensyn til overflater, senger, bokhyller, stol og pult samt et garderobeskap på 1 m³. Beregninger anslo en dimensjonerende brannenergi på 652 MJ/m² gulvareal. Til sammenligning ville en lignende beregning gjort ut ifra NS EN 1991-1-2 gitt en verdi på 948 MJ/m² gulvareal. Dette ble ansett som urealistisk høyt for en slik hybelleilighet. Det ble fremholdt at selv med eksponerte massivtrevegger ville ikke disse bidra ytterligere til brannforløpet etter at det mobile brenselet i leilighetene var oppbrukt. De ville heller ikke gitt signifikant effekt på brannforløpet.

Ventilasjonsanlegget ble utstyrt med røyksikker avtrekksvifte, som skal trekke ut røykgasser opp mot temperaturer på 300 °C. Det ble forutsatt at anlegget var i drift under en brann for å trekke ut røyk, men at det stanser dersom det detekteres røyk på tilluftssiden. I VTEKs §11-8 defineres boenhet slik; *Hybelleilighet og lignende som innehar alle nødvendige funksjoner regnes som boenhet. Boenhet skal være egen branncelle.* Hyblene i andre til niende etasje innehar ikke eget kjøkken og ble derfor ikke regnet som egen boenhet. Derfor ble det i risikovurderingen lagt til grunn at hyblene, sammen med fellesarealet hvor kjøkken befinner seg betegnes som én enkel boenhet. I stedet for at hver hybel ble definert som en egen boenhet i dimensjoneringen. Hver hybel ble imidlertid utført som én egen branncelle.

Innvendige trapperom med heissjakt ble utført som Tr1 med bærende vegger i massivtre. Utvendig er disse veggene isolert med ubrennbar kledning. Dør til trapperom er selvlukkende med motstand EI₂60-CS_a. I tillegg ble trapperommet fullsprinklet i henhold til NS 12845. Fasaden i nederste etasje ble utført i ubrennbart/begrenset brennbart materiale i klasse A eller A2. Fra andre etasje og opp ble kledning utført i krysslektet trepanel. Innsiden av panelet ble isolert med Rockwool RedAIR Flex fasadesystem som betyr at det er kontinuerlig steinull mellom lektene. I tillegg ble den utlektede ytterkledningen delt inn brannteknisk avgrensede felter med horisontale hulromsventiler og vertikale skott av lekter som har som

formål å hindre brannspredning bak kledning. Vinduer ble også innfelt i fasaden med overliggende beslag for å forhindre eventuell brannspredning ut fra vindu og inn bak kledning over vinduet.

5.2.2 Problem- og målformulering

Det er en del forhold som må tas stilling til ved konstruksjon av byggverk i slik skala utført i massivtre da mangel på preaksepterte ytelser gjør det problematisk å utføre i henhold til den standarden som er angitt i TEK. Det ble derfor gjort vurderinger rundt hvilke brannforløp som kan være aktuelle og hvilke kriterier som da må være oppfylt. Kan de aktive tiltak som implementeres benyttes for å verifisere tilfredsstillende sikkerhetsnivå for slike bygg?

5.2.3 Akseptkriterier

Det ble utarbeidet akseptkriterier både for verdisikkerhet og rømningsikkerhet. Bakgrunnen for valget av akseptkriteriet om verdisikkerhet er vurdert som følger:

Det ble gjort fullskala tester i henhold til en ISO 834 brann hvor temperaturer og innbrenningshastigheter på massivtreet ble målt, som worst case scenario hvor sprinkleranlegg ikke løste ut. En normert brann har innbrenningshastighet på 0,65 mm/min, mens testresultatene hadde samsvarende innbrenningshastighet på omtrent 1,1 mm/min, en betydelig forskjell. Den økte forkullingshastigheten ble ivaretatt i prosjekteringen, ved at massivtrekonstruksjonen ble dimensjonert med økt tverrsnitt. Med bakgrunn i de testene som ble gjort kunne det forutsettes at øvrige overflater i hybelenhetene var av tilstrekkelig styrke slik at lokal kollaps kan aksepteres i ett dekke samt én vegg.

I henhold til risikoanalysen ble det vurdert at etter ca. 90 minutter vil en ubeskyttet bærende vegg kunne kollapse, mens dekke over hybelen vil kunne vedvare ved lengre brannpåkjenning på grunn av økt tykkelse samt gipsbeskyttelse. Ifølge rapporten ble det videre understreket at det kunne forekomme lokal kollaps i en hybelenhet. På grunn av bæresystemets oppbygging ble det påpekt at omkransende naboelementer fortsatt kunne inneha sin bærende integritet. Dette vil fungere som en slags redundans sammenlignet med løsninger hvor kun søyler benyttes som bærende elementer. Denne sistnevnte løsningen kan føre til total kollaps. En overtent hybelleilighet vil ikke kunne selvslukke. Innen 90 minutter er det imidlertid medregnbart at brannvesenet har kommet til med slokkeinnsats for å hindre videre brannspredning. Dette kan forutsettes fordi at det er tilrettelagt slik at brannvesenet har adkomst til hver etasje både fra utsiden via sirkeltrapp og innsiden, samt høyderedskap. Utover dette ble det lagt til grunn implementering av ytterlige kompenserende tiltak som; et sprinkleranlegg som tilfredsstillt krav i NS 12845 tillegg F, Brannalarmanlegg med økt deteksjons- og varslingsnivå, to trapperom med økt krav til dør, økt ventilasjon ved røykdeteksjon, utvendig trapperom tilgjengelig for brannvesenets innsatspersonell, markeringslys til utganger til trappe, brannteppe på kjøkken, etablering av evakueringsplan for tårnene, brannmotstandsegenskaper i vegger mellom hybelenheter og fellesareal opprettholdes til minimum EI30. Lengste fluktvei skal tilfredsstillt avstandskrav for alle risikoklasser (1-6) jfr VTEK som er lik 25 meter. I tillegg skal det i medhold av Brann- og eksplosjonsvernloven [68] for disse byggene være etablert kontrollrutiner og serviceavtaler på alle aktive brannsikringsanlegg. Ettersom studentboliger og vanlige boliger er satt i samme risikoklasse av myndighetene ble det vurdert at det for alle brannscenarier måtte bety at beboere for disse har lik forutsetning for å kunne bringe seg selv i sikkerhet. Men fordi

konsekvensen av en brann i et av tårnene vil være større på grunn av det høye persontallet må sannsynligheten for branttilløp reduseres, slik at samme sikkerhetsnivå kan opprettholdes.

5.2.4 Analyse

I rapporten ble det benyttet komparativ analyse for å sammenligne brannsikkerheten i analysebygget opp mot et referansebygg utført i henhold til VTEK med preaksepterte ytelser. Hensikten med dette var å verifisere at analyseobjektet har minst samme sikkerhetsnivå som referansebygget. Det ble gjort sammenligninger på tre hovedområder:

- Potensielt verditap ved et fullstendig brannforløp
- Rømningsforhold fra studentenes boarealer
- Mulighet for rednings og slokkeinnsats fra etasjene

Tillegg ble fravik som var underordnet disse tre områdene vurdert. Det ble benyttet komparativ analyse ut ifra standarden NS 3901 hvor det ble gjort sammenligninger av ytelsesnivå og konsekvenser ved branttilløp mellom analyseobjektet og referanseobjektet. Analysebygget og referansebygget er beskrevet tidligere i kapittelet.

Det ble gjort analyse av mulige årsaker og sannsynlighet for brannstart på hybel, brannstart i fellesareal, brannstart i trapperom og utvendig brannstart. Ut ifra disse mulige årsakene ble det utarbeidet fire aktuelle scenarier som skulle analyseres med hensyn til ulike utfall og alvorlighetsgrad:

1. Et alvorlig brannscenario med rask brannutvikling og høy branneffekt som representerer det verst troverdige brannscenarioet i byggverket
2. Brann som oppstår i et rom som normalt er uten personer og som kan true et større antall personer i andre deler av byggverket.
3. Brann som utvikler seg langsomt og som ikke utløser et automatisk slokkeanlegg
4. Representative brannscenarioer for det aktuelle byggverket som skal analyseres for å avdekke robustheten i den branntekniske utformingen.

Ut ifra disse fire scenariene ble analyse av brannstart på hybel dekket av scenario 1. Brannstart i fellesareal ble dekket av scenario 3.

5.2.5 Kortfattet fremstilling av analyser

Etttersom det er mange og lange analyser et slikt bygg som skal gjennomgås for å verifisere at verdi- og personsikkerhet er ivaretatt har en i denne oppgaven valgt å gå direkte til presentasjon av konklusjonene for de ulike analysene. Dette omfatter:

1. Konsekvensanalyse som skal vurdere i hvilken grad følgene av et gitt scenario vil kunne være akseptabel eller ikke.
2. Usikkerhetsanalyse vurderer påliteligheten til sprinkleranlegget ettersom det ikke finnes norske statistikker over det valgte anlegget. I stedet ble det derfor gjort en sammenligning mellom ytelsen på sprinkler dimensjonert med NS-INSTA 900 boligsprinkler type 3 opp imot sprinkler dimensjonert i henhold til NS-EN 12845 OH1. Her ble det statistikker fra både Sverige og USA gjennomgått.[69]

3. Sensitivitetsanalyse anvendes for å undersøke hvilken betydning av valg bygningsdeler i analysebygget har for brannsikkerhet sammenlignet med referansebygget. Her gjennomgås bæresystem, trapperom med bærevegger av massivtre, trefasade og branncelleinndeling. Med disse analysene er det fremkommet en del fravik fra VTEKs preaksepterte ytelser som må dokumenteres.

5.2.6 Risikoevaluering

For byggingen av Moholt 50|50 har Studentsamskipnaden i Trondheim lagt til grunn at sikkerheten for studentene skal være høy. Men de har også lagt ALARP prinsippet som utgangspunkt "As Low As Reasonably Practicable" med tanke på kostnader og utførelse. Det nevnes i rapporten at analysebygget er unikt på flere måter og det har vært utfordrende å finne et godt referansebyggverk å sammenligne opp mot. Det ble forsøkt å komme så nært som mulig det sikkerhetsnivået som kan utledes ved bruk av VTEK, men det var til slutt tre hovedpunkt som skilte analysebyggverk fra referansebyggverk:

- 1) Referansebygg i brannklasse 3 skal ha ubrennbart bæresystem, men analysebyggverket har bæresystem i tre. Det ble stilt spørsmål om hvordan tapspotensialet da skulle vurderes?
- 2) Studentboliger defineres i samme risikoklasse som boliger, RKL 4. En bolig defineres som en boenhet. Men i rapporten ble det reist spørsmål om man kan bruke ytelsesnivået i RKL 4 som referanse når det er 15 hybelenheter i boenheten?
- 3) Referansebyggverkets ytelsesnivå skiller mye på om det er opptil 8 etasjer eller over 8 etasjer, men ytelsesnivået i VTEK gjøres også avhengig av brannvesenets innsatsmuligheter. I denne sammenheng ble det reist spørsmål til hvor referansenivået skal plasseres dersom brannvesenets innsatsmuligheter er bedre enn hva referansebyggverket legger til grunn?

Til punkt 1 ble det vist til at analysebyggverk hadde et gunstig bæresystem som omlagret kreftene godt dersom det skulle skje lokale skader på bæresystemet som følge av brann. I tillegg har massivtre gode brannskillende egenskaper. Forutsigbarheten til bæreevnen for massivtreelementene med tanke på bruddgrense bidrar til å gjøre slokkeinnsats fra redningsvesen påregnelig.

Til punkt 2 nevnes det økte ytelsesnivået og påliteligheten til de aktive og passive brannsikringstiltakene i etasjene som gode kompensierende tiltak. Evakueringsplaner er med på å bevisstgjøre boende studenter om rømnings- og slokkestrategi.

Til punkt 3 ble det lagt stor vekt på brannvesenets mulighet til innsats i høyden. Denne evnen er bekreftet av Trondheim Brannvesen, og de kan også bekrefte at de kan utføre både slokking og redning fra samtlige vinduer i alle etasjene.

Ut ifra dette ble det vurdert at analysebygget innehar minimum samme sikkerhetsnivå for verdier, rømning og innsatsmuligheter for brannvesen sammenlignet med hvordan et referansebyggverk ville sett ut.

5.2.7 Fraviksanalyse

I motsetning til fraviksanalysen for Sørhauggata 100 ble Moholt 50|50 oppført som brannklasse 3 i hovedsak på grunn av sine ni etasjer. Men med samme risikoklasse, RKL 4. Prosjektering av konstruksjoner som Moholt 50|50 kommer på mange punkter godt utenfor de preaksepterte ytelsene som er angitt i VTEK og disse måtte derfor verifiseres ved fraviksanalyse.

5.2.7.1 Brennbart bæresystem

Funksjonskrav:
TEK §11-4 (2): Ved dimensjonering for tilfredsstillende bæreevne og stabilitet ved brann skal det medregnes termisk påkjenning fra den brannenergien og det brannforløpet som kan forventes i byggverket.
TEK §11-4 (4): Bærende hovedsystem 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.

Risikoanalysen sannsynliggjorde at et oppgradert sprinkleranlegg dimensjonert i henhold til NS-EN 12845 ville kunne slukke en brann mer effektivt enn et dimensjonert i hht. NS-INSTA 900 boligsprinkler. Dersom anlegget mot formodning skulle være ute av drift, ble det likevel hevdet at det var grunnlag for å anta bygget ville opprettholde sin bæreevne og stabilitet for en overtent naturlig brann i mer enn 90 minutter uten innsats fra brannvesenet. Det ble videre hevdet at et preakseptert bygg med brannbeskyttede stålsøyler ville vært mer følsomt for skade på brannbeskyttelsen og dermed også bæreevnen til stålelementene. På den annen side ble det fremhevet at massive bærende veggskiver slik som for analysebygg hadde god evne til å omlagre krefter dersom lokal kollaps skulle forekomme. Det ble derfor vurdert at angitt løsning med brennbart bæresystem vil være tilfredsstillende sammen med gitte aktive og passive brannsikringstiltak.

5.2.7.2 Brennbar fasade

Funksjonskrav: TEK § 11-6 (1) Tiltak mot brannspredning mellom byggverk
Brannspredning mellom byggverk skal forebygges slik at sikkerheten for personer og husdyr ivaretas, og slik at brann ikke kan føre til urimelige store økonomiske tap eller samfunnsmessige konsekvenser.

Her er minste avstand mellom studenttårnene 13 meter. Sikkerhet mot brannspredning mellom tårn ble ansett å være ivaretatt.

Funksjonskrav: TEK § 11-8 (2) Brannceller (vertikale spredning)
Brannceller skal være slik utført at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tid som er nødvendig for rømning og redning.

De økte kravene som ble iverksatt med tanke på sprinkler samt brannalarmanlegg ble vurdert til å gi tilfredsstillende beskyttelse mot vertikal brannspredning. Det ble ansett som formildende at annenhver etasje skal høre til forskjellige sprinkleroner. Dette medfører at det aldri vil være mer enn 2 etasjer over hverandre som er uten sprinklervann. Det ble fremhevet at tiden for vertikal spredning mellom

boenhetene er svært høy. Fasadens detaljutforming skal begrense brannspredning. Funksjonskravet ble her vurdert som ivaretatt.

Funksjonskrav: §11-9. Materialer og produkters egenskaper ved brann

(1) Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at sannsynligheten for at brann skal oppstå, utvikle og spre seg er liten. Det skal tas hensyn til byggverkets bruk og nødvendig tid for rømning og redning.

(2) Materialer og produkter skal ha egenskaper som ikke gir uakseptable bidrag til brannutviklingen. Det skal legges vekt på mulighet for antennelse, hastigheten av varmeavgivelse, røykproduksjon, utvikling av brennende dråper og tid til overtenning.
--

(1)(2) I rapporten ble det påpekt at det ikke fantes noe utvendig som kunne antenne selve fasaden. En brann som sprer seg fra innsiden av bygget ut til fasaden vil forutsette at sprinkleranlegget svikter helt, eller delvis. Dette er svært lite sannsynlig. Nederste etasje kompenserer mot ildspåsetting fra utsiden med brannimpregnert tre og hulromsventiler for å forhindre at en slik utvendig brann skal kunne antenne fasaden. Disse hulromsventilene er horisontale og strategisk plassert for å begrense eventuell brannspredning bak kledning. Utforming av vinduene er detaljert slik at dersom et vindu sprekker, skal det fortsatt være slik at flammene ikke blir ledet bak kledning. I tillegg er også fasaden delt inn i vertikale tette felt i form av lekter for å hindre horisontal spredning bak fasade. Dette gjelder også hjørner.

I tillegg er det 200 mm tykk steinull bak fasaden som beskytter hovedbæresystemet i massivtre. Derfor er sannsynligheten for at en fasadebrann skal kunne svekke dette bæresystemet svært liten.

Når det gjelder utvendig rømningstrapp er det ingen tilstøtende vinduer fra hybelenhetene som kan gi åpne flammer i denne trappen. I tillegg har de to fasadene mot utvendig rømningstrapp en brannmotstand på EI60 fra vegger, vinduer og dører. Dette sikrer at utvendig rømning ikke blir hindret av røyk eller brann.

Funksjonskravet ble derfor ansett å være ivaretatt.

Funksjonskrav: §11-17. Tilrettelegging for rednings- og slokkemannskap
--

(1) Byggverk skal plasseres og utformes slik at rednings- og slokkemannskap, med nødvendig utstyr, har brukbar tilgjengelighet til og i byggverket for rednings- og slokkeinnsats.
--

(2) Byggverk skal tilrettelegges slik at en brann lett kan lokaliseres og bekjempes.
--

Tilgjengeligheten til fasaden, materialbruk og oppdeling av fasade med branntette felter ble avklart med Trondheim Brannvesen. Tiltakene som ble gjort for å forhindre utvendig ildspåsetting i første etasje ble gjennomført etter diskusjon med brannvesenet. Dette var som følge av mange stiftede branner vinteren mellom 2014/15.

6 Diskusjon

Diskusjonsdelen vil bestå av tre underkapitler hvor litteraturstudiet og case studiet med brannkonsepter diskuteres hver for seg. I tillegg vil de branntekniske utfordringene som menes å motvirke en effektiv, fremtidsrettet og miljøbevisst prosjektering av massivtrebygg bli diskutert i kapittel 6.3.

Dette diskusjonskapittelet skal belyse de forskjellige aspektene rundt problemstillingen som fremgår i kapittel 1. Det skal til slutt kunne ut i en konklusjon. I litteraturstudiet samt kapittel 3 gjennomgås dokumentasjon brannprosjekterende ofte må forholde seg til når de skal argumentere for om et byggverk kan verifiseres å ansees som prosjektert i henhold til gjeldende regelverk. Her må de forholde seg til myndigheter, når det gjelder lover, forskrifter og standarder. I tillegg må de ofte fremvise og argumentere med forskning, forsøk og dokumentasjon av bygningsdeler samt løsninger utført av tredjepart. Prosjekterende må i tillegg vurdere slik dokumentasjon nøye for å forsikre seg om at det er samsvar mellom testoppsett og resultater.

Kapittel 5 bygger utleverte brannkonsepter for to massivtreprosjekter som begge er ment for å huse studenter. Her vil det bli diskutert hvilke utfordringer de prosjekterende aktørene støter på for to prosjekter som i hovedsak skal være innenfor samme risikoklasse og brannklasse dersom de kategoriseres ut ifra preaksepterte ytelser. Hovedforskjellen mellom disse prosjektene er antall tellende etasjer, samt at Sørhauggata 100 er plassert inn imellom allerede eksisterende bebyggelse, mens Moholt 50|50 vil være frittstående uten direkte tilstøtende bygg. Både for dette kapittelet og for litteraturstudiet vil en søke å belyse i hvor grad dokumentasjonen er tilstrekkelig og sikker som hjelpemiddel til å prosjektere høye massivtrehus. Det vil bli drøftet om denne typen dokumentasjon kan også anvendes til enda høyere massivtrebygg eller om den i en slik sammenheng vil være mangelfull. Det skal drøftes verktøyene en prosjekterende har til rådighet ikke strekker til og om det må derfor gjøres forbedringer, enten med tanke på regelverk, materialdokumentasjon, analyser osv.

6.1 Litteraturstudie

I litteraturstudien er det gjennomgått flere aspekter knyttet til dokumentasjon av brannsikkerhet for massivtrekonstruksjoner. Med referanser fra både norske og internasjonale aktører. Et av de mest sentrale spørsmålene knyttet til bruk av massivtre er bæreevne og stabilitet når de bærende elementene er konstruert i tre og hvordan disse vil påvirkes seg under en brann.

De preaksepterte ytelsene i VTEK byr på komplikasjoner spesielt dersom et byggverk klassifiseres som brannklasse 3. Dette er fordi bærende hovedsystem for slike konstruksjoner må være av ubrennbar materiale i minst klasse A2. En kategori trevirke ikke kan oppnå. Begrepet fullstendig brannforløp er også diskutabel fordi bygningsdeler som er testet under standarden NS-EN1363-1 med en ISO 834 kurve mangler definisjon av avkjølingsfasen. Forsøkene til SP Fire Research på bærende limtresøyler som ble presentert i kapittel 4.1 testet både frittstående avkjøling i frisk luft, samt avkjøling inne i brennkammer. Swecos konklusjon basert på disse forsøkene var at det er mulig for limtrekonstruksjoner å dimensjoneres til å motstå et fullstendig brannforløp uten å bli slokket av brannvesenet. Søylerne ville heller ikke bidra til en signifikant forlengelse av brannforløpet når det ikke lengre tilføres varme. En svakhet med denne

konklusjonen kan være at det i mange tilfeller er nærliggende vegger konstruert i massivtre. Dette er en faktor som testen ikke tar høyde for ettersom den omsluttende ovnen benyttet til forsøkene er ubrennbar. Dette kan medføre at reelle forhold ikke gjenspeiles fordi glødende og brennende trevirke vil stråle mot hverandre og katalysere forbrenningen i rommet. Selv om disse forsøkene er gjort på store limtresøyler, vil de dersom vi sammenligner skalaen med testing som omfatter et komplett rom eller hel bygning være relativt lite. Utførelsen av forsøkene kan gjenspeile noe av problematikken rundt branntesting. Det er kostbart og krevende å finansiere og dette kan føre til begrensninger og/eller mangelfulle data sammenlignet med hvordan et reelt scenario ville kunne utfolde seg. Ved bruk av slike data som dokumentasjon er det viktig ved konkludering å vurdere om testoppsettet og opplysninger som fremkommer i stor nok grad er relevant for å underbygge en konklusjon som beslutningsgrunnlag for prosjektering. Det nevnes også i rapporten at noe slokkeinnsats vil være nødvendig etter hvert, ettersom det ble observert gløding i fuger. Denne innsatsen ble ikke ansett å være tidskritisk. Søylen ble heller ikke lasttestet og Sweco understreker derfor at det ikke er dokumentert med disse forsøkene at bæresystemet vil opprettholde sin bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp. En slik lastbæringstest kunne vært nyttig å inkludere, for å se hvor mye lastbæringsevne søylene mister gjennom et fullstendig brannforløp.

I kapittel 4.2.1 kommer det frem at for rombranner med ulike konfigurasjoner av beskyttede og ubeskyttede CLT vegger har vesentlig raskere temperaturstigning enn brannkurven til en ISO 834 brann. Det var derfor av stor betydning for utviklingen av brannforløpet om veggen var tildekket eller ikke. I testen med ubeskyttede vegger steg temperaturen i rommet opp mot $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, og holdt seg jevnt på denne temperaturen. For tester med tildekket CLT vegger sank temperaturen raskt etter inventaret var oppbrent og brannen gikk til avkjølingsfase. Disse testene viste tydelig viktigheten av gips som brannbeskyttelse når det gjaldt å kontrollere en rombrann med vegger i tre og hindre unødig bidrag av brensel som ville forlenge brannforløpet.

Andre aspekter som forkulling, delaminering og isolerende funksjon av kullag er også viktige når den kommer til vurdering av brannmotstand i CLT og limtre.

Den nominelle forkullingsraten oppgitt i NS-EN 1995-1-2 ansees som konservativ og det fremkommer også i testen som SP Fire Research(4.1) gjorde. Andre forsøk derimot, i større skala som for eksempel "Branntest av massivtre" gjengitt i kapittel 4.3 viser at forkulling i massivtre for et overtent rom uten sprinklerpåvirkning kan oppnå forkullingshastigheter opp mot $1,4\text{ mm/min}$. For ubeskyttet treverk i NS-EN 1995-1-2 er det oppgitt en nominell forkullingshastighet på $0,65\text{ mm/min}$ for massivtre. I kapittel 4.3 vil forkullingsraten etter hvert synke til en hastighet på $0,7\text{ mm/min}$, men denne reduksjonen hevdes å skyldes den isolerende effekten kullaget har på varmeledningsevnen til tre. Det kan dermed sies at nominelle forkullingsrater bør benyttes med forsiktighet og etter nøye vurdering.

Når det gjelder delaminering er det tydelig at valg av limtype vil ha en innvirkning på når dette fenomenet kan inntreffe under en brann. I kapittel 4.4 er det gjort forsøk som viser at type lim, sett i sammenheng med hvordan lamellene orienteres har innvirkning på forkullingsrate. Dette kan igjen videreføres til når en eventuell delaminering kan inntreffe. Forskjellige limtyper har også ulik temperaturbestandighet. Dette betyr at noen limtyper, som for eksempel PUR mister sin bindende evne ved rundt $90\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens MUF vil kunne være bestandig ved temperaturer opp mot $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dermed kan det konstateres at limtype

benyttet vil ha konsekvenser for når delaminering kan inntreffe. Varmeledningsevnen til trevirke er i utgangspunktet svært lav og temperaturforskjellen mellom 100 °C og 300 °C er derfor av stor betydning for når en eventuell delaminering kan inntreffe og gi økt bidrag med friskt trevirke til brannen. Limtype benyttet i bygningsdelene er derfor en faktor som prosjekterende bør ta hensyn til selv om en bygningsdel er oppgitt til en viss brannmotstand. Dette gjenspeiler viktigheten av å se hvordan dokumentasjonen er utført ettersom eventuelle testmetoder angitt i en standard som for eksempel NS-EN 1363-1 ikke nødvendigvis vil gjenspeile reelle situasjoner med høy nøyaktighet siden bygningsdeler ofte testes alene i en ovn.

Den isolerende effekten til kullaget er signifikant og hemmer bakenforliggende forkullingshastighet så lenge dette kullaget er intakt. Hovedproblemet med å begrunne brannsikkerhetsnivået på bakgrunn av denne effekten er at et slikt kullag vil ha lav eller ingen lastbæringsevne og være uforutsigbart. Under turbulente branner kan slike lag ofte kollapse og falle ned fra vegger og tak og dermed tilføre brannen friskt trevirke for pyrolysering. I tillegg vil den isolerende effekten forsvinne. Den isolerende effekten av et slikt kullag er for noen markedsaktører en begrunnelse for å hevde at massivtre og limtre vil selvslukke når den mobile brannenergien i ett som for eksempel møbler er oppbrent. Dette er en påstand forbundet med usikkerhet og dette kommer tydelig frem i testen fra kapittel 4.3.2 hvor sprinkler ikke løser. En brann i en hybel konstruert i massivtre vil holde høy temperatur og etter hvert ha gjennombrenning av massivtreelementene lenge etter at den mobile brannenergien er oppbrent. Ifølge disse forsøkene vil ikke påstanden om at massivtre selvslukker være gyldig når den omhandler ubeskyttet massivtre i et overtent rom.

Gjennomføringer for blant annet ventilasjon, rør og strømledninger i bygningsmasser kan ofte være årsak til brannspredning. Slike gjennomføringer er uunngåelig, og sammen med hjørneskjøter og skjøter i planet regnes de som svake punkter med hensyn til røyk- og brannspredning. Dette er drøftet i kapittel 4.2.4. En gjennomføring kan være dekket i stål, som raskt vil kunne bidra til brannspredning til andre rom eller etasjer dersom den utsettes for høy varmpåkjening. Per i dag finnes det en standardisert måte å teste flammespredning mellom skjøter i planet. Men for spredning i hjørneskjøter mot andre CLT elementer finnes det ennå ikke en standardisert testmetode. Når det gjelder gjennomføringer er det få godkjente løsninger på markedet og det nevnes i kapittel 4.2.4 at det enda ikke finnes en enkel metode for å sikre at alle typer gjennomføringer er sikret mot brann- og røykspredning. Her det enda ikke funnet opp en ultimat løsning, men i dag benyttes det brannsikker isolasjon som Rockwool, eller brannspjeld som ekspanderer ved høy varmpåkjening og tetter gjennomføringer eller skjøter.

Sprinkleranlegg er et svært effektivt aktivt tiltak mot brann. Dersom det er dimensjonert riktig vil det i de fleste tilfeller bidra til å kontrollere eller slokke en brann allerede i startbrannrommet. Mye av dokumentasjonen av brannsikkerhet i massivtrebygg beror på et operativt automatisk slokkesystem. Slike systemer viser seg å være svært effektivt. Her kan det fremvises dokumentasjon på en pålitelighet på mellom 80-95%^{[58][59][60]}. I Norge er boligsprinkling er nyere fenomen, men i TEK stilles det krav om at alle nye boligbygg med krav til heis, også skal ha boligsprinkling, med egen standard for boligsprinkler NS-INSTA 900-1. Effekten av hva et slikt boligsprinklersystem kan bety er beskrevet i kapittel 4.5 fra byen Scottsdale i Arizona US. Her er det godt dokumentert med stort datagrunnlag over 15 år i hvilken grad boligsprinkler redder både mennesker, hus og verdier. Dette tiltaket medførte målrettede og drastiske

forbedringer innen person- og verdisikkerhet sammenlignet med fra før lovforslaget om boligsprinkler i nye boliger ble vedtatt. I dag er automatisk slokkeanlegg det desidert mest effektive aktive brannsikringstiltaket på markedet. På en annen side har ikke automatiske slokkeanlegg i seg selv høy nok pålitelighet til å benyttes som eneste brannsikringstiltak. Det må derfor suppleres med andre aktive og passive tiltak som brannalarm og detaljløsninger for å ivareta et akseptabelt sikkerhetsnivå. Høyhus vil som regel ha trappeløp som eneste rømningsvei dersom brannvesenets høydemateriell ikke har tilstrekkelig rekkevidde eller tilgjengelighet. Eldre mennesker er overrepresentert i dødsbranner i Norge i dag. Det er trangt om plassene på sykehjem og det er ofte ønskelig at en eldre person skal bo i sitt eget hjem så lenge som mulig. Dette kan medføre at det bor personer i høyhus som ikke har evne til å ta seg til sikkert sted via trappeløp som følge av nedsatt funksjonsevne. Dette medfører at deres beste sjanse for overlevelse ved brann vil være å bli igjen i leiligheten til de blir reddet. Dette kan ta tid og det understreker derfor viktigheten av god dimensjonering av bæreevne og stabilitet, samt hindring av både røyk og brannspredning. Gjennom litteraturstudiet fremkommer det frem at det i dag kun er aktivering av automatisk slokkeanlegg som med sikkerhet kan kontrollere en brann i et rom konstruert i massivtre, utenom om aktiv brannbekjempelse av for eksempel røykdykkere. Tiltak som gips og brannmaling vil i hovedsak bare utsette brannforløpet i den tid det er dimensjonert for å være brannbestandig.

6.2 Branntekniske fraviksløsninger i eksisterende massivtrebygg

En stor del av å prosjektere høyhus i massivtre vil være å vurdere de fravikene som oppstår og dokumentere at de nye løsningene er like gode eller bedre enn de preaksepterte løsningene. Dette kan gjøres både ved hjelp av komparative kvalitativ og kvantitativ analyse. I utgangspunktet vil begge byggeprosjektene som er presentert i kapittel 5 plasseres i samme risikoklasse(4) og brannklasse(3) dersom VTEKs preaksepterte ytelser legges til grunn. Et av de mest omfattende fravikene for Sørhauggata 100 er at det er valgt å prosjektere bygget i brannklasse 2 i stedet for 3. Ettersom første etasjen prosjekteres i brannklasse 3 og de resterende 4 etasjene er adskilt fra denne delen av bygget og nødvendig rømningstid ikke påvirkes i stor grad blir dette fraviket ansett som akseptabelt. Ettersom det stilles betydelig strengere krav til materialvalg og bygningsdeler i brannklasse 3 sammenlignet med 2, og spesielt med tanke på at hele bygget skal oppføres i massivtre med bærende hovedkonstruksjon i limtre vil de prosjekterende med dette kunne sammenligne de videre analysene med et referansebygg utført i brannklasse 2. Dette vil redusere kostnadene rundt analyse og materialvalg, samt redusere kompleksiteten i analysene og dokumentasjonskravet til sikkerheten. Graden av brannsikkerhet er ofte dokumentert med hensyn referanser fra andre aktører som produsenter eller kan også være forskningsbasert ut i fra gjeldende standarder.

En stor del av dokumentasjonen for sikkerhetsnivået i Sørhauggata 100 og Moholt 50|50 baserer seg på et operativt sprinkleranlegg dimensjonert i henhold til NS-EN 12845 som er strengere enn NS-INSTA 900-1 med tanke på vannmengde. Her vil en hevde at dette argumentet inneholder noen svakheter. Dette fordi at den kjølede effekten av vann fra sprinkler ikke er proporsjonal med vannmengde. Dette kan forklares med at energien som kreves for å omdanne vandråpene til damp vil stjele varme fra flammene og dermed også etter hvert bidra til å slokke eller kontrollere brannen. Det er faseskift for vannet som krever store mengder energi, og dermed vil vann som lander på gulvet bare i ubetydelig grad bidra til nedkjøling og slokking. Et annen type konsekvens av større vannmengder kan være betydelige vannskader i etterkant av

en slokkeinnsats. Selv om sprinkleranlegg har høy effektivitet sammenlignet med andre brannsikringstiltak, vil konstruksjoner i tre være ekstra utsatt for svekkelser som følge av råte når det påføres større vannmengder sammenlignet med like bygg konstruert i betong. Dette kan føre til store ekstra kostnader med tanke på restaurering og i verste fall må hele bygget rives.

Kostnader vil for alle byggeprosjekter være et viktig aspekt. ALARP prinsippet benyttes i et forsøk på å holde kostnadene så nøktern som mulig mens sikkerhetsnivået holdes adekvat. En kan for eksempel ta for seg Sørhauggata 100 hvor de prosjekterende analyserte seg fra brannklasse 3 til 2 for store deler av bygget. Uten denne dokumentasjonen kunne det risikeres at det ikke var mulig å bygge disse studentboligene slik som byggherre ønsket både med tanke på utforming og kostnader. Det er ikke gitt at dyrere løsninger nødvendigvis er sikrere løsninger. Her kan det derfor ikke hevdes at de prosjekterende i dette tilfellet i hovedsak har analysert seg vekk fra de kostnadene et 5 etasjers massivtrebygg i brannklasse 3 vil innebære. Kvaliteten og gjennomføringen av analysene må vurderes. Blant annet valg av aktuelle scenarier for den scenariobaserte analysen som skal være dekkende for hvilke hendelsesforløp som kan tenkes å være worst case scenario. Det må også vurderes hvordan det kan forventes at bygget vil takle en slik påkjenning. Tiltaksklasse er en ekstra barriere som skal forsikre at de prosjekterende har tilstrekkelig utdanning, fartstid og erfaring for å kunne dimensjonere denne type prosjekt på en pålitelig måte. Analyser er bare så solide som datagrunnlag og metode tilsier. Det er viktig at iveren etter å begrense kostnader ikke medfører at kutt i kvalitet og det tas snarveier, som igjen kan føre til inadekvat dimensjonering og prosjektering. Dette kan ha medfølgende konsekvenser for helse-, miljø- og verdisikkerhet. Ved en gjennomgang av fraviksanalysene for Sørhauggata 100 og Moholt 50|50, er det tydelig at det er lagt ned betydelig mer ressurser ned i analysene for Moholt 50|50 og kompensierende tiltak sammenlignet med Sørhauggata 100. Et eksempel på dette er fullskala testingen hvor hybelenheter ble forsøkt antent både med og uten påvirkning av sprinkleranlegg. Dette er grundige, unike og kostbare tester som igjen er benyttet som referanse for andre aktører som ønsker å bygge i massivtre.

Eurokode 5 også kalt NS-EN 1995-1-2 sin nominelle forkullingsrate på 0,65 mm/min er mer representativ for bygningsdeler som er branttestet for seg selv. Når det derimot gjøres fullskala tester vil både temperaturer i rommet, samt forkullingshastigheten avvike fra de dimensjonerende verdiene fra denne godkjente standarden. Dette understreker viktigheten av behovet for å vurdere hvordan dimensjonerende verdier i standarder er utarbeidet og samtidig være kritisk til disse når de benyttes for å dokumentere sikkerhetsnivå for slike høye massivtrebygg.

Fullskaletestene for Moholt 50|50 medførte at tykkelsen på dekke mellom etasjene ble økt med 40% samt brannbeskyttet med gips. Dersom dimensjoneringen kun hadde vært utført basert på Eurokode 5, kunne dette medført at dekkene mellom etasjene ville blitt underdimensjonert og da ikke kunne motstått den brannpåkjenningen hele bygget var prosjektert for. Dette viser at det fortsatt er forbedringspotensiale når det gjelder standardisering og testing av bygningsdeler i massivtre med tanke på forventet brannmotstand.

Det kan være vanskelig å velge treffende og aktuelle dimensjonerende scenarier ettersom det i dag er svært lite erfaring og dokumentasjon rundt store brannforløp i høye massivtrebygg. Samtidig regnes trevirke som et forutsigbart materiale med tanke på hvordan det vil oppføre seg i en brann. Den kunnskapen vi har om hvordan vanlig trevirke brenner kan ikke overføres direkte og sidestilles med

hvordan massivtre brenner da det fremkommer at den lagvise oppbyggingen sammen med lim kan føre til en noe annerledes brannutvikling, spesielt med hensyn til faktorer som delaminering og secondary flashover. Manglende kunnskap om branner i massivtre kan føre til overkompensering av sikkerhetstiltak som igjen vil gjenspeiles i høyere byggekostnader. Samtidig kan likevel disse ekstra kostnadene over tid medføre at man ser nødvendigheten av å utvikle nye og mer kosteffektive løsninger for fremtiden.

De kompensierende tiltakene i Moholt 50|50 er av større kompleksitet enn de som er benyttet i Sørhauggata 100. Tiltak som lekting bak fasade i horisontal og vertikal retning sammen med Rockwool er fremtidsrettede løsninger som i betydelig grad reduserer risiko for brannspredning bak fasade. En god del av sikkerhetsdokumentasjonen for Moholt 50|50 baseres på et operativt sprinkleranlegg. Her er det kompensert grundig med implementering av flere separate sprinkelsystemer. Systemene er konstruert slik at kun 2 etasjer om gangen er tilkoblet samme sprinklersystem. Dette medfører at risikoen for at hele sprinkleranlegget ikke vil være operativt blir redusert betraktelig. Dette innebærer at det er 5 uavhengige sprinklersystemer per blokk som igjen vil gjenspeiles i kostnadene. Effekten av sprinkleranlegg og viktigheten rundt aktiv slokkeinnsats som et tillegg understrekes tydelig i fullskalatestene i kapittel 4.3. Fullskalatesten gjort for Moholt 50|50 med forsøk uten aktivert sprinkleranlegg legger grunnlaget for at kostnadene rundt ett operasjonssikkert sprinkleranlegg er en nødvendighet for å kunne opprettholde et tilfredsstillende verdisikkerhetsnivå. Andre kompensierende brannsikringstiltak tiltak vil mest sannsynlig ikke på langt nær ha like god kost/nytte verdi.

6.3 Branntekniske utfordringer

Eurokode 5 skiller ikke mellom verdier for limtre og massivtre når det gjelder nominell forkullingsrate. Den er 0,65 for begge. Dette er en gjennomsnittlig verdi. Problemet med dette er at forkullingsraten ikke er konstant når det gjelder innbrenning i limtre og massivtre. Den er raskere i starten av en brann og kan være godt over 0,65 mm/min, når det isolerende kullet enda ikke har blitt etablert. En korrelasjon mellom tykkelse på det isolerende kullet og hastighet på forkullingsjikt kan være interessant å se på for å mer presist vurdere brannmostanden til massivtrevegger, når det gjelder forventet tid til flammegjennomtrening, eller tid til svikt i lastbærende evne.

Det er påvist at hvilken limtype som benyttes har påvirkning på brannforløp, med tanke evne til å motstå på temperaturpåkjenning, delaminering og secondary flashover. Denne variabelen burde utredes mer.

Mye av sikkerhetsdokumentasjonen baseres på aktiv slokkeinnsats, og bruk av massivtre vil kunne bidra med økt tilførsel av brannenergi som må kompenseres for, samt lengre brannforløp. Standarden NS-INSTA 12845 sitt økte krav til vannmengde sammenlignet med NS-EN 900-1 er i seg selv ikke et kompensierende tiltak, da det ikke er vannmengde i seg selv som har slukkende effekt, men heller mengde vann som fordampes som vil si noe for slokkeeffektivitet. Løsninger til anleggets pålitelighet vil være av større betydning, da sprinkleranlegg operer med en pålitelighet på sprinklerhodene på mellom 80-95%.

Den varmeisolerende effekten av kullag for det bakenforliggende trevirket gjelder bare så lenge integriteten er intakt. Ved turbulente branner spesielt vil som regel dette kullet falle av i store flak og gjøre nytt friskt trevirke tilgjengelig. Faktorer som påvirker tid til nedfall kan være lamelltykkelse, limtype

og konfigurasjon, og bør derfor undersøkes nærmere da økt kunnskap om dette kan bidra til å utnytte den isolerende effekten til kullaget i større grad.

Erfaring rundt bygging av store konstruksjoner i massivtre er på et relativt tidlig stadie, sammenlignet med de kunnskaper man har om tilsvarende bygg i stål og betong. Konkurransen og ambisjonene om å bygge størst kan være en pådriver for utvikling av løsninger knyttet til brannsikkerhet for massivtrebygg. Samtidig kan det reises spørsmål om dagens løsninger for konstruksjon av massivtrebygg er godt nok utviklet for å kunne bygge tilsvarende høyhus i stål og betong. Det bør vises varsomhet slik at konkurransen og prestisjen i det å bygge størst i tre, ikke overgår hva som er akseptabelt med tanke på brannsikkerhet for slike konstruksjoner.

Mangel på erfaring med reelle branner i høyhus av massivtrebygg kan svekke utarbeiding av dimensjonerende scenarier som kan tenkes for slike konstruksjoner. Erfaring og kunnskap fra branner i høyhus av stål og betong er ikke nødvendigvis direkte overførbare til dimensjoneringen av sikkerhetstiltak mot eventuelle branner høye massivtrebygg.

Standardisering av gjennomføringer og skjøter sammen med validering av testmetoder i små og storskalas gyldighetsområder må utredes ettersom dette ennå ikke er validert. Både skjøting og gjennomføringer er nødvendige når det skal bygges stort, og dette er svake punkter med tanke på røyk- og flammespredning.

Tester gjort på limtresøyler viser at disse er svært bestandig mot brannpåvirkning over lengre tid. At disse skal være dimensjonert for å kunne motstå et fullstendig brannforløp er et av de viktigste punktene når det gjelder verdisikkerheten til et stort trebygg. På en annen side er det også påvist at slike søyler vil gløde og brenne, selv lenge etter at brannpåvirkningen er avsluttet. Dermed kreves det aktiv innsats for å slukke branner fullstendig. En mangelfull definisjon på hva et fullstendig brannforløp er gir rom for fortolkning på hva dette forløpet innebærer. Dette fremheves i forskningsrapporten knyttet til testing av fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner beskrevet i kapittel 4.1. Dersom et regelverk kan tolkes i flere retninger vil dette medføre inkonsekvent prosjektering og dette kan igjen kan medføre at det enkelt kan avvikes fra god byggeskikk. Dette kan overføres til sikkerhetsnivået i konstruksjonen, og kan innebære en problematisk retning i utviklingen av massivtrebygg.

Det stilles krav til at blant annet bæresystem i brannklasse 3 skal kunne motstå et fullstendig brannforløp slik det kan modelleres. Avkjølingsfasen i ett fullstendig brannforløp er ikke definert når det gjelder branntesting av bygningsdeler. Dette kan føre til at materialer prøves med metoder hvor effekter og påkjenninger som ville vært relevante i realistiske scenarier blir neglisjert når bygningsdelen testes for brannmotstand. En kan derfor hevde at gjeldende teststandarder som ISO 834 og ASTM E119 ikke er fullverdig tilpasset regelverket.

7 Konklusjon

I denne oppgaven konkluderes det at dagens veiledning til aktuelle forskrifter ikke er godt nok tilpasset en fremtidsrettet utvikling innen effektiv prosjektering av høye massivtrebygg. Dette bidrar til at utviklingen av løsninger for store massivtrebygg kan bli forsinket. Det kan gjøres flere forbedringer i veiledningen til forskriftene og tilhørende standarder som til sammen kan bidra til en mer effektiv og konsis prosjektering og dimensjonering av slike bygg.

Den preaksepterte ytelsen som omhandler krav til bæreevne og stabilitet i bæresystem for brannklasse 3, er i dag uopnåelig med bæresystem i tre da dette må være ubrennbar klasse A2. Formuleringen i funksjonskravet om at bærende konstruksjon skal kunne stå gjennom et fullstendig brannforløp bør omformuleres dersom det skal insentiveres å konstruere oftere og større i tre. Det kan gjøres omfattende reduksjon av CO₂ dersom en større andel av høyhus konstrueres i massivtre. Globalt står byggebransjen for 30% av klimagassutslippene, en større andel enn både transport og industri. Produksjon av massivtre har ett mer gunstig klimaregnskap enn, enn tilsvarende produksjon av stål og betong. Norge har mye skog og lange tradisjoner for bygging i trevirke. Bruk av kortreist massivtre kan bidra til utslippsreduksjon innen transportsektoren.

I dag ser det ut til at det hovedsakelig er private aktører som er ledende i å utvikle brannsikre løsninger. Disse løsningene skal legge grunnlaget for å bygge stadig høyere i massivtre. Det er viktig å tilpasse regelverket slik at det fremmer en bærekraftig og miljøgunstig utvikling med bruk av tre som byggemateriale. Dette bør skje så raskt som mulig ettersom Norge som nasjon har forpliktet til å kutte klimagassutslippene sine med 40% innen 2030.

8 Fremtidig arbeid

Ulike tresorter har blant annet ulike densitet og brennverdi. Det er mulig at valg av tresort kan være av betydning for forkullingshastighet, samt robustheten til et etablert kullsjikt med tanke på hvor lenge det kan holde seg på plass, før det faller av overflater. Hvor stor betydning har valg av tresort for brannmotstanden?

Effekten av ventilasjon som en faktor av åpninger, som vinduer og dører. Det bør kartlegges hvor mye brensel som blir produsert som en faktor i forhold til hvor mye luft som tilføres brannen? Hvor stor andel av brenselet antennes inne i rommet? Hvor mye antennes på utsiden, med mulighet til brannspredning til ytterkledning eller korridorer?

Store vannmengder kan forårsake råte og skade på trevirke. Utvikling og normalisering av slokkeløsninger basert vanntåke i stedet for tradisjonelt sprinkleranlegg vil redusere omfanget av vannskader ved aktivering uten at det går på bekostning av slokkeeffekt.

Byggetendensene tyder på at det fremover vil bli satset på og bygget stadig høyere og mer komplekse massivtrebygg. Derfor vil det være viktig å tilpasse og modernisere regelverket slik et det vil være i samsvar med denne utviklingen.

9 Referanser

- [1] Wikipedia. «*Grenfell Tower Fire*». Hentet fra: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Grenfell_Tower_fire
- [2] Norsk Treteknisk institutt. Trefokus. «*Trevirkets oppbygging og egenskaper*». 2007. Hentet fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/40-Trevirkets-oppbygging-og-egenskaper.pdf>
- [3] Sintef Byggforskserien. «*520.205 Massive treelementer. Typer og bruksområde*»
- [4] Standard Norge. «*NS 3470-1:1999 Prosjektering av trekonstruksjoner - Beregnings- og konstruksjonsregler - Del 1: Allmenne regler*»
- [5] Vikingskipet. <https://vikingskipet.com/vare-anlegg/vikingskipet/tall-og-fakta/>
- [6] Norske Limtreprodusenters Forening, «*Limtreboka*», 2015.
https://www.moelven.com/globalassets/moelven-limtre/limtreboka_2015_el2.pdf
- [7] Binderholz, «*Binderholz CLT BBS*», 2019. Hentet fra:
<https://www.binderholz.com/en/basic-products/binderholz-clt-bbs/>
- [8] Norsk Treteknisk institutt, «*Trefokus. Opplevelse av trematerialer i innemiljø*», 2012. Hentet fra:
http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/Fokus_nr_54_JZ3zO.pdf
- [9] Statistisk Sentralbyrå, «*Utslipp til luft*». Hentet fra: <https://www.ssb.no/klimagassn/>
- [10] Andrea Costa, Marcus M. Keane, J. Ignacio Torrens Edward Corry, «*Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit*», 2012. Hentet fra:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191100691X>
- [11] D. Drysdale, «*An introduction to fire dynamics*», John Wiley & Sons, 2011.
- [12] *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggteknisk forskrift)*, 2017. Hentet fra:
<https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840>.
- [13] Espen Daaland Wormdahl, Kristian Hox, Anne Steen-Hansen, Greg Baker og Mette Kristin Ulfsnes, «*Brannsikkerhet i bygg med massivtre*», 2017. Hentet fra: https://dibk.no/globalassets/02.-om-oss/rapporter-og-publikasjoner/spfr-a16-20229-brannsikkerhet-i-bygg-med-massivtre_spfr-_2017.pdf
- [14] Norsk Treteknisk institutt, «*Trefokus – Tre og brann*», 2005. Hentet fra:
<http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-37.pdf>
- [15] Buchanan, A. H., «*Structural Design for Fire Safety*». John Wiley and Sons, Ltd. 2009
- [16] Lars Mytting, «*Hel Ved*», Kagge Forlag, 2011

- [17] Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering, EN 1995-1-2:2004.
- [18] 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.
- [19] A. Gunnarshaug og B. Schei. «Sammenheng mellom fuktighet i treverk og tiden til overtenning», Bacheloroppgave i sikkerhet, brannteknikk. Høgskolen Stord/Haugesund, 2016. Hentet fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2392511>
- [20] Birgit Ostman, Daniel Brandon, Hakan Frantzich. «Fire safety engineering in timber buildings». 2017.
- [21] Kristian Hox. «Branntest av massivtre», SP Fire Research AS, 2015. Hentet fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2015/spfr-a15101-branntest-av-massivtre.pdf>
- [22] Standard Norge. «NS-EN 12845:2015 Faste brannslukkesystemer - Automatiske sprinklersystemer - Dimensjonering, installering og vedlikehold». 2015
- [23] Standard Norge. «NS-INSTA 900-1:2009 Boligsprinkler. Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold». 2013.
- [24] Marty Ahrens, «US Experience with Sprinklers», NFPA, 2017. Hentet fra: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Suppression/ossprinklers.pdf>
- [25] Wikipedia. Sprinkleranlegg. Hentet fra: <https://no.wikipedia.org/wiki/Sprinkleranlegg>
- [26] Svein Heggebø. Hva er forskjellen på tørranlegg, glykolanlegg og våtanlegg». 2017. Hentet fra: <https://blogg.vb.no/proff/sprinkleranlegg-forskjellene-pa-torranlegg-glykolanlegg-og-vatanlegg>
- [27] Sintef Byggforsk. «550.361 Sprinkleranlegg». 2009. Hentet fra: <https://www-byggforsk-no.galanga.hvl.no/dokument/510/sprinkleranlegg>
- [28] Standard Norge. «NS-EN 1363-2:1999 Prøving av brannmotstand – Del2: Alternative prosedyrer og sikkerhetsprosedyrer».1999
- [29] Standard Norge. «NS-EN 13501:2018 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler». 2018
- [30] Sintef Byggforskserien. «520.320 Brannteknisk klassifisering og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter». 2017. Hentet fra: https://www-byggforsk-no.galanga.hvl.no/dokument/315/brannteknisk_klassifisering_og_dokumentasjon_av_bygningsdeler_og_byggeprodukter
- [31] Anne Steen-Hansen. «Dokumentasjon av brannegenskaper». Direktoratet for Byggkvalitet. 2014. Hentet fra: https://dibk.no/globalassets/brann-og-konstruksjoner/fagdag-2014/dokumentasjon-av-brannegenskaper_fagdag-dibk-25.09.2014.pdf
- [32] Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven), 2008. Hentet fra: https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71/KAPITTEL_1#KAPITTEL_1

- [33] Sintef Byggforskserien, «321.025 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av prosjektering, utførelse og kontroll – oversikt», 2013. Hentet fra: https://www-byggforsk.no/galanga.hvl.no/dokument/2998/brannsikkerhet_dokumentasjon_av_prosjektering_utfoerelse_og_kontroll_oversikt
- [34] *Byggesaksforskriften(SAK10)*, Hentet fra: <https://dibk.no/byggeregler/sak/>
- [35] *Veiledning til Byggteknisk forskrift(VTEK17)*, <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>
- [36] Direktoratet for byggkvalitet, «*Slik leser du TEK17*». Hentet fra: <https://dibk.no/byggereglene/alt-om-tek/slik-leser-du-tek17/>
- [37] Justis og beredskapsdepartementet, «*Brann og eksplosjonsvernloven*», 2002. Hentet fra: https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2002-06-14-20#KAPITTEL_1
- [38] Arbeids og sosialdepartementet, «*Internkontrollforskriften*», 1997. Hentet fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1996-12-06-1127>
- [39] Justis- og beredskapsdepartementet, «*Forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen*» 2002. Hentet fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-06-26-729>
- [40][41] Sintef Byggforskserien, «*520.387 Tilgjengelig rømningstid*» Hentet fra: https://www.byggforsk.no/dokument/2955/tilgjengelig_roemningstid_ved_brann
- [42] Nina K. Reitan, Kathinka L. Friquin, Ragni F. Mikalsen, «*Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger*», SP Fire Research AS, 2019.
- [43] Even Andersen, «*Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner*», Sweco, 2017.
- [44] X. Li, C. McGregor, A. Medina, X. Sun, D. Barber, and G. Hadjisophocleous, «*Real-scale fire tests on timber constructions*» presented at the World Conference on Timber Engineering, Vienna, Austria, 2016.
- [45] A. Bartlett, R. Hadden, L. Bisby, and B. Lane, «*Sectional Analysis of Cross-Laminated Timber as a Design for Fire Methodology*» presented at the 9th International Conference on Structures in Fire, USA, 2016.
- [46] M. Klippel, J. Schmid, and A. Frangi, «*Fire design of CLT*» in Proceedings of the Joint Conference of COST Actions FP1402 & FP1404 KTH Building Materials, Cross Laminated Timber—a Competitive Wood Product for Visionary and Fire Safe Buildings, 2016, pp. 101–122.
- [47] A. Frangi, G. Bochiccio, A. Ceccotti, and M. P. Lauroli, «*Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building*» presented at the 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Miyazaki, Japan, 2008.
- [48] A. R. Medina Hevia, «*Fire Resistance of Partially Protected Cross-Laminated Timber Rooms*» Masters in Engineering Thesis, Carleton University, Ottawa, Canada, 2014.
- [49] Kristian Hox, «*Branntest av massivtre sluttrapport*», SP Fire Research, 2015.

- [50] Laura Hasburgh, Keith Bourne, Perry Peralta, Phil Mitchell, Scott Schiff, Weichi Pang, «*Effect of adhesives and ply configuration on the fireperformance of southern pine cross-laminated timber*»
- [51] R. White and E. Nordheim, «*Charring rate of wood for ASTM E119 exposure*» Fire Technology, Bd. 28, Nr. 1, pp. 5-30, 1992.
- [52] R. White, «*Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members*», SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, 2008, pp. (4)346-366.
- [53] R. White, «*Fire resistance of exposed wood members*», 5th International Wood & Fire Safety Conference, Zvolen, Slovak Republic, 2004.
- [54] Jim Ford, «*A 15 Year Update on the Impact and Effectiveness of the Scottsdale Sprinkler Ordinance*», Scottsdale Fire department, 2001
- [55] Opplysningskontoret for automatiske slokkeanlegg, «*Flere boliger utstyres med sprinkleranlegg*». Hentet fra: <http://www.slokkeanlegg.no/Aktuelle-saker/Flere-boliger-utstyres-med-sprinkleranlegg>
- [56] Christian Sesseng, Karolina Storesund, Anne Steen-Hansen, «*Analyse av dødsbranner i Norge i perioden 2005-2014*», RISE Fire Research, 2017. Hentet fra: <https://risefr.no/media/publikasjoner/upload/2017/a17-20176-1-analyse-av-dodsbranner-i-norge-i-perioden-2005-2014.pdf>
- [57] Norges offentlige utredninger, «*Trygg hjemme*», 2012. Hentet fra: <https://www.regjeringen.no/contentassets/09f468441d8145f38659e7388a4a69d8/no/pdfs/nou201220120004000dddpdfs.pdf>
- [58] Daniel Johansen, Trygve Lennavik, «*Effekt av sprinkleranlegg i Scottsdale*», 2006. Hentet fra: <http://www.nblf.no/MineFiler/Dokumenter/Nyhet/NBLF%20STUDIERAPPORT%20-%20EFFEKT%20AV%20SPRINKLERANLEGG%20I%20SCOTTSDALE.pdf>
- [59] Bodil Aamnes Mostue, Jan P. Stensaas og Ragnar Wighus, «*Forventet effekt av faste, aktive slokkeanlegg- Boligsprinkler og vanntåke*», SINTEF rapport NBL A03105, 2003,
- [60] Bodil Aamnes Mostue, Jan P. Stensaas, «*Effekt av boligsprinkler i omsorgsboliger*», Sintef rapport NBL A02117, 2002.
- [61] Direktoratet for byggkvalitet. «*HO 2/98 temaveileder om brannalarmanlegg*», 1998
- [62] Standard Norge, «*BS PD 7974-7:2003 Application of fire safety engineering principle to the design of buildings- Part 7: Probabilistic risk assessment.* »
- [63] SINTEF Byggforskserien «*520.385 Nødvendig rømningstid ved brann*»
- [64] Direktoratet for byggkvalitet «*HO-3/2000 temaveileder Røykventilasjon*», 2000
- [65]. Abrahamson, Marcus, «*Scenariotenkande vid brandsyn i samlingslokaler Institutionen för Brandteknik*», Lunds universitet, 1997.

[66] Harald Nordbakken, *Sørhauggata 100*, 2016. Hentet fra: <https://www.h-avis.no/arkitektur/utstilling/haugesund/studentboligene-til-venezia/s/5-62-242614>

[67] *Moholt 50/50*. Hentet fra: <https://mdh.no/project/moholt-student-housing-towers/>

[68] Justis- og beredskapsdepartementet, «*Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver (Brann- og eksplosjonsvernloven)*», 2002.

[69] F. Nystedt, «*Verifying Fire Safety Design in Sprinkled Buildings*» Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund, Sverige, 2011. og J. R. Hall, «U.S. EXPERIENCE WITH SPRINKLERS AND OTHER AUTOMATIC FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT,» NFPA, 2010.

[70] Q Rådgivning, «*Studentboliger, Sørhauggata 100*», 2014

[71] Rambøll, «*Moholt 50/50 – Brannteknisk risikovurdering*», 2015

[72] C. Dagenais, R. H. White and K. Sumathipala, «CLT Handbook (US Edition) Chapter 8 - Fire Performance of Cross-Laminated Timber Elements», FPIInnovations, 2013.

[73] Nystedt, Fredrik, «*Verifying fire safety design in sprinkled buildings*», Report 3150, Department of fire safety engineering and systems safety, Lund University, Sweden, 2011.

[74] Standard Norge, «*NS 3901 Risikovurdering av brann i byggverk*», 2012