



Høgskulen på Vestlandet

Master Thesis

ING5002

Predefinert informasjon

Startdato:	24-05-2018 10:33	Termin:	2018 VÅR
Sluttdato:	01-06-2018 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Masteroppgave		
SIS-kode:	203 ING5002 1 MOPPG 2018 VÅR		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Navn:	Marianne Rønquist
Kandidatnr.:	10
HVL-id:	123809@hvl.no

Informasjon fra deltaker

Tittel *:	Brann tekniske utfordringer og kompenserende tiltak i høye trehus		
Engelsk tittel *:	Fire Safety Challenges and compensating measures in tall timber buildings		
Tro- og lovetilsvarende *:	Ja	Inneholder besvarelsen konfidensiell materiale?:	Nei
Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:	Ja		

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min *

Ja

BRANNTEKNISKE UTFORDRINGER OG KOMPENSERENDE TILTAK I HØYE TREHUS



Marianne Rønquist
Høgskulen på Vestlandet
Masteroppgave i Brannsikkerhet


Trondheim
Mai 2018



Høgskulen
på Vestlandet

**BRANNTEKNISKE UTFORDRINGER OG
KOMPENSERENDE TILTAK I HØYE TREHUS**

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Marianne Rønquist	Forfatter sign. 
Oppgaven uttatt: Høst 2017	Åpen oppgave
Veileder: Stefan Andersson	
Stikkord: Trehus, massivtre, limtre, forkulling, brannforløp, delaminering, regelverk, kompenserende tiltak	Antall sider: 131 Trondheim, 25.05.2018 Sted/Dato/År
Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.	

Sammendrag

De senere års utvikling av massive trekonstruksjoner gjør det mulig å bygge stadig høyere bygninger i tre. Spesielt bidrar fordeler med hensyn til miljø og inn klima til at massivtre benyttes mer og mer som byggemateriale. Massivtreelementer består av flere lag med trelameller, normalt limt sammen, lagt 90 grader mot hverandre. Tre er et brennbart materiale, som brenner stabilt og forutsigbart, og som fra utsiden vil forkalles ved eksponering mot brann.

Det bygges høye trehus i mange land, og de to høyeste, som vil ferdigstilles i 2019 i Norge og i 2018 i Østerrike, vil være på ca. 84 meter. Oppgaven tar for seg seks ulike bygg som er oppført eller under oppføring i fire ulike land, samt hvilke regelverk og krav som er gjeldende for høye trehus i disse og andre sammenlignbare land.

Brannteknisk dimensjonering av bærende trekonstruksjoner utføres i Europa i henhold til Eurokode 5. Standarden angir parametre for blant annet forkullingsrate, men er ikke egnet for å benyttes til byggverk med eksponerte massivtrekonstruksjoner, blant annet fordi metoder angitt i standarden forutsetter at en brann vil avta og slokke av seg selv. I mangel av en gyldig standard, blir Eurokode 5 likevel lagt til grunn.

De største massivtreprodusentene benytter lim som delaminerer ved høye temperaturer. Ikke bare gir dette en høyere forkullingsrate, men etter hvert som lagene forkuller og faller av, vil elementene gi et nytt friskt lag med tre, som gir et større bidrag til brannen og også flere stadier med overtenning. Dette limet benyttes til tross for at det ikke er gode grunner til å ikke bytte det ut med lim som tåler tilstrekkelig temperatur for å unngå dette. Utfordringene med massivtre er ikke nødvendigvis aktuelle kun for høye byggverk, men høyden gjør at konsekvensen ved brann kan bli langt større.

En brann i et rom med eksponerte massivtrekonstruksjoner vil medføre økt brannenergi, og det er i flere branntester påvist at en større del av forbrenningen foregår på utsiden av åpninger. Dette påvirker utvendig brannspredning, og vil kunne gi raskere antennelse av brennbare materialer på innsiden av vindu i etasjen over.

Det er store forskjeller i brannsikkerhetsstrategien i de byggene som er gjennomgått. Brock Commons i Canada er bygget med 18 etasjer i massivtrekonstruksjoner, hvor disse er beskyttet med gips som tåler to-tre timers branneksponeering.

Ved HoHo i Østerrike bygges det 24 etasjer med eksponerte massivtrekonstruksjoner og med sprinkleranlegg. Ved Dalston Lane i London er sprinkler utelatt, fordi alle massivtrekonstruksjoner er kledd inn med gips. I Norge ligger sikkerhetsnivået et sted midt imellom, ved at omfanget av eksponerte trekonstruksjoner begrenses og at byggene sprinkles med økte pålitelighetstiltak.

De fleste undersøkte lands regelverk er basert på funksjonskrav med preaksepterte ytelser som kan fravikes, tilsvarende som i Norge. Funksjonskravene er svært generelle, og av de undersøkte landene er det kun i Norge det stilles krav til at bæresystem i høye bygninger skal kunne stå gjennom et fullstendig brannforløp. Flere land har heller ikke preaksepterte ytelseskrav om ubrennbare materialer for bæresystem og branncellebegrensende konstruksjoner.

De mest brukte kompenserende tiltakene som er benyttet i disse byggene er gjennomgått og vurdert hver for seg. Disse tiltakene omfatter sprinkleranlegg, innkledning med gips, økt brannmotstand på bærende konstruksjoner, beskyttelse med brannmaling og brannimpregnering, hulromsventiler og økt krav til kjølesoner.

Det er ikke mulig å si at funksjonskravet i Byggteknisk forskrift, som angir at bæresystemet skal stå gjennom et fullstendig brannforløp, ivaretas når byggverkene har stor grad av eksponerte massivtrekonstruksjoner. Sprinkleranlegg legges i stor grad til grunn for å dokumentere brannsikkerheten i bygget, men konsekvensen av sprinklersvikt er stor. Pålitelighetsdata for sprinkler varierer stort, og det er ikke gitt at anlegget fungerer som det skal, når det skal. Brannvesenets slokkeinnsats blir derfor nødvendig å legge til grunn.

Et riktig sikkerhetsnivå for et byggverk med over åtte etasjer i massivtre bør inkludere sprinkler iht. standardens Tillegg F, innkledning med gips som tilsvarer minst 1-2 timer, kjølesoner 1:1, og oppdeling av hulrom bak kledning. Tilstrekkelig beskyttelse med gips bør vurderes i hvert tilfelle, for eksempel ved hjelp av ekvivalent branneksponeeringstid. Synlig massivtre bør kun aksepteres etter en grundig vurdering basert på plassering i bygget og i et svært begrenset omfang.

Det er gjort, og pågår mye forskning på brann i forbindelse med massivtrekonstruksjoner. Likevel er mangelen på kunnskap om brannsikkerhet i høye trehus stor, først og fremst fordi vi mangler erfaring fra virkelige branner. Først når flere branner har inntruffet kan vi med sikkerhet vite om det er trygt å bygge så høyt som det gjøres med brennbare trekonstruksjoner. Fram til vi får denne erfaringen, må det prosjekteres med gode sikkerhetsmarginer.

Abstract

The recent development of massive wood structures makes it possible to build taller buildings of timber than ever before. Particularly advantages in terms of the environment and indoor climate contribute to the increased use of more and more CLT (cross laminated timber) as building material. CLT consists of several layers of wood, usually glued together, laid 90 degrees against each other. Wood is a combustible material that burns stably and predictably, and which from the outside will be charred by exposure to fire.

Tall timber buildings are built in many countries, and the two tallest ones, which will be completed in 2019 in Norway and in 2018 in Austria, are said to be around 84 meters tall. This thesis involves six different buildings that are completed or under construction in four different countries, as well as the regulations and requirements that apply to tall timber buildings in these and other comparable countries.

Dimensioning of load-bearing timber structures in case of fire, is in Europe carried out according to Eurocode 5. The standard sets parameters for, for example charring rate, but is not suitable for use with structures with CLT, among other things because methods specified in the standard require the fire to decay and quench by itself. In the absence of a valid standard, Eurocode 5 is nevertheless being used.

The largest producers of CLT use adhesives that make the element delaminate when exposed to higher temperatures. Not only does this give a higher charring rate, but as the layers cool and fall off, the elements will serve the fire with a new fresh layer of wood, which will make a bigger contribution to the fire and several stages of flashover. This adhesive is used even though there are no good reasons not to replace it with an adhesive that can withstand sufficient temperature to avoid delamination. The challenges with CLT in fires are not necessarily relevant only to tall buildings, but the height makes the possible consequences of fire more severe.

A fire in a room with exposed CLT will result in increased fire energy, and several fire tests have shown that a larger part of the combustion occurs on the outside of the openings. This affects external fire spread and will allow faster ignition of combustible materials inside the window of the floor above.

There are major differences in the fire safety strategy in the buildings under review. Brock Commons in Canada, an 18 storey building, has been built with CLT, where they are protected by gypsum plasters that can withstand two-three hours of fire exposure.

HoHo in Austria, a 24 storey building, will when finished have exposed CLT in most of the building, and will be equipped with sprinklers. At Dalston Lane in London sprinklers are omitted, because all CLT are covered by gypsum. In Norway, the level of safety is somewhere in the middle, by limiting the amount of exposed wooden structures and sprinkling the buildings with increased reliability measures.

Most countries' regulations are based on performance requirements with acceptable solutions that can be deviated from, as in Norway. Performance requirements are very general, and, of the countries surveyed, it is only in Norway that it is required that the load-bearing structures should be able to resist burnout. The acceptable solutions in most countries do not require non-combustible materials.

The most used compensatory measures used in the buildings surveyed have been reviewed and considered separately. These measures include sprinkler systems, encapsulation, increased fire resistance of load-bearing structures, fire protection and fire impregnation of lining, vents with fire stop and vertical separation distance of openings.

It is not possible to claim that the performance requirement, which states that the load-bearing structure must resist burnout, is fulfilled, when the building has a considerable share of exposed CLT. Sprinklers are largely used for verifying an acceptable level of fire safety in the building, but the consequences of sprinkler failure could be enormous. Reliability data for sprinklers vary greatly, and it is not given that the system works as needed, when needed. The fire department's effort is therefore necessary to take into consideration.

An acceptable level of safety for a building with more than eight floors in CLT should include sprinklers in accordance with the standard's Annex F, encapsulation with gypsum plasters that corresponds to a fire resistance of at least 1-2 hours, vertical separation distance 1:1, and vents with fire stop. Sufficient encapsulation should be considered in each case, for example by using equivalent time of fire exposure. Exposed CLT should only be accepted after a thorough assessment based on location in the building and only to a very limited extent.

A lot of research on fire and CLT is both on-going and has been completed. Nevertheless, the lack of knowledge about fire safety in tall timber buildings is extensive, primarily because of the lack of experience from real fires. Only when real fires have occurred can we know for sure whether it is safe to build as high as it is done with combustible wood structures. Until we get this experience, safety margins must be implemented.

Forord

Oppgaven omfatter 60 studiepoeng og andre året ved studiet Master i Brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet i Haugesund (HVL). Studiet har vært lærerikt hele veien, og jeg ser stor nytte i å gjennomføre dette etter en del år i arbeid som brannrådgiver. Jeg tror at jeg har fått større utbytte av studiene ved å ta det i denne rekkefølgen.

Valg av oppgave er påvirket av mitt yrke og erfaring som brannrådgiver, og det var en viktig forutsetning at jeg både skulle få brukt min kompetanse i oppgaven, og at jeg skulle lære noe av oppgaven som ville være relevant for mitt yrke. Tema for oppgaven ble valgt i samråd med Anne Steen-Hansen ved RISE Fire Research og Kathinka Leikanger Friquin ved Sintef Byggforsk, som også har bidratt med gode innspill.

Med en stor økning av massivtreprosjekter og viktigheten av å kunne synliggjøre brannteknisk kompetanse innenfor massivtre og trekonstruksjoner, ble dette til slutt et veldig enkelt valg.

Stefan Andersson har vært intern veileder ved HVL. Gode kollegaer innen flere fagdisipliner i Norconsult AS har bidratt med faglige innspill og gode, konstruktive diskusjoner. Rambøll i Trondheim har bidratt med å dele erfaringer med massivtreprosjekt, blant annet i forbindelse med Moholt 50/50. Håvard Frengen har bidratt med sprinklerkompetanse. Alle bidrag har vært veldig nyttig, og jeg takker for all god hjelp underveis.

Å kombinere fulltidsstudier og full jobb med ansvaret for branngruppa i Norconsult AS i Trondheim har vært hardt arbeid. Jeg vil takke mine nærmeste kollegaer og venner for at de har vært tålmodige med meg i disse to årene. Takk til Nina Eklo Kjesbu, som har lest korrektur på oppgaven. Takk også til arbeidsgiver Norconsult AS, som hjalp meg med å gjøre dette mulig, og hadde tro på at jeg kunne gjennomføre.

Trondheim

25.05.2018

Marianne Rønquist

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	I
Abstract	III
Forord	V
Bildetekstliste	VIII
Tabelliste	VIII
Definisjoner	IX
1. Introduksjon.....	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål for oppgaven	2
1.3 Metode	3
1.4 Omfang og begrensninger	4
2 Teoretisk grunnlag	5
2.1 Tre.....	5
2.1.1 Tre som byggemateriale.....	5
2.1.2 Hva er massivtre og limtre?.....	6
2.1.3 Krypning som følge av redusert fuktnivå	9
2.2 Brannteori	11
2.3 Tre og brann	17
2.3.1 Forkulling og nedbryting	17
2.3.2 Knutepunkt og sammenføyninger	21
2.3.3 Dimensjonering av bærende konstruksjoner iht. Eurokode 5	22
2.4 Branntekniske utfordringer med høye trehus	26
2.5 Refleksjon.....	32
3 Brannteknisk klassifisering av produkter og materialer.....	34
4 Regelverk	36
4.1 Historie	36
4.2 Regelverk i Norge	37
4.2.1 Plan- og bygningsloven, funksjonskrav og preaksepterte ytelser	37
4.2.2 Kompenserende tiltak.....	41
4.2.3 Brannteknisk prosjektering og kontroll av utførelse	44

4.3	Aktuelle funksjonskrav og veiledningskrav	45
4.3.1	Bæresystem	45
4.3.2	Branncellebegrensende konstruksjoner	46
4.3.3	Overflate/kledning	46
4.4	Regelverk i andre land	47
4.4.1	Canada	48
4.4.2	Østerrike	50
4.4.3	England	51
4.4.4	Australia	52
4.4.5	Sverige	53
4.4.6	USA	54
4.4.7	Andre land	55
4.5	Oppsummering/refleksjon	56
5	Casestudium	58
5.1	Overblikk	58
5.2	Brock Commons, Vancouver, Canada	60
5.3	Moholt 50/50, Trondheim, Norge	63
5.4	Treet, Bergen, Norge	66
5.5	Mjøstårnet, Brumunddal, Norge	69
5.6	HoHo, Wien, Østerrike	72
5.7	Dalston Lane, London, Storbritannia (Dalston Grove)	75
6	Vurdering av kompenserende tiltak	77
6.1	Slokkeanlegg	78
6.2	Innkledning med gips	86
6.3	Økt brannmotstand på bærende konstruksjoner	92
6.4	Beskyttelse med brannmaling og brannimpregnering	94
6.5	Hulromsventiler	98
6.6	Økt krav til kjølesoner	100
7	Diskusjon	105
8	Konklusjon	110
9	Fremtidig arbeid	112
10	Referanser	113

Bildetekstliste

Figur 1: Eksempel på massivtre (5)	7
Figur 2: Oppføring av Moholt 50/50	7
Figur 3: Limtre (7)	8
Figur 4: Fra Nardo skole, gliper mellom planker	9
Figur 5: Fra Nardo skole, gliper mellom elementer	10
Figur 6: Svartlamoen: Sprekker i veggelement.....	10
Figur 7: Svartlamoen: Glipe mellom to veggelementer	10
Figur 8: Brannutvikling inndelt i faser (16)	11
Figur 9: Brannkurver iht. ulike standarder (19)	15
Figur 10: De ulike lagene ved degradering av tre ved brannpåkjenning (20)	18
Figur 11: Tabell 3.1 fra Eurokode 5 (23), angir forkullingsrater	19
Figur 12: Eksempel på sammenføyninger som ikke krever brannbeskyttelse (9)	21
Figur 13: Eksempel på sammenføyninger som kan kreve brannbeskyttelse (9)	21
Figur 14: Testoppsett og resultater (25)	25
Figur 15: Effektive forkullingsdybder for ulike lamelltykkelser når delaminering er ivaretatt (9)	30
Figur 16: Hierarki for regelverket i Norge	37
Figur 17: Tabell risikoklasser	38
Figur 18: Tabell brannklasser	39
Figur 19: Sammenheng mellom kompenserende tiltak og sikkerhetsobjektet som fravikes (47)	42
Figur 20: Konseptbygget W350 i Tokyo, sammenlignet med noen av dagens høyeste trehus (73)	59
Figur 21: Brock Commons (75)	60
Figur 22: Moholt 50/50 (78)	63
Figur 23: Treet, Bergen (83)	66
Figur 24: Mjøstårnet (86)	69
Figur 25: Illustrasjon av HoHo Wien (90)	73
Figur 26: Illustrasjon av konstruksjonene i betong og tre (91).....	73
Figur 27: Dalston Lane, London (64)	75
Figur 28: Eksempel på hulromsventil og plassering i yttervegg (110)	98
Figur 29: Brann i leilighet i bygård i Oslo (112)	99
Figur 30: Brann i leilighet på Stathelle (113)	100
Figur 31: Varmestråling målt i ulike høyder over vindu ved ulik branneffekt (114)	102
Figur 32: Fasade Moholt 50/50 (115)	103

Tabelliste

Tabell 1: Vurderingskriterier for kompenserende tiltak (46)	43
Tabell 2: Beskyttelse av gips, basert på ulike kilder.....	89

Definisjoner

Kun begrep som ikke er forklart underveis i rapporten er forklart her. Kollegiet for brannfaglig terminologi (1) og NS 3901 er i hovedsak benyttet, men med noen tilpasninger til rapporten.

Aktivt tiltak	Teknisk brannsikringstiltak med en funksjon som aktiveres etter at brann er detektert, automatisk brannalarm er utløst eller brann er varslet
Antennelse	Starten av en forbrenning
Branneksponeringstid	Tiden for påkjenning mot konstruksjoner fra en brann
Brannenergi	Summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle faste og mobile brennbare materialer i et område
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
Fasadesprinkling	Sprinkleranlegg som har til hensikt å hindre brannsmitte fra nærliggende bygning, eller å hindre at brann i et nivå sprer seg til et høyere nivå
Flammespredning	Utbredelse av en flammefront
Forbrenningsrate	Masse av materiale som har brent per tidsenhet ved spesifiserte betingelser.
Forkullingsrate	Mål for hvor fort forkullingen beveger seg innover i treverket
Karakteristisk brannenergi	Beregnet brannenergi inkludert sikkerhetsfaktorer
Konduktivitet	Se varmeledningsevne
Konkalorimeter	Varmemåler, f. eks. til å bestemme et stoffs smelte-, fordampnings- eller forbrenningsvarme eller varmekapasitet
Mobil brannenergi	Flyttbart materiale i et område, som f. eks. inventar
Parametrisk brann	Brannkurve for et naturlig brannscenario, medregnet passive og/eller aktive tiltak (2)
Passivt tiltak	Teknisk tiltak som skal ha en dimensjonert funksjon for å bevare bæreevne, danne barriere eller hindre spredning av brann eller røyk
Preakseptert ytelse	Ytelse angitt av myndighet i veiledning til Byggteknisk forskrift, som vil oppfylle, eller bidra til å oppfylle, ett eller flere funksjonskrav i forskriften (3)
Pålitelighet	Sannsynlighet for at et system fungerer

Reaksjonstid	Summen av fortolkningstid og beslutningstid
Risiko	Uttrykk for kombinasjon av sannsynlighet for og konsekvens av en uønsket hendelse (3)
Røykplume	Oppadstigende blanding av røyk og luft fra en brann
Røykventilasjon	Tiltak for å fjerne røyk, mekanisk eller ved å utnytte røykens termiske drivkrefter
Sannsynlighet	I hvilken grad det er trolig at en hendelse skal inntreffe (3)
Selvantenning	Antennelse av et stoff uten tilførsel av varme utenfra (selvoppvarming).
Spesifikk brannenergi	Brannenergi per arealenhet
Sårbarhet	Manglende evne hos et analyseobjekt til å motstå virkninger av en uønsket hendelse og til å gjenopprette sin opprinnelige tilstand eller funksjon etter en hendelse (3)
Tetthet	Massen av en mengde av et stoff delt på volumet av stoffmengden
Tiltaksklasse	Inndeling av oppgaver i tiltaket basert på vanskelighetsgrad, kompleksitet og konsekvenser av mangler og feil
Tredjepartskontroll	Kontroll utført av et annet, uavhengig foretak
Trykksetting	Etablering av overtrykk i en del av et byggverk, f. eks. trapperom, for å hindre tilsig av røyk fra omliggende areal
Varmefluks	Mengde varmeenergi avgitt, transmittert eller mottatt per arealenhet og per tidsenhet.
Varmekapasitet	Mengde varmeenergi som kreves for å øke temperaturen til et objekt med én kelvin.
Varmeledningsevne	Evnen et stoff har til å transportere varmeenergi
Varmestråling	Overføring av varme ved elektromagnetisk stråling
Varmetapsrate	Varmemengde som avgis per tidsenhet ved forbrenning av et materiale under angitte prøvingsbetingelser

1. Introduksjon

Det bygges høye trehus i flere deler av verden, og Norge er et av foregangslandene i denne prosessen. Manglende kunnskap og erfaring kombinert med en rask utvikling i byggehøyde, medfører et stort behov for fokus og kompetanse innenfor brannsikkerhet. Oppgaven tar for seg flere av disse utfordringene, og hvordan kompenserende tiltak benyttes for å øke sikkerhetsnivået i trehus med mer enn åtte etasjer. Det er sett på hvilke branntekniske tiltak som er benyttet i flere høye trehus i ulike steder i verden og foretatt en vurdering av disse. Det er også sett på regelverket for brannsikkerheten i disse landene, og andre land som er relevant for bygging av høye trehus.

1.1 Bakgrunn

Mange land har lange tradisjoner med å bygge trehus, på grunn av god tilgang til tre som byggemateriale. Tidligere har det vært vanlig å bygge med tre som bindingsverk, men nye byggemetoder og mange fordeler ved disse har gjort at limtrekonstruksjoner og spesielt massivtre har blitt mer og mer aktuelt det siste tiåret.

Behovet for å bygge i høyden øker som følge av økt befolkning i byene. Kombinasjonen av økt fokus på miljø, og utviklingen av massive trekonstruksjoner som har lav vekt i forhold til styrke har ført til at det er mulig å bygge i høyden med trekonstruksjoner. Tre er fleksibelt, fornybart og bærekraftig, og er billigere å produsere enn andre materialer. Det er miljøvennlig og robust, og gir også bedre innelima. Et stort miljøfokus ved at det stadig stilles strengere krav til miljøvennlighet i både byggeprosess og levetid, har bidratt til å gi tre et stort konkurransefortrinn.

Byggherre kan stille et prosjektspesifikt krav til at bygget skal oppnå en viss sertifisering innenfor for eksempel BREEAM (miljøsertifisering) og/eller ZEB (klassifisering for nullutslipp). Ved bruk av massivtre vil dette gi et positivt utslag på de faktorene som berører materialbruk, noe som også har bidratt til den økte etterspørselen. Tre er også svært gunstig i forbindelse med klimagassberegninger, da det binder opp CO₂. Tre er lite energikrevende å framstille som byggemateriale og gir lavere utslipp enn andre byggematerialer. Det kan derfor regnes som nærmest klimanøytralt. Det er også enkelt å resirkulere og gjenbruke tre (4).

Massivtreelementer produseres på fabrikk, og settes sammen på byggeplass. Dette gir raskere byggetid, mindre støy, og mindre avfall på byggeplass. Den lave vekten kan medføre enklere fundamentering, noe som kan være en fordel ved dårlige grunnforhold. Fordelene med massivtre er mange, og det har gjort konstruksjonsmetoden svært populær. Dette medfører kapasitetsproblemer på leveranse fra norske produsenter, slik at mye av det som nå oppføres i Norge bygges med elementer som transporteres fra Østerrike. Dette gir en svært negativ effekt på miljøregnskapet for bygget. Andre ulemper er at det gir lav fleksibilitet i byggverket, da det ofte bygges med korte spenn og mange bærevegger. I tillegg vil ofte lydkrav medføre at det ikke er mulig å ha synlige massivtreelementer i et så stort omfang som ønskelig. Nettopp fordi tre er så lett, må det gjøres tiltak for at høye byggverk ikke skal svaie for mye i vinden. Dette løses ofte ved at deler av byggverket må oppføres i betong, som for eksempel etasjeskillere eller sjakter.

Oppføring av høyere bygninger i brennbare konstruksjoner medfører nye utfordringer med tanke på brannsikkerhet. Brennbare materialer i bærende og branncellebegrensende konstruksjoner, økt brannenergi og raskere brannutvikling er bare noen av elementene som påvirker brannsikkerheten negativt. Dette øker risiko for både beboere, brannvesenet og naboer. Preaksepterte ytelser i vårt regelverk i Norge tillater ikke å bygge mer enn fire etasjes høye trehus, uten at det gjøres en særskilt vurdering av brannrådgiver. Flere land har i de siste årene endret regelverket sitt, for å tillate høyere bygninger i tre, som en følge av alle fordelene dette gir. I Norge vurderes det fra DiBK (Direktoratet for Byggkvalitet) en økning til 6-8 etasjer i tunge trekonstruksjoner som en preakseptert løsning.

Til tross for at det tillates å bygge stadig høyere bygninger i tre, er mangelen på kunnskap stor. Det forskes rundt i verden på mange ulike forhold når det gjelder brann i trekonstruksjoner, men vi mangler erfaring fra virkelige branner i massivtrehus.

1.2 Mål for oppgaven

Målet for oppgaven er å belyse branntekniske problemstillinger/utfordringer og å se på hva som er gjort i flere ulike bygg i ulike land. De kompensierende tiltakene som er lagt til grunn i disse byggene vurderes hver for seg og samlet, for å vurdere om sikkerheten i høye trehus er ivaretatt, med hensyn til de fravik fra preaksepterte løsninger og utfordringer som byggene medfører.

1.3 Metode

Arbeidet med oppgaven har vært delt opp i tre faser:

Det er først utført et litteraturstudium, for å finne ut av hva som foreligger av forskningsrapporter, testrapporter og dokumentasjon i forbindelse med brann og massive trekonstruksjoner, og også hva som foreligger av dokumentasjon av brannsikkerhet i høye trehus.

Det er foretatt en gjennomgang av regelverket, både i Norge og i andre land hvor det bygges høye trehus. Kravene som framkommer og er relevante for dette er sammenlignet og vurdert. Det er sett på flere høye trebygninger, både byggeprosjekt under oppføring og ferdigstilte byggverk, i Norge og i utlandet. Fra disse er det sett på hvilke kompenserende tiltak som er lagt til grunn, i hovedsak som følge av at bærende, branncellebegrensende og kledningskonstruksjoner er utført i tre.

De kompenserende tiltakene har videre blitt vurdert med hensyn til effekten de utgjør ved brann, sammenlignet med fraviket eller utfordringen det skal kompenseres for. Videre er det foretatt en vurdering av om dette vil være tilfredsstillende, ut i fra gjeldende regelverk i det respektive landet, og ut i fra et generelt sikkerhetsnivå.

På slutten av hvert kapittel er det tatt med en egen del med refleksjon, basert på innholdet i hvert enkelt tema, der dette er aktuelt. Diskusjonskapittelet omhandler forholdene ved utfordringer og kompenserende tiltak i høye trehus sett i et helhetlig perspektiv.

1.4 Omfang og begrensninger

Oppgaven tar for seg branntekniske utfordringer og kompenserende tiltak i høye trehus, og begrenser seg til bygg som er oppført eller er under oppføring, og som har over åtte etasjer. Det er valgt å se på flere tilfeller både nasjonalt og internasjonalt for å få en god oversikt og forståelse av hvilke kompenserende tiltak som benyttes av brannrådgivere. Det går i dybden på hvert av tiltakene og de vurderes med hensyn til funksjonen og effekten de har ved brann.

Oppgaven begrenser seg til tynge trekonstruksjoner. Det er spesielt fokusert på limte massivtrekonstruksjoner. Det er sett på kompenserende tiltak som er valgt i ulike bygninger for å ivareta et nødvendig sikkerhetsnivå i forbindelse med fravik fra preaksepterte løsninger. Det er ikke sett på hvordan fravikene dokumenteres i brannkonseptene.

Da det er mange utfordringer og problemstillinger å ta tak i, er det kun gått i dybden på de viktigste av disse, mens andre er beskrevet i mer begrenset grad. Branntekniske utfordringer med massivtre som går på sammenføring og branntetting av massivtreelementer er det lagt mindre vekt på i oppgaven. Det samme gjelder brann i byggefase. Det er valgt å ha størst fokus på utfordringer en brann kan medføre når massivtreelementer eksponeres i bruksfase, da det ofte er et ønske om å ha synlige trekonstruksjoner.

Automatisk slokkeanlegg er i en eller annen grad benyttet som kompenserende tiltak i de fleste av byggene det er sett på. Det er det mest komplekse tiltaket, samtidig som at det også er det tiltaket som har størst effekt ved brann, og som vil gi størst konsekvens ved svikt. Det er derfor gjort et mer omfattende arbeid vedrørende sprinkleranlegg, enn det er gjort vedrørende de andre tiltakene.

Større mengde brennbart materiale vil også generere røyk. Røykspredning i høye bygninger kan medføre svært farlige forhold, da overtrykk og undertrykk i forskjellige høyder i bygget vil øke røykspredning via sjakter. Det er ikke fokusert på røykspredning i oppgaven.

2 Teoretisk grunnlag

Kapittelet gir grunnleggende informasjon om tre, brann og hvordan trekonstruksjoner påvirkes ved brann. Dette skal gi et grunnlag for å få en tilstrekkelig forståelse for arbeidet som er gjort videre i oppgaven.

2.1 Tre

2.1.1 Tre som byggemateriale

Tre består av i hovedsak av cellulose (ca. 40 %), hemicellulose (ca. 25 %), og ligning (20-30 %). I tillegg inneholder det forbindelser som harpiks, garvesyre, fett, etc. (5). Tre er oppbygd av flere sjikt, med lange celler som har som funksjon å stive av, og frakte væske. De forskjellige tresortene har ulik oppbygging og egenskaper, og egnethet til ulike byggematerialer varierer derfor (6).

Tre er fleksibelt, fornybart og bærekraftig, og er billigere å produsere enn stål og betong. Det er miljøvennlig og robust, og gir også bedre inn klima. Tre er lite energikrevende å framstille som byggemateriale og gir lavere utslipp enn andre byggematerialer. Tre binder CO₂ og kan regnes nærmest som klimanøytralt, til sammenligning med betongproduksjon, som slipper ut store CO₂-mengder. Det er også enkelt å resirkulere og gjenbruke tre (4).

I Norge er det lang tradisjon for bruk av tre som bygningsmateriale, blant annet på grunn av god styrke og stivhet i forhold til vekt. Det benyttes mest gran og furu. Ved 12 % fuktighet har gran en densitet på 470 kg/m³, mens furu er en hardere tresort med densitet på 520 kg/m³. Etter at treet har tørket og vannet i celleveggene har forsvunnet, vil trevirkets styrke øke (7). Tre har alltid vært lett tilgjengelig, og det har tidligere i hovedsak vært benyttet som stenderverk og som kledning, i tillegg til at det har vært benyttet som brennstoff i form av ved. Ulemper med tre som byggemateriale, er blant annet at det er brennbart, og det beveger seg ved endringer i fuktnivå.

Trevirkets varmekonduktivitet varierer med densitet, fuktinnhold og varmestrømmens retning i forhold til fiberretning. Konduktiviteten øker med økt densitet, og ved 12 % fukt vil den ved densitet 450 kg/m³ være 0,12 W/(mK), mens den for 700 kg/m³ vil være 0,18 W/(mK). Trevirke har en spesifikk varmekapasitet på 1 600 J/(kgK) (7).

2.1.2 Hva er massivtre og limtre?

Ved å benytte bygningsmaterialer som limtre og massivtre utnyttes treets egenskaper bedre. Massivtre er et komposittprodukt som består av flere lag med trelameller som er limt eller mekanisk innfestet til hverandre. Det skilles mellom kantstilte og krysslagte elementer. Kantstilte elementer er satt sammen av stående elementer, som er mekanisk innfestet med f. eks. skruer eller spiker. Krysslagte elementer har lameller som er lagt i kryss i forhold til hverandre, vanligvis 90 grader. Disse er normalt forbundet med lim eller tredybler. Paneltykkelsen varierer fra tre til ni lag, med en total tykkelse på 75 til 500 mm. Hvert lag kan ha en tykkelse på mellom 10 og 50 mm. De ulike sjiktene i elementene vil ha ulike styrker, og ofte er det et svakere sjikt i midten.

Massivtreelementene benyttes til lastbærende vegger og dekker og kan i dag fås med spenn på opptil 18 meter. Tresorter som benyttes er i stor grad gran, men også furu, osp, bjørk og eik (8). Limte massivtreelementer (som er det som er mest benyttet) produseres ved at det påføres lim mellom hvert lag før det neste laget legges på. Det kan også påføres lim på kantene mellom hvert bord, dette omtales som kantliming.

Elementene presses sammen under et visst trykk (ofte 120 psi) over en viss tid, ved hjelp av hydraulisk presse eller vakumpresse. Nødvendig trykk og herdetid avhenger av flere faktorer, blant annet type lim, treegenskaper, overflaten det skal limes på og toleranse som følge av tykkelse, hvordan limet påføres og nødvendig mengde lim. Tidligere var 60-120 minutter nødvendig, mens nyere metoder og limtyper kan redusere denne tiden (8), (9), (10). Ved 20 °C kan for eksempel elementer med lim av MUF (melaminureaformaldehyd) behøve en pressetid på 60 minutter, men tiden kan reduseres ytterligere dersom treet forvarmes til 25 °C. Elementer med PUR-lim (polyuretan) behøver en pressetid på 25-30 minutter avhengig av fuktighet, og det er nødvendig å påføre fukt i produksjonsprosessen ved bruk av PUR. Lim av EPI (emulsion polymer isocyanate) gir den korteste herdetiden, som kan være så kort som 15-30 minutter, avhengig av limfugetykkelse. Også tiden det tar å stable elementene i pressa påvirker valg av lim. Det er viktig at limet ikke herder så raskt at det herder før det er ferdig stablet og satt under trykk, og dette påvirkes også av antall lag det skal være i elementene som produseres. Elementer med flere lag tar lengre tid å stable. PUR-lim har den raskeste herdetiden (11), og dette vil være en problemstilling, siden limet herder raskt også uten tilført varme.

MUF-lim er ca. 2,5 ganger mer kostbart enn PUR-lim, men det kreves ca. 1,5 ganger større mengde MUF for å oppnå tilfredsstillende heft. Likevel vil altså PUR være dyrere.

Utviklingen av massivtreelementproduksjonen startet i Sveits og Østerrike og har senere spredt seg både til Norge og andre deler av verden, som Australia og Canada.

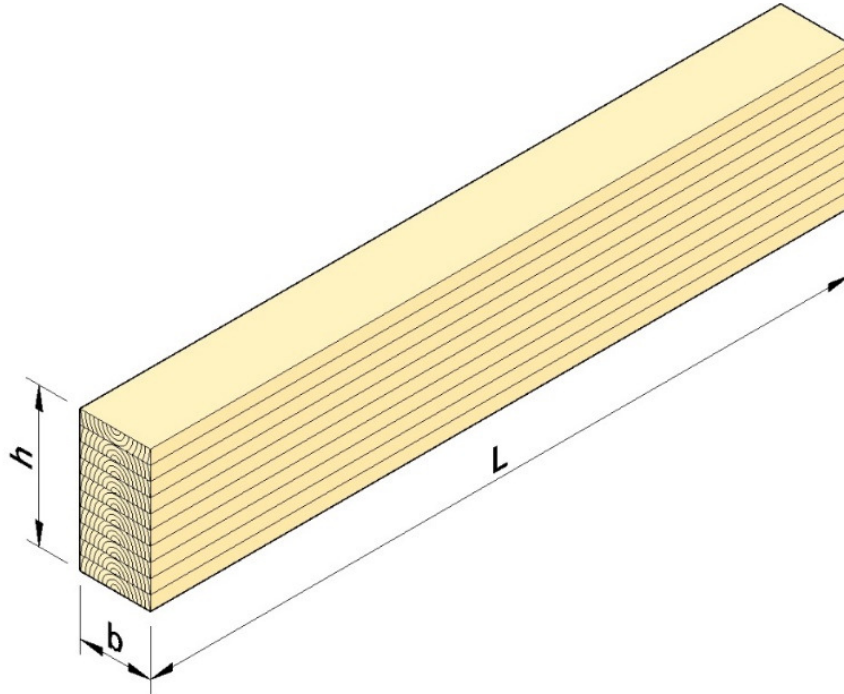
Massivtreelementene har lav vekt, og har også gode egenskaper for stivhet og styrke. De kan klare store punktlaster, da disse fordeles utover elementene. En av de store fordelene er at elementene kan bygges på forhånd, slik at montering på byggeplass går svært raskt. Dette gir også mindre støy og mindre avfall på byggeplassen. En ulempe er at bruk av massivtreelementer gir lav fleksibilitet, da de krever korte spenn og derfor er mest egnet for bygg med små og mellomstore rom. På grunn av lav kapasitet på produksjonen av massivtreelementer i Norge og Sverige, og den økte etterspørselen, må mesteparten av det som bygges i Norge i dag (og i andre deler av verden, som for eksempel Australia) fraktes fra Østerrike. Dette har stor innvirkning på miljøregnskapet, og mye av gevinsten forsvinner. Det er også utfordringer med hensyn til brannsikkerhet og akustikk. Derfor må ofte massivtreelementene kles inn. Eksempel på massivtre er vist i Figur 1. Figur 2 viser et eksempel fra oppføring av et massivtrebygg.



Figur 1: Eksempel på massivtre (5)



Figur 2: Oppføring av Moholt 50/50



Figur 3: Limtre (7)

For større bærekonstruksjoner må tre limes sammen i flere elementer, for å oppnå store nok spenn. Limtre er også et komposittprodukt, hvor flere lag med tre er limt eller mekanisk innfestet. Dette gjør at produktet er sterkere enn vanlig tre. Limtre benyttes til bærende søyler og bjelker, og det er i Norge vanligst å benytte gran eller furu, med 40-45 mm tykke lameller. Et eksempel på limtre er vist i Figur 3.

NS 3470-1 definerer limtre som «bærende komponent hvor tverrsnittet er bygd opp av minst fire lameller med tilnærmet parallell fiberretning som ved hjelp av lim har full statisk samvirke». Lim som benyttes til å holde sammen lamellene er vanligvis MUF og PUR. Limtre kan leveres med svært lange spenn, og er derfor et populært byggemateriale for takkonstruksjoner i store haller og i brukonstruksjoner (12).

2.1.3 Krymping som følge av redusert fuktnivå

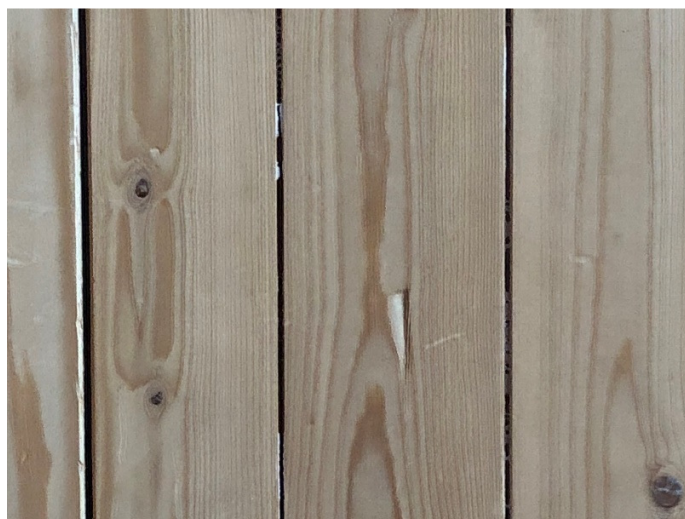
I høye bygninger vil krymping av tre være et viktig element, som følge av at fuktinnholdet i treet reduseres over tid før det stabiliserer seg. I et høyt byggverk vil krymp som akkumuleres utgjøre en langt større forskjell enn i et lavere bygg. Dette må ivaretas ved prosjektering, og må spesielt fokuseres på i byggverk hvor tre kombineres med betongkonstruksjoner, for eksempel med sjakter utført i betong. På grunn av forskjeller i fuktnivå i luften på vinter og sommer, vil også treet bevege på seg i løpet av året. Brannteknisk påvirkes dette ved at det oppstår sprekker i konstruksjonene.

Binderholz, som er største produsent av massivtreelementer i Europa, angir i sin produktdokumentasjon at fuktinnholdet stabiliseres ved rundt 8-10 % etter tre vintre. De beskriver at disse endringene kan føre til sprekker, men at disse ikke påvirker statiske egenskaper (13).

Iht. teknisk godkjenning for Martinsons KL-trä (14), som produseres av det norske firmaet Splitkon, angis følgende forventede verdier for fuktbevegelser:

- Lengderetning 0,01 %
- Bredderetning 0,03 %
- Tykkelsesendring 0,20 %

Nardo skole er et massivtrebygg i Trondheim som ble oppført i 2008. Befaring ble utført i april 2018. I elementene har det her oppstått gliper mellom skjøtene, og det ble ikke observert noen sprekker i treverket. Dette er vist i Figur 4 og Figur 5.



Figur 4: Fra Nardo skole, gliper mellom planker

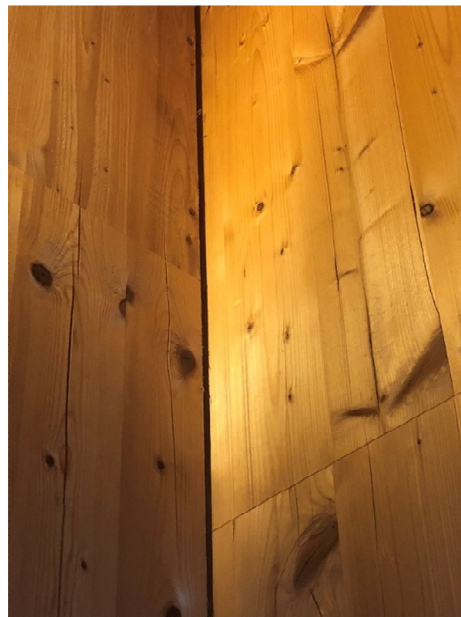


Figur 5: Fra Nardo skole, gliper mellom elementer

Det første «høye» massivtrebygget ble oppført i 2004 på Svartlamoen i Trondheim. Ved befaring i mars 2018 ble det observert sprekker i elementene i stort omfang, både i dekker og vegger. I tillegg var det gliper på inntil ca. 1 cm. mellom veggelementer og takelementer og to ulike veggelementer. Dette er vist i Figur 7. Det ble opplyst fra byggforvalter om at sprekken var kommet de første årene, og at det ikke hadde forverret seg den siste tiden. Årsaken til at elementene har sprukket opp på ulike måter, er at elementene på Svartlamoen er kantlimte, mens de ikke er det på Nardo skole. Ved krymping er limet mellom kantene så sterkt, at det også sprekker i treverket.



Figur 6: Svartlamoen: Sprekker i veggelement



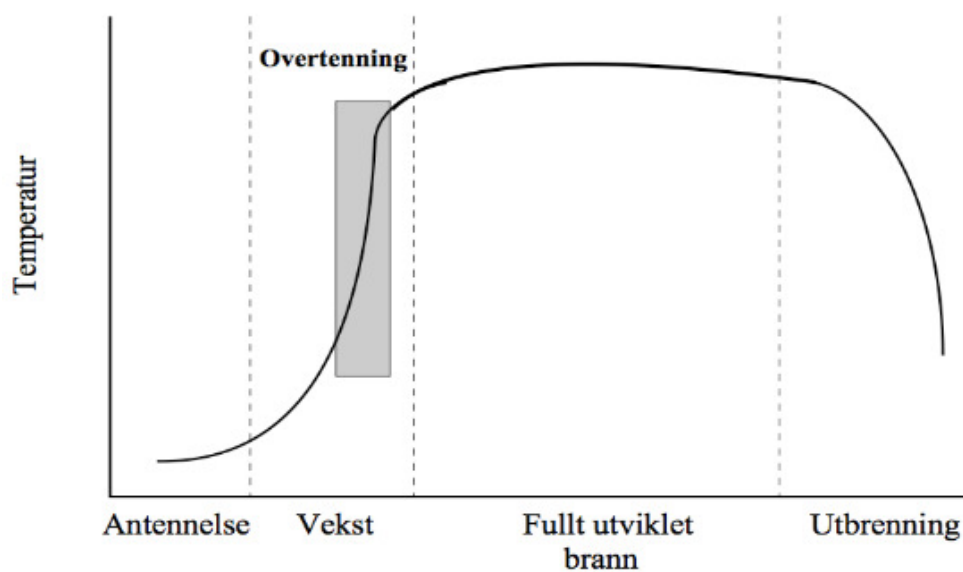
Figur 7: Svartlamoen: Glippe mellom to veggelementer

2.2 Brannteori

En brann kan defineres som en ikke-eksplosiv, varmeutviklende kjemisk reaksjon, mellom oksygen og brennbart materiale, normalt under dannelse av flammer og/eller glør, med eller uten røyk (15).

Brannforløp

Branner kan utvikle seg forskjellig, og rombrann er spesielt relevant i bygninger, da branner spres på en annen måte enn ved utvendig brann. En rombrann defineres som en fullt utviklet brann inne i et rom. En brann som får utvikle seg i et lukket rom og har tilstrekkelig med oksygen og brennstoff, vil normalt gjennomgå fire faser; antennelse, vekst, fullt utviklet brann, og utbrenning (nedkjølingsfase). Dette omtales som et fullstendig brannforløp og er illustrert i Figur 8.



Figur 8: Brannutvikling inndelt i faser (16)

Overtening er overgangen mellom vekst og fullt utviklet brann, og kjennetegnes ved at alle brennbare flater i rommet brenner, og flammer slår ut vinduer. Etter hvert som det dannes varme røygasser fra brannen, samler disse seg i et stadig tykkere røyklag oppunder taket. Overtening inntreffer som regel når temperaturen i røyklaget overstiger $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ og varmestrålingen fra røyklaget til gulv overstiger 20 kW/m^2 (16).

Etter antennelse og i begynnelsen av vekstfasen, vil brannen være brenselskontrollert. Det vil si at det er tilstrekkelig med oksygen i rommet. I en fullt utviklet brann vil den være ventilasjonskontrollert. Det vil da være nok brensel i rommet, men begrensning på oksygen gjør at ikke alle pyrolysegasser i rommet forbrenner (17).

Tiden fra antennelse til overtenning varierer som følge av mange ulike variabler, som f. eks. type, mengde, størrelse og plassering av antennelseskilde, geometri på rommet, mengde og type materialer, oksygentilgang, etc. I et bolighus er brannutviklingen ofte rask, og overtenning kan inntreffe i løpet av et par minutter etter antennelse.

Faktorer som påvirker overtenning

Rommets størrelse har stor innvirkning på tiden til overtenning. I et lite rom vil en brann medføre høye temperaturer og rask brannutvikling. I et større rom vil røyken blande seg med et større volum med kald luft, noe som gir økt røykfyllingstid, mindre stråling tilbake til brannen og dermed tregere brannvekst. I et større rom vil ulike deler av rommet kunne være i ulike faser av en brann. Mens én del av rommet kan ha gjennomgått fullt utviklet brann som har begynt å avta, kan en annen del fortsatt være i vekstfasen. Varmestrålingen fra røyklaget kan være høy akkurat der hvor brannen er plassert, mens lenger bort vil røyken være mer utblandet. Brannveksten vil styres av stråling mot nærliggende brennbare materialer, noe som gjør at plasseringen av disse har stor betydning. Høy takhøyde vil gi relativt lave temperaturer i røyklaget, men til gjengjeld vil det trekkes inn mer luft i røykplumen, noe som igjen generer mer røyk. I bygninger av massivtre er ofte branncellene små eller mellomstore.

Rommets åpninger avgjør brannens tilgang på oksygen. En brann i et rom uten vinduer eller åpne dører vil være ventilasjonskontrollert, og vil slokke av seg selv eller brenne med en svært treg hastighet. Geometrien på åpningene i rommet har stor betydning, dette gjelder både åpningenes størrelse, plassering og høyde. I starten av en brann, når den er brenselskontrollert, kan åpningen fungere som ventilering av røyk, avhengig av åpningens plassering. Dersom det er tilstrekkelig med oksygen i rommet til at en brann går til overtenning, vil ofte åpningenes effekt først inntre når vinduenes knuses som en effekt av høye temperaturer i rommet. Ved en ventilasjonskontrollert brann vil uforbrente gasser strekke seg ut av vindusåpninger og brenne på utsiden. Dette kan medføre brannspredning til overliggende etasjer.

Forbrenningsraten (hvor mye av et materiale eller væske som forbrennes) styres av åpningsfaktoren, som er definert ved

$$\dot{m} = A_0 \sqrt{H_0}$$

hvor A_0 er det samlede arealet av åpningene [m^2], og H_0 er åpningenes vektete høyde [m].

Forbrenningsraten angis i kg/s eller g/s .

Bygningsmaterialers innvirkning på brannen

Bygningsmaterialers egenskaper kan ha stor innvirkning på temperaturen i røyklaget, som igjen påvirker varmestrålingen tilbake til brannen, og til andre brennbare materialer i rommet. Materialer i vegger og tak som har høy isolasjonsevne, som for eksempel mineralull, vil oppta en del av energien i røyklaget. Dette medfører at temperaturen i røyklaget reduseres. Egenskapene i materialene som påvirker energioptaket er varmeledningsevnen, tettheten og varmekapasiteten. Sammen defineres disse egenskapene som materialets termiske treghet. Høy termisk treghet i vegg- og takkonstruksjoner gir lavere temperatur i røyklaget, som igjen gir en tregere brannutvikling (17). Tre har lavere termisk treghet enn for eksempel betong og gips, noe som reduserer tid til overtenning. Brennbar kledning på vegger og i himling i brannrommet kan gi svært rask brannvekst, og det er betydelig forskjell på om det er brennbar kledning kun på vegger eller også i himling. Ved branntester med brennbar kledning på vegg, og med og uten brennbar kledning i himling, ble rommet overtent etter henholdsvis fire og tolv minutter (17).

Nødvendig rømningstid er tiden det tar fra brannstart til personene i bygningen har kommet fram til sikkert sted. Tilgjengelig rømningstid ved brann er tiden det tar fra brannstart til tålegrenser med hensyn til varme- og røykutvikling blir kritiske (18). Tidlig fase i en brann vil være spesielt relevant for personsikkerheten. For å overleve er det derfor viktig å komme seg ut raskest mulig etter antennelse, mens brannen er i vekstfasen, og i god tid før overtenning. Bruk av brennbar kledning vil redusere den tilgjengelige rømningstiden og vil i hovedsak ha innvirkning på personsikkerheten for de som befinner seg i brannrommet. Bæresystem i brennbare konstruksjoner vil være mindre relevant i tidlig fase, men ved fullt utviklet brann vil det ha stor betydning for personer som befinner seg andre steder i bygget, eller i nærområdet utenfor bygget, på grunn av fare for kollaps.

Brannenergi og branneffekt

Brannenergi er den totale energien i rommet som kan frigjøres ved fullstendig forbrenning ved at brennbare materialer brenner, og er gitt som energi per arealenhet [MJ/m²]. I noen land er det gulvarealet som legges til grunn, andre land benytter arealet på omhyllingsflate. I Norge benyttes omhyllingsareal iht. VTEK, mens Eurokodene benytter gulvareal. Brannenergien vil øke når det benyttes brennbare materialer i stedet for ubrennbare. Branneffekt er den totale energien en brann avgir gjennom hele brannforløpet, denne er angitt i megawatt (MW).

Standard brannforløp

Standardbranner benyttes i forbindelse med testing av bærende og branncellebegrensende konstruksjoner. Disse er basert på tid-temperaturkurver og er i de aller fleste tilfeller svært konservative i forhold til en naturlig brann. I Norge (og de fleste andre land) benyttes brannkurve iht. ISO 834 i forbindelse med bygningsbranner. I USA og Canada benyttes ASTM E-119, som er svært lik ISO 834. En brann etter standarden ISO 834 er gitt ved:

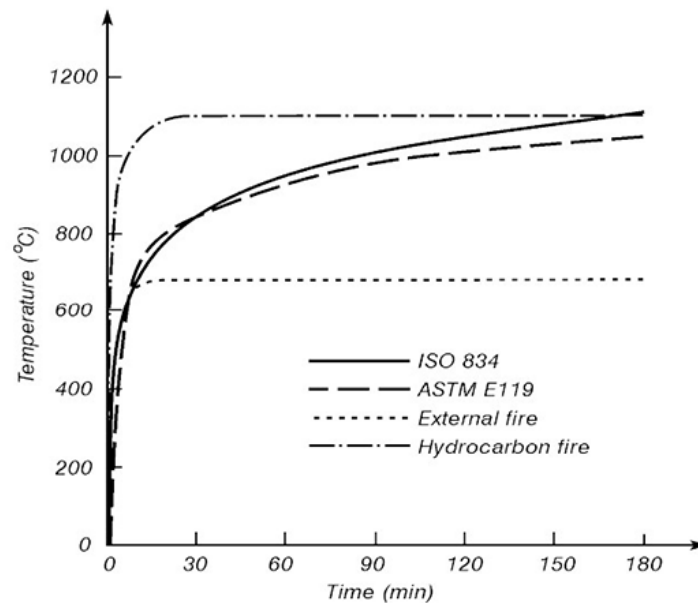
$$T_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1)$$

hvor

t er tid i minutter

T_g er temperaturen i rommet ved tiden t [°C] (2)

Det finnes tilsvarende standardbranner for ulmebrann, utvendig brann og hydrokarbonbranner. Brannkurvene er illustrert i Figur 9.



Figur 9: Brannkurver iht. ulike standarder (19)

NS-EN 1991-1-2: Laster på konstruksjoner (2) (videre kalt Eurokode 1), Del 1-2 Tillegg A, angir beregningsmetode for parametriske temperatur-tidkurver, hvor brannkurven for en naturlig brann kan finnes for en gitt branncelle. Metoden har en begrensning i størrelse på brannceller innenfor 500 m² og 4 m takhøyde, og kan kun benyttes for tilfeller hvor overtenning inntreffer og hvor brannen dør ut av seg selv når det ikke er mer brensel i rommet. Ekvivalent branneksponeeringstid gir varigheten for en naturlig brann og kan beregnes utfra standardens Tillegg F.

Viktige faktorer i disse beregningene er brannenergi i branncellen, størrelse på branncellen og åpningsfaktoren for vertikale åpninger.

Åpningsfaktoren er gitt ut i fra følgende formel:

$$O = (A_V/A_T) \times \sqrt{h_{eq}}$$

Hvor

$$O = \text{åpningsfaktoren [m}^{0.5}\text{]}$$

$$A_V = \text{totalt areal av vertikale åpninger i [m}^2\text{]}$$

$$A_T = \text{total omhyllingsflate [m}^2\text{]}$$

$$H_{eq} = \text{veid gjennomsnittshøyde av alle vertikale åpninger [m]}$$

Brannspredning

Brannspredning kan foregå på tre ulike måter, enten via:

- Varmeledning: varme ledes gjennom et materiale og kan antenne et annet materiale dersom temperaturen blir høy nok. Dette kan for eksempel inntreffe ved at varme ledes gjennom en vegg via et stålrør eller en ventilasjonskanal.
- Konveksjon: Strømning av røyk/varme gasser transporteres bort fra brannen og kan antenne andre materialer.
- Varmestråling: Varme fra flammer eller røyklag overføres ved elektromagnetisk stråling. Dersom strålingen er kraftig nok, vil den kunne føre til at andre materialer spontanantenner, eller at de på forhånd varmes opp slik at de lettere antenner ved flammer eller en gnist (16). Varmestråling vil være spesielt relevant ved utvendig brannspredning, som for eksempel brannspredning mellom ulike byggverk, og til overliggende etasjer via flammer ut av vinduer.

2.3 Tre og brann

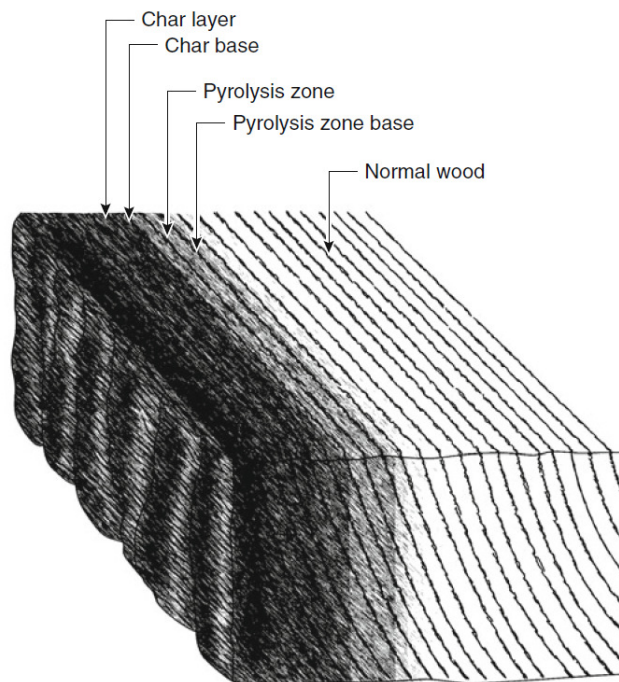
Utfordringen med å bygge i tre er at det er et brennbart materiale, som vil gi et bidrag til brannen. Slik kan brannen bli større og utvikle seg raskere sammenlignet med i et bygg i ubrennbare materialer. I tillegg vil tverrsnittet i konstruksjonene reduseres. Massivtre er likevel tungt antenneleg, og det må være en viss størrelse på brannen for at det skal antenne.

Når tre brenner, foregår det en termisk degradering som kalles pyrolyse. Denne avhenger av temperatur og inorganiske urenheter, som f. eks. kjemikalier. Treet omgjøres til kull og brennbare gasser, dette medfører flammibrann. Ved i underkant av 200 °C vil treet begynne å dekomponere i brennbare gasser, tjære og kull. Gran og furu vil kunne selvantenne ved 350-400 °C (7).

2.3.1 Forkulling og nedbryting

Når tre eksponeres for brann, vil det ytterste laget av treet forkalles gradvis innover. Forkullingen reduserer tverrsnittet av trekonstruksjonen, slik at den gjenværende strukturelle kapasiteten reduseres. Dersom det forkullede laget holdes på plass, vil dette beskytte det innenforliggende materialet, da forkullet tre har liten varmekonduktivitet. Elementene kan da sees på som homogene trekonstruksjoner. Dersom det forkullede laget faller av, kan det forventes en økt forbrenning som følge av at temperaturen i brannrommet øker. Etter hvert som temperaturen i treet øker, vil mer og mer av trekonstruksjonen forkalles. Det forkullede laget vil ikke gi noe bidrag til styrke og stivhet i trekonstruksjonen. Det er derfor viktig å dimensjonere trekonstruksjoner slik at de beholder sine lastbærende egenskaper i den tiden som er nødvendig.

Tetthet, kjemisk komposisjon og permeabilitet (gjennomtrengningsevne) varierer for ulike tresorter, i tillegg vil graden av fuktighet i treet påvirke forkullingsraten. Temperaturgradienten er bratt i den delen av treet som ikke er forkullet. I den innerste delen av det forkullede laget ligger temperaturen på rundt 300 °C. Tre har lav termisk konduktivitet, og temperaturen 6 mm inn fra det forkullede laget vil være rundt 180 °C når forkullingen har lagt seg på et stabilt nivå. Ca. 13 mm fra det forkullede laget vil temperaturen være rundt 100 °C. Jo tykkere lag med forkullet tre, jo bedre vil det beskytte det friske treet lenger inn i konstruksjonen (20) (21). De ulike lagene i treet er vist i Figur 10.



Figur 10: De ulike lagene ved degradering av tre ved brannpåkjenning (20)

Det er utarbeidet en egen europeisk standard for krysslimte massivtreelementer, NS-EN 16351:2015 (22). Denne har et eget avsnitt om brannmotstand, men angir kun at brannmotstand skal deklarerer med hensyn til parametre som geometriske data og forkullingsrate, og at forkullingsrate kan beregnes ved brannteknisk prosjektering ved å hensynta parametre gitt i det respektive regelverk.

Beregning av forkullingsdybde for trekonstruksjoner utføres iht. NS-EN 1995-1-2: Eurokode 5 Prosjektering av Trekonstruksjoner Del 1-2 Brannteknisk dimensjonering (23) (heretter omtalt som Eurokode 5). De fleste land i Europa er bundet til å benytte denne standarden.

Under standardbrann er forkullingsraten konstant og enkel å forutse. Forkullingsdybde er i Eurokode 5 definert som avstanden mellom den ytre overflaten på elementet før påkjenning og punktet for forkullingslinjen. Dette beregnes ut ifra branneksponeeringstiden og den aktuelle forkullingsraten:

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 t$$

hvor

$d_{\text{char},0}$ er dimensjonerende forkullingsdybde for en-dimensjonal forkulling (dvs. fra én side) [mm]

β_0 er en-dimensjonal forkullingsrate ved standardbrann, angitt i [mm/min];

t er branneksponeeringstid [min]

Ved bruk av β_n , som angitt i Figur 11, tas også avrunding av hjørner med.

	β_0 mm/min	β_n mm/min
a) Softwood and beech		
Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
b) Hardwood		
Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
c) LVL		
with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels		
Wood panelling	0,9 ^a	–
Plywood	1,0 ^a	–
Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a	–
^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.		

Figur 11: Tabell 3.1 fra Eurokode 5 (23), angir forkullingsrater

Kapittel 4.2.2 i standarden angir metode for beregning av effektivt tverrsnitt, og beskriver et sjikt med redusert tverrsnitt som antas å ikke ha noen egenskaper med tanke på styrke og stivhet. Sjektet skal derfor trekkes fra resttverrsnittet.

Effektiv forkullingsdybde angis ved formelen

$$d_{\text{ef}} = d_{\text{char},n} + k_0 d_0$$

hvor $k_0 d_0$ er det totale ikke lastopptakende sjiktet. d_0 er gitt ved 7 mm, og k_0 bestemmes ut ifra uttrykket $t/20$ for ubeskyttet tre når eksponeringstid er under 20 minutter, og 1,0 over 20 minutter. k_0 tar dermed ikke hensyn til at det ikke lastbærende sjiktet ikke er fullt utviklet i de første 20 minuttene i et brannforløp. Sjiktets tykkelse vil så øke lineært med tid (23).

En analytisk prosedyre for prosjektering av bæresystem tar hensyn til materialets atferd ved en gitt temperatur, potensiell varmeeksponering og fordelene ved aktive tiltak som sprinkleranlegg, med en viss usikkerhet for å være på den konservative siden. Ved beregning av parametrisk brannforløp (naturlig brann), skal den lastbærende funksjonen ivaretas gjennom et fullstendig brannforløp, inkludert nedkjølingsfasen. Tillegg A i Eurokode 5 angir framgangsmåte for beregning av et parametrisk brannforløp, basert på tillegg A i NS-EN 1991-1-2 (2). Ved beregning av forkulling benyttes samme inndata, men i tillegg legges til grunn omfanget av beskyttede og ubeskyttede vegger i tre. Beskyttede vegger er basert på antall lag gips og tykkelse på disse. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 6.2.

Tillegg A angir at dimensjonerende, spesifikk mobil brannenergi påvirkes av faktorer som brannaktiveringsrisiko mht. størrelse på branncellen og bruk. I tillegg kan denne reduseres med en faktor på 0,6 når det er sprinklet. En forbrenningsfaktor på 0,8 legges til grunn når det først og fremst er cellulosebaserte materialer som forbrennes, hvilket vil være riktig i vanlige husbranner (2). Den parametriske forkullingsraten påvirkes av nominell forkullingsrate for aktuell tresort (basert på tetthet), åpningsfaktor og de termiske egenskapene til de omsluttende bygningsdelene. Tid med konstant forkulling beregnes som angitt i formel under. Formelen kan kun benyttes når $t_0 \leq 40$.

$$t_0 = 0,009 \frac{q_{t,d}}{O}$$

hvor t_0 er tiden med konstant forkulling [min]

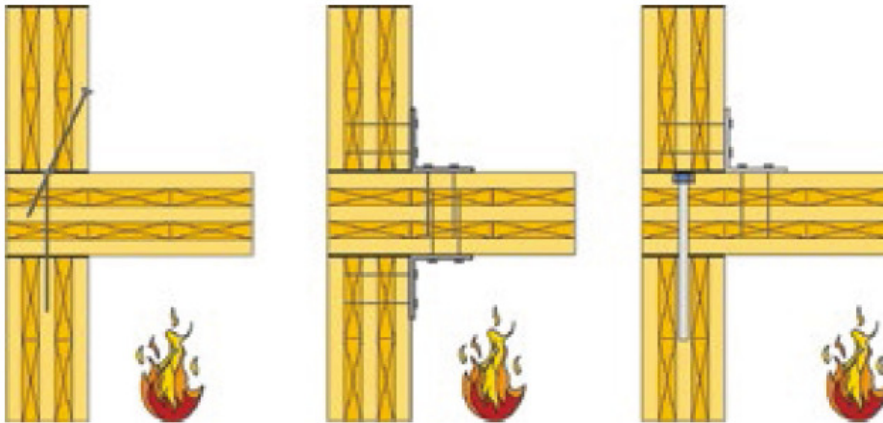
$q_{t,d}$ = total dimensjonerende spesifikke brannenergi [MJ/m^2] (omhyllingsareal)

O = åpningsfaktoren [$\text{m}^{0,5}$]

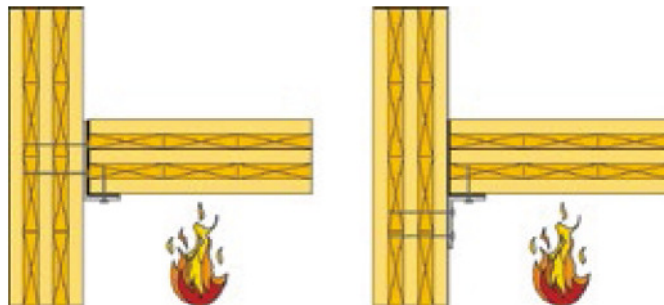
Ved beregning av total forkullingsdybde må hele brannforløpet legges til grunn, ikke bare tiden hvor forkullingen er konstant.

2.3.2 Knutepunkt og sammenføyninger

Knutepunkt og sammenføyninger mellom elementer er ofte et svakt punkt i konstruksjon, og må beskyttes mot brann. Disse kan utføres på mange ulike måter, og er ofte godt beskyttet mellom to elementer som er satt sammen. Riktig utførelse av brannbeskyttelse av sammenføyninger er derfor svært viktig. Eksempler på sammenføyninger er vist i Figur 12 og Figur 13.



Figur 12: Eksempel på sammenføyninger som ikke krever brannbeskyttelse (9)



Figur 13: Eksempel på sammenføyninger som kan kreve brannbeskyttelse (9)

2.3.3 Dimensjonering av bærende konstruksjoner iht. Eurokode 5

Eurokode 5 benyttes for dimensjonering av trekonstruksjoner. Selv om standarden ikke omfatter massivtreelementer, legges denne til grunn i mangel av noe annet. Forenklet dimensjonering legger verdiene i tabell 3.1 til grunn, og en forkullingsrate på 65 mm/min (beskrevet i kapittel 2.3.1 for informasjon om beregningsmetoder). Alternativt kan beregning av forkullingsrate for massivtrekonstruksjoner utføres iht. Tillegg A «Parametric fire exposure» i Eurokode 5, til tross for at standarden ikke ivaretar denne type konstruksjoner. Metoden er basert på at en brann slokker av seg selv, noe som ikke kan forventes. Ved bruk av eksponerte massivtreelementer er det i flere branntester vist at dette ikke er tilfelle (24), (25). Ved bruk av eksempelvis limtre kan det forventes at en brann etter hvert slokker av seg selv på grunn av begrenset omfang tre.

I forbindelse med Mjøstårnet ble det utført branntester på limtrekonstruksjoner gjennom et fullstendig brannforløp, for å verifisere dette. Testene ble utført iht. standard brannkurve (ISO 834) i 90 minutter. Testene viste at forkullingen stopper opp etter at testovnen er skrudd av (etter 90 minutter). Forkullingshastigheten sank etter hvert som tykkelsen på det forkullede laget økte. Det er i rapporten konkludert med at limtrekonstruksjoner kan dimensjoneres til å opprettholde sin bæreevne gjennom et fullstendig brannforløp (26).

En viktig forutsetning for beregning ved parametrisert brannkurve er at overtenning inntreffer, og at alle vinduer i branncellen knuses. Åpningsfaktoren har svært stor betydning for resultatet, da dette styres av brannens tilgang til oksygen. Med god oksygentilgang vil brannen være brenselskontrollert, og forbrenningen vil foregå raskt. Med lite oksygentilgang vil brannen være ventilasjonskontrollert, og brenne med lavere intensitet, men i lengre tid.

Det er flere faktorer som påvirker dimensjonering av trekonstruksjoner, men som ikke nødvendigvis tas hensyn til ved å benytte standarden:

- Tykkelse på lameller: Høyere forkullingshastighet har blitt observert ved smalere lameller i massivtreelementene (mindre enn 35 mm) (9).
- Redusert tverrsnitt: Ved branntester utført av Frangi og Fontana ble det observert økt forkullingsrate når resttverrsnittet var mindre enn 40-60 mm (20 s. 1987).

- Ikke-lastbærende sjikt: Brandsäkra trähus (27) angir at d_0 for elementer over 35 mm kan være større enn 7 mm. Branntester utført av SP Fire i Sverige i 2014 (28) har også vist at standarden ikke er konservativ nok når det gjelder angivelse av tykkelse på dette sjiktet, og at tykkelsen på sjiktet bør økes.
- Ekstern varmefluks: Forsøk utført ved Fire Research Station i 1971 (29) viste at innenfor et område på $20\text{--}33\text{ kW/m}^2$ vil forkullingsraten være 0,022 ganger varmestrålingen. Det vil si at ved 20 kW/m^2 er forkullingsraten 0,44 mm/min, mens den ved 35 kW/m^2 vil være 0,726 mm/min. Ved forsøk på gran ble det observert forkullingsrater helt opp til 1,02 mm/min (ved varmefluks på 75 kW/m^2), og det viste seg at forkullingsraten var proporsjonal med forholdet ekstern varmefluks over tetthet (20). Ved høyt strålingsnivå vil altså forkullingsraten være høyere enn det som benyttes i Eurokode 5.
- Nyere vinduer har blitt langt mer solide og tåler større temperatursvingninger enn tidligere. Det har ved flere branner blitt observert at vinduer ikke har sviktet, til tross for at det har vært en større brann i rommet, som har sloknet av seg selv.
- Høye bygninger er ofte mer utsatt for vind, noe som også vil kunne bidra til økt oksygentilgang.
- Ved senere ombygging kan størrelse på branncelle, brannenergi, åpningsareal og type kledning endres.
- Vurdering av sprinklersvikt (se kapittel 6.1) med hensyn til reduksjonsfaktor for brannenergi ved parametrisk brannkurve.

Ifm. prosjektet «Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2» (25), i regi av NFPA ble det i 2017 utført seks branntester med massivtrevegger- og tak i et rom med målene 9,1 m x 4,6 m x 2,7 m. Målet med testene var å se hvilket bidrag massivtreet ga til brannen under ulike forhold med innkledning av gips, og to ulike størrelser på ventilasjonsåpninger. Det ble derfor ikke utført slokking før testene var over. Disse testene gir nyttig informasjon om hvordan en brann påvirkes for en veldig aktuell branncellestørrelse, blant annet når det gjelder tid til overtenning, temperatur, forkullingsdybde, ventilasjonsforhold og delaminering.

Det ble benyttet ekte og like møbler i alle testene, med en brannenergi på 550 MJ/m^2 omhyllingsflate (tilsvarer ca. 220 MJ/m^2 gulvareal). Massivtreelementene var produsert med lim av PUR.

Testene med den minste vindusåpningen var ventilasjonskontrollerte, og fasen med fullt utviklet brann hadde derfor en lengre varighet. Massivtreelementene ble da mer involvert i brannen. Dette økte også når eksponert areal med massivtre økte. I testen med størst ventilasjonsåpning delaminerte elementene, noe som førte til en andre overtenning etter en avkjølingsfase. Dette inntraff også i testen med mindre ventilasjonsåpning, hvor mindre varme slapp ut av rommet. Både arealet av eksponert massivtre og hvilke vegger som var eksponert påvirket bidraget fra massivtreet til brannen. I alle testene med eksponert massivtre var tiden til overtenning tre til fem minutter kortere enn i de to første testene, hvor alle overflater var kledd inn med branngips. Temperaturene var like i testene både med og uten eksponert tre. En oppsummering av resultatene fra testen er vist i Figur 14 på neste side.

Opening size in W2 wall	1.8 m wide x 2.0 m high								3.6 m wide x 2.0 m high			
	1-1 (Feb 16)		1-4*(Mar 21)		1-5 (Apr 13)		1-6 (Apr 18)		1-2 (Feb 23)		1-3*(Mar 16)	
W1 wall	3GB		3GB		exposed		exposed		2GB		exposed	
W2, W3 and W4 walls	3GB		3GB		3GB		3GB		2GB		2GB	
Ceiling	3GB		exposed		3GB		exposed		2GB		3GB	
Exposed CLT surface versus total ceiling and wall area (%)	0		36%		21%		57%		0		21%	
Smoke / heat alarms (min)	2.1 / 3.5		2.5 / 1.5		1.8 / 2.5		2.0 / 3.0		3.4 / 2.9		5.5 / 2.9	
STEs reaching 68 °C (min)	1.3-5.4		1.3-3.5		1.2-3.6		1.6-3.9		1.5-4.6		2.4-5.8	
Smoke OD > 3.4 m ⁻¹ (min)	12.6		11.6		11.0		9.4		15.2		12.4	
Flashover (min)	14.9		11.5		11.5		9.8		15.3		12.5	
Fully developed fire stage(min)	14.9 - 45		11.5 - 57 [☆]		11.5 - 50 [☆]		9.8 - 160		15.3 - 37		12.5 - 35	
HRR initial peak (MW)	9.5		13.1		9.6		12.9		12.4		14.2	
HRR fully developed (MW)	> 5		> 6		> 5		> 6		> 8		> 9	
HRR near end (MW)	0.34		5.1		10		9.5		0.43		0.7	
HF ceiling centre; bed (kW/m ²)	160; 240		>100 [§]		190; 180		220; 200		170; 230		n/a; 220	
HF W1 front; mid; rear (kW/m ²)	250; 275; 260		320; 320; 235		270; 290; 270		280; 270; 290		220; 275; 275		245; 320; 320	
HF W3 (kW/m ²)	180		-		250		280		200		n/a	
HF W4 (kW/m ²)	250		150		175		>170 [§]		230		210	
HF floor (kW/m ²)	190		205		190		170		190		200	
HF 3.5 m; 5.5 m high (kW/m ²)	70; 20		120; 30		120; 30		190; 60		105; 37		115; 45	
HF 2.4 m; 4.8 m away(kW/m ²)	40; 12		45; 17		40; 15		55; 20		65; 22		65; 25	
GB back reaching 300 °C	ceiling	walls	ceiling	walls	ceiling	walls	W3	W4	ceiling	walls	ceiling	walls
face layer (min)	30-40	32-60	-	31-58	28-35	36-60	37-68	48-82	32-36	31-43	13-17	30-92
mid layer (min)	50-68	65 [†]	-	53-80	46-56	58-72	60-102	83-120	-	-	30-91	-
base layer (min)	No	No	-	77-141 rear only	70-85	98-191	86-123	102-130	53-67 rear only	No	118-221 rear only	95-123 upper only
GB fall-off time	ceiling	walls	ceiling	walls	ceiling	walls	W3	W4	ceiling	walls	ceiling	walls
face layer (min)	34-44	Nfo	-	46-73	32-45	50-70	55-108	77-120	36-40	Nfo	25-35	Nfo
mid layer (min)	Nfo	Nfo	-	Nfo	70-144	155-180	85-120	93-120	-	-	Nfo	-
base layer (min)	Nfo	Nfo	-	Nfo	144-155	185-195	125	125-130	Nfo	Nfo	Nfo	Nfo
Test duration (min)	134		159		202		160		104		242	
W1 char (mm)	0		0-14		102-141		88-143		0		60-86	
W3 char (mm)	0		0-10		0-52		5-66		0		0-10	
W4 char (mm)	0		0-2		25-51		25-68		0		0-20	
Ceiling char (mm)	0		66-90		25-79		116-154		0-15		0-20	
CLT contribution to HRR (MW)	0		5.5		3.3; 6.3; 9.5		7.5; 10		0		2.5	

GB: 15.9 mm (5/8 in.) thick Type X gypsum board; 2GB: 2 layers of GB; 3GB: 3 layers of GB

Nfo: no fall-off (i.e., GB stayed intact during test); * Reused CLT structure; † W1 front upper portion only; § gauge failed;

☆ re-flashed after 140 min.

Figur 14: Testoppsett og resultater (25)

2.4 Branntekniske utfordringer med høye trehus

Branntekniske utfordringer med høye bygninger (uansett bygningsmateriale) kan i hovedsak deles i tre:

- Rømningsstrategi: Nødvendig rømningstid øker når det er mange etasjer.
- Bæresystem: Viktigheten av at bæresystemet kan stå i lengre tid øker, da brannvesenet vil ha svakere innsatsmuligheter, og en kollaps vil kunne få svært store konsekvenser.
- Brann- og røykspredning: Risiko for røykspredning via sjakter økes, pga. ulikheter i trykk mellom de nedre og de øvre etasjene. Risiko for brannspredning i fasade øker på grunn av brannvesenets manglende innsatsmuligheter fra utsiden i høyden.

Ved å i tillegg bygge høyt i trekonstruksjoner, øker også brannenergi, hastigheten på brannutvikling og brannforløpet forlenges, noe som ikke direkte er en følge av det bygges høyt. Flere utfordringer kombineres ved at det både bygges høyt og i tre, og i dette kapittelet gjennomgås noen av disse. Utfordringer med delaminering og manglende standard for beregning av forkulling kan ikke sies å være en direkte følge av høye trehus, men konsekvensen ved mangelfull dimensjonering vil øke jo høyere det bygges. Fordelen er at tre brenner så stabilt, at det er enkelt for brannvesenet å vite hvor lenge det er trygt for dem å gjøre en innsats inne i bygningen, før bygget i verste konsekvens kollapser.

2.4.1.1 Økt risiko for brannspredning til nabobygg

I byggetiden er ikke sikkerhetstiltak som sprinkler og innkledning med gips på plass. En brann som inntreffer i et større bygg etter at trekonstruksjonene er montert, kan medføre en svært stor brann, og risiko for brannspredning til andre bygninger kan være stor. Høyere byggverk med økt brannenergi gir økt strålingsnivå, og 8 meter avstand til nabobygg vil mest sannsynlig ikke være tilstrekkelig for å hindre brannspredning til disse. Det er derfor svært viktig å gjøre ekstra sikkerhetstiltak i byggefasen. Dette kan for eksempel være brannvakt, kameraovervåkning, midlertidige brannalarmanlegg, sikkerhetsavstander og strengere rutiner med økt fokus på brannsikkerhet for de som arbeider på byggeplass. Fordelen er at byggetiden er kort, og at det ikke er behov for varme arbeider på byggeplass, noe som igjen vil redusere risiko for brann.

2.4.1.2 *Branntetting*

Det finnes per i dag ikke godkjente produkter for branntetting av tekniske gjennomføringer for kabler, rør og kanaler i massivtrekonstruksjoner. Det benyttes derfor produkter som er godkjent for andre typer konstruksjoner, som betong og lettvegger. Krymp (som nevnt i kap. 2.1.3) som følge av tørking de første årene, vil medføre at branntettingen svekkes. Ved store utsparinger og svekkede gjennomføringer, vil både forkulling og brannspredning kunne påvirkes. I og med at treet tørkes, vil det også kunne oppstå sprekker i elementene. Det er også viktig at rør og kanaler som føres gjennom konstruksjonen ikke kommer i kontakt med de brennbare elementene, slik at risiko for brannspredning ved varmeledning ivaretas.

2.4.1.3 *Økt risiko for ventilasjonskontrollert brann*

En ventilasjonskontrollert brann vil medføre større flammer ut av vinduer. Eksponert tre på vegger og i himling øker brannenergien i rommet, noe som, avhengig av åpningsfaktoren, øker behovet for oksygen. Dette fører i større grad til ventilasjonskontrollert brann, og de uforbrente gassene skaper større utvendige flammer. Konsekvensen av dette vil være økt risiko for antennelse av fasade og brannspredning til ovenforliggende etasje. Det har vist seg i flere branntester, blant annet i testene som ble utført i forbindelse med prosjektet «Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2» (25), at i testene med eksponert tre var både varmetapsrate og varmestråling mot utvendig fasade høyere enn i testene hvor treet var beskyttet med gips.

Ved branntester i et nordisk prosjekt med og uten innkledd trekonstruksjoner viste det seg at branntemperaturen var lik i alle tilfellene, men i de testene hvor trekonstruksjonene ikke var tildekket, var det store flammer ut av vinduene. Dette skjedde som følge av uforbrente gasser på grunn av mangel på oksygen (30).

Utvendig brannspredning er videre behandlet i kapittel 6.6 Økt krav til kjølesoner.

2.4.1.4 Delaminering

Massivtre og limtre er satt sammen av flere lag lameller, som regel med lim som bindemiddel. Dersom limet ikke tåler de høye temperaturene i trekonstruksjonen ved brann, vil lamellene falle av lag for lag, og brannen tilføres på nytt friskt tre, hvor pyrolyseprosessen ennå ikke har startet. Dette omtales som delaminering, og dersom dette skjer i avkjølingsfasen vil dette kunne føre til en ny overtenningsfase, også kalt andre overtenning. Tykkelsen på de ulike lagene i elementene, type lim og om det er vegg- eller dekkeelementer, vil påvirke omfanget av delaminering.

Delaminering har blitt observert i flere branntester, blant annet ved test ved SP Fire Research i Trondheim (nå RISE Fire Research). Testen ble utført i forbindelse med prosjektet Moholt 50/50, hvor det ble utført fullskalaforsøk på en hybel oppbygd av massivtrevegger og himling, med og uten sprinkling. Denne testen viste også temperatur tilsvarende HC-kurven, som er ca. 200-300 °C over standard brannkurve ISO 834. Testen ble utført med massivtreelementer med lameller med 5 x 20 mm (24), som var limt sammen med PUR-lim.

Limet må kunne tåle samme temperatur som hvor forkulling inntreffer, dvs. rundt 300 °C, for å sikre at delaminering ikke inntreffer, men fullskaletester har også vist delaminering når lim har vært eksponert for 200 °C (9). Blant annet har lim av PUR (polyuretan) vist delaminering ved 200 °C ved branntest iht. ANSI/APA PRG 320 «Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber» som benyttes i USA og Canada (31). Omfattende testing av bindemiddelet PRF (phenol-resorcinol-formaldehyd) har vist at delaminering ikke inntreffer når dette benyttes.

Erfaring har vist at MUF (melaminureaformaldehyd) kan ivareta sin styrke ved temperaturer på 300 °C. Branntester ved Forest Products Laboratory i 2016 som ble utført på massivtreelementer med fire ulike typer lim, viste at elementer hvor det ble benyttet MUF og PRF ga lite eller ingen delaminering, mens elementer med EPI (emulsjon polymer isocyanate) og PUR ga stor grad av delaminering (32).

Ved branntester utført i Sveits i 2009, ble det utført branntester på massivtreelementer med MUF og fem ulike typer PUR-lim iht. ISO 834. I alle tilfellene med PUR-lim oppsto delaminering av elementene, mens dette ikke inntraff med lim av MUF. Det ytterste laget falt av først når hele laget var forkullet, og det ble observert økt forkullingshastighet etter at dette laget var falt av. I testene med MUF-lim holdt mer eller mindre hele det forkullede laget seg på plass gjennom hele branntesten og forkullingsrate gjennom testen var noe lavere enn 0,65 mm/min (32).

I forbindelse med prosjektet i Sveits ble det også utviklet en designmetode for brannmotstand av massivtreelementer som delaminerer, hvor 0,65 mm/min legges til grunn for det første laget. For neste lag antas det at forkullingsraten øker til det dobbelte (1,3 mm/min) for de første 25 mm. Forkullingsraten reduseres så til 0,65 mm/min for resterende del av laget. Dette fortsettes for hvert lag som vil bli eksponert i løpet av branntiden (33). Metoden er tatt inn i en østerriksk veiledning, pro: Holz Cross Laminated Timber Structural Design (34), som angir prinsipper som kompletterer Eurokode 5, og som er utarbeidet på initiativ av de store massivtreleverandørene.

I forbindelse med oppgaven er det sjekket tekniske godkjenninger og dokumentasjon fra branntester fra flere ulike leverandører av massivtre. Binderholz, som er en av de store produsentene i Østerrike benytter PUR som bindelsesmiddel, og har i tillegg gjennom branntest dokumentert forkullingsrate for sine elementer med tre og fem lameller. Resultatene var 0,67 mm/min for elementer med tre lag, og 0,71 mm/min for elementer med fem lag. Dette er så vidt i overkant av det som er angitt i Eurokode 5. Det er i testrapporten ikke angitt tykkelse på lamellene, men branntestene varte kun i 31 minutter, noe som tilsier at oppnådd forkullingsdybde var ca. 20-22 mm (35). Pga. testens varighet kan det antas at de ytterste lamellene var tilstrekkelig tykke til at disse ikke brant gjennom. Testen gir derfor ikke et godt nok bilde på den faktiske forkullingsraten for elementene. I henhold til deres produktdokumentasjon legges det til grunn en forkullingsrate på 0,67-0,74 mm/min, avhengig av type og bruk av elementene (13).

Den finsk-svenske leverandøren Stora Enso er nest største leverandør i Europa, og produserer massivtreelementer i Østerrike med lim av PUR. I dokumentasjonen for elementene deres legges metoden iht. østerriksk veiledning til grunn, slik at delaminering tas hensyn til ved dimensjonering. De benytter de overnevnte verdiene ved elementer plassert horisontalt (dekkeelementer) og en noe lavere forkullingshastighet ved vegglementer (36).

KLH produserer også i Østerrike og bruker lim av PUR. Iht. branntest av deres elementer legges det til grunn en forkullingsrate på 0,67 mm/min for det ytterste laget, og det forutsettes at minst 3 mm av dette laget skal være igjen. I tillegg skal det ved dimensjonering av resttverrsnitt trekkes fra 10 %. Dersom mer enn ett lag forkulles, skal en rate på 0,76 mm/min benyttes (37).

CLT Handbook anbefaler en metode som tar hensyn til delaminering ved at et ikke lastbærende sjikt på 7 mm legges til forkullingsdybden på nytt for hver gang et limlag plasseres. Dette er vist i Figur 15.

Fire Exposure	Effective Char Depth, $a_{char,eff}$ (mm)					
	Lamination Thickness (mm)					
	19 (3/4")	21 (7/8")	25 (1")	32 (1 1/4")	35 (1 3/8")	38 (1 1/2")
30 min.	34	33	30	27	27	27
45 min.	51	50	47	39	36	36
1 hr.	67	66	61	54	51	51
1.5 hrs.	101	100	91	78	72	72
2 hrs.	136	133	122	102	99	99

Figur 15: Effektive forkullingsdybder for ulike lamelltykkelser når delaminering er ivaretatt (9)

Eurokode 5 kap. 3.5 (23) angir at limprodukter for bæreføremål skal gi limfuger av slik holdfasthet og bestandighet at integriteten av bindemiddelet ivaretas i den aktuelle brannmotstandstiden. Standarden viser til EN 301 (38) for bruk av bindemiddel, hvor maksimal testtemperatur for delaminering er 90 °C. Dette betyr at det er mulig å oppnå standardens krav, men fortsatt ikke hindre delaminering. Det foreligger også en egen standard for lim av PUR for bærende trekonstruksjoner (39). Heller ikke denne angir høyere testtemperatur enn 90 °C.

De største leverandørene av massivtreelementer i Østerrike og én leverandør i Norge ble i forbindelse med oppgaven kontaktet og forespurt om årsaken til at de benytter PUR-lim i sine elementer. De opplyser om at kostnad ikke er en faktor, da PUR er et kostbart lim. Hovedårsaken til at de ikke benytter MUF er at det inneholder formaldehyd. I tillegg oppgir de at lim som inneholder formaldehyd krever varme for å herdes, og at det i tykke elementer vil bli krevende og dyrt å få varmet opp tilstrekkelig. Til sammenligning behøver PUR-lim kun luft og fukt for å herde. Andre fordeler med PUR er at det tåler vann og er fargeløst. Formaldehyd er ønskelig å unngå blant annet på grunn av irritasjon av øyne, nese og svelg (40). Dette påvirker også HMS i produksjonsfase.

Årsaken til at Splitkon benytter MUF er i hovedsak for å unngå delaminering av brann. De opplyser at MUF-limet er videreutviklet og betydelig forbedret i de senere årene, og ikke lenger behøver så mye varme ved herding (kun 18 °C). Limet som benyttes inneholder mindre formaldehyd i dag enn tidligere, faktisk mindre enn tre i seg selv (41). Mens MUF er sensitiv for riktig temperatur, er PUR mer sensitiv for riktig fuktnivå. Fukt må derfor påføres i produksjonen. Dette ble også bekreftet av Dynea, som er produsent av begge typer lim.

2.5 Refleksjon

Forkullingsratene angitt i Eurokode 5 er ikke beregnet for massivtre, og prosjekterende for dimensjonering av konstruksjoner må være klar over hvilke forhold som påvirker forkullingsdybder utover det som er angitt i standarder. Ved beregning av forkullingsdybde iht. Tillegg A bør flere usikkerheter legges inn, som for eksempel ulike vindusareal. Nyere vinduer knuses ikke nødvendigvis ved brann, og dette kan påvirke dimensjoneringen i en mindre konservativ retning. Lavere åpningsfaktor medfører et lengre brannforløp, men bidrar også til ventilasjonskontrollert brann, som igjen gir en større del av forbrenningen på utsiden. Endring i brannenergi eller innvendig kledning på vegger kan også forekomme ved at bruk endres senere i driftsfasen. Selv om det vil være et søknadspålagt tiltak, fanges det ikke nødvendigvis opp at dette påvirker de bærende konstruksjonene. Metoden i Tillegg A tillater også en reduksjon i brannenergi når bygget er sprinklet, noe som bidrar til at tiden på brannforløpet reduseres. Ingen tekniske tiltak er 100 % pålitelige, og det må være redundante sikkerhetssystemer i høye byggverk. Å legge sprinkleranlegget til grunn for dimensjonering av bæresystem i høye byggverk vil ikke være riktig. Effekten av disse faktorene bør alltid tas med i vurderingen ved bruk av metoden som er angitt i Eurokode 5.

Dagens standarder tillater å levere massivtreelementer med bindemiddel som medfører delaminering, og det vil være opp til hver produsent å velge hvilken type lim som benyttes. Til tross for at problematikken med delaminering har vært kjent i mange år, leverer fortsatt mange av de største produsentene massivtreelementer som delaminerer. Selv om det benyttes beregningsmetoder for forkullingsrate som ivaretar delaminering, vil fortsatt det friske laget med tre som eksponeres gi et bidrag til brannen, slik at denne øker i intensitet. Det er dermed mulig å oppnå flere overtenningsfaser. Ved elementer som ikke delaminerer vil det legges seg et forkullet lag som beskytter det bakenforliggende treet. Brannen vil da ha en mulighet til å slokke av seg selv. Hvis ikke er brannvesenet nødt til å ta seg inn i bygget og slokke brannen.

Risiko for delaminering vil være ivarettatt når et sprinkleranlegg utløser og begrenser brannen. I de tilfellene hvor det ikke vil forekomme høye nok temperaturer i lomsjiktet bak det første laget, vil heller ikke type lim ha noen betydning. Dette kan for eksempel være i et rom med lav brannenergi. Et alternativ for å unngå delamineringsproblematikken er innkledning med et tilstrekkelig antall lag med gips for å beskytte trekonstruksjonene gjennom et fullstendig brannforløp.

Konsekvensen av effekten ved delaminering er stor, og det er ikke lenger noen grunn til å frykte formaldehydinnholdet, som er hovedgrunnen til at PUR velges foran MUF. Kompleksiteten i produksjonsprosessen er relativt lik, og produktprisen taler til fordel for MUF. Leverandørene må ta dette innover seg, og produsere elementer som ikke reduserer brann sikkerheten unødvendig. Byggherre eller brannrådgivere kan også stille krav til at det skal benyttes elementer som ikke delaminerer i det aktuelle prosjektet.

Tre tørker i løpet av de første årene, og beveger seg også ved ulikt fuktnivå både inne og ute. Dette medfører at det er nødt til å bli gliper og sprekker i elementene. I alle brann testene som er gjennomgått i forbindelse med oppgaven er det benyttet nyere massivtreelementer. Hvordan gliper og sprekker påvirker forkullingsrate ved brann, er derfor ikke kjent. Dette er et forhold som må tas med i totalvurderingen ved brannteknisk dimensjonering av bygningskonstruksjoner i massivtre.

3 Brannteknisk klassifisering av produkter og materialer

I dette kapittelet beskrives klassebetegnelse som det vises til i Byggteknisk forskrift (TEK) med veiledning (VTEK) (42).

TEK § 3-1 angir at før produkter bygges inn i byggverk skal det dokumenteres at produktene har de egenskapene som er nødvendige for at det ferdige byggverket skal tilfredsstillere kravene i forskriften (42). Bygningsmaterialer må tilfredsstillere bestemte branntekniske ytelser for å oppfylle dette, når det gjelder bygningsdelenes brannmotstand og materialenes egenskaper ved brannpåvirkning (43).

Brannmotstanden uttrykker tiden bygningsdelen skal opprettholde sin funksjon i forhold til en standard tid-temperaturkurve.

Bæresystem:

R – bæreevne: en bærende konstruksjons evne til å motstå branneksponeering under aktuelle mekaniske laster i en gitt tid, uten at den strukturelle stabiliteten reduseres (angitt i minutter).

Brannskillende (ikke-bærende) konstruksjoner:

E – integritet: en brannskillende bygningsdels evne til å motstå branneksponeering kun på én side, uten brannspredning til motsatt side som et resultat av gjennomtrenging av flammer eller varme gasser (angitt i minutter).

I – isolasjonsevne: en brannskillende bygningsdels evne til å motstå branneksponeering kun på én side, uten gjennomtrenging av brann som et resultat av varmegjennomgang fra eksponert til ueksponert side. Gjennomsnittstemperatur på ueksponert side skal ikke overstige 140 °C, og største temperaturøkning skal ikke overstige 180 °C (angitt i minutter) (44).

Byggprodukter deles inn i klasser basert på brennbarhet, røykutvikling og brennende dråper og partikler (basert på euroklassene):

A1 - ubrennbart materiale (f. eks. betong og steinull)

A2 - begrenset brennbar

B – D - ulik grad av begrenset brennbar (brannimpregnert tre oppnår eksempelvis B, mens ubehandlet tre oppnår D)

E – brennbart materiale

F – brennbart materiale som ikke tilfredstiller klasse E.

Disse klassene benyttes også i forbindelse med klassifisering av overflate og kledning.

Røykutvikling deles inn i tre klasser:

s1 – meget begrenset røykutvikling

s2 – begrenset røykutvikling

s3 – ingen begrensning i røykutvikling

Brennende dråper deles inn i tre klasser:

d0 – ingen brennende dråper

d1 – begrenset mengde brennende dråper

d2 – ingen begrensning i mengden brennbare dråper

Tre er typisk D-s2,d0, mens gips er A2-s1,d0. Dette betyr at gips ikke bidrar til brann, mens tre gir et større bidrag, både til brann- og røykutvikling.

Overflater og kledning:

Med overflater menes det ytterste sjiktet på en bygningsdel, som for eksempel maling og tapet. Dette skal brannprøves på det underlaget som skal anvendes i praksis. Kledning skal beskytte sin egen bakside eller bakenforliggende materiale mot antenning, forkulling eller annen skade i den tiden som er påkrevd. I Norge er dette generelt 10 minutter. Kledning angis med benevnelsen K₂10 i kombinasjon med euroklassene (43).

Den strengeste klassen det stilles krav til i Norge er A2-s1,d0. Per definisjon er dette begrenset brennbart, men omtales i praksis som ubrennbart.

4 Regelverk

4.1 Historie

Dagens regelverk og standarder utfordres av nyere byggemetoder og henger ikke med i utviklingen. Regelverkene vi har i dag ivaretar ikke høye trehus, noe som krever økt kompetanse og økt behov for dokumentasjon.

Lovgivningen for brannsikkerhet i Norge har gjennom tidene utviklet seg basert på erfaringer fra branner. Fram til rundt 1870 var det ikke vanlig å bygge høyere enn to-etasjes hus, da med trekonstruksjoner. Tre har historisk medført mange store branner. Brannsikker kledning av trevegger, som for eksempel forblending av tegl eller leirpuss, ble benyttet allerede på 1800-tallet.

Etter flere store bybranner i Norge var det stort fokus på å hindre brannspredning mellom bygninger. Murtvangloven (Lov om forbud mod opførelse av træbygninger i landets byer m.v. av 1904) ble innført i 1904 og gjaldt i sentrale strøk i samtlige norske byer (45). Murtvang innebar at yttervegger og tak skulle være i mur, mens innvendige konstruksjoner kunne være brennbare. Begrensning av høyde på trehus ble satt til ca. 9 m. I etterkant av dette ble det oppført mange bygårder i mur i inntil fire etasjer i flere av de største byene. Etter hvert ble det mer fokus på personsikkerhet, og at mennesker omkom i brann i boligene sine. Dette medførte krav til to trapperom og også at innvendige konstruksjoner skulle være ubrennbare i høyere bygninger.

Fokuset har altså tidligere vært på å gå mer og mer bort fra tre i bygninger, mens trenden nå har snudd, og det bygges stadig høyere bygninger i tre. Nyere typer trekonstruksjoner som gjør det mulig å bygge høyere gir utfordringer med hensyn til regelverk, og det er stadig et ønske om å bygge enda høyere. Mangel på erfaring fra branner i trehus med massive konstruksjoner vanskeliggjør denne prosessen.

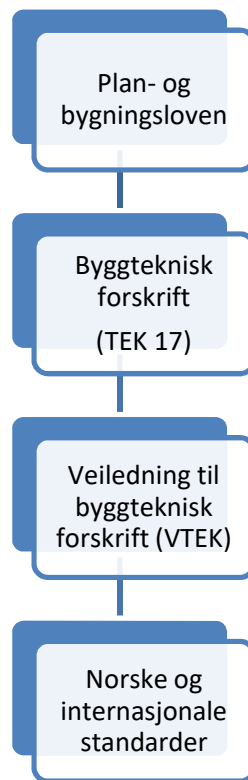
I 1997 ble det innført en tillatt økning på begrensning av trehus fra tre til fire etasjer. Fram til 2000-tallet har bygninger som er høyere enn fire etasjer blitt oppført i stål- og betongkonstruksjoner. Bygninger med inntil fire etasjer har tradisjonelt blitt oppført i lette trekonstruksjoner, det vil si trestenderverk.

4.2 Regelverk i Norge

4.2.1 Plan- og bygningsloven, funksjonskrav og preaksepterte ytelser

Oppføring av byggverk reguleres i Norge av Plan- og bygningsloven (Lov om planlegging og byggesaksbehandling, 2008). Byggteknisk forskrifts kapittel 11 omfatter sikkerhet ved brann, og angir funksjonskrav. Et funksjonskrav er i TEK § 1-2 definert som et overordnet formål eller oppgave som skal oppfylles i det ferdige byggverket. Funksjonskravene er alltid kvalitative. Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK) forklarer forskriftens krav og gir preaksepterte ytelser som vil oppfylle disse kravene. Dette er ofte en konkretisering av funksjonskravene, og kan ofte være kvantitative. Funksjonsbasert forskrift ble innført i 1997.

Hierarkiet for lover, forskrifter og veiledninger er vist i Figur 16:



Figur 16: Hierarki for regelverket i Norge

Byggverk, eller deler av byggverk, kategoriseres i risikoklasser basert på trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse. Risikoklassene bestemmes ut fra tabell i TEK (vist i Figur 17), eller VTEK § 11-2 Tabell 1, som angir preaksepterte forslag til plassering i risikoklasser. Typisk vil kontor plasseres i risikoklasse 2, boliger i risikoklasse 4, og hotell eller helsebygg i risikoklasse 6.

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 17: Tabell risikoklasser

Byggverk, eller deler av byggverk, deles videre opp i brannklasser ut fra konsekvensen en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø. Brannklasser er delt inn fra 1-4, hvor 1 er liten og 4 er særlig stor. Brannklasser er basert på antall etasjer og risikoklassen for bygget og legges til grunn for videre prosjektering. Tabell som viser preaksepterte brannklasser er vist i Figur 18. Eksempel på byggverk i brannklasse 4 er høye byggverk over 16 etasjer. Høye trehus vil typisk plasseres i brannklasse 3 eller 4 (42).

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 18: Tabell brannklasser

Et eksempel på et funksjonskrav kan være at bæresystem i byggverk i brannklasse 1 og 2 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i minimum den tid som er nødvendig for å rømme og redde personer og husdyr i og på byggverket. Tilhørende preakseptert ytelse er at brannmotstanden på bærende konstruksjoner skal tilfredsstillende R 60 i brannklasse 2.

Funksjonskravene i Byggteknisk forskrift kan ikke avvikes av brannrådgiver. Dersom det er behov for å avvike et funksjonskrav, og vurdert som forsvarlig, må det søkes om dispensasjon til kommunen.

Det er tre ulike alternativer for brannteknisk prosjektering av byggverk:

- Forenklet prosjektering: preaksepterte ytelser følges, uten fravik
- Analytisk brannteknisk prosjektering: det gjøres fravik fra de preaksepterte ytelsene. Disse må dokumenteres ved analyse.
- Blandingsløsning: det benyttes en kombinasjon av de to ovennevnte.

De preaksepterte løsningene angitt i VTEK gjelder kun for brannklasse 1-3, og bygninger opp til 16 etasjer. Ved brannteknisk prosjektering i henhold til brannklasse 4, foreligger ikke preaksepterte løsninger, og det er opp til prosjekterende å vurdere om disse er relevante og tilstrekkelige. Veiledningen angir at det ved behovet for sikkerhetstiltak ved brann blant annet må tas hensyn til:

- a) Sannsynlige brannforløp
- b) Potensielle konsekvenser ved brann
- c) Byggverkets kompleksitet
- d) Om brannsikkerhetsstrategien er komplisert, for eksempel ved at det er mange tiltak som skal virke samtidig og som er avhengige av hverandre (42).

TEK § 2-2 angir at man kan fravike preaksepterte ytelser, inklusiv en tilknyttet standard, dersom det dokumenteres at de valgte ytelsene oppfyller funksjonskravene i forskriften med et minst like høyt sikkerhetsnivå som de angitte preaksepterte ytelsene. Det kreves da at det utarbeides dokumentasjon som verifiserer at kravene i forskriften er ivaretatt med tiltak som gir samme ytelsesnivå, inklusiv effektivitet og pålitelighet (42). Å verifisere vil si å bevise at funksjonskravet er oppfylt (46).

Årsaker til at det er ønskelig å fravike fra de preaksepterte ytelsene kan for eksempel være:

- Bygget passer ikke til de angitte løsningene i VTEK.
- Den preaksepterte ytelsen er kostbar og gir ingen, eller marginalt økt sikkerhetsnivå, i det aktuelle bygget.
- Byggherre ønsker store åpne areal og fleksibilitet (avviker fra ytelser angående branncellebegrensning).
- Muliggjøre bruk av nyere forskning og nyere teknologi.
- Det er ønskelig å bygge høyt i trekonstruksjoner pga. alle fordelene det gir med hensyn til miljø, byggetid, etc.

Ulempene med å fravike kan være:

- Økte kostnader for brannteknisk prosjektering.
- Lengre prosjekteringstid.
- Behov for mer kompetanse, stiller større krav til brannrådgiver.
- Kan være større usikkerhet.
- Større begrensninger for endringer i driftsfase.
- Kan kreve høyere kompetanse for eier i driftsfase.

4.2.2 Kompenserende tiltak

Det angis i TEK at «der et sett av preaksepterte ytelser må til for å oppfylle et funksjonskrav, vil reduksjoner i noen av ytelsene vanligvis kreve kompenserende tiltak for å opprettholde det samlede kravsnivået som følger av forskriften». Et kompenserende tiltak skal altså veie opp for det tiltaket som fjernes. Tidligere ble dette kalt «teknisk bytte».

Et kompenserende tiltak defineres som et «tiltak som iverksettes for å opprettholde brannsikkerhetsnivået ved fravik fra løsninger som er akseptert på forhånd» (1).

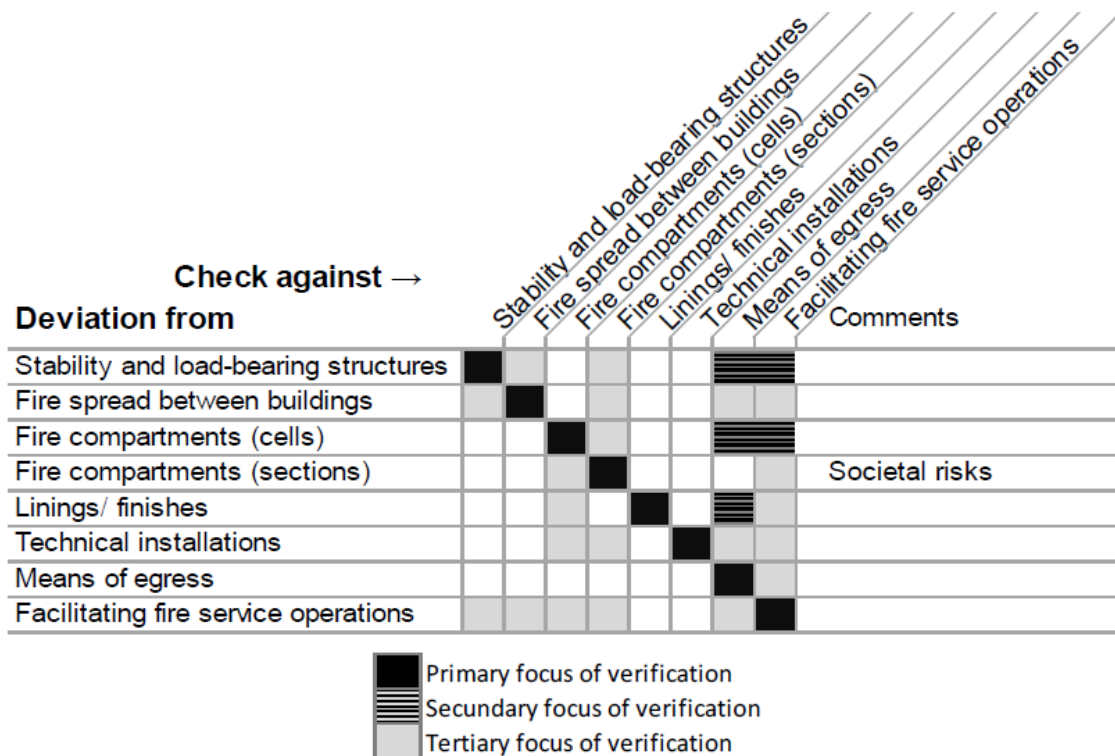
Behov for kompenserende tiltak er beskrevet i blant annet følgende litteratur:

- I TEK § 2-2 (42), for å opprettholde nødvendig sikkerhetsnivå, ved reduksjon av preaksepterte ytelser.
- I SN-INSTA/TS 950 (47), som angir at kompenserende tiltak ved fravik fra preaksepterte ytelser skal gi høyere eller likeverdig sikkerhetsnivå som det som fraviker ytelseskravet.
- I HO-3/2007 Prosjektering – brannsikkerhetsstrategi. Temarettleijing (46), som angir at fravik vanligvis må følges opp med alternative eller kompenserende tiltak, slik at brannsikkerheten holdes på det nivået som er fastsatt i TEK.
- I 321.026 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av brannsikkerhetsstrategi (48), som angir at det ved fravik i utgangspunktet må iverksettes kompenserende tiltak for å innfri funksjonskravet i TEK, i forbindelse med konsekvensanalyse.

HO-3/2007 er av DiBK lagt under eldre temaveiledninger som ikke er ajour med dagens byggeregler.

DiBK angir at temaveiledningen var gyldig før 2010, men at de utgåtte veiledningene kan være til nytte for å forstå dagens regelverk (49). Veiledningens formål er å gi kommunene et grunnlag for å *føre tilsyn med brannteknisk prosjektering på strateginivå (brannsikkerhetsstrategi)*, hvor de overordnede kravene i «forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk» (TEK97, som var gyldig da veiledningen ble utgitt i 2007) er oppfylte. Veiledningen er også et nyttig verktøy for brannteknisk prosjekterende, samt kontrollerende. Det er i TEK § 2-2 vist til 321.026 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av brannsikkerhetsstrategi, utgitt av Sintef Byggforsk (48). Dette dokumentet henviser videre til HO-3/2007.

Ved å angi et kompensierende tiltak må dette kunne veie opp for det samme sikkerhetsobjektet (preakseptert ytelse) som fravikes. Dette er illustrert i Figur 19, hentet fra SN-INSTA 950. Det kompensierende tiltaket må også kunne sammenlignes med egenskapene til tiltaket som utgår i fraviket. Disse egenskapene er angitt i HO-3/2007 og vist i Tabell 1. Videre er de benyttet i oppgaven for vurdering av de ulike kompensierende tiltakene som er angitt i de høye trebygningene som er gjennomgått.



Figur 19: Sammenheng mellom kompensierende tiltak og sikkerhetsobjektet som fravikes (47)

Tabell 1: Vurderingskriterier for kompenserende tiltak (46)

Egenskap/karakteristikk	Vurderingsbehov
Avhengighet av menneskelige handlinger	I hvilken grad er tiltakene avhengig av menneskelige handlinger for å fungere?
Kompleksitet	Vil brannsikkerheten bli basert på flere tiltak som må fungere som følge av dette? Flere avhengigheter? Dette vil øke kompleksiteten.
Fleksibilitet/redundans	Uttrykker i hvilken grad tiltaket kan føre til at målet oppnås. Vil redundansen være minst like god sammenlignet med tiltaket som er fjernet? Redundans oppnås når flere (uavhengige) tiltak medvirker til at det samme målet oppnås.
Følsomhet	Vurderes tiltaket å være mer følsomt for de forutsetninger (som bruksområde, virksomhet, brannenergi og persontall) og skjønnsmessige vurderinger som ligger til grunn for brannkonsept?
Sårbarhet	Vil det kompenserende og det fjernede tiltaket være ulike med hensyn til følsomhet? Er det lettere å sette ut av funksjon enn hva de preaksepterte tiltakene er (f. eks. ved strømbrudd?)
Pålitelighet	Er tiltaket like pålitelig med hensyn til å opprettholde sin funksjon gjennom hele bygningens livstid sammenliknet mot preaksepterte løsninger?

Det er flere dokumentasjonsmetoder som kan benyttes for å verifisere at fravik fra preaksepterte ytelser tilfredsstiller kravet i TEK, for eksempel:

- Kvalitativ metode (beskrivelse med ord) – vurdering av konsekvens av fraviket fra preaksepterte ytelser og av planlagte alternative eller kompenserende tiltak med hensyn til personsikkerhet, sikkerhet for slokkemannskaper og sikring av verdier. Dette kan eksempelvis være scenariobasert.
- Komparativ metode: Det aktuelle byggverket sammenlignes med et preakseptert referansebyggverk. Målet er å verifisere at det aktuelle byggverket har et høyere sikkerhetsnivå enn referansebyggverket. Kompenserende tiltak er nødvendig for å oppnå dette.
- Kvantitative metoder (beskrivelse med tall):
 - o Probabilistisk, f. eks. hendelsestre basert på statistiske data for hendelser og pålitelighet.
 - o Deterministisk (f. eks. simulering, beregning). Ved verifikasjon ved denne metoden kan det være mulig å oppnå akseptkriterium uten å benytte kompenserende tiltak.
- Risikoanalyse ved identifikasjon av uønskede hendelser og konsekvenser av disse.

Det er vanlig å dokumentere fravik ved kombinasjon av to eller flere metoder. I tillegg er det svært viktig å vurdere den totale brann sikkerheten når flere fravik er akseptert, sammenlignet med kompenserende tiltak.

4.2.3 Brannteknisk prosjektering og kontroll av utførelse

Ved oppføring av nye byggverk skal det utarbeides et brannkonsept, med utgangspunkt i kapittel 11 i VTEK. Brannkonseptet angir overordnede ytelser for videre detaljprosjektering av andre fag, som f. eks. byggrådgiver, arkitekt eller VVS-rådgiver. Brannkonseptet skal blant annet beskrive prosjektet, hva som er tiltaket, regelverket som legges til grunn og de branntekniske kravene som skal være gjeldende for det aktuelle byggverket. Forutsetninger som bruk, persontall, brannenergi, areal, etasjeantall, risikoklasse, brannklasse, seksjonering, plassering av bygget og brannvesenets innsatsmuligheter må alltid legges til grunn (48).

Brannkonseptet skal utarbeides av et foretak som er godkjent, enten i form av sentral godkjenning, eller ved at det søkes om godkjenning for det aktuelle tiltaket (lokal godkjenning). Foretaket må kunne dokumentere at de har kompetanse til å utføre brannteknisk prosjektering i aktuell tiltaksklasse. Tiltaksklassene er delt opp i tre ulike klasser, basert på kompleksitet, vanskelighetsgrad og mulige konsekvenser mangler og feil kan få for helse, miljø og sikkerhet (50). Ved brannteknisk prosjektering med løsninger som fraviker de preaksepterte ytelsene, vil tiltaket alltid plasseres i den høyeste klassen (tiltaksklasse 3). Dokumentasjonen av fravikene ved analyse vil være en del av brannkonseptet. I tiltaksklasse 2 og 3 vil det også være krav til uavhengig kontroll av brannkonseptet.

KUT brann (uavhengig kontroll av brannteknisk utførelse) er ikke et av de obligatoriske kravene, som det er ved kontroll av prosjektering. Byggesaksforskriften (SAK 10) angir at kommunene skjønnsmessig kan kreve uavhengig kontroll av utførelse, for eksempel der hvor kommunen ønsker særlig oppmerksomhet på brannsikring. Dersom det ikke kreves uavhengig kontroll, vil det kun være utførende, som uansett har et kontrollansvar, som kontrollerer det de selv har gjort.

4.3 Aktuelle funksjonskrav og veiledningskrav

4.3.1 Bæresystem

TEK § 11-4 omhandler bæreevne og stabilitet. Følgende relevante krav er angitt:

- 1) Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at byggverket som helhet, og de enkelte delene av byggverket, har tilfredsstillende sikkerhet med hensyn til bæreevne og stabilitet.
- 2) Ved dimensjonering for tilfredsstillende bæreevne og stabilitet ved brann skal det medregnes termisk påkjenning fra den brannenergien og det brannforløpet som kan forventes i byggverket.
- 3) Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres (42).

Veiledningen angir at hovedformålet med å stille branntekniske krav til bærende konstruksjoner er å oppnå tilstrekkelig bæreevne og stabilitet til å motstå en forventet brannpåkjenning slik at byggverket ikke styrter sammen under brann, men bevarer sin stabilitet og bæreevne i nødvendig tid for rømning, redning og slokking. Det er angitt at for beregningsmessig påvisning av bæreevne under brann kan brannenergi beregnes eller bestemmes på grunnlag av relevant anerkjent statistikk i samsvar med NS-EN 1991-1-2:2002+NA:2008: Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 1-2: Allmenne laster på konstruksjoner ved brann (2).

VTEK angir at bærende bygningsdelers brannmotstand for bygninger i brannklasse 3 skal ha bærende hovedsystem som tilfredsstillende R 90 A2-s1,d0 [A 90], altså skal ubrennbare materialer benyttes. Videre angis at ved konstruksjonsdeler som må ha brannmotstand R 90 eller høyere, må det brukes en dimensjonerende brannenergi der karakteristisk brannenergi multipliseres med faktoren 1,5. Faktoren på 1,5 samsvarer med overgangen fra brannmotstand R 60 til R 90 ved bruk av preaksepterte ytelser. I tillegg angis det at for bærende hovedsystem i byggverk i brannklasse 4 må det ved beregning dokumenteres tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp.

Det vises til kapittel 2.3.3 for beskrivelse av dimensjonering av trekonstruksjoner.

4.3.2 Branncellebegrensende konstruksjoner

TEK § 11-8 Brannceller angir følgende:

- 1) Byggverk skal deles opp i brannceller på en hensiktsmessig måte. Områder med ulik risiko for liv og helse, eller ulik fare for at brann oppstår, skal være egne brannceller med mindre andre tiltak gir likeverdig sikkerhet.
- 2) Brannceller skal være utført slik at de forhindrer spredning av brann og branngasser til andre brannceller i den tiden som er nødvendig for rømning og redning.

De preaksepterte ytelsene angir at branncellebegrensende bygningsdel i brannklasse 3 skal tilfredsstillе EI 60 A2-s1,d0 [A 60], noe som betyr at ubrennbare materialer skal benyttes. I massivtrebygg er vanligvis selve massivtreelementet den branncellebegrensende konstruksjonen. Dette medfører et fravik fra VTEK som må dokumenteres og kompenseres av ansvarlig prosjekterende.

4.3.3 Overflate/kledning

TEK § 11-9 Materialer og produkters egenskaper ved brann angir følgende:

- 1) Byggverk skal prosjekteres og utføres slik at det er liten sannsynlighet for at brann skal oppstå, utvikle, og spre seg. Det skal tas hensyn til byggverkets bruk og den nødvendige tiden for rømning og redning.
- 2) 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.

Iht. VTEK skal overflater på vegger og i himling tak i brannceller over 200 m² tilfredsstillе B-s1,d0 [In1] på kledning K₂10 B-s1,d0 [K1]. Massivtre vil kun tilfredsstillе overflatekrav D-s2,d0 [In2] på kledningskrav K₂10 D-s2,d0 [K2], noe som vil være preakseptert i brannceller under 200 m² (med unntak av virksomhet i risikoklasse 6). I rømningsveier er kravet til kledning strengere, K₂10 A2-s1,d0 [K1-A].

Det er ofte ønskelig med synlige trekonstruksjoner. Dette må i hvert tilfelle vurderes av brannteknisk prosjekterende, og dokumenteres som fravik.

Utvendige overflater på ytterkledning skal i henhold til preaksepterte ytelser tilfredsstillende B-s3,d0 [Ut1] for bygg i brannklasse 3. VTEK presiserer at overflater i hulrom i ytterveggskonstruksjoner betraktes på samme måte som utvendig overflate og må ha minst like gode branntekniske egenskaper. Trekledning vil ikke tilfredsstillende dette, med mindre det er trykkimpregnert med brannimpregnering. Ved bruk av massivtreelementer i yttervegg, vil det også være brennbare materialer i hulrommet i ytterveggskonstruksjonen.

Det vurderes nå fra DiBK å øke preakseptert ytelse for utvendige overflater fra klasse B-s3,d0 til klasse A2-s1,d0 i byggverk med flere enn åtte etasjer i risikoklasse 1, 2 og 4, samt i byggverk med mer enn fire etasjer i risikoklasse 3, 5 og 6. Dette er basert på en utredning om kledninger og overflater utført av RISE Fire Research, på oppdrag for DiBK (51).

4.4 Regelverk i andre land

For sammenligning av regelverk er det i hovedsak sett på de landene hvor de gjennomgåtte casene er plassert, men også andre land hvor det bygges høye trehus. Hensikten med dette er å se på ulikheter i sikkerhetsnivå. For bærende konstruksjoner er det tatt med flere land, da dette vil være av størst betydning. Alle de undersøkte landene har funksjonsbasert regelverk og et sett med preaksepterte ytelser som kan fravikes med alternative løsninger. Regelverkene baserer seg på ulike former for brannklasser, basert på bruk av bygget, og antall etasjer.

Krav til omfang av branncelleinndeling er i hovedsak lik som for bæresystemet i de fleste land. Der bæresystemet tillater brennbare konstruksjoner, tillates også dette i branncellebegrensende konstruksjoner. Kravet til brannmotstandstid for branncellebegrensende konstruksjoner følger ofte det samme kravet som til bæresystemet. Noen land har begrensninger på størrelse på branncelle, dette finnes ikke i Norge.

4.4.1 Canada

I Canada gjelder National Building Code of Canada 2015 (NBC) for branntekniske krav. National Fire Code 2015 (NFC) (52) angir få spesifikke ytelser og henviser i stor grad til NBC. De ulike provinsene har i tillegg egne regelverk å forholde seg til. Regelverket er bygd opp etter følgende hierarki:

Division A: Funksjonskrav (Compliance, Objectives and Functional Statements)

Division B: Preaksepterte løsninger (Acceptable Solutions)

Division C: Provinsbaserte løsninger (Administrative Provisions)

På samme måte som i Norge angir de preaksepterte løsningene et minimumsnivå, som kan erstattes med alternative løsninger dersom det kan verifiseres at de har et minst like høyt sikkerhetsnivå. Mulighet for alternative løsninger ble introdusert i 2005 i Canada.

«Objectives» angir krav på et svært overordnet nivå: «Et mål er å begrense sannsynligheten for, som et resultat av spesielle omstendigheter relatert til byggverket, at byggverket skal bli eksponert for uakseptabel risiko for skade som følge av brann. Videre angis noe mer spesifikt at dette gjelder som følge av aktivitet, forholdene rundt spesifikke elementer av byggverket, design av konstruksjoner av spesifikke elementer relatert til spesielle farer, eller utilstrekkelige innebygde tiltak for den nåværende eller planlagte bruken av byggverket. Disse risikoene vil være som følge av brann eller eksplosjon i byggverket eller i nærheten, kollaps av konstruksjoner som følge av brann eller eksplosjon, eller branntekniske installasjoner som ikke fungerer som forventet». Videre skal «functional statements» beskrive forhold i byggverket for å bidra til å tilfredsstillende målene. To eksempler på dette er «å redusere svikt eller kollaps som følge av brann», og «å begrense effekten av brann og eksplosjon» (52).

For provinsen Quebec i Canada er det utarbeidet en egen veiledning for bygninger i trekonstruksjoner i opptil 12 etasjer, Mass Timber Buildings of up to 12 storeys (53).

Fram til 2015 var det preakseptert tillatt høyst fire etasjer i trekonstruksjoner, dersom sprinklet bygg, og maksimalt tre etasjer i usprinklede bygg. Enkelte provinser tillot inntil seks etasjer dersom bygget sprinkles. Det ble gjennomført en endring til maksimalt seks etasjer i 2015. I den forbindelse ble det også innført økte krav med hensyn til risiko for skade ved brann og strukturell kollaps, både i ferdig bygg og i byggefase (54). Det kan bygges høyere ved å benytte seg av alternative løsninger (55). Det kreves minst to timer brannmotstand på branncellebegrensende konstruksjoner. Bæresystem må minst ivareta dette for understøtting av konstruksjoner.

Gjeldende versjon av British Columbia Building Code tillater å bygge brennbare konstruksjoner i bygninger med inntil seks etasjer/18 meters høyde dersom maksimalt areal er 1200 m² og bygget sprinkles (56).

Mass Timber Buildings of up to 12 storeys (53) angir krav til brannmotstand for bæresystem på minst to timer. Det samme gjelder for branncellebegrensning i etasjeskiller. I tillegg skal bærende massivtrekonstruksjoner være innkledd med minst to lag branngips. Tekniske sjakter skal være i ubrennbare konstruksjoner og ha en brannmotstand på minst to timer. Det tillates massivtre i trapperom og heissjakter, disse skal ha minst samme brannmotstand på vegger som de dekkene de krysser. Byggene skal fullsprinkles iht. NFPA 13.

Det stilles ingen spesifikke funksjonskrav som omhandler krav til kledninger, men det er angitt at «effekten av brann skal hindres i arealer utenom antennelsesstedet». Det stilles ikke krav til ubrennbar kledning i bygg med virksomhet for bolig og kontor, med unntak av i himling og i rømningsveier (55).

Minst 90 % av utvendig kledning på hver yttervegg skal bestå av ubrennbare materialer i byggverk over tre etasjer, alternativt kan bygget sprinkles.

4.4.2 Østerrike

Østerrike har på tilsvarende måte funksjonskrav og preaksepterte løsninger som i Norge. Delstatene har ulike byggeforskrifter. De preaksepterte løsningene er angitt i veiledninger kalt OIB, men bruk av disse varierer i ulike delstater. OIB Richtlinie 2 gjelder for branntekniske ytelser, og det er en egen veiledning for brannsikkerhet i bygninger hvor høyde på rømningsvei er over 22 m (OIB-Richtlinie 2.3 fra 2015). Dersom høyde på rømningsvei er over 90 m, må det gjøres en særskilt vurdering med et spesielt fokus på persontall, rømningsveier, angrepsforhold for brannvesen, bruk og miljø (57).

Konstruksjoner i bygninger med over seks etasjer skal preakseptert tilfredsstillende REI 90 og A2 (øverste etasje kan ha REI 60). I byggverk opp til seks etasjer tillater preaksepterte ytelser trekonstruksjoner, men det kan oppføres høyere bygninger i kombinasjon med andre konstruksjoner som ivaretar brannsikkerhet. For trehus over seks etasjer gir regelverket mulighet for en spesiell bygningstillatelse hvis byggverket fullsprinkles eller om bærende konstruksjoner er tildekket med ubrennbare materialer som tilsvarer REI 90. Delstatene har ulike byggeforskrifter, men generelt gjelder at bæresystemet skal være konstruert på en slik måte at det tåler lasten i tilfelle brann i den tid som er nødvendig for å rømme og redde mennesker. Aktuelle omstendigheter for sikker rømning og redning må vurderes.

Utvendig fasade skal være utført i ubrennbare materialer. Dette gjelder også vegger og himling i rømningsveier, samt rekkverk og gulvbelegg (57). OIB angir ikke særskilte krav for innvendige overflater og kledninger, altså kan trekledning benyttes i brannceller som ikke er rømningsvei.

4.4.3 England

Building Regulation 2010 Part B: Fire Safety. Volume 1 – Dwelling houses og Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses (58) gjelder for brannteknisk prosjektering. Volume 1 gjelder for boligbygg, men i noen tilfeller, for eksempel bygninger over 18 meter, vil Volume 1 måtte komplementeres av Volume 2. Preaksepterte løsninger angis i Approved Document, disse skal følges så langt bygget passer. Det er angitt at alternative løsninger bør være iht. andre regelverk eller veiledninger, og at dette ikke bør blandes. Britiske standarder kan benyttes som supplement eller alternativ til Approved Documents. Det er mulig å bruke alternative løsninger ved brannrådgivning. British Standard BS 7974 Fire safety engineering in buildings og supporting publishing documents (PD) skal legges til grunn. Disse angir rammeverk og veiledning for brannteknisk prosjektering og vurderinger av branntekniske løsninger.

Funksjonskravet for bæresystem angir at byggverket skal prosjekteres og bygges slik at i tilfelle brann, vil dets stabilitet være ivaretatt i akseptabel tid. De preaksepterte ytelsene angir at funksjonskravet vil være ivaretatt dersom bæresystemet kan motstå effekten av brann i en passende tid uten tap av stabilitet. Bæresystem i bygninger over 30 meter skal tilfredsstillende minst R 120, men det stilles ikke krav til ubrennbare konstruksjoner. For bygninger mellom 18 og 30 meter er kravet R 90. Boliger, kontorbygg og kommersielle bygninger over 30 meter må også sprinkles (58).

Funksjonskrav for kledning angir at for å hindre spredning av brann i en bygning, må innvendig kledning tilfredsstillende motstå flammespredning over overflate og ha, dersom antent, en varmetapsrate for brannutvikling som er akseptabel innenfor omstendighetene.

Preaksepterte ytelser angir at trekledning kan benyttes på vegg og i himling i små rom (maks 4 m² i bolig og maks 30 m² i rom som ikke er i tilknytning til bolig). Trekledning kan også benyttes i øvrige rom dersom arealet ikke overstiger halve gulvarealet i rommet og uansett maksimalt 20 m² i bolig og 60 m² i rom som ikke er bolig (gjelder ikke rømningsvei).

Utvendig kledning på byggverk over 18 meter skal tilfredsstillende minst B-s3,d0 dersom det er kortere enn 1 m til nabobygg. Større avstand tillater at kledning med klasse C-s3,d0, alternativt trekledning med maksimal tykkelse 9 mm, kan benyttes opp til 18 m. Øvrige etasjer må ha B-s3,d0 (58).

4.4.4 Australia

Brannteknisk prosjektering reguleres i Australia av National Construction Code (NCC 2016), som angir såkalte Deemed-to-satisfy Provisions, tilsvarende preaksepterte løsninger i Norge. De preaksepterte løsningene angis av såkalte inspektører, mens brannrådgivere først kommer inn i byggeprosjektene for å vurdere alternative løsninger, først og fremst som kostnadsbesparende tiltak. Brannrådgivere kan dokumentere alternative løsninger (Deemed-to-satisfy Solutions), så lenge de tilfredsstillers funksjonskravet (kalt Performance Requirements) (59).

Funksjonskrav for bæresystem angir at en bygning må ha elementer som, i nødvendig grad, ivaretar strukturell stabilitet ved en brann med hensyn til funksjonen/bruk av en bygning, brannenergi, potensiell brannintensitet, brannfare, byggets høyde, nærhet til andre bygninger, aktiv brannbeskyttelse installert i bygget, størrelsen på brannceller, brannvesenets innsats, andre elementer de understøtter, og evakueringstid (60).

Det australske regelverket er endret i senere tid for bygging av høye trehus, under forutsetning av sprinkling og innkledning av trekonstruksjoner med branngips. Der det er ønskelig med synlig tre, oppdimensjoneres dette. Fra 2016 tillates det preakseptert opp til 25 m/8 etasjer i trekonstruksjoner, forutsatt at bygget er sprinklet. Tidligere var begrensningen på tre etasjer.

Nødvendig brannmotstand på bærende konstruksjoner avhenger av om det er yttervegg eller innervegg, og type bygg. Eksempelvis vil det være krav til bærende innervegger R 90 for et høyt boligbygg, og R 120 for et kontorbygg. Brannmotstand på bærende yttervegger avhenger av avstand fra brannkilde til andre bygningsdeler og andre bygninger (61).

Funksjonskravet angir at kledningen må motstå brannvekst og begrense utviklingen av røyk, varme og giftige gasser i nødvendig tid for rømning, sett i sammenheng med bruken av bygget og de aktive tiltakene som er installert. Det kreves en vurdering av avstand for forflytning, bygningens utforming, brannenergi, potensiell brannintensitet og risiko og mulighet for brannvesenets innsats.

Preaksepterte ytelseskrav til innvendig kledning avhenger av om bygget er sprinklet eller ikke, og hvilken type areal det gjelder. Det stilles strengest krav til utganger til det fri, hvor kun ubrennbare kledninger på vegger og i himling tillates. For korridorer i boligbygg og kontorbygg tillates både gruppe 1 (f. eks. gips, betong, etc.), 2 (f. eks. brannimpregnert tre) og 3 (f. eks. ubehandlet tre) i sprinklede bygg, men kun gruppe 1 og 2 i bygg uten sprinkler. I korridorer tillates gruppe 1 og 2 i usprinklede bygg.

I leiligheter tillates gruppe 1, 2 og 3 uavhengig av sprinkleranlegg, mens kravet er strengere i himling i kontorbygg, der tillates kun gruppe 1 og 2. Krav til kledningens røykproduksjon stilles kun i usprinklede bygg (62).

Det stilles krav til at utvendig kledning i alle typer bygg med mer enn fire etasjer skal være ubrennbar (63).

4.4.5 Sverige

Brannteknisk prosjektering utføres iht. Boverkets byggregler. BBR – BFS 2011:6. Denne er basert på forskriftskrav (tilsvarende funksjonskrav) og Allmänt råd (tilsvarende preaksepterte løsninger). Allmänna råd kan fravikes så lenge det dokumenteres at forskriftskravet er ivaretatt.

Funksjonskravene for bæresystem angir at bygningsdeler skal utføres basert på brannsikkerhetsklasser utfra risiko for personskader under et brannforløp. Blant annet skal det tas hensyn til risiko for at evakuerende og redningspersonell blir i området, og påvirkningen av funksjoner i byggverket som har vesentlig betydning for rømnings- og innsatsmuligheter. Det stilles i utgangspunktet ikke krav til at bæresystemet skal stå i et fullstendig brannforløp, med mindre dimensjonering utføres basert på modellering av naturlig brannforløp. Bygningsdeler i høye bygninger skal da dimensjoneres for et fullstendig brannforløp med 50 % økt brannenergi inkludert avkjøling i brannsikkerhetsklasse 4 (64).

Preaksepterte ytelser angir ingen spesifikk høydebegrensning, så lenge nødvendig brannmotstand på bygningskonstruksjonene kan oppnås (27). Det stilles ikke krav til ubrennbare konstruksjoner.

Preaksepterte ytelse R 90 kan reduseres til R 60 dersom bygget sprinkles med et ordinært sprinkleranlegg (boligsprinkler er iht. veiledningen ikke tilstrekkelig) (65).

Utvendig kledning kan være brennbar dersom bygget er sprinklet, og nederste etasje har ubrennbar kledning. I usprinklet bygg kan inntil 20 % av fasaden i hver etasje være brennbar.

I brannklasse 1 (bygninger over tre etasjer) bør himlingskledning være ubrennbar, uansett størrelse på brannceller. Kledning på vegg skal ha minst C-s2,d0, noe som betyr at tre ikke kan benyttes uten at det gjøres en særskilt vurdering. I rømningsveier må kledning tilfredsstillende minst A2-s1,d0 eller K₂10/B-s1,d0 (66).

4.4.6 USA

Standarder utgitt av NFPA legges til grunn for prosjektering. Regelverket er bygd opp med generelle krav, funksjonskrav og preaksepterte løsninger. Bygningsmyndighetene må avgjøre om de alternative løsningene som er angitt er minst like gode som de preaksepterte. Høye bygninger (high-rise buildings) for bruk til kontor eller helse defineres som høyde på mer enn 23 m fra terreng til etasjeskille på øverste etasje. Boligbygg defineres som høye bygninger når de har mer enn seks etasjer. Høye bygninger skal sprinkles (67).

Funksjonskravet angir at bygninger skal være prosjektert og bygget for å akseptabelt forebygge strukturell svikt ved brann i den tid som er tilstrekkelig for å beskytte personer som oppholder seg i bygget, slökkemansker og redningsmannskaper for søk- og redningsoperasjoner (68).

Preaksepterte ytelser angir at bygninger for kontor/næring kan oppføres i inntil fem etasjer med tunge trekonstruksjoner. Boligbygg kan oppføres i inntil fire etasjer, forutsatt tunge trekonstruksjoner (27). Begge kan økes med én etasje dersom det sprinkles. Bæresystemet må tilfredsstille to timers brannmotstand (68). Enkelte stater/byer i USA har lokale myndigheter som tillater høyere bygninger i tre (69). Høye bygninger skal ha ubrennbart bæresystem.

Kledningsklassene for innvendig kledning på vegger og himling er basert på flammespredningsindex (røykutviklingsindex er lik i alle klasser) iht. ASTM E84 eller UL 783. Materialer grupperes i tre klasser; A, B og C, hvor A har den laveste flammespredningen. Klasse C tillates i brannceller, mens det kreves A i rømningsveier. Det er mulig å redusere til et nivå lavere når bygget er sprinklet (68). Tre vil oppnå B eller C, avhengig av hvilken tresort det er. Massivtre vil oppnå B (70).

Yttervegger med to timers brannmotstand kan bygges i brennbare materialer.

4.4.7 Andre land

Spania: Ingen spesifikk høydebegrensning, så lenge nødvendig brannmotstand på bygningskonstruksjonene kan oppnås (69).

Tyskland: Bygninger over 22 m regnes som høye bygninger, og må da oppføres i ubrennbare konstruksjoner (69).

New Zealand: Ingen spesifikk høydebegrensning, så lenge nødvendig brannmotstand på bygningskonstruksjonene kan oppnås (69).

Danmark: Funksjonskrav inneholder ingen begrensninger for bruk av tre. I bygningsreglementet (preaksepterte løsninger), tillates inntil fire etasjer dersom det sprinkles, eller kledning tilfredstiller K₂60/A2-s1,d0 (27).

Finland: Høyst 8 etasjer dersom sprinklet, og høyst to etasjer dersom usprinklet, med bærekonstruksjoner i tre (27).

4.5 Oppsummering/refleksjon

Regelverket i de landene som er gjennomgått, er i stor grad basert på funksjonskrav som *må* tilfredsstilles, og preaksepterte ytelser som kan fravikes gitt at valgt løsning tilfredsstiller et minst like høyt sikkerhetsnivå. Funksjonskravene er svært generelle, noe som også er en vanlig oppfatning av de norske funksjonskravene. Likevel er det ett forhold som skiller seg ut, nemlig kravet i Norge om at bærende hovedsystem i brannklasse 3 skal dimensjoneres for et fullstendig brannforløp. Tilfredsstillelse av dette forskriftskravet er en utfordring ved eksponerte massivtrekonstruksjoner.

Ingen av de andre landene er så spesifikke, men benytter i stedet begreper som «i nødvendig grad», eller at «stabilitet skal være ivaretatt i akseptabel tid». Dette gir stort rom for tolkning. Kun dersom trekonstruksjonene dimensjoneres ved å utføre beregninger for naturlig brann, for eksempel iht. Tillegg A i Eurokode 5, vil det være nødvendig å gjøre en vurdering på om konstruksjonene vil stå i et fullstendig brannforløp i andre europeiske land.

Det er ingen begrensninger i regelverkene for hvor høyt det kan bygges i ubrennbare materialer, som stål og betong. Enkelte land har innført sprinklerkrav når et byggverk overskrider et visst antall etasjer. Iht. NFPA 101 skal for eksempel bygninger over 23 m i USA sprinkles, uansett bruk. I Norge er det ingen krav til sprinkler som følge av høyde, kun med bakgrunn i bruk. Et høyt boligbygg må sprinkles uansett bygningskonstruksjoner, mens et kontorbygg i seg selv ikke vil medføre sprinklerkrav, uansett høyde.

Canada og Australia har i den senere tid økt antall etasjer som preakseptert kan bygges i trekonstruksjoner, og i Norge vurderes det å gjøre det samme. I England og Sverige er det ingen preakseptert begrensning for antall etasjer ved bruk av brennbare konstruksjoner, så lenge brannmotstanden er ivaretatt. Bruk av brennbare konstruksjoner er dermed ikke noe som må vurderes særskilt, noe som kan medføre at konsekvensene av dette ikke blir vurdert godt nok i alle byggverk.

Av de undersøkte landene er Sverige minst konservative, da de både tillater ubegrenset høyde i brennbare konstruksjoner, og at det aksepteres at brannmotstanden på bæresystemet kan reduseres til R 60 dersom bygget er sprinklet. Dette vil gi kort tid for brannvesenets slokkeinnsats i tilfelle sprinklersvikt. Også utvendig fasade kan i Sverige utføres som brennbar uten høydebegrensning, så lenge bygget er sprinklet, og det er ubrennbar fasade i plan 1.

Det er ikke noe forbud mot å prosjektere med løsninger som er utover de preaksepterte, og i et høyt trebygg vil muligens ikke funksjonskravene være ivaretatt. Dette avhenger av i hvilken grad man legger til grunn at sprinkleranlegget fungerer ved prosjektering. Foreløpig er det ikke oppført bygninger over åtte etasjer i trekonstruksjoner i Sverige, men flere prosjekter er på tegnebrettet i en tidlig fase. Det vites derfor ikke hvordan dette vil bli løst i praksis.

På den andre siden er Norge det mest konservative landet når det kommer til preaksepterte løsninger, da det kun tillates inntil fire etasjer i brennbare konstruksjoner. Likevel er vi i Norge blant de landene som strekker oss lengst når det gjelder byggehøyde og trehus. Dette krever et høyt kompetansenivå av de involverte i prosjektet, både på konstruksjonsteknikk og brannteknikk.

Både i Canada og i Østerrike stilles det kun krav til innvendig kledning i rømningsvei, mens det tillates trekledning i brannceller utenom dette, uansett størrelse. I England er de noe mer konservative, da de tillater trekledning i et visst omfang, uavhengig av størrelse på branncelle. Dette synes å være en fornuftig løsning, da det ofte er ønskelig med trekledning på kun deler av veggene. Dette utgjør gjerne lite dersom det sammenlignes med den mobile brannenergien i bygget. Preaksepterte ytelser i Australia og USA avhenger av om bygget er sprinklet eller ikke, noe som også har vært oppe til høring i Norge i forbindelse med TEK17, men som ikke ble gjennomført (71).

I Norge skilles det ikke på krav til kledning til vegg eller himling, til tross for at det er et velkjent faktum at det kan utgjøre en stor forskjell i tid til overtenning med ubrennbar himling, selv om det er trekledning på vegger. I Sverige anbefales det at himling er ubrennbar, uansett hvor stor branncellen er. Dette synes å være fornuftig. Sverige er også mer konservativ når det kommer til kledning på vegger, da tre ikke vil ivareta det preaksepterte ytelseskravet.

I Canada og i Sverige kan utvendig kledning preakseptert utføres i tre dersom bygget sprinkles. I Sverige er det i tillegg et ekstra krav til ubrennbar kledning i 1. etasje for å ivareta sikkerheten da det er økt risiko for utvendig brannstart på bakkeplan. I Østerrike og i Australia skal fasade være ubrennbar i høye bygninger, mens det i England avhenger av avstanden til nabobygg. I Norge har vi krav til begrenset brennbar kledning, uten at det lempes ved sprinkling. Ved at det nå vurderes å redusere preakseptert løsning til ubrennbar kledning i høyere byggverk, vil det altså bli vanskeligere å estetisk synliggjøre at de høye trehusene faktisk er bygd av tre.

5 Casestudium

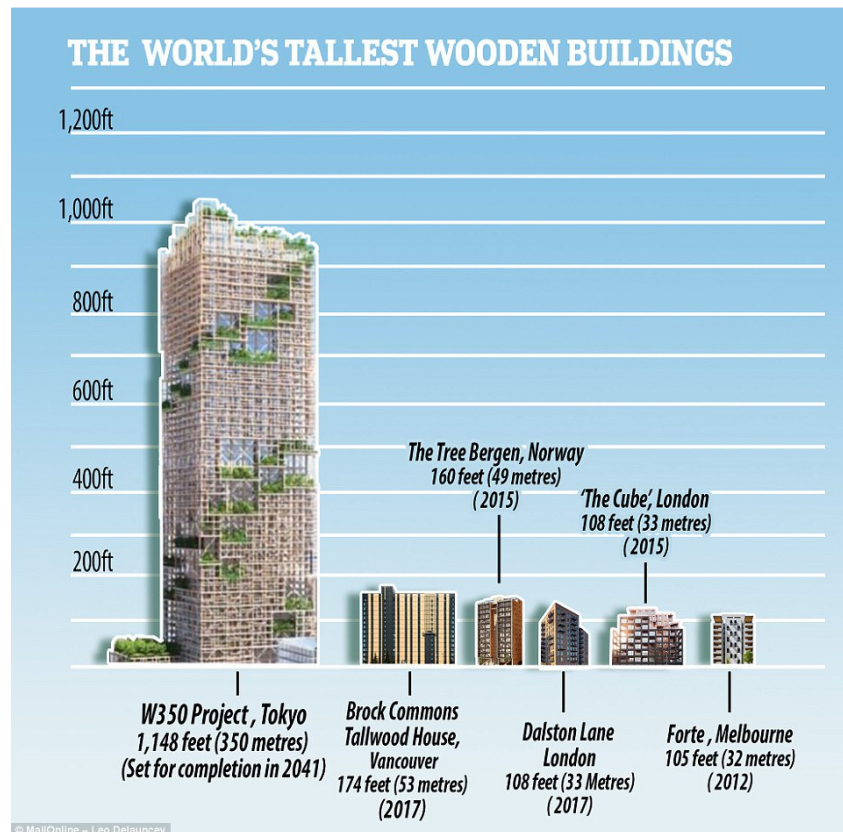
Trenden med å bygge høyere i trekonstruksjoner foregår ikke bare i Norge. Seks ulike bygg i fire ulike land er gjennomgått, for å se på hvordan byggene er prosjektert, og hvordan de branntekniske utfordringene er ivaretatt. Synet på hva som er nødvendig sikkerhetsnivå vil variere, og det er lærerikt å se hva som er gjort andre steder. De valgte løsningene er sammenlignet med det branntekniske regelverket i de respektive land.

5.1 Overblikk

Norge har vært et foregangsland når det gjelder å bygge høyt i trekonstruksjoner. Treet i Bergen var ved ferdigstillelse i 2015 påstått å være verdens høyeste trehus med sine 14 etasjer. I Brumunddal hevdes det at Mjøstårnet med sine 84 meter skal bli verdens høyeste trehus, til tross for at det i Wien, Østerrike vil stå ferdig et trehus med samme høyde i 2018. Likevel påstås det i Australia at deres kontorbygg i Brisbane med 10 etasjer er verdens høyeste. Forskjellen er at de ulike aktørene definerer trehus ulikt. Trehus er lette, og Mjøstårnet må derfor bygges med de øverste dekkene i betong, for at bygget skal kunne unngå for mye svingninger i de høyeste etasjene ved vind. Bygget HoHo i Wien har kun 75 % av bygningskonstruksjonene i tre, da de har heissjakter og trappesjakter i betong. I Brisbane er de ni øverste etasjene i tre, uten stabilisering av betong, derfor hevdes det at dette er verdens høyeste. I Kina finnes et gammelt tempel fra 1056, bygget kun i trekonstruksjoner. Yingxian Pagoda i provinsen Shanxi i Nord-Kina er 67 meter høyt, og slår dermed både «verdens høyeste trehus» i Bergen og i Brisbane (72).

Flere land enn Norge, Østerrike og Australia har kommet langt når det gjelder bygging av trehus. Også i Canada, USA, Nederland og Storbritannia bygges det høyt, og det er store planer for framtiden.

I Paris planlegges byggeprosjektet Baobab med 35 etasjer, mens Oakwood Tower i London kan bli 80 etasjer. I Tokyo ble det nylig lansert planer om å bygge 70 etasjer i trekonstruksjoner, men dette vil i tilfelle ikke skje før i 2041 (illustrert i Figur 20). Disse prosjektene er ennå i konseptfasen, og det gjenstår å se hva som faktisk vil skje de neste årene og hvor langt det kan gå.



Figur 20: Konseptbygget W350 i Tokyo, sammenlignet med noen av dagens høyeste trehus (73)

Det er i oppgaven valgt å se på seks ulike bygninger for å se på hvilke kompensereende tiltak som er benyttet. Tiltakene er forklart og vurdert i kapittel 6. Siden Norge foreløpig har kommet lengst med bygging av høye trehus, er det tatt med tre eksempler fra Norge. I tillegg er de høyeste trehusene i Canada, Østerrike og i Storbritannia tatt med. Dette er vurdert som et representativt utvalg. Disse byggene er:

- Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Canada (studenthybler)
- Moholt 50/50, Trondheim, Norge (studenthybler)
- Treet, Bergen, Norge (leiligheter)
- Mjøstårnet, Brumunddal, Norge (kontor, hotell og leiligheter)
- HoHo, Wien, Østerrike (kontorer)
- Dalston Lane, London (næringsareal og boliger)

5.2 Brock Commons, Vancouver, Canada

Høyde: 53 meter

Antall etasjer: 18

Bruk: Studentboliger (405 studenter). Forsamlingslokale i 1. og 18. etasje.

Totalt areal: 15 115 m²

Byggeår: 2016-2017

Byggekostnad: 51,5 mill. kanadiske dollar (74)

Regelverk: British Columbia Building Code 2012 (for provinsen British Columbia, basert på The National Building Code of Canada), med tilhørende British Columbia Fire Code 2012. Bygget er klassifisert som «Group C (residential) major occupancy». I forbindelse med prosjekteringen ble det opprettet et ekspertpanel som sammen jobbet for å ivareta brannsikkerheten for bygget. Gruppen besto blant annet av brannrådgivere, forskere, brannvesen, byggingeniører, bygningsråd og bygningsmyndigheter.

Byggemåte: 1. etasje er oppført i betongkonstruksjoner, i tillegg er det oppført to betongkjerne for trapperom. 17 etasjer i massivtre (dekker og vegger) stabilisert med limtresøyler. Det er påstøp i betong over dekker pga. lyd. Fasade er utført med en stålramme, med kledning som er laget av 70 % trefiber.

Takkonstruksjon er utført i stål. Bygget er fullsprinklet iht. NFPA 13 (56) og vist i Figur 21.



Figur 21: Brock Commons (75)

Fravik:

- Bæresystem i brennbare konstruksjoner.
- Brennbare branncellebegrensende konstruksjoner.
- Synlige trekonstruksjoner i lounge i øverste etasje.
- Synlig himling i tre i 1. og 18. etasje (dekke over 1. etasje er i betong).

Kompenserende tiltak:

- Alle trekonstruksjoner (limtre og massivtre) er innkledd med tre til fire lag branngips (med unntak øverste etasje). Dette gir to timers brannmotstand for dekker, trapperom og vertikale sjakter, og én times brannmotstand mellom hybler og korridor. Trapperommene er i betong. Tekniske rom er plassert i 1. etasje, som er oppført i betong.
- Vannreservoar dimensjonert for 30 minutter (20 000 liter) er etablert som ekstra vannforsyning for sprinkleranlegget, i tillegg til at det er påkoblet vannledningsnett. Pumpe for vannreservoaret er tilkoblet et nødstrømsanlegg. Sprinkleranlegget er overvåket både elektrisk og ved monitor for brannvesenet.
- Utvendig sprinkling over inngangsparti.
- Det er etablert våtopplegg med påkobling for brannvesenet i trapperom, men dette er standard i høye bygninger i Nord-Amerika. (iht. NFPA 14).
- Det er etablert overtrykk i trapperom, utløst på deteksjon.
- Branncellebegrensende konstruksjoner med to timers brannmotstand mot øverste etasje. Vindussprinkler på begge sider og herdet glass i brannskille mellom korridor og lounge i samme etasje.
- Sprinkling over og under trehimling i plan 1 og 18 (76).

Refleksjon

Gjeldende regelverk i British Columbia tillater opptil seks etasjer i sprinklede trebygninger. Bygget har altså tre ganger så stor høyde som den preaksepterte løsningen, noe som er et svært omfattende fravik. Det stilles ikke klare funksjonskrav til stabiliteten av bæresystemet i Canada. Høyde er kompensert med økte pålitelighetstiltak på sprinkler, og det er kledd inn med tilstrekkelig antall lag med gips som beskytter trekonstruksjonene i minst to timer, tilsvarende som er kravet til bæreevnen på konstruksjonene. Massivtreelementene vil dermed ikke bli eksponert, selv ved sprinklersvikt. Filosofien om kompensere tiltak er at det skal oppnås like god sikkerhet som preakseptert løsning. Eksponert massivtre i øverste etasje vil ikke påvirke underliggende konstruksjoner, og vil derfor ikke medføre kollaps av byggverket i tilfelle et lengre brannforløp. Sikkerhetsnivået synes å være tilfredsstillende ivaretatt.

5.3 Moholt 50/50, Trondheim, Norge

Høyde: 27 meter

Antall etasjer: 9 etasjer i fem blokker

Bruk: Studentboliger i plan 2-9, boder i kjeller, ulike virksomheter i plan 1 i de forskjellige blokkene, som legekontor, treningssenter og næringsareal. Totalt 632 hybelenheter

Totalt areal: ca. 17 500 m² (380 m² per etasje i blokkene)

Byggeår: 2016-2017

Byggekostnad: 450 millioner kr. (77)

Regelverk: TEK10

Byggemåte: Betong i kjeller og plan 1, alle konstruksjoner i plan 2-9 i massivtre. Ubehandlet trekledning på fasade. Hver etasje inneholder 15 studenthybler med felles kjøkken. Én av veggene i hver hybel har synlig massivtre. Øvrige vegger er beskyttet med 15 mm gips + 50 mm isolasjon + 13 mm gips. I fellesareal har over halvparten av veggarealet synlig massivtre. Avstand mellom byggene er minst 10 meter. Figur 22 viser deler av byggene sett utenfra.

I forbindelse med prosjektet ble det også utført to fullskala branntester av en hybelenhet med korridor utenfor, med og uten sprinkleranlegg. Dette er beskrevet i kapittel 2.3.2.



Figur 22: Moholt 50/50 (78)

Fravik:

- Bæresystem og trappeløp i brennbare konstruksjoner.
- Brennbare branncellebegrensende konstruksjoner.
- Utvendig trekledning (D-s3,d0).
- Innvendig trekledning i brannceller (D-s2,d0).
- Trapperom Tr1.
- Kun brannisolering av kanaler i sjakt i plan 2 til 9, begrunnet med økt sprinklerbeskyttelse.
- Høydebegrensning på 23 m overstiges, med det er angitt at bygget skal ha ytelse som angitt i VTEK for bygg med åtte etasjer, med bakgrunn i at brannvesenet kan nå alle etasjer med sitt høydemateriell. Det er likevel angitt stigeledninger i trapperom. Brannvesenet har akseptert at det ikke etableres brannmannsheis med bakgrunn i at de når alle etasjer med sitt høydemateriell.
- Utelatt sprinkler i enkelte sjakter med brennbar kledning.

Kompenserende tiltak:

- Sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 (OH1) med Tillegg F i alle bygg. Tillegg F kom som følge av resultatene fra branntest.
- Massivtre i trapperom er brannmalt slik at In1 (B-s1,d0) oppnås, gjelder både vegger og selve trappeløpet. Delvis eksponert treverk i noen sjakter som er uten antenneskilder.
- Brannskille mellom hybler og kjøkken. Massivtre tilfredsstiller EI 30 i seg selv, satt krav til dør og gjennomføringer.
- Brannmotstand på dør til trapperom samt til utvendig trapp er økt til EI 60.
- Oppdeling av hulrom bak utvendig kledning med hulromsventiler med brannmotstand EI 60 og vertikale lekter som deler hulrom i tette felt. Hulromsventilene er plassert på bakkeplan, mellom plan 1 og 2, og mellom plan 5 og 6. Plan 1 har kledning som tilfredsstiller B-s1,d0. Det er benyttet brannimpregnerte lekter.
- Brannslanger er etablert i alle etasjer.
- Det er redundans i bæresystemet, som følge av at det er små rom i massivtre. Det er mulig å fjerne to hybelvegger ved siden av hverandre, uten at det får konsekvens for bæresystemet.

- Bæresystemet er dimensjonert for ca. 90 minutter, men det er benyttet høyere forkullingshastighet for å ivareta delaminering. De bærende konstruksjonene kan motstå 84 mm innbrenning, noe som tilsier ca. 0,93 mm/min i 90 minutter. Dette ble gjort som følge av resultatene fra branntest.

Brannvesenet har mulighet for å redde ut personer med høydemateriell i alle etasjer, men høydebegrensning angitt i VTEK § 11-17 er 23 m/8 etasjer. Trøndelag brann- og redningstjeneste har høydemateriell som kan nå over 40 m. Med bakgrunn i at brannvesenet kan fungere som alternativ rømningsvei er det kun stilt krav om Tr1 for hovedtrapperom. I tillegg er det etablert en utvendig trapp.

Alle opplysninger er hentet fra brannkonsept utarbeidet av Rambøll Norge AS (79), samt samtaler med brannrådgiverne i prosjektet.

Refleksjon

Bygget er fem etasjer høyere enn det som preakseptert tillates for bygninger i brennbare konstruksjoner i Norge, noe over det dobbelte. Det er synlig trekledning i branncellene, noe som vil gi et større bidrag til brannenergi, og kortere tid til overtenning. Det kan ikke tydelig verifiseres at bæresystemet vil stå i et fullstendig brannforløp ved for eksempel brann i en hybel. Gipskledning i himling vil likevel øke tiden til overtenning, og det er også kompensert med sprinkleranlegg med høyere pålitelighetsnivå. Redundans i bæresystemet ved at stabiliteten kan tåle kollaps av to massivtrevegger ved siden av hverandre, samt at delaminering er hensyntatt ved at det er lagt til grunn en høyere forkullingsrate, vil øke sikkerhetsnivået. Ved sprinklersvikt vil det være nødvendig med slokkeinnsats fra brannvesenet for å hindre kollaps, selv om tiden for at dette skal inntreffe forlenges som følge av redundans i bæresystemet.

Det er utført en risikoanalyse for å verifisere at brannsikkerheten er ivaretatt. Denne er ikke gjennomgått i forbindelse med oppgaven, da det ikke er sett på hvordan dette dokumenteres i de ulike casene.

5.4 Treet, Bergen, Norge

Høyde: 51 meter

Antall etasjer: 14

Bruk: leiligheter (62 stk.), takterrasse, parkeringskjeller

Totalt areal: ca. 5 830 m²

Byggeår: 2014-2015

Regelverk: TEK10

Byggemåte: Fire moduler i høyden, rammeverk med bærekonstruksjon i tre med poweretasjer i betong som underlag for de fire neste modulene. Trapperom, heissjakt, trappeløp og skillevegger i korridorer er utført i massivtre. Massivtreelementene skal kun bære seg selv og har ingen avstivende effekt i bygget. (80). Betongelementene er nødvendige for ekstra tyngde, for å redusere svingninger ved vind. Fasade er brannimpregnert tre (81) (82). Bygget er vist i Figur 23.

Fullstendig brannforløp ble beregnet til under 90 minutter. Bygget ble oppført med hovedbæresystem samt modulvegger i R 90, med sekundære konstruksjoner i R 60. Bygget er sprinklet iht. NS 12845, men med bruk av hurtigutløsende hoder. Det ble utført uavhengig kontroll av brannteknisk utførelse (KUT).



Figur 23: Treet, Bergen (83)

Fravik akseptert av brannrådgiver:

- Bæresystem i brennbare konstruksjoner.
- Branncellebegrensende konstruksjoner i brennbare konstruksjoner.
- Trappeløp i brennbare konstruksjoner.
- Horisontalt brannskille mellom innglassede balkonger akseptert EI 30 i stedet for EI 60.
- Brennbar kledning i trapperom, tilfredsstillende In1.
- Ubehandlet tre som utvendig overflate i hovedtrapperommets fasade (over 1. etasje) og hulrom bak denne. Aktuell fasade har fasedsprinkling og brannstopp i hulrommet over plan 1.
- Limtrekonstruksjoner bak utvendig kledning er ubehandlet (Ut2). Det er forutsatt splitting av hulrommet for minimum annenhver etasje med brannstopp EI 60 og innkassing med konstruksjoner EI 30 mot alle vinduer.

Kompenserende tiltak:

- Hele bygget er sprinklet iht. NS-EN 12845 med hurtigutløsende hoder, i stedet for NS-INSTA 900 i boligetasjer.
- Fagverk i limtre, massivtre i rømningsvei, sjakter og hulrom er akseptert under forutsetning om at de ble behandlet for å oppnå overflatekrav In1.
- Ved brann kan modulene kun kollapse innenfor poweretasjen, men modulene er dimensjonert for REI 90.
- Det er innkledd med to lag gips mot vegg mellom leiligheter, og to lag gips i himling.
- Satt krav til at avtrekkskanaler fra kjøkken føres i egen sjakt (egen branncelle).
- Skillevegg mellom balkonger er utført med branncellebegrensning EI 30.
- Kjølsoner i fasade ivaretatt med minst 1:1 mellom vinduer.
- Brannstopp i hulrommet bak kledning i all fasade, som følger rammeverkets oppdeling. Det er satt krav til EI 30 mellom vinduer og hulrom i fasaden, ivaretatt med brannisolert vindusbeslag.
- Funksjonssikring av strømforsyninger, selv om bygget er sprinklet.

Alle opplysninger er hentet fra brannkonsept utarbeidet av Sweco Norge AS (84) og presentasjon mottatt fra Sweco (82).

Refleksjon

Bygget har åtte etasjer mer enn det som preakseptert tillates i Norge. Det er benyttet limtrekonstruksjoner som hovedbæresystem, og det skal ikke være fare for kollaps som følge av svikt i massivtrekonstruksjoner. Konsekvensen ved eventuell kollaps er også begrenset som følge av en spesiell type bærekonstruksjon. Omfanget av brennbar kledning er begrenset og kun benyttet i areal hvor det er lav brannenergi. Personikkerhet og risiko for kollaps synes å være ivaretatt også ved sprinklersvikt, og kravet i TEK som angir at bærende konstruksjoner skal stå gjennom et fullstendig brannforløp, vil trolig være ivaretatt.

5.5 Mjøstårnet, Brumunddal, Norge

Høyde: 81 meter

Antall etasjer: 18 etasjer inkludert utsiktsplattform

Bruk: Bolig, kontor, hotell. Svømmehall bygges inntil, avdelt med forsterket brannskille.

Totalt areal: ca. 15 000 m² (inkluderer svømmehall)

Byggeår: Skal stå ferdig i 2019

Byggekostnad: 600 millioner (inkluderer svømmehall) (85)

Regelverk: TEK10. Bygget er prosjektert iht. brannklasse 4

Byggemåte: Bæresystem utføres i hovedsak i limtrekonstruksjoner, mens trappesjakter og heissjakter er i massivtre. Etasjeskillere i bindingsverk i plan 1-11 og betongdekker i øvrige plan. Innervegger oppføres i lette konstruksjoner, med ubrennbar kledning. Brannimpregnert trekledning i fasade. Bygget er illustrert i Figur 24.



Figur 24: Mjøstårnet (86)

Fravik (kun fravik relevante for oppgaven er tatt med):

- Bæresystem i brennbare konstruksjoner
- Branncellebegrensende konstruksjoner for trapperom og heissjakter i brennbare konstruksjoner.
- Synlige trekonstruksjoner i rømningsvei (massivtreelementer rundt trapp- og heissjakter og synlige limtresøyler i korridor). Ett av trapperommene skal ha ubrennbare materialer (innsatsvei for brannvesen).
- Synlige limtrekonstruksjoner i brannceller.

Kompenserende tiltak:

- Sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 i hele bygget, med tillegg F (det er angitt at anlegget er oppgradert til OH3, men dette er iht. standard når det er mer enn 45 m mellom høyeste og laveste sprinkler). Svømmebassenget i 1. etasje benyttes som ekstra vannforsyning. Separat sonestengeventil i hver etasje.
- Hovedbæresystem i limtre tilfredsstillende R 120 (og dimensjonert for et fullstendig brannforløp) Dekker tilfredsstillende R 90.
- Selvlukkere på dører fra mellomliggende rom til sluse.
- Husbrannslanger i boliger, brannslanger i hele bygget, utover preakseptert for boliger og kontor.
- Sikring mot brann i hulrom i fasade på følgende måte: Vannbord i hver etasje, lekter på siden av hvert vindu, hulromsventil EI 60 over vinduer fra plan 7 og opp (brannvesenet når opp til plan 6).
- Fasademateriale testet etter SP Fire 105 i stedet for SBI-test.
- Kjølsoner ca. 1:1, selv om det er preakseptert uten kjølesone i sprinklede bygg.
- Synlig massivtre påføres brannhemmende maling.
- Ubrennbare overflater i øvrige brannceller, også i brannceller under 200 m².
- Doble stigeledninger for brannvesenet.
- Eget kontrollrom for brannvesen, som inneholder styring for røykventilasjon og trykksetting samt grafisk presentasjonssystem som viser hvor alarm er utløst.
- Ubrennbar kledning (A2-s1,d0) på fasade i plan 1 og 2, men akseptert brannimpregnerert trekledning dersom det etableres fasadesprinkling på aktuelle områder (87).

Refleksjon

Bygget er 14 etasjer høyere enn det som preakseptert tillates med brennbare konstruksjoner i Norge, dette tilsvarer en faktor på 4,5. Bruk av massivtre er begrenset, og er kun synlig i områder med lav brannenergi, hvor det vil være liten risiko for overtenning. Innvendige vegger i branncellene er innkledd med gips, men bæresystemet i limtre er eksponert. Sweco har utført branntester for å vise at limtrekonstruksjonene vil slokke av seg selv når de ikke lenger er eksponert for brann, og har i tillegg økt dimensjoneringen på konstruksjonene fra 90 til 120 minutters brannmotstand. Med ubrennbar kledning i branncellene er det sannsynlig at en brann vil dø ut av seg selv før resttverrsnittet på limtrekonstruksjonene er på et kritisk nivå. Det er i tillegg kompensert med et høyere pålitelighetsnivå på sprinkleranlegget. Det anses som en svakhet at svømmebassenget benyttes som uavhengig vannforsyning, da det kan være tømt som følge av vedlikehold. Likevel er ikke stabiliteten på bæresystemet avhengig av sprinkleranlegget. Funksjonskravet som angir at byggverket skal stå gjennom et fullstendig brannforløp synes å være ivaretatt.

5.6 HoHo, Wien, Østerrike

Høyde: 84 meter

Antall etasjer: 24

Bruk: Kontor, hotell, restaurant og boliger

Totalt areal: ca. 25 000 m²

Byggeår: 2016-2018 (bygget ferdigstilles i løpet av 2018)

Byggekostnad: 65 millioner Euro

Regelverk: NÖ Bautechnikverordnung 2014 (viser til OIB Richtlinie 2)

Byggemåte: Hybridløsning med 75 % av bygningskonstruksjonene i tre. Alle sjakter, heissjakter/trappesjakter samt midtre kjerne er i betong. Synlig treoverflater og tresøyler innvendig. Små brannceller i de fleste etasjer. Yttervegger i massivtre, men med ubrennbar fasade (A2). Bygget sprinkles. (88).

Bygget er illustrert i Figur 25 og Figur 26.

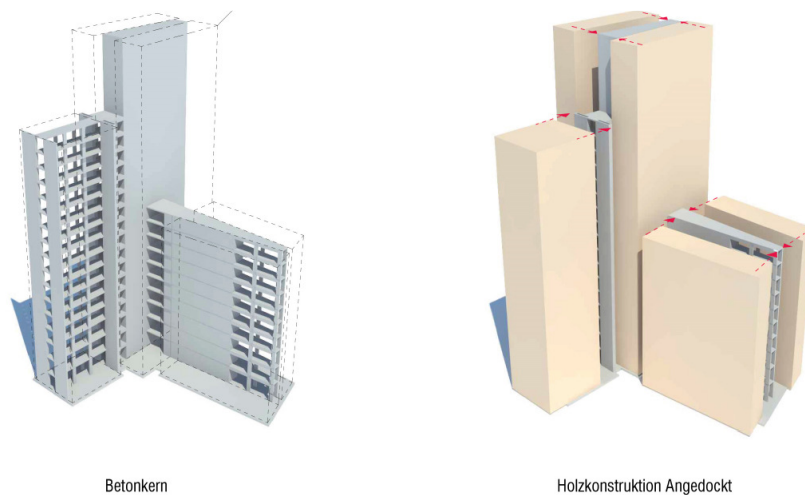
Det ble utført egne fullskala branntester med 90 minutters varighet blant annet for å finne forkullingsdybden på elementene som blir benyttet. Trekonstruksjoner er ubeskyttet, da disse holder nødvendig brannmotstand i seg selv (89).

Brannrådgiver for prosjektet ble kontaktet via e-post, men forespørselen ble videresendt og besvart av prosjektets kommunikasjonsrådgiver. De kunne ikke utgi alle opplysninger da bygget ikke er ferdigstilt, men kunne opplyse om at det på grunn av riktig dimensjonering av trekomponentene og byggets design, ikke er nødvendig å kle inn trekonstruksjonene. Det har vært viktig å få fram treet som en del av interiørets atmosfære. Det ble vist til at det forkullede laget ville beskytte bakenforliggende tre, og at forbrenningen derfor forsinkes og er kontrollerbar.

Fravik: Bærende konstruksjoner i brennbart materiale.



Figur 25: Illustrasjon av HoHo Wien (90)



Figur 26: Illustrasjon av konstruksjonene i betong og tre (91)

Refleksjon

Byggverket er tre ganger så høyt som det som preakseptert tillates for bygninger i trekonstruksjoner i Østerrike. Ved at det er mulighet for en spesiell byggetillatelse i høyere byggverk dersom det eksempelvis er sprinklet eller at bærende konstruksjoner er tildekket med ubrennbare materialer som tilsvarer minst REI 90, vil kravene i Østerrike være ivaretatt. Det er også en preakseptert løsning med brennbar kledning i brannceller i Østerrike. Så å si alle massivtrekonstruksjonene er eksponerte, og brannsikkerheten i bygget er derfor fullstendig avhengig av at sprinkleranlegget fungerer. Ved sprinklersvikt vil det være helt nødvendig at slokkemannskaper gjør en innsats for å hindre kollaps. Med tanke på at byggverket er så høyt som 18 etasjer, og at det stort sett benyttes massivtreelementer med lim som delaminerer i Østerrike, synes sikkerhetsnivået å være lavt, selv om dette anses som en akseptabel løsning i Østerrike. Aktuelt funksjonskrav angir at bæresystemet skal være konstruert på en slik måte at det tåler lasten i tilfelle brann i den tid som er nødvendig for å rømme og redde mennesker. Kravet vil nok ivaretas, men synes å være utilstrekkelig for et trehus på 18 etasjer.

5.7 Dalston Lane, London, Storbritannia (Dalston Grove)

Høyde: 33,8 meter

Antall etasjer: 10 etasjer

Bruk: Næring i kjeller og i plan 1, 121 boliger i plan 2-10

Totalt areal: ca. 11 600 m²

Byggeår: Ferdigstilt 2017

Regelverk: Building Regulation 2010 Part B: Fire Safety. Volume 1 – Dwelling houses og Volume 2 – Buildings other than dwellinghouses (58), komplementert av Volume 2 som følge av bygningens høyde. Bygget er vist i Figur 27.

Byggemåte: Kjeller og plan 1 i betong, resten er massivtre i alle konstruksjoner (også sjakter). Fasade i tegl. De fleste leiligheter har kun tilgang til ett trapperom. Alle trekonstruksjoner er innkledd med gips. Bygget er ikke sprinklet. R 120 i de deler av bygget som har mer enn seks etasjer (92).



Figur 27: Dalston Lane, London (64)

Fravik: Bygget er ikke sprinklet.

Kompenserende tiltak: Kledd inn med gips som skal beskytte de bakenforliggende trekonstruksjonene i minst 90 minutter (93).

Refleksjon

Det stilles ikke krav til ubrennbare konstruksjoner for bæresystemet i England, men det stilles krav til at bygninger over 30 meter skal sprinkles og ha brannmotstand minst R 120. Brannmotstanden vil være ivaretatt med svært god margin, da de deler av bygget som har mer enn 10 etasjer tilfredsstillende R 120, i tillegg til at det er kledd inn med gips, slik at bæresystemet er beskyttet i minst 90 minutter. Det er valgt å utelate sprinkling som følge av dette, noe som vil redusere sikkerhetsnivået i bygget som følge av andre forhold.

De fleste leiligheter vil kun ha tilgang til ett trapperom. Dette gjelder i den høyeste delen av bygget. Iht. gjeldende regelverk tillates dette, så lenge det er mellomliggende rom foran trapperommet, og maksimalt 7,5 m fra dør fra leilighet til dør til trapperom. Dette gjelder uavhengig av om bygget er sprinklet eller ikke, da sprinklerkravet kun inntreffer som følge av byggets høyde. Utelatelse av sprinkleranlegg medfører blant annet raskere brannutvikling, noe som gir kortere tilgjengelig rømningstid. På grunn av byggets høyde vil nødvendig rømningstid øke. Det at alle trekonstruksjoner er innkledd med gips, vil igjen gi noe tregere brannutvikling, men ikke noe som kan sammenlignes med effekten av et sprinkleranlegg. De forholdene som berøres av at bygget er oppført i massivtre synes å være ivaretatt i henhold til gjeldende regelverk. Diskusjonen rundt øvrige forhold rundt personsikkerhet som berøres av manglende sprinkleranlegg tas ikke videre da det ikke vil være relevant for temaet i oppgaven.

6 Vurdering av kompenserende tiltak

Tiltakene som er vurdert er hentet fra casene som er gjennomgått i kapittel 5, og omfatter:

6.1: Slokkeanlegg

- NS-EN 12845 i stedet for NS-INSTA 900 i boliger
- Tillegg F
- Ekstra vannforsyning (inngår i tillegg F, men kan også være i tilfeller uten tillegg F)

6.2: Innkledning med gips

6.3: Økt brannmotstand på bærende konstruksjoner

6.4: Beskyttelse med brannmaling og brannimpregnering

6.5: Hulromsventiler

6.6: Økt krav til kjølesoner

6.1 Slokkeanlegg

Det finnes flere typer slokkeanlegg, som sprinkleranlegg, gasslokkeanlegg og vanntåke. Det er her fokusert på standard sprinkleranlegg med bruk av vann som slökkemiddel, da det er det som er benyttet i byggverkene som er gjennomgått i oppgaven.

Et standard sprinkleranlegg er et vannbasert slokkeanlegg med vann under trykk som utløser ved høy temperatur. Anlegget er utført med et rørsystem med utplasserte dyser, hvor hver dyse har en varmfølsom bulb eller et smelteledd. Ved oppvarming av bulben/smelteleddet til en gitt temperatur, vil det aktuelle sprinklerhodet slippe ut store mengder vann, som skal kontrollere brannen i det aktuelle rommet. Ved en større brann kan flere dyser aktiveres i samme rom. Når en sprinklerdyse utløser, vil trykket i rørene reduseres. Dette gir et signal til en alarmventil som videre gir signal til brannalarmsentralen, slik at de som oppholder seg i det aktuelle bygget varsles. Sprinkleranlegg har vært i bruk i mange år, og i USA siden 1860-årene. Et sprinkleranlegg som er riktig prosjektert og installert er det sikreste og mest effektive tiltaket for personsikkerhet og verdier, og skal slokke eller kontrollere brannen inntil slökkemannskapene er på plass. Normalt vil sprinkleranlegget begrense brannen til rommet den startet i, selv om rommet ikke er utført som en egen branncelle (67). Ved at vannet også har en kjølede effekt, reduseres risiko for reantenning etter at brannen har slokket. Vanligvis er det tilstrekkelig at ett eller to sprinklerhoder løser ut.

Sprinkleranlegget vil ha flere funksjoner som har innvirkning på fravikene som er relevante for trebygninger. Et utløst sprinkleranlegg vil redusere brannutvikling, brannstørrelse og hindre overtenning, slik at den termiske påkjenningen mot konstruksjonene reduseres. Dette vil også øke den tilgjengelige rømningstiden for de som oppholder seg i bygget, og det vil forenkle slokkeinnsatsen for brannvesenet. Ved at brannstørrelse reduseres, vil også brannspredning begrenses, både internt i bygget, og til andre omkringliggende bygninger.

I Norge er det to aktuelle sprinklerstandarder som benyttes; NS-EN 12845 (94), som er et ordinært sprinkleranlegg, og boligsprinkleranlegg iht. NS-INSTA 900 (95) som benyttes i boliger og i andre overnattingsbygg. Type 3 skal benyttes for boligbygg med ni etasjer eller mer, mens type 2 kan benyttes ved færre etasjer. I Canada og USA benyttes NFPA 13 (standard sprinkler) (96). NFPA 13 R og D gjelder for boligsprinkler, men ikke for høye bygninger over fire etasjer. Det er derfor kun henvist til NFPA 13.

Alle høye trehus som det er sett på i denne oppgaven, med unntak av ett, har vært sprinklet. I Norge er det krav til at alle leilighetsbygg hvor det er krav om heis, skal sprinkles. Det stilles i hovedsak krav til heis iht. TEK § 12-3 i bygninger i tre etasjer eller flere som har boenhet (42). Dette kravet kom inn i forskriften i 2010. Tidligere var det kun krav til sprinkler i bygninger med areal over 1 800 m² per etasje, da som et verdisikkerhetstiltak.

Å etablere sprinkleranlegg i seg selv, i et boligbygg med tre etasjer eller mer, kan ikke vurderes som et kompensierende tiltak, da dette uansett er et krav i henhold til Byggteknisk forskrift (TEK). Det stilles ikke krav til sprinkleranlegg i byggverk i risikoklasse 2 (som f. eks. kontorbygg) iht. TEK. I et høyt trehus med slik bruk vil derfor etablering av sprinkleranlegg kunne sees på som et rent kompensierende tiltak.

Et boligsprinkleranlegg skal dimensjoneres slik at det varsler og kontrollerer en brann på et tidlig stadium, eller holde brannen under kontroll slik at evakuering kan gjennomføres på en sikker måte (95). I boliger kreves hurtigutløsende sprinklerhoder, med en utløsningstemperatur på 57 °C. Standard sprinklerhoder skal vanligvis utløses ved 68 °C. Lav utløsningstemperatur og et spesielt spredemønster gjør at boligsprinkleranlegg er dimensjonert for at en person i brannrommet skal kunne overleve, dette er det også flere eksempler på fra virkeligheten. Ved å øke sikkerhetsnivået ved å gå fra boligsprinkleranlegg til et standard sprinkleranlegg (uten tillegg F) må det i tillegg spesifiseres at det skal benyttes hurtigutløsende sprinkler.

Et sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 dimensjoneres etter ulike fareklasser; lav fareklasse (LH), ordinær fareklasse (OH), eller høy fareklasse (HH). Klassifiseringen avhenger av virksomhet og brannenergi. Lav fareklasse omfatter virksomheter med lav brannenergi og lav brennbarhet, der ingen branncelle med brannmotstand minst 30 minutter er over 126 m². Kontorer som ikke faller inn under LH, samt hotell plasseres iht. standarden i OH1. Boliger er ikke angitt i denne standarden, da dette omfattes av boligsprinkleranlegg.

Et sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 og NFPA 13 er i hovedsak veldig likt. Forskjellen på et standard sprinkleranlegg og et boligsprinkleranlegg er dimensjonerende vanntetthet og dimensjonerende utløsningsareal. Ved boligsprinkler kan det dimensjoneres med færre antall utløste hoder, slik at nødvendig vannmengde inn til bygget kan reduseres. Vanntetthet ved et LH-anlegg skal være minst 2,25 mm/min, mens det for et OH-anlegg skal være 5,0 mm/min. Ved boligsprinkleranlegg skal det være 4,08 mm/min.

Både NS-INSTA 900 og NS-EN 12845 angir tillatte unntak for areal som ikke behøver å sprinkles. Ved bruk av boligsprinkler tillates det å unnlate rom som ikke brukes til beboelse, og som er skilt ut som egen branncelle (forutsatt at rommene ikke inkluderer trapper eller korridorer som brukes som en del av rømningsveien), samt i ubrukte loft. I tillegg er NS-EN 12845 strengere på krav til utelukkende EI 60 mellom sprinklet og usprinklet areal, og også krav til selvlukker på dører mellom disse. Samlet sett vil derfor et standard sprinkleranlegg med hurtigutløsende sprinklerdyser medføre et betydelig høyere sikkerhetsnivå i en høyere trehusbygning, enn et boligsprinkleranlegg.

NS-EN 12845 Tillegg E skal benyttes når høydeforskjell mellom høyeste og laveste sprinkler som overskrider 45 m. Tillegg E angir blant annet at:

- Høydesystemene skal oppfylle krav til beskyttelse tilsvarende OH3. Ved å øke fareklasse til OH3, økes kravet til dimensjonerende utløsningsareal, noe som medfører større vannforsyning inn til bygget.
- Høydesystemene skal inndeles i sprinkleranlegg slik at høydeforskjellen mellom høyeste og laveste sprinkler på ett av anleggene ikke overskrider 45 m.
- Systemet skal ha minst én forbedret enkel vannforsyning (97).

NS-EN 12845 Tillegg F omfatter ytterligere tiltak for å forbedre systemets pålitelighet og tilgjengelighet.

Tillegget angir følgende relevante tiltak:

- Systemet skal ha minst én forbedret enkel vannforsyning.
- Det skal brukes hurtigutløsende sprinklere, unntatt for rom med et areal på minst 500 m² og en høyde på minst 5 m, der standard følsomhet A og spesiell følsomhet kan brukes.
- Redusert størrelse på soner for å redusere ubeskyttet areal i tilfelle svikt.
- Ved service og vedlikehold utført på anleggets alarmventiler skal sprinkleranlegget være fullstendig operativt på alle måter.
- Krav til drift for soner og kontrollventilsett ved service og vedlikeholdsarbeid (94).

Pålitelighet

Et sprinkleranlegg har høy pålitelighet sammenlignet med andre branntekniske tiltak, men konsekvensen av svikt i et høyt trehus vil kunne være katastrofal. Pålitelighet på sprinkleranlegg er et omdiskutert tema, og ulike studier har kommet fram til svært ulike pålitelighetstall. Det er derfor gjort et mer omfattende arbeid rundt dette.

Det er vanlig praksis at brannrådgivere i Norge viser til utenlandske pålitelighetstall for sprinkleranlegg, som ofte ligger på 90-98 %. Dette skyldes at det i hovedsak ikke foreligger noe anerkjent, dokumentert pålitelighetstall for anlegg iht. NS-EN 12845 og NS-INSTA 900, noe som skyldes manglende statistikk. De fleste brannrådgivere legger 95 % pålitelighet til grunn, med henvisning til BSI PD 7974-7 (98). Rapporten angir at pålitelighet på 95 % kan legges til grunn ved nye sprinkleranlegg i områder hvor sprinkler er lovpålagt, men forutsetter at ikke mer enn fire sprinklerhoder opererer. Antallet er vurdert som en grenseverdi for pålitelighetstallet (98).

John Hall's rapport «U.S Experience with sprinklers» (99) anses å være det best dokumenterte studiet som angir pålitelighetsdata for sprinkler i de senere år. Siden både standarder, regelverk og systemer utvikles og endres, er det viktig å se på nyere statistikk. Rapporten oppsummerer resultatene fra en studie hvor det er gjennomgått statistikk fra innrapporterte branner i USA i perioden 2006-2010. Sprinkler utløste i 91 % av tilfellene hvor brannen var stor nok. Når anlegget var utløst, fungerte det slik det skulle i 96 % av tilfellene. Kombinert gir dette en pålitelighet på 88 % hvor sprinkleranlegget fungerte slik det skulle, og brannen var stor nok til å utløse anlegget, 89 % hvis det kun sees på våtanlegg. I de tilfellene hvor anlegget feilet, skyldtes dette:

- Anlegget var avslått (63 %)
- Menneskelig feil (18 %)
- Mangel på vedlikehold (6 %)
- Feil type anlegg for type brann (5 %)
- Skadede komponenter (8 %)

I de tilfellene hvor sprinkler utløste, men ikke fungerte slik som det skulle, skyldtes dette:

- Vannet nådde ikke brannen (53 %)
- Det kom ikke nok vann (18 %)
- Menneskelig feil (9 %)
- Skadede komponenter (9 %)
- Mangel på vedlikehold (8 %)
- Feil type anlegg for type brann (3 %) (99)

Dette viser at dersom anlegget er påslått, det er prosjektert riktig for riktig bruk, og vedlikeholdet følges, vil et sprinkleranlegg ha svært høy pålitelighet.

En gjennomgang av brannstatistikk i Sverige for registrerte branner i perioden 2006-2007 viste en pålitelighet på sprinkleranlegg på 92 % (alle typer bygg) (100). Det ble også gjennomgått pålitelighetsdata fra syv ulike land, hvor påliteligheten varierer mellom 38 og 99,5 %. De store forskjellene kan skyldes at det ikke er hensyntatt om brannen var stor nok til å utløse anlegget, eller ikke (101). Rapporten konkluderer med tiltak for å øke påliteligheten, som blant annet strengere krav til styring (fire-protection management system), inkludert vedlikehold og rutiner, strengere krav til prosjektering, utførelse og inspeksjon av sprinkleranlegg. I tillegg må forsikringsselskapene stille strengere krav til byggeiere og forbedre deres samarbeid med sprinklerkontrollører.

I 2003 gjorde OFS (Opplysningskontoret for sprinkleranlegg) en undersøkelse av 150 sprinkleranlegg i Norge. Resultatet viste at kun 8 % av de undersøkte anleggene tilfredsstilte regelverket som da gjaldt. Blant annet ble det registrert at 33 % ikke hadde egenkontroll, og at 60 % ikke retter alle avvik etter kontroll. 43 % kunne ikke dokumentere at regelverkens krav om vann var tilfredsstilt med 90 % av kravet eller bedre (102).

I flere tilfeller i den senere tid har det vist seg at gjengroing av rørene for vanntilførsel inn til bygget er et problem, også på nyere rør. Det pågår nå et prosjekt ved Sintef for å finne årsaken til dette. Gjengroing vil ikke oppdages ved rutinemessig service og vedlikehold. Det vil heller ikke framkomme av manometertrykk, men kan kun oppdages ved en tappeprøve. Dette blir gjerne ikke utført, da kommunene ofte ikke tillater det, selv om det stilles krav i standarden til fullskala vannmengdemålinger. En forenklet metode som oftere utføres, er å åpne dreneringsventil for å se etter trykkfall.

Dette vil avdekke om stengeventil i gate står mer eller mindre i lukket posisjon, men vil ikke avdekke gjengrodde tilførselsrør. Et sprinkleranlegg dimensjoneres for at mange hoder utløses samtidig (typisk 10-12 dyser i et kontorbygg, færre i et boligbygg), mens det i få tilfeller er mer enn to som utløses ved brann. Røret for vanninntak skal derfor være svært gjengrodde for at dette faktisk skal få en konsekvens.

Trykkøkingspumpe i høye bygg er nødvendig for å oppnå tilfredsstillende trykk i de høyeste etasjene. Dette introduserer en ny avhengighet med en pålitelighet <1 som igjen vil redusere den totale påliteligheten på anlegget. NS-EN 12845 angir ikke et entydig krav til back-up på strømforsyningen til trykkøkingspumper, og utførelsen varierer derfor. På samme måte som at sprinkleranlegget kan være slått av, kan også pumpe være avslått eller defekt. VTEK krever at sikring av strømforsyning til installasjoner som skal ha en funksjon under brann og slokking skal beskyttes, og ett av alternativene for dette er beskyttelse med et automatisk sprinkleranlegg. Altså er det ikke krav til at det skal gjøres noe tiltak for å sikre funksjonen av sprinklerpumpe ved brann. Ved bruk av tillegg F skal det være dobbel vannforsyning, hvor hver vannforsyning må ha hver sin pumpe. Kravene til pumpe er i hovedsak like for et standard sprinkleranlegg og et boligsprinkleranlegg.

Sertifisering av prosjekterende og kontrollerende av sprinkleranlegg, samt dokumentasjon av sprinkleranlegg, foregår via Forsikringsselskapenes Godkjennelsesnevnd (FG). Iht. FG skal enten den som selv utfører prosjekteringen eller den som tar sidemannskontroll ha FG-eksamen. Det vil si at det er tilstrekkelig ved prosjekteringen at kun én person har tilfredsstillende kompetanse. I den senere tid har det blitt mer vanlig å benytte BIM (tre-dimensjonalt modelleringsverktøy) ved prosjektering av tekniske installasjoner, noe som reduserer feil i prosjektering ved å gjennomføre kollisjonskontroller, og gjør det lettere å få kontroll på fysiske hindre. Innredning etter at bygget står ferdig vil likevel ikke identifiseres, og installasjoner/møblering som hindrer sprinklerhodets spredemønster er ofte vanskelig å unngå.

Tredjepartskontroll skal utføres iht. krav i sprinklerstandard NS-EN 12845 ved idriftsettelse og ved årlige kontroller. Standarden stiller ingen andre krav til denne kontrollen, enn at «Kontrollrapporten skal vise om systemet samsvarer med denne standarden med hensyn til vedlikehold, drift og ytelse i forhold til aktuell risiko. En avvikrapport skal foreligge» (94). NS-INSTA 900 angir mer omfattende hva som skal inngå: «Tredjepartskontroll skal omfatte kontroll av dokumentasjon og kontroll av virkemåten til anlegget. Tredjepartskontrollen skal omfatte praktisk prøving av funksjoner og signaler...». Det skal også gis et sertifikat/rapport som bekrefter at anlegget oppfyller alle aktuelle krav i standarden, og om eventuelle avvik fra denne (95).

Sprinkleranlegg skal kontrolleres av sertifisert personell innen området kontroll hvert år. Ved 1. gangskontroll er det angitt at det utføres en utvidet kontroll, hvor det i tillegg skal utføres kontroll av hydrauliske beregninger og at disse er foretatt i alle nødvendige områder. NFPA 13 viser til en egen standard, NFPA 25, for kontrollrutiner.

FG har utarbeidet en veiledning for tredjepartskontroller av sprinkleranlegg iht. NS-EN 12845 (103), gyldig fra 1.1.2018 for kontroll i driftsfase. Veiledningen skal følges av alle foretak som er sertifisert etter FG-910 Sertifisering av Foretak. En tilsvarende veiledning for kontroll av boligsprinkleranlegg er under utførelse. Veiledningen har sjekklister som skal gjennomgås, og hvert avvik eller merknad skal kommenteres. I tillegg skal det kommenteres dersom det ikke er avvik/merknad, noe som gjør at hvert punkt i sjekklisten må vurderes. Dette skal forelegges for å dokumentere karakteren som gis på anlegget.

Refleksjon

Sprinkleranlegget er i en eller annen form i de fleste tilfeller benyttet for å kompensere for at det benyttes brennbare konstruksjoner både for bæresystem og branncellebegrensende konstruksjoner. Dette er gjort for eksempel ved å bytte til et konvensjonelt sprinkleranlegg prosjektert iht. NS-EN 12845 (som ved Moholt 50/50 og Treet), ekstra vannforsyning (f. eks. Brock Commons), eller ved å benytte Tillegg F i NS-EN 12845 (Mjøstårnet og Moholt 50/50) for å øke påliteligheten til anlegget. På denne måten er det også mulig å argumentere for at det er gjort et ekstra tiltak, som kan sies å være kompenserende, selv om det uansett er krav til sprinkleranlegg iht. gjeldende regelverk. Effekten ved bruk av Tillegg F vil likevel begrenses i et byggverk som inneholder boliger, og hvor høydeforskjell mellom høyeste og laveste sprinkler er over 45 m, da det uansett skal være ekstra vannforsyning og hurtigutløsende sprinkler. I hovedsak vil tillegg F i en boligbygning hvor det også er krav til tillegg E medføre redusert størrelse på ubeskyttet areal i tilfelle svikt, og at anlegget skal være operativt under service og vedlikehold. Tillegg F vil dermed ikke øke påliteligheten i et slikt tilfelle.

Et sprinkleranlegg er ikke avhengig av menneskelige handlinger for å fungere i det det brenner, men brannsikkerheten vil være mer kompleks, da det er et ekstra tiltak som skal fungere (et passivt tiltak byttes ut med et aktivt tiltak). Dette gjelder i de byggverkene hvor det i utgangspunktet ikke er krav til sprinkler. Sårbarhet vil eksempelvis kunne påvirkes som følge av svikt enten i vannforsyning eller i strømforsyning. Tiltaket vil være svært mye lettere å sette ut av funksjon enn tiltaket som er fjernet.

Anlegget kan være avslått, mens et ubrennbart bæresystem vil være «på» i hele byggets levetid.

Sprinkleranlegget i Mjøstårnet har et svømmebasseng som sin alternative vannforsyning, noe som vil være sårbart i tilfelle svømmebassenget er tømt i forbindelse med vedlikehold. Anlegget er også sårbart for feil i prosjektering eller utførelse. Kompetansekravene er lave, i og med at det kun kreves at én av den som prosjekterer eller tar sidemannskontroll har tilstrekkelig sertifisering.

Pålitelighet på sprinkleranlegg er et viktig og omdiskutert tema, da mange faktorer kan føre til svikt. Det krever blant annet et omfattende kontrollregime for at det skal kunne opprettholde nødvendig pålitelighet. Iht. NS-EN 12845 skal det utføres rutinemessig inspeksjon og kontroll av bruker ukentlig, månedlig og kvartalsvis. Det finnes ikke noe system for å påtvinge dette, og slike kontroller blir derfor ikke utført. Eksempelvis er det krav til automatisk prøving av pumpestart ukentlig, noe som tilsier en høyere brukerterskel enn det å lese av manometertrykket.

Årlige sprinklerkontroller har tidligere blitt utført i svært varierende grad. Den nye veiledningen vil trolig medføre at sprinklerkontroller blir utført mer likt, og at de som tidligere har gjort det enkelt og billig for kunden, tvinges til å gå mer i detalj i kontrollen. Det forventes at et bedre system for årskontroller, som følge av den nye veiledningen, kan øke påliteligheten på sprinkleranlegg i Norge.

Studiet «U.S Experience with sprinklers» inkluderer flere typer sprinkler, og de fleste av disse vil nok ikke ha samme sikkerhetsnivå som etableres ved å oppgradere anlegget iht. Tillegg F. Som følge av at Tillegg F stiller krav forbedret vannforsyning, kan det antas at andelen tilfeller hvor det ikke kom nok vann, og at vannet ikke nådde brannen, kunne vært redusert. Feil type anlegg for type brann gjelder i hovedsak tilfeller med at lagring ikke stemmer med prosjektert løsning, dette kan eksempelvis være hva som lagres, lagringshøyder og hvordan det lagres. Dette er mer relevant i lagerbygg og vil være lite aktuelt i høye trehus. Trolig vil også eier av et høyt trehus ha større fokus på brannsikkerhet, slik at avvik fra sprinklerkontroll lukkes, vedlikeholdet følges opp og sannsynligheten for at anlegget er avslått reduseres.

Ved brannteknisk analyse kan det ikke sees bort fra risiko for at sprinkleranlegget kan være avslått, eller at feil ikke rettes etter sprinklerkontroll, da det har vist seg at dette er reelt i svært mange tilfeller. Det er svært mange faktorer som påvirker påliteligheten til tiltaket, og å legge til grunn 95 % pålitelighet synes å være vel høyt. Påliteligheten vil uansett være lavere enn de ubrennbare konstruksjonene som det kompenseres for. Å kunne si at vi i Norge har et godt nok system for å kunne si at vi har samme pålitelighetsnivå som det som har framkommet i andre land, synes å være noe optimistisk. Tillegg F vurderes å være helt nødvendig for å ivareta et tilfredsstillende sikkerhetsnivå i høye trehus.

6.2 Innkledning med gips

Innkledning med gips kompenserer for fraviket ved at det benyttes brennbare bærende og branncellebegrensende konstruksjoner i høye bygninger.

Bruk av ubrennbar kledning vil ha betydning for brannutvikling, brannstørrelse og vil øke tiden til overtenning. Kledning vil dermed ha positiv innvirkning på personsikkerheten i bygget, da brennbar kledning vil bli involvert tidlig i et brannforløp. Ved å kle inn brennbare konstruksjoner, vil brannpåkjenningen mot de brennbare konstruksjonene forsinkes.

Gipsplater består av en gipskerne med et tynt lag papp limt utenpå. Gips er et ubrennbart materiale og gir dermed ikke noe bidrag til brannen i form av brannenergi. Når vannet i gips fordamper ved varmpåkjening vil det derimot ta opp energi fra brannen. Vanlige gipsplater (12,5 mm) oppnår A2-s1,d0 og K₂10 A2-s1,d0. Gips finnes i flere ulike tykkelser, og med ulike sammensetninger. I Norge benyttes ofte 9 mm GU i ytterveggskonstruksjoner, da disse tåler mer fukt enn vanlig gips. Gips som tåler mer fukt, går under betegnelsen type H. 12,5 mm gips (ofte omtalt som 13 mm) regnes i Norge som normal gips (type A), mens det også er vanlig å benytte 15 mm branngips når den ønskede funksjonen er å oppnå høyere brannmotstand på konstruksjonene som tildekkes (type F). Branngips inneholder mer vann enn vanlig gips og er altså litt tykkere. I tillegg har den en glassfiberarmering som tåler høyere temperaturer. Siden mer vann tar lenger tid å fordampe, vil platen krympe mindre ved brann. Det finnes også andre typer gipsbaserte plater (104).

Det skilles på begrenset innkledning, som vil hindre at trekonstruksjoner involveres i brannen i en tidlig fase og forsinker start av forkulling, og fullstendig innkledning, med tilstrekkelig antall gipsplater som beskytter trekonstruksjonene gjennom et fullstendig brannforløp. Dette avhenger av brannen, antall lag med gips og hvilken type gips som benyttes. Fullstendig innkledning vil dermed kunne gi et tilsvarende sikkerhetsnivå som om bygget var oppført med ubrennbart bæresystem.

Ulempen med å kle inn trekonstruksjonene med gips, er at effekten av de synlige treoverflatene som ofte er ønskelig i bygninger i massivtre går tapt. Likevel er det i mange tilfeller lydkrav som medfører at massivtreelementene kles inn, og ikke på grunn av brannsikkerhet.

Antall minutter beskyttelse som oppnås ved bruk av gips varierer avhengig av hvilken standard/litteratur som legges til grunn. Forkulling av tre starter når temperaturen i treet oppnår ca. 300 °C, dvs. at det beskyttende platelaget ikke nødvendigvis behøver å ha falt av, før den beskyttende effekten avtar.

I Eurokode 5 (23) kapittel 3.4.3.3 angis beregningsmetode for hvor lang tid det tar før start av forkulling dersom treet er beskyttet med gipsplate av type A, F og H. Ved beskyttelse av ett lag gips av type A, F og H (forutsatt hulrom mellom platene ≤ 2 mm) benyttes formelen:

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 14$$

hvor h_p er tykkelsen på platelaget [mm]

Ved beskyttelse av to lag gips av type A eller H benyttes samme formel, men med tykkelsen på det ytre laget og kun 50 % av tykkelsen på det innerste laget. Ved beskyttelse av to lag gips av type F (branngips), beregnes tykkelsen av det ytterste laget, og kun 80 % av det innerste laget. Det vil si at standarden ikke tillegger branngips noen ekstra effekt, annet enn tykkelse og redusert reduksjon på platelag nummer to. Årsaken til at det innerste laget har redusert beskyttelse, er at det allerede er foroppvarmet, har delvis kalsinert (vannet har fordampet) og utsettes for en høyere temperatur når det blir eksponert.

Siden det ytterste laget gir høyest brannmotstand, legges gipsplate med høyest brannmotstand ytterst, f. eks. branngips. Som følge av tyngdekraft vil bruddtidspunktet for gips på underside av dekker være kortere enn gips på vegger.

Tabell 2 på neste side viser beskyttelsestid for bakenforliggende trekonstruksjoner, basert på ulike kilder. Tallene som er hentet fra Eurokode 5 angir tid til start av forkulling for beskyttet treverk, mens det i CLT Handbook er angitt som tid som kan tillegges bæreevnen til en ubeskyttet bygningsdel til strukturell svikt av gipslaget. Det vil altså i praksis si det samme, slik at tallene vil være sammenlignbare. CLT handbook (9 s. 277) angir kun verdier for branngips (X tilsvarer type F i Norge (105)). Tallene fra Brandsäkra trähus angir både tid til forkulling (t_{ch}) og nedfallstid (t_f) og er basert på mer enn 340 fullskala branntester (27).

Nedfallstid er iht. SP-rapport (105) definert som når minst 1 % av gipsplaten har falt av. Dette vil være når vannet i gipsen er komplett fordampet, som er angitt som tidspunktet hvor forkulling starter i treet bak gipsplaten. Forsterket gips (branngips) vil ikke falle av før glassfibrene smelter (ved 700 °C). Konklusjoner etter gjennomgang av de 340 branntestene var at gipsplater fra ulike produsenter har ulike egenskaper, og kan derfor ikke sammenlignes direkte. Hver produsent bør dokumentere tid til nedfall og tid til forkulling for sine gipsplateprodukter, dersom disse har bedre verdier enn det som er angitt i Eurokode 5. Tid til forkulling iht. Eurokode 5 bør reduseres ved ett lags beskyttelse, og bør økes ved to lags beskyttelse (105).

Tabell 2: Beskyttelse av gips, basert på ulike kilder

Kilde	Eurokode 5 (23)	Brandsäkra trähus (27) Vegg		Brandsäkra trähus (27) Dekke		CLT handbook (9)
		t _{ch} (min)	t _{ch} (min)	t _f (min)	t _{ch} (min)	
Antall lag, type gips, tykkelse	t _{ch} (min)	t _{ch} (min)	t _f (min)	t _{ch} (min)	t _f (min)	t _{ch} (min)
Ett lag type A 12,5 mm	21	15,5	16,8	15,5	15,5	
To lag type A 12,5 mm (kun 50 % av det innerste laget medregnes iht. eurokode)	38,5	33	38,5	31	-	
Ett lag type F/X 12,5 mm		15,5	32,3	15,5	22,5	15*
Ett lag type F/X 15 mm	28	20	43,5	24,5	25	30**
To lag type F 12,5 mm		45,5	60	36	47	40*
To lag type F 15 mm (kun 80 % av det innerste laget medregnes iht. eurokode)	61,6	56	80	46	57	60*
Ett lag type F 15 mm (ytterst) + ett lag type A 12,5 mm	56	50,8	81	36	50	

*12,7 mm

**15,9 mm

Refleksjon

Iht. Brandsäkra trähus vil altså det innerste platelaget gi et høyere bidrag til brannbeskyttelse enn det ytterste laget, i motsetning til Eurokode 5. Branngips tillegges også en lavere effekt for beskyttelse i Brandsäkra trähus, men holder seg på plass i mye lengre tid. I Norge er det en utbredt praksis blant brannrådgivere i Norge å regne 15 minutter beskyttelse for ett lag normal gips, og 30 minutter ved branngips, noe som stemmer godt med det som er angitt både i Eurokode 5 og i CLT Handbook. Dette benyttes spesielt ved branntekniske oppgraderinger i eksisterende bygg. Utfordringen med å benytte standardverdier på tid for beskyttelse med gips, er at det ikke finnes en egen teststandard for dette, og at gipsplater fra ulike leverandører ikke er like. NS-EN 520:2004 «Gipsplater - Definisjoner, krav og prøvingsmetoder» angir krav til gipsplater, men ikke tilstrekkelig til å kunne gi en entydig brannmotstand på platene.

I Canada er det vanlig å bruke innkledning med tre lag branngips for å kompensere for bruk av brennbare konstruksjoner, noe som gir et langt høyere sikkerhetsnivå enn det som bygges i andre land. Dette er også gjort ved Brock Commons. Også ved Dalston Lane er det benyttet gips for å beskytte bakenforliggende trekonstruksjoner i en tid som trolig vil være langt over tiden for et fullstendig brannforløp. Tiltaket vil være av noe mindre betydning i de tilfellene hvor det i hovedsak er limtrekonstruksjoner.

Tiltaket med innkledning av gips er ikke avhengig av menneskelig handling, og anses å ha lav innvirkning på kompleksitet, sammenlignet med en preakseptert løsning, som for eksempel bærende konstruksjoner i stål, som også må beskyttes. Det er altså ikke flere tiltak som må fungere uavhengig av hverandre. I de tilfellene hvor gipskledning beskytter bakenforliggende bæresystem i 90-120 minutter, og bæresystemet i tillegg har tilsvarende brannmotstanden, vil dette gi økt redundans. Verken sårbarhet eller følsomhet påvirkes av det kompenserende tiltaket, mens pålitelighet kan diskuteres:

3.4.3.4 (23) angir at svikt i brannbeskyttende kledning kan inntre som følge av enten forkulling eller mekanisk svikt som følge av materialet i kledningen, utilstrekkelig gjennomføringsdybde av innfesting i trekonstruksjonen bak, utilstrekkelige avstander eller mellomrom mellom innfestingen. Det angis også at tid til svikt er avhengig av temperatur og størrelse på platen, og orienteringen av denne. Ved å bruke for korte skruer kan altså platene falle av i en tidlig fase i en brann. Montering av gipsplater er en svært standard arbeidsoppgave, og det skal monteres iht. anvisning fra produsent av gipsplatene, med forskyving når det er flere lag, og sparkling av skjøter og skruer.

Risiko for feil utførelse vil derfor tilsynelatende være lav. Gipsplater er skjøre, og kan i bruksfase lett få skader. Det er derfor viktig at dette undersøkes og utbedres. Ved flere lag gips utenpå hverandre, vil risiko for skader, samt konsekvensen av dette, reduseres.

Gips vil være et svært godt tiltak med hensyn til et høyere sikkerhetsnivå i høye trehus. For å ivareta funksjonskravet om at bæresystemet skal opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i den tid som er nødvendig gjennom et fullstendig brannforløp, vil innkledning med gips være helt nødvendig. Antall lag vil avhenge av brannforløpet, som bør beregnes, med mindre det velges en mer konservativ løsning med flere lag branngips, slik som praksis er i Canada. Innkledning med gips vil også være nødvendig for å tilfredsstille kledningskravet i rømningsveier, men da vil ett lag normal gips være tilstrekkelig for å ivareta kravet om ti minutters beskyttelse av bakenforliggende konstruksjoner. Med riktig utførelse synes innkledning med tilstrekkelig antall lag gips å være et like godt tiltak som den preaksepterte løsningen det fravikes fra.

6.3 Økt brannmotstand på bærende konstruksjoner

Kapittelet omfatter også økt forkullingsrate, da dette vil gi økt brannmotstand.

Økt brannmotstand på trekonstruksjoner vil si tykkere konstruksjoner, noe som igjen øker brannenergi, slik at bæresystemet vil gi et større bidrag til brannen. Tiltaket vil gi ekstra tid for slokking for brannvesenets innsatsmannskaper, og bidrar dermed til å hindre en kollaps i byggverket. Siden sprinkleranlegget vil kontrollere en brann slik at påkjenningen mot de bærende konstruksjonene reduseres, vil tiltaket først og fremst kun ha en funksjon dersom sprinkleranlegget svikter. Tiltaket vil ikke påvirke personsikkerhet for de som oppholder seg i bygget, da det forventes at alle personer er kommet seg ut, enten på egen hånd, eller ved hjelp av brannvesenet, før det er kritisk for kollaps.

Økt forkullingsrate dersom det benyttes lim som delaminerer, vil ikke nødvendigvis gi økt brannmotstand på konstruksjoner. For å ivareta nødvendig brannmotstandstid må hensyn som delaminering tas med ved dimensjonering av trekonstruksjoner. Økt brannmotstand kan også ivaretas ved å kle inn med gips eller andre typer plater. Beregning av forkulling og utfordringer ved dette som bør tas hensyn til, er beskrevet i kapittel 2.3.

Det er ikke oppgitt i noen av tilfellene om det har blitt regnet på forkullingsdybde ved hjelp av parametrisert brann, hvor beskyttelse av et sprinkleranlegg tillater å legge inn en faktor på 0,6 for brannenergi. Dette vil ha stor effekt på dimensjoneringen av bæresystemet.

Refleksjon

Ved Brock Commons er alle trekonstruksjoner kledd inn med tre-fire lag branngips, slik at konstruksjonene ikke skal eksponeres, mens bærende konstruksjoner ved Dalston Lane er beskyttet i minst 90 minutter.

Ved Moholt 50/50 er det benyttet en høyere forkullingsrate, og konstruksjonene er dimensjonert til å tåle 84 mm forkullingsdybde. Dette tilsier ca. 0,93 mm/min i 90 minutter. Med bakgrunn i at dette er gjort for å ivareta delaminering, er ikke dette vurdert som et kompensierende tiltak, men som nødvendig for tilstrekkelig dimensjonering.

Ved Mjøstårnet er hovedbæresystemet i limtre dimensjonert for å tilfredsstille R 120.

Tiltaket kompensere for at bærende konstruksjoner er brennbare i stedet for ubrennbare. Tiltaket består i å øke dimensjoneringen på et tiltak som allerede er til stede. Det er derfor ikke avhengig av menneskelig handling for å fungere, og påvirker verken kompleksitet, fleksibilitet, sårbarhet eller pålitelighet.

Ved å dimensjonere opp bæresystemet ved bruk av massivtre, vil ikke dette nødvendigvis bidra til at bæresystemet kan stå i et fullstendig brannforløp, men heller forlenge brannforløpet ved at det tilføres mer brensel. I tilfelle sprinklersvikt vil risiko for kollaps av byggverket uansett være avhengig av brannvesenets slokkeinnsats. Ved bruk av massivtreelementer som delaminerer, må dette uansett tas hensyn til ved dimensjonering. Dette kan beregnes ved flere ulike metoder, som angitt i kapittel 2.4.1.4. Det anbefales at dette gjøres konservativt, med bakgrunn i svært mange usikkerheter ved dimensjonering av forkullingsdybde. Økt brannmotstand i høye bygninger vil være et svært fornuftig tiltak. Innkledning av bæresystemet med flere lag gips, vil uansett være et bedre tiltak, da dette vil hindre at trekonstruksjonene gir et bidrag til brannen i form av økt brannenergi.

6.4 Beskyttelse med brannmaling og brannimpregnering

Synlige trekonstruksjoner er ofte ønskelig av estetiske årsaker, men også på grunn av effekten på innneklima. For å redusere konflikten med brann sikkerhet, er det mulig å benytte brannmaling eller brannimpregnering. Tunge trekonstruksjoner, som massivtre og limtre, vil ikke kunne impregneres (med mindre hvert lag behandles før sammenpressing), men kan brannmales for å redusere risiko for antennelse. For utvendig kledning benyttes ofte brannimpregnering. Det finnes i dag ikke godkjente produkter for å øke brannmotstanden på bærende trekonstruksjoner, men det er likevel svært interessant å se på hvilken effekt disse metodene vil kunne ha for å påvirke forkullingsdybde.

Tre kan aldri bli ubrennbart, uansett behandling. Den høyeste klassen tre kan oppnå, er klasse B, begrenset brennbart. Brannimpregnert tre som er impregnert ved en trykkimpregneringsprosess, kan oppnå enten B-s1,d0 eller B-s2,d0, avhengig av tresort. En brannmalt kledning vil kun tilfredsstille overflatekravet, ikke kledningskravet.

Ved ønske om bruk av utvendig trekledning, kan det benyttes brannimpregnert tre. Dette vil tilfredsstille ytelse angitt i VTEK for utvendig kledning (D-s2,d0). Bruk av brannimpregnert tre på fasade vil derfor ikke regnes som et kompenserende tiltak, men som en måte å oppnå preakseptert ytelse.

Ved ønske om synlige massivtrevegger innvendig, vil dette være en preakseptert løsning i brannceller mindre enn 200 m² (med unntak av rømningsvei, og i risikoklasse 6). I større brannceller er det vanlig å akseptere fravik på trekledning i bygg som er sprinklet, da overflate og kledning har mindre betydning for brannens utvikling i et sprinklet bygg. Dette ble også utredet i forbindelse med høringsutkastet til nye preaksepterte ytelser for sprinklede bygg til TEK17, men ble ikke innført (106).

Brannmaling

Overflatebehandling skal i hovedsak redusere flammespredning på overflaten. Brannmaling av tre fungerer ved at malingen danner et beskyttende lag utenpå treet. Ved varme vil malingsfilmen svulle opp og isolere mot brannspredning. På denne måten vil ikke treet komme opp i temperaturer høye nok til å avgis brennende gasser, slik at det ikke kan underholde en brann (107). Bruk av svellende brannmaling påvirker både antennelse, varmetapsrate, forbrenningsrate og flammespredning, parametere som er relevante for klassifisering av materialer (108).

Brannmaling må påføres i flere omganger, og må også vedlikeholdes. Brannmaling vil i høye trehus være mest aktuelt i rømningsveier hvor det er ønskelig med synlig tre.

For en luftet kledning vil alle sidene av kledningen måtte behandles. I tillegg må kledningen etterbehandles etter en tid for å fortsatt ivareta de branntekniske egenskapene. Dette betyr at kledningen må demonteres for hver behandling, noe som gjør dette til en svakt alternativ. Brannmaling vil også miste sin effekt ved skader som skraper, etc.

Brannimpregnering

Brannimpregnering av tre foregår ved at tre eller finer vakuum-trykkimpregneres med en brannhemmende væske. Ved brann vil de brannhemmende komponentene i impregneringsmiddelet omdanne de brennbare gassene fra treet til ikke-brennbare gasser, som karbondioksid, ammoniakk og vann. Treet forkulles, og det dannes ikke flammer. På denne måten vil ikke brannen spre seg og treet bidrar ikke til brannen. Utvendig panel må overflatebehandles, mens ved innvendig bruk kan det være ubehandlet etter brannimpregneringen (107). Treets egenskaper påvirker resultatet. Dette betyr at alle tresorter som er brannimpregnert må gjennom en egen branntest.

Montering av trekledningen er svært viktig, da det ofte er forutsetninger i godkjenning som må følges. For eksempel kan et produkt som monteres med luftespalte ha dårligere branntekniske egenskaper enn uten. Det er i tillegg viktig å være klar over VTEK også stiller krav til at bakenforliggende materiale skal ha samme branntekniske egenskaper som kledningen. Dette betyr at også lektene bak må være brannimpregnerte.

Ved brannimpregnert trekledning som benyttes utvendig, vil det være risiko for at effekten av brannimpregneringen svekker over tid. Dette kan skyldes to årsaker:

- Risiko for at fuktinnholdet øker, og at fukten migrerer ut brannbeskyttelsesmiddelet, og at det da dannes saltkrystaller på treets overflate. Dersom det er synlige krystaller på overflaten, vil ikke trekledningen lenger ivareta branncravet.
- Brannbeskyttelseskjemikalene lekker ut.

Problematikken kommer av bruk av brannbeskyttelsesmiddel basert på ammoniumfosfat eller salter. Dette kan unngås ved å benytte leverandører som har CE-sertifiserte produkter, leverer DoP (Declaration of Performance) samt kreve dokumentasjon for bestandighet (27).

Bærende konstruksjoner

Bærende stålkonstruksjoner kan brannmales for å oppnå tilfredsstillende bæreevne ved brann. Det finnes per i dag ikke noe tilsvarende malingsprodukt for bærende konstruksjoner i tre. Tester har vist at brannmaling som er ment for å hindre brannspredning vil ha en viss effekt også for å hindre/reducere forkulling av bærende konstruksjoner. Branntester ble utført i Østerrike på norsk gran, for å sammenligne forkulling på brannmalt og ubehandlet tre. Testene, som ble utført både iht. ISO 834 standard testkurve og med konkalorimeter med en varmefluks på 50 kW/m^2 , viste at ved standard brannmalingsprodukter ble forkullingsdybden redusert med ca. 10 mm i løpet av 30 minutter. Ved test iht. ISO 834, startet forkullingen ca. fem minutter etter det ubehandlede prøvestykket, i tillegg til at forkullingsraten var lavere (108).

På 80-tallet ble det utført branntester iht. teststandard ASTM E-119 for å se på sammenhengen med brannimpregnert tre og forkulling. De fleste impregneringene var basert på uorganiske salter. Forkullingsratene var redusert med inntil 25 % sammenlignet med ubehandlet tre. Ved test av overflatebehandlet tre ble det observert inntil 40 % redusert forkullingsrate, i hovedsak som følge av forsinkelse av start på forkulling som skyldtes et isolerende lag på 20-30 mm. Testtid var nesten 1 time (109).

Refleksjon

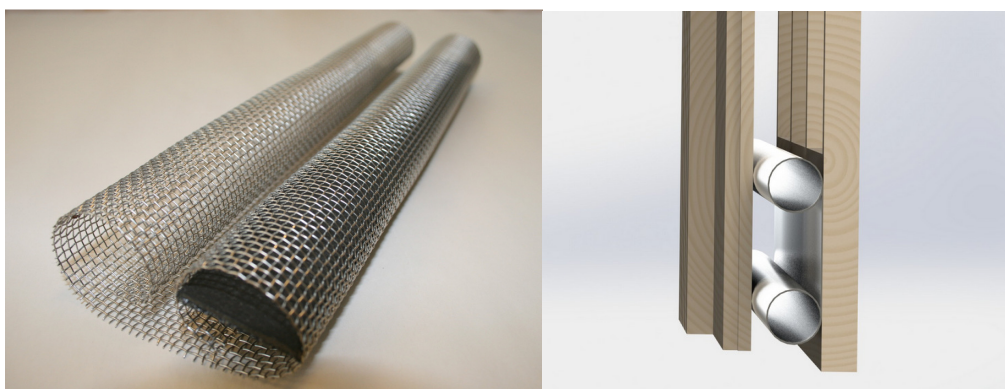
Tiltaket kompenserer for bruk av trekledning, både innvendig og utvendig. Ved bruk av brannimpregnert tre for å oppnå B-s2,d0 på fasade, er ikke tiltaket direkte kompenserende, men enn måte å oppnå preakseptert løsning. Tiltaket er ikke avhengig av menneskelig handling for å fungere, og påvirker ikke kompleksitet, fleksibilitet eller redundans. Følsomhet påvirkes da det er behov for vedlikehold. Bruken i bygget vil ha betydning for hvor realistisk det er at dette følges opp i tilstrekkelig grad.

Påliteligheten til tiltaket vil være lavere enn den preaksepterte løsningen det kompenserer for. Dette henger sammen med risiko for feil påføring av brannhemmende maling/lakk og manglende vedlikehold, samt at det finnes produkter på markedet som har dårlig holdbarhet over tid, blant annet som følge av at det produseres produkter som er basert på ammoniumfosfat eller salter.

Sammen med andre tiltak, som for eksempel sprinkling, kan det likevel gi et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Dette må vurderes ut ifra hvor det gjelder (innvendig/utvendig/rømningsvei) og hvilken konsekvens dette kan få. Det behøver ikke være kritisk at det aksepteres brannmalt trekledning i et trapperom som er rømningsvei, selv om preakseptert ytelseskrav ikke oppnås. Planløsning og kombinasjonen av flere tiltak må vurderes i hvert enkelt tilfelle. Dette kan for eksempel være at det ikke legges til rette for at det er mulig å sette fra seg gjenstander (det er ikke plass) og at det er sluse foran trapperom, slik at en åpen dør fra en tilliggende branncelle ikke gir direkte eksponering av flammer, i tillegg til at det er sprinklet. Risiko for at en brannmalt trekledning da skal kunne gi uakseptable forhold i trapperommet vil da være minimal, til tross for at løsningen ikke kan verifiseres å være like sikker som preakseptert løsning (A2-s1,d0).

6.5 Hulromsventiler

For å redusere brannspredning i hulrom bak fasade, benyttes massive konstruksjoner, som for eksempel tre, steinull eller gips, som en skillende konstruksjon. Dette omtales som brannstopp. Ofte er det nødvendig å ivareta lufting bak kledning, og det kan da benyttes brannklassifisert hulromsventil. Tiltaket benyttes som et kompenserende tiltak for at materialet i hulrommet bak ytterveggskonstruksjonen ikke tilfredsstiller B-s3,d0, men vil også være et positivt tiltak i forbindelse med at brannvesenet ikke kommer til for å slokke i øverste del av de høyeste bygningene. En brann i hulrom er både vanskelig å oppdage og å slokke, brannstopp vil derfor være et godt tiltak for å redusere brannspredning. Hulromsventilene har brannmotstand opp til EI 90 og kan benyttes uten å bryte kledningen, slik at lufting ivaretas på en god måte.



Figur 28: Eksempel på hulromsventil og plassering i yttervegg (110)

Hulromsventilen fungerer ved at et metallnett, formet som en rull, hindrer gjennomtrenging av flammer pga. størrelsen på luftehullene. I tillegg inneholder den et ekspanderende materiale som tetter lufteåpningene når den eksponeres for varme (110). Produktet blir benyttet både bak trekledningen, lagt hele veien i hvert etasjeskille, og over vinduskonstruksjoner.

Refleksjon

Hulromsventilene er ikke avhengig av menneskelig handling for å fungere. Tiltaket øker kompleksiteten i bygget sammenlignet med den preaksepterte løsningen, som er begrenset brennbar kledning og bakenforliggende materiale. Dette skyldes at det er et ekstra tiltak som må fungere. Risiko for feilmontering er til stede, og produktet har derfor lavere pålitelighet enn den preaksepterte løsningen. Det er mulig å montere hulromsventilene feil vei, da intumescentbåndet må ligge ned, og intumescentmassen må ligge parallelt med monteringsoverflaten. Ventilene må ligge helt tett i skjøtene, og må ligge i klem i hulrommet det monteres i, men ikke slik at de deformeres.

Ved bruk av oppdeling med lekter, isolasjon eller gips, vil risiko for feilmontering være langt lavere, og påliteligheten på tiltaket vil derfor økes. Følsomhet og sårbarhet vil ikke påvirkes av tiltaket.

Det er prosjektert med oppdeling av hulrom ved Moholt 50/50, Mjøstårnet og Treet, og det er benyttet ulike løsninger med brannimpregnerte lekter som deler opp hulrom, og brannklassifiserte hulromsventiler. Det er ikke funnet informasjon om at det er benyttet noen form for oppdeling av hulrom i de gjennomgåtte byggverkene i utlandet.

Tiltaket vil være en svakere løsning enn det som det kompenseres for. Riktig plassert og montert, vil det kunne begrense brannspredning til hulrom, og videre i hulrommet, men preakseptert løsning med kledning eller bakenforliggende materiale i begrenset brennbart materiale vil være vanskeligere å antenne. Ofte benyttes GU bak kledning ved preakseptert løsning, som vil være en langt bedre løsning enn brennbare konstruksjoner og oppdeling.

6.6 Økt krav til kjølesoner

Med kjølesone menes avstanden mellom to vinduer ovenfor hverandre i ulike etasjer, som også er ulike brannceller. I Norge er kravet at forholdet mellom vinduene skal være minst 1:1, det vil si at avstanden mellom vinduene skal være minst like stor som høyden på det underliggende vinduet. Yttervegg mellom vinduene må tilfredsstille minst E 30, noe en isolert yttervegg normalt gjør uten ytterligere tiltak. Et alternativ til kjølesone er å benytte utkragende bygningsdel, som for eksempel balkongdekke med brannmotstand som vil forskyve flammene bort fra fasaden. Andre land opererer med andre høydekrav for kjølesone, for eksempel 1,2 m uansett høyde i Sverige, og tilsvarende 0,9 m i Australia og 1,5 m i USA. Ved høye vindusfelt vil kravet i Norge mer konservativt. Det er et preakseptert unntak i de fleste land å kunne utelate dette kravet i bygg som er sprinklet. Dersom en brann går til overtenning og flammene står ut av vindusåpningen, vil flammene, dersom de er høye nok, kunne medføre brannspredning til etasjen over. Lett antenkelige materialer som f. eks. bomullsgardiner bak vindusfeltet over vil kunne antenne ved et strålingsnivå på ca. 12,5 kW/m² (111).

Ved Mjøstårnet og Treet er det valgt å beholde kjølesone 1:1, i tillegg til at det er sprinklet. Dette er ikke direkte et kompensierende tiltak for et fravik, men et virkemiddel for å redusere risiko siden det bygges høyt og med brennbare materialer, selv om fasade tilfredsstillende preakseptert ytelse. Tiltaket vil også kompensere for at brannvesenet har manglende tilgjengelighet i høyden. Ved HoHo Wien, Brock Commons og Moholt 50/50 er det brukt store glassfelt i hver etasje i fasade.



Figur 29: Brann i leilighet i bygård i Oslo (112)



Figur 30: Brann i leilighet på Stathelle (113)

Ved å se på bilder fra branner, er det lett å finne eksempler på at kjølesone 1:1, eller henholdsvis 0,9 og 1,2 m ikke alltid vil være tilstrekkelig. To eksempler på dette er vist i Figur 29 og 30. Figur 32 viser eksempel på kjølesone kun ivaretatt av sprinkleranlegg. Beregning av flammehøyde fra en åpning i en yttervegg kan utføres iht. NS-EN 1991-1-2 Eurokode 1 (2), Tillegg B.

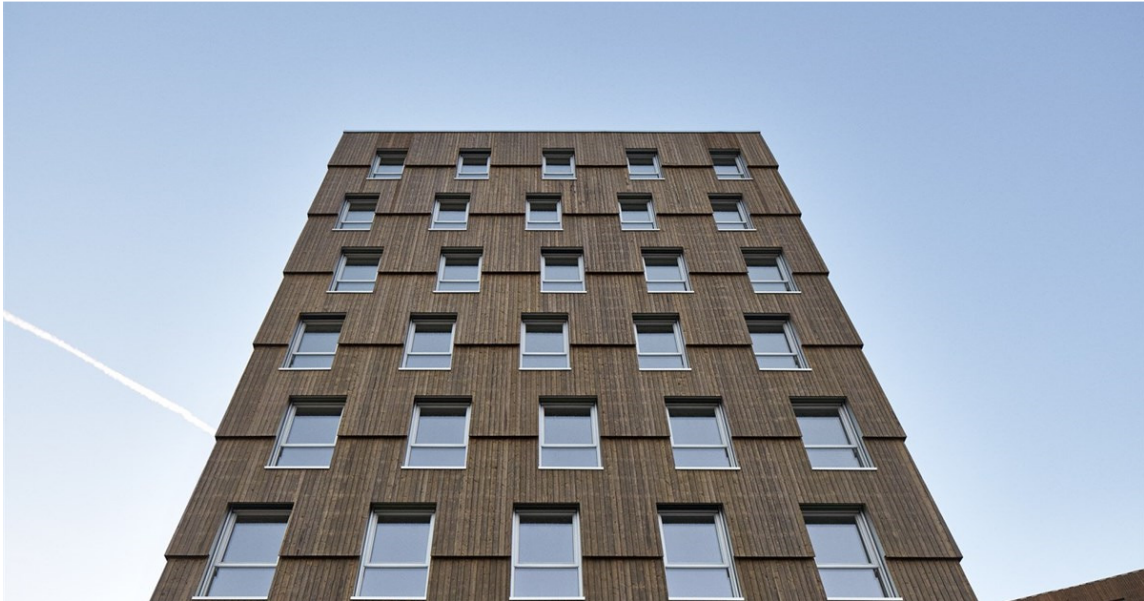
Ved IRC's National Fire Laboratory i Canada ble det i 1989 gjennomført branntester for å se på strålingsnivået i ulike avstander over vindusåpning ved flammer ut av vindu med ulike vindusstørrelser (114). Testene viste at forholdet mellom høyde og bredde påvirket formen på flammene ut vinduet, og at høye, smale vinduer ga lavere risiko for brannspredning enn lave, brede vinduer. De høye vinduene ga en flamme som strakte seg bort fra fasaden, slik at strålingsnivået målt av termoelementene som var montert inntil fasadene var lavere. Resultatene fra testene er vist i Figur 31. Branntester som har vist økt forbrenning på utside av vindu ved bruk av trekledning er beskrevet i kapittel 2.4.1.3.

Resultatene fra branntestene er sammenlignet med beregninger av høyde på flammer ut av vinduer iht. forenklet metode angitt i Tillegg B i Eurokode 1. Flammehøyde angis som høyde på flamme over overkant vindu. Både beregningene og branntestene viste laveste flammehøyde på vinduer som var store både i bredde og i høyde (b x h 2,6 m x 2,7 m). Flammehøyde ble da beregnet til 1,52 m ved branneffekt 8,6 MW. I branntestene var flammehøyden størst ved lave, men brede vinduer, hvor teststørrelsen var (b x h) 2,6 m x 1,37 m. Ved beregning ga dette ved branneffekt 5,5 MW en flammehøyde på 1,76 m over vindu, og ved 8,6 MW, 2,85 m. Både beregninger og testresultat viste at når vindushøyde økte fra 2,0 m til 2,7 m, ble flammehøyden redusert.

Window (W x H) (m)	Height above window (m)	Total heat flux density (kW/m ²) for heat release rate:			
		5.5 MW	6.9 MW	8.6 MW	10.3 MW
0.94 x 2.00	0.5	43.9	58.6	75.5	--
	1.5	12.4	17.7	25.9	--
	2.5	7.7	9.9	15.9	--
	3.5	3.9	5.1	8.1	--
0.94 x 2.70	0.5	19.2	34.8	53.2	68.3
	1.5	6.3	10.4	15.9	23.2
	2.5	3.5	6.0	9.8	13.7
	3.5	1.7	3.0	4.8	6.7
2.60 x 1.37	0.5	24.5	53.2	104.3	208.7
	1.5	22.9	33.1	58.6	122.4
	2.5	13.2	17.2	51.2	103.9
	3.5	11.5	15.6	28.3	56.5
2.60 x 2.00	0.5	10.5	17.4	29.5	43.4
	1.5	5.2	9.4	14.8	20.8
	2.5	4.5	7.4	12.6	16.3
	3.5	2.9	5.4	8.2	9.6
2.60 x 2.70	0.5	6.5	11.4	17.4	29.1
	1.5	2.9	5.3	8.1	12.8
	2.5	2.0	4.2	5.7	9.1
	3.5	1.4	2.9	3.6	5.6

Figur 31: Varmestråling målt i ulike høyder over vindu ved ulik branneffekt (114)

Testene viste at strålingsnivået øker med økt varmetapsrate. Eksponeringen øker også raskere enn varmetapsraten på grunn av at en økende andel av forbrenningen foregår utenfor vinduet. Store vinduer medfører at mer av brenselet brenner på utsiden av vinduet, mens temperaturen og høyden på de utvendige flammene da vil reduseres. Ved å følge ytelseskrav i VTEK om avstand minst 1:1, ville dermed den preaksepterte løsningen svært sannsynlig kunne medført brannspredning, mens kravet for høye vinduer vil være svært konservativt.



Figur 32: Fasade Moholt 50/50 (115)

Refleksjon

Økt krav til kjølesoner er et tiltak som ikke avhengig av menneskelige handlinger for å fungere, og kompleksiteten og påliteligheten påvirkes ikke. Tiltaket kompenserer for at brannvesenet har svakere innsatsmuligheter i høyden, men vil også kompensere for økt risiko for brannspredning ved at en større grad av flammene brenner på utsiden av vinduet. Tiltaket består i å øke et tiltak som allerede er til stede. Det er derfor ikke avhengig av menneskelig handling for å fungere, og påvirker verken kompleksitet, fleksibilitet, sårbarhet eller pålitelighet. Tiltaket vil også øke redundansen, da det vil ivareta en funksjon i tilfelle sprinklersvikt. Dersom sprinkleranlegget fungerer som det skal, vil dette hindre overtenning, og tiltaket vil ikke ha noen effekt.

Selv om standarder for dimensjonering av brann følges, synes risiko for brannspredning i fasade i mange tilfeller ikke å være tilfredsstillende ivaretatt. Trekonstruksjoner øker brannenergi i rommet, noe som bidrar til ventilasjonskontrollert brann, og en større del av gassene forbrennes utenfor vindu. Dette gir større flammer som øker risiko for brannspredning via vindu til etasjen over. Kravene er forskjellige i ulike land, men både tester og erfaring fra branner har vist at dette ikke vil være tilstrekkelig for å hindre brannspredning. I tillegg kommer forhold som vind, som kan endre forutsetningene for flammehøyde.

Ingen av byggene kan sies å være plassert beskyttet med tanke på vindforhold, noe som er vanskelig når det bygges så høyt. I to av byggverkene ble det kompensert ved å ivareta kjølesonekravet på 1:1 selv om byggene var sprinklet.

Testene som er beskrevet med eksponerte massivtrevegger i brannrommet, viser at sprinklersvikt vil få en enda større konsekvens med hensyn til brannspredning mellom ulike etasjer. Konsekvensen ved sprinklersvikt avhenger av om det påvirker personsikkerheten i bygget, eller ikke. Det vil si at de som oppholder seg (og i verste tilfelle sover) i branncellen over, blir varslet og rekker å komme seg ut i tide. Som eksempel er det sett på branntesten med utkoplet sprinkleranlegg ved Moholt 50/50. Detektor i hybel utløste etter 1:06 (minutter:sekunder). Overtening inntraff etter 4:00 (24). Med en forsinkelse på fem minutter før brannalarmanlegget går i stor alarm og personen i etasjen over blir varslet, har det allerede vært overtening i startbranncellen i to minutter. I tillegg må det legges til en reaksjonstid, noe som vil være umulig å anslå for sovende personer, da enkelte ikke våkner av brannalarm. Reaksjonstid kan spesielt forventes å øke på nattetid i helg i et hybelbygg. Dette viser at ved for liten kjølesone mellom vinduer i ulike etasjer, vil ikke nødvendigvis personsikkerheten være ivaretatt ved sprinklersvikt. Også tiden for oppvarming gjennom vindu ved stråling fra flammene, og hva slags materialer, som for eksempel gardiner som er på innsiden, vil ha innvirkning på dette. Bomullsgardiner vil typisk kunne antenne raskt. Dersom vinduet i tillegg står åpent, er topphengslet og slår utover, skal det veldig lite til før gardiner på innsiden antenner.

Beregning av høyde på flammer ut vindu i henhold til tillegg B i Eurokode 1 synes ikke å være konservative nok. Beregningene baserer seg på branneffekt, uten at tid tas hensyn til. Dermed vil det ikke ha noen betydning om brannen er ventilasjonskontrollert eller brenselskontrollert, selv om dette er en svært viktig faktor for størrelse på flammer ut av vindu. I hovedsak vil det være fornuftig å ivareta kjølesonekrav i tillegg til sprinkler der brannvesenet ikke kommer til, og det bør i hvert tilfelle vurderes om personsikkerhet er ivaretatt.

7 Diskusjon

På slutten av hvert kapittel er det tatt med en egen del med refleksjon, basert på innholdet i hvert enkelt tema, der dette er aktuelt. I dette diskusjonskapittelet er det sett mer på de helhetlige forholdene ved utfordringer og kompenserende tiltak i høye trehus.

Høye bygninger vil i henhold til Byggteknisk forskrift plasseres i brannklasse 3 og 4, og bæresystemet skal da dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres (42). Funksjonskravet vil som tidligere nevnt ikke ivaretas ved bruk av eksponerte massivtrekonstruksjoner, da det ikke er mulig å verifisere at ikke alle brennbare konstruksjoner ikke brenner, og at bygget ikke kollapser som følge av dette. Slokkeinnsats fra brannvesenet må da påregnes. Fordelen er at det brenner stabilt, slik at slokkemannskaper lett kan anslå tilgjengelig tid for slokking, før usikre forhold inntreffer.

Eurokode 5 ivaretar heller ikke massivtrekonstruksjoner, og det finnes dermed ingen godkjent standard å legge til grunn for en slik modellering. Risiko for dette er størst i tilfelle sprinklersvikt, og det synes ikke riktig å legge til grunn sprinkler ved en slik modellering, når ytterste konsekvens ved sprinklersvikt vil være kollaps av et høyhus. Det er svært mange forhold og usikkerheter som må ivaretas ved dimensjonering av trekonstruksjoner, utover det som er angitt i standarder. Nødvendig kompetanse er viktig, og de prosjekterende rådgiverne innenfor konstruksjon og brann må ha fokus på dette og stille krav til hva som leveres med tanke på nødvendig brannmotstand for det aktuelle bygget. Ved bruk av Eurokode 5, og også beregning av forkullingsdybde ved bruk av standardens Tillegg A, må de prosjekterende ha god kunnskap til forutsetningene som er angitt for denne bruken, og også hvilke utfordringer denne bruken kan medføre. Det å kun ivareta standarden vil ikke nødvendigvis være tilstrekkelig, derfor vil kompetansenivået til de prosjekterende være av stor betydning for sikkerhetsnivået i byggverket. Usikkerheter rundt for eksempel delaminering, brannenergi, åpningsfaktor og bruk av sprinkleranlegg for å redusere brannenergi må vurderes, og det må sees på hvilken konsekvens dette vil få i det aktuelle prosjektet. Disse faktorene gjør det vanskelig å beregne et fullstendig brannforløp. Det er derfor svært viktig at alle disse forholdene tas med i vurderingen, og at metoden for dimensjonering av massivtrekonstruksjoner benyttes med stor forsiktighet. Flere rom oppført i massivtre i samme branncelle vil medføre påkjenning på flere deler av bæresystemet på samme tid, noe som kan bli kritisk. Massivtre er derfor mest egnet når det er små brannceller.

Delaminering har stor innvirkning på forkullingsdybde, og må alltid legges til grunn ved beregning dersom det benyttes elementer med denne type lim. Entreprenørene betaler som regel for massivtre per kubikk, slik at økt forkullingsrate kan øke kostnaden på byggeprosjektet. Samtidig er det få som produserer elementer som ikke delaminerer, og det vil ikke være god nok produksjonskapasitet på disse til at alle kan kreve denne typen massivtre. For å få flere leverandører til å gå over til MUF-lim kreves noe omlegging av produksjonsprosessen, men som kanskje vil tjenes inn over tid. Produsentene som brukte PUR-lim viste til formaldehydnivået som hovedårsak til dette valget, og ikke kostnad.

Spørsmålet er hva som skal til for å bransjen til å gå bort fra bruk av PUR-lim. Kan brannrådgiver eller byggherre kreve at dette ikke skal benyttes i det aktuelle prosjektet? Byggherre har ofte ikke tilstrekkelig kunnskap, men mye av det som bygges av massivtre i Norge er for stat og kommune, og det må da kunne forventes et visst kompetansenivå. En brannrådgiver som i et prosjekt tør å stille krav til massivtre som ikke delaminerer vil sette seg selv i en svært vanskelig posisjon, dersom dette fordyrer byggeprosjektet vesentlig, og «alle» andre brannrådgivere mener at det er ok å benytte dette.

Funksjonskravene i de landene det er sett på, er som tidligere angitt i hovedsak svært generelle, og kun i Norge er det et spesifikt krav til at bæresystemet skal stå i et fullstendig brannforløp. Funksjonskravet synes å være fornuftig, da konsekvensen ved kollaps er stor, slik at dette ikke bør være noe som brannrådgiver kan dokumentere seg bort fra. DiBK, som er ansvarlig for Byggteknisk forskrift, har stort fokus på trekonstruksjoner i dag og vurderer flere endringer som følge av dette. Dersom det velges å innføre 6-8 etasjer i massive trekonstruksjoner som en preakseptert ytelse, bør det også legges noen forutsetninger til grunn for dette, slik at den økte risikoen ivaretas med risikoreduserende tiltak. I denne prosessen vil det være nyttig å se på hva som kreves i andre land, og hvordan dette fungerer. De fleste land som det er sett på har et lavere sikkerhetsnivå enn i Norge, noe som ikke anbefales ved bruk av trekonstruksjoner. Få land har kommet så langt at det er angitt særskilte krav for høye trehus, men i veiledningen som benyttes i Quebec i Canada for bygninger i massive trekonstruksjoner inntil 12 etasjer er det angitt at bærende massivtrekonstruksjoner skal kles inn med minst to lag branngips. Dette vil i henhold til den canadiske håndboken for massivtre gi to timers beskyttelse av den bakenforliggende konstruksjonen.

I byggene som har blitt gjennomgått i oppgaven er det store forskjeller på sikkerhetsnivået. Ved Brock Commons i Canada er trekonstruksjonene innkledd med tre-fire lag branngips, noe som gir 1,5-2 timers brannmotstand før trekonstruksjonene i det hele tatt blir eksponert. Sikkerhetsnivået i dette bygget kan sies å være tilnærmet likt som for et ubrennbart bygg. Ved HoHo i Østerrike er alt treverk synlig, med begrunnelse om at det forkullede laget vil beskytte de bakenforliggende trekonstruksjonene. Det er ikke kjent om det her er benyttet lim som delaminerer, men med tanke på holdningen i Østerrike om at PUR-lim er helseskadelig, vil dette være nærliggende å anta. Dalston Lane er ikke sprinklet, men der er ingen av massivtreelementene eksponert. De øvrige som er gjennomgått er sprinklet, og det er også gjort ekstra tiltak for å øke påliteligheten på sprinkleranlegget. Med bakgrunn i manglende erfaring med branner i høye trehus, synes det å være riktig å følge eksempelet for Brock Commons i Canada, hvor alt av massivtre er beskyttet med flere lag gips. På grunn av byggets høyde synes det fornuftig å beskytte i så lang tid, mens det for et lavere bygg vil kunne være mulig å beregne nødvendig antall lag gips ut fra branneeksponeringstid i henhold til Eurokode 1, Tillegg A, med en gitt sikkerhetsmargin.

Minimumsnivå angitt i preaksepterte ytelser må ved alternative løsninger ivaretas med en løsning som er minst like sikker. Et boligbygg i betong på for eksempel åtte etasjer må uansett sprinkles i Norge. Sprinkler vil dermed ikke være kompenserende, men det vil være kompenserende å øke påliteligheten på anlegget ved å legge til grunn Tillegg F, til tross for at den kompenserende effekten reduseres for bygninger som er så høye at det uansett vil være krav til Tillegg E. Likevel er det viktig å ta med seg at sprinkleranlegget også har en svært positiv effekt på flere forhold enn at bygget har brennbare konstruksjoner. Sprinkler vil også hindre en brann i å utvikle seg og gå til overtenning, slik at belastningen på konstruksjoner reduseres og tilgjengelig rømningstid økes.

Siden sprinkleranlegg ikke har en pålitelighet på 100 %, men statistisk sett vil fungere i ca. 9 av 10 tilfeller, vil det være nødvendig at sikkerheten er ivaretatt også ved sprinklersvikt. Dette gjelder spesielt personsikkerhet og risiko for kollaps av høye bygninger. Konsekvensen av hvert fravik må derfor også vurderes uten sprinkler. I bygninger med mennesker som sover, hvor det ikke er personale som kan bistå med evakuering, kan reaksjonstiden være lang, da ikke alle våkner av brannalarm. Størst risiko vil det være dersom sovende personer også har drukket alkohol, noe det vil være økt risiko for i studentboliger.

Den største årsaken til at sprinkleranlegg ikke fungerer er at anlegget er avslått. Overvåking av anlegget vil derfor være et svært avgjørende tiltak. Ved Brock Commons i Canada har anlegget direkte overvåking fra brannvesenet. På denne måten vil det enklere kunne oppdages om anlegget er avslått.

I høye bygninger, hvor det ikke er sprinklerkrav som følge av bruk, vil det i de fleste tilfeller uansett benyttes som kompenserende tiltak, og da gjerne for flere fravik. Sprinkler kompenserer for flere preaksepterte lempelser, og i tillegg til fravik akseptert av brannrådgiver, vil dette blant annet kunne medføre følgende reduksjoner:

- manglende kjølesone mellom vinduer i ulike etasjer (preakseptert lempelse ved sprinkling)
- sikring av funksjoner som skal fungere ved brann (preakseptert lempelse ved sprinkling)
- økt omfang av kabler over himling i rømningsvei (preakseptert lempelse ved sprinkling)
- redusert skjermingskrav av utvendig rømningsvei (preakseptert lempelse ved sprinkling)
- brennbar kledning (både innvendig og utvendig)
- bæresystem er brennbart
- branncellebegrensende konstruksjoner er brennbare
- lavere brannenergi legges til grunn ved dimensjonering av trekonstruksjoner (iht. parametriske branneksponeering i Eurokode 5).

I tillegg mangler det godkjente produkter for branntetting, og effekten på antennelse og forkulling av massivtreelementer som har krympet etter noen år er ikke kjent. Dette medfører enda flere usikkerheter. Sprinkler brukes mange ganger for å kompensere for lempelser og fravik, noe som gjør brannsikkerheten sårbar. Ved å i tillegg benytte lim som delaminerer, legges det et veldig stort ansvar på sprinkleranlegget. Pålitelighetstall som benyttes er ikke nødvendigvis korrekte, og i høye bygninger hvor anlegget i tillegg er avhengig av at sprinklerpumpe må fungere, reduseres påliteligheten ytterligere. Det vil derfor være helt nødvendig å gjøre tiltak for å øke påliteligheten til sprinkleranlegget, for eksempel ved å benytte seg av tillegg F.

For å ivareta sikkerheten også ved sprinklersvikt vil det være nødvendig å også benytte seg av andre tiltak. Å øke brannmotstanden på bærende konstruksjoner vil være et fornuftig tiltak i høye bygninger, men tiltaket medfører også en negativ effekt dersom det er benyttet eksponert massivtre, da det også vil gi et enda større bidrag til brannen. Brannmaling og brannimpregnering er først og fremst tiltak for å kompensere for at det benyttes brennbar kledning, og er i hovedsak benyttet for å ivareta et tilfredsstillende sikkerhetsnivå på utvendig kledning. Hulromsventiler og økte krav til kjølesoner er også tiltak for å redusere utvendig brannspredning, og kan være helt nødvendig i høye byggverk, hvor brannvesenet ikke kommer til med sitt høydemateriell.

Økte kjølesonekrav vil også kunne påvirke personsikkerheten, som følge av at en branncelle med trekledning på vegger og i himling vil gå raskere til overtenning, og at sovende personer i branncellen over kan ha lang reaksjonstid.

Det sikreste tiltaket vil være å kle inn massivtrekonstruksjoner med flere lag med gips. Tiltaket vil ha svært høy pålitelighet, og vil ha en positiv effekt på mange forhold; redusert brannenergi, lengre tid til overtenning, som igjen vil gi økt tilgjengelig rømningstid samt økt brannmotstand på bærende konstruksjoner (også som følge av at delaminering ikke oppstår). Og ikke minst, kravet i teknisk forskrift som angir at bæresystemet skal stå i et fullstendig brannforløp, og at valgt løsning er minst like god som preakseptert, vil være ivaretatt.

Behovet for kompenserende tiltak må alltid vurderes i hvert prosjekt, hvor bruk og antall etasjer vil være svært relevant. Et viktig skille går på åtte etasjer, da dette er grensen for hvor langt brannvesenet normalt klarer å nå med sitt høydemateriell. Også VTEK har et tydelig skille på åtte etasjer, da flere krav som for eksempel brannheis, stigeledning og trapperom Tr3 (trykksatt trapperom og mellomliggende rom) inntreer. Et riktig sikkerhetsnivå for et byggverk over åtte etasjer i massivtre bør inkludere sprinklerstandardens Tillegg F, innkledning med gips som tilsvarer minst 1-2 timer, kjølesoner 1:1, og oppdeling av hulrom bak kledning. Tilstrekkelig beskyttelse med gips bør vurderes i hvert tilfelle, for eksempel ved hjelp av ekvivalent branneksponeeringstid. Dette vil både tilfredsstille funksjonskravene i Byggteknisk forskrift, og også ivareta det påkrevde sikkerhetsnivået om at de valgte løsningene skal ha et minst like høyt sikkerhetsnivå som de preaksepterte.

Ved ønske om synlig massivtre bør det være mulig å vurdere dette, men da kun i et svært begrenset omfang. Det er da også viktig å se på hvor i byggverket det er. For eksempel i brannceller hvor det forventes lav risiko for brannstart og brannutvikling. For byggverk som bæres av limtre synes det å være akseptabelt med synlige konstruksjoner, så fremt økt brannmotstand vurderes. Dette begrunnes i at limtrekonstruksjoner vil gi et langt mer redusert bidrag til brannen enn hva massivtre gjør.

Erfaringsmessig gjøres det mye feil i byggefasen. Det er svært viktig at de kompenserende tiltakene blir kontrollert ved utførelse underveis i byggefase, for å redusere risiko for at feil utførelse får konsekvenser. Selv om det ikke kreves uavhengig kontroll av brannteknisk utførelse (KUT) i byggesaken, er det fornuftig at entreprenør eller byggherre får dette utført av et kompetent firma som et selvpålagt krav. Det har stor betydning at branntetting og knutepunkt utføres på riktig måte, og at innkledning av gips blir gjort riktig. Høye massivtrehus er absolutt et tilfelle som bør ha særlig fokus på riktig utførelse.

8 Konklusjon

Det har vært en rask utvikling i byggehøyde og materialbruk uten at regelverk og standarder har blitt oppdatert til nye bygningskonstruksjoner. Bygging av brannsikre høye trehus krever derfor at de prosjekterende innehar tilstrekkelig kunnskap og kompetanse om massivtre og limtre. Tre brenner og erfaring mangler. Erfaring får vi ved reelle branntilfeller i de aktuelle bygningstypene. Det vil ta lang tid før vi kan si at vi har tilstrekkelig erfaring. Likevel konkurreres det rundt omkring i verden om å bygge verdens høyeste trehus.

Kravene til bærende konstruksjoner ved brann varierer fra land til land, og av de undersøkte landene er det kun i Norge at funksjonskravene angir at de skal stå i et fullstendig brannforløp. Dette vil være mulig for limtrekonstruksjoner, men ikke for massivtre med mindre de kles inn med flere lag gips. Eurokode 5 benyttes for dimensjonering av tykkelse på massivtreelementer, men i mange tilfeller vil ikke dette være tilstrekkelig. Dimensjonering i henhold til Tillegg A ved beregning av et fullstendig brannforløp, forutsetter nettopp at brannen vil slokke av seg selv. Dette kan ikke påregnes dersom det skal benyttes eksponerte massivtreelementer.

Sikkerhetsnivået i høye trehus i ulike land varierer stort, fra å kun benytte sprinkleranlegg som kompensierende tiltak, til å benytte sprinkleranlegg med tiltak som øker påliteligheten, og i tillegg kle inn med gips som beskytter bakenforliggende konstruksjoner fra branneeksponering i minst to timer. Et pålitelighetsnivå på sprinkler på 95 % er ikke realistisk i høye bygninger i Norge. Tillegg F vil være helt nødvendig for å ivareta et tilfredsstillende sikkerhetsnivå. Risiko for kollaps kan heller ikke alene kompenseres med kun sprinkleranlegg, da konsekvensene ved sprinklersvikt vil være for store. Med eksponerte massivtrekonstruksjoner vil det fortsette å brenne, og det er helt nødvendig at slokkemannskapene bidrar med slokkeinnsats. Dette gjelder spesielt når det benyttes elementer med lim som delaminerer. Flere av de største leverandørene produserer fortsatt elementer med PUR-lim, og skylder på frykten for at formaldehyd i MUF-limet som ikke delaminerer, er helseskadelig. Dette til tross for at MUF-lim i dag inneholder mindre formaldehyd enn tre i seg selv.

Behovet for kompensierende tiltak må alltid vurderes i hvert spesifikt prosjekt, hvor bruk og antall etasjer vil være svært relevant. Et riktig sikkerhetsnivå for et byggverk med over åtte etasjer i massivtre bør inkludere Tillegg F, innkledning med gips som tilsvarer minst 1-2 timer, kjølesoner 1:1, og oppdeling av hulrom bak kledning. Tilstrekkelig beskyttelse med gips bør vurderes i hvert tilfelle, for eksempel ved hjelp av ekvivalent branneeksponeringstid. Synlig massivtre bør kun aksepteres etter en grundig vurdering basert på plassering og et svært begrenset omfang. Utførelse er viktig, og det bør derfor også kreves uavhengig kontroll av brannteknisk utførelse ved oppføring av høye trehus.

9 Fremtidig arbeid

Bygging av høye trehus med tunge trekonstruksjoner er fortsatt så nytt at det er mange områder vi mangler kompetanse på. Dette gjelder ikke bare høye hus, men også kombinasjonen massive trekonstruksjoner og brann generelt. For eksempel mangler det gode metoder for dimensjonering av bærende massivtreelementer ved brann. Det er mange forhold som gir usikkerheter, og som bør tas hensyn til ved beregninger av forkullingsdybde. Ny Eurokode 5 som skal inkludere massivtre er visstnok på vei, og det vil bli spennende å se hva som kommer. Faktorer som bør sees på er hvordan tykkelsen på de ulike lamellene påvirker forkullingsraten, og hvordan den økte forkullingen påvirker resttverrsnittet når dette er redusert til under 60 mm. Dimensjonering av det ikke-lastbærende sjiktet bør vurderes nærmere, da denne synes å ikke være konservativ nok.

Branntester som er utført tidligere er gjort på nyere massivtreelementer. Det bør utføres branntester for å se på hvilken innvirkning gliper og sprekker som følge av krymp som resultat av redusert fuktnivå i treverket har på både forkulling og antennelse. Dette bør utføres ved å sammenligne nye elementer med elementer som har stått i mer enn tre år og gjennomgått denne prosessen. Det vil også være interessant å se hvordan fuktforskjeller i treet mellom sommer og vinter påvirker forkullingsraten.

Flere tester har vist at branner med eksponerte massivtreelementer på vegger og i himling har medført at en større del av brannen foregår på utsiden av ventilasjonsåpningen. Det bør forskes nærmere på hva som vil være tilstrekkelige avstand i kjølesoner ved ulike vindushøyder. Høye bygninger er også utsatt for mer vind. Det bør også sees på hvordan en brann i massivtreelementer påvirkes av økt oksygentilførsel som en følge av dette.

Det finnes i dag ikke godkjente branntetteprodukter for massivtre. Branntester bør utføres for å se hvordan ulike produkttyper fungerer ved brann etter at elementene med branntetting har gått gjennom den naturlige tørkeprosessen. Gjennomføringer av rør og kanaler medfører en spredningsmulighet også som følge av varmeledning, og det bør sees nærmere på hvor store utsparinger som er nødvendige for å få tilstrekkelig avstand fra rør til tre.

10 Referanser

1. Kollegiet for brannfaglig terminologi. [http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Uttrykk=kompenserende tiltak](http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Uttrykk=kompenserende_tiltak). [Internett]
2. Standard Norge. *NS-EN 1991-1-2 + NA: 2008. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann*. 2008.
3. Standard Norge. *NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk*. 2012.
4. Det kongelige landsbruks- og matdepartementet. *Meld. St. 9 (2011-2012). Melding til Stortinget. Landsbruks- og matpolitikken. Velkommen til bords*. 2011.
5. Store Norske Leksikon. https://snl.no/tre_-_plante#-Kjemisk_sammensetning.
6. Trefokus. *Fokus på tre. Nr. 40. Trevirkets oppbygging og egenskaper*. s.l. : Trefokus.
7. Sintef Byggforsk. *571.523 Trevirke. Treslag og materialeegenskaper*. 2015.
8. Trefokus. *Fokus på tre. Nr. 20. Massivtre*. 2008.
9. FP Innovations. *CLT Handbook. Canadian Edition*. 2011.
10. R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel. *Cross Laminated Timber (CLT): overview and development*. 2015.
11. Dynea. Generelt Dynea og CLT (fra presentasjon). 2018.
12. <http://www.trefokus.no/proff/artikler/materialer/limtre>.
13. Binderholz. *Binderholz CLT BBS*. 2017.
14. SINTEF Certification. *Teknisk Godkjenning. Martinsons KL-trä*. 2013.
15. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/brann>. [Internett]
16. Hagen, Bjarne Christian. *Grunnleggende brannteknikk*. 2004.
17. Quintiere, Björn Karlsson og James. *Enclosure Fire Dynamics*. 2000.
18. Sintef Byggforsk. *520.385 Nødvendig rømningstid ved brann*. 2016.
19. http://www.thorntontomasetti.com/performance_based_fire_engineering/. [Internett]
20. SFPE. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 2016.
21. Buchanan, Andrew H. *Structural Design of Fire Safety*. 2002.
22. Standard Norge. *NS-EN 16351-2015 Trekonstruksjoner. Krysslimte massivtreelement. Krav*. 2015.
23. Standard Norge. *NS-EN 1995-1-2: 2004+NA: 2010. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. 2010.
24. SP Fire Research AS. *Branntest av massivtre. SPFR-rapport SPFR A 15101*. 2015.

25. NFPA. *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings - Phase 2: Task 2 & 3 - Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests*. 2018.
26. Sweco Norge AS. *Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner. Vurdering av resultater fra branntest*. 2017.
27. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. *Brandsäkra trähus, Version 3. Nordisk – baltisk kunnskapsöversikt og vägledning*. 2012.
28. SP Fire Research. *The influence of parametric fire scenarios on structural timber performance and reliability*. 2014.
29. Butler, C. P. *Notes on charring rates in wood*. s.l. : Fire Research Note No. 896, 1971.
30. Birgit Östman, Daniel Brandon, Håkan Frantzich. *Fire safety engineering in timber buildings*. 2017.
31. FP Innovations (Lindsay Osborne, Christian Dagenais, Noureddine Bènichou). *Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report*. 2012.
32. Laura Hasburgh, Keith Bourne, Perry Peralta, Phil Mitchell, Scott Schiff, Weichiang Pang. *Effect of adhesives and ply configuration on the fire performance of southern pine cross-laminated timber*. 2016.
33. Andrea Frangi, Mario Fontana, Erich hugi og Robert Jöbstl. *Experimental analysis of cross-laminated timber panels of fire*. s.l. : Fire Safety Journal, 2009.
34. proHolz Austria. *Cross-Laminated Timber Structural Design. Basic design and engineering principles according to Eurocode*. 2014.
35. IBS - Institut für Bradschutztechnik under Sicherheitsforschung. *Classification Report. Report for classifying the fire resistance of load-bearing cross-laminated timber walls of thickness k 75 mm Type BBS*. 2009.
36. Stora Enso. *CLT - Cross Laminated Timber. Fire Protection*. 2016.
37. Österreichisches institut für bautechnik (OIB). *European Technical Approval. KLH-Massivholzplatten. ETA-06/0138*. 2011.
38. Standard Norge. *NS-EN 301:2017 Lim av fenolplast og aminoplast for bærende trekonstruksjoner. Klassifisering og ytelseskrav*. s.l. : Standard Norge, 2017.
39. Standard Norge. *NS-EN 15425:2017. Lim. En-komponents polyuretan (PUR) for bærende trekonstruksjoner. Klassifisering og krav til utførelse*. s.l. : Standard Norge, 2017.
40. nhi.no. <https://nhi.no/livsstil/egenomsorg/formaldehyd/>. [Internett]
41. Holz Forschung Austria. *Test Attestation. 1274/2013/1 -RB*. 2013.
42. Direktoratet for byggkvalitet. *Byggteknisk forskrift (TEK 17) med veiledning*. 2017.
43. Sintef Byggforsk. *520.320 Brannteknisk klassifisering og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter. Byggforskserien*. 2017.

44. Standard Norge. *NS-EN 13501-1:2007 + A1:2009. Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler. Del 1: Klassifisering ved bruk av resultater fra prøving av materialers egenskaper ved brannpåvirkning.* 2009.
45. Sintef Byggforsk. *614.014 Bygningslovgivning og byggebestemmelser fra første halvdel av 1800-tallet til 1930.* 2017.
46. Statens Bygningstekniske Etat. *HO 3/2007 Prosjektering – brannsikkerhetsstrategi. Temarettleijing.* 2007.
47. Standard Norge. *SN-INSTA/TS 950:2014. Analytisk brannteknisk prosjektering. Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk.* 2014.
48. Sintef Byggforsk. *321.026 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av brannsikkerhetsstrategi. Byggforskserien.* 2013.
49. <https://dibk.no/byggereglene/liste-over-tidligere-regelverk/Eldre-temaveiledninger/>. *dibk.no.* [Internett]
50. Direktoratet for Byggkvalitet. *Byggesaksforskriften (SAK10).* 2010.
51. RISE Fire Research: Anne Steen-Hansen. *Rapport. Utredning - branntekniske ytelser for kledninger og overflater. RISE-rapport A18 20354:1.* 2018.
52. Canadian Commission on Building and Fire Codes National Research Council of Canada. *National Fire Code of Canada.* 2015.
53. Gouvernement of Quebec. *Mass timber buildings of up to 12 storeys. Directives and Explanatory Guide.* 2015.
54. www.nrc-cnrc.gc.ca. https://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/publications/codes_centre/2015_national_building_code.html. [Internett]
55. Government of Canada. *National Building Code of Canada.* 2015.
56. University of British Columbia's Centre for Interactive Research on Sustainability. *Brock Commons: Code Compliance - Design and preconstruction of a tall wood building.* 2016.
57. Österreichisches Institut für Bautechnik. *OIB Richtlinie 2.3 Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m OIB-330.2-014/15.* 2015.
58. HM Government. *The Building Regulations 2010. Fire Safety. Approved Document. Volume 2 - Buildings other than dwellinghouses.* 2013.
59. www.abcb.gov.au. <https://www.abcb.gov.au/ncc-online/How-it-works>. [Internett]
60. Australian Building Codes Board. *National Construction Code Volume 1. Building Code of Australia Class 2 to Class 9 Buildings.* 2016.
61. ABCB. *National Construction Code 2016. Amendment 1. Volume 1. Building Code of Australia. Class 2 to Class 9 Buildings.* 2016.

62. Wood Solutions. *Alternative Solution Fire Compliance. Internal Linings*. 2014.
63. Wood Solutions. *Alternative Solution Fire Compliance. Facades*. 2014.
64. Boverket. *BFS 2013:10. Boverkets föreskrifter om ändring i verkets föreskrifter och allmänna råd (2011:10) om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)*. 2013.
65. Brandskyddslaget AB, Brandteknik, LTH og Bengt Dahlgren Brand & Risk AB. *Brandskyddshandboken #6*. 2017.
66. Boverket. *Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd) BBR. BFS 2011:6-2017:5*. 2017.
67. NFPA. *NFPA 101 - Handbook Life Safety Code. 2015 Edition*. 2015.
68. NFPA. *NFPA 5000. Building Construction and Safety Code*. 2018.
69. Wood Solutions. *Alternative Solutions Fire Compliance. Timber Structures. Australian Design Guide 17*. 2014.
70. American Wood Council. *Flame Spread Performance of Wood Products Used for Interior Finish*. 2017.
71. DiBK. *Høringsnotat 10. november 2016. Forslag til ny Byggeteknisk forskrift (TEK17)*. 2016.
72. NFPA. *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings*. s.l. : The Fire Protection Research Foundation, 2013.
73. Daily Mail. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5395371/Worlds-tallest-WOODEN-skyscraper-set-Tokyo-2041.html>. [Internett]
74. Haden, Bruce. *Reaching new heights*. s.l. : Canadian Architect, 2017.
75. <http://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>. [Internett]
76. Moudgil, Manu. *Feasibility study of using cross-laminated timber core for the UBC Tall Wood Building*. 2014.
77. <http://veidekke.no/prosjekter/article19204.ece>.
78. www.trefokus.no.
79. Rambøll Norge AS. *Moholt 50/50 Studenttårn A,B,C,D,E. Brannkonsept Revisjon 5 As built 2016-09-28*. 2016.
80. Marina Trifkovic, Artec. *Treet - verdens høyeste trehus, presentasjon fra 3. nasjonale konferansen for trearkitektur*. 2015.
81. <http://www.arkitektur.no/treet?tid=158202>.
82. Bjarne Vangsnes, Sweco Norge AS. *Treet - hvordan brannsikker man verdens høyeste trehus? Presentasjon Brannforebyggende forum, 9.-10- september, Bergen*. 2014.
83. <http://www.innovasjon Norge.no/landbruk/Tjenester/Tre/40forbilder/verdens-hoyeste-boligblokk-i-tre/>.

84. Sweco Norge AS. *Verdens høyeste trehus (VHT). Brannkonsept. 20.12.12. 2012.*
85. <http://www.h-a.no/nyhet/ringsak/millardsatsing-paa-mjostaarnet>. *Hamar Arbeiderblad*. [Internett]
86. <https://www.aftenposten.no/kultur/i/JdzMJ/81-meter-hoyt-trehus-i-Brumunddal-setter-verdensrekord>. [Internett]
87. Sweco Norge AS. *Brannkonsept Mjøstårnet. Revisjon 02 14.11.2017. 2017.*
88. Beuth.de.
<https://www.beuth.de/blob/155732/543999ae557cd2a3ec26417514b24159/holzbauforum-2016-sterl-data.pdf>. . [Internett] 2017.
89. *Auf dem richtigen Holzweg – Vom „grünen“ Gedanken zum Vorzeigeprojekt*. Caroline Palfy, Richard Woschitz. s.l. : OIB, 2016.
90. [www.hoho-wien.at. http://www.hoho-wien.at/?lang=en](http://www.hoho-wien.at/?lang=en). [Internett] 2018.
91. *Holzhochhaus HoHo Wien*. RWT plus ZT GmbH AT-Wien (Richard Woschitz. s.l. : Internationales Holzbau-Forum IHF, 2015.
92. *CLT stands tall on Dalston Lane*. Shearing, Daniel. 12.17, s.l. : Housebilder & Developer, 2017, Vol. 2017.
93. Anders Dragsted, Frank Markert, Finn Larsen, Peder Fynholm. *Fleretagers træhuse. Brandforhold*. 2017.
94. Standard Norge. *NS-EN 12845:2015 Faste brannslukkesystemer. Automatiske sprinklersystemer. Dimensjonering, installering og vedlikehold*. 2015.
95. *NS INSTA 900-1:2013. Boligsprinkler Del 1: Dimensjonering, installering og vedlikehold*. s.l. : Standard Norge, 2013.
96. NFPA. *NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems*. 2016.
97. Standard Norge. *NS-EN 12945:2015 Faste brannslukkesystemer. Automatiske sprinklersystemer. Dimensjonering, installering og vedlikehold*. 2015.
98. British Standards (BSI). *PD 7974-7: 2003 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 7: Probabilistic risk assessment*. 2003.
99. John R. Hall, Jr, NFPA. *U.S Experience with sprinklers*. 2012.
100. Daniel Malm, Ann-Ida Pettersson, Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety Lund University, Sweden. *Reliability of Automatic Sprinkler System - an Analysis of Available Statistics*. 2008.
101. Fredrik Nystedt, Lund Universitet. *Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings*. 2011.
102. Opplysningskontoret for sprinkleranlegg. *Hvordan er kvaliteten på sprinkleranlegg i Norge?* 2003.
103. FG (Forsikringssekskapenes Godkjennelsesnevnd). *FG-Veiledning. Kontroll av faste automatiske vannbaserte slokleanlegg FG-920:4). Utgave 4, gyldig fra 1.1.2018*. 2018.

104. Sintef Byggforsk. *571.047 Gipsplater. Typer og egenskaper*. 2016.
105. Alar Just, Joachim Schmid, Jürgen König, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. *Gypsum plasterboards used as fire protection – Analysis of a database*. 2010.
106. Multiconsult. *Rapport. Utredning: Muligheter for reduserte branntekniske ytelser ved installasjon av automatisk slokkeanlegg*. 2015.
107. Moelven. *Branntrygt tre. Brannmalt. Brannimpregnert*. 2014.
108. *Proceedings of the 1st European Workshop - Fire Safety of Green Buildings, s 10-11*. s.l. : Cost Action FP1404, 2015.
109. Ralph M. Nussbaum, Swedish Institute for Wood Technology Research. The Effect of Low Concentration Fire Retardant Impregnations on Wood Charring Rate and Char Yield. *Journal of Fire Sciences*. Vol. 1988, Vol. 6.
110. www.securo.no. *www.securo.no*. [Internett] Securo.
111. NFPA. *NFPA 80 A. Recommended practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures*. 2012.
112. <https://www.nettavisen.no/nyheter/innenriks/brann-i-bygard-i-oslo/3423328645.html>. *www.nettavisen.no*. [Internett]
113. Telemarksavisa. <https://www.ta.no/grenland/og-jeg-som-hadde-stovsuget/s/1-111-4029640>. [Internett]
114. National Research Council Canada, Oleszkiewicz, I. *Heat transfer from a window fire plume to a building facade*. s.l. : NRC Publications Archive, 1989.
115. Arkitektur.no. [Internett] 2017.
116. Sintef Byggforsk. *720.315 Brannteknisk utbedring av murgårder fra perioden 1870-1940. Byggforskserien*. 2007.
117. White, Hao C. Tran og Robert H. *Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter*. s.l. : Fire and Materials, vol. 16, 197-206, 1992.
118. Standard Norge. *NS-EN 1993-1-2: 2005+NA:2009 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. . 2009.
119. Norsk Betongforening. *Mur og betong i bygningsmessig brannvern. Publikasjon nr. 34. Prosjekteringsanvisning 2014*. 2014.
120. Sintef Byggforsk. *626.102 Dokumentasjon av brannsikkerhet for bygninger i bruk*. 2013.
121. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/brann>. [Internett]
122. <http://arcwood.ee/nn/limtre>. [Internett]

123. <http://www.worldarchitecturenews.com/project-images/2017/28219/waugh-thistleton/world-s-largest-clt-building-in-london.html?img=4>. *www.worldarchitecturenews.com*. [Internett]

124. Teknisk Ukeblad. <https://www.tu.no/artikler/boligblokk-i-tre-tok-halvparten-sa-lang-tid-a-byggesom-naboblokka-i-betong/276082>. [Internett]