

Verifikasjon og dokumentasjon av branntekniske krav i teknisk forskrift ved bruk av trekonstruksjoner i fleretasjes bygninger

Håkon Silderen Halvorsen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Harald Landrø, BAT

Medveileder: Ole Henry Hallgren, Norconsult AS

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



Oppgavens tittel: Verifikasjon og dokumentasjon av branntekniske krav i teknisk forskrift ved bruk av trekonstruksjoner i fleretasjes bygninger	Dato: 10.06.2014		
	Antall sider (inkl. bilag): 117		
	Masteroppgave	X	Prosjektoppgave
Navn: Stud. Techn. Håkon Silderen Halvorsen			
Faglærer/veileder: Harald Landrø			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Ole Henry Hallgren			

Ekstrakt:

Oppgaven er utformet i forbindelse med økt interesse for fleretasjes trekonstruksjoner. Den økte interessen er knyttet til en utvikling innen tyngre trematerialer, som limtre og massivtre, samt miljøfordeler ved tre som bygningsmateriale.

Oppgaven inneholder en gjennomgang av aktuelle fravik fra veiledning til teknisk forskrift ved bruk av tre i bæresystemet i byggverk med fem etasjer eller mer (brannklasse 3). Aktuelle fravik blir analysert ved bruk av verktøy anerkjent av forskriften, slik at dokumentasjon av oppfylte krav fra teknisk forskrift er ivaretatt på en tilfredsstillende og tillitsvekkende måte.

Stikkord:

- | |
|--|
| 1. Trekonstruksjoner i fleretasjes bygninger |
| 2. Fraviksanalyse |
| 3. Dokumentasjon |
| 4. Fullstendig brannforløp |

Forord

Denne rapporten utgjør det avsluttende arbeidet på det 5-årige sivilingeniørprogrammet Bygg- og Miljøteknikk ved NTNU. Masteroppgaven er skrevet ved Institutt for bygg, anlegg og transport, faggruppe Bygg og anleggsteknikk, fordypning brannsikkerhet og gjennomført i tidsperioden 14. januar 2014 til 10. juni 2014. Tittelen på oppgaven er *Verifikasjon og dokumentasjon av brannteknisk krav i Teknisk Forskrift ved bruk av trekonstruksjoner i fleretasjes bygninger*. Rapporten er gjennomført i samarbeid med Norconsult AS.

Oppgaven ble utformet i samarbeid med Harald Landrø, Professor II ved NTNU og Ole Henry Hallgren, seksjonsleder Brannsikkerhet ved Norconsult AS i Sandvika. Oppgaven er valgt med bakgrunn i den økte interessen for oppføring av fleretasjes trekonstruksjoner og et regelverk som legger opp til muligheten for høyhus i tre, under forutsetning av tilfredsstillende analyser og dokumentasjon.

Jeg vil rette en stor takk til veiledere og kollegaer ved Norconsult i Sandvika. Spesielt Ole Henry Hallgren, for filosofiske betraktninger, Henning Saga, for kaffekoppene kombinert med faglig input og Stefan Andersson, for spennende teoretiske tilnærminger.

Som inspirasjon vil jeg takke min familie, mine venner og alle som har kommet med oppmuntrende ord når jeg har trengt det som mest.

I tillegg vil jeg takke følgende bidragsytere for fruktbare diskusjoner og innspill:

Harald Landrø, NTNU

Anders Arnhus, NTNU

Nils Forsen, Multiconsult

Sandvika, 10. Juni 2014

Håkon Silderen Halvorsen

Sammendrag

På grunn av den positive miljøprofilen til tre som bygningsmateriale, har interessen for fleretasjes trekonstruksjoner økt de siste årene. Fra et brannsikkerhetsperspektiv er det viktig at høye trehus oppnår det sikkerhetsnivået, som er påkrevd i forskrift og lovverk. Denne oppgaven tar for seg problemer knyttet til dokumentasjonen av oppfylt sikkerhetsnivå i henhold til teknisk forskrift av brannsikkerheten i fleretasjes trekonstruksjoner.

Opgaven fokuserer på trekonstruksjoner med fem etasjer eller mer, hvor det benyttes tyngre trekonstruksjoner, som eksempelvis massivtre eller limtre. Med fem etasjer eller mer, altså brannklasse 3, er det krav til bæring i et fullstendig brannforløp for hovedbæresystemet. Å dimensjonere etter et fullstendig brannforløp er krevende, da ingen branner er like, og en må definere det verste troverdige brannforløp som blir dimensjonerende for trekonstruksjonen.

Veiledningen til teknisk forskrift angir at ubrennbare bygningsdeler som oppnår tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i 90 minutter etter en standardbrannpåkjenning (R90) er preakseptert. Problemet er at påkjenningen fra et fullstendig brannforløp ikke direkte korrelerer med standardbrannpåkjenning.

For å kunne oppnå tilfredsstillende og tillitsvekkende dokumentasjon i høye byggverk er det i oppgaven kun benyttet standardiserte beregningsmodeller for kvantitative analyser. Modellene er hentet fra europeiske standarder, hovedsakelig Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann og Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner.

Løsninger ved bruk av trekonstruksjoner i brannklasse 3 vil ha en restrisiko for sammenbrudd. Et preakseptert byggverk, i stål eller betong, vil også kunne inneha noe restrisiko, men det må erkjennes at høye trekonstruksjoner har større restrisiko - forutsatt kompensierende tiltak. Allikevel er det oppgavens standpunkt at beregningene presentert i oppgaven dokumenterer oppfylt forskriftskrav for bæring ved fullstendig brannforløp, og da trenger ikke nødvendigvis trekonstruksjoner i brannklasse 3 å ha samme restrisiko som den preaksepterte løsningen fra veiledningen til teknisk forskrift.

De viktigste resultatene fra oppgaven viser at tilfredsstillende sikkerhetsnivå for en fleretasjes trekonstruksjon er mulig å dokumentere så lenge følgende kompensierende sikkerhetstiltak benyttes:

- Fullsprinkling av bygget
- Kledning på alle brennbare overflater

Disse tiltakene gjør det mulig å benytte kvantitative beregningsmodeller for vurdering av tilstrekkelig bæreevne og stabilitet for et fullstendig brannforløp. For kravet til kledning har rapporten vist at to lag gipskledning, et lag standardgips og et lag branngips for alle synlig brennbare konstruksjoner, oppnår godkjent sikkerhetsnivå. Det utelukkes allikevel ikke at andre kledningstyper ved samme

kvantitative analyse også kan vise samme resultat. For øvrig er forventet forkullingsdybde og bæreevne noe som må beregnes for ethvert prosjekt med hovedbæresystem i tre i brannklasse 3.

Den kvalitative konsekvensanalysen for bruk av sekundære konstruksjoner i tre i brannklasse 3 viser i tillegg at det oppstår en økt spredningsfare ved brann, sammenlignet med sekundære konstruksjoner i ubrennbar materiale. Et aktuelt tiltak for å håndtere spredningsfaren kan være ubrennbar kjølesone over vindu. Det kan også vise seg nødvendig med økt fokus på brannspredning til hulrom.

Utviklingen av brannforløpet etter at inventar er utbrent og gipskledning har falt av, er en usikkerhet i resultatene i oppgaven. Det er ukjent om brannen vil kunne fortsette som en selvoppretholdende brann i bæresystemet. I tillegg er det gjennomført en antagelse ved å fjerne deler av forkullingsforløpet for bakenforliggende brennbar materiale på grunn av gipskledning. Begge disse forutsetningene bør undersøkes nærmere. Det er også oppgavens oppfatning at modellene som er tilgjengelige og anerkjente, ikke nødvendigvis er utformet for å håndtere den komplekse problemstillingen et brennbar bæresystem utgjør. Til tross for usikkerhetene, er det kun benyttet standardiserte metoder og verktøy, så resultatet er basert på metoder som forskriften anerkjenner.

Summary

The use of timber as a building material is both sustainable and has a positive environmental effect since it binds carbon. Consequently the interest for timber structures has increased in recent years. From a fire safety perspective it is, however, important that timber structures are designed in such a manner that they obtain the fire safety level demanded by the Norwegian regulations. This thesis discusses the difficulties in documenting the fire resistance of load bearing structures in multi-story timber structures according to the Norwegian Technical Regulation.

The focus of this thesis is timber structures consisting of five stories or more, i.e. heavy timber structures such as laminated timber or cross laminated timber. The building code requirement for the main loadbearing structure in a building of five floors or more is satisfactory loadbearing ability during a complete natural fire including the cooling phase.

The guide to the technical regulations (building code) in Norway specifies that non-combustible building components which have a satisfactory loadbearing capacity after 90 minutes of standard fire exposure are pre-accepted. Deviating solutions are allowed, but they have to fulfill the requirements of the building code and they should not increase the risks which the pre-accepted solutions yield. Hence, a fire safety analysis is needed when using timber structures in tall buildings in Norway.

Designing a structure to resist a complete natural fire is demanding since no fires are the same, and it is therefore necessary to define the worst credible temperature-time curve that the timber structure will be exposed to. The issue is that the natural fire exposure and standard fire exposure does not directly correlate to 90 minutes standard fire exposure and special models are needed in order to calculate the fire resistance.

The methods and calculations regarding quantitative analysis of load bearing structures are standardized by the international community. The models used in this thesis are from European standards, mainly Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: Actions of structures exposed to fire and Eurocode 5: Design of timber structures – part 1-2: General – Structural fire design.

A construction according to the guidance for the technical regulations will have some residual risk of collapse in a complete fire. Tall timber structures with compensating safety measures will come fairly close to non-combustible structures, but will have slightly higher residual risk. Since the calculations prove that the requirements from the technical regulations (building code) are fulfilled for load bearing capacity during a natural fire exposure, the timber structures do not need to have exactly the same residual risk as the pre-accepted and the use of timber structures should, therefore, be acceptable.

The primary results from the thesis show that satisfactory safety level for timber structure is achieved as long as the following fire safety measures are utilized:

- Sprinkler
- Cladding on combustible surfaces.

These fire safety measures make the calculations for load capacity and stability for a complete natural fire possible. The report has shown that regarding the requirement for cladding, two layers of gypsum plaster, or one layer gypsum plasterboard type A and one layer gypsum plasterboard type F, is sufficient to reach approved fire safety level in most cases. The report does not exclude that other combinations of claddings also may prove the same results.

The consequence analysis for secondary construction in timber, prove that there is an increased risk of fire spread, compared to when using non-combustible secondary construction. Possible compensating measures can be the use of non-combustible exterior cladding above windows and/or increased focus on preventing fire spread in voids and cavities.

The uncertainties in the calculations are mainly caused by two assumptions. One is related to the temperature-time development after the loose combustibles have burnt out and the gypsum plasterboard cladding has fallen off, i.e. the contribution from the combustible structure itself. The other is an assumption of removal of parts of the charring scenario when using claddings for protection of the load bearing structure. Both assumptions should be assessed. The models which are available and recognized, do not necessarily handle the complexity from a combustible load bearing construction. Though there are uncertainties, the calculations are based on standardized calculations tools, and therefore the results are based on models that the regulations approve.

Innholdsfortegnelse

1. Introduksjon	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Teoretisk bakgrunn.....	2
1.3. Problemstillinger	3
1.4. Målsetting.....	3
1.5. Omfang og begrensninger	4
1.6. Leserveiledning	4
1.7. Definisjoner:.....	5
2. Metode.....	7
2.1. Litteraturstudium.....	7
2.2. Kvantitativ og kvalitativ analyse.....	8
3. Teoretisk grunnlag	9
3.1. Regelverket.....	9
3.2. Brannteknisk prosjektering.....	13
3.3. Tre som byggemateriale	19
3.4. Treets egenskaper ved brann	22
3.5. Trekonstruksjoner i forskriften.....	25
3.6. State-of-the-art.....	26
4. Gjennomgang av fravik	31
5. Fravik 1 – Brannenergi.....	33
5.1. Beskrivelse av fravik.....	33
5.2. Metoder for dokumentasjon av brannenergi.....	34
5.3. Eksempelcase for beregning av brannenergi.....	41
6. Fravik 2 – Hovedbæresystem	49
6.1. Beskrivelse av fravik.....	49
6.2. Metoder for dokumentasjon hovedbæresystem.....	53
6.3. Analyse for hovedbæresystem i tre	59
6.4. Oppsummering av resultater:	69
7. Fravik 3 - Sekundære konstruksjoner.....	71
7.1. Beskrivelse av fravik.....	71
7.2. Metoder til dokumentasjon - konsekvensanalyse.....	73

7.3.	Tid til rømning.....	77
8.	Fravik 4 – Overflater og kledning.....	81
8.1.	Beskrivelse av fravik.....	81
8.2.	Metoder for dokumentasjon	83
9.	Kompenserende tiltak	85
9.1.	Automatisk sløkkeanlegg	87
9.2.	Beskyttelse av treverk	91
10.	Diskusjon.....	93
10.1.	Drøfting av forskrift, restrisiko og beregningsmodeller	93
10.2.	Analyse av brannenergi	94
10.3.	Analyse av hovedbæresystem.....	94
10.4.	Analyse av sekundære konstruksjoner	97
10.5.	Analyse av overflater og kledning.....	97
10.6.	Usikkerheter	98
11.	Konklusjon.....	99
12.	Videre arbeid	101
13.	Kildehenvisning	103
14.	Oversikt vedlegg	107

1. Introduksjon

Introduksjonskapitlet presenterer oppgavens bakgrunn, dens problemstillinger, hvilke mål som er satt for arbeidet, samt oppgavens omfang og begrensninger. Bakgrunnen er inndelt to deler: Generell bakgrunn som gir en introduksjon til temaet og setter temaet i en større sammenheng og teoretisk bakgrunn som redegjør for de tekniske utfordringene fra forskriften som er bakgrunnen for at arbeidet blir utført. Den teoretiske bakgrunnen bør sees i sammenheng med kapittel 3 - Teoretisk grunnlag. Det er også inkludert en leserveiledning i slutten av kapitlet hvor oppbygningen av oppgaven er gjennomgått.

1.1. Bakgrunn

De siste årene har det vært stor fokus på økt global oppvarming. Byggebransjen alene står for rundt 15 % av det totale klimagassutslippet i Norge [1], og har et stort forbedringspotensial når det kommer til kutting av CO_2 utslipp. Deler av klimagassutslippet fra byggebransjen kommer fra produksjon av byggevarer. For å minimere utslipp er det derfor naturlig å sammenligne ulike byggematerialer, eksempelvis en sammenligning av tre-, stål- og betongkonstruksjoner. I flere av de eksterne artiklene funnet av oppgaven er konklusjonen at bruken av trematerialer i konstruksjonen gir en lavere klimapåvirkning sammenlignet med andre aktuelle byggematerialer [2-4].

Trevirke har tidligere kun blitt benyttet i lette trekonstruksjoner, men etter en utvikling av trematerialer er det nylig blitt mulig å bygge fleretasjes bygninger i tre. Selv om trevirke fremstår som ett positivt alternativ i forbindelse med miljøprofil og klimagassutslipp, har også bruken sine utfordringer. Denne masteroppgaven fokuserer på en av disse utfordringene – brannsikkerhet ved bruk av tre i bæresystemet for fleretasjes bygninger.

Brannsikkerheten i fleretasjes trekonstruksjoner er omdiskutert, grunnet bruk av mye brennbart materiale i bæresystemet som kan påvirke den totale konstruksjonssikkerheten. Denne masteroppgaven har som mål å analysere konsekvensene ved bruk av brennbart materiale i bæresystemet, både for personsikkerhet, materiell sikkerhet og sikkerhet for miljø. Dette gjøres ved kvantitative analyser av brannforløp og påvirkningen på bæresystemet med utgangspunkt i eksisterende godkjente beregnings- og analysemetoder, utgitt av standardiseringsorganisasjonen Standard Norge. Oppgavens ønske er å skaffe til veie tilfredsstillende og tillitsvekkende dokumentasjon for brannsikkerheten i fleretasjes trekonstruksjoner. Eventuelt å belyse hvilke forutsetninger og sikkerhetstiltak som bør være tilstede, for å kunne oppføre fleretasjes trekonstruksjoner i henhold til regelverket.

1.2. Teoretisk bakgrunn

Den teoretiske bakgrunnen bør sees i sammenheng med kapittel 3 - Teoretisk grunnlag. Oppgaven tar utgangspunkt i de formelle krav gitt av forskrift om tekniske krav til byggverk med veiledning. Spesielt viktig for oppgave blir kravet til dokumentasjonen av tilfredsstillende brannsikkerhet ved bruk av trekonstruksjon i fleretasjes bygninger. Dokumentasjonen er viktig på grunn av:

1. Flere fravik ved prosjektering av tyngre trekonstruksjoner i brannklasse 3
2. Krevende kvantitativ fraviksanalyse grunnet forskriftsformuleringer, eksempelvis «bæring ved fullstendig brannforløp»
3. Funksjonsbasert forskrift som stiller strenge krav til dokumentasjon av brannsikkerheten.

Preaksepterte ytelser for bæresystemet og overflater i brannklasse 3 er hovedsakelig ubrennbare og derfor oppstår det flere fravik. Behovet for en gjennomgang av aktuelle krav i teknisk forskrift og hvordan skaffe til rette tilfredsstillende og tillitsvekkende dokumentasjon ved prosjektering og bygging av fleretasjes trekonstruksjoner har blitt introdusert gjennom samtaler med veiledere. Temaet og problematikk vedrørende dokumentasjon er dessuten berørt i flere prosjekter gjennomført nylig. Dokumentasjonen av brannsikkerhet for disse prosjektene har ikke imponert forfatter, men innholdet blir ikke gjennomgått grunnet opphavsrettslige hensyn.

1.3. Problemstillinger

Fra gjennomgangen i kapittel 1.1 og 1.2 identifiseres følgende problemstillinger som er av interesse:

1. Hvilke fravik fra veiledning til byggeteknisk forskrift oppstår ved bruk av trekonstruksjoner i fleretasjes byggverk for brannsikkerhet?
2. Hvordan kan valgte løsninger analyseres og dokumenteres, slik at de oppfyller forskriftskravet? Dette gjelder både selve oppfyllelsen av kravet og dokumentasjonsbehovet for oppfylt krav.
3. Hvilke kompensierende tiltak kan iverksettes for å oppnå ønsket sikkerhetsnivå ved bruk av trekonstruksjoner?

1.4. Målsetting

Resultatmål

Rapporten har som resultatmål å utrede de fravik som oppstår ved prosjektering av fleretasjes trekonstruksjoner, samt vise hvordan tilfredsstillende dokumentasjonskrav angitt i forskrift om tekniske krav til byggverk.

Suksesskriterier

Følgende resultater og leveranser er satt som resultatmål til vurderingen av suksess i oppgaven:

1. En oversikt over aktuelle fravik
2. Beskrivelse av hvordan analysere fravik og dokumentere tilfredsstillende og tillitsvekkende brannsikkerhet for valgt løsning
3. Gi eksempler på tiltak og effekten av tiltak som kan benyttes til å oppnå ønsket sikkerhetsnivå i fleretasjes trekonstruksjoner

Effektmål

Effektmålet for oppgaven er at de fleretasjes trekonstruksjoner som bygges i Norge, minst opprettholder det sikkerhetsnivå satt av dagens forskrifter og lovverk.

1.5. Omfang og begrensninger

Omfanget og begrensninger i oppgaven bør sees i sammenheng med kapittel 3 - Teoretisk grunnlag. Det vil bli fokusert på trekonstruksjoner i brannklasse 3. Brannklasse 3 tilsvarer 5 etasjer eller mer. Brannklasse 3 er valgt, da vanskeligheter med fraviksdokumentasjonen begynner her. De metoder som benyttes til å løse problematikk i brannklasse 3 er også gyldige for lavere brannklasser, om analyse skulle være nødvendig.

Opgaven tar for seg tyngre trekonstruksjoner. Dette betyr at løsninger for bindingsverk, utfyllende bindingsverk eller andre lette trekonstruksjoner ikke blir inkludert. Om en ønsker å oppnå trekonstruksjoner med 5 etasjer eller mer vil det, normalt sett, være behov for massivtre eller limtre.

1.6. Leserveiledning

Opgaven er rettet mot branntekniske rådgivere, arkitekter, entreprenører, byggherrer og annet fagpersonell som jobber med brannsikkerhet i byggverk. Det forventes derfor en viss grunnkunnskap innen brannteknikk av leser. For leseren er det også fokusert på klare formuleringer og tydelig framstilling av resultat.

Opgaven er delt inn i tre hoveddeler. Disse er som følger:

- Del 1: Gjennomgår litteratur og teoretisk grunnlag (Kapittel 3)
- Del 2: Presenterer fravik, analyser av fravik og resultater fra analyser (Kapittel 4 til 9)
- Del 3: Diskusjon og konklusjon (Kapittel 10 til 12)

Oppbygningen av del 2 er basert på kapittelinnstillingen i byggt teknisk forskrift. Årsaken er for å kunne systematisere arbeidet, og fravikene blir derfor gjennomgått i den rekkefølge de er beskrevet i teknisk forskrift.

Opgaven gir generelle betraktninger i forbindelse med fraviksanalyse, framfor casebasert fraviksanalyse. Det har kun blitt benyttet eksempelcase ved analyse av brannenergi.

Det er viktig for forståelsen av oppgaven at leser er opplyst om angivelsen av spesifikk brannenergi. Spesifikk brannenergi kan angis både med hensyn på omhyllende areal og med hensyn på gulvareal. I teksten i denne oppgaven er det kun benyttet omhyllende areal.

Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner, del 1-2: Brannteknisk prosjektering, forkortes ofte i oppgaven til Eurokode 5 – del 2, eller Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner.

1.7. Definisjoner:

De begrep som kan skape uklarheter for oppgaven er definert i listen under. Det er tatt sikte på å finne definisjonen som er bransjenorm ved å benytte nettsiden til kollegiet for brannfaglig terminologi [5]. Hovedandelen av definisjonene er hentet direkte fra sine respektive kilde, mens andre er tilpasset til oppgaven:

Begrep	Definisjon
Akseptabel risiko	Risiko som aksepteres i en gitt sammenheng basert på gjeldende verdier i samfunnet [6].
Avvik	Ikke oppfylt krav, som angitt i TEK. Bør ikke forveksles med fravik.
Brannenergi	Summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle faste og mobile brennbare materialer i et område [5].
Brannforløp	Brannens utvikling fra antennelse til den er sloknet [5].
Brannklasse	Klasse for byggverk ut fra den konsekvens en brann kan innebære for skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljø [5].
Bærende hovedsystem Hovedkonstruksjon	Konstruksjon som sikrer stabilitet og bæreevne til hele byggverket [5]. Svikt i bærende hovedsystem betyr at byggverket helt, eller i stor grad, kolliderer.
Fravik	Ikke oppfylt preakseptert ytelse, som angitt i veiledning til teknisk forskrift.
Immobil brannenergi	Brannenergi fra brennbart materiale i bygningskroppen. Gjelder kun de bygningsdelene som forventes å forbrenne ved brannforløpet.
Lett trekonstruksjon	Stender-/bjelkelagskonstruksjoner, mindre tverrsnittdimensjoner
Mobil brannenergi	Brannenergi fra inventar, gitt av bruken i bygningen

Begrep	Definisjon
Referansebyggverk	Preakseptert alternativ til analysebyggverk. Begrepet benyttes i komparativ analyse.
Restrisiko	Risikoen som gjenstår etter iverksatte tiltak.
Risiko	Uttrykk for kombinasjon av sannsynlighet for og konsekvens av en uønsket hendelse [5].
Risikoklasse	Kategori av byggverk, eller ulike bruksområder i et byggverk, ut fra den trussel en brann kan innebære for skade på liv og helse [5].
Sekundært bærende bygningsdel Sekundær konstruksjon	Konstruksjoner som sikrer stabilitet og bæreevne til deler av byggverket [5]. Sekundær bærende konstruksjon betegner deler av konstruksjonen som kan miste sin bæreevne uten at konstruksjonens hovedbæresystem påvirkes i betydelig grad.
Spesifikk brannenergi	Brannenergi per arealenhet [5]. Spesifikk brannenergi kan være relatert til gulvarealet eller til hele omhyllingsflaten, inklusive åpninger.
Trekonstruksjon	Byggverk med bæresystem i tre.
Tung trekonstruksjon	Massivtre-/limtrekonstruksjoner, større tverrsnittdimensjoner

2. Metode

Metodekapitlet dokumenterer hva arbeidet består av og hvordan arbeidet er utført. Det inneholder en oversikt over hvilke metoder som er benyttet, slik at arbeidet etterprøvbart.

2.1. Litteraturstudium

Arbeidet begynte med et litteraturstudium. Formålet med litteraturstudiet var

1. Finne litteratur på metoder til brannteknisk analyse av trekonstruksjoner – altså det tekniske teoretiske aspektet av brannteknisk analyse for trekonstruksjoner og
2. Finne litteratur på forskning/erfaring gjort på temaet tidligere – altså erfaringer og vurderinger ved bruk av fleretasjes trekonstruksjoner.

Litteratursøk på det teknisk teoretiske aspektet ved oppgaven, derav brannscenario, brannforløp, forkulling og dimensjonering av trekonstruksjoner gav flere gode resultater. Analysene og den tekniske bakgrunnen for analysene er derfor basert hovedsakelig fra artikler av anerkjente internasjonale forfattere som for eksempel; Buchanan, Drysdale, Östman, Law og Hadvig. Flere av artiklene benyttet til den tekniske bakgrunnen er blitt brukt som kilde i internasjonale håndbøker. Dette sees på som en tydelig kvalitetssikring.

Litteratursøk om erfaringer ved bruk av fleretasjes trekonstruksjoner og den norske tekniske forskrift gir derimot få internasjonale resultater. Kildene om erfaringer ved høyhus i tre har derfor hovedsakelig norske og svenske forfattere. Flere av utgivelsene er hentet fra SP wood technology, Trefokus AS eller fra norske og svenske master- og doktorgradsoppgaver. Disse artiklene og oppgavene har blitt benyttet i begrenset grad, da kvalitetssikringen av arbeidet er mer usikkert enn internasjonale publikasjoner. Etersom resultatene fra litteratursøket på erfaringer ved fleretasjes trekonstruksjoner var noe mangelfulle, ble det fokusert på forståelse og anvendelse av forskrift om tekniske krav til byggverk med veiledning.

Det er også sett på litteratur som ansees for å være gyldig til dokumentasjonsformål, eksempelvis:

1. Eurokoder, spesielt Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann og Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner.
2. SINTEF Byggforsk kunnskapssystemer, ved Byggforskserien
3. Temaveiledninger fra Direktoratet for byggekvallitet (DiBk) - såkalte HO-meldinger
4. Anerkjente temalitteratur og håndbøker, derav:
 - Brandsäkra trähus – Nordisk – baltisk kunskapsöversikt och vägledning
 - Fire safety in timber buildings – Technical guideline for Europe

2.2. Kvantitativ og kvalitativ analyse

Arbeidet var å kartlegge konsekvenser ved bygging av fleretasjes trekonstruksjoner som i henhold til veiledning til teknisk forskrift gir fravik. Kartleggingen ble gjennomført gjennom samtaler med veiledere, brannsikkerhets rådgivere, og ved gjennomgang av teknisk forskrift med veiledning. For å kunne forankre konsekvensene for høye trehus ble kapitlene i forskrift om tekniske krav til byggverk benyttet som grunnlag. Dette viste seg å være en hensiktsmessig fremstillingsmetode, ettersom oppgavens vinkling er knyttet til prosjektering- og dokumentasjonsproblematikk. Det foreligger i praksis en fullstendig fraviksvurdering i oppgaven og dels fullstendige fraviksanalyser som viser hvordan ta høyde for fravik og konsekvensen av bruken av brennbart materiale i bæresystemet. Fraviksanalysene gir for øvrig generelle betraktninger, fremfor casebasert analyse

Videre har oppgaven gjennomgått fravikene som ble avdekket, suksessivt etter kapittelinnndelingen i forskriften. Det er lagt spesielt fokus på de mer omfattende fravik, eksempelvis oppfyllelse av krav til hovedbæresystem. Dette vises i form av flere kvantitative analyse og mer detaljert diskusjon. Den riktige tolkning av forskriften er diskutert, både i henhold til oppfyllelse av krav og i henhold til nødvendig dokumentasjonsmetode.

Det er også valgt å benytte kvalitative risikomatriser for mindre fravik, eksempelvis fravik fra sekundære bærende konstruksjoner og fravik fra overflate/kledning. Risikomatrissene er tatt i bruk for å bedre kunne kombinere konsekvensen og sannsynligheten for enkelte hendelser. Risikomatrissene er hentet fra en temaveiledning fra direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap [7].

Kommentar til kvantitative analyser

Ved beregninger i forbindelse med kvantitative analyser er det benyttet Microsoft Office EXCEL og MathWorks - MATLAB. Begge verktøyene anses for å være godt egnet til de analyser gjennomført. Endelig valg av program som er benyttet er vurdert på bakgrunn av tidsforbruk, fremstilling av resultater og personlig kunnskapsbegrensning.

Bruken av beregningsprogrammer har vært nødvendig for resultater, diskusjon og konklusjoner gjort i oppgaven. Beregningsmetode har blitt gjennomgått i teksten der dette har føltes nødvendig. Selve beregningen med tallverdier har generelt ikke blitt gjennomgått i detalj i oppgaven. Endelig resultat har heller blitt presentert. Beregningen og antagelser for viktige figurer og resultater er istedenfor vedlagt.

De kvantitative fraviksanalysene inneholder generelle betraktninger, og skal slikt sett være anvendbar uansett prosjekt, såfremt det er innenfor beregningsmetodenes begrensinger. I flere tilfeller har det allikevel vært nødvendig å velge forutsetninger (eksempelvis: areal, andel vindu, brannenergi og lignende), grunnet behovet for fremstilling av resultater, eller bare ønske om en representativ figur med beskrivelse. Der dette har blitt viktig for analysene er antagelsene beskrevet i oppgaveteksten. Antagelsene er ellers beskrevet sammen med de vedlagte beregninger.

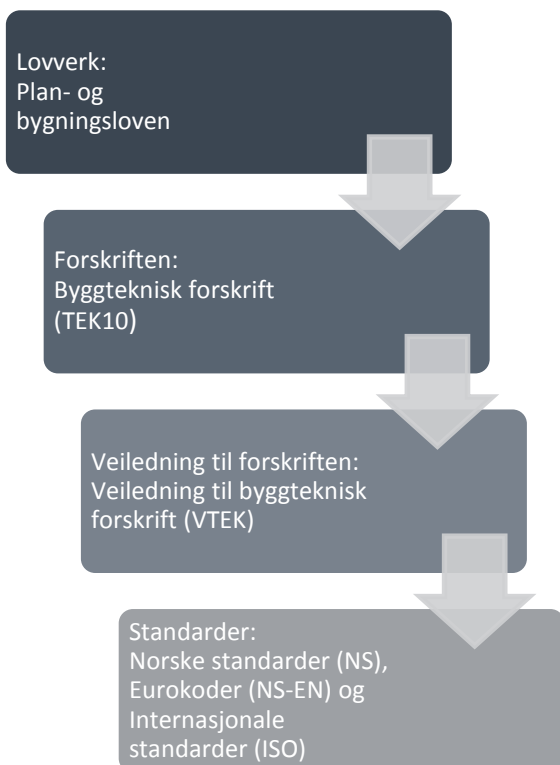
3. Teoretisk grunnlag

Kapitlet gjennomgår teori som utgjør grunnlaget for de kvalitative og kvantitative analyser og drøftingen gjennomført i oppgaven. Teorien beskriver de branntekniske aspektene av:

- Det norske regelverket og derav primært byggteknisk forskrift med veiledning
- Generell fremgangsmetode for brannteknisk prosjektering
- Tre som byggemateriale
- Hvordan trekonstruksjoner er behandlet i regelverket

Deler av teorien kan for den lærde virke overflødig, men gjennomgått teori ansees for å være nødvendig for forståelsen av brannsikkerhet i fleretasjes trekonstruksjoner. Arbeid utført nylig, state-of-the-art, på temaet brannsikkerhet i fleretasjes trekonstruksjoner er oppsummert på slutten av kapitlet.

3.1. Regelverket



Figur 1: Hierarkiet av lovverk, forskrifter og veiledninger

Hierarkiet av bestemmelser, lovverk og forskrifter i Norge har oppbygning som vist i Figur 1. Figuren presenterer plan og bygningsloven som øverste juridiske nivå, så byggteknisk forskrift, deretter veiledning til byggteknisk forskrift og tilslutt standarder.

Plan- og bygningsloven er øverste ledd i hierarkiet. Denne er utgitt av kommunal- og moderniseringsdepartementet. Lovverket er overordnet - på en slik måte at byggtekniske rådgivere i praksis ikke benytter seg av denne.

Byggteknisk forskrift angir det minimum av egenskaper som et byggverk må ha og ligger juridisk sett under plan- og bygningsloven. Det er kommunal- og moderniseringsdepartementet som har ansvaret for forskriften. Forskriften er den delen av hierarkiet som de tekniske løsningene prosjektert blir vurdert opp imot.

Veiledning til teknisk forskrift [8] angir ytelseskrav/preaksepterte ytelser som kan benyttes, samt utfyllende informasjon til kravene i byggteknisk forskrift. Veiledningen er utgitt av direktoratet for byggekvalitet. I ytelseskravene refereres det til fremgangsmetoder tilsvarende nivået under i pyramiden, altså er standarder(NS, NS-EN og ISO). Under standardene finnes det også et uoffisielt nivå hvor en finner SINTEF Byggforsk datablad, anvisninger, fagbøker og andre tekniske rapporter, som kan benyttes til å dokumentere at preaksepterte ytelseskrav er fulgt.

Opgaven tar utgangspunkt i dokumentasjon påkrevd for å oppfylle funksjon- og ytelseskrav gitt i byggteknisk forskrift ved prosjekteringsprosessen og det er derfor valgt å gjennomgå byggteknisk forskrift med veiledning i mer detalj. De andre nærliggende lovverk som kan være aktuelle i bruksfasen er brann- og eksplosjonsvernloven. Herunder ligger forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn, dimensjoneringsforskriften og internkontrollforskriften. Disse blir ikke gjennomgått i teorien.

Byggteknisk forskrift

Byggteknisk forskrift er en funksjonsbasert forskrift [9]. En funksjonsbasert forskrift betyr at forskriften angir hvilken funksjon løsningen skal oppfylles, istedenfor ett kvantifisert krav til ytelse som løsningen skal oppfylle.

- Eksempel på funksjonskrav: "Byggverk skal deles opp i brannseksjoner slik at brann innen en brannseksjon ikke gir urimelig store økonomiske eller materielle tap".
- Tilsvarende ytelseskrav: "Største bruttoareal for byggverk med brannalarmanlegg uten brannseksjonering er 1800 m²."

Funksjonsbaserte forskrifter ble innført i Norge i 1997 [10]. Fram til 1997 var forskriftene ytelsesbasert [11]. Det er både positive og negative sider med denne endringen og oppsummert effekt for brannsikkerhetsrådgiveren kan vurderes slik:

- + Funksjonsbasert forskrift åpner for ingeniørbaserte vurderinger og derav også optimalisering og innovasjon for det enkelte prosjekt.
- ÷ Ved funksjonsbasert forskrift oppstår det ofte tilfeller hvor det er tvil om oppfyllelse av kravet, hvor tilfredsstillende dokumentasjon av valgt løsning blir viktig.

Det er viktig å merke seg forskjellen mellom byggteknisk forskrift [9] og veiledning til byggteknisk forskrift [8]. Krav beskrevet i forskriften må oppfylles, mens «krav» i veiledningen kan følges. Veiledningen utfyller forskriften og gir føringer og anbefalinger for hvordan forskriftskrav kan etterkommes i praksis. Veiledningen angir i tillegg preaksepterte ytelser. Om en oppfyller en preakseptert ytelse, ansees forskriftskravet for å være oppfylt uten nødvendigvis mer dokumentasjon. De preaksepterte ytelsene gir grunnlag for tilsvarende preaksepterte løsninger som ofte er angitt direkte i veiledningen, ved referanser til SINTEF Byggforsk datablad eller ved referanser til beregningsmetoder fra standarder. Preaksepterte løsninger er generelt sett godt utprøvde løsninger,

som ansees for å være god nok, til ønsket funksjonsytelse. Om valgt løsning stemmer overens med ytelseskrav i veiledningen til forskriften så er dette tilstrekkelig dokumentasjon.

Det er nødvendig å presisere at veiledningen kan følges, mens forskriften må følges. Om det benyttes løsninger som ikke er preaksepterte oppstår det fravik. Fravik må analyseres og løsningen må dokumenteres at oppfyller funksjonskravet. Omfanget av fraviksdokumentasjonen avgjøres av omfanget av fraviket [12]. Små fravik kan lukkes uten nødvendigvis mye dokumentasjon, mens større fravik behøver ofte både kvantitative og kvalitative betraktninger før valgt løsning er tilstrekkelig dokumentert.

De kapitlene i byggeteknisk forskrift og veiledning som er av spesiell interesse for oppgaven er kapittel 2. *Dokumentasjon av oppfyllelse av krav* og Kapittel 11. *Sikkerhet ved brann*. Kapittel om *dokumentasjon av oppfyllelse av krav* er viktig for å kunne vite hvilke krav som stilles til dokumentasjonen av brannsikkerhet og verifikasjonen av oppfylte forskriftskrav. Kapittel om *sikkerhet ved brann* er av åpenbare grunner betydningsfull for kravene som må oppfylles til prosjektert byggverk. Alle de tekniske kravene (kapittel 11. i byggeteknisk forskrift) som fremstår som spesielt krevende for fleretasjes trekonstruksjoner er gjennomgått i kapittel 4. Hvordan utføre dokumentasjonen korrekt (kapittel 2. i byggeteknisk forskrift) er gjennomgått under.

Dokumentasjon av oppfylt krav

Dokumentasjonen av oppfylt krav er gjennomgått i detalj grunnet oppbygningen av oppgaven. Fokuset er å sikre at fleretasjes trekonstruksjoner tilfredsstiller funksjonskravene og derav det sikkerhetsnivå bestemt av ansvarlige myndigheter. Dokumentasjonsbehovet for brannsikkerhet har i tillegg økt med kravet til obligatorisk uavhengig kontroll som trådte i kraft 1. januar 2013. For brannsikkerhet gjelder kravet om uavhengig kontroll kun brannkonseptet for prosjekt i *tiltaksklasse 2* og *3* [13]. Dokumentasjonen må være forståelig og etterprøvbar for kontrollerende bedrift.

Hva som må dokumenteres, hvordan det bør dokumenteres og hvilke metoder som er egnet til dokumentasjonsformål er beskrevet i kapittel 2 i byggeteknisk forskrift. Kravene i dette kapitlet er satt for å sikre at prosjekteringsprosessen og utførelsesprosessen er i samsvar med myndighetskravene. Kapitlet bemerker at alle ytelseskrav og funksjonskrav som er angitt i forskriften skal oppfylles. Ytelseskrav verifiseres ved beskrivelse av valgt løsning, mens funksjonskrav kan verifiseres på to ulike metoder:

1. Ved at bygget prosjekteres i samsvar med preaksepterte ytelser
2. Ved at bygget prosjekteres i samsvar med ytelser som er verifisert ved analyse at oppfyller forskriftens funksjonskrav

Ved fraviksanalyse (metode 2.) stilles det ytterligere krav, ved at analysemetoden påviselig skal være egnet og gyldig til formålet. NS 3901 – Krav til risikovurdering av brann i byggverk [14] kommer med utfyllende spesifisering at kvalitative analysemetoder kun skal benyttes i ukompliserte byggverk, ved

små fravik, hvor fravikene i liten grad påvirker personrisikoen. Basert på denne formuleringen vil eksempelvis, fravik fra bærende hovedsystem måtte analyseres kvantitativt.

Flere av de kvantitative modellene som benyttes i brannteknikk er eksperimentelle og inneholder begrensninger i form av ett angitt gyldighetsområde. Gyldighetsområde beskriver gjerne gyldigheten til de eksperimentelle data og arbeid utenfor gyldighetsområde kan gi ukorrekt resultat. I tillegg til vurderingen av egnet og gyldig analysemetode, må forutsetninger og sikkerhetsmarginer være beskrevet. Veiledningen i kapittel 2. i byggteknisk forskrift viser til en punktliste som fremgangsmåte ved bruk av brannteknisk prosjektering ved analyse. Punktlisten er beskrevet under:

1. Kartlegge ytelsesnivå som følge av veiledningen
2. Identifisere og begrunne fravik fra veiledningens ytelsesnivå
3. Vurdere behovet for kompenserende tiltak
4. Vurdere kvalitativt effekten av de kompenserende tiltak
5. Vurdere behovet for beregningsmessig analyse (kvantitativ analyse)

Om det er nødvendig med en beregningsmessig analyse bør denne inneholde aktuelle brann scenario, henvisninger til metode, verktøy og litteratur, akseptkriterier for beregningen og drøfting av resultater. I tillegg bør det gjøres en vurdering på sensitiviteten av parameterne som inngår i beregningen. Analysemetoder gjennomgås nærmere i NS 3901 Krav til risikovurdering av brann i byggverk [14].

For å etablere ytelsesnivå og omsette disse til tekniske løsninger foreslår veiledningen til byggteknisk forskrift et utvalg egnede verktøy. De nevnte verktøyene er beregning og målestandarder fra Standard Norge [15], prosjekteringshåndbøker, som eksempelvis *Fire Safety In Timber Buildings* [16] og SINTEF Byggforsks byggdetaljblader [17]. Det må belyses at både forskriften, standardene og håndbøkene er i konstant endring, da brannsikkerhet som fagfelt fortsatt ansees for å være ferskt.

3.2. Brannteknisk prosjektering

Brannteknisk prosjektering gjennomføres for å verne liv, miljø og verdier, gjennom å senke sannsynligheten og konsekvensen ved brann. Den branntekniske prosjekteringen baserer seg på sikkerhetstiltak som til sammen utgjør en helhetlig strategi for personsikkerhet, materiell sikkerhet og sikkerhet for miljø. Gjennomføringen av den branntekniske prosjekteringen følger i teorien en av tre prosjekteringsmodeller:

- Forenklet prosjektering: De preaksepterte ytelsene angitt i veiledningen til byggtknisk forskrift følges uten fravik.
- Analytisk prosjektering: Valgte løsninger for prosjektet verifiseres gjennom fraviksanalyse som dokumenterer at forskriftens funksjonskrav er oppfylt.
- Blandingsmodell: Preaksepterte ytelser gitt i veiledningen til byggtknisk forskrift følges i begrenset grad, og aktuelle fravik dokumenteres ved bruk av brannteknisk analyse og beregning.

I praksis viser det seg at blandingsmodellen benyttes oftest, spesielt ved større prosjekt. Denne modellen er mest effektiv da prosjektet i utgangspunktet følger veiledningen, med enkelte unntak/fravik. De fravik som gjøres analyseres og løsningene dokumenteres. Mer omfattende fravik, betyr mer omfattende analyse.

Som brannrådgiver er det viktig å kunne regelverket. Ikke kun ha kjennskap til reglene, men også hva grunnlaget for reglene er. Årsaken er den kvalitative vurderingen av ulike sikkerhetstiltak. Det er vanskelig å kvantifisere effekten av sikkerhetstiltak og gjennom å vite hva som er bakgrunnen for kravet, kan en best velge gode bytter, og korrekt vurdere den kvalitative effekten av tiltaket. Spesielt viktig blir en slik kvalitativ vurdering når en benytter seg av tekniske bytter. Et teknisk bytte/kompenserende tiltak oppstår når brannsikkerhetsrådgiver velger å bytte ut et sikkerhetstiltak med et annet.

De tiltak som kan iverksettes kan grovt sett inndeles i passive, aktive og organisatoriske tiltak. Passive tiltak behøver ikke å aktiveres manuelt eller automatisk, men er heller en del av bygningskroppen. Eksempler på passive tiltak kan være brannseksjonering, avkjølingssone over vindu eller flammeskjerm i konstruksjonen. Aktive tiltak må aktiveres ved et brannscenario. Eksempler på aktiveringskriterier kan være høy temperaturer, høy optisk tetthet eller lignende. Aktive tiltak kan eksempelvis være brannalarmanlegg, røykventilasjon eller sprinkleranlegg. Organisatoriske tiltak skal ikke være en del av teknisk forskrift og derav prosjekteringsprosessen, men styres heller av forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn i bruksfasen. Eksempler på organisatoriske kan være brannøvelser eller brannforebyggende tiltak som å holde rømningsveier fri for gjenstander.

Til fraviksanalyse angir *NS 3901:2012 Krav til risikovurdering ved brann i byggverk* [14] to mulige tilnæringsmetoder. De to metodene er:

- **Risikoanalyse:** Metode som bestemmer absolutt risiko i byggverket og kan benyttes til både kvalitativ og kvantitativ vurderinger. Metoden baserer seg på egenproduserte akseptkriterier. Deretter beskrives analysebyggverket og en identifiserer potensielle farer. Så analyseres aktuelle brannscenarier og analyse av konsekvenser.
- **Komparativ analyse:** Likt risikoanalysen i metode, men beskriver ett referansebygg som analysebygget sammenlignes med, istedenfor akseptkriterier. Referansebygget er definert av preaksepterte ytelser og angir et akseptabelt risikonivå. Metoden finner altså relativ risiko, i forhold til referansebygget. Kravet er at risikoen til analysebyggverket (R_A) skal være mindre enn risikoen til referansebyggverket (R_R), kan også skrives som $R_A < R_R$.

Komparativ analyse ansees for å være enklest å forholde seg til. Årsakene er at valg av akseptkriterier i henhold til teknisk forskrift er en krevende oppgave, som vanligvis håndteres av veiledning til byggt teknisk forskrift. For en komparativ analyse er akseptkriteriene angitt ved preaksepterte ytelser.

Klassifisering

Ettersom klassifiseringsregimet i brannteknisk prosjektering er viktig for oppgaven er det et delkapittel om dette. Veiledningen til teknisk forskrift benytter ofte klassifiseringen til å angi ytelseskrav til bygningsdeler og produkter. De to klassifiseringene er: Brannmotstand og brannpåvirkning.

Brannmotstand beskriver hvor lenge en konstruksjonsdel kan opprettholde en vesentlig brannteknisk funksjon, eksempelvis bæreevne, ved brann. Test av brannmotstand skjer etter standard temperatur-tid kurven. Standardbrannkurven er definert under delkapitlet om brannforløp. De ulike funksjonene som konstruksjonsdelene kan oppnå er beskrevet i Tabell 1.

Tabell 1: Klassifisering brannmotstand

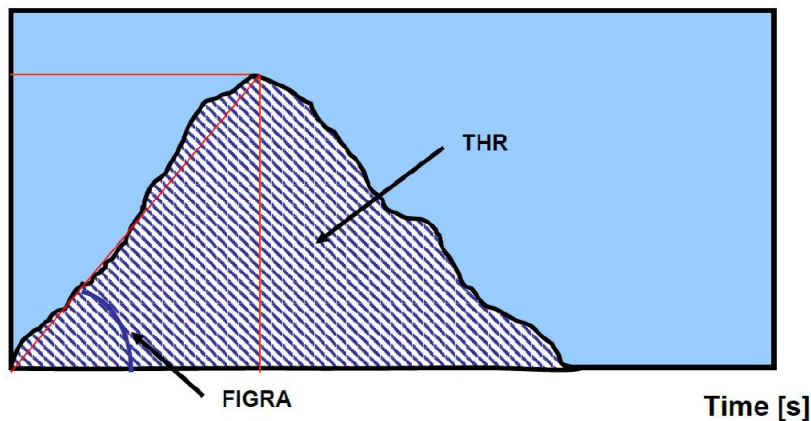
Klassifisering	Funksjon	Beskrivelse
R	Bæreevne	Ivaretar tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i den tid angitt.
E	Integritet	Motstand mot spredning ved gjennomtrenging av varme gasser og flammer. Visuell test.
I	Isolasjon	Evnen til å motstå spredning av brann gjennom varmeledning. Måler temperaturøkning upåvirket side.
M	Mekanisk motstand	Motstand mot mekanisk påkjenning, eksempelvis fall av bjelke mot vegg. Bæreevne og stabilitet etter støt på vegg sjekkes.

Klassifiseringen av brannmotstand etterfølges av ett tall (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180). Dette tallet angir hvor lenge konstruksjonen kan forventes å opprettholde angitt funksjon. Eksempelvis REI 30 betyr at bygningsdelen forventes å opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet [R], motstand

mot spredning av varme gasser og flammer [E] og motstår spredning av brann gjennom varmeledning [I] i 30 minutter.

Brannpåvirkning beskriver hvilken påvirkning bygningsdelen/produktet har på brannen. Klassifiseringen viser i hvilken grad og hvor raskt produktet bidrar til videre brannforløp. I tillegg sier brannpåvirkningsklasse noe om produksjon av brennbare dråper og røykintensitet. Test prosedyren for brannpåvirkning er standardisert og måler varmeavgivelsesrate, som så plottes mot tid, dette gir et midlere stigningstall som så indikerer produktets brannpåvirkningsklasse (fire growth ratio = FIGRA). Lavt stigningstall betyr lite bidrag og god klassifisering, mens høyt stigningstall betyr rask utvikling og dårlig klassifisering. Prinsippet er vist i Figur 2.

Heat release rate [kW]



Figur 2: Klassifisering av et materiale for brannpåvirkningsklasse

Figuren har varmeavgivelsesrate (heat release rate) langs y-aksen, tid langs x aksens og arealet under grafen er total varmeavgivelse (total heat release, THR). De ulike brannpåvirkningsklassene er angitt i Tabell 2.

Tabell 2: Klassifisering brannpåvirkning

Klassifisering	Beskrivelse	Eksempler på materiale
A1	Ingen bidrag til brannen	Betong, mur, stål
A2	Ingen bidrag til brannen	Gips, glassull, steinull
B	Svært begrenset bidrag til brannen	Brannbehandlet treverk
C	Begrenset bidrag til brannen	Fenolskum
D	Akseptabelt bidrag til brannen	Ubehandlet treverk
E	Akseptabelt bidrag til brannen	Plast
F	Oppfyller ingen klasse	Ikke testet/ikke klassifisert

Røykproduksjon har tre ulike klasser. s1, s2 og s3. Hvor klasse s1 gir lite røykproduksjon, mens s3 ikke har noe begrensning på produsert røykmengde.

For brennende dråper er det også tre klasser. d0, d1 og d2. Klasse d0 gir ingen brennende dråper, mens d2 ikke har noe begrensning på krav for produksjon av brennende dråper.

Bidrag til brannen, produksjon av røyk og produksjon av brennende dråper kombineres og utgjør brannpåvirkningsklassen. En vanlig klassifisering av brannpåvirkningsklasse til eksempelvis ubehandlet trevirke ser slik ut:

D-s2,d0

Hvor altså D beskriver akseptabelt bidrag til brannen, s2 beskriver noe røykproduksjon, og d0 beskriver at det oppstår ingen brennende dråper ved brann fra produktet.

Brannforløp

Brannforløp er definert som brannens utvikling fra antennelse til den er sloknet. Ved brannteknisk prosjektering er det ofte nødvendig å tilnærme forventet brannforløp med en temperatur-tid-kurve. Det finnes to typer kurver, parametrisk og nominell.

- **Parametriske kurver** er basert på parametere som har betydning for utviklingen av brannen og er karakteristisk for hver enkelt case. Hensikten med parametrisk brannforløp er å gi en mest mulig korrekt, men konservativ, framstilling av det naturlige brannforløpet.
- **Nominelle kurver** er standardiserte og utgjør en representasjon av de mest alvorlige resultatene fra eksperimentelle data.

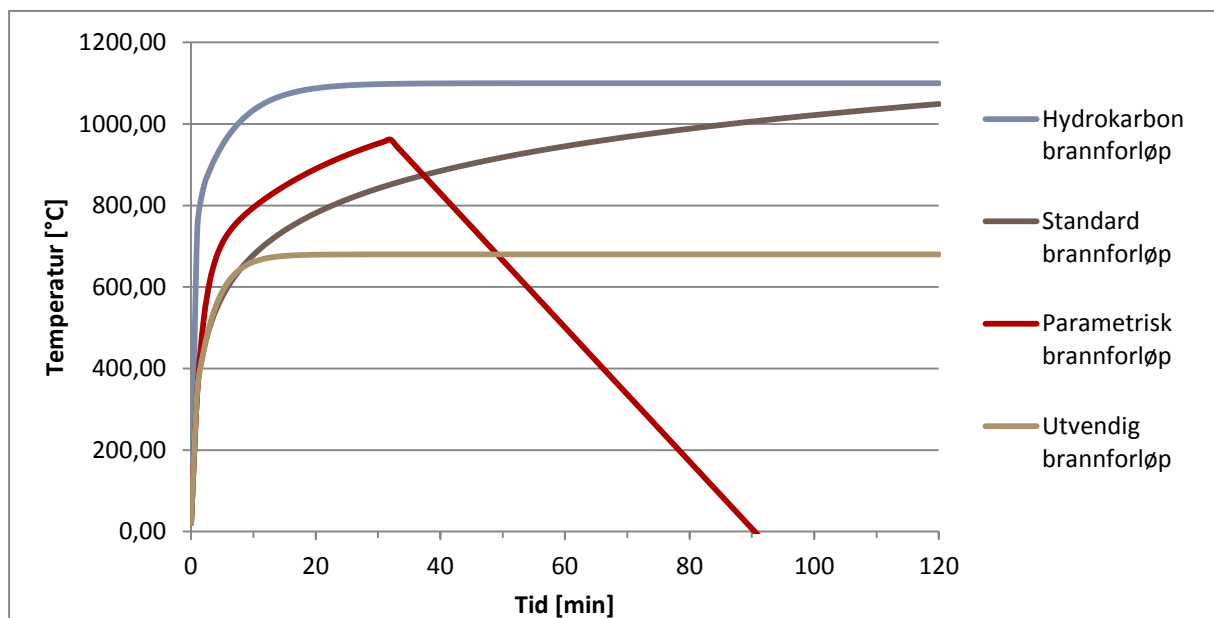
Designkurvene fokuserer på temperaturutviklingen ved overtenning. Årsaken er at kurvene primært benyttes til påvirkningsanalyse for bærende bygningsdeler. Temperaturene før overtenning er ikke interessante, grunnet lav påvirkning på bæresystemet. I dimensjoneringssammenheng er det viktig å benytte en kurve som er troverdig, men allikevel representerer et alvorlig brannforløp. Det er i utgangspunktet vanskelig å forutsi hvilket brannforløp som faktisk kommer til å oppstå i branncellen, så vi tilnærmer et verste troverdig scenario. Dette gjelder både for parametriske og nominelle kurver.

De ulike temperatur-tid-kurvene som benyttes i brannteknisk prosjektering er beskrevet i Tabell 3. Både standardbrannforløp og parametrisk brannforløp diskuteres i forbindelse med analyse av hovedbæresystem i kapittel 6.2.

Tabell 3: Beskrivelse av ulike brannforløp

Kurve	Beskrivelse
Standardbrannforløp Standard temperatur-tidkurve	Nominell kurve. Begrenset til brann i en branncelle – benyttes til klassifisering av brannmotstand for bygningsdeler.
Utvendig brannforløp Utvendig brannkurve	Nominell kurve. Beskriver utvendige brannscenario, brenselskontrollert, men ikke petroleum branner.
Hydrokarbon brannforløp Brannkurve for hydrokarbonbrann	Nominell kurve. Beskriver brannscenario ved petroleumsbranner.
Parametrisk brannforløp Parametrisk temperatur-tidkurve	Parametrisk kurve. Ventilasjonkontrollert brann, hvor utgangspunktet for forløpet er parametere som er spesifikk for scenarioet. Eksempel på aktuelle parameter: Åpningsfaktor, brannlast, omhyllende konstruksjoners termiske egenskaper.

De ulike temperatur-tid-kurvene er fremstilt i Figur 3. Som en ser tar ikke de tre nominelle brannkurvene høyde for avkjølingsfase, slik som den parametriske brannkurven gjør. Eksperimentelle tester for å avgjøre klassifiseringen av brannmotstanden til bygningsdeler gjennomføres etter standardbrannkurven. Ingen av kurvene vil være helt korrekte, men de er tilnærminger av virkeligheten hvor parametrisk brannforløp trolig gir best representasjon grunnet avkjølingsperiode



Figur 3: Framstilling av ulike brannforløp

For å kunne benytte det parametriske brannforløpet sammen med standard brannforløp, og derav klassifiseringen av bygningsdeler, finnes det en metode i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Denne metoden kalles for ekvivalent branneksponeeringstid. Modellen knytter sammen alvorlighetsgraden ved den designmessige parametriske brannen og hvilken tid samme påvirkning

tilsvarer målt i standardbrannforløp. Metoden benyttes i analyse av hovedbæresystem i kapittel 6.3. Modellen er gjennomgått her, men kunne like gjerne vært plassert under «state-of-the-art». Det er viktig å bemerke at metoden er materialspesifikk og kan ikke benyttes på trekonstruksjoner. Dette står beskrevet i introduksjonen til modellen i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Det diskuteres i kapittel 6.2 at metoden er basert på forventet temperatur i ståltverrsnitt, hvor da trevirke forkuller ved 300 grader og derfor vil ikke resultater fra bygningsdeler i tre sammenfaller med denne modellen.

Den ekvivalente branneksponeeringstiden ($t_{e,d}$) beregnes slik:

$$t_{e,d} = q_{f,d} \cdot k_b \cdot w_f \cdot k_c = q_{t,d} \cdot k_b \cdot w_t \cdot k_c$$

Subindeksene angir hvorvidt faktoren er relatert til gulvareal (subindeks f) eller omhyllingsareal (subindeks t). Hvor da $q_{f,d}$ og $q_{t,d}$ er spesifikk brannenergi for henholdsvis gulvareal (f loor) og omhyllingsareal (t otal). De resterende korreksjonsfaktorene tar høyde for:

- Omsluttende bygningsdelers termiske egenskaper (k_b). Denne faktoren tar hensyn til spesifikk varmekapasitet, varmeledningsevne og massetettheten til omhyllende bygningsdelers til branncellen. Dette er for å inkludere varmelednings- og varmelagringstapet til de omhyllende konstruksjoner. Om det ikke er gjennomført en detaljert vurdering kan denne settes konservativt lik 0,07. Trekonstruksjoner for øvrig kan forventes å ha verdi lik 0,07.
- Ventilasjonsfaktor (w). Faktoren angir om den brannen er brenselskontrollert eller ventilasjonskontrollert og varierer branneksponeeringstiden på bakgrunn av dette.
- Korreksjonsfaktor for materialbruk (k_c). Faktoren korrigerer den ekvivalente branneksponeeringstiden basert på hvilket tverrsnittsmateriale analysen beregning skal gjennomføres for. Armert betong og beskyttet stål har verdi lik 1.

Utleddning for denne metoden er ikke utgitt, og heller ikke de eksperimentelle data tilknyttet utledningen, men metoden er standardisert i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Dette ansees for å være et kvalitetsstempel.

3.3. Tre som byggemateriale

Lette trekonstruksjoner, spesielt bindingsverk, er den dominerende byggemetoden for bolighus i Norge. Hele 75 – 80 % av alle nybygg er i dag trehus, og hele 98 % av alle småhus i dag er trehus [18]. Tidligere ble trevirke benyttet grunnet lav pris og god lokal tilgjengelighet, mens i dag benyttes det på grunn av positiv miljøprofil. Fra gammelt av ble ikke brannsikkerhet nevneverdig vektlagt og det oppstod følgelig flere store bybranner. Oslo, Trondheim, Bergen og Ålesund har alle hatt større bybranner de siste 400 årene. Etter den siste massive brannen i Ålesund, år 1904, ble det innført murtvang i flere større norske byer som brannsikkerhetstiltak for å forebygge brannspredning og forhindre fullstendig nedbrenning av byene [19]. Dette blir sett på som den symbolske starten for arbeid med brannsikkerhet i Norge.

For tyngre trekonstruksjoner har utviklingen i Norden først og fremst skjedd de siste 10-20 årene. Byggene kan nå konstruktivt bygges både større og høyere enn tidligere, takket være videreutviklingen av trematerialer. Spesielt har prefabrikering av limtreelementer og massivtreelementer økt, men bruken av trebaserte bygningsmaterialer (engineered wood products, EWP) som for eksempel I-bjelker har også opplevd økning. Produktene har generelt sett god bæreevne og lav vekt [20]. Dette gir et gunstig økonomisk sluttresultat for frakt av materiale og fundament, sammenlignet med stål, betong og mur. Likevel må det nevnes at tre er et nedbrytbart materiale og ofte blir stigmatisert grunnet dårlige brannsikkerhets-egenskaper sammenlignet med stål, betong eller mur.

Arkitekten foretrekker ofte trekonstruksjoner grunnet flott estetisk uttrykk og godt inneklima. I tillegg har tre vist seg å være nøytral med hensyn på klimagassutslipp, og en stor forbedring med tanke på miljøaspektet, sammenlignet med betong [2-4, 21].

Trebaserte bygningsmaterialer

Det finnes per dags dato mange ulike typer trebaserte produkter som benyttes i trekonstruksjoner. De desidert mest benyttede produktene i fleretasjes trekonstruksjon blir gjennomgått i denne oppgaven. Disse er heltre, massivtre og limtre. De mindre brukte produktene, som eksempelvis parallell strand lumber (PSL), Laminated strand lumber (LSL), I-bjelker og Laminater veneer lumber (LVL) blir ikke gjennomgått i detalj grunnet lav grad av påvirkning på oppgavens analyse. De overnevnte produktene er heller ikke et alternativ ved bygging av fleretasjes trekonstruksjoner. En beskrivelse av alle trebaserte produkter som finnes på markedet i dag er oppsummert i artikkelen Trebaserte konstruksjonselementer, av TreFokus AS og Treteknisk [22].

De tre viktigste trekonstruksjonsproduktene for oppgaven er:

- **Heltre:** Heltre er det treverket som gjenstår etter behandling (sag og justering av skurlast) av tømmer. Heltre er sortert, enten visuelt eller mekanisk, etter styrke. Materialet kalles ofte feilaktig for konstruksjonsvirke, men dette er en paraplybetegnelse treverk benyttet i konstruksjoner. Eksempler på konstruksjonsvirke er heltre, massivtre eller limtre. Heltre

benyttes ofte i bindingsverksvegg, som bjelkelag eller som utgangspunkt for de andre trekonstruksjonsmaterialer.

- **Massivtre:** Massivtre er et produkt bestående av lameller av heltre. Disse bindes sammen til elementer ved bruk av skruer, spiker, tredybler, lim eller stålstag, hvorav lim er den vanligste [23, 24]. Lamellene plasseres i ulike fiberretninger, for å øke kapasiteten til produktet i de ulike retningene ved å benytte styrken til trevirke i fiberretningen. Massivtreelementer benyttes som bærende elementer i gulv, vegg og tak. Elementene kan produseres i mange ulike dimensjoner og har derfor mange bruksområder. Det er også enkelt å bearbeide massivtre på byggeplass eller bestille elementer med ferdige behandlede overflater.
- **Limtre:** Limtre er et konstruksjonsmateriale som består av lameller av heltre som er limt sammen i parallell fiberretning. I produksjonen av norsk limtre benyttes lameller av heltre som er 40 mm tykke. Limet som benyttes skal være godkjent konstruksjonslim. Limtre kan i teorien produseres i hvilken som helst tykkelse og lengde. Det finnes to styrke-klassifikasjoner av limtre. Den første klassen er GL c (glulam combined) og den andre klassen er GL h (glulam homogenous). Forskjellen mellom produktene er hvilke styrkeklasser som er benyttet for lamellene av heltre. Det er vanlig å benytte to ulike styrkeklasser for en limtrebjelke, hvorav de ytterste lamellene har høyere fasthet, dette tilsvarer GL c. Hvis alle lamellene har lik styrkeklasse er det klassifisering GL h.

Viktigste forskjellen på massivtre og limtre er at lamellene i massivtre plasseres i ulike fiberretninger, mens lamellene plasseres i samme fiberretning for limtre.

Treverks konstruktive egenskaper

Treverk er et anisotropt og inhomogent materiale, det betyr at treverk har ulike egenskaper i de forskjellige fiberretninger. Styrke for strekk og trykk, parallelt med og normalt på fiberretning har alle ulike verdier. For å kunne dimensjonere med treverk er det utviklet styrkeklasser som konstruksjonsmaterialet sorteres etter. De ulike klassene har ulik forventet styrke og klassifiseringen avhenger av om det er limtre (klasse GL) eller heltre (klasse C). De forskjellige egenskapene i ulike retninger og for ulik påkjenning vises best gjennom et eksempel, som vist i Tabell 4.

Tabell 4 viser at treverk har gode styrke egenskaper parallelt med fibre, både for trykk og strekk. I tillegg har treverk høy momentfasthet, men tabellen viser også at treverk ikke bør benyttes til strekk eller trykk normalt på fibre, da styrken her er lav. Konstruksjonstrevirke har også et godt vekt-styrke forhold, selv sammenlignet med stål. Vekt-styrke forholdet betyr ofte at det kan spares inn store kostnader ved bruk av trematerialer ved større konstruksjoner. Gjennom bruk av limtre eller massivtre kan den potensielle innsparingen for fundament, frakt og kran-kostnader gi et økonomisk gunstig sluttresultat [20]. Dette sees selvfølgelig i sammenheng med andre alternativer som betong og stål.

Tabell 4: Eksempel på styrke for trevirke – Limtre klasse GL 24c

Egenskap	Symbol	Klasse GL 24c Styrke [N/mm^2]
Bøyemoment	$f_{m,g,k}$	24,0
Strekk, parallelt med fibre	$f_{t,0,g,k}$	17,0
Strekk, normalt på fibre	$f_{t,90,g,k}$	0,5
Trykk, parallelt med fibre	$f_{c,0,g,k}$	23,5
Trykk, normal på fibre	$f_{c,90,g,k}$	2,5

Treverk har god stivhet og det er enkelt å tilpasse på byggeplass. Det er heller ikke et problem å prefabrikkere ferdige utsparinger til rørspesifikasjoner av elektro eller ventilasjon. Ved bruk av slike prefabrikkerte elementer er det naturlig at prosjektering og planlegging tar lengre tid og koster mer. Det totale regnskapet vil allikevel i mange tilfeller vise at byggefasen oppnår såpass kostnadseffektiv montasje slik at summa summarum gir positivt resultat. Det er i tillegg mulig å bygge trekonstruksjon ved vinterstid, og kostnader ved uttørking er lavere enn ved bruk av betong.

3.4. Treets egenskaper ved brann

Tre er ett organisk nedbrytbart materiale. Det består primært av cellulose, hemicellulose og lignin. Ved temperaturøkning vil først vanninnholdet i treverket fordampe. Dette skjer ved temperatur lik 100 °C. Deretter mellom 110-230 °C vil det oppstå begynnende pyrolyse. Pyrolyse er en dekomposisjon av et organisk materiale uten tilgang på oksygen. Treverkets brennpunkt er rundt 260 °C. Ved brennpunktet begynner de nedbrutte komponentene å oksidere og det oppstår en eksoterm reaksjon. Når treverk når brennpunktet begynner dannelsen av et forkullingslag. Dette forkullingslaget er rester etter forbrenningen av cellulose og består hovedsakelig av karbonrike forbindelser. Forkullingslaget er porøst og innehar tilnærmet ingen mekanisk styrke.

Forkullingslaget kan i enkelte tilfeller beskytte bakenforliggende treverk grunnet dens lave varmeledningsevne. Kull-laget isolerer og beskytter slik sett mot videre forkulling. I turbulente branner vil en kunne se at forkullingslaget ikke holder seg på plass og gradvis faller av slik at beskyttende effekt er minimal. Beregningsmessig blir ikke forkullingslagets isolerende effekt inkludert.

Nøyaktig hvilken forkullingsrate (raten som kull-laget propagerer innover i tverrsnittet) som en bør forvente ved brann i treverk er komplekst tema. Selve forkullingsraten kan være avhengig av mange faktorer, for eksempel:

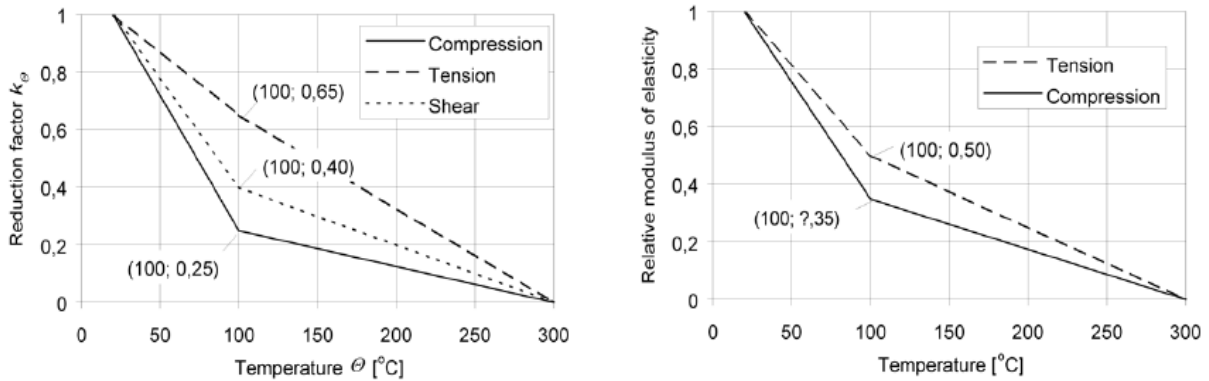
- Densiteten av treverket
- Tykkelse av konstruksjonsdelen
- Varmepåvirkningen fra brannen, derav stråling, gasstemperatur mm.
- Fuktinnholdet i treverket
- Kjemisk sammensetning, derav forholdet lignin og cellulose mm.
- Geometriske faktorer

Selv om densiteten har desidert størst påvirkning, bør en med så mange potensielle ukjente faktorer vurderes forkullingsrate i konservativ retning, for å sikre robustheten av konstruksjonen. Spesielt viktig blir dette om en ikke har informasjon eller tatt avgjørelse på hvilken type tremateriale som benyttes i konstruksjonen. Flere nyere håndbøker eksempelvis *Fire Safety in Timber Buildings* [16] eller *Brandsäkra Trähus* [25] anbefaler å benytte forkullingsraten som beskrevet Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner, del 1-2: Brannteknisk prosjektering.

I Eurokode 5 – del 2 er det to mulige metoder for å bestemme forkullingsrate. Metodene er basert på hvilken analysemetode og brannforløp det dimensjoneres med. De to metodene er forenklet metode og forkullingsrate ved parametrisk brannforløp. Forenklet metode angir en konstant konservativ forkullingsrate som kan forventes på bakgrunn av typen konstruksjonsmateriale. Forkullingsrate ved parametrisk brannforløp derimot, angir et sett beregningsregler basert på hvilke egenskaper som brannen forventes å ha. Forkullingsrate ved parametrisk brannforløp angir at forkullingsraten designmessig kan forventes å holde seg konstant ved oppvarmingsfasen av brannen, for så å avta

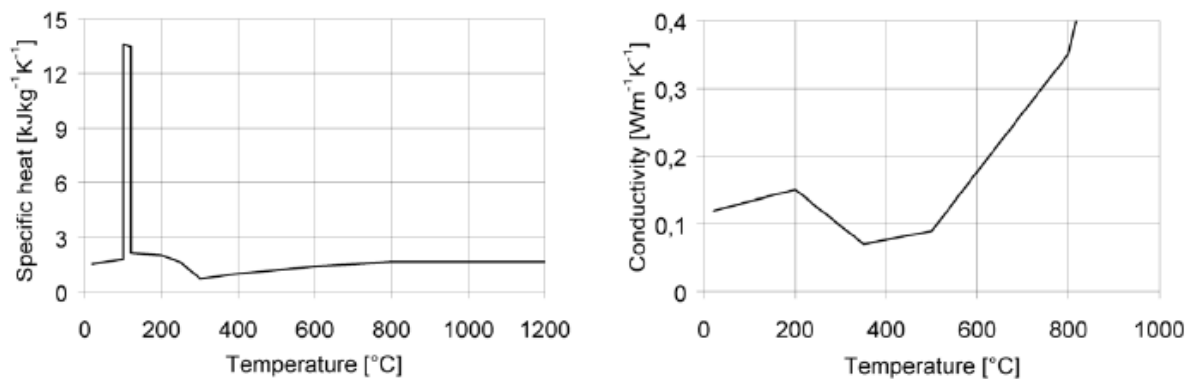
lineært i avkjølingsfasen. Dimensjoneringsmetoder for forkullingsrate er gjennomgått i siste del av teorikapittelet og i kapittel 5, i forbindelse med beregning av spesifikk dimensjonerende brannenergi.

Ved brann endrer treverkets styrke og stivhet seg. Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering angir følgende designkurver til bestemmelsen av styrke og stivhet. Merk at disse kun er gyldige for en standardbrannpåvirkning.



Figur 4: Relativ styrke (til venstre) og stivhet (til høyre) for trevirke ved brann. Hentet fra [26]

De termiske egenskapene til treverket endrer seg også ved temperaturendring. Økningen av spesifikk varmekapasitet ved 100 grader celsius forklares med at fuktinnholdet i treverket gjennomgår en faseendring.

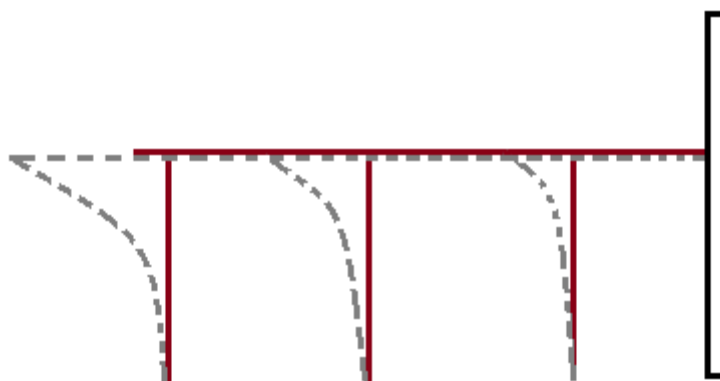


Figur 5: Spesifikk varmekapasitet (til venstre) og varmeledningsevne (til høyre) for tre ved brann. Hentet fra [26]

Ved 300 grader oppstår forkulling. En benytter null styrke og stivhet for trevirke som er forkullet ved beregninger av tverrsnitt. Dette ser en av Figur 4. Det er også grunnlag for å redusere styrke og stivhet

i oppvarmet dybde, og vanligste metoden å ta høyde for dette er å fjerne en dybde av tverrsnittet som en antar har null styrke og stivhet – redusert tverrsnittsmetode.

Selv om bruken av trekonstruksjoner har negative sider finnes det eksempler på positive effekter. Eksempelvis et ordinært scenario, med bjelker og søyler av stål:



Figur 6: Utvidelse og indre krefter i stål ved brann

Et slikt scenario vil skape store indre krefter i stålet, grunnet den høye varmeutvidelseskoeffisienten som stål har. Det er for øvrig helt vanlig praksis å sveise sammen stålbejlen slik at denne blir meget lang. Oppsettet vil kunne føre til gjennomlokking av seksjoneringsveggen til høyre i figuren.

Hvis utformingen hadde vært søyler og bjelker av tre ville påvirkningen på brannveggen til høyre i figuren vært mye lavere grunnet den lave utvidelseskoeffisienten trematerialer har. Det er viktig at brannveggen til høyre, vanligvis i betong, opprettholder sin funksjon gjennom et fullstendig brannforløp, for å hindre spredning til andre seksjoner av bygget.

Et annet eksempel på positiv effekt ved bruk av trekonstruksjoner er ved en meget hurtigutviklende brann. Det vil kunne forekomme tidlig deformasjon av stålsøyler, mens søyler av tre vil oppleve tilnærmet lik forkullingsrate, som en langsomt utviklende brann. En hurtig utviklende brann, vil avslutte raskere, og derav også bremse forkullingen på et tidligere tidspunkt. Trekonstruksjoner vil altså kunne være mer positivt i en brann med større effekt.

3.5. Trekonstruksjoner i forskriften

Trekonstruksjoner ble før 1997 begrenset til to etasjer (tre etasjer for boliger) gjennom ytelseskrav i forskriften med ubrennbar bærende hovedsystem ved tre etasjer eller mer [11]. Dagens norske forskrift angir ingen slik etasjebegrensning for trekonstruksjoner, men heller et skjerpet krav til dokumentasjon av tilstrekkelig brannsikkerhet ved bruk av fleretasjes trekonstruksjoner.

Oversikt over antall etasjer tillatt for trekonstruksjoner i Norden er angitt i Tabell 5. Denne oversikten viser at myndighetene i Norden de siste årene har beveget seg mot en mindre konservativ holdning, forutsatt at valgt løsning er veldokumentert.

Tabell 5: Maksimalt antall etasjer ved bruk av trekonstruksjon, tillat i forskrift for nordiske land [27]

	Fram til 1993	1994	1997	1999	2004	2007	2010
Norge	3	3	∞	∞	∞	∞	∞
Sverige	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞
Finland	2	2	4 ¹⁾	4 ¹⁾	4 ¹⁾	4 ¹⁾	4 ¹⁾
Danmark	2	2	2	4	∞	∞	∞

¹⁾ Krav til fullsprinkling.

Den norske forskriften er per dags dato materialnøytral. Det legges ingen begrensninger utover at materialer ikke skal gi uakseptable bidrag til brannen. Veiledningen derimot er ikke materialnøytral. Det blir angitt at overflater eller konstruksjoner må inneha brannpåvirkningsklassifisering lik A2-s1,d0. Ubehandlet trevirke oppfyller D-s2,d0 og behandlet kan komme ned i B-s1,d0. Det oppstår i den forbindelse flere fravik fra veiledningskravet.

Ved nærmere gjennomgang virker det som om mange av kravene til ubrennbare materialer gitt i veiledningen til forskrift om tekniske krav til byggverk kommer direkte fra den gamle byggeforskrift 1987. Disse ytelsene ekskluderer trevirke som preakseptert løsning. Kravene er endret så de følger dagens klassifiseringssystem, men dagens veiledning er lik byggeforskrift 1987. Dette er ikke kritikk til veiledningen, men heller en påpekning om at de erfaringer gjort i sammenheng forskriften fra 1987, fortsatt er gyldige. Det anbefales fortsatt i veiledningen å benytte ubrennbare materialer grunnet god dokumentasjon for slike løsninger. Det samme erfaringsgrunnlaget finnes ikke på brennbare materialer og akkurat dette er nok bakgrunnen for ønske om analyse ved bruken av trevirke som byggemateriale.

3.6. State-of-the-art

Dette kapitlet oppsummerer state-of-the-art arbeid gjort på trekonstruksjoner de siste årene. Artiklene tar for seg aktuell funn for oppgaven for dimensjoneringsmetoder, bæresystem i tre, brannforløp og erfaringer fra bygging med tre. Innholdet i aktuelle artikler/standarder er oppsummert kort.

Dimensjoneringsmetoder – standarden

Som ledd i standardiseringsarbeidet av beregningsmetoder i Europa har det kommet nye standarder for dimensjonering av trekonstruksjoner til Norge. Den viktigste for arbeidet gjennomført i denne oppgaven er utgitt i Norge av Norsk Standard i 2004 og heter Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner, del 1-2: Brannteknisk dimensjonering [26]. Denne eurokoden erstatter NS 3470-2:2003: Prosjektering av trekonstruksjoner - Beregnings- og konstruksjonsregler - Del 2: Brannteknisk dimensjonering. Bestemmelse av forkullingsrate er gjennomgått:

Forkullingsraten ved forenklet dimensjonering, standard brannforløp, skjer i henhold til Tabell 6.

Tabell 6: Forkullingsrate i henhold til eurokode 5 - del 2.

	β_0 [$\frac{mm}{min}$]	β_n [$\frac{mm}{min}$]
Mykt trevirke og bølgeved		
Limtre med en karakteristisk densitet på $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Heltre med karakteristisk densitet på $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
Trevirke med høy densitet		
Heltre, limtre eller massivtre med karakteristisk densitet på 290 kg/m^3	0,65	0,7
Heltre, limtre eller massivtre med karakteristisk densitet på $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
LVL (Laminated veneer lumber)		
Med karakteristisk densitet av $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Panel		
Trepanel	0,9	-
Kryssfiner	1,0	-
Trebaserte produkter som ikke er kryssfiner	0,9	-

Her er β_0 en-dimensjonal forkullingsrate og gjelder for en-dimensjonal brannpåkjenning.
 β_n nominell forkullingsrate og tar høyde for hjørner avrundinger ved flersidig brannpåkjenning.

Forkullingsrate ved parametrisk brannforløp skjer i henhold til beregningsregler gitt i Tillegg A i Eurokode 5 – del 2. Oppsummering av beregningsmodellen er gjennomgått her:

$$\beta_{par} = 1,5 \cdot \beta_n \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \cdot \sqrt{\Gamma} + 0,08}$$

Denne raten er ikke konstant gjennom hele brannforløpet, men heller konstant igjennom oppvarmingsfasen, før den avtar lineært i nedkjølingsfasen i en tid lik to ganger oppvarmingsfasen. De ulike fasene er vist i Figur 3 og Figur 15. Hvordan raten endrer seg med tiden er også presentert i Figur 18: Forholdet mellom forkullingsrate og tid for et parametrisk brannforløp.

I bestemmelsen av forkullingsrate for parametrisk brannforløp er Γ definert som en faktor som tar hensyn til de termiske egenskapene til branncellen.

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2}$$

Hvor O er åpningsfaktor, som beskriver ventilasjonen og derav tilgangen på oksygen i rommet, og b er absorptiviteten til rommets omhyllende bygningsdeler. Årsaken til at forkullingsrate ved parametrisk brannforløp blir problematisk i beregningene senere i oppgaven, er gyldighetsområdet angitt som:

$$\begin{aligned} t_0 &\leq 40 \text{ min} \\ d_{char} &\leq \frac{b}{4} \\ d_{char} &\leq \frac{h}{4} \end{aligned}$$

Hvor b og h er tverrsnittsdimensjonene til analyserte bygningsdel. Dette er knyttet til en forenkling om termisk tykt materiale som må være tilstede for gyldigheten av modellen. t_0 er definert som tiden bygningsdelen opplever konstant forkullingsrate. Ved lengre branner, altså hvor åpningsfaktoren er lav og/eller brannenergien er høy, vil heller ikke denne metoden være gyldig.

Korrigerings av standarden

Hopkin [28] presenterte i 2011 en vurdering av beregningsmodellen forkullingsrate ved parametrisk brannforløp. Konklusjonen var at modellen har relativt lavt gyldighetsområde, og bør utvides for økt bruksområde. Begrensende gyldighetsfaktor var primært $t_0 \leq 40 \text{ min}$. En annen konklusjon var at det er behov for å finne nye termiske egenskaper for tre utsatt for parametrisk brann. De grafene presentert i kapittel 3.4 - Figur 4 og Figur 5 er kun gyldige ved standardbrannpåkjenning og det bør utvikles egne grafer for påkjenning etter parametrisk brannforløp. Det er i denne artikkelen foreslått designgrafer for varmeledningsevne, i forbindelse med nye funn for spesifikk varmekapasitet ved parametrisk brannforløp.

Feasey og Buchanan [29] presenterte også i en annen artikkel fra 2002, endringsforslag til hvordan Eurokode 1 og Eurokode 5 håndterer nedkjølingsfasen i parametrisk brannforløp. Enkelte av disse forslagene er nylig implementert i beregningsmodellen i Eurokode 1 og Eurokode 5, parametrisk brannforløp. Årsaken til endringer er en underprediktering av varigheten av nedkjølingsperioden for parametrisk brannforløp.

Erfaringsdata som supplement til standarden

SP tr  presenterte i 2012, med håndboka Brands kura trähus [25] en gjennomgang av dem normerte beregningsreglene for trekonstruksjoner, spesielt da reglene i Eurokode 5 – del 2. Håndboken inneholder veiledningstekst og omfattende eksempler. En tilsvarende europeisk veiledning er også presentert i forbindelse med forskningsprosjektet FireInTimber. Denne håndboken heter Fire safety in Timber buildings - Technical guidelines for Europe [16]. Beregningene i Eurokode 5 og håndbøkene er tilnærmet identiske, men de Brands kura trehus presenterer omfattende eksperimentelle data for beskyttelse av treverk med bruk av gips. Disse er å foretrekke framfor eurokoden da de er mer korrekte og gir en bedre sikkerhet i sluttresultatet sammenlignet med beregningen fra Eurokode 5 – del 2. Oppsummering av disse resultatene er gitt i Tabell 7.

Tabell 7: Tabulerte verdier for start av forkulling (t_{ch}) og nedfallstider (t_f) for gipskledning [min]. Hentet fra [25]

Gipskledning	Tykkelse	Vegger		Bjelkelag	
		T_{ch}	T_f	T_{ch}	T_f
Type A	12,5	15,5	16,8	15,5	15,5
Type F	12,5	15,5	32,3	15,5	22,5
Type F	15,0	20,0	43,5	24,5	25,0
Type A og type A	25,0	33,0	38,5	31,0	-
Type F og type A	25,0	45,5	50,8	36,0	36,0
Type F og type A	27,5	50,8	81,0	36,0	50,0
Type F og type F	25,0	45,5	60,0	36,0	47,0
Type F og type F	30,0	56,0	80,0	46,0	57,0

Forklaring på kledningstype i Tabell 7: Gips type A er såkalte standardplater, 12,5 mm tykke og benyttes til innvendig kledning på vegger og i himling. Har forsenket kant på langsiden, for å gi plass til sparkelmasse og skj tremse. Gips type F er definert som spesielle brannbeskyttende plater som produseres i både 12,5 og 15 mm tykkelse. Type F benyttes til brannklassifiserte konstruksjoner og består av en armert gipskerne og mineralske tilsetninger for bedre oppførsel ved brann [30]. Faktorene T_{ch} og T_f er definert som henholdsvis tiden til forkullingsoppstart og tiden til nedfall av gipsplaten.

De to håndbøkene presenterer også veiledning for spredning av brann igjennom hulrom og fasade. Spesielt foreslås tiltak for å hindre spredning til fasade og tetting av rørgjennomføringer og hulrom.

Hovedbæresystem i tre

Buchanan [31] gjennomgår i sin oppsummerende artikkel de viktigste egenskapene til trekonstruksjoner til brann. Buchanan trekker et viktig skille ved tiden før overtenning og tiden etter overtenning. Egenskapene som er viktige f r overtenning er antennelse, varmeavgivelsesrate, flammespredning og mengde røyk produsert. Egenskapene som er viktige etter overtenning er total brannmengde, ventilasjon, bærende konstruksjoner og sekundære konstruksjoner. Modellen for forkullingsrate ved parametrisk brannforløp blir også verifisert gjennom flere fullskala forsøk. Det blir

i tillegg presentert en oppsummering av arbeidet på knutepunkt ved tyngre trekonstruksjoner og gitt en kilde til omfattende arbeid på knutepunkt av Carling [32].

Knutepunkt

Arbeidet fra Carling [32] sammenfaller med arbeid fra Peng, L., et al. [33]. Begge artiklene presenterer utnyttelsesgrad, tykkelse på bygningsdelene og spiker-, dybel-, skruediameter som de viktigste faktorene ved bestemmelse av kapasitet for knutepunkt ved brann. Konklusjonen er at modellene for beregning av knutepunkt i Eurokode 5 stemmer godt overens med de eksperimentelle data som er å finne på tre-til-tre og tre-stål knutepunkt. Eneste svakhet presentert ved beregning i henhold til Eurokode 5 – del 2, er lite konservativt resultat om bygningsdelene i knutepunktet blir tynne. Dette er vist i Figur 21.

Fullskala brannforløp

Det er også sett på to fullskala forsøk med naturlig brannforløp, et forsøk av Frangi, et al. i 2008 [34], og et forsøk av Hakkarainen i 2002 [35]. I begge forsøkene er det benyttet massivtrekonstruksjoner. Spesielt resultatene fra Hakkarainen var interessante da forsøkene viste at de sekundære konstruksjonene bidrar til brannforløpet, og en kan ikke nødvendigvis forutsette at brannen slokkes etter at inventaret er utbrent. I tillegg viser resultatene en lavere temperatur ved ubeskyttet trekonstruksjoner grunnet at produksjon og oppvarming av pyrolysegasser krever mye energi. Forsøkene fra Frangi ble sløkket av brannmannskaper etter 60 minutter, og hadde som hovedformål å vise branncellebegrensende bygningsdeler fungerte som tiltenkt. En annen viktig observasjon ved begge eksperimentene er at det er store mengder pyrolysegasser i branncellen, som gjør at mye av forbrenningene skjer utenfor branncellen. Store mengder flammer ble observert ut igjennom vinduet. Dette kan skape en økt spredningsfare for trekonstruksjoner sammenlignet med ubrennbare konstruksjoner, så fokus på kjølesone over vindu eller andre tiltak mot spredning i fasaden anbefales.

Erfaringer fra bygging i tre

SP trä, (SP wood technology) presenterte i 2010 artikkelen «Multi storey wood houses in Sweden – Technical data» et erfaringsgrunnlag fra bygging av fleretasjes trekonstruksjoner i Sverige. Største prosjektet registret i artikkelen er 8 etasjes boligblokker i Växjö. Kort oppsummert viser erfaringsgrunnlaget til mange positive effekter ved bygging av trekonstruksjoner. Deriblant lavere kostnad ved fundamentering, muligheter for oppføring av trekonstruksjon ved vinter, lavere kostnad ved kran, positive miljøeffekter ved riving og klimanøytral produksjon ved bygging. Som negative effekter nevnes: vanskeligheter ved brannsikkerhet - hvor lokal myndighet blir avgjørende for endelig godkjenning, krevende lydtetting og dels vanskelig prefabrikering av enkelte installasjoner i bygningsdelene. Effektene sees i sammenheng med andre bygningsmaterialer.

4. Gjennomgang av fravik

I dette kapitlet er det gjennomført en vurdering av aktuelle fravik som oppstår ved prosjektering av fleretasjes trekonstruksjoner. Dette er gjort for å få oversikt over hvilke områder som er spesielt krevende ved den branntekniske prosjekteringen av fleretasjes trehus. De etterfølgende kapitler tar så for seg alle bemerkede fravik suksessivt.

Tabellene er for øvrig splittet opp tilsvarende oppbygningen i teknisk forskrift med veiledning, hvor gjennomgangen av kapittel (§) er i samsvar med gjennomgangen av krav i oppgaven.

§11-1. Sikkerhet ved brann

Kravspesifikasjon med løsning		Kommentar
Brannenergi og ev. spesiell risiko		Fravik 1 - Vanskeligheter ved bestemmelse av konstruksjonens bidrag til brannenergi

§11-3. Brannklasser

Kravspesifikasjon med løsning		Kommentar
Brannklasse	BKL 3	Det er i oppgaven valgt å fokusere på brannklasse 3. Dette er kun opplysning og intet fravik.

§11-4. Bæreevne og stabilitet

Kravspesifikasjon med løsning		Kommentar
Brannmotstand bærende hovedkonstruksjon	Krav: R90, A2-s1,d0	Fravik 2 - Kravet til ubrennbar hovedbærekonstruksjon er ikke gjennomførbart ved massivtre/ limtre.
	Oppfyller: R90, D-s2,d0	
Brannmotstand på sekundært bæresystem, tak og etasjeskillere	Krav: R60, A2-s1,d0	Fravik 3 - Kravet til ubrennbar sekundære konstruksjoner er ikke gjennomførbart ved massivtre/ limtre.
	Oppfyller: R60, D-s2,d0	
Trappeløp, innvendig	Krav: R30, A2-s1,d0	Fravik 3 – Trappeløpet skal bygges i ubrennbare materialer. Dette kan ikke gjennomføres ved bruk av trekonstruksjon. Fraviket for trappeløp vurderes til å være tilsvarende den for sekundære konstruksjoner.
	Oppfyller: R30, D-s2,d0	

§11-9. Materialers og produkters egenskaper ved brann

Kravspesifikasjon med løsning	Kommentar
Overflater og kledninger	Fravik 4 – Overflater i bygget må vurderes, hvis det velges ubehandlede trekonstruksjoner.

I de etterfølgende kapitler av oppgaven beskrives og analyseres de fravik som er bemerket. For hvert fravik er også metoder for dokumentasjonen av oppfylt krav gjennomgått. Oppsummeringen over hvordan best gå fram for å dokumentere god brannsikkerhet i fleretasjes byggverk av tre er gjennomgått i diskusjonskapitlet.

5. Fravik 1 – Brannenergi

Brannenergi [MJ] er et mål på den varmemengden som frigis ved forbrenning av alle brennbare materialer i et område. Spesifikk brannenergi [MJ/m^2] er brannenergi fordelt på et areal. Dette arealet kan enten være totale omhyllingsflaten (q_t) eller golvflaten (q_f). Byggteknisk forskrift benytter spesifikk brannenergi for omhyllingsflaten, mens eurokoden benytter spesifikk brannenergi for golvflaten. Brannenergien benyttes til å vurdere størrelse av brannseksjoner og brannmotstand for bygningsdeler og er slikt sett en viktig forutsetning for brannkonseptet. Spesifikk brannenergi benyttet i denne oppgaven er relatert til totalt areal, altså q_t , tilsvarende de verdiene benyttet i forskriften.

5.1. Beskrivelse av fravik

Beskrivelse for beregning av brannenergi er inkludert i oppgaven fordi det er en viktig forutsetning og inputparameter for videre arbeid med brannsikkerhetsstrategi. I tillegg kan være vanskelig å bestemme den totale brannenergien for en trekonstruksjon, da bidraget fra konstruksjonsdelene må inkluderes i den spesifikke brannenergiberegningen. Som det står beskrevet i innledningen av Kapittel 11 – Sikkerhet ved brann i veiledningen til byggteknisk forskrift:

«... forutsetningene for den branntekniske prosjekteringen må bestemmes og beskrives... Forutsetningene omfatter blant annet: brannenergi og ev. spesiell risiko»

Det står også i kapittel § 2.1 Verifikasjon av ytelser følgende:

«Både valg av metode, inngangsparametre og akseptkriterier er avgjørende for resultatet. Valg av prosjekteringsforutsetninger og akseptkriterier skal fastlegges ut fra normative verdier, enten de er standardiserte eller andre vel forankrede verdier...»

Dimensjonerende brannenergi benyttes som vurderingsgrunnlag i flere branntekniske konseptuelle vurderinger, så vel som de mer detaljerte analysene. Derfor er det viktig å ende opp med en konservativ, men sannsynlig verdi. Brannenergien bør beregnes eller bestemmes på grunnlag av anerkjent statistikk – og da gjerne i samsvar med Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann [36]. Dette anbefaler for øvrig også SINTEF Byggforsk i sin anvisning om brannenergi i bygninger [37].

De delene som vurderes som spesielt krevende for trekonstruksjoner og som kan oppfattes som problematisk ved beregning av dimensjonerende spesifikk brannenergi er:

1. Hvordan inkluderes/dimensjoneres den spesifikke brannbelastningen for trekonstruksjoner?

2. Hvorfor benyttes det i veiledningen til byggt teknisk forskrift en konservativ sikkerhetsfaktor ved vurdering av spesifikk brannenergi? Er faktoren gjeldende ved bruk av tillegg E i Eurokode 1 – Del 2. Brannteknisk prosjektering:

«For konstruksjonsdeler som etter tabell 1 skal ha brannmotstand R 90 eller høyere, må det brukes en dimensjonerende brannenergi som er karakteristisk brannenergi multiplisert med faktoren 1,5. Faktoren på 1,5 samsvarer med overgangen fra brannmotstand R 60 til R 90 ved bruk av preaksepterte ytelser.»

5.2. Metoder for dokumentasjon av brannenergi

Det refereres direkte til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann i forskriften. Dette kapitlet viser derfor hvordan beregne brannenergi for trekonstruksjoner slik det er beskrevet i Eurokoden (punkt 1.). Tolkning av uklarheten i forskriften er diskutert på slutten av kapitlet (punkt 2.).

Slik det står i Eurokode 1 – del 2:

«Brannenergien bør omfatte alt brennbart innhold i bygningen (mobil brannenergi) og de aktuelle brennbare delene av konstruksjoner, inklusive kledninger og innredninger. Det er ikke nødvendig å ta hensyn til brennbare deler som ikke forkulles under brannen.»

Konstruksjonen skal inkluderes i brannenergi-vurderingen. Dette gjelder kun de delene som forventes å forkulle. For å kunne beregne forkullingsdybde, og derav brannenergi må en ha kunnskap om brannforløpet. Metodene som er valgt til å beregne forkullingsdybden er hentet fra Eurokode 1 – Del 2: Laster på konstruksjoner ved brann og Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner. Brannenergiberegningen bør deles opp i:

1. Brannenergi fra inventar gitt av bruken i bygningen (mobil brannenergi)
2. Brannenergi fra bygningen + spesielle forhold (immobil brannenergi)

Mobil brannenergi, som er brannenergi fra inventar etter bruken av bygningen, skal baseres på statistikk om brannenergi for bruksområde for bygningen og er gitt av forventet normal innredning. For trekonstruksjoner vil immobil brannenergi, som er beskrevet som brannenergi fra bygningsdeler og spesiell innredning, være gitt av forkullingsdybden for de brennbare bygningsdelene. Den totale spesifikke brannenergien fordelt på gulvarealet ($q_{f,d}$) kan uttrykkes som:

$$q_{t,d} = q_{t,d,mobil} + q_{t,d,immobil}$$

Her er $q_{t,d,mobil}$ brannenergi fra inventar gitt av bruken av bygningen (mobil dimensjonerende brannenergi) og $q_{t,d,immobil}$ brannenergi fra bygningen (immobil brannenergi)

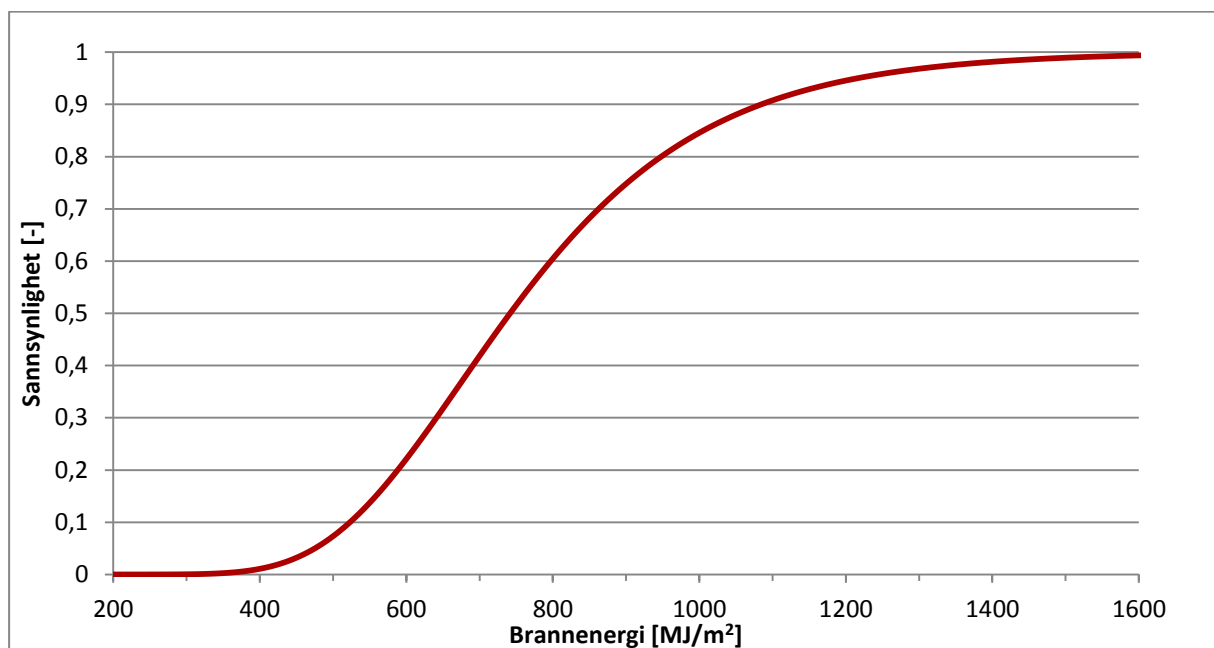
Mobil spesifikk brannenergi – $q_{f,mobil}$

Verdier for forventet karakteristisk spesifikk brannenergi for gulvareal basert på bruken av bygningen kan hentes fra Eurokode 1 - Tabell E.4. Disse verdiene er gjengitt i Tabell 8. Disse verdiene er erfaringsdata.

Tabell 8: Spesifikk brannenergi $q_{f,k}$ [MJ/m^2] for forskjellig bruk av bygningen

Bruk	Gjennomsnitt	80 % - fraktil
Bolig	780	948
Sykehus	230	280
Hotell (rom)	310	377
Bibliotek	1500	1824
Kontor	420	511
Klasserom i skole	285	347
Handlesenter	600	730
Teater (kino)	300	365
Transport (offentlig område)	100	122

Tabellen viser at spesifikk brannenergi for ulike bruk av bygningen følger en Gumbel-sannsynlighetsfordeling. Eksempel på hvordan fordelingen ser ut for bruksområde bolig, er vist i Figur 7. Kurven er indirekte angitt ved å angi to punkter i tabellen.



Figur 7: Kumulativ Gumbel sannsynlighetsfordeling for spesifikk karakteristisk brannenergi for bolig

Det sikkerhetsnivået Eurokode 1 – del 2. anbefaler for mobil brannenergi er gitt ved 80 % fraktil. Dette tilsvarer verdien hvor en 80 % av tilfellene ikke forventer overskridelse. For bolig er denne verdien lik 948 MJ/m².

Beregningsmetoden for dimensjonerende mobil brannenergi $q_{f,d}$ i henhold til Eurokode 1 - Del 2: Laster på konstruksjoner ved brann ser slik ut:

$$q_{f,d,mobil} = q_{f,k} \times \delta_{q1} \times \delta_{q2} \times \delta_n \times m$$

Hvor da $q_{f,k}$ er gitt ved 80 - % fraktil av brannenergien basert på en Gumbel-fordeling (sannsynlighetsfordeling) for forskjellig bruk av bygningen. De resterende faktorene tar høyde for ulike egenskaper ved brannen basert på størrelse, typen bruk og materialer. Disse er beskrevet som:

- Forbrenningsegenskaper ved (m). Faktoren tar hensyn til forbrenningsegenskapene til de materialene som er i bygningen. Den sier noe om effektiviteten til forbrenningen og en fullstendig forbrenning har verdi lik $m = 1,0$. Om materialene hovedsakelig består av cellulose kan forbrenningsfaktoren forventes å være lik $m = 0,8$.
- Brannaktiveringsrisiko ved (δ_{q1} og δ_{q2}). Faktorene tar hensyn til sannsynligheten for antennelse med tanke på branncellens gulvareal og aktivitet i bygningen.
- Brannbekjempelsestiltak ved (δ_n). Faktorene tar hensyn til ulike tiltak som skal bekjempe brannen, eksempelvis vannslokkeanlegg eller brannalarmanlegg. Det er angitt i det norske tillegget at samtlige faktorer skal være lik 1,0, men at en ved prosjektert sprinkleranlegg kan, ved særskilt vurdering av brannrådgiver, benytte verdier ned til 0,6.

Det blir senere i oppgaven diskutert at δ_n lik 0,6 kan være en tilfredsstillende verdi. Årsaken er at den verdien reduserer brannenergien på bakgrunn av sprinkler som både konsekvensreducerende og sannsynlighetsreducerende tiltak for brannforløpet. Det er i beregningen ikke tillat å vurdere effekten av automatisk slokkeanlegg på noen annen måte.

Immobil brannenergi – $q_{f,immobil}$

Trekonstruksjonens potensielle bidrag til brannenergien må inkluderes, da dette ikke omfattes av verdiene angitt i Tabell 8. Denne immobile brannenergi fra bygningsdelene bør baseres på forventet forkullet dybde og andel eksponert treverk. Det finnes flere metoder for å finne totalt forkullingsdybde i Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk dimensjonering av trekonstruksjoner. Den ene er forenklet metode, og den andre er forkullingsrate ved parametrisk brannforløp.

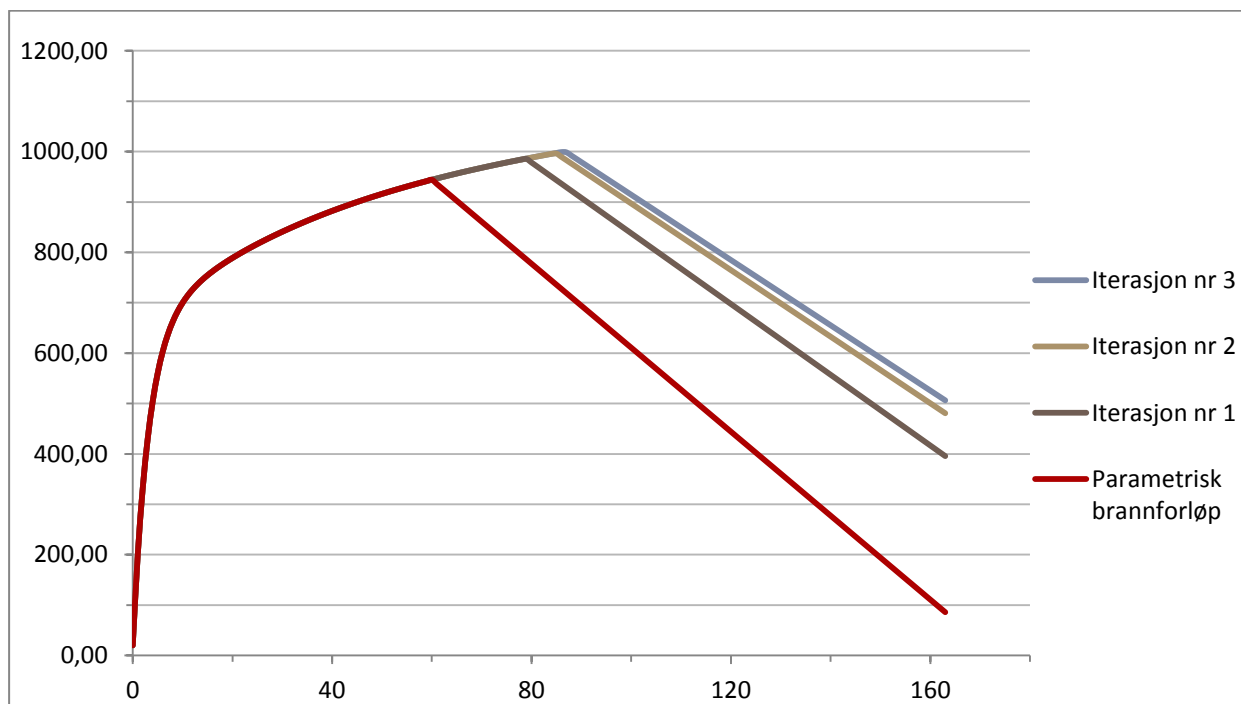
For forkullingsrate ved parametrisk brannforløp oppstår dilemmaet når en trenger brannenergi for å bestemme forventet branneksponeeringstid og forventet branneksponeeringstid for å bestemme brannenergi. Skulle en modellert dette med parametrisk brannpåvirkning kunne en iterativ prosess blitt forutsatt. Beregningsmetode:

1. Bestem brannenergi_{initial} gitt av Tabell 8
2. Kalkuler forkullingsdybde [mm] fra Eurokode 5 – del 2 – tillegg A, med brannenergi_{initial} og regn om denne forkullingsdybden til spesifikk brannenergi fra trekonstruksjoner [MJ/m^2].
3. Finn så ny brannenergi ved: $\text{brannenergi}_{\text{ny1}} = \text{brannenergi}_{\text{initial}} + \text{bidrag fra trekonstruksjon}$

Deretter begynner iterasjonene:

2. Kalkuler forkullingsdybde [mm] fra Eurokode 5 – del 2 – tillegg A, med brannenergi_{ny1} og regn om denne forkullingsdybden til spesifikk brannenergi fra trekonstruksjoner [MJ/m^2].
3. Finn ny brannenergi ved: $\text{brannenergi}_{\text{ny2}} = \text{brannenergi}_{\text{initial}} + \text{bidrag fra trekonstruksjon}$

Iterasjonene kan så gjøres til ønsket nøyaktighet er oppnådd. Som en ser i Figur 8 utgjør iterasjonene mindre og mindre for endelig resultat. Casebeskrivelse og hvilke forutsetninger som er lagt til grunn for figuren er angitt i tillegget.



Figur 8: Parametriske brann med iterasjoner for brannenergi

Denne iterative metoden er vanskelig å benytte tidlig i dimensjoneringsprosessen da det kreves kunnskap om åpningsfaktor og omhyllende bygningsdelers egenskaper. Dette er forutsetninger som normalt sett er vanskelig å bestemme korrekt i konseptfasen. Den kan derimot ved detaljprosjekteringen blir benyttet. Det viser seg også at for et fullstendig rom, vil ikke nødvendigvis forkullingsdybden konvergere.

Det finnes også en forenklet, men konservativ metode for å bestemme bidraget fra konstruksjonen. Metoden er å benytte beregningsmessig ekvivalent branneksponeeringstid og en forenklet antagelse av forkullingsrate til å estimere forkullingsdybde og derav brannenergi. Forkullingsraten hentes fra Eurokode 5- del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner. Verdiene er gjengitt i Tabell 9.

Det er viktig å presisere at det primært benyttes gran i massivtre/limtreproduksjon. Gran er et mykt trevirke med karakteristisk densitet rundt 500 kg/m^3 .

Tabell 9: Design forkullingsrate for trevirke - Gjengitt fra [26]

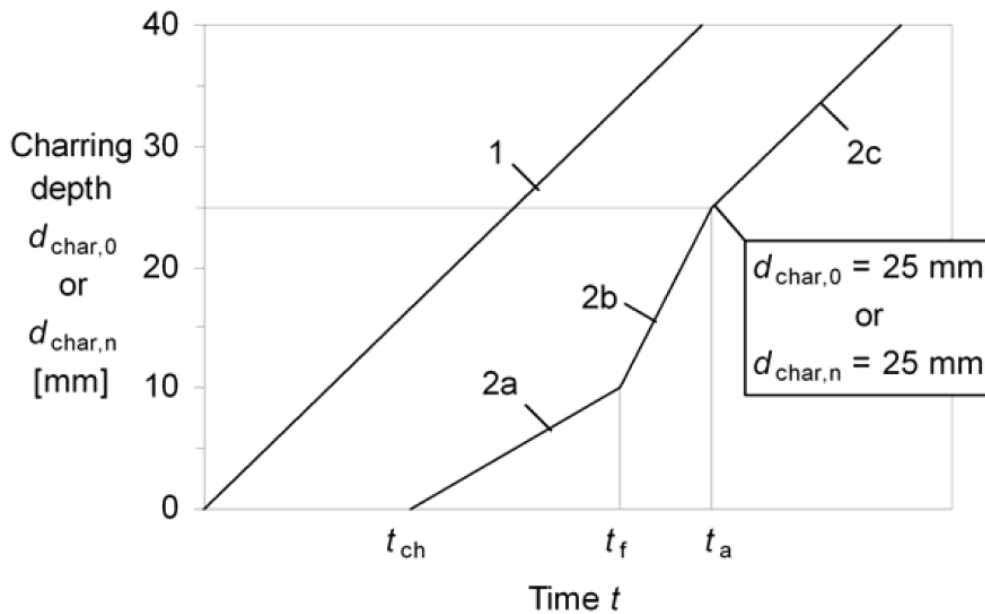
	β_0 - [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	β_n - [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]
Mykt trevirke og bøkeved		
Limtre med en karakteristisk densitet på $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Heltre med karakteristisk densitet på $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
Trevirke med høy densitet		
Heltre, limtre eller massivtre med karakteristisk densitet på 290 kg/m^3	0,65	0,7
Heltre, limtre eller massivtre med karakteristisk densitet på $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
LVL (Laminated veneer lumber)		
Med karakteristisk densitet av $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Kledning		
Trepanel	0,9	-
Kryssfiner	1,0	-
Trebaserte produkter som ikke er kryssfiner	0,9	-

Beregningsmetode for forenklet beregning av brannenergibidrag fra trekonstruksjonen:

1. Bestem dimensjonerende brannmotstand. Eksempelvis betyr R90 at konstruksjonen forventes å oppleve 90 minutter med standard brannforløp.
2. Gjør en vurdering om branneksponeeringstiden er ensidig, tosidig eller tresidig, og velg β_n eller β_0
3. Anslå forkullingsrate i henhold til Tabell 9. Dette gir forkullingsdybde og derav total brannenergi fra bygningsdelene. Benytt at netto brennverdi for trevirke er $17,5 \text{ MJ/kg}$ [26].

Det er ikke enkelt å anbefale en metode som fungerer i alle tilfelle. Ved fraviksanalyse for trekonstruksjoner i brannklasse 3 anbefales definitivt forkullingsrate ved parametrisk brannforløp. Årsaken til dette er kravet om bæring ved fullstendig brannforløp. Da må også forkullingsdybden fra fullstendig brannforløp inkluderes. For byggverk i lavere brannklasser vil forenklet beregning av forkullingsdybde være tilstrekkelig.

Om konstruksjonen er beskyttet med eksempelvis et lag med gips, anbefales en tilnærming til problemet lik den i Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner:



Figur 9: Forkulling ved beskyttet trevirke – hentet fra Eurokode 5 – del 2 [26]

Her er linje 1 en ubeskyttet trekonstruksjon og linje 2 trekonstruksjon beskyttet, med eksempelvis ett lag gips. Det som er viktig å legge merke til er t_{ch} , tiden som til forkullingsoppstart er forsinket. Beregningen for t_{ch} kan vurderes med bakgrunn i Eurokode 5 – del 2: Brann teknisk prosjektering av trekonstruksjoner, eller en kan benytte erfaringsgrunnlaget fra Brandsikre trehus [25].

Kommentar til sikkerhetsfaktor fra veiledning til byggt teknisk forskrift

Forskriften angir at bygningsdeler som preakseptert krever 90 minutter bæreevne og stabilitet eller høyere, skal ha dimensjonerende brannenergi lik karakteristisk brannenergi ganger 1,5. Problemet med angivelsen av en sikkerhetsfaktor i veiledningen til forskriften er at verdien av faktoren ikke er beskrevet i detalj. Det finnes ingen forklaring hvorfor eller hva denne faktoren tar høyde for. Det kan være at sikkerhetsfaktorer fra Eurokoden er i direkte uoverensstemmelse med sikkerhetsfaktoren fra veiledningen til forskriften. Det er uklart om sikkerhetsfaktoren kun benyttes ved analyse av de bygningsdeler som har R90 krav, eller om den må benyttes for samtlige analyser for ett bygg som har en enkelt bygningsdel med R90 krav.

Det kan tenkes at bakgrunnen for denne faktoren på 1,5 er tilknyttet den gamle forenklede dimensjoneringsmetoden fra NS 3478 for branntid [38]. Metoden er basert på en lineær sammenheng mellom dimensjonerende brannenergi og nødvendig brannmotstandstid for bygningsdelen. Ligningen ser slik ut:

$$t_{rd,fi} = 0,3 * q$$

Her er $t_{rd,fi}$ brannmotstandstiden målt i [*min*] og q spesifikk brannlast målt i [MJ/m^2], fordelt på omhyllingsflaten. Metoden viser at brannmotstanden forenklet kun er avhengig av hvilken verdi brannenergien har og ved sprinkling av et byggverk kan en ifølge det nasjonale tillegget i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann redusere brannenergien med en faktor på 0,6. Ved å benytte sprinkling kan altså kravet til bæring ved brann reduseres fra R90 til R60. Av sikkerhetsmessige årsaker ønsker en å unngå en slik tolkning, og faktoren 1,5 har blitt innlemmet inn i forskriften. Den totale endringen i brannenergi er da kun 0,9.

Det må presiseres at metoden fra NS 3478 ikke er gyldig som dokumentasjonsformål, da standarden er utgått og erstattet av Eurokode. Det finnes allikevel eksempler på at direkte korrelasjonen mellom brannenergi og brannmotstand benyttes til å forsvare en lavere brannmotstandstid enn kravsnivå i nyere prosjekter om fleretasjes trekonstruksjoner. Dette kan vanskelig sies å være i henhold til forskriften og de beregningsmodeller som er tilgjengelig i dag.

En annen årsak til at angivelsen av en slik sikkerhetsfaktor er upresis er at brannenergien benyttes ikke til å vurdere bæreevnen til en bygningsdel med mindre det blir nødvendig å gjennomføre kvantitative analyse på grunn av fravik. Et slikt fravik oppstår normalt kun om det benyttes brennbare materialer i bærende hovedsystem eller i sekundære bygningsdeler – altså kun ved bygging av trekonstruksjoner i brannklasse 3. Faktoren er slik sett materialspesifikk og brannklasse spesifikk.

Det er ikke klokt av forskriften å angi at dimensjonerende brannenergi er lik 1,5 ganger karakteristisk brannenergi, når forskriften i tillegg henviser til beregning av brannenergi i henhold til Eurokoden. En bør ikke velge sikkerhetsfaktorer fra ulike steder (forskrift og eurokode) og kombinere, spesielt ikke når forskriften ikke forteller hva sikkerhetsfaktoren tar høyde for.

På grunnlag av uklarheten i forskriften forslås følgende tolkning. Enten:

1. Eurokoden skal kun benyttes til å finne karakteristisk brannenergi ($q_{f,k}$). Regneregler som vist i «Mobil spesifikk brannenergi» med sikkerhetsfaktorene m , δ_{q1} , δ_{q2} og δ_n skal ikke benyttes. Det betyr også at sprinkling ikke kan benyttes til beregningsmessig å påvirke brannenergien med faktoren $\delta_n = 0,6$. Den eneste sammenhengen som bør benyttes er:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot 1,5$$

Hvor da $q_{f,k}$ er gitt ved 80 % fraktil i Tabell 8.

Eller:

2. Eurokoden skal benyttes til det fulle i henhold til beskrevet metode i kapitlet «Mobil spesifikk brannenergi». Faktoren 1,5 forkastes og en benytter sikkerhetsfaktorene fra Eurokoden. Disse er m , δ_{q1} , δ_{q2} og δ_n . Faktoren for sprinkling $\delta_n = 0,6$ kan benyttes

5.3. Eksempelcase for beregning av brannenergi.

Her er det valgt å forkaste faktoren på 1,5 fra veiledning til teknisk forskrift, og kun benytte de sikkerhetsfaktorene som Eurokoden presenterer. Det er altså i henhold til tolkning 2 ved beregning av spesifikk brannenergi, i kapitlet over.

Figur 10 viser en typisk studentbolig hvor vegger, tak og gulv er alle av massivtre. Rommet er 20 m². Og har innvendig mål lik 4x5x2,4 [m]. Åpningsfaktoren settes lik 0,04 og brannenergien bestemmes med bakgrunn i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Rommet er en del av et høyhus i massivtre, brannklasse 3.



Figur 10: Modell til beregning av brannenergi

Beregning av gulvflate:

$$A_f = 4 \cdot 5 = 20 \text{ m}^2$$

Beregning av omhyllende areal:

$$A_t = A_f \cdot 2 + A_{vegg1} \cdot 2 + A_{vegg2} \cdot 2$$

$$A_t = 20 \cdot 2 + 4 \cdot 2,4 \cdot 2 + 5 \cdot 2,4 \cdot 2 = 83,2 \text{ m}^2$$

Her antas det at branncellens høyde er 2,4m.

Beregning av spesifikk mobil brannenergi $q_{t,d,mobil}$:

Henter verdier på karakteristisk brannenergi bolig fra Tabell 8. Denne er lik $q_{f,k,mobil} = 948 \text{ MJ/m}^2$

Omregnet til totalt overflate areal tilsvarer dette:

$$q_{t,d,mobil} = q_{t,k,mobil} \cdot \frac{A_f}{A_t}$$

$$q_{t,k,mobil} = 948 \cdot \frac{20}{83,2} = \mathbf{228 \text{ MJ/m}^2}$$

Spesifikk dimensjonerende mobil brannenergi

$$q_{t,d,mobil} = q_{t,k,mobil} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

$$q_{t,d,mobil} = 228 \cdot 0,8 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = \mathbf{200 \text{ MJ/m}^2}$$

Valgt forbrenningsfaktor m lik 0,8. Brannaktiveringsrisiko δ_{q1} for 20 m^2 er lik 1,1 og brannaktiveringsfare ved bolig δ_{q2} lik 1,0. Alt i henhold til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Effekten av sprinkling er ikke inkludert, $\delta_n = 1,0$.

Beregning av spesifikk immobil brannenergi $q_{t,d,immobil}$:

En konservativ metode for å bestemme økningen av brannbelastningen er å se på forventet forkullingsdybde. Hvis en benytter den største gyldige verdien innenfor beregningsmodellen fra kapittel 6.3, som er 88 mm. Det antas konservativt at samtlige vegger og tak alle forkuller.

Den karakteristiske brannenergien beregnes etter følgende:

$$q_{t,k,immobil} = H_u \cdot M_{k,i,t} \cdot \Psi_i$$

Hvor H_u er netto brennverdi [MJ/kg], $M_{k,i,t}$ er mengden netto brennbart materiale fordelt på total omhyllingsflate [kg/m^2], Ψ_i er en valgfri faktor for vurdering av beskyttet brannenergi og m er forbrenningsfaktor som tar hensyn til den ufullstendige forbrenningen. Ettersom beregningen tar hensyn til gips gjennom påvirkning på parametrisk forkullingsforløp fremfor å benytte reduksjonsfaktoren Ψ , settes denne lik 1.

H_u er valgt til 14,3 [MJ/kg] på bakgrunn av følgende beregning med fuktinnhold (u) lik 16 %:

$$H_u = H_{u0}(1 - 0,01 \cdot u) - 0,025 \cdot u = 17,5(1 - 0,01 \cdot 16) - 0,025 \cdot 16 = 14,3$$

H_{u0} er valgt til 17,5 på bakgrunn av verdi oppgitt i Eurokode 1 – del 2. Laster på konstruksjoner ved brann. $M_{k,i,t}$ er beregnet til 44 kg/m^2 ved:

$$M_{k,i,t} = d_{char} \cdot \rho = 0,088 \text{ m} \cdot 500 \text{ kg/m}^3 = 44 \text{ kg/m}^2$$

Hvor d_{char} er forkullingsdybden lik 88 mm og ρ er densiteten til massivtreet. Det kan forventes at en godt valgt verdi for densiteten til massivtre/limtre kan være 500 kg/m^3 . Denne verdien er funnet ved gjennomgang av datablad fra leverandører av massivtre/limtre [23, 24].

Fullstendig uten beskyttelse av brannenergien tilsvarer dette en økning i spesifikk karakteristisk brannenergi fordelt på omhyllingsareal lik:

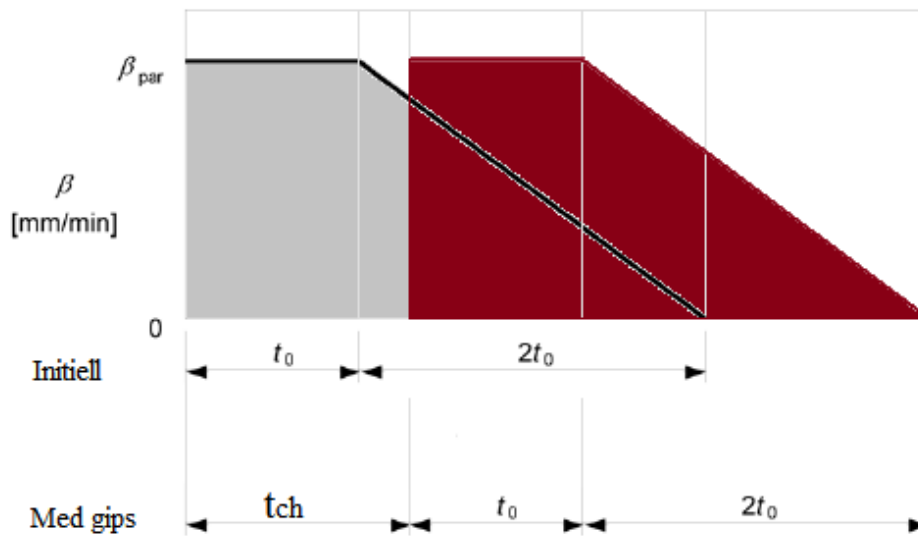
$$q_{t,k,immobil} = 14,3 \cdot 44 = \mathbf{629,2 \text{ MJ/m}^2}$$

Spesifikk dimensjonerende immobil brannenergi

$$\begin{aligned} q_{t,d,immobil} &= q_{t,k,immobil} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \\ q_{t,d,immobil} &= 629,2 \cdot 0,8 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = \mathbf{554 \text{ MJ/m}^2} \end{aligned}$$

Dette er en mye høyere verdi enn en vil kunne forvente om en kler inn byggverket med tolags gipsplater som gjennomført i masteroppgaven til Herman Knoop [39]. Det må presiseres at beskyttelsesfaktoren på $\Psi = 0,2$ som i masteroppgaven til Knoop er lav og benyttet uten nærmere presisering. Hvis en velger å beskytte brannenergien med to lag gips, kan en velge å anta to typer forkullingsforløp:

Tolkning 1: Forkullingsforløpet forskyves (fra grått til rødt areal) og gir derfor samme brannenergi:



Figur 11: Effekt av gips - forskjøvet forkullingsforløp

Tolkning 2: Forkullingsforløpet hvor gipsen beskytter (grått areal) fjernes:



Figur 12: Effekt av gips - fjerner forkullingsforløp

Tolkning 2 virker i utgangspunktet mest fornuftig da gips har en effekt på total forkullingsdybde. Om en velger tolkning 1 utgjør gips ingen beregningsmessig effekt fordi forkullingsdybden blir den samme om det benyttes gips eller ikke. Hvis en velger å følge tolkning 2 gir dette følgende beregning:

Må bestemme enkelte faktorer for forkullingsforløpet ved parametrisert brannforløp først:

$$\Gamma = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2} = \frac{(0,04/500)^2}{(0,04/1160)^2} = 5,4$$

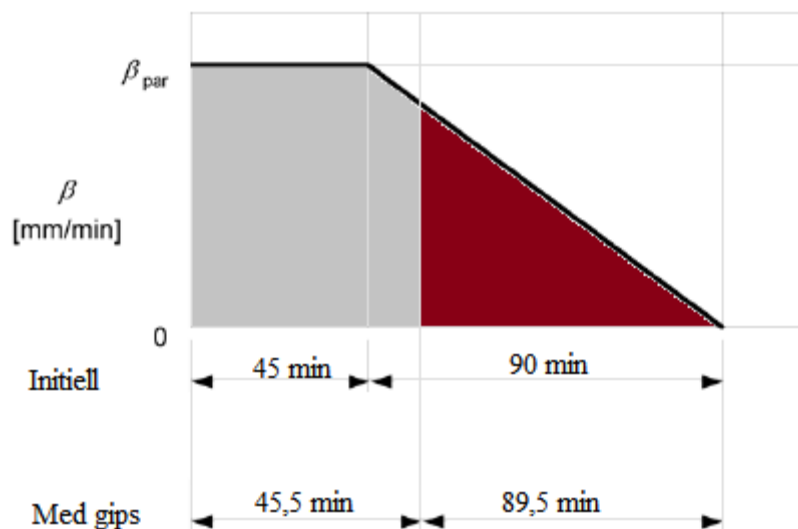
$$t_0 = 0,009 \cdot \frac{q}{O} = 0,009 \cdot \frac{200}{0,04} = 45 \text{ [min]}$$

Så vidt utenfor gyldighetsområde ($t_0 \leq 40$), men fortsetter på grunn av ønske om resultat.

$$\beta_{par} = 1,5 \cdot \beta_n \cdot \frac{0,2 \cdot \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \cdot \sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 \cdot 0,70 \cdot \frac{0,2\sqrt{5,4} - 0,04}{0,16\sqrt{5,4} + 0,08} = 0,99 \text{ [mm/min]}$$

To lag gips, hvor et lag er Gips type F og det andre laget er Gips type A, gir $t_{ch} \approx 45,5 \text{ min}$ [39]. Dette er hentet fra Tabell 7.

Da ser modellen for forkullingsforløpet omtrent slik ut:



Figur 13: Forkullingsforløp for case

Ved geometrisk vurdering er forkullingsdybden (rødt areal) lik:

$$d_{char} = \left(\frac{\beta_{par}}{2t_0} \right) \cdot (3t_0 - t_{char}) \cdot \left(\frac{3t_0 - t_{char}}{2} \right) = \left(\frac{0,99}{2 \cdot 45} \right) \cdot (3 \cdot 45 - 45,5) \cdot \left(\frac{3 \cdot 45 - 45,5}{2} \right)$$

$$d_{char} = 44 \text{ mm}$$

Dette tilsvarer følgende karakteristisk immobil brannenergi:

$$q_{t,k,immobil} = 14,3 \cdot 0,044 \cdot 500 = 315 \text{ MJ/m}^2$$

Spesifikk dimensjonerende immobil brannenergi, ved beskyttelse med gips:

$$q_{t,d,immobil} = q_{t,k,immobil} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n$$

$$q_{t,d,immobil} = 315 \cdot 0,8 \cdot 1,1 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 277 \text{ MJ/m}^2$$

Beregning av total spesifikk brannenergi $q_{d,total}$:

$$q_{t,d} = q_{t,d,mobil} + q_{t,d,immobil}$$

Resultat uten gips

$$q_{t,d} = 200 + 554$$

$$q_{t,d} = 754 \text{ MJ/m}^2$$

Resultat med sprinkling:

$$q_{t,d} = (200 + 544) \cdot 0,6$$

$$q_{t,d} = 452,4 \text{ MJ/m}^2$$

Resultat med gips

$$q_{t,d} = 200 + 277$$

$$q_{t,d} = 477 \text{ MJ/m}^2$$

Resultat med sprinkling og gips ($\delta_n = 0,6$)

$$q_{t,d} = (200 + 277) \cdot 0,6$$

$$q_{t,d} = 286 \text{ MJ/m}^2$$

Uten sikkerhetstiltak vil en ha 750 MJ/m². Med så høy energimengde i et enkelt rom, vil en kunne måtte velge å plassere bygget i brannklasse 4. I henhold til veiledningen til brannteknisk forskrift:

«Byggverk hvor konsekvensen ved brann kan bli særlig stor for liv og helse, miljøet eller samfunnet generelt, skal plasseres i brannklasse 4... Eksempler på slike byggverk kan være... byggverk med spesifikk brannenergi over 400 MJ/m² ...»

Kravet for brannklasse 4 er en fullstendig analyse av alle aspekter ved brannsikkerheten. Analysene gjennomføres i henhold til valgte akseptkriterier. Det blir opp til brannrådgiver å bestemme disse kriteriene og dette anses for å være en krevende jobb. Det kan tenkes at en komplett analyse er en bedre tilnærming enn fraviksanalyse på samtlige fravik ved oppføring av trekonstruksjoner, men ansvaret for brannsikkerhet og valg av sikkerhetsnivå ligger normalt hos myndighetene, mens ansvaret i brannklasse 4 ligger hos brannrådgiver.

Med gips er resultatet 480 MJ/m², og med sprinkling er resultatet 450 MJ/m² også dette gir grunnlag for å plassere bygget i brannklasse 4. Med både gips og sprinkling derimot er resultatet kun 286 MJ/m², dette betyr at brannklasse 3, som i utgangspunktet var forutsatt, kan beholdes.

6. Fravik 2 – Hovedbæresystem

Det er først og fremst branntekniske rådgivere som benytter de to begrepene hovedbæresystem og sekundært bæresystem. Årsaken til begrepsavklaringen er knyttet til hvilken funksjon bygningsdelen skal utfylle ved et eventuelt brannscenario og sammenbrudd. Hovedbæresystem er definert som konstruksjonsdeler som sikrer stabilitet og bæreevne til hele byggverket. Svikt i bærende hovedsystem betyr at byggverket helt, eller i stor grad, kollapser.

Målet med analysen av fraviket er å belyse hvilken konsekvens bruken av brennbart materiale i bærende hovedsystem har. Det er også arbeidet med å oppnå samme sikkerhetsnivå på trekonstruksjoner kontra ubrennbar konstruksjon. Ulike tiltak som kan settes i verk for å oppnå samme sikkerhetsnivå er også inkludert og for øvrig gjennomgått i kapittel 9. Kompenserende tiltak.

6.1. Beskrivelse av fravik

Det beskrives i veiledningen til teknisk forskrift (§ 11-4) at følgende bygningsdeler må oppføres i brannpåvirkningsklasse A2-s1,d0 (se Tabell 10): Bærende hovedsystem, sekundære bærende bygningsdeler, trappeløp, bærende bygningsdeler under øverste kjeller og utvendig trappeløp. Da treverk kun oppnår D-s2,d0, vil det ved bygging av trekonstruksjoner i brannklasse 3 oppstå mange fravik fra veiledningen til byggeteknisk forskrift. Bruken av brennbart materiale i sekundære konstruksjoner er gjennomgått i neste kapittel.

Tabell 10: Bærende bygningsdeler brannmotstand avhengig av brannklasse, hentet fra [8]

Bygningsdel	Brannklasse		
	1	2	3
Bærende hovedsystem	R30	R60	R90, A2-s1,d0
Sekundære konstruksjoner	R30	R60	R60, A2-s1,d0
Trappeløp	-	R30	R30, A2-s1,d0
Bærende bygningsdel under øverste kjeller	R60, A2-s1,d0	R90, A2-s1,d0	R120, A2-s1,d0
Utvendig trappeløp	-	R60 eller A2-s1,d0	A2-s1,d0

Fra Tabell 10 er det for brannklasse 3 krav til 90 minutter bæreevne for bærende hovedsystem (R90) og 60 minutter bæreevne for sekundære konstruksjoner (R60). Preaksepterte ytelse som ikke er mulig å tilfredsstille med trekonstruksjoner er markert. Legg merke til at alle bygningsdeler i tre i brannklasse 3 fremstår som fravik. Bærende bygningsdel under bakken, typisk fundament og utvendig trappeløp er ikke direkte relevant for oppgaven.

Kravet til sikkerhet av konstruksjon ved brann i brannklasse 3 ved bygging av trekonstruksjoner må dokumenteres ved analyse. Begynner med å se på forskriftskravet i teknisk forskrift, § 11-4 (4). Først beskrives det generelle kravet:

«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.»

Deretter spesifiseres kravet ytterligere bærende hovedsystem for brannklasse 3 og 4:

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

Spørsmålet som bør besvares for å tilfredsstille forskriftsteksten er:

1. Hva er et fullstendig brannforløp?
2. Hvordan dimensjonere hovedbæresystem i tyngre trekonstruksjoner i brannklasse 3?

Kommentar til fraviksdokumentasjonen

Fraviksdokumentasjon for bruk av brennbart materiale i bærende hovedkonstruksjon kan gjennomføres på mange ulike måter. Vanligst er å utføre arbeidet i samsvar med NS 3901 – Krav til risikovurdering av brann i byggverk [14]. Det beskriver også veiledningen til byggt teknisk forskrift som en tilfredsstillende metode, med følgende:

«Risikoanalyse og komparativ analyse som gjennomføres i samsvar med NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk vil tilfredsstille forskriftens krav til analyse av sikkerhet ved brann.[8]»

Under kapitlet om komparativ analyse i NS 3901 finner en følgende presisering av analysemetode:

«Rent kvalitative scenarioanalyser skal bare benyttes i ukompliserte byggverk der det er små fravik fra de preaksepterte ytelsene, og der fravikene i liten grad påvirker personrisikoen»

Fravik fra preaksepterte ytelser for hovedbæresystem havner ikke under begrepet små fravik. Fleretasjes trekonstruksjoner i brannklasse 3 havner heller ikke under begrepet ukompliserte byggverk og det kan slik sett vurderes at det er nødvendig med en kvantitativ analyse. Denne kvantitative analysen kan gjennomføres på flere måter, eksempelvis: brannsimuleringsmodeller, pålitelighetsanalyser, rømnings og evakueringsanalyser og beregninger av bygningsdelenes brannmotstand og bæreevne. Problematikken med slike analyser er at de krever både tid og kunnskap

for å kunne gjennomføres og med innføringen av Eurokodene har flere av de tradisjonelle forenklede beregningsmetodene blitt forkastet. Dette stiller ikke bare krav til brannrådgiver, som skal sette seg inn i de nye beregningsmodellene, men og rådgivende ingeniør byggeteknikk, som ikke nødvendigvis har forutsetningen for å kunne vurdere den branntekniske prosjekteringen av den bærende konstruksjonen. I tillegg viser det seg at analysene er spesielt krevende grunnet formuleringen av forskriften og dens referanse til fullstendig brannforløp.

I denne oppgaven er det benyttet brannforløpsmodeller og beregninger av bygningsdelenes brannmotstand som analyse av hovedbæresystem. Dette har med intensjonen til forskriftskravet å gjøre. Beskrivelsen av forskriftskravet er som følger:

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

Kravet er at konstruksjonens hovedbæresystem ikke skal styrte sammen under brann, men bevarer sin stabilitet og bæreevne i den tiden som er nødvendig for rømning og redning. Dette kan tolkes på flere måter, men hvis en vurderer konsekvensen av kollaps for et større byggverk (≥ 5 etasjer), vil også rømning og redning til det som er definert som sikkert sted – eksempelvis parkeringsplassen utenfor bygget - kunne oppleve nedfall av konstruksjonsdeler. En kollaps vil også kunne bidra til spredning av brannen til andre bygg.

Det virker som om forskriften er konsekvensbasert når det kommer til kravbeskrivelse for bærende hovedsystem, altså at konsekvensen er så stor ved kollaps at kravet ikke endres eller reduseres ved å senke sannsynligheten for hendelsen brann. Begrepet redundans er gjeldende i dette tilfelle. Redundans beskrives best ved et eksempel fra rørleggerbransjen: rør-i-rør. Hvis det ene røret mot for modning skulle svikte, blir det ikke vannlekkasje, for neste rør sikrer funksjonen. For trekonstruksjoner er det viktig at selv om en brann mot formodning skulle skje, er det fortsatt tilstrekkelig bæreevne og stabilitet etter et fullstendig brannforløp.

Ettersom veiledningen angir at R90, A2-s1,d0 tilfredsstillt kravet til stabilitet og bæreevne ved et fullstendig brannforløp, vil dette implisitt kunne tolkes som at et fullstendig brannforløp er angitt som 90 minutter med standardbrannforløp. Dette er korrekt, men 90 minutter med standardbrannforløp kan tilsvare alt fra 60 minutter med rask utviklingshastighet på det naturlige brannforløp eller 150 minutter med lav utviklingshastighet på det naturlige brannforløpet. For stålkonstruksjoner (A2-s1,d0) vil ikke et langt naturlig brannforløp nødvendigvis påvirke bæresystemet, så lenge temperaturen holder seg under kritisk temperatur. Mens for trekonstruksjoner (D-s2,d0) vil et langt naturlig brannforløp kunne føre til mer forkulling, da forkullingsraten er tilnærmet konstant så lenge temperaturen er over kritisk forkullingstemperatur. Da lengden på et fullstendig brannforløp er gitt av brannenergien og egenskaper til branncellen, vil det være nødvendig å gjennomføre en analytisk tilnærming av lengden på brannforløpet når en benytter trekonstruksjoner og ikke bare bruke 90 minutter standardbrannforløp påkjenning direkte. En enkeltstående observasjon gjort er at det finnes brennbare bygningsdeler som

oppfyller R90 kravet. Et slikt eksempel er massivtredekke til KLH [40]. Dokumentasjonen tilsier at et dekke på 146 mm, oppfyller REI 90, D-s2,d0. Hvorvidt dekke benyttes til primær konstruksjon eller sekundær konstruksjon blir opp til rådgivende ingeniør byggeteknikk og er ikke diskutert nærmere, men det må presiseres at denne konstruksjonsdelen ikke oppfyller forskriftskravet uten videre.

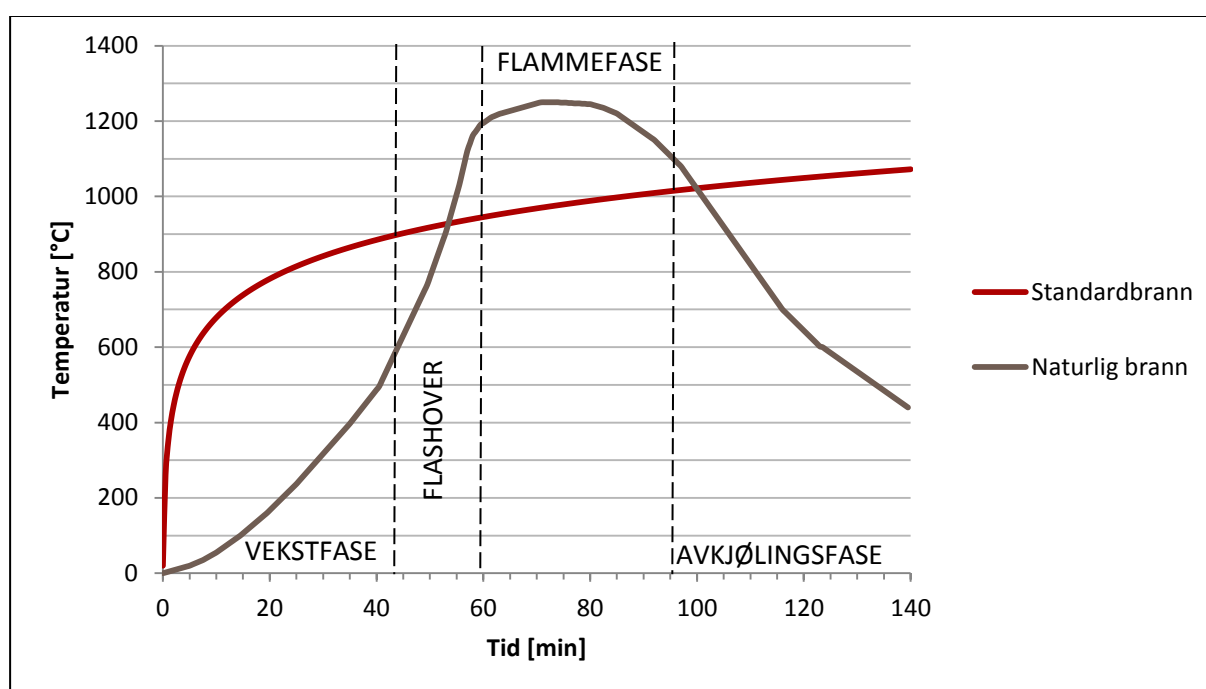
En annen direkte konsekvens av å benytte brennbart materiale er usikkerheten av brannforløpets lengde og inkludering av brennbart bæresystem til videre brannforløp. Om en benytter ubrennbar konstruksjon vil brannen slutte å brenne på det tidspunktet hvor inventaret er fullstendig brent opp, men dette er en uavklart forutsetning når en benytter trekonstruksjon. Hvis søyler, bjelker og dekker fortsetter å brenne som en selvopprettholdende eksoterm brann vil konstruksjonen på et tidspunkt gå til brudd.

Om brannen fortsetter i bæresystemet er et ubesvart spørsmål i oppgaven, som gjerne skulle vært besvart, men som ikke har latt seg løse med oppgavens begrensninger. Det har dessverre ikke vært mulig å finne flere kilder eller informasjon om videre brannforløp. Eurokode 1 – del 2 og Eurokode 5 – del 2 beskriver at brannen har en avkjølingsfase hvor brannen går lineært fra maksimumstemperatur til null grader, uansett konstruksjon. Det vil kreve mer forskning for å kunne besvare dette problemet og modellenes korrekthet vil naturligvis være en forutsetning for oppgavens videre arbeid.

6.2. Metoder for dokumentasjon hovedbæresystem

Begrepet *fullstendig brannforløp* er ikke definert nærmere i byggt teknisk forskrift. Veiledningen til forskriften og Vidar Stenstad [12] viser til at fullstendig brannforløp samsvarer med begrepet *naturlig brannforløp*, som er benyttet i Eurokode 1, del 1-2, kapittel 3.3 «Modeller for naturlig brann».

Naturlig brannforløp er en representasjon for hvordan en brann faktisk vil se ut. Denne inkluderer både vekstfase, flashover, flammefase og avkjølingsfase til forskjell fra standardbrannkurven – som kun inneholder vekst- og flammefase. Se Figur 14 for eksempel på naturlig brannforløp (kun illustrativ) og standard-temperatur-tid kurve.

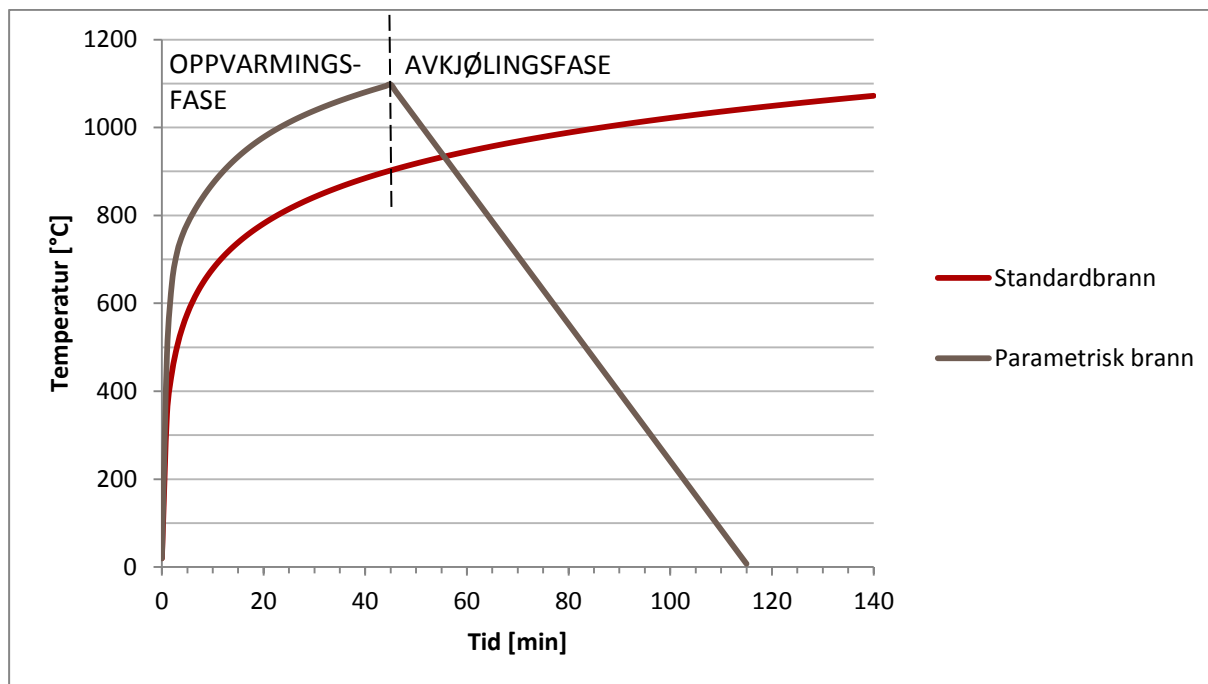


Figur 14: Illustrasjon av standardbrann og naturligbrann

Parametrisk brannforløp i henhold til

Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann

For å kunne dimensjonere med *naturlig brannforløp* blir det i Eurokode 1- del 2 referert videre til *parametrisk brann* (Eurokode 1 – del 2 – tillegg A). Den parametriske brannen er en designmodell av den naturlige brannen. Brannen tilnærmes ved å benytte fysiske parametere som er karakteristisk for en gitt branncelle i prosjektet. I Eurokoden benyttes brannlast, ventilasjonsfaktor og egenskaper til omhyllende bygningsdeler for å bestemme hvilken utvikling brannen kan forventes å ha. Eksempel på hvordan en parametrisk brann ser ut, sammenlignet med standardbrann er vist i Figur 15. Figuren har designmessige antagelser for brannlast, ventilasjon og egenskaper til omhyllende bygningsdeler for den parametriske brannen. Denne kurven er illustrativ og bør derfor ikke benyttes direkte til dimensjoneringsformål.



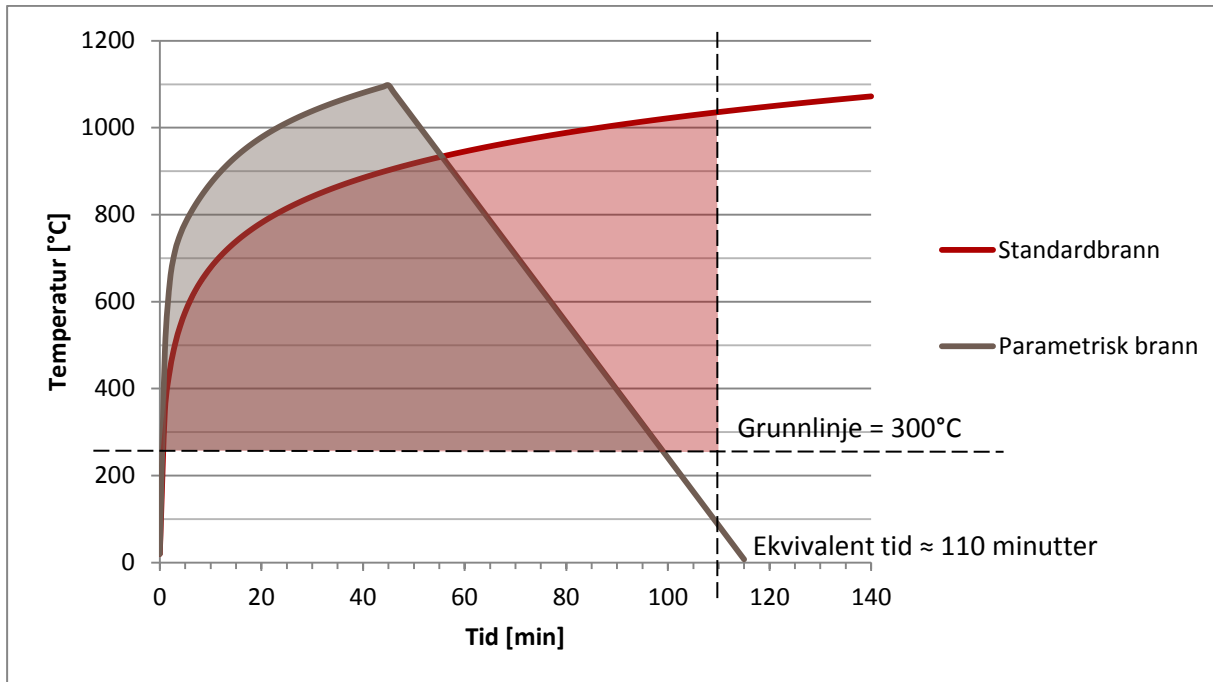
Figur 15: Illustrasjon av standardbrann og parametriske brann

Materialer testes og prøves etter standardbrannkurven. Dette er utgangspunktet for alle brannmotstandstidene for bygningsdeler. Når forskriften etterspør dimensjonering etter fullstendig brannforløp, så må fullstendig brannforløpet kunne relateres til brannmotstanden av en bygningsdel (etter standardbrannkurven). Problemet er koblingen mellom standardbrannforløp og naturlig brannforløp. En potensiell metode for å koble begrepene sammen er ekvivalent branneksporeringstid.

Ekvivalent branneksporeringstid

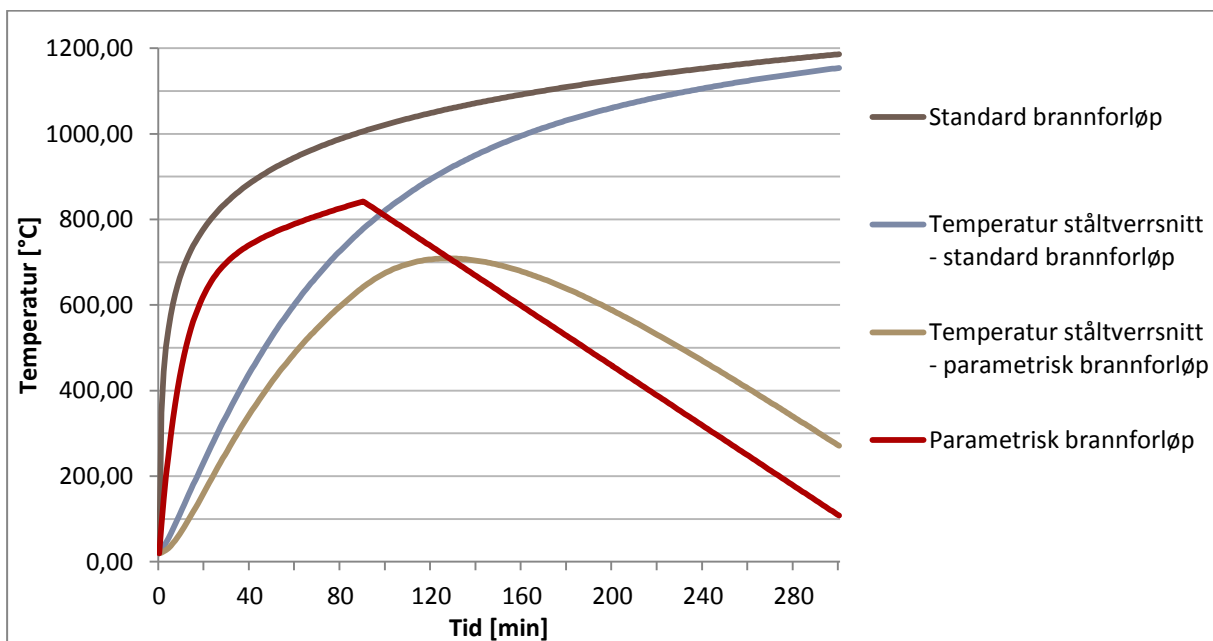
Det er utviklet flere metoder for å tilnærme seg ekvivalent tid på. De er generelt sett unøyaktige og konservative, men likevel nyttig i branndimensjoneringssammenheng. Ingberg utviklet i 1928 equal area hypothesis og prinsippet er vist i Figur 16 [41]. Når arealet under kurvene er likt har brannene lik alvorlighetsgrad. I eksempelet i Figur 16, er arealet det samme ved tid ≈ 110 minutter. Altså hadde bygningsdelen måtte opprettholde bæreevnen og stabilitet i 110 minutter for å opprettholde kravet på.

Ingberg konkluderte med at brannlast er en viktig faktor i bestemmelsen av alvorlighetsgraden av en brann og kan direkte relateres til temperatur-tid kurvene. Equal area hypothesis kan ikke forsvares hverken vitenskapelig eller teknisk [42], men benyttes likevel i dag som sammenheng mellom naturlig brannforløp og den tilsvarende ekvivalente tid for standardbrann. Om en så allikevel tar i bruk equal area hypothesis bør valg av parametere i den parametriske brannkurven være konservative, altså konservative vurderinger angående brannlast, ventilasjonsfaktor og egenskaper til omhyllende bygningsdeler. Dette er for å unngå en undervurdering av hvilken ekvivalent tid den faktiske brannen vil kunne tilsvare. Ingeberrgs metode er ikke mulig å benytte ved bruk av standardiserte og forskriftsaksepterte beregningsmodeller.



Figur 16: Ekvivalent branneksponeeringstid basert på equal area hypothesis av Ingberg

En annen måte å beregne den ekvivalente tiden på er å se på temperaturvirkningen i materialet. Law har publisert en metode, hvor selve prinsippet i metoden er vist i Figur 17. Metoden er basert på en korrelasjon mellom kritisk temperatur i et ståltverrsnitt ved parametrisk og standard brannforløp. Den er utviklet med utgangspunkt i målinger av temperaturer i ståltverrsnitt. Metoden gjelder ikke for trevirke, ettersom tre brytes ned ved temperatur over 300 °C, og derav er ikke temperaturkorrelasjonen gjeldende.



Figur 17: Ekvivalent branneksponeeringstid basert på temperatur i ståltverrsnittet av Law

Metoden til Law kan benyttes ved i denne oppgaven gjennom en komparativ analyse, hvor bæresystem i tre sammenlignes med den preaksepterte løsningen.

Ekvivalent branneksponeeringstid i henhold til:

Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann

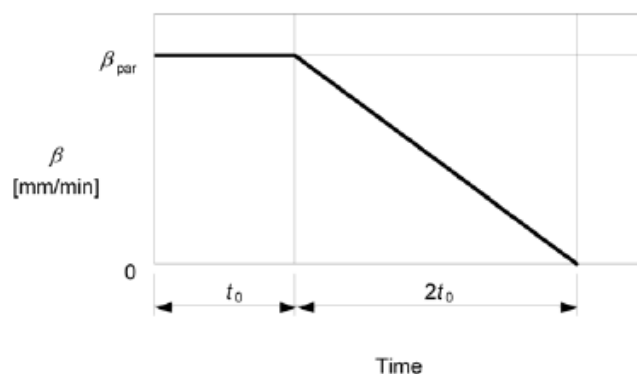
I Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, Del 1-2: Allmenne laster, Laster på konstruksjoner ved brann har det blitt utviklet en ekvivalent branneksponeeringstid, tilsvarende metoden beskrevet av Ingberg [41] og Law [43]. Denne er basert på ukjente prinsipper og utledningen av formelen er ikke utgitt. Etter en gjennomgang av beregningsmetoden, begrensninger og omfang er det deler som tyder på at metoden presentert i eurokoden er basert på Law sin metode og da har forankring i eksperimentelle data og empiriske analyser for temperaturvirkninger i stålkonstruksjoner. Beregningsmetoden er gjennomgått i teorien.

Ettersom eurokoden er et standardisert beregningsverktøy er denne metoden å foretrekke foran den ekvivalente branneksponeeringstiden til Law. Metoden kan ikke benyttes av trekonstruksjoner grunnet gyldigheten av de eksperimentelle data, men har, som metoden til Law, bruksområde i en komparativ analyse. Ekvivalent branneksponeeringstid gjelder i følge standarden: « *ikke samvirkekonstruksjoner av stål og betong eller trekonstruksjoner* »

Parametrisk brannpåvirkning og forkullingsdybde i henhold til:

Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner

Det er mulig å benytte Eurokode 5 – del 2 til analyse av forkullingsforløp for parametrisk brannforløp. Denne materialstandard beskriver hvordan forkullingsrate og fullstendig brannpåvirkning kan analyseres. Metoden gir designmessige forenklinger som gjør det mulig å beregne både varighet og forkullingsrate i løpet av hele brannen. Sammenhengen mellom tid og forkullingsrate i en parametrisk brann er for øvrig vist i Figur 18.



Figur 18: Forholdet mellom forkullingsrate og tid for et parametrisk brannforløp

Figuren viser at forkullingsraten holder seg konstant i tiden t_0 . Tiden t_0 er tilnærmet lik tiden brannen er i oppvarmingsfasen. Deretter synker forkullingsraten lineært i avkjølingsfasen i løpet av en periode lik $2t_0$. Bakgrunnen for denne dimensjoneringsmetoden er tester gjennomført av Hadvig [44] og

senere bekreftet av Hansen & Olesen [45]. Den empiriske forenklingen viser at tiden i oppvarmingsfasen t_0 [min] er lik:

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

Her er $q_{t,d}$ lik spesifikk brannbelastning målt i $[MJ/m^2]$ fordelt på omhyllingsflaten og O lik åpningsfaktoren målt i $[m^{1/2}]$. Beregningen gir total forkullingsdybde, som så benyttes til å vurdere stabilitet og bæreevne etter endt brannforløp.

Det presiseres at t_0 , fra Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner, ikke samsvarer nøyaktig med t_{maks} , fra Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Dette er i utgangspunktet merkelig, da det virker som om utgangspunktet for modellene er de samme parametriske kurvene. En observasjon gjort er at tiden t_0 er mer konservativ, sammenlignet med t_{maks} . Dette har med en antagelse at forkullingsraten ikke avtar med en gang inventaret er brent opp, men heller litt når temperaturen synker i branncellen.

Metoden parametrisk brannpåvirkning og forkullingsrate/forkullingsdybde har enkelte begrensninger/gyldighetsområder disse er:

- $t_0 \leq 40 \text{ min}$
- $d_{char} \leq b/4$
- $d_{char} \leq h/4$

Symbolbeskrivelse:

d_{char} er tykkelsen på forkullet del [mm]

b er bredden på tverrsnittet [mm]

h er tykkelsen på tverrsnittet [mm]

Begrensningen handler om gyldigheten til de eksperimentelle data og derav bruksområdet til analysemetoden. Kravet på $t_0 \leq 40 \text{ min}$ vurderes til å være meget avgjørende ved mange «normale» scenario.

Gyldighet av metoder foreslått over:

I teknisk forskrift, § 2-1 (3), står følgende beskrevet:

«Dersom oppfyllelse av forskriftens funksjonskrav verifiseres ved analyse, skal det påvises at anvendt analysemetode er egnet til og gyldig for formålet...»[10]

For verifikasjon av ytelser er følgende beskrevet:

«Oppfyllelse av ytelser kan verifiseres ved bruk av metoder i samsvar med Norsk Standard eller likeverdig standard.»

I tillegg beskrives det følgende i veiledningen:

«Forskriften setter ikke krav om at Norsk Standard skal brukes, men når det gjelder bruk av andre standarder, f.eks. for prosjektering og utførelse, så anbefales at grunnlaget bygges opp som i norske standarder.»

I veiledningen refereres det til både Eurokode 1 – del 2 - Modeller for naturlig brann og Eurokode 5 – del 2. De valgte metoder er derfor både egnet og gyldig til formålet. Problemet er i større grad å kunne konkludere med de kvantitative analysemetodene beskrevet ovenfor. Det er så mange begrensninger på de eksperimentelle formlene i eurokoden at de ikke alltid kan benyttes som ønsket. En kombinasjon av analyse med preakseptert krav og analyse av trekonstruksjoner blir derfor utgangspunktet for videre analyse.

6.3. Analyse for hovedbæresystem i tre

For å kunne bevise at hovedbæresystem i massivtre/limtre kan benyttes anbefales en komparativ analyse. Analysene som er gjennomført benytter følgende oppsett:

Del	Beskrivelse/Beregningsmodell	Referansebygg /Analysebygg	Modell:
A	Ekvivalent brannekspneringstid	Referansebygg	Eurokode 1 – del 2, tillegg F
B	Forkullingsdybde ved parametrisk brannforløp uten tillegg fra immobil brannenergi	Analysebygg	Eurokode 5 – del 2, tillegg A
C1	Beregning av immobil brannenergi basert på forkullingsdybde del B	Analysebygg	Eurokode 1 – del 2, tillegg E
C2	Forkullingsdybde ved parametrisk brannforløp med tillegget fra immobil brannenergi	Analysebygg	Eurokode 5 – del 2, tillegg A

Disse beregningene er gjennomført på 3 ulike analyse-/referansebyggverk. Forskjellen ved analysene er hvilke sikkerhetstiltak som iverksettes og hvordan effekten av tiltaket vurderes:

Analyse 1. Ingen kompenserende tiltak

- Referansebyggverkets sprinkles ikke. Hovedbæresystem: R90 A2-s1,d0
- Analysebyggverkets hovedbæresystem er i massivtre/limtre
- Sekundære bygningsdeler er også i treverk.

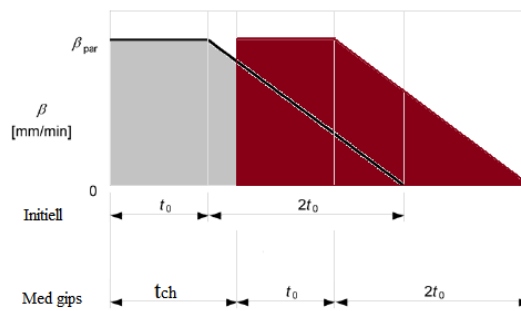
Analyse 2. Gips og sprinkling

- Referansebyggverkets sprinkles. Hovedbæresystem: R90 A2-s1,d0
- Analysebyggverket sprinkles. Hovedbæresystem i massivtre/limtre
- Analysebyggverkets sekundære bygningsdeler er også i tre.
- Analysebyggverket kles med gips. Alle overflater. Forkullingsforløpet er forskjøvet.

Analyse 3. Gips og sprinkling

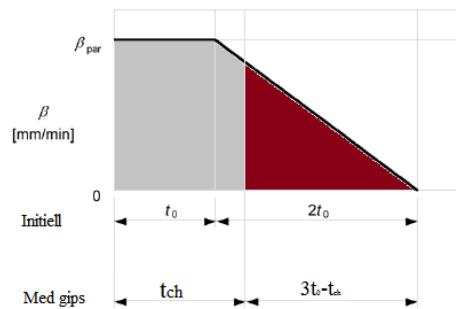
- Referansebyggverket sprinkles. Hovedbæresystem: R90 A2-s1,d0
- Analysebyggverket sprinkles. Hovedbæresystem er i massivtre/limtre
- Analysebyggverkets sekundære bygningsdeler er også i tre.
- Analysebyggverket kles med gips. Alle overflater. Forkullingsforløpet er hindret.

Forskjellen på analyse 2 og 3 er hvordan effekten av gips designmessig håndteres. For analyse 2 vil forkullingsforløpet presentert i eurokode 5 – del 2, tillegg A bli forskjøvet. Altså vil en i prinsippet oppnå samme forkullingsdybde som uten gips, men tiden dette tar er mye lengre sammenlignet med analyse 1. Dette er fremstilt i Figur 19, hvor dimensjonerende forkullingsforløp er **rødt** areal.



Figur 19: Forventet forkullingsforløp for analyse 2.

For analyse 3 vil forkullingsforløpet bli hindret i tiden gipsen opprettholder sin funksjon. Dette vil si at en beholder det opprinnelige forkullingsforløpet, men fjerner den delen hvor gipsen beskytter trematerialet. Dette er fremstilt i Figur 20, hvor dimensjonerende forkullingsforløp er rødt areal.



Figur 20: Forventet forkullingsforløp for analyse 3.

Det forekommer ingen beskrivelse av hvordan en bør håndtere effekten av gips ved parametrisk forkullingsforløp, så begge er tolkninger gjort av forfatter. Fjernet forkullingsforløp virker i utgangspunktet mest fornuftig da gips har en effekt på total forkullingsdybde. Om en velger forskjøvet forkullingsforløp utgjør gips ingen beregningsmessig effekt da resultatet for forkullingsdybden blir den samme om det benyttes gips eller ikke.

Komparativ analyse:

Det er ønskelig å bygge en tillitsvekkende og tilfredsstillende dokumentasjon. Derfor er den komparative analysen gjennomføres i henhold til NS 3901:2012 Krav til risikovurdering av brann i byggverk. For å kunne gjøre resultatet av analysen anvendelig er det valgt konservative verdier. Scenarioet med de angitte verdier vil kunne oppstå ved dimensjonering av brannforløp i brannklasse 3, selv om sannsynligheten for dette er lav.

Analysen begynner med en vurdering av konstruksjonssikkerhet for referansebyggverket. Dette gjøres ved å benytte ekvivalent branneksponeeringstidmodell fra Tillegg F i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann [36]. Følgende konstante verdier er valgt for den komparative analysen:

Tabell 11: Konstante verdier ved analyse av konstruksjonssikkerhet for referansebyggverk

	Symbol	Verdi	Benevning	Kommentar
Korreksjonsfaktor for materiale	k_c	1,00	-	Konservativt. Gjelder enten armert betong eller beskyttet stål.
Omregningsfaktor for omsluttende bygningsdelers termiske egenskaper	k_b	0,07	$\min \cdot m^2/MJ$	Konservativt. Det er usikkerhet knyttet til egenskapene til de omsluttende bygningsdelene

Følgende verdier endres i den komparative analysen, hvor effekten av endringen studeres.

Tabell 12: Variable ved analyse av konstruksjonssikkerhet for referansebyggverk

	Symbol	Intervall	Benevning	Kommentar til intervall
Spesifikk brannenergi	$q_{t,d}$	25 – 400	MJ/m^2	Dette er basert på forskriftens begrensninger for brannklasse 3 Legg merke til at for sprinklet byggverk benyttes reduksjonsfaktoren på 0,6
Åpningsfaktor (O) og derav ventilasjonsfaktor (w_t)	O	0,02 - 0,20	$m^{1/2}$	Dette er basert på neste ledd i analysen. Beskrivelse under

Begrunnelsen for intervallet for åpningsfaktor ligger i begrensningen i neste ledd i den komparative analysen, beregningsmodellen parametrisk brannpåvirkning. Denne modellen har grenseverdier for åpningsfaktor (O) lik 0,02 og 0,20. Modellen er ventilasjonsbasert, som betyr at brannens utvikling er knyttet til forventningen om at ventilasjon er begrensende faktor for utviklingen av brannen. Grenseverdiene kan forsvares med at åpningsfaktor mindre enn 0,02 sannsynligvis vil gi en veldig lokal brann grunnet manglende oksygentilførsel, mens en åpningsfaktor over 0,20 sannsynligvis vil kunne gi en brenselskontrollert brann.

Resultat del A – ekvivalent branneksporeringstid for referansebyggverket

For analyse 1 – ingen sprinkling av referansebygget:

Tabell 13: Ekvivalent branneksporeringstid for referansebyggverk. Analyse 1A

		Åpningsfaktor, O [
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]	25	12	9	7	6	6	5	5	4	4	4
	50	25	18	14	12	11	10	9	9	8	8
	75	37	26	21	19	17	15	14	13	12	12
	100	49	35	29	25	22	20	19	18	16	16
	125	62	44	36	31	28	25	23	22	21	20
	150	74	53	43	37	33	30	28	26	25	23
	175	87	61	50	43	39	35	33	31	29	27
	200	99	70	57	49	44	40	37	35	33	31
	225	111	79	64	56	50	45	42	39	37	35
	250	124	88	71	62	55	51	47	44	41	39
	275	136	96	79	68	61	56	51	48	45	43
	300	148	105	86	74	66	61	56	53	49	47
	325	161	114	93	80	72	66	61	57	54	51
	350	173	123	100	87	77	71	65	61	58	55
	375	186	131	107	93	83	76	70	66	62	59
	400	198	140	114	99	89	81	75	70	66	63

 Verdiene inne i tabellen er branneksporeringstid. Enhet [*min*]

For analyse 2 og 3 - sprinkling av referansebyggverk:

Tabell 14: Ekvivalent branneksporeringstid for referansebyggverk. Analyse 2A og 3A

		Åpningsfaktor									
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]	15	7	5	4	4	3	3	3	3	2	2
	30	15	11	9	7	7	6	6	5	5	5
	45	22	16	13	11	10	9	8	8	7	7
	60	30	21	17	15	13	12	11	11	10	9
	75	37	26	21	19	17	15	14	13	12	12
	90	45	32	26	22	20	18	17	16	15	14
	105	52	37	30	26	23	21	20	18	17	16
	120	59	42	34	30	27	24	22	21	20	19
	135	67	47	39	33	30	27	25	24	22	21
	150	74	53	43	37	33	30	28	26	25	23
	165	82	58	47	41	37	33	31	29	27	26
	180	89	63	51	45	40	36	34	32	30	28
	195	97	68	56	48	43	39	36	34	32	31
	210	104	74	60	52	46	42	39	37	35	33
	225	111	79	64	56	50	45	42	39	37	35
	240	119	84	69	59	53	48	45	42	40	38

 Verdiene inne i tabellen er branneksporeringstid. Enhet [*min*]

Resultatet fra analysen for konstruksjonssikkerhet for referansebyggverket er vist i Tabell 13 og Tabell 14. Resultatene for analyse 2 og analyse 3 i denne delen er helt like, de er derfor vist som en tabell. Tabellene presenterer ekvivalent branneksponeeringstid på konstruksjonen for de angitte verdier av åpningsfaktor og brannenergi. Verdier over 90 minutter betyr at en ville forvente at bæresystemet, R90 A2-s1,d0, ikke opprettholder bæreevne og stabilitet ved et fullstendig brannforløp. Det er altså tydelig fra tabellen at ved å benytte preakseptert ytelse så vil konstruksjonen i enkelte tilfeller kunne motstå et fullstendig brannforløp (grønt i tabellen), og i noen tilfeller ikke kunne ha tilstrekkelig kapasitet til å motstå et fullstendig brannforløp (rødt i tabellen). Det er altså beregningsmessig vist at preakseptert løsning under visse forutsetninger ikke holder funksjonskravet i byggteknisk forskrift. Myndighetene har altså beviselig valgt at bæring ved brann inneholder en risiko. Den risikoen bygningen har for å falle sammen under brann er det vi kaller akseptabel risiko, eventuelt restrisiko. Den akseptable risiko i den fiktive generelle beregningen er lav, og muligens også enda lavere enn beregningen direkte gir uttrykk for, grunnet sikkerhetsfaktorer i materialet, lasten og brannens egenskaper. Spesielt lav er den for det sprinklede referansebyggverket. Det viktigste funnet er at det er en akseptabel restrisiko selv ved bygging etter veiledningen til teknisk forskrift.

De to forutsetningene som ble gjennomført for å kunne presentere resultatet var forutsetning om liten branncelle ($A_f \leq 100 \text{ m}^2$) og forutsetning om at branncellen er uten åpning i taket ($A_h = 0 \text{ m}^2$) Åpninger i tak vil senke konsekvensen av brann og er slik sett en konservativ antagelse med tanke på resultatet. Antagelsen om en liten branncelle vil på den annen side kunne påvirke brannens utvikling både i retning av lavere og høyere ekvivalent branneksponeerings tid og må vurderes i det enkelte tilfelle. De forenklinger påpekt er likevel ok, grunnet en branncelle på 100 m^2 kan betegnes som en relativt stor branncelle. En endring til beregningsmetode for større branncelle ($A_f \geq 100 \text{ m}^2$) vil kunne endre resultatet noe. For større brannceller vil spesielt høyden på branncellen kunne være avgjørende. Så lenge branncellen ligger rundt normal romhøyde er forutsetningen ok.

Følgende konstante verdier er valgt som grunnlag for videre analyse analysen:

Tabell 15: Konstante verdier ved analyse av forkullingsdybde for analysebyggverk

	Symbol	Verdi	Benevning	Kommentar
Omsluttende bygningsdelers termiske egenskaper	b	520	$J/m^2s^{1/2}K$	Fra kilde: An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires [28].
Nominell forkullingsrate	β_n	0,70	mm/min	Konservativ, men sammenfaller med tabell 3.1 i Eurokode 5 – del 2.

De variable som ble benyttet i analysen av konstruksjonssikkerhet for referansebyggverket vil være de samme i denne analysen av forkullingsdybde av analysebyggverket. Variablene er brannenergi og åpningsfaktor. Begge er variable er beskrevet og effekten er diskutert under Tabell 12.

Resultat del B – forkullingsdybde for analysebyggverk:

For analyse 1 – ingen sprinkling av analysebyggverk:

Tabell 16: Forkullingsdybde for analysebyggverk. Analyse 1B

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
25	17	11	8	6	5	4	4	3	3	3
50	33	22	16	13	10	9	8	7	6	6
75	50	33	24	19	16	13	12	10	9	8
100	67	44	32	25	21	18	15	14	12	11
125	84	55	40	32	26	22	19	17	15	14
150	100	66	48	38	31	27	23	21	18	17
175	117	77	56	44	37	31	27	24	21	19
200	134	88	64	51	42	36	31	27	25	22
225	151	99	72	57	47	40	35	31	28	25
250	167	110	81	63	52	44	39	34	31	28
275	184	121	89	70	57	49	42	38	34	31
300	201	132	97	76	63	53	46	41	37	33
325	218	143	105	82	68	58	50	44	40	36
350	234	154	113	89	73	62	54	48	43	39
375	251	165	121	95	78	67	58	51	46	42
400	268	176	129	101	84	71	62	55	49	44

 Verdiene inne i tabellen er forkullingsdybde. Enhet [*mm*]

For analyse 2 og 3 – sprinkling av analysebyggverk:

Tabell 17: Forkullingsdybde for analysebyggverk. Analyse 2B og 3B

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
15	10	7	5	4	3	3	2	2	2	2
30	20	13	10	8	6	5	5	4	4	3
45	30	20	14	11	9	8	7	6	6	5
60	40	26	19	15	13	11	9	8	7	7
75	50	33	24	19	16	13	12	10	9	8
90	60	40	29	23	19	16	14	12	11	10
105	70	46	34	27	22	19	16	14	13	12
120	80	53	39	30	25	21	19	16	15	13
135	90	59	43	34	28	24	21	18	17	15
150	100	66	48	38	31	27	23	21	18	17
165	110	72	53	42	34	29	25	23	20	18
180	120	79	58	46	38	32	28	25	22	20
195	131	86	63	49	41	35	30	27	24	22
210	141	92	68	53	44	37	32	29	26	23
225	151	99	72	57	47	40	35	31	28	25
240	161	105	77	61	50	43	37	33	29	27

 Verdiene inne i tabellen er forkullingsdybde. Enhet [*mm*]

Resultatene presentert i Tabell 17 til Tabell 23 er angitt på tilsvarende måte, som for Tabell 13 og Tabell 14, hvor:

- De **røde** cellene angir scenarioer hvor referansebyggverket ikke vil kunne opprettholde stabilitet og bæreevne igjennom et fullstendig brannforløp, som forskriften kategoriserer som akseptabel risiko.
- De **grønne** cellene angir scenarioer hvor referansebygget ville kunne motstå et fullstendig brannforløp.

I tillegg:

- De **oransje** cellene angir beregnede verdier ved analysen som havner utenfor beregningsmodellen forkullingsrate og forkullingsdybde for parametrisk brannforløp for analysebyggverket sitt gyldighetsområde.

Resultatet i denne delen av analysen (del B) er den samme for analyse 2 og analyse 3. Dette er derfor vist i en enkelt tabell. Resultatet som er fremstilt i Tabell 16 og Tabell 17, viser tydelig at forkullingsdybden er sterkt avhengig av åpningsfaktoren, altså av hvilken oksygentilgang og utlufting som kan forventes. Dette gir mening da en lav åpningsfaktor gir lite oksygen og treg brannutvikling. Likevel trenger det ikke være mye varmere enn 300 grader i materialet før forkullingsfronten propagerer innover i tverrsnittet, og slik sett vil en treg brannutvikling være ugunstig for bæresystemet i trevirke, så lenge tverrsnittet opplever temperaturer over 300 grader. Det må presiseres at verdiene for øvrig også virker fornuftig, så lenge en er innenfor gyldighetsområde. Selv enkelte av verdiene som er så vidt utenfor gyldighetsområde ansees for å gi sannsynlig resultat.

Det presiseres at i Tabell 16 og Tabell 17 er ikke effekten av gips inkludert eller bidraget fra den immobile brannenergien heller. Begge disse blir implementert i del C.

Resultat del C – immobil brannenergi og forkullingsdybde for analysebyggverk:

Immobil brannenergi for analyse 1 – ingen gips:

Tabell 18: Immobil brannenergi for analysebyggverk. Analyse 1-C1

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]										
25	105	69	51	40	33	28	24	22	19	17
50	211	138	101	80	66	56	49	43	39	35
75	316	207	152	120	99	84	73	65	58	52
100	421	276	203	160	132	112	97	86	77	70
125	526	345	253	199	164	140	122	108	96	87
150	632	415	304	239	197	168	146	129	116	105
175	737	484	355	279	230	196	170	151	135	122
200	842	553	405	319	263	224	194	172	154	140
225	948	622	456	359	296	252	219	194	173	157
250	1053	691	507	399	329	280	243	215	193	175
275	1158	760	557	439	362	307	267	237	212	192
300	1264	829	608	479	395	335	292	258	231	210
325	1369	898	659	519	427	363	316	280	251	227
350	1474	967	709	559	460	391	340	301	270	245
375	1579	1036	760	598	493	419	365	323	289	262
400	1685	1105	811	638	526	447	389	344	308	279

 Verdiene inne i tabellen er immobil brannenergi. Enhet [MJ/m²]

Ny forkullingsdybde med bidraget fra immobil brannenergi for analyse 1 – ingen gips

Tabell 19: Forkullingsdybde for analysebyggverk. Analyse 1-C2

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]										
25	87	41	24	16	12	9	8	6	5	5
50	174	83	49	33	24	19	15	13	11	9
75	262	124	73	49	36	28	23	19	16	14
100	349	165	97	66	48	38	30	25	22	19
125	436	207	122	82	60	47	38	32	27	24
150	523	248	146	99	73	56	46	38	33	28
175	611	289	171	115	85	66	53	44	38	33
200	698	331	195	132	97	75	61	51	43	38
225	785	372	219	148	109	85	69	57	49	42
250	872	413	244	165	121	94	76	64	54	47
275	959	455	268	181	133	104	84	70	60	52
300	1047	496	292	198	145	113	91	76	65	57
325	1134	537	317	214	157	122	99	83	71	61
350	1221	579	341	230	169	132	107	89	76	66
375	1308	620	366	247	181	141	114	95	81	71
400	1395	661	390	263	194	151	122	102	87	75

Verdiene inne i tabellen er forkullingsdybde. Enhet [mm]

Immobil brannenergi for analyse 2 – sprinkling og gips, forskjøvet forkullingsforløp:

Tabell 20: Immobil brannenergi for analysebyggverket. Analyse 2-C1

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
15	38	25	18	14	12	10	9	8	7	6
30	76	50	36	29	24	20	18	15	14	13
45	114	75	55	43	36	30	26	23	21	19
60	152	99	73	57	47	40	35	31	28	25
75	190	124	91	72	59	50	44	39	35	31
90	227	149	109	86	71	60	53	46	42	38
105	265	174	128	101	83	70	61	54	49	44
120	303	199	146	115	95	81	70	62	56	50
135	341	224	164	129	107	91	79	70	62	57
150	379	249	182	144	118	101	88	77	69	63
165	417	274	201	158	130	111	96	85	76	69
180	455	298	219	172	142	121	105	93	83	75
195	493	323	237	187	154	131	114	101	90	82
210	531	348	255	201	166	141	123	108	97	88
225	569	373	274	215	178	151	131	116	104	94
240	606	398	292	230	189	161	140	124	111	101

Verdiene inne i tabellen er immobil brannenergi. Enhet [MJ/m^2]

Ny forkullingsdybde med bidraget fra immobil brannenergi for analyse 2 – sprinkler og gips.

Tabell 21: Forkullingsdybde for analysebyggverk. Analyse 2-C2

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
15	35	18	11	7	6	4	4	3	3	2
30	71	35	21	15	11	9	7	6	5	5
45	106	53	32	22	17	13	11	9	8	7
60	142	70	43	30	22	18	15	12	11	9
75	177	88	54	37	28	22	18	16	13	12
90	212	105	64	45	34	27	22	19	16	14
105	248	123	75	52	39	31	26	22	19	17
120	283	140	86	60	45	36	29	25	22	19
135	319	158	96	67	50	40	33	28	24	21
150	354	175	107	74	56	45	37	31	27	24
165	390	193	118	82	62	49	40	34	30	26
180	425	210	128	89	67	53	44	37	32	28
195	460	228	139	97	73	58	48	40	35	31
210	496	245	150	104	79	62	51	44	38	33
225	531	263	161	112	84	67	55	47	40	35
240	567	280	171	119	90	71	59	50	43	38

Verdiene inne i tabellen er forkullingsdybde. Enhet [mm]

Immobil brannenergi for analyse 3 – sprinkling og gips, fjernet forkullingsforløp:

Tabell 22: Immobil brannenergi for analysebyggverket. Analyse 3-C1

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]										
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	65	1	0	0	0	0	0	0	0	0
90	100	11	0	0	0	0	0	0	0	0
105	138	25	0	0	0	0	0	0	0	0
120	175	43	4	0	0	0	0	0	0	0
135	213	63	12	0	0	0	0	0	0	0
150	251	85	22	2	0	0	0	0	0	0
165	289	108	34	6	0	0	0	0	0	0
180	327	131	47	12	1	0	0	0	0	0
195	365	156	62	20	3	0	0	0	0	0
210	403	181	77	29	7	0	0	0	0	0
225	441	205	93	39	13	2	0	0	0	0
240	479	230	110	50	19	4	0	0	0	0

Verdiene inne i tabellen er immobil brannenergi. Enhet [MJ/m²]

Ny forkullingsdybde med bidraget fra immobil brannenergi for analyse 3 – med sprinkler og gips.

Tabell 23: Forkullingsdybde for analysebyggverk. Analyse 3-C2

	Åpningsfaktor									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
Mobil dimensjonerende brannenergi [MJ/m ²]										
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	60	1	0	0	0	0	0	0	0	0
90	93	5	0	0	0	0	0	0	0	0
105	129	15	0	0	0	0	0	0	0	0
120	164	28	2	0	0	0	0	0	0	0
135	199	43	5	0	0	0	0	0	0	0
150	235	59	11	1	0	0	0	0	0	0
165	270	75	17	2	0	0	0	0	0	0
180	306	92	25	5	0	0	0	0	0	0
195	341	110	34	9	1	0	0	0	0	0
210	376	127	44	13	3	0	0	0	0	0
225	412	145	54	18	5	1	0	0	0	0
240	447	162	64	24	7	1	0	0	0	0

Verdiene inne i tabellen er forkullingsdybde. Enhet [mm]

6.4. Oppsummering av resultater:

Resultat fra analyse del A:

For et byggverk som følger preaksepterte ytelser i henhold til veiledning til teknisk forskrift er det funnet en restrisiko for kollaps ved fullstendig brannforløp. Dette er interessant da forskriften beviselig velger restrisikonivået. En kan se at restrisikoen i utgangspunktet er lav, og for et sprinklet byggverk er dette restrisikonivået enda lavere. Scenario som vurderes som akseptabel risiko er for øvrig markert med **rødt** igjennom alle tabellene i videre analyser.

Resultat fra analyse del B:

De beregnede forkullingsdybdene fra del B av analysen virker sannsynlig, men konservative. Det samme gjelder enkelte av forkullingsdybdene som havner utenfor beregningsmodellens gyldighetsområde, markert med **oransje**. Men for enkelte scenario et godt stykke utenfor gyldighetsområde kan verdiene oppfattes som usannsynlige. Eksempelvis kan en ved 250 MJ/m^2 mobil brannenergi og åpningsfaktor lik 0,04 forvente 110 mm forkullingsdybde, ved ensidig påvirkning for analyse 1. Dette virker ikke realistisk, og synd at en ved helt normale scenario uten sprinkling som regel havner utenfor gyldighetsområde. For den sprinklede tabellen er derimot gyldighetsområde (**grønt**) mye større, og et vanlig scenario vil kunne havne innenfor modellens gyldighetsområde.

Resultat fra analyse del C:

Når den immobile brannenergien blir inkludert for det analysebygget som ikke er sprinklet (analyse 1) og hvor det i tillegg ikke er benyttet gips, ser en at analysen blir ubrukelig. Store deler av Tabell 19 blir **oransje**, og dette tyder på at brannenergien er alt for høy for beregningsmodellen. Kriteriet som blir utslagsgivende er kravet om at $t_0 \leq 40 \text{ min}$. Med bakgrunn i analysene kan det være aktuelt å konkludere med at det ikke er gjennomførbart å bygge trekonstruksjon uten kompenserende tiltak.

Når den immobile brannenergien blir inkludert for analysebyggverket som er sprinklet og hvor en antar forskjøvet forkullingsforløp grunnet gips (analyse 2) virker verdiene for forkullingsdybde mer sannsynlige. Fra Tabell 21 finner en fortsatt er et relativt stort område hvor modellene ikke er gyldig (**oransje**), hvor det kan konkluderes med at antagelsen om forskjøvet forkullingsforløp var konservativ. Totalt blir andelen gyldige beregninger større, og derav mer troverdige, men enkelte vanlige scenario (åpningsfaktor lik 0,04 og brannenergi mellom $200\text{-}300 \text{ MJ/m}^2$) kan fortsatt ikke vurderes.

For analyse 3, hvor tillegget fra immobil brannenergi blir inkludert for analysebyggverket som er sprinklet og hvor en antar fjernet forkullingsforløp grunnet gips virker verdiene sannsynlige. En oppnår i henhold til Tabell 23 både gode brannenergiverdier og fornuftige verdier til forkullingsdybde. En kan fint dimensjonere trekonstruksjoner etter denne tabellen, men en vil allikevel stå igjen med en viss restrisiko sammenlignet med referansebyggverket. Selve vurderingen av dette resultat blir sett nærmere på i diskusjonen. Analyse 3 viser for øvrig at ved bruk av både gipskledning og sprinklersystem så vil en kunne dimensjonere bygningsdeler i trekonstruksjoner.

Kommentar til brannenergi: Det er mulig å fortsette iterasjoner for forkullingsdybde og brannenergi som gjort i vedlegget. Det virker derimot ikke som dette er meningen, da modellen og iterasjonene ikke konvergerer. Det antas at kun å benytte seg en iterasjon av brannenergi og forkullingsdybde, som beskrevet ovenfor er å følge standarden. Dette er for øvrig en problemstilling, som ikke er håndtert/forklart i standarden.

7. Fravik 3 - Sekundære konstruksjoner

Sekundære konstruksjoner er et begrep som i utgangspunktet kun benyttes av branntekniske rådgivere. Begrepet er knyttet til bygningsdelens oppførsel ved sammenbrudd. Sekundære konstruksjoner er definert som konstruksjonsdeler som sikrer stabilitet og bæreevne til deler av byggverket. Et sammenbrudd av sekundær bærende konstruksjon betyr lokalt kollaps uten at konstruksjonens hovedbæresystem går til kollaps.

Målet med gjennomgangen av fraviket er å belyse konsekvensen av bruken av brennbart materiale i sekundære konstruksjoner. Fraviksanalysen ønsker også å finne aktuelle tiltak for å oppnå ønsket sikkerhetsnivå, selv med brennbare sekundære konstruksjoner.

7.1. Beskrivelse av fravik

Forskriften sier at:

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

Veiledningen presiserer at sekundære konstruksjonsdeler i brannklasse 3 skal bygges i ubrennbare materiale med tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i 60 minutter - R60, A2-s1,d0. Dette kan sees fra Tabell 10. Om det velges å benytte brennbart materiale i sekundær bæresystem i brannklasse 3 oppstår det et fravik fra veiledningen. Fraviket krever på lik linje med fraviket av brennbart materiale i hovedbæresystemet fraviksanalyse og tilfredsstillende dokumentasjon.

Ettersom kravet direkte henviser til tiden til rømning og redning av personer og husdyr, vil det være nødvendig å beregne rømningstid i analysen. Tiden som er nødvendig for rømning kan tilnærmes gjennom forenklede håndberegninger eller ulike simuleringsprogram for forflytning ved rømning. Det kan være nødvendig å anslå utrykningstid og innsatstid. Grunnet stor usikkerhet ved beregning bør også sikkerhetsmarginer for beregninger vurderes.

Kollaps av sekundære konstruksjonsdeler er, i motsetning til kollaps av hovedbæresystem, en forventet og akseptabel konsekvens ved brann - så lenge kollapsen finner sted etter at rømning og redning er gjennomført og en ikke opplever en dominoeffekt av kollaps av bygningsdeler. Kollaps av sekundære konstruksjoner er en akseptabel konsekvens, fordi om utført korrekt, setter det ikke liv eller miljø i fare. Dette gjelder så vel sikkerheten til redningsmannskap, som spredningen til andre

nærliggende bygg. Konsekvensen av kollaps vil være den samme uansett om det benyttes massivtre eller ubrennbare materialer i den sekundære konstruksjonen. Basert på dette vil ikke R60 i massivtre være en dårlig løsning. Tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i 60 minutter med bruk av tremateriale i sekundære konstruksjoner betyr at uansett brannforløp, rask utvikling eller mindre rask utvikling, så vil bæresystemet opprettholde tiden som er prosjektert da forkullingsraten endrer seg minimalt med påvirkningen. Dette er ikke tilfelle ved bruk av betong eller stål, hvor en rask utvikling kan påvirke tiden til bæring grunnet at kritisk temperatur oppnås raskere enn i design brannen. En har, med andre ord, mer kontroll på oppførselen til materiale ved brannpåvirkning når en benytter trekonstruksjoner i de sekundære bygningsdeler.

Kravet om ubrennbare sekundære konstruksjoner fremtvinger en konsekvensanalyse på grunn av usikkerheten til oppførselen av trekonstruksjoner ved brann. Det fremtvinger også en analyse av rømnings og redningstider, men det vil sjelden være aktuelt å øke behovet for bæreevne og stabilitet til sekundære bygningsdeler grunnet for lang rømningstid.

Spørsmålet som bør besvares for å tilfredsstillere forskriftsteksten er:

1. Hvilken konsekvens har bruken av brennbart sekundært bæresystem?
2. Hvordan dimensjonere sekundære bæresystem i trevirke i den tid som er nødvendig for å rømme og redde personer (evt. husdyr)?

7.2. Metoder til dokumentasjon - konsekvensanalyse

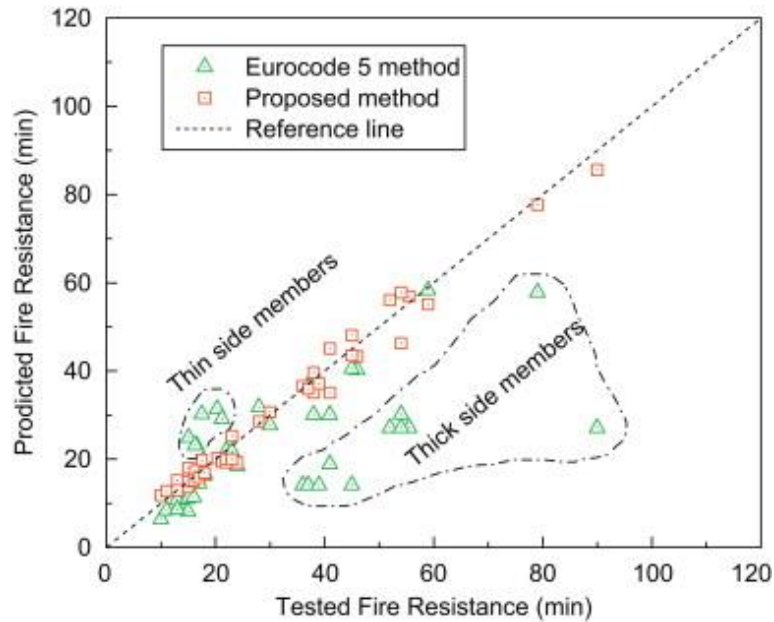
I kapitlet blir det gjennomgått en kvalitativ konsekvensanalyse for bruken av brennbare sekundære bygningsdeler. Konsekvensene er også presentert i en risikomatrix, lik den beskrevet i en temaveiledning fra direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap [7]. I vedlegg 3 er grunnlaget for risikomatriksen beskrevet

Konsekvensanalyse

Den mest åpenbare konsekvensen og usikkerheten ved å benytte trekonstruksjoner for brannsikkerhet er økningen av brennbart materiale i bygget. Økning av brannenergi gjennom bruk av brennbare sekundære bygningsdeler betyr både mer omfattende og lengre brannforløp. Overslaget fra kapittel 5.3 beviste at bruken av trekonstruksjoner i sekundære bygningsdeler kan utgjøre en betydelig andel av den totale potensielle spesifikke brannenergien. I enkelte tilfeller kan økningen i spesifikk brannbelastning faktisk være utslagsgivende for om bygget bør vurderes til å være brannklasse 4. I brannklasse 4 er det behov for fullstendige analyser av alle aspekter ved risikonivået til byggverket. Et lengre brannforløp påvirker ikke nødvendigvis personsikkerheten og rømningen, men kan gi en påkjenning som bæresystemet ikke er dimensjonert for. Om en forutsetter at rømning og redning tar meget lang tid, kan en allikevel sette liv i fare ettersom hovedbæresystemet er såpass avhengig av lengden på brannforløpet. Det kan ikke forventes at brennbare sekundære konstruksjoner bidrar til det tidlige brannforløpet, hvor bidraget fra inventar og kledning er dominerende – forutsatt gipskledning.

En annen negativ konsekvens for bruken av brennbare sekundære bygningsdeler er produksjonen av pyrolysegasser. Den store mengden pyrolysegasser som produseres vil kunne gi mye større forbrenning utenfor branncellen grunnet lite tilgang på oksygen. Dette øker spredningsfaren. Forbrenning av pyrolysegasser utenfor branncellen kan observeres som flammer ut av vinduet fra branncellen. Den økte spredningsfaren vurderes til å gjelde etter flashover når alt i rommet antennes og brannen blir ventilasjonskontrollert. Dette betyr at personsikkerhet er ivaretatt, men at risikoen for større materielle skader øker.

Det er knyttet usikkerheten til utforming av knutepunkt i trekonstruksjoner. De vanligste typene knutepunkt er sammenbinding av bygningsdeler i tre ved bruk av bolter, dybler, skruer eller spiker i stål. En oppvarming av et slikt knutepunkt er komplisert, grunnet den store varmeledningsevnen til stålet, som kan bety lokal forkulling langsmed forbindingsmateriale. Det er likevel fullt mulig å dimensjonere knutepunkt med forbindingsmaterialer av stål til å opprettholde den nødvendige tid med tilfredsstillende preakseptert bæreevne og stabilitet i brannklasse 3 for sekundære konstruksjoner [46]. Det er gjennomført mye tester og eksperiment på knutepunkt og mye av denne litteraturen viser at så lenge bygningsdelene er av typen tyngre trekonstruksjoner kan en ved bruk av de beregningsreglene i Eurokode 5, finne gode tilnærminger for tiden til brudd [33, 47]. Det anbefales for øvrig ikke å benytte innlimte bolter for trekonstruksjoner med økt krav til brannsikkerhet grunnet limets kritiske temperatur [48]. Det kan være behov for forsiktighet ved bruk av beregningsreglene for knutepunkt i Eurokode 5 når det er tynne bygningselementer. Dette er vist i Figur 21 hvor stiplede linje er sammenfallende beregnings- og testresultat, de grønne trekantene er beregnet verdier fra Eurokode 5 og de røde firkantene er en forslått metode utarbeidet i artikkelen:



Figur 21: Sammenheng mellom testresultat, beregninger fra Eurokode 5 og ny foreslått beregningsmetode for knutepunkt, hentet fra Peng [33]

Brann i hulrom og åpninger vil også kunne vurderes som en negativ konsekvens. Spesielt ved bruk av brennbare sekundære bygningsdeler, da brann i hulrom kan utvikle seg fritt, uten at brannvesenet nødvendigvis kommer til. Om en brann i slike hulrom ikke oppdages og heller ikke slokkes, kan den føre til svekkelse av sekundære konstruksjoner før rømning har skjedd. Det må pekes på lite oksygen i slike hulrom, og en svekkelse av sekundære konstruksjoner er mindre sannsynlig. Her er spesielt modulbygg i tre utsatt, da en mellom modulene ofte opplever glipper eller små åpninger.

Som del av vurderingen av personsikkerhet ved sekundære bygningsdeler i trevirke er det nødvendig å ta høyde for konsekvensen av å benytte brennbare overflater med tanke på tidlig brannforløp. Sekundære bygningsdeler i tre vil gi flere brennbare overflater og konsekvensen av dette blir gjennomgått nærmere i kapittel 8.

En av de positive effektene av å benytte trekonstruksjoner i de sekundære bygningsdelene er at det er enklere å forutsi oppførselen til konstruksjonen. Forkullingsraten er forholdsvis konstant uansett brannpåkjenning, og tiden til brudd er mer forutsigbart sammenlignet med stålbjelker eller betongdekker.

En annen positiv effekt er at temperaturen som oppstår ved ubeskyttede trekonstruksjoner er eksperimentelt målt til mye lavere verdier enn den funnet gjennom parametrisk brannforløp, etter flashover. For trekonstruksjon beskyttet med eksempelvis 2 lag gips vil modellen til parametrisk brannforløp gi en god tilnærming av oppvarmingsfasen til brannforløpet [35]. Årsaken til denne effekten har med den energien som kreves til produksjon av pyrolysegasser og den energien det kreves for å varme opp disse gassene.

Risikomatrise

De negative konsekvenser ved å bygge sekundære konstruksjoner i trevirke blir implementert i en risikomatrise. Dette er for å bedre få oversikt over hvilke konsekvenser som må adresseres (rødt), hvilke konsekvenser som bør vurderes (gult) og de konsekvenser som er innenfor akseptabel risiko (grønt).

Meget sannsynlig					
Sannsynlig			Hendelse 2	Hendelse 1	
Mindre sannsynlig			Hendelse 4		
Lite sannsynlig		Hendelse 3			
	Ufarlig	En viss fare	Kritisk	Farlig	Katastrofalt

Hendelse 1: Økning av brennbart materiale.

Konsekvensen vurderes til lengre brannforløp, og derav påvirkning på hovedbæresystem. – «Farlig»
Sannsynligheten for et lengre brannforløp vurderes til sannsynlig.

Hendelse 2: Produksjon av pyrolysegasser.

Konsekvensen vurderes til økt spredningsfare mellom etasjer. – «Kritisk»
Sannsynligheten for økt spredningsfare vurderes til sannsynlig [25].

Hendelse 3: Krevende dimensjonering av knutepunkt.

Konsekvensen vurderes til lokal kollaps, grunnet underdimensjonering – «En viss fare»
Sannsynligheten vurderes til lite sannsynlig.

Hendelse 4: Hulrom og åpninger.

Konsekvensen vurderes til svekkelse av sekundære konstruksjoner – «kritisk»
Sannsynligheten vurderes til mindre sannsynlig.

Konsekvensen av brennbare overflater blir behandlet i neste kapittel og er derfor ikke inkludert her.

Sikkerhetstiltak

Det bør iverksettes konsekvensreducerende eller sannsynlighetsreducerende tiltak for hendelse 1, 2 og 4. Eksempler på slike kompenserende tiltak er gitt i kapittel 9 – Kompenserende tiltak. Hendelse 3 havner for øvrig under akseptabel risiko, og trenger ikke håndteres på linje med hendelse 1 og 2. Det er akseptabelt å godta den risiko hendelse 3 utgjør i et brannscenario.

Hendelse 1, økning i brannenergi, kan håndteres ved korrekt dimensjonering av hovedbæresystem, da en i utgangspunktet ønsker å unngå global kollaps ved brann. Hvordan analysere hovedbæresystemet korrekt med bidraget til brannenergi fra de sekundære bygningsdelene er beskrevet i kapittel 6.3.

Hendelse 2, økt spredningsfare, kan håndteres gjennom å minimere risikoen for spredning. Mye av pyrolysegassene vil brenne utenfor branncellen, så typisk tiltak vil være å legge inn ubrennbar kjølesone over vindu. Kjølesone er avstanden mellom overkant av vindu i en etasje og underkant vindu for etasjen over. Ubrennbar kjølesone bør for øvrig kombineres med spredningstiltak i fasaden for å unngå spredning i ventilasjonsspalte bak utvendig kledning – hvor dette ansees for å være nødvendig.

Hendelse 4 ligger under konsekvenser som kan håndteres. En av de enkleste metodene for å bli kvitt hendelsen, er å minimere antallet prosjekterte hulrom. Det kan også være aktuelt å installere inspeksjonsluker for brannmannskapene, slik at om det brenner i et hulrom vil en kunne slukke brannen. Andre eksempler er å hindre spredning av brann til hulrom. Både håndboken om Brandsäkra Trehus [25] og Fire Safety in Timber Buildings [16] gir gode eksempler på hvor og hvordan slike hindringer kan implementeres. Eksempler på plassering kan være takutstikk, bak luftet kledning, ved rørinstallasjoner eller ved ventilasjonsanlegg. Det er dessuten påkrevd ubrennbare overflater i hulrom, dette senker risikoen.

7.3. Tid til rømning

Dette kapitlet er i utgangspunktet gjennomført for å ha en fullstendig fraviksanalyse, grunnet forskriftens krav om at sekundære bygningsdeler skal opprettholde bæring og stabilitet i nødvendig rømningstid. Det kan for enkelte prosjekt være behov for å gjennomføre en analyse av rømningstider – men dette vil vanligvis ikke være dimensjonerende. De ulike metodene for å bestemme nødvendig rømningstid er:

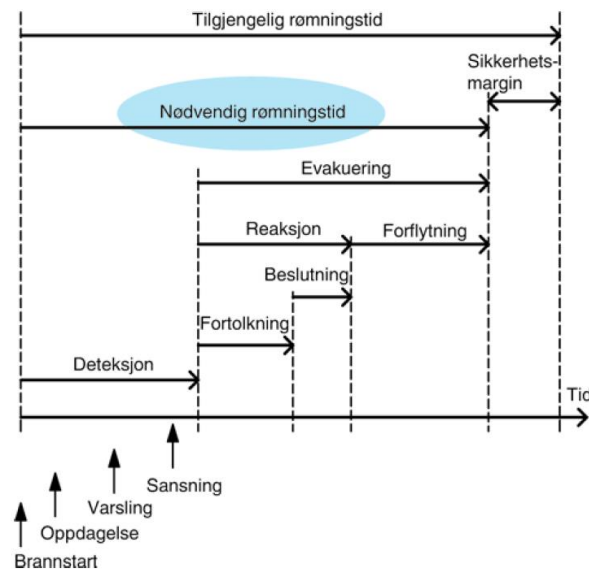
- Håndberegninger i henhold til
 - o Byggforskdatablad 520.385 – Nødvendig rømningstid ved brann. [49]
 - o SFPE, Handbook of fire protection engineering – Kapittel 3-13: Moment of people: The Evacuation Timing [50]
- Simuleringsprogram av rømning:
 - o PathFinder [51]
 - o Simulex

Den mest benyttede metoden fra SINTEF byggforskdatablad 520.385 – Nødvendig rømningstid ved brann er beskrevet i nærmere detalj. Selv om denne i mange tilfeller vil gi en mye lavere verdi en den påkrevd for byggverk, anbefales det å benytte brannmotstand minst lik den påkrevd i veiledningen. Årsaken har med vanskeligheten ved å bestemme tiden redningsmannskaper trenger for redning av personer inne i bygget. Hvis det bygges i brannklasse 3, økes risikoen tilknyttet byggverket – sammenlignet med lavere brannklasser, og det blir desto mer viktig å opprettholde minst 60 minutter bæreevne på sekundære konstruksjoner. Spesielt utfordrende er det for redningsmannskap når byggene både har flere etasjer og er mer uoversiktlige – sammenlignet med brannklasse 2.

Tiden som er nødvendig for rømning avhenger av flere faktorer og i henhold til veiledningen for byggt teknisk forskrift på beregning av nødvendig rømningstid er det viktig at usikkerhetene hver for seg og samlet vurderes og dokumenteres. Dette har med usikkerheten knyttet til alle inputparametere og verdier som benyttes i beregningen. Usikkerheten som avdekkes bør gi grunnlaget for en vurdering av nødvendig sikkerhetsmargin. En god tilnærming er å benytte anerkjent statistikk ved vurdering av de ulike faktorene, slik at konservative men likevel troverdige verdier benyttes.

Oppsummering av beregning fra SINTEF

Byggforskdatablad 520.385 beskriver begrepene knyttet til rømning som illustrert i Figur 22. Herunder er nødvendig rømningstid, tiden fra brannstart til alle personene i bygningen har kommet seg i sikkerhet, mens tilgjengelig rømningstid er tiden fra brannstart til en overskrider tålegrenser for varme og røyk – eventuelt sammenbrudd av sekundære konstruksjoner.



Figur 22: Nødvendig rømningstid i henhold til SINTEF byggforskdatablad 520.385 [49]

Den forenklete beregningen av nødvendig rømningstid basert på Figur 22 kan også uttrykkes som en ligning. Ligningen for nødvendig rømningstid $t_{nødvendig}$ ser slik ut:

$$t_{nødvendig} = t_{deteksjon} + t_{reaksjon} + t_{forflytning}$$

Hvor

$t_{deteksjon}$ er forventet tid brukt på deteksjon av brann,

$t_{reaksjon}$ er forventet benyttet tid på reaksjon av brannen og

$t_{forflytning}$ er forventet tid brukt på forflytningen

Hvordan bestemme verdien av de ulike faktorene er beskrevet nærmere i Tabell 24. De usikkerhetene som er knyttet til bestemmelsen av verdiene er beskrevet. Det er også nevnt enkelte scenario som verdiene gitt i SINTEFs byggdetalj ikke nødvendigvis tar hensyn til.

Tabell 24: Gjennomgang av deteksjonstid, reaksjonstid og forflytningstid fra rømningsberegninger

	Beskrivelse
Deteksjonstid $t_{deteksjon}$	<p>Deteksjonstiden finnes det ingen enkel metode for å bestemme, grunnet den store variansen for ulike brannscenario. Det som bør vurderes er:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Type brannalarmanlegg og dekningsgrad - Verste troverdige brannscenarioer med tanke på deteksjonstid. - Rekkefølge på varslingsmelding <p>Et potensielt godt utgangspunkt kan være kapittel 7.3 i HO-3/2000- Røykventilasjon [52]. Denne angir responstiden i minutter for ulike røykdetektorer og sprinkleranlegg.</p>
Usikkerhet:	Scenario hvor brannalarmanlegget er utkoblet eller ikke har dekning over rommet hvor brannen begynner, foreligger som usikkerheter ved bruk av denne tabellverdien direkte.
Reaksjonstid $t_{reaksjon}$	De veiledende verdiene for reaksjonstid er basert på bruken av bygningen. Verdiene fra Byggdetalj er gjengitt 520.385 i Tabell 25.

Tabell 25: Veiledende reaksjonstider for enkelte virksomheter

Virksomhet	Personer ser brannen	Reaksjonstid i minutter
Offentlig miljø, skole, kontor, varehus, butikk	Ja	1
Varehus uten rømningsalarm	Nei	4
Varehus alarmklokke	Nei	3,5
Varehus, enkel talevarsling	Nei	2
Varehus, informativ talevarsling	Nei	1
Mindre lokaler med alarmgiver i aktuelt lokale, mindre kino, butikk, kirke	Nei	1
Sykehus, personale, enkel akustisk signal	Nei	2
Sykehus, personale	Nei	1
Nattklubb, personale	Nei	1 - 1,5
Nattklubb, gjester	Nei	3 - 5

Usikkerhet: Det bør legges vekt på at alarmeringen ikke alltid er tilrettelagt for alle - eksempelvis er effekten av talevarsling liten for hørselshemmede. Andre scenario hvor reaksjonstiden kan øke er store uoversiktlige bygg, hvor man oppfatter brannalarmen men ikke brannen.

Forflytningstid
 $t_{forflytning}$ Nødvendig forflytningstid beregnes gjennom å summere tiden brukt over hele rømningsveien. Dette beregnes vanligvis som

$$t_{forflytning} = t_{gang} + t_{dør}$$

$$t_{gang} = L/v$$

med L som lengden på rømningsveien og v er ganghastighet (m/s)

$$t_{dør} = N/(B \cdot f)$$

Hvor N er antall personer som skal passere døra, B er døras bredde og f er forventet strømhastighet gjennom en passasje.

Beskrivelse

Det finnes tabulerte verdier for ganghastigheter for personer uten nedsatt funksjonsevne, ganghastigheter i sjenerende røyk, strømningshastigheter der enkelte kan ha nedsatt funksjonsevne, og strømningshastigheter gjennom døråpninger.

Usikkerhet: Det fins mange scenarioer som kan påvirke forflytningstiden. Alle disse skaper usikkerhet rundt resultatet. Noen av disse er beskrevet her: Det er viktig å ta hensyn til potensielle kødannelser ved innsnevring, da køen ikke er raskere enn det minste gangbredde tillater. I tillegg kan endringer i rømningsretning, terskler eller påvirkning av giftige branngasser delvis eller fullstendig stanse ganghastighetene. Store ansamlinger med mennesker i auditorier eller lignende kan også påvirke forflytningstiden på grunn av trengsel. I tillegg har en større risiko ved vertikal forflytning for eldre.

De usikkerhetene som blir fremvist i Tabell 24 bidrar til usikkerhet rundt resultatet av håndberegningene og derav behovet for en større sikkerhetsfaktor. Behovet for sikkerhetsfaktor må for øvrig alltid vurderes i sammenheng med den beregnede tiden.

8. Fravik 4 – Overflater og kledning

Som del av analysen på bruk av fleretasjes trekonstruksjoner er det sett på effekten av brennbare overflater og kledninger. Dette gjelder så vel innvendig overflate og kledning som utvendig overflate og kledning. Som det står beskrevet i veiledningen til kapittel § 11-9. Materialer og produkters egenskaper ved brann om innvendig kledning:

«De branntekniske egenskapene til innvendige overflater (himling, vegger og golv) har betydning for brannforløpet inntil det blir full overtenning. Valg av produkter vil derfor ha betydning for hvor raskt antennelse kan skje og for varmeavgivelsen og røykutviklingen under brann»

Og om utvendig kledning:

«Utvendige overflater på vegger og tak vil vanligvis ikke ha avgjørende betydning i det tidlige brannforløpet med mindre byggverket antennes utvendig, men kan ha stor betydning for brannspredningen når brannen har blitt mer omfattende (etter overtenning)»

Det er vanskelig å kvantifisere kravene gitt i forskriften og da vurdere i hvilken grad bruk av brennbare overflater er akseptabelt.

8.1. Beskrivelse av fravik

Forskrift om tekniske krav til byggverk er fleksibel ved valg av produkt og dens egenskaper ved brann. Ordlyden i byggteknisk forskrift er relatert direkte til den nye klassifiseringen for brannreaksjonsklasser:

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

Veiledningen beskriver de preaksepterte ytelsene til overflater og kledninger i to tabeller - disse er gjengitt i Tabell 26. Samtlige krav til kledning i tabellen har for øvrig klassifisering lik K₂10, som angir beskyttelse mot antennelse i 10 minutter for kledningen og bakenforliggende materiale.

Ubehandlet trevirke oppnår brannpåvirkningsklassifisering D-s2,d0, men trevirke kan oppnå klassifisering B-s1,d0 med brannhemmende behandling. De overflate- og kledningskrav som krever tiltak er markert med grå.

Tabell 26: Krav til ytelser for overflater og kledninger

Brannklasse Risikoklasse	1		2		3	
	1-5	6	1-5	6	1-5	6
Overflater i brannceller som ikke er rømningsvei						
Vegger og i himling/tak (< 200 m ²)	D-s2,d0	B-s1,d0	D-s2,d0	B-s1,d0	D-s2,d0	B-s1,d0
Vegger og i himling/tak (> 200 m ²)	D-s2,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0
Sjakter og hulrom	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0
Overflater i brannceller som er rømningsvei						
Vegger og i himling/tak	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0
Golv	D _{fl} -s1	B-s1,d0	D _{fl} -s1	B-s1,d0	D _{fl} -s1	B-s1,d0
Utvendige overflater						
Overflater på ytterkledning	D-s3,d0	D-s3,d0	B-s3,d0	B-s3,d0	B-s3,d0	B-s3,d0
Kledninger med krav K₂10						
Ikke rømningsvei (< 200 m ²)	D-s2,d0	B-s1,d0	D-s2,d0	B-s1,d0	D-s2,d0	B-s1,d0
Ikke rømningsvei (> 200 m ²)	D-s2,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0	B-s1,d0
Rømningsvei	B-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0
Sjakter og hulrom	B-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A2-s1,d0

Oppsummering av tabellen for brannklasse 3: Innvendige overflater/kledning har krav lik B-s1,d0. Kun vegger og tak som ikke er en del av rømningsveien og hvor branncellen er mindre enn 200 m² har brannreaksjonsklasse lik D-s2,d0. Kledning i rømningsvei og i sjakter og hulrom har krav lik A2-s1,d0.

I tillegg til tabellens preaksepterte ytelser presiseres følgende i veiledningen til teknisk forskrift for analyse av overflater og kledninger:

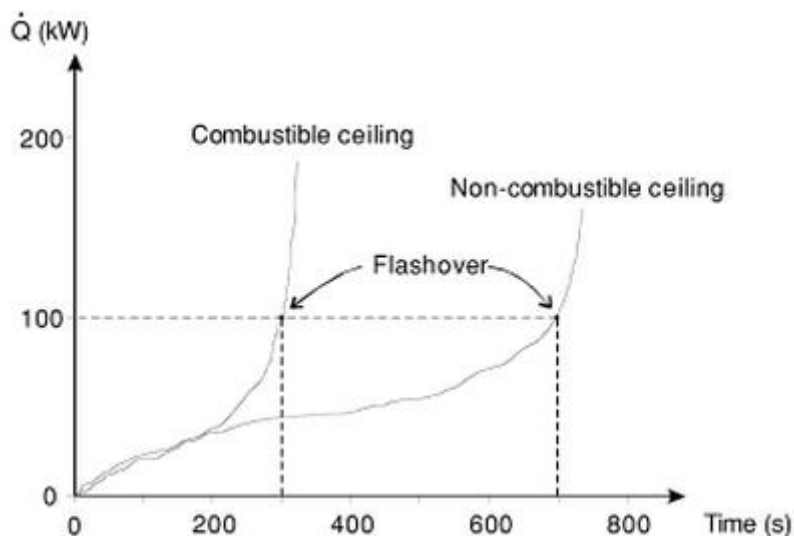
«Selv om sikkerhet ved brann verifiseres ved analyse, må innvendige overflater på vegger og i himlinger ha minst klasse D-s2,d0»

Overflater fra sekundære konstruksjoner i massivtre vil gi brannpåvirkningsklasse lik D-s2,d0. Dette gir fravik fra veiledningen. Det kan også være ønskelig å benytte brennbar utvendig kledning, dette medfører fravik som må analyseres. Selve håndteringen av fraviket er enklest håndtert ved iverksetting av kompensierende tiltak. Effektene ulike kompensierende tiltak er diskutert i kapittel 9 – enkelte andre spesifikke sikkerhetstiltak er diskutert i neste avsnitt.

8.2. Metoder for dokumentasjon

Konsekvensanalyse:

Forskjellen ved brennbar og ubrennbar overflate i himlingen, og hvordan denne påvirker tiden til flashover kan en finne i «*Enclosure fire dynamics*» [53]. Figuren viser brannutviklingen for samme startbrann men med ulik overflate i himlingen – det kan trekkes paralleller for oppførselen fra brennbar himling til brennbare overflater og kledninger på vegger:



Figur 23: Varmeavgivelsesrate plottet mot tid for brennbar og ubrennbar himling med samme startbrann. Hentet fra [53]

Bruken av brennbar innvendig kledning/overflater har påvirkning på brannens tidlige utvikling. Om de sekundære konstruksjonene oppføres i tre og ikke blir beskyttet/behandlet vil dette kunne bidra til det tidlige brannforløpet og slik sett påvirke personsikkerheten. Det stilles derfor krav til brannreaksjonsklassen til overflater og kledninger.

En annen konsekvens av synlig brennbare overflater kan være at sannsynligheten for antennelse øker. Det er vanskelig å verifisere denne effekten for tynge trekonstruksjoner, da mange hevder at massivtre og limtre er tungt antennelig. Det er vanskelig å bekrefte eller avkrefte denne effekten. Hendelsen ansees for å være lite sannsynlig mye grunnet vanskeligheten ved å antenne massive konstruksjoner.

Det kan benyttes ubehandlede brennbare overflater på utvendig kledning, men som beskrevet i kapittel 7.2, er det behov for ubrennbare overflater i kjølesone over vindu.

Risikomatrise

De negative konsekvenser ved å ha brennbare overflater blir implementert i en risikomatrise. Dette er for å bedre få oversikt over hvilke konsekvenser som må adresseres (rødt), hvilke konsekvenser som bør vurderes (gult) og de konsekvenser som er innenfor akseptabel risiko (grønt).

Meget sannsynlig				Hendelse 1	
Sannsynlig					
Mindre sannsynlig					
Lite sannsynlig			Hendelse 2		
	Ufarlig	En viss fare	Kritisk	Farlig	Katastrofalt

Hendelse 1: Bruk av brennbare overflater (økt konsekvens for tidlig brannforløp)

Konsekvensen er tidligere overtenning, som anses for å være viktig ved rømning – «farlig»
Sannsynligheten er også meget sannsynlig. Spesielt ved bruk av brennbart tak i branncelle.

Hendelse 2: Bruk av brennbare overflater (økt sannsynlighet for antennelse)

Konsekvensen er økt sannsynlighet for brann. – «kritisk»
Sannsynligheten vurderes til lite sannsynlig.

Sikkerhetstiltak

Det bør iverksettes konsekvensreducerende eller sannsynlighetsreducerende tiltak for hendelse 1. Eksempler på slike kompenserende tiltak er gitt i kapittel 9 – Kompenserende tiltak. Hendelse 2 havner for øvrig under akseptabel risiko, og trenger ikke håndteres

Hendelse 1 kan håndteres ved å kle de innvendige overflatene med gips. Gipskledning ansees for å være et konsekvensreducerende tiltak. En vil hindre tidlig overtenning og slik sett sikre at rømningstiden er ivaretatt. Gips vil også kunne forsinke forkullingen av de sekundære konstruksjonene og senke den immobile brannenergien som vist i analysene fra kapitlet om hovedbæresystem. Det vil også kunne være nødvendig å installere fullsprinkling i bygget, som både sannsynlighetsreducerende og konsekvensreducerende tiltak.

9. Kompenserende tiltak

Kompenserende tiltak er tiltak som iverksettes for å opprettholde tilfredsstillende brannsikkerhetsnivå ved fravik fra preaksepterte løsninger. De preaksepterte ytelsene er angitt i veiledningen til byggteknisk forskrift. Kompenserende tiltak sammenfaller med begrepet teknisk bytte. Begrepene kan forklares gjennom å benytte en komparativ analyse. En bestemmer referansebyggverket og analysebyggverket og beskriver hvilke forskjeller det er mellom byggene. Det en ønsker å oppnå er i bunn og grunn at sikkerhetsnivået er tilsvarende eller bedre for analysebyggverket. Dersom eksempelvis analysebyggverket har lange rømningsveier (> 30m) kan det være aktuelt å legge inn ekstra røykseksjonering som kompenserende tiltak. Altså byttes det preaksepterte tiltaket «kort rømningsvei» ut mot tiltaket røykseksjonering. Det må presiseres at om ett sikkerhetstiltak skal være kompenserende kan ikke tiltaket være en preakseptert ytelse. Altså er det beskrevet i veiledningen at det skal sprinkles så kan ikke sprinkleranlegg

Den vanligste måten å dele inn brannsikkerhetstiltak er ved aktive tiltak og passive tiltak. Felles for aktive tiltak er at de aktiveres ved brannscenario, mens felles for passive tiltak er at de er implementert i bygningskroppen. Tiltakene kan også deles inn i eksempelvis sannsynlighetsreducerende og konsekvensreducerende tiltak, hvor de sannsynlighetsreducerende tiltakene reduserer sannsynligheten for uønsket hendelse mens konsekvensreducerende tiltak reduserer konsekvensen av uønsket hendelse. Noe av problemet med sannsynlighetsreducerende tiltak er at forskriften i utgangspunktet virker konsekvensbasert. Om en reduserer sannsynligheten for uønsket hendelse vil ikke dette nødvendigvis dekke funksjonskravet. Det finnes likevel deterministiske metoder til å analysere effekten av risikoreducerende tiltak, eksempelvis indekismetoden, hendelsestre eller lignende.

Kompenserende tiltak knyttes til den manglende preaksepterte ytelsen og derav kravet det skal kompenseres for. Gjennom riktig forståelse av kravet og korrekt bruk av kompenserende tiltak er det fullt mulig å oppnå like god eller bedre brannsikkerhetsnivå selv ved fravik fra preaksepterte ytelser. Årsaken til at kapitelet er inkludert er at det viser seg ofte at brannsikkerhetsrådgiver har benyttet et tiltak som ikke korrelerer med ønsket effekt. Ett eksempel på feil bruk av kompenserende tiltak kan være at det oppstår fravik gjennom bruken av brennbart bærende hovedsystem, når kravet er ubrennbart bærende hovedsystem. Som kompenserende tiltak er det benyttet en strengere branncelleinndeling enn forskriftskravet. Det iverksatte tiltaket stemmer da ikke overens med forskriftskravet da branncelleinndelingen sikrer lengre spredningstid som personsikkerhetstiltak, mens kravet om ubrennbar bærende hovedkonstruksjon er satt for å hindre kollaps av bygget, altså noe en brann med noe lengre spredningstid ikke nødvendigvis vil forhindre.

Grunnet et stort antall fravik ved å benytte tre som byggemateriale er det valgt å skrive om de ulike kompenserende tiltak som kunne være aktuelle å benytte ved prosjektering av fleretasjes trekonstruksjoner. Tiltakene er gjennomgått under, det er pekt på hvilke type krav tiltakene kan kompensere for, hvilken effekt som kan forventes og hvilke forutsetninger som bør legges til grunn. Det er også beskrevet hvilken pålitelighet og sensitivitet som tiltaket forventes å ha.

Oversikt over ulike tiltakene er vist i Tabell 27. Av tiltakene er det enkelte som det er valgt å skrive mer om – disse er markert i tabellen. Dette er tiltak som kan være er påkrevd, men som ofte benyttes som teknisk bytte. Disse blir gjennomgått i detalj etter tabellen.

Tabell 27: Oversikt over aktive og passive kompenserende tiltak

Aktive tiltak		Passive tiltak	
Brannalarmsystem	Lyd	Behandling av treverk	Impregnering
	Lys		Overflatebehandling
	Vibrasjon	Beskyttelse av treverk med gips	
Branndeteksjonsanlegg	Røyk	Branncelleinndeling	
	Varme	Brannseksjonering	
	Flamme	Kontroll på spredning av røyk, spjeld	
	Brenngass	Overdimensjonering av strukturelle ytelser	
Inert luft		Branntetting, brannstopp	
Varme- og røykventilasjon		Avkjølingszone over vindu	
Spjeld i ventilasjonssystem			
Automatiske lukke/åpnesystem for dører			
Automatisk brannsløkkeanlegg	Sprinkler		
	Vanntåke		
	Skum		
Branntavle med indikasjon over hvor det brenner.			

9.1. Automatisk slokkeanlegg

Automatisk slokkeanlegg består av et rørsystem som leder vann ut til dyser. Dysene kalles for sprinklerhoder. Sprinklerhodene utløses ved brann på grunn av temperaturøkningen. Akkurat hvilken temperaturøkning som utløser slokkeanlegget kan endres gjennom et bevisst valg av sprinklerhode. Det finnes flere typer automatisk slokkeanlegg. De viktigste som benyttes i byggverk er:

- Sprinkleranlegg: Automatisk slokkeanlegg som benytter vannets høye spesifikke varmekapasitet å ta opp energien fra brannen. Dette er det mest brukte automatiske slokkeanlegget for byggverk. Boligsprinkleranlegg er de mest benyttede for boliger og er basert på en teknologi om rask responstid.
- Vanntåkeanlegg: Vanntåkeanlegg er et automatisk slokkeanlegg som benytter små vanndråper som spres i lufta som en tåke. De små vanndråpene oppstår i en dyse som knuser vannet, enten mekanisk eller ved å kollidere to vannstråler. Små vanndråper gir større nedkjølingseffekt, og benytter mindre vann til samme nedkjøling som sprinkleranlegg. Dette kan gi mindre vannskader sammenlignet med sprinkleranlegg ved utløsning.

Herunder finnes det nærmere spesifisering av oppførselen og egenskapene til anlegget:

- Våtanlegg: Den vanligste typen sprinkleranlegg – hvor vannet står helt fram til sprinklerhodet. Når sprinklerhodet utløses kommer vannet umiddelbart.
- Tørranlegg: Vannet står ikke i rørene, men spres til dysene etter utløsning. Dette er for å sikre at frost ikke ødelegger anlegget. Tørranlegg har litt lengre reaksjonstid sammenlignet med våtanlegg, men fremstår som et mer robust alternativ.
- Delugeanlegg: Et stort antall dyser utløses samtidig. Delugeanlegg benyttes der faren for raskt brannforløp er stor. Delugeanlegg utføres som tørranlegg, hvor de ytterste dysene, sprinklerhodene, er åpne.
- Pre-action anlegg: Vannet står ikke i rørene, altså et tørranlegg, hvor et uavhengig branndeteksjonsanlegg åpner ventilen. Dette er for å sikre at ikke mekanisk skade eller lekkasjer utløser anlegget og hvor lekkasje kan medføre store skader på utstyr og inventar. Eksempler på bruk som krever pre-action anlegg kan være server-rom

I tillegg finnes de litt mer spesielle automatiske slokkeanleggene – skumanlegg, gassanlegg og inert luft. Skumanlegg er mest benyttet ved slokking av brennbare væsker. Gassanlegg fyller rom med gass som fortrenger oksygenet når brann blir detektert og med inert luft menes luft hvor vanlige materialer ikke vil antenne og forbrenne på grunn av tilsetningen av inerte gasser, eventuelt fjerning av oksygen ved brann.

Krav til automatisk brannslukkeanlegg

Følgende byggverk krever automatiske brannslukkeanlegg i henhold til Byggteknisk forskrift § 11-12, Tiltak for å påvirke rømmings og redningstider:

1. Byggverk som krever heis i risikoklasse 4
 - Risikoklasse 4 tilsvarer byggverk beregnet for overnatting hvor personer kjenner rømningsforholdene. Eksempelvis boligblokk, studentboliger eller barnehjem.
2. Alle byggverk i risikoklasse 6
 - Risikoklasse 6 tilsvarer byggverk beregnet for overnatting hvor personene ikke kjenner rømningsforholdene. Eksempelvis fengsel, asylmottak, sykehus og sykehjem.

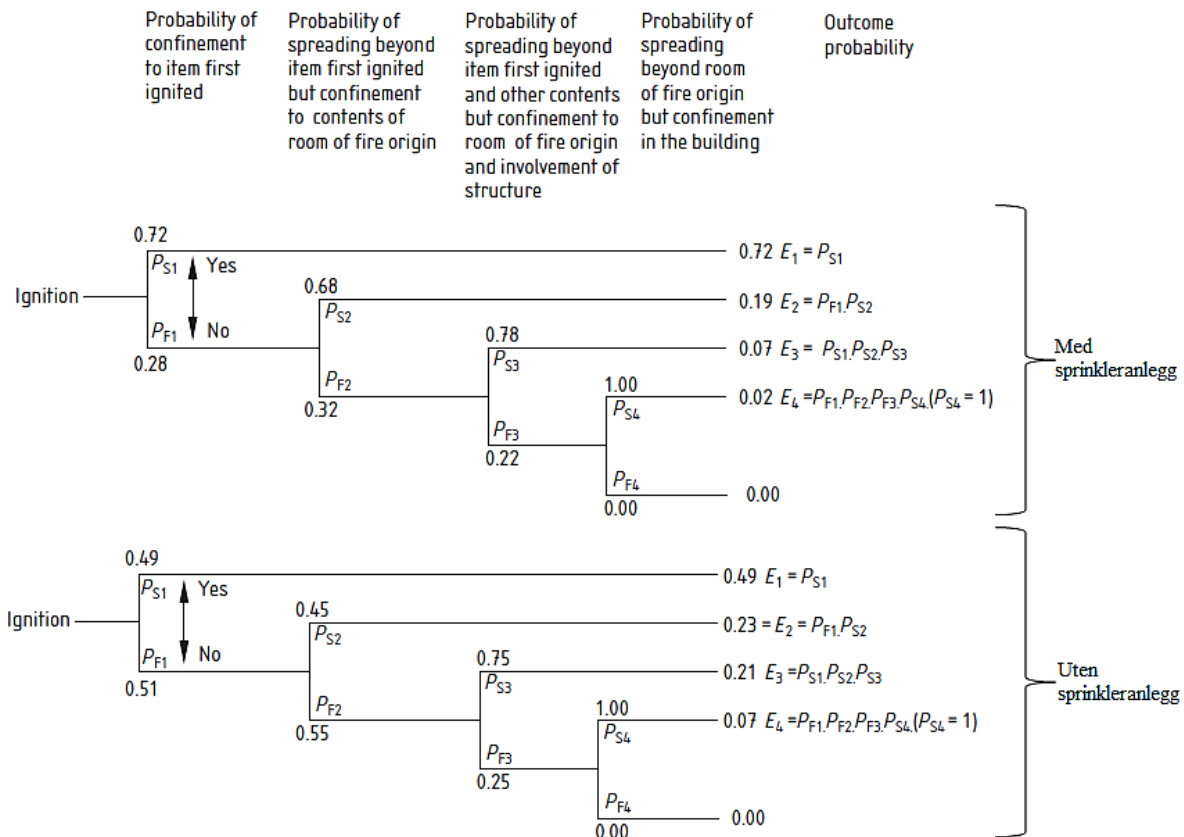
Hvilke byggverk krever heis? (Byggteknisk forskrift § 12-3, Krav om heis i byggverk)

1. Byggverk for publikum eller arbeidsbygning med to etasjer eller mer.
2. Bygning med tre etasjer eller flere som har boenhet. (Tiltenkt krav: byggverk hvor atkomst fra inngangsparti til boenhetens inngangsdør er over en etasje)

Altså gjelder kravet om automatiske brannsløkkeanlegg, boliger med mer tre etasjer eller mer, og spesialbyggverk som sykehus og sykehjem. I brannklasse 3, som er oppgavens hovedfokus, vil en alltid ha 3 etasjer eller mer.

Effekten av automatisk brannsløkkeanlegg

Et automatisk brannsløkkeanlegg er dimensjonert for å øke rømnings- og redningstid gjennom å kontrollere eller eventuelt slukke et tidlig branntilløp. Sannsynligheten for at det automatiske brannsløkkeanlegget vil fungere ligger i størrelsesorden 80-90 %. (Hvorav maksimalverdi ligger opp mot 95 %, typisk verdi ligger mellom 80-90 % og minimumsverdi for eldre anlegg ligger på 70 %). Dette er verdier hentet fra britisk standard [54]. Denne verdien er en forventet pålitelighetsverdi. Dette må ikke forveksles med den forventede effekten en vil kun oppleve for sprinkleranlegget. Forventet effekten har den britiske standarden fra 2003 presentert i et hendelsestre og er gjengitt i Figur 24.



Figur 24: Hendelsestre for branntilløp med og uten sprinkleranlegg

Av Figur 24 ser vi at sannsynlighet for at brannen begrenses til en enkelt branncelle, men at konstruksjonen inkluderes i brannen er lik 0,07 hvis sprinkleranlegget utløses, mens samme sannsynlighet er lik 0,21 uten sprinkleranlegg.

Det som for øvrig er interessant er at brannen kan forventes å bli begrenset til branncellen, uten at konstruksjonen bidrar til videre brannforløp, med en sannsynlighet lik 0,91 med sprinkleranlegg. Samme sannsynlighet uten sprinkleranlegg er 0,72. Eller beskrevet på en annen måte: sannsynligheten for flashover er lik 0,09 (0,07 + 0,02) med sprinkleranlegg, og lik 0,28 (0,21 + 0,07) uten sprinkleranlegg. Flashover er da definert som punktet hvor alt brennbart materiale i branncellen bidrar til videre brannforløp.

Hvilke type krav kan automatisk brannsløkkeanlegg kompensere for?

Automatiske brannsløkkeanlegg kan både kompensere for konstruksjonssikkerhet og personsikkerhet, grunnet dens påvirkning på sannsynligheten for fullstendig brannforløp, samt påvirkning på tidlig brannforløp.

Konstruksjonssikkerhet

Sannsynligheten for at konstruksjonen blir involvert i en full utviklet brann er antatt å være tilnærmet proporsjonal med design brannenergien i bygningen. Sprinklersystem reduserer sannsynligheten for

strukturell skade på bygningen med en faktor på 2,5 [54, 55]. Dette betyr også at dimensjonerende spesifikk brannenergi, som for øvrig er definert som 20 % sannsynlighet for overskridelse, kan reduseres med en faktor på 2,5 til 50 % sannsynlighet for overskridelse. Dette tilsvarer å benytte 50 % fraktilen, eller median, for kurven angitt i Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann. Det må presiseres at median og gjennomsnitt ikke er samme verdi, ved gumbelfordeling.

Dette sammenfaller for øvrig ikke med faktoren på 0,6 som angitt i det nasjonale tillegget for beregning av brannenergi, som for øvrig også er gjennomgått i kapittel 5.2. Denne faktoren ifølge beregningene overestimerer den dempede effekten av sprinkleranlegget. Faktoren på 0,6 tar trolig hensyn til sprinkler som både sannsynlighetsreducerende tiltak og konsekvensreducerende tiltak og kan slikt sett være et godt estimat.

Personsikkerhet

Selv om sprinkleranlegg kan benyttes til å redusere sannsynligheten for kollaps og slik sett optimalisere dimensjoneringen av bæresystemet gjennom endring av brannlasten, vil ikke et byggverk med høy brannmotstand uten sprinkling være ekvivalent med et byggverk med lav brannmotstand med sprinkling. Cirka 50 % av dødsfall og 75 % av skader på grunn av brann, begrenser seg til branncellen hvor brannen startet. I disse tilfellene kan implementering av sprinkleranlegg påvirke risikonivået, mens økt brannmotstand kan ikke. En kan ta hensyn til denne effekten gjennom å endre sikkerhetsfaktorer for nødvendig rømningstid og slik sett tillate seg selv å ha lengre rømningsveier enn preakseptert. En kan også justere krav til overflater og derav endre det tidlige brannforløp, men dette kan det være vanskeligere å få aksept for, grunnet den store konsekvensen brennbare overflater har. Se Figur 23.

9.2. Beskyttelse av treverk

Å beskytte treverket fra brannpåvirkning er et vanlig kompenserende tiltak som ofte benyttes ved bygging av trekonstruksjoner. Som beskrevet i teoridelen er det slik at overflater av trevirke har brannreaksjonsklasse:

D-s2,d0

Den mest benyttede typen kledning er gips. Fordelen med gips er høy spesifikk varmekapasitet og lav varmeledningsevne, som betyr at det krever mye energi for å oppnå en temperaturøkning, samt at temperaturøkning bak gipskledningen er lav. Gips er også ubrennbar og vil ikke bidra til videre brannforløp.

Krav til beskyttelse av overflate

Ettersom det er strenge krav til overflater i brannklasse 3, som før øvrig er gjennomgått i kapittel 8 – Overflater og kledning, vil det være behov for beskyttelse av overflatene ved:

1. Større brannceller ($A_f > 200m^2$)
2. Rømningsveier
3. Sjakter og hulrom.

I tillegg er det krav til klassifisering B-s3,d0, på utvendig kledning. Brannbehandlet trevirke kan oppnå klassifisering B-s2,d0, men som diskutert tidligere kan det være nødvendig med ubrennbar kjølesone over vindu og bruken av utvendig brennbar kledning på andres steder må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

Effekten av gips

Gips anses for å være et konsekvensreducerende tiltak. Det har den effekt at det bremser brannforløpet og beskytter bakenforliggende materiale fra temperaturøkning. Om utført korrekt, altså at innfestningen og plassering er utført i henhold til leverandørens spesifikasjoner, vil en kunne oppnå stor effekt på brannforløpet. En kvantifisert verdi for effekten av gips er presentert i Tabell 7: Tabulerte verdier for start av forkulling (t_{ch}) og nedfallstider (t_f) for gipskledning [min].

Den samme tabellen blir presentert her. Dette er eksperimentelle data for start av forkulling (t_{ch}) og nedfallstider for gipskledning (t_f). Hvor da gips type A er såkalt standard gips, mens type F er brannklassifisert gips med ekstra tilslag for bedre ytelse ved brann.

Tabell 28: Tabulerte verdier for start av forkulling (t_{ch}) og nedfallstider (t_f) for gipskledning [min]

Gipskledning	Tykkelse	Vegger		Bjelkelag	
		T_{ch}	T_f	T_{ch}	T_f
Type A	12,5	15,5	16,8	15,5	15,5
Type F	12,5	15,5	32,3	15,5	22,5
Type F	15,0	20,0	43,5	24,5	25,0
Type A og type A	25,0	33,0	38,5	31,0	-
Type F og type A	25,0	45,5	50,8	36,0	36,0
Type F og type A	27,5	50,8	81,0	36,0	50,0
Type F og type F	25,0	45,5	60,0	36,0	47,0
Type F og type F	30,0	56,0	80,0	46,0	57,0

Hvilke krav kan beskyttelse av treverk kompensere for?

Gips kan kompensere for konstruksjonssikkerhet og personsikkerhet. Konstruksjonssikkerhet ved beskyttelse av den brennbare konstruksjonen og slik sett senke den immobile brannenergien. Personsikkerhet ved påvirkning av tidlig brannforløp.

Det er vanskelig å kvantifisere effekten gips har for personsikkerheten. Den øker tilgjengelig rømningstid og senker antennelsesfaren. For konstruksjonssikkerhet senker gips forkullingsdybden og derav påvirkningen brannforløpet har på bærende konstruksjonsdeler.

10. Diskusjon

Dette kapitlet er en diskusjon av de resultat som er funnet i oppgaven. Først diskuteres forskriften, restrisiko og beregningsmodeller. Deretter drøftes de ulike fravikene gjennomgått i oppgaven - brannenergi, hovedbæresystem, sekundære bygningsdeler og overflater/kledning. Tilslutt drøftes de usikkerheter som er knyttet til oppgaven og de valgte dimensjoneringsmetodene.

10.1. Drøfting av forskrift, restrisiko og beregningsmodeller

Opgaven tar ingen stilling til om de sikkerhetsfaktorene som er innlagt i forskrift og veiledningen i forskriften er tilfredsstillende. I utgangspunktet skal en skal være lojal mot regelverket. Dette er viktig fordi en vil unngå at brannrådgiveren både er lovgiver og dommer på samme tidspunkt. Det finnes flere eksempler på at vilje kan ta over argumentasjonen, og at ønske om å godkjenne løsningen overskygger konsekvensene av valgene. Dette kan primært gjøres ved bruk av subjektive analyser.

Opgavens intensjon er ikke at brannrådgiver skal innta en passiv rolle og kun følger reglene slavisk, men heller at en bør skille mellom prosjekteringsarbeid og arbeid med optimalisering av innlagte politiske og samfunnsmessige sikkerhetsfaktorer. Allikevel må det nevnes at noe av det viktigste innen brannsikkersrådgivning å se helheten, så det kan ikke utelukkes at å benytte forskriften og veiledning, uten å tenke på intensjonen til kravene, også kan være feil tilnærming.

Etter mye arbeid med standardiseringsverktøyene virker beregningsmodellene overkompliserte, mangelfulle og uten tydelig teoretisk grunnlag. Jeg savner enkelte utledninger og utgivelser av eksperimentelle data fra Eurokodene. De virker ikke gode nok til å håndtere problematikken som finnes ved bruk av trekonstruksjoner. Spesielt framstår eurokodene overkompliserte ved analyse av hovedbæresystem. Metodene er mer nøyaktige nå, sammenlignet med eldre metoder, men likevel krever nøyaktige metoder spesifikk input og innehar begrensede gyldighetsområder. Kompleksiteten av beregningsmodellene må sees i sammenheng med forskriftens ønske om dimensjonering etter fullstendig brannforløp. Fullstendig brannforløp er et krevende tema, både grunnet lite erfaringsdata og store forskjeller fra prosjekt til prosjekt. Flere av modellene som er benyttet i denne oppgaven har også blitt endret over tid, på grunn av gjennomgang fra internasjonalt fagmiljø eller nye erfaringsdata. Det som var korrekt i går, kan overraskende nok vurderes til feil i dag.

Ettersom vurdering av modellene og deres nøyaktighet er utenfor oppgavens fokusområde, er oppgaven nødt til å forholde seg til de resultater som er fremstilt. Spesielt viser det seg at forkullingsdybde for parametrisk brannforløp, Eurokode 5 – del 2, tillegg A, har store begrensninger ved bruk. De scenario som en kan forvente for trekonstruksjon i brannklasse 3, havner ofte utenfor gyldighetsområdet til modellen. Det kan tenkes at modellene ikke er designet til å håndtere den store mengden brannenergi som oppstår ved bruk av trekonstruksjoner i både primære og sekundære bygningsdeler – gitt at ingen kompensierende tiltak er iverksatt.

10.2. Analyse av brannenergi

Den immobile brannenergien kan for trekonstruksjoner utgjøre hele 500 MJ/m^2 – som vist i eksempelcase for beregning av brannenergi. Dette utgjør en betydelig del av den totale brannlasten i branncellen. Oppgaven følger de anvisninger gitt av standardiserte verktøy, så metoden og resultatet er korrekt, men om resultatet er fornuftig er det mer vanskelig å ta stilling til. Korrekt metode, men ufornuftig resultat kan skyldes at modellen er forenklet forbi vanskeligheten av faktiske forhold. Det er lite sannsynlig at for alle scenario vil alle vegger, tak og gulv kunne forkulle såpass mye at det utgjør 500 MJ/m^2 .

Om en velger å benytte seg av sprinkling, kan brannenergien i henhold til det norske tillegget til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann [36], reduseres med 40 %. Om bygningen i tillegg kles med gips, vil en kunne få mye lavere forkullingsdybde, noe som betyr lavere immobil brannenergi. Med sprinkler og gips utgjør tillegget fra trekonstruksjoner i eksempelet i oppgaven cirka 150 MJ/m^2 . Dette gir totalt sett at bygningen kan vurderes til å være i brannklasse 3. Hvis ingen av de kompensierende tiltakene benyttes, kan konsekvensen av den høye brannenergien bety at bygningen potensielt havner i brannklasse 4. I brannklasse 4 benyttes forskriftsformuleringene til utforming av akseptkriterier, men det må vektlegges at akseptkriterier er vanskelige å produsere og dimensjonere etter, spesielt når forskriften benytter åpne subjektive formuleringer som: «tilfredsstillende nivå», «liten sannsynlighet», eller «effektiv rømning». Det er godt mulig å ende opp med gode løsninger ved bruk av analyse i brannklasse 4, men primært er tilnærmingen med egenproduserte akseptkriterier å fraråde. Uansett må man ha en måte å beregne dette på, og jeg har vanskelig for å se at dette vil kunne løses forsvarlig uten kompensierende tiltak.

10.3. Analyse av hovedbæresystem

Forskriften benytter formuleringen: «bæring ved fullstendig brannforløp», og formuleringen som sådan antyder ikke hvilken tid dette tilsvarer i standardbrannpåvirkningstid for de ulike materialene. En mulig tolkning fra veiledningens preaksepterte ytelse (R90 A2-s1,d0) er at 90 minutter tilsvarer fullstendig brannforløp. Dette er ikke korrekt, da en bygningsdel med klassifisering R90 er testet med 90 minutter standardbrann-påkjennning og dette kan tilsvare alt fra 60 minutter med rask utviklingshastighet eller 150 minutter med lav utviklingshastighet for det naturlige brannforløpet. En vurdering av uheldig brannscenario viser at en lang brann uten nødvendigvis høy maksimaltemperatur, er verre for trekonstruksjoner sammenlignet med kort men mer hurtig utviklende brann. Korrekt tolkning av formuleringen blir derfor, som vist i oppgaven, hvor alle scenario, heldige og uheldige for bygningsdelene, blir vurdert, og hvor forløpene som kan vurderes som verste troverdige blir dimensjonerende.

Analysene for ekvivalent branneksponeeringstid viser at et byggverk i brannklasse 3, prosjektert etter preaksepterte ytelse fra veiledningen, ikke nødvendigvis opprettholder funksjonskravet for bæreevne og stabilitet for et fullstendig brannforløp for alle scenario. Det er indirekte angitt en restrisiko, som kan føre til kollaps. Det er usannsynlig at konstruksjonen går til kollaps, men beregningen tilser

allikevel at det finnes scenario hvor konstruksjonen ikke tåler påkjenningen fra brannforløpet. Det er ønskelig å benytte funnet av akseptabel risiko til å oppnå samme sikkerhetsnivå for vårt analysebyggverk med trekonstruksjon. Dette har blitt gjennomført for tre ulike analysebyggverk.

I analyse 1 er det ikke valgt noen sikkerhetstiltak, mens i analyse 2 og 3 er det valgt fullsprinkling og gipskledning. Analyse 2 og 3 har ulik tolkning av effekten gips har for forkullingsforløpet for bakenforliggende materiale.

Analyse 1. Hovedbæresystem og sekundære bygningsdeler i tre. Ingen passive tiltak.

Analyse 2. Hovedbæresystem og sekundære bygningsdeler i tre. Fullsprinklet byggverk og kledning av overflater med gips hvor forventet effekt fra gips er forskjøvet forkullingsforløp.

Analyse 3. Hovedbæresystem og sekundære bygningsdeler i tre. Fullsprinklet byggverk og kledning av overflater med gips hvor forventet effekt fra gips er fjernet forkullingsforløp i tiden hvor gipsen beskytter treverket.

For analyse 1 er problemet at høy brannenergi gir lang brannpåvirkningstid og store forkullingsdybder. Mange av de «normale» åpningsfaktorene og brannenergiverdiene som en kan forvente er også utenfor beregningsmodellens gyldighetsområde. Eksempelvis blir forkullingsdybden med åpningsfaktor 0,04 og mobil brannenergi 200 MJ/m² lik 331 mm for ensidig påvirkning. Dette virker usannsynlig mye. Det har ikke blitt gjennomført noen sikkerhetstiltak for å senke denne brannenergien, og etter analysen kan det i prinsippet utelukkes at en trekonstruksjon uten kompenserende tiltak er en tilfredsstillende løsning.

Ved analyse 2 finner en at mange flere av beregningene havner innenfor gyldighetsområdet, sammenlignet med analyse 1. Dette betyr at beregningene blir mer og mer troverdige, men allikevel kan enkelte «normale» scenario fortsatt ikke vurderes, da disse er utenfor gyldighetsområdet til beregningsmodellen. Både referansebygget og analysebygget er i analyse 2 fullsprinklet. Effekten av sprinkler er det som skiller denne analysen fra forgående analyse, da vurderingen av et forskjøvet forkullingsforløp gir samme resultat for immobil brannenergi som uten gipskledning. At gipskledning ikke har noen forventet begrensende effekt for forkullingsdybden av bygningsdeler, er en meget konservativ tolkning. Tolkningen for forkullingsforløpet for analyse 3 virker derfor mer logisk.

Analyse 3 viser at ved bruk av både gipskledning og sprinklersystem vil en kunne dimensjonere bygningsdeler i trekonstruksjoner. Analysen har få ugyldige beregningsresultater, og de fleste resultatene, både utenfor og innenfor gyldighetsområdet virker plausible. Eksempelvis gir åpningsfaktor lik 0,04 og mobil karakteristisk brannenergi lik 200 MJ/m², en total forkullingsdybde lik 28 mm. Åpningsfaktor lik 0,04 og mobil karakteristisk brannenergi lik 300 MJ/m² gir en total forkullingsdybde lik 92 mm. Selv om resultatet for 300 MJ/m² er så vidt utenfor gyldighetsområdet til modellen, virker resultatet sannsynlig. Tolkningen med fjernet forkullingsforløp grunnet gipskledning kan være noe radikal, men ansees allikevel for å være sannsynlig. Hvilken verdi for forkullingsdybde en velger ved dimensjoneringen av bæresystemet, blir en vurdering gjort av rådgivende ingeniør brann sikkerhet (RiBr) og rådgivende ingeniør bygg (RiB) for det enkelte prosjekt.

Hva betyr analysene for hovedbæresystem?

Oppgaven har kun benyttet de verktøy forskrift med veiledning angir at en skal benytte. Derfor er det positivt at analysene for hovedbæresystem viser at en kan bygge trekonstruksjoner i brannklasse 3. Dette resultatet forutsetter at byggverket både fullsprinkles og at alle trekonstruksjoner kles med gips. I denne oppgaven er det benyttet 2 lag kledning, gips type A + gips type F. Det kan tenkes at andre kledningstyper også vil være akseptable.

For et byggverk prosjektert fullstendig etter preaksepterte ytelser, vil en kunne stå igjen med et visst restrisikonivå. For et byggverk prosjektert i massivtre/limtre, vil en også kunne stå igjen med en restrisiko for konstruksjonen, grunnet enkelte ugyldige beregningsresultater. Det erkjennes at restrisikonivået en står igjen med for trekonstruksjoner er større enn den preaksepterte konstruksjonen. Vurderingen er allikevel den at om en ligger på et sikkerhetsnivå noe lavere enn de preaksepterte ytelser, vil en så lenge funksjonskravet er ivaretatt, ha oppfylt forskriftens formål. Det støttes av utredningen gjennomført av advokatfirmaet Hjort DA [56], på oppdrag for direktoratet for byggkvalitet. Denne betraktningen er viktig for oppgavens dokumentasjon av oppfylt krav for hovedbæresystem. Preakseptert ytelse til ubrennbar konstruksjon er kun stilt ved brannklasse 3, hvor konsekvensen av brann er relativt stor. Det er mulig veiledningen ikke godtar den risiko som en trekonstruksjon i fleretasjes byggverk utgjør, mens forskriften på sin side åpner for muligheten, og i denne oppgaven er det gjennomført flere sikkerhetstiltak for å minimere risikoen.

Modellene inneholder usikkerhet, som gjør at resultatene også er noe usikre. Spesielt ansees forkullingsdybde ved parametrisert brannforløp for å være en modell som bør gjennomgås av det internasjonale fagmiljøet. Det kan også være at enkelte av forutsetningene bør raffineres før en kan benytte beregningene i aktuelle prosjekter.

Det finnes også andre, mer subjektive tilnæringsmetoder til problematikken for hovedbæresystem, eksempelvis deterministisk analyse eller rett og slett kvalifisert synsing. Problemet med slike metoder er at prosjekterende kan påvirke resultatet i større grad, sammenlignet med en brannteknisk kvantitativ analyse, og kan man da egentlig verifisere at teknisk forskrift er ivaretatt?

I kvalitative vurderinger av risiko knyttet til brannsikkerhet generelt, tillegges ofte sprinkleranlegget varierende vekt og effekt. Det er opplagt at et sprinkleranlegg vil ha en betydelig positiv effekt ved en brann, men når det gjelder hovedbæresystemet skal egenskapene dette skal ha for å motstå brann først komme til sin rett når øvrige sikringstiltak nærmest har utspilt sin rolle. Videre kan konsekvensene ved svikt i hovedbæresystemet i høye bygninger være betydelig større enn de fleste andre forhold. Det antas at dette er årsaken til at dimensjoneringsstandardene og VTEK ikke tillegger sprinkling mer effekt for dimensjonering av hovedbæresystemet enn en reduksjonsfaktor på 0,6 på brannlasten (gis i nasjonale tillegg til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann, etter en særskilt vurdering). Bæresystemets brannmotstand er en betydelig faktor for redundansen i sikringskonseptet mot brann.

Det finnes enkelte eksempler fra tidligere tider hvor man i byggesaken har fått en reduksjon på 30 minutter på brannmotstanden til hovedbæresystemet dersom man sprinkler. I «gamle dager» kalte man det gjerne et eksempel på teknisk bytte. Det vil si at man for eksempel i brannklasse 3 oppførte bæresystemet med krav til 60 minutter istedenfor 90 minutters brannmotstand. Dette synes å være basert på mer eller mindre kvalifisert synsing. Med dagens kunnskap, anvisninger, tilnærming og metoder for dimensjonering av brannmotstand for hovedbæresystemet vil en slik tilnærming ikke være tilstrekkelig for å dokumentere og verifisere sikkerheten tilfredsstillende.

Arkitekten for fleretasjes trekonstruksjoner ønsker ofte at bærende bygningsdeler som søyler og bjelker, skal være synlige. Beregningsmessig er det mulig å konkludere at dette er ok, men konsekvensen for brannrådgiver blir mer detaljert analyse. Årsaken til at dette er ok, er at en enkelt søyle, eller en enkelt bjelke ikke utgjør utslagsgivende mye brannenergi, og at det naturlige brannforløpet blir ikke påvirket nevneverdig. Dette må for øvrig ikke bryte med andre krav til brannsikkerhet. En analyse for verifisering er allikevel nødvendig i hvert enkelt tilfelle.

10.4. Analyse av sekundære konstruksjoner

De kvalitative analysene for fraviket på grunn av brennbare sekundære konstruksjoner viser at det for trekonstruksjoner kan være nødvendig med tiltak for å hindre spredningsfaren mellom etasjer og spredning av brann i hulrom. Tiltak som kan være aktuelle, er ubrennbar kjølesone over vindu, slik at en hindrer spredning mellom etasjer. Dette tiltaket bør iverksettes, grunnet store mengder pyrolysegasser som oppstår ved oppvarmingen av et rom hvor alle vegger og dekker består av massivtre. Det kan også være aktuelt å legge inn konsekvensreducerende tiltak, slik at risikoen for spredning av brann til hulrom minimeres. Den massive mengden brannenergi som sekundære konstruksjoner i tre utgjør, er behandlet gjennom korrekt dimensjonering av bygningsdelene som angitt i diskusjonskapitlet for hovedbæresystem.

Generelt sett kan den branntekniske dimensjoneringen av sekundære trekonstruksjoner gjennomføres etter samme forkullingsdybde som ved hovedbæresystem, da begge bygningsdelene er fullstendig gipset. Det kan også være aktuelt å dimensjonere sekundære bygningsdeler etter 60 minutters standardbrann – om dette gir et mer økonomisk resultat, da dette er nok til å oppfylle forskriftens krav.

Det er også begrunnet at dimensjonering av knutepunkt for trekonstruksjoner ved brann ikke vil fremstå som et problem. Dette har bakgrunn i gode beregningsmodeller i Eurokoden og mye detaljert eksperimentelt arbeid på temaet.

10.5. Analyse av overflater og kledning

De kvalitative analysene på brennbare overflater og kledninger viser at en bør iverksette tiltak for å hindre tidlig overtenning. Ettersom gipskledning av alle brennbare overflater og fullsprinkling allerede er presentert som nødvendig som sikkerhetstiltak i kapitlet om hovedbæresystem, vil en ikke måtte

trengte flere tiltak for å oppnå tilstrekkelig rømningssikkerhet. Sannsynligheten og konsekvensen for brann vil være tilfredsstillende for personsikkerheten.

10.6. Usikkerheter

Det parametriske brannforløpet antar en lineær nedkjølingsfase, men i utgangspunktet vil en ved inkludering av brennbare sekundære konstruksjoner i teorien kunne oppleve at brannen fortsetter. Akkurat denne usikkerheten er ikke håndtert i oppgaven. Oppgaven har kun benyttet standardiserte brannforløpsmodeller som ikke viser en slik effekt. Det er ikke funnet gode kilder på temaet, og at en eksoterm brann ikke fortsetter i bæresystemet, vil være en uavklart forutsetning for oppgavens resultater.

Det er for analyse 3 på hovedbæresystem gjennomført et relativt radikalt valgt av effekten på forkullingsforløp ved gipskledning, se Figur 12. Det er ukjent om denne er korrekt, men standarden åpner opp for dens bruk. Det anses for å være en mulig tolkning av forkullingsforløpet, men forutsetningen er ikke verifisert.

11. Konklusjon

Trekonstruksjoner i brannklasse 3 må opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet i et fullstendig brannforløp, i henhold til teknisk forskrift. Fullstendig brannforløp er en krevende formulering fra forskriften, da den preaksepterte ytelsen for 90 minutter standardbrannforløp ikke korrelerer med 90 minutter fullstendig brannforløp.

Oppgaven viser gjennom kvantitative analyser og branntekniske modeller at et bæresystem av trekonstruksjon kan oppnå høy grad av sikkerhet ved brann – forutsatt kompensierende tiltak. Det vil allikevel være en litt større restrisiko for trekonstruksjoner sammenlignet med et bæresystem i stål eller betong. Oppgavens standpunkt er allikevel at dersom trekonstruksjoner er dimensjonert til å ivareta forskriftskravet ved bruk av standardiserte og anerkjente metoder, så trenger ikke nødvendigvis den nye løsningen å oppnå nøyaktig det samme sikkerhetsnivået som et preakseptert byggverk.

Om en ønsker å benytte trekonstruksjoner i fem etasjer eller mer, må følgende tiltak iverksettes:

- **Alle brennbare overflater kles med gips.** Oppgaven har vist at tolags-gipskledning, gips type A og gips type F, vil kunne være tilstrekkelig. Kledning utføres av to grunner. Den ene er å forhindre all den potensielle energien å bli forbrent, i henhold til analyse for hovedbæresystem. Den andre er å sikre nødvendig rømningstid, i henhold til kvalitative analyser av fravik på overflater og kledning.
- **Fullsprinkling av bygget.** Oppgaven har vist at det er nødvendig å benytte sprinkleranlegg for å begrense brannens dimensjonerende brannenergi, i henhold til analyse for hovedbæresystem. Hvis bygget er utført med fullsprinkling, vil en kunne dimensjonere med kun 60 % av karakteristisk brannenergi, grunnet at brannforløpet blir endret, i henhold til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann.

I tillegg avdekker konsekvensanalysen for brennbare sekundære bygningsdeler en økt spredningsfare på grunn av sekundære konstruksjoner i tre. Det kan derfor også være nødvendig med enkelte konsekvensreducerende tiltak, som eksempelvis ubrennbar kjølesone over vindu. Konsekvensreducerende tiltak for å håndtere økt brannspredningsfare til hulrom bør også vurderes.

De viktigste usikkerhetene knyttet til konklusjonen er:

- Hvordan ser brannforløpet ut etter at inventaret er utbrent - vil brannen fortsette i eksponerte vegger og tak?
- Er antagelsen om å fjerne forkullingsforløpet på grunn av gipskledning etter forkullingsdybde for parametrisk brannforløp korrekt?

12. Videre arbeid

Som forslag til videre arbeid, er det naturlig å nevne de usikkerhetene som har oppstått i analyser av brennbart hovedbæresystem og sekundære bygningsdeler:

- Gjennomføre litteraturstudium på brannforløp i trekonstruksjoner etter at inventar er utbrent. Eventuelt å gjennomføre fullskala forsøk på brannforløp i brannceller hvor omhyllende konstruksjoner er brennbare.
- Finne effekten av gipskledning for parametriske brannforløp. Kan en fjerne deler av forkullingsforløpet, eller bare forskyver forløpet seg?

Det har i tillegg oppstått noen refleksjoner om miljø og kostnad knyttet til tiltakene som er satt som forutsetninger for bruk av trekonstruksjoner i brannklasse 3. Det kan derfor være av interesse å gjennomføre følgende:

- Studie på ulike designløsninger for trekonstruksjoner. Hvorav kostnad/nytte og positive negative sider ved løsningene studeres nærmere.
- Studie på hvilken miljøgevinst en oppnår ved bygging av trekonstruksjoner når vegger og himling må kles med gips. CO₂ ekvivalenter.
- I bygninger med små robuste brannceller i kombinasjon med sprinkler vil antall barrierer ved brann være større enn i bygninger med store brannceller. I hvilken grad dette skal tillegges vekt ved vurdering av krav til brannmotstand for hovedbæresystemet kan undersøkes nærmere.
- Det kan i tillegg være aktuelt å analysere hvordan trekonstruksjoner kan repareres etter brann.

Eurokodene og standardiserte verktøy som er benyttet til de kvantitative analysene behøver en gjennomgang. Modellene fremstår som lite anvendelig grunnet små gyldighetsområder og dårlig håndtering av kompleksiteten som brennbart materiale i bæresystem utgjør. Dette gjelder spesielt: Parametriske brannforløp i henhold til Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann og Forkullingsrate ved parametriske brannforløp i henhold til Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner

13. Kildehenvisning

1. Byggemiljø. *Innspill til sektorvis klimahandlingsplan for byggesektoren*. 2007 [cited 2014 02.02]; Available from: http://www.regjeringen.no/Upload/MD/Vedlegg/Forurensing/Et%20klimavennlig%20Norge/byggenaeringens_miljosekretariat2.pdf.
2. Gustavsson, L., K. Pingoud, and R. Sathre, *Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete-and wood-framed buildings*. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2006. **11**(3): p. 667-691.
3. Buchanan, A.H. and B.G. Honey, *Energy and carbon dioxide implications of building construction*. Energy and Buildings, 1994. **20**(3): p. 205-217.
4. Börjesson, P. and L. Gustavsson, *Greenhouse gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives*. Energy policy, 2000. **28**(9): p. 575-588.
5. Kollegiet for brannfaglig terminologi, *Faguttrykk*, in *KBT - faguttrykk*. 2014: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp>.
6. Olje og energidepartementet. *Stortingsmelding 5: Hvordan leve med farene*. Akseptabel risiko og samfunnsøkonomi 2012 [cited 2014 01.06].
7. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, *Samfunnssikkerhet i arealplanlegging*, in *Kartlegging av risiko og sårbarhet*. 2008, DSB: <http://www.dsb.no/no/Ansvarsomrader/Regional-og-kommunal-beredskap/ROS-analyser/Sjekklistor-for-ROS-analyser/>.
8. Statens byggt tekniske Etat, *Veiledning til byggt teknisk forskrift*, Direktoratet for byggekvalitet, Editor. 2010: <http://byggeregler.dibk.no/dxp/content/tekniskekrav>.
9. Kommunal og regionaldepartementet, *Forskrift om tekniske krav til byggverk (Byggt teknisk forskrift)*, Bolig- og bygningsavdelingen, Editor. 2010.
10. Kommunal- og arbeidsdepartementet og Miljøverndepartementet, *Forskrift om krav til byggverk - TEK*, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Editor. 1997.
11. Kommunal- og arbeidsdepartementet og Miljøverndepartementet, *Byggt forskrift 1987 - Del 3. Brannvern*, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Editor. 1987.
12. DiBK v/Vidar Stenstad, *Fravik fra preaksepterte ytelser, Krav til dokumentasjon, saksgang/dokumentflyt ved avdekking av feil, ny kontrollordning*, in *Forebyggende Forum*. 2013: Drammen. p. 42.

13. Kommunal- og moderniseringsdepartementet. *Forskrift om byggesak (byggesaksforskriften)*. 2010 [cited 2014 12.03]; Available from: <http://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2010-03-26-488>.
14. Norsk Standard, *NS 3901 Krav til risikovurdering ved brann i byggverk*. 2012, Standard Norge.
15. Standard, N. *Standard.no*. 2014 [cited 2014 02.04]; Available from: <https://www.standard.no/>.
16. Ostman, B.A.-L. and S.S.T. Forskningsinstitut, *Fire Safety in Timber Buildings: Technical Guideline for Europe*. 2010: SP Technical Research Institute of Sweden.
17. SINTEF Byggforsk. *SINTEF Byggforsk Kunnskapssystemer*. 2014 [cited 2014 02.04]; Available from: <http://bks.byggforsk.no/>.
18. SINTEF Byggforsk, *Trehus - Håndbok 53*. 9 ed, ed. T. Ramstad and K.I. Edvardsen. 2010: SINTEF Byggforsk.
19. Hoel, O. and N.Ø. Rimstad. *Brann: norske storbranner*. Store Norske Leksikon 2009 [cited 2014 22.01]; Available from: http://snl.no/brann%2Fnorske_storbranner.
20. SP Wood Technology. *Multi-storey wooden houses in Sweden - Technical data*. 2010 [cited 2014 25.01]; Available from: <http://www-v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=10384>.
21. Landbruks- og matdepartementet. *Bruk av tre*. 2011 [cited 2014 28.02.]; Available from: http://www.regjeringen.no/nb/dep/lmd/tema/skogbruk_trebruk_og_bioenergi/bruk-av-tre.html?id=473275.
22. Solli, K.H. and G. Glasø, *Trebaserte konstruksjonselementer*. FOKUS på tre, 2011. **27**.
23. Stora Enso. *Building with CLT massive wood*. 2013 [cited 2014 23.05]; Available from: <http://www.clt.info/en/produkt/bauen-mit-massivholz/>.
24. KLH UK. *Cross-Laminated Timber*. 2013 [cited 2014 23/5]; Available from: <http://www.klhuk.com/product-/cross-laminated-timber.aspx>.
25. Trä, S., *Brandsäkra trähus, Nordisk - baltisk kunskapsöversikt och vägledning*. 2012: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
26. Norsk Standard, *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner*, in *Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. 2004, Standard Norge.
27. SP Träteknik. *Fire Safe Timber buildings - Nordic design guidelines*. 2005. Tallinn: Birgit Östman.

28. Hopkin, D., et al., *An effective thermal property framework for softwood in parametric design fires: Comparison of the Eurocode 5 parametric charring approach and advanced calculation models*. Construction and Building Materials, 2011. **25**(5): p. 2584-2595.
29. Feasey, R. and A. Buchanan, *Post-flashover fires for structural design*. Fire Safety Journal, 2002. **37**(1): p. 83-105.
30. SINTEF Byggforsk, *571.047 Gipsplater. Typer og egenskaper*. 2005, SINTEF Byggforsk: <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?documentId=570§ionId=2>.
31. Buchanan, A.H., *Fire performance of timber construction*. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000. **2**(3): p. 278-289.
32. Carling, O., *Fire Resistance of Joint Details in Loadbearing Timber Construction: A Literature Survey*. 1990: Building Research Association of New Zealand.
33. Peng, L., et al., *Fire resistance performance of unprotected wood–wood–wood and wood–steel–wood connections: A literature review and new data correlations*. Fire Safety Journal, 2010. **45**(6–8): p. 392-399.
34. Frangi, A., et al. *Natural full-scale fire test on a 3 storey X Lam timber building*. in *Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Miyazaki, Japan*. 2008.
35. Hakkarainen, T., *Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments*. Journal of fire sciences, 2002. **20**(2): p. 133-175.
36. Norsk Standard, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner*, in *Del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann*. 2002, Standard Norge.
37. SINTEF byggforsk, *321.051 Brannenergi i bygninger. Beregninger og statistiske verdier*. 2013, SINTEF byggforsk: <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=4096>.
38. Norsk Standard, N., *3478. Brannteknisk dimensjonering av bygningskonstruksjoner Beregning (Design for structural members for fire resistance)*, 1979.
39. Knoop, H., *Risikovurdering og dimensjonering av gipsplater som passiv brannsikring av trekonstruksjoner*. 2013.
40. Kreuz Lagen Holz, *Klassifizierungsbericht, KLH massivholz GmbH*, in *klassifisering av REI 90, massivtredekke*. 2012: http://www.klh.at/fileadmin/klh/kunde/2011/Technische%20Anwendungen/Brandschutz/Decke_REI_90.pdf.
41. Ingberg, S., *Fire loads*. Quarterly Journal of the National Fire Protection Association, 1928. **22**: p. 43-61.

42. Drysdale, D., *An introduction to fire dynamics*. 2011: John Wiley & Sons.
43. Law, M., *A relationship between fire grading and building design and contents*. 1971: Fire Research Station.
44. Hadvig, S., *Charring of wood in building fires*. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1981: p. 88-99.
45. Hansen, P.F. and F.B. Olesen, *Full-Scale Tests on Loaded Glulam Beams Exposed to Natural Fires*. 1992, Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg Universitycenter.
46. Westerheim, N., *Konseptstudie av knutepunkt i limtre og lange aksialbærende treskruer utsatt for brannbelastning*, in *Institutt for konstruksjonsteknikk*. 2013, Norges teknisk-naturvitenskapelige Universitet.
47. Audebert, M., et al., *Experimental and numerical analysis of timber connections in tension perpendicular to grain in fire*. *Fire Safety Journal*, 2014. **63**(0): p. 125-137.
48. Buchanan, A.H. and D. Barber. *Fire resistance of epoxied steel rods in glulam timber*. in *Proceedings of Pacific timber engineering conference, Gold Coast, Australia*. 1994.
49. SINTEF Byggforsk, *520.385 Nødvendig rømningstid ved brann*. 2006, SINTEF Byggforsk: <http://bks.byggforsk.no/>.
50. DiNunno, P.J., et al., *Handbook of Fire Protection Engineering*. Third Edition ed, ed. Society of Fire Protection Engineers. 2002, One Batterymarch Park Quincy, Massachusetts 02269: National Fire Protection Association.
51. Thunderhead Engineering Consultants, *Pathfinder*. 2013.
52. DiBK, *HO-3/2000. Røykventilasjon, Temaveiledning*, D.f. byggekvalitet, Editor. 2000.
53. Karlsson, B. and J. Quintiere, *Enclosure fire dynamics*. 2002: CRC press.
54. British Standards, *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings*, in *Part 7: Probabilistic risk assessment*. 2003, The British Standards Institution.
55. Melinek, S., *Effectiveness of sprinklers in reducing fire severity*. *Fire safety journal*, 1993. **21**(4): p. 299-311.
56. Advokatfirmaet Hjort DA, *Utredning av hjemmelsgrunnlaget for bruk av funksjonskrav i plan- og bygningsretten*, Direktoratet for byggekvalitet, Editor. 2013: http://www.dibk.no/no/Om_oss/Arkiv/Nyhetsbrev-arkiv/Nyhetsbrev-1201411/Artikkelliste-12014/Utredning-Hjemmelsgrunnlaget-for-bruk-av-funksjonskrav/.

14. Oversikt vedlegg

Vedlegg 1. Parametrisk brann med iterasjoner for brannenergi

Filnavn: Vedlegg 1.xlsx

Beskrivelse: Regneark som grunnlag for Figur 8.

Vedlegg 2. Analyse av hovedbæresystem

Filnavn: Vedlegg 2.xlsx

Beskrivelse: Regneark som grunnlag for Tabell 16 til Tabell 23

Vedlegg 3. Risikomatrise

Filnavn: Vedlegg 3.pdf

Beskrivelse: Kort beskrivelse av risikomatriksen benyttet i oppgaven.