

Probabilistisk og deterministisk analyse av brannforløp i høye trehus

Anojan Arumugam

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: januar 2018

Hovedveileder: Jon Ivar Knarud, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk



Oppgavens tittel: Probabilistisk og deterministisk analyse av brannforløp i høye trehus	Dato: 23.01.18		
	Antall sider (inkl. bilag): 127		
	Masteroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>	Prosjektoppgave
Navn: Stud.techn. Anojan Arumugam			
Faglærer/veileder: Jon Ivar Belghaug Knarud			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Joakim Flathaug Ramberg (Multiconsult)			

Ekstrakt:

De siste årene har det vært rettet stort fokus mot miljøet, og siden byggenæringen står for store deler av klimagassutslippene er det ønskelig å bygge mer miljøvennlig og bærekraftig. Tre som bygningsmateriale har miljømessige fordeler og anses som et bærekraftig materiale. Dette har ført til økt interesse for bygging av høyhus i tre hvor det benyttes massivtre eller limtre som bærende hovedsystem. Her dukker det opp utfordringer knyttet til brannikkerheten.

Byggverk på 5 etasjer eller mer plasseres preakseptert i brannklasse 3 (med unntak av byggverk i risikoklasse 1), og for denne brannklassen er de preaksepterte ytelsene et ubrennbart hovedbæresystem som skal motstå en standardbrannpåkjenning i 90 minutter. Ettersom tre er brennbart blir dette et fravik, og det må dokumenteres for at forskriftskravet tilfredsstilles. Forskriftskravet angir at det bærende hovedsystemet skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. Derfor er det valgt å fokusere på modelleringen av brannforløp for trekonstruksjoner, og det er Eurokodens beregningsmodeller som er benyttet.

Først undersøkes Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve og forkullingsrate ved en parametriske brannpåkjenning. Her gjøres det manuelle itereringer hvor det forkullede treverket fra brannforløpet inkluderes som brannlast ved neste modellering, for å undersøke om kurven konvergerer eller ikke. Dette ble gjort for to ulike rom; et rom med vegger, tak og gulv av massivtre tildekt med to lag normalgips, og for et rom med hovedsakelig gipskledning men med eksponerte limtresøyler og -bjelker. Dette resulterte i:

- Rom med massivtre: Store mengder treverk som forkuller førte til høy brannlast, som videre førte til at kurven ikke konvergente. Beregningsmodellens begrensninger ble overgått.
- Rom med limtre: Kurven konvergerer og brannens totale varighet ble 37 % lengre enn ved første iterering, men beregningsmodellens begrensninger ble overgått.

Videre undersøkes hvordan en kan bruke probabilistiske metoder, og verktøyet som ble tatt i bruk var Monte Carlo. Det er gjort sensitivitetsanalyser for parametriske temperatur-tidkurve med varierende gulvareal, åpningsareal, vindushøyde, termiske egenskaper til bygningsmaterialer og brannlast. Det er også gjort sensitivitetsanalyse for forkullingsrate med varierende åpningsfaktor. Analysene viser at det som har størst påvirkning på brannforløpet og forkullingen er parameterne knyttet til åpningsfaktor samt hvilken brannlast som benyttes.

Det er usikkerheter knyttet til resultatene i oppgaven, da en ikke vet om det eksponerte bæresystemet av brennbart materiale vil fortsette å brenne når inventaret er brent opp, eller om brannen slokker av seg selv.

Stikkord:

1. Høyhus i tre
2. Modellering av brannforløp
3. Forkulling
4. Monte Carlo-simuleringer

(sign.)

Forord

Denne rapporten er skrevet som avsluttende masteroppgave i emnet TBA4905 Bygnings- og materialteknikk med fordypning i brannsikkerhet, ved Institutt for Bygg- og Miljøteknikk (IBM) ved NTNU i Trondheim. Masteroppgaven utgjør det avsluttende arbeidet på det femårige masterprogrammet Bygg- og Miljøteknikk. Gjennom arbeidet med denne oppgaven har jeg fått ny kunnskap om brannsikkerhet i høye trehus, blant annet om hvilke muligheter og utfordringer som eksisterer innen dette området. Arbeidet har i tillegg økt interessen min for fagområdet brannsikkerhet.

Jeg ønsker å takke min veileder Jon Ivar Belghaug Knarud (NTNU) for god veiledning og mye innspill gjennom arbeidet. Jeg ønsker også å takke Joakim Flathaug Ramberg (Multiconsult) som motiverte meg til å skrive om brannsikkerhet i høye trehus og som har bidratt med nyttig hjelp og innspill til oppgaven.

Til slutt vil jeg takke min familie, kjæreste og venner som har motivert og støttet meg gjennom hele arbeidet.

Anojan Arumugam

Oslo, 23. januar 2018

Sammendrag

De siste årene har det vært rettet stort fokus mot miljøet, og siden byggenæringen står for store deler av klimagassutslippene er det ønskelig å bygge mer miljøvennlig og bærekraftig. Tre som bygningsmateriale har miljømessige fordeler og anses som et bærekraftig materiale. Dette har ført til økt interesse for bygging av høyhus i tre hvor det benyttes massivtre eller limtre som bærende hovedsystem. Her dukker det opp utfordringer knyttet til brannsikkerheten.

Byggverk på 5 etasjer eller mer plasseres preakseptert i brannklasse 3 (med unntak av byggverk i risikoklasse 1), og for denne brannklassen er de preaksepterte ytelsene et ubrennbart hovedbæresystem som skal motstå en standardbrannpåkjenning i 90 minutter. Etersom tre er brennbart blir dette et fravik, og det må dokumenteres for at forskriftskravet tilfredsstilles. Forskriftskravet angir at det bærende hovedsystemet skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. Derfor er det valgt å fokusere på modelleringen av brannforløp for trekonstruksjoner.

Det er benyttet standardiserte beregningsmodeller for kvantitative analyser av brannforløp og forkulling. Modellene er hentet fra Eurokode 1 – del 2: Laster på konstruksjoner ved brann og Eurokode 5 – del 2: Brannteknisk prosjektering av trekonstruksjoner.

Først undersøkes Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve og forkullingsrate ved en parametriske brannpåkjenning. Her gjøres det manuelle itereringer hvor det forkullede treverket fra brannforløpet inkluderes som brannlast ved neste modellering, for å undersøke om kurven konvergerer eller ikke. Dette ble gjort for to ulike rom; et rom med vegger, tak og gulv av massivtre tildekt med to lag normalgips, og for et rom med hovedsakelig gipskledning men med eksponerte limtresøyler og –bjelker. Dette resulterte i:

- Rom med massivtre: Store mengder treverk som forkuller førte til høy brannlast, som videre førte til at kurven ikke konvergente. Beregningsmodellens begrensninger ble overgått.
- Rom med limtre: Kurven konvergerer og brannens totale varighet ble 37 % lengre enn ved første iterering, men beregningsmodellens begrensninger ble overgått.

Videre undersøkes hvordan en kan bruke probabilistiske metoder, og verktøyet som ble tatt i bruk var Monte Carlo. Det er gjort sensitivitetsanalyser for parametriske temperatur-tidkurve med varierende gulvareal, åpningsareal, vindushøyde, termiske egenskaper til bygningsmaterialer og brannlast. Det er også gjort sensitivitetsanalyse for forkullingsrate med varierende åpningsfaktor. Analysene viser at det som har størst påvirkning på brannforløpet og forkullingen er parameterne knyttet til åpningsfaktor samt hvilken brannlast som benyttes.

Det er usikkerheter knyttet til resultatene i oppgaven, da en ikke vet om det eksponerte bæresystemet av brennbart materiale vil fortsette å brenne når inventaret er brent opp, eller om brannen slokker av seg selv.

Summary

The last years there has been an increased focus towards the environment. Since the construction industry accounts for large volumes of greenhouse gas emissions it's desirable to build more environmental friendly. Timber as a building material have environmental benefits and are considered as a sustainable material. This has led to increased interest in the construction of high-rise timber buildings, where cross laminated timber (CLT) or glued laminated timber (Glulam) is used as the load-bearing construction. This is where the fire safety challenges occur.

Buildings with five stories or more are classified as fire class 3 (except buildings in risk class 1), and for this fire class the solutions for the prescriptive code are incombustible load-bearing construction that must resist a standard fire exposure in 90 minutes. Since timber is a combustible material, it has to be documented to meet the requirement for the technical regulations. The technical regulations require that the load-bearing system must be dimensioned in order to maintain satisfactory bearing capacity and stability throughout a complete natural fire, as this may be modeled. Therefore, it is decided to focus on the modeling of natural fires for timber constructions.

Standardized calculation models have been used for quantitative analyzes of natural fires and charring rates. The models are from Eurocode 1: Action on structures - Part 1-2: Action on structures exposed to fire and Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: Structural fire design.

First, the Eurocode's parametric temperature-time curve and charring rate are investigated. There are done manual iterations where the charred wood from the fire is included as fire load at the next modeling, to check if the curve converges or not. This was done for two different rooms; a room with walls, ceilings and floors of CLT with two layers of normal gypsum, and for a room with mainly plasterboard but with exposed glulam pillars and beams. This resulted in:

- Room with CLT: A high amount of charring wood led to high fire load, which further led to the curve not converging. The calculation model limitations were exceeded.
- Room with glulam: The curve converges and the total duration of the fire was 37% longer than the first iteration, but the limitations of the calculation model were exceeded.

Furthermore, it is investigated how to use probabilistic methods, and the tool used was Monte Carlo. Sensitivity analyzes have been made for parametric temperature-time curves with varying floor space, opening area, window height, thermal properties for building materials and fire load. Sensitivity analysis has also been performed for the charring rate with varying opening factor. The analysis shows that the greatest impact on the fire intensity, fire duration and charring rate is the parameters related to the opening factor and the amount of fire load.

There are uncertainties related to the results, as one does not know whether the exposed combustible load-bearing system will continue to burn when the inventory has burnt up, or if the fire extinguish itself.

Innholdsfortegnelse

FORORD	III
SAMMENDRAG	V
SUMMARY	VII
INNHOLDSFORTEGNELSE	IX
INTRODUKSJON	- 1 -
BAKGRUNN	- 1 -
PROBLEMSTILLING	- 2 -
MÅLSETTING	- 3 -
METODE	- 4 -
LITTERATURSTUDIUM	- 4 -
KVANTITATIV ANALYSE.....	- 4 -
TEORI	- 5 -
BRANNKLASSE FOR HØYHUS I TRE	- 5 -
TREBASERTE BYGNINGSMATERIALER.....	- 6 -
VERIFIKASJON AV BRANNSIKKERHET	- 9 -
EUROKODENS TEMPERATUR-TIDKURVER	- 11 -
EUROKODENS FORKULLINGSBEREGNING	- 23 -
TEMPERATUR-TIDKURVER: INKLUDERING AV EKSPONERT TRE.....	- 31 -
BEREGNING AV BRANNENERGI	- 34 -
CASE: MODELLERING AV TEMPERATUR-TIDKURVE – MASSIVTREKONSTRUKSJON	- 36 -
ETABLERING AV ANALYSEBYGGVERK	- 36 -
MODELLERING	- 38 -
RESULTATER	- 48 -
DISKUSJON	- 50 -
CASE: MODELLERING AV TEMPERATUR-TIDKURVE – LIMTREKONSTRUKSJON	- 52 -
ETABLERING AV ANALYSEBYGGVERK	- 52 -
MODELLERING	- 54 -
RESULTATER	- 59 -

DISKUSJON	- 60 -
CASE: MONTE CARLO-SIMULERINGER FOR PARAMETRISKE TEMPERATUR-TIDKURVER.....	- 61 -
FORBEREDELSE	- 61 -
PROGRAMVARE.....	- 61 -
EUROKODENS PARAMETRISKE TEMPERATUR-TIDKURVE.....	- 62 -
PLAN FOR SIMULERINGENE.....	- 64 -
RESULTATER	- 80 -
DISKUSJON	- 94 -
CASE: MONTE CARLO-SIMULERINGER FOR FORKULLING.....	- 96 -
FORKULLINGSRATE.....	- 96 -
FORKULLINGSDYBDE.....	- 100 -
FORKULLINGSVARIGHET	- 105 -
DISKUSJON	- 108 -
DISKUSJON	- 110 -
KONKLUSJON	- 111 -
VIDERE ARBEID.....	- 112 -

Introduksjon

Bakgrunn

Grunnet verdens klimautfordringer blir man nødt til å tenke mer miljøvennlig, både nå og i fremtiden. Byggenæringen og bruk av bygg står for rundt 40 % av klimagassutslippene og energibruken i verden [3], og er dermed en sentral brikke i arbeidet med å redusere klimagassutslippene.

Tre som bygningsmateriale har miljømessige fordeler siden det er naturlig og fornybart. I norske skoger er tilveksten større enn hogsten, og det drives etter prinsipper som gjør at det er et bærekraftig materiale. Bruk av tre motvirker også drivhuseffekten ved at det lagrer CO₂. Treprodukter har god holdbarhet, kan gjenbrukes og gjenvinnes, det skaper godt innemiljø og har høy fasthet i forhold til vekt. Siden tre fra naturens side er så sterkt og smidig, og i tillegg miljøvennlig, blir det stadig mer populært å bygge i tre.

Med økende miljøbevissthet har det i Norge, og i andre deler av verden, vært økende interesse for å dra inn tre i store byggeprosjekter, spesielt høyhus. I Trondheim finner vi studentboligene "Moholt 50/50" som består av 9 etasjer, Bergen har "Treet" på 14 etasjer og i Brumunddal bygges "Mjøstårnet" som blir hele 81 meter høyt bestående av 18 etasjer - noe som gjør dette til verdens høyeste trehus.

Det dukker opp flere utfordringer knyttet til å bygge høye bygninger av tre. En av de store utfordringene er brann sikkerheten. Både bolig- og kontorbygg på 5 etasjer eller mer vil plasseres i brannklasse 3. Denne klassifiseringen betyr at konsekvensene er store dersom det skulle oppstå brann og kan innebære skade på liv, helse, samfunnsmessige interesser og miljøet. Brannklassene legges til grunn for prosjekteringen og skal sikre byggets bæreevne ved brann. Ett av de mest aktuelle kravene er TEK17 § 11-4 (4) [4]:

"Det bærende hovedsystemet i byggverk i brannklasse 3 og 4 skal dimensjoneres for å kunne opprettholde tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres."

I henhold til veiledningen til teknisk forskrift skal det bærende hovedsystemet for bygninger i brannklasse 3 være klassifisert med en brannmotstand på minst R 90 A2-s1,d0. Annet ledd beskriver brennbarheten til materialet, og klasse A2 betyr at det ikke skal bidra vesentlig til brannlast og brannutvikling under en fullt utviklet brann. I praksis betyr dette ubrennbare materialer, men den tillater eksempelvis gipsplater med papp på ytterste lag. Generelt sett regner man med at ubehandlet treverk tilfredsstiller klasse D, men kan oppnå klasse B om det brannimpregneres. Treverk kan aldri oppnå klasse A2 siden det er brennbart, og blir dermed et fravik fra veiledningen. Dermed må det dokumenteres for at forskriftskravene er tilfredsstillt gjennom analytisk prosjektering.

Det er behov for ny kunnskap og rett verktøy for dagens branningeniører for å sikre at det bærende hovedsystemet skal motstå kollaps ved brann. Det bærende hovedsystemet kan utføres på ulike måter, eksempelvis ved bruk av massivtre, limtre eller til og med hybrid hvor det benyttes betong i kombinasjon med tre. Det er usikkerheter knyttet til brannens oppførsel og dens konsekvenser for ulike konstruksjonsprinsipper. Neste utfordring er tolkningen av fullstendig brannforløp. Veiledningen sier at brannmotstanden skal være på 90 minutter for et ubrennbart bæresystem, men dette gjelder ikke for bærekonstruksjon av tre. Her er det usikkerheter knyttet til om brannen dør ut etter at inventaret har brent opp, eller om bæresystemet bidrar til å opprettholde brannen. Det er blant annet tidligere gjort branntester som viser at det er mulig å dimensjonere limtresøyler til å motstå en standardbrann i 90 minutter uten at den blir slokket av et automatisk slökkeanlegg [5], men det er omdiskutert om en standardbrann i 90 minutter kan representere et fullstendig brannforløp. Her er det utfordringer rundt hvordan et fullstendig brannforløp kan modelleres. Brannens utvikling gjennom et fullstendig brannforløp kan variere mye, og avhenger blant annet av åpninger, branncellestørrelse, brannbelastning i rommet med tilhørende termiske egenskaper og ikke minst brannlasten fra trekonstruksjonen. Derfor kan det være mer realistisk å benytte metoder for å beregne naturlig brannforløp ved bruk av parametriske temperatur-tidkurver. Dette er forenklinger av virkeligheten og innehar usikkerhet, men kurvene kan si noe om brannveksten, maksimumstemperaturen og brannens varighet. For trekonstruksjoner kan kurvene blant annet brukes for beregning av forkullingsrate og –dybde.

Problemstilling

For å dokumentere at trekonstruksjoner opprettholder tilfredsstillende bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp er det valgt å undersøke modelleringen av et fullstendig brannforløp for en analysebranncelle, og en må ta hensyn til at bygget er oppført med et bæresystem av tre. For modelleringen er det valgt å studere eurokodens parametriske temperatur-tidkurve, og det er ønskelig å gjøre en probabilistisk sensitivitetsanalyse av en slik modellering. Det er valgt å dele opp problemstillingen i flere deler og er som følgende:

1. Hvilke svakheter og utfordringer har eurokodens parametriske temperatur-tidkurve?
2. Hvordan kan bidraget fra forkullet treverk tas med i eurokodens metode for beregning av parametriske temperatur-tidkurve, og hvordan kan dette knyttes opp mot forkullingsrate og –dybde?
3. Hvordan kan en gjennom probabilistisk metode utføre en sensitivitetsanalyse?
4. Hvor stor usikkerhet utgjør parameterne i beregning av temperatur-tidkurve, og hva er dens betydning for brannteknisk dimensjonering av trekonstruksjoner?

Målsetting

Resultatmål

Analysere en modell som viser hvordan bidraget fra trekonstruksjonen påvirker brannforløpet i en branncelle ved bruk av eurokodens parametriske temperatur-tidkurve, i tillegg til en probabilistisk modell som kartlegger usikkerhetsmomenter ved inputverdiene i anvendt metode. For å oppnå dette er det laget delmål som er beskrevet under:

- Kartlegge begrensninger ved eurokodens parametriske temperatur tid-kurve.
- Modellere en parametriske temperatur-tidkurve for en analysebranncelle som tar hensyn til forkullet treverk.
- Utføre en probabilistisk sensitivitetsanalyse som kartlegger usikkerheten og variasjonen ved Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve.

Suksesskriterier

- Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve er beskrevet grundig med dens svakheter og begrensninger.
- Metode for modellering av parametriske temperatur-tidkurve med tilhørende forkullingsrate og –dybde er beskrevet punktlig og oversiktlig.
- Modelleringen viser grafisk hvordan det parametriske brannforløpet blir ved anvendt metode.
- Den probabilistiske sensitivitetsanalysen tar hensyn til parameternes usikkerheter og gir resultater som kan brukes for å kartlegge usikkerheten.

Effektmål

Anvendt metode og analyse av denne kan bidra til bakgrunns materialet for dokumentasjon av tilfredsstillende brannsikkerhet i høye trehus.

Metode

I dette kapitlet er det beskrevet hvordan arbeidet er gått frem metodisk, og hvordan valg av metode egner seg til å svare på problemstillingen. Alt som er gjort er mulig å etterprøve.

Litteraturstudium

I denne oppgaven ligger hovedfokuset på brannteknisk analyse av trekonstruksjoner og det var valgt å undersøke eurokodens beregningsmodeller, derfor er det gjort en grundig beskrivelse av disse. Modellene er hentet fra både NS-EN 1991-1-2 Laster på konstruksjoner ved brann [6] og NS-EN 1995-1-2 Brannteknisk dimensjonering [7], og de modellene som er beskrevet er den parametriske temperatur-tidkurven, den parametriske forkullingsraten og beregning av brannenergi. Videre er det gjort litteraturstudie på disse modellene, om svakheter, begrensninger og anvendeligheten av disse til trekonstruksjoner.

Før den probabilistiske analysen var det nødvendig å samle inn informasjon om romgeometrier, termiske egenskaper og brannlast. Romgeometrier ble funnet ved å studere noen høye trehus i Norge ved å blant annet se på prospekter. For å undersøke termiske egenskaper og brannlast ble det hentet inn informasjon fra både eurokoden og ved å gjøre litteraturstudium.

Kvantitativ analyse

Hovedfokuset ligger på den kvantitative analysen, da det er modelleringen av brannforløp i trekonstruksjoner som oppgaven går ut på.

For analysene ble det gjort kvantitative beregninger og modelleringer hvor det benyttes kjente modeller fra eurokoden. For modellering av temperatur-tidkurver ble Microsoft Excel benyttet. Her ble det konstruert egne regneark for oppvarmingsfasen, når maksimumstemperaturen inntreffer og for avkjølingsfasen. Disse blir til slutt satt sammen til en fullstendig kurve. Ved bruk av Microsoft Excel var det også lett å sette sammen kurvene for sammenligning.

For den probabilistiske analysen ble Monte Carlo benyttet, og programvaren er en tilleggs pakke til Microsoft Excel som heter @Risk. Ved modellering av temperatur-tidkurver blir først Monte Carlo-simulering brukt for en parameter, deretter hentes det ut verdier for parameteren fra simuleringen, og til slutt modelleres resten av kurven deterministisk. Hvordan Monte Carlo-simuleringer blir gjort i @Risk blir beskrevet senere.

Teori

Brannklasse for høyhus i tre

Før en skal gjøre brannteknisk prosjektering av et byggverk må en bestemme hvilken brannklasse bygget skal plasseres i, da det er ulike krav som må følges avhengig av type bygg. For å bestemme brannklasse må en først bestemme risikoklasse. Figur 1 viser enkelt rekkefølgen på hva som må bestemmes før en kan gjøre brannteknisk prosjektering av et bygg.



Figur 1 Innledende prosjekteringsprosess

Bestemmelse av risikoklasse er beskrevet i TEK 17 § 11-2 [8], og risikoklasse skal beskrive trusselen en brann kan innebære for skade på liv og helse, og skal legges til grunn for prosjektering og utførelsen for å sikre rømning og redning ved brann. Hvilken risikoklasse et bygg plasseres i avhenger av om bygget er beregnet for sporadisk opphold, om personer i bygget kjenner til rømningsforholdene, om bygget er beregnet for overnatting og om bruken av bygget medfører liten brannfare. Risikoklassene går fra 1 til 6, og i tabell 1 er det listet opp eksempler på type byggverk og hvilken risikoklasse disse tilhører. De mest aktuelle risikoklassene for høyhus i tre er markert i tabellen.

Tabell 1 Ulike virksomheter og tilhørende risikoklasser

Risikoklasse	Eksempler på virksomhet
1	Arbeidsbrakke, båtnaust, skur
2	Kontorbygg, lager
3	Barnehage, skole
4	Bolig, fritidsbolig, studentbolig
5	Idrettshall, kinolokale, museum
6	Fengsel, asylmottak, hotell, sykehjem

Videre bestemmes brannklasse i henhold til TEK 17 § 11-3 [9]. I veiledningen finnes en tabell som brukes for å bestemme brannklasse, og denne avhenger av hvilken risikoklasse bygget er plassert i og antall etasjer det er i bygget. Tabellen i veiledningen er gjengitt i tabell 2, og de aktuelle brannklassene er markert.

Tabell 2 Brannklasse (BKL) for byggverk

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

Fra tabell 2 ser en at for bygg på 5 etasjer eller flere vil bygget plasseres i brannklasse 3, med mindre det er risikoklasse 1. Når en ser på høyhus i tre er det ofte kontorbygg eller leilighetsbygg, og dermed blir dette brannklasse 3.

Trebaserte bygningsmaterialer

Tre har lenge blitt brukt som konstruksjonsmateriale, men i senere tid har det blitt aktuelt med større dimensjoner og høyere fasthet som kan brukes til større konstruksjoner. Derfor har det blitt utviklet trebaserte bygningsmaterialer, som ofte blir omtalt som EWP (Engineered Wood Products), og dette har fått stadig mer økende anvendelse i Norge. EWP er materialer av tre som er satt sammen på en bestemt måte, som har blitt produsert industrielt. Fordelen ved å bruke trebaserte bygningsmaterialer er at en kan oppnå større dimensjoner og høyere fasthet og det har lav variasjon i fasthets- og stivhetsegenskaper. Den optimaliserer også materialforbruket siden produktene leveres med eksakte mål, og en unngår svinn grunnet kapping. Det er også flere egenskaper som ivaretas av samme produkt, og dette er egenskaper som fasthet, isolasjonsevne, lyd og brann, og den har lav vekt i forhold til bæreevne [10]. De bygningsmaterialene som gjennomgås videre er massivtre og limtre.

Massivtre

Massivtre er internasjonalt bedre kjent som CLT, som står for Cross Laminated Timber. Bruk av massivtreelementer har blitt en anerkjent byggemetode og benyttes i bolighus, fleretasjes hus, næringsbygg, barnehager og skoler. Grunnen til det er at ved bruk av massivtreelementer oppnår man stor fleksibilitet ved formgivning og konstruksjon, relativt kort byggetid, enkelt å kombinere med andre materialer, lav vekt, enkel montasje og positive miljøegenskaper. Massivtre er lameller satt sammen til elementer, og disse kan festes sammen ved bruk av spiker,

skruer, dybler, lim eller stålstag. Ut i fra elementenes funksjon og bruksområde velges tykkelse og antall sjikt. Hovedsakelig skilles det mellom kantstilte elementer og krysslagte elementer. Kantstilte elementer er elementer som er satt sammen av stående lameller. Krysslagte elementer er elementer som er satt sammen av lameller i forskjellige sjikt, og sjiktene har ofte en vinkel på 45 eller 90 grader.



Figur 2 Massivtre [11]

Massivtreelementer kan brukes som bærende elementer i gulv, vegger og tak, og kan benyttes i alle typer bygg. Det kan bli brukt for å bygge opp hele bæresystemet, og det kan kombineres med andre materialer [12]. Studentboligene Moholt 50|50 [13] benytter massivtre som både vegg- og dekkeelementer, og et bilde fra byggefasen er vist i figur 3.



Figur 3 Montering av massivtreelementer på Moholt 50/50 [14]

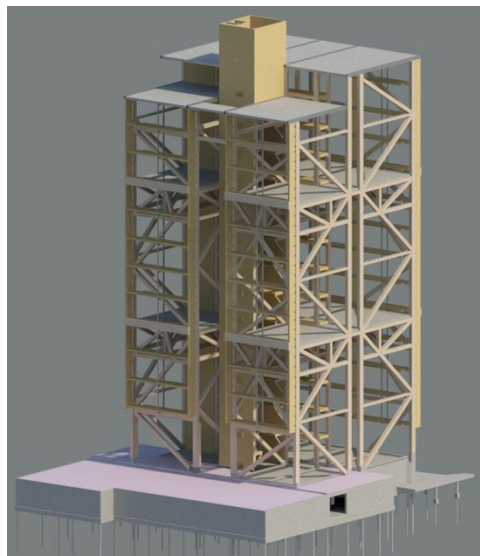
Limtre

NS-EN 386 [15] er en produksjonsstandard, og her er limtre definert som konstruksjonsdel formet ved å lime sammen trelameller med hovedsakelig parallell fiberretning. Det er et godt alternativ til betong og stål i bærende konstruksjoner, og siden det er det sterkeste konstruksjonsmaterialet i forhold til egen vekt kan det benyttes til store spennvidder. Det er i tillegg stivt og formstabilt. Limtre har en arkitektonisk verdi og gir mange muligheter for utforming av komplekse konstruksjoner. Det anses også som brannsikkert, og ved en branntest gjort av Sweco vises det at limtrekonstruksjoner kan dimensjoneres til å opprettholde bæreevnen gjennom det de har definert som et fullstendig brannforløp [5].



Figur 4 Limtre [16]

Treet i Bergen er hovedsakelig bygget opp av et bjelke-søylesystem av limtre [2], og en illustrasjon av bæresystemet er vist i figur 5.



Figur 5 Bæresystem av limtre, Treet [17]

Verifikasjon av brannsikkerhet

Preaksepterte ytelser mot analytisk metode

Når det gjelder metode for dokumentasjon av brannsikkerheten skilles det mellom preaksepterte ytelser og analytisk metode. Å dokumentere brannsikkerheten ved å bruke preaksepterte løsninger kalles forenklet brannteknisk prosjektering i forskriften. Dette vil si å følge de preaksepterte løsningene i veiledningen uten fravik. Fordelene ved å følge preaksepterte ytelser er at det er relativt lett, det krever ikke mye kompetanse og det er lett å kontrollere. Baksiden er at det fører til mindre fleksibilitet, og man oppnår ikke nødvendigvis de optimale løsningene i forhold til sikkerhet og kostnader.

Utfordringene ved bruk av tre i høyhus oppstår grunnet fravik fra kravene i veiledningen. Fravik fra veiledningen til TEK forutsetter verifikasjon, det vil si at man har ansvaret for å vise at de valgte løsningene allikevel tilfredsstillende kravene i forskriften. Om løsningene ikke tilfredsstillende kravene i forskriften kalles det er avvik, noe som ikke er akseptabelt. Verifisering gjøres gjennom analytisk metode, eller analytisk brannteknisk prosjektering som det heter i forskriften. Omfanget av analysen avhenger av hvor omfattende fravik som er gjort. Det er ulike måter å utføre analysen på, og det skilles hovedsakelig mellom kvalitativ vurdering, deterministisk analyse og probabilistisk analyse. Fordelene ved analytisk prosjektering er at det gir høy fleksibilitet, skreddersydde løsninger for det bestemte bygget, flere aspekter kan bli tenkt gjennom grundigere og komplekse situasjoner kan bli tatt hånd om. Ulempene er at utførelsen er vanskeligere, det kreves høy kompetanse for både prosjektering og kontroll, og siden det er mer tidkrevende enn å følge preaksepterte ytelser fører det til økte kostnader.

I praksis blir det ofte prosjektert som en blandingsløsning mellom preaksepterte ytelser og analytisk prosjektering, og det er flere grunner til dette. Veiledningen gir generelle prinsippløsninger som ikke alltid er mulig eller ønskelig å følge, men ved å ha veiledningen som utgangspunkt i prosjekteringen så er man på god vei til å tilfredsstillende TEK. Det er også mindre ressurskrevende enn ren analytisk prosjektering, hvor brannsikkerheten blir verifisert fra bunn av.

Probabilistisk analyse

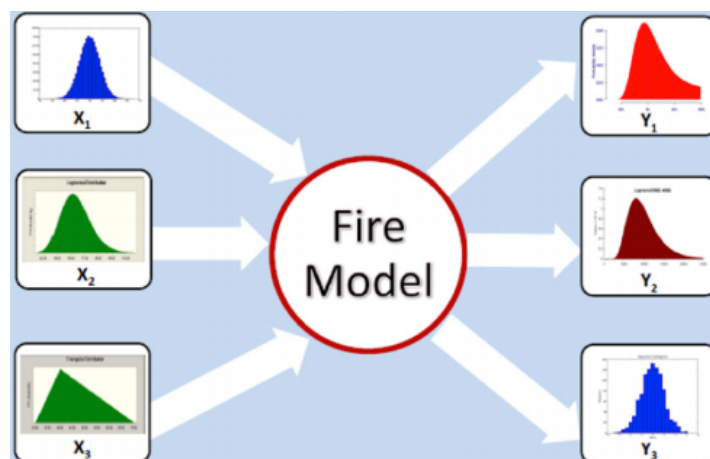
Dersom det oppstår fravik og en ønsker å gjøre en analytisk prosjektering kan probabilistisk analyse benyttes. I en probabilistisk analyse ser man på et antall brannscenarier som kan inntreffe, tallfester sannsynligheten for hendelsen og hvilke konsekvenser hendelsen kan føre til, og deretter kalkulerer man risikoen. I motsetning til deterministisk analyse, som innebærer å gjøre utregninger for bestemte scenarier basert på visse forutsetninger, så vil en ved probabilistisk analyse ikke bare se på konsekvenser men også sannsynligheten for at konsekvensene vil oppstå. I en slik analyse blir det ofte laget en modell, for eksempel i form av et hendelsestre, over hvilke brannscenarier som kan oppstå. På denne måten kan den totale risikoen knyttet til bygningen regnes ut [18].

For de fleste tilfeller av brannteknisk verifisering holder det med deterministisk analyse for å vise at brannsikkerheten er akseptabel. I tillegg kan probabilistisk analyse være tidkrevende og dyrt grunnet dens kompleksitet. Probabilistisk analyse kan derimot være nyttig dersom inputparameterne er svært variable, alternative løsninger i bygg som skiller seg veldig fra standardløsninger eller dersom konsekvensen av svikt grunnet en brann er stor. Det kan også brukes for sensitivitetsanalyse, identifisering av brannscenarier for deterministisk analyse, bestemme inputdata for deterministisk analyse, analysere brannsikkerheten for deler av bygget og/eller brannsikkerheten for hele bygget. Det er få begrensninger ved bruk av probabilistisk analyse. Teoretisk sett kan det brukes for alle typer bygg og alle aspekter av brannteknisk dimensjonering. De tilgjengelige dataene som finnes kan derimot være mangelfulle, noe som kan føre til at det blir vanskelig å benytte seg av denne typen analyse, eller at resultatene innehar mye usikkerhet. I tillegg, som nevnt, kan det være komplekst og tidkrevende.

Den britiske standarden for probabilistisk analyse [19] skiller mellom standard- og komplekse probabilistiske analyser, og de ulike metodene er presentert. Blant standardanalysene finnes hendelsestre- og feiltreanalyse. Av de komplekse metodene finnes pålitelighetsanalyse, stokastiske modeller, Monte Carlo-analyse, partiellsikkerhetsfaktorer og beta-metoden. Videre skal Monte Carlo-analyse studeres nærmere.

Monte Carlo-analyse

Monte Carlo-analyse er en simuleringsteknikk som er anvendelig når en må involvere stokastiske eller probabilistiske input-parametere, som videre gir deg alle mulige resultater i form av en fordeling. De stokastiske eller probabilistiske input-parametere velges tilfeldig innenfor de gitte betingelsene, og når en kjører simuleringen så gjør den et bestemt antall beregninger, typisk 1000 eller 10 000. På denne måten kan en lese av hvilke verdier som oftest forekommer, eller øvre og nedre verdi dersom det er mest aktuelt. Jo høyere antall simuleringer, jo riktigere resultater. Figur 6 viser tankegangen og mulighetene ved Monte Carlo-simuleringer [20].



Figur 6 Monte Carlo-simuleringer [20]

Hensikten med Monte Carlo-simulering er å ta hensyn til tilhørende usikkerheter av inputparameterne som er involvert i beregninger som gjøres ved brannteknisk analyse, og for å estimere effekten av inputparameterne på resultatet. Resultatene, eller outputvariablene, kan skrives som y_j ($j = 1, 2, \dots, N$) og er avhengig av inputparameterne χ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) og de gitte funksjonene.

$$y_j = f_j(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n)$$

Eurokodens temperatur-tidkurver

Ved brannteknisk prosjektering er det interessant å vite hvordan en brann vil utvikle seg, og derfor har det blitt utviklet ulike modeller for beskrivelse av brannforløp. En kan modellere forventet brannforløp med temperatur-tidkurver som viser sammenhengen mellom gasstemperaturen og tiden som er gått. Eurokoden presenterer ulike temperatur-tidkurver, og disse kan finnes i NS-EN 1991-1-2 [6]. Kurvene viser temperaturutviklingen etter overtenning, for fullt utviklede branner. Det er disse brannene som kan påvirke bæresystemet og utgjøre en strukturell svikt. Det skilles mellom nominelle kurver og parametriske kurver.

Nominelle kurver

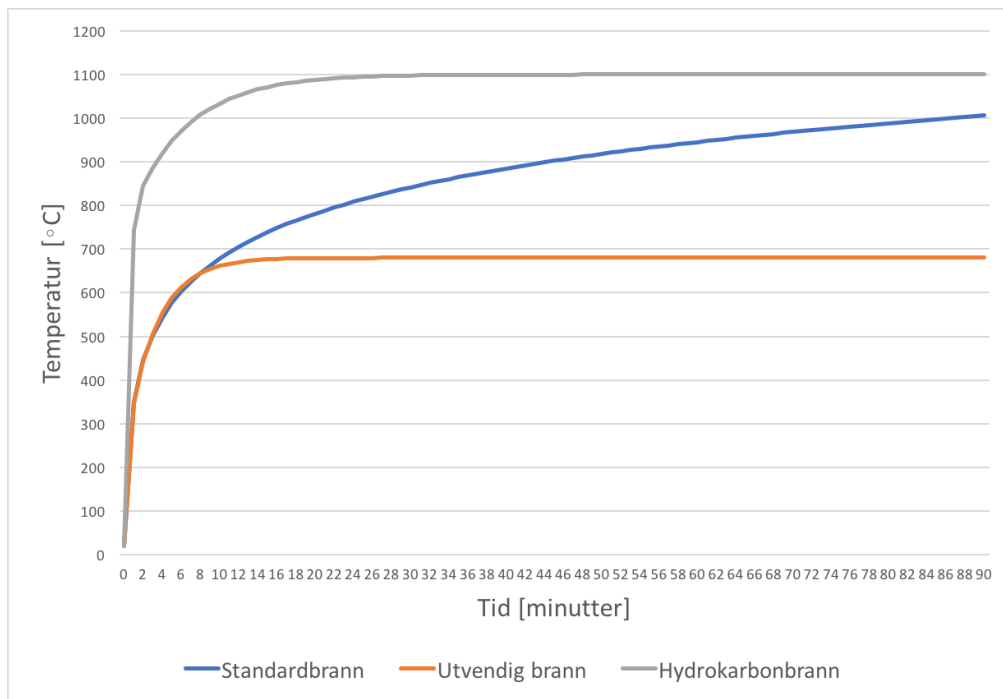
Eurokoden presenterer tre nominelle kurver. Den mest kjente kurven kalles standardbrann eller standard temperatur-tidkurve, men internasjonalt er den best kjent som ISO 834-kurve. Modellen er en kvantifisering av temperaturutviklingen som brukes for å anslå den termiske påkjenningen i bygningsdelene. De nominelle kurvene tar ikke hensyn til geometrien av branncellen, åpningsfaktor, brannlast eller de termiske egenskapene av omsluttende konstruksjonsdeler, og den ser heller ikke på avkjølingsfasen. Mange land i verden gjør fullskala brannmotstandstester for å vurdere brannmotstanden i bygningsmaterialer eller -deler, og ved slike tester brukes nominelle branner for å avgjøre antall minutter bygningsdelen holder ved brann [21].

De skilles mellom tre ulike nominelle temperatur-tidkurver, og disse beskriver brannkurven for en standardbrann, utvendig brann og hydrokarbonbrann. Formlene for beregning er vist i tabell 3 og figur 7 er en grafisk fremstilling av de tre nominelle temperatur-tidkurvene.

Tabell 3 Formler for nominelle brannkurver

Brannkurve	Formel
Standardbrann	$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1)$
Utvendig brannkurve	$\theta_g = 660 (1 - 0,678 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-3,8 t}) + 20$
Hydrokarbonbrann	$\theta_g = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}) + 20$

θ_g er gasstemperaturen i grader celsius og t er tiden i minutter.



Figur 7 De nominelle brannkurvene

Parametriske kurver

Beregningsmetode

Eurokoden presenterer en metode for beregning av naturlig brannforløp, i motsetning til de nominelle kurvene hvor det ikke er tatt hensyn til avkjølingsfasen. Den naturlige brannen beskriver brannens utvikling fra start til slutt, men neglisjerer vekstperioden fra antenning til overtenning. Modellen beskriver sammenhengen mellom temperatur og tid som en funksjon av brannlast, åpningsfaktor og termiske egenskaper av omsluttende konstruksjonsdeler [22]. På denne måten kan en brann modelleres for spesifikke brannceller, og det er et forsøk på å skape et realistisk bilde av et brannforløp for en bestemt situasjon.

For å modellere eurokodens parametriske temperatur-tidkurver må en gjøre tre ulike beregninger:

- 1) Regne ut temperaturutviklingen i oppvarmingsfasen
- 2) Regne ut når maksimumstemperaturen inntreffer
- 3) Regne ut temperatur-tidkurven for avkjølingsfasen

Videre er fremgangsmåten for beregningene beskrevet.

1) Temperatur-tidkurvene i oppvarmingsfasen

Gasstemperaturen for en branncelle i oppvarmingsfasen er gitt ved:

$$\theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*}) \quad (1)$$

og t^* er gitt ved:

$$t^* = t * \Gamma \quad (2)$$

der t er tiden i timer og Γ er gitt ved:

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad (3)$$

O er åpningsfaktoren, og beskriver et forhold mellom åpninger i et rom og rommets omhyllingsflate. Åpningsfaktoren O er gitt ved:

$$O = \frac{A_v * \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (4)$$

A_v er samlet areal for vertikale åpninger i veggene, h_{eq} er vektet gjennomsnitt av vindushøyden for alle vegger og A_t er samlet areal av omsluttende bygningsdeler. Videre er b gitt ved:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (5)$$

Faktoren b beskriver egenskapene til de omsluttende bygningsdelene. Varmetapet ut av branncellen er en viktig faktor ved beregning av temperaturutviklingen inne i branncellen. Varmeovergangen til omhyllende bygningsdeler skjer ved konveksjon og stråling. De termiske egenskapene til omhyllende bygningsdeler må være kjent for å kunne bestemme varmeovergangen ved varmeledning til veggene. I formelen er ρ massetettheten, c er den spesifikke varmekapasiteten og λ er varmekonduktiviteten. Både spesifikk varme c og termisk konduktivitet λ forandrer seg med temperaturen. Dersom det ikke brukes avanserte beregninger eller dersom en ikke vet hvordan c og λ vil forandre seg med temperaturen, er det foreslått å benytte verdiene ved romtemperatur. Formel (5) brukes kun dersom vegger, gulv og tak er av samme materiale. For å ta hensyn til ulike faktorer b i vegger, tak og gulv bør b innføres som:

$$b = \frac{\sum b_j A_j}{A_t - A_v} \quad (6)$$

Her er A_j arealet av omhyllingsflaten j , fratrukket arealet av åpninger, og b_j er varmeegenskapen for omhyllingsflate j og regnes ut slik det er gitt i formel (5).

2) Beregne når maksimumstemperaturen inntreffer

Denne inntreffer for $t^* = t_{max}^*$, og t_{max}^* er gitt ved:

$$t_{max}^* = t_{max} * \Gamma \quad (7)$$

Γ regnes ut slik det er gitt i formel (3), og t_{max} er gitt ved:

$$t_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{O} \\ t_{lim} \end{array} \right. \quad (8)$$

Åpningsfaktoren O regnes ut slik det er gitt i formel (4). $q_{t,d}$ er den dimensjonerende verdien av den spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten A_t , og er gitt ved:

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} \quad (9)$$

$q_{f,d}$ er den dimensjonerende verdien av den spesifikke brannenergien relatert til overflatearealet A_f av gulvet. $q_{f,d}$ er gitt ved:

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n \quad (10)$$

$q_{f,k}$ er den karakteristiske spesifikke brannenergien per enhet gulvareal, og kan finnes ved bruk av tabell E.4 i NS-EN 1991-1-2 som viser karakteristisk spesifikk brannenergi for forskjellig bruk av bygningen. Tabellen viser et gjennomsnitt og 80 %-fraktilen ved en gumbel-fordeling. De karakteristiske verdiene er gjengitt i tabell 4.

Tabell 4 Verdier for karakteristisk spesifikk brannenergi

Bruk	Gjennomsnitt	80 %-fraktil
Bolig	780	948
Sykehus (rom)	230	280
Hotell (rom)	310	377
Bibliotek	1 500	1 824
Kontor	420	511
Klasserom i skole	285	347
Handlesenter	600	730
Teater (kino)	300	365
Transport (offentlig område)	100	122

m i formel (10) er forbrenningsfaktoren, og denne bør vurderes i forhold til bruken av bygningen og typen brannenergi. Dersom materialene hovedsakelig består av cellulose kan forbrenningsfaktoren antas å være:

$$m = 0,8$$

δ_{q1} i formel (10) er en faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på branncellens størrelse, og kan finnes i tabell E.1 i NS-EN 1991-1-2. Verdiene er gjengitt i tabell 5.

Tabell 5 Fare for brannaktivering ift. gulvareal

Branncellens gulvareal $A_f [m^2]$	Fare for brannaktivering δ_{q1}
25	1,10
250	1,50
2 500	1,90
5 000	2,00
10 000	2,13

δ_{q2} i formel (10) er en faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på typen bruk av branncellen, og kan finnes i tabell E.1 i NS-EN 1991-1-2. Verdiene er gjengitt i tabell 6.

Tabell 6 Fare for brannaktivering ift. opphold i bygningen

Fare for brannaktivering, δ_{q2}	Eksempler på opphold i bygningen
0,78	Kunstgalleri, museum, svømmebasseng
1,00	Kontor, bolig, hotell, papirindustri
1,22	Fabrikk for maskiner og motorer
1,44	Kjemisk laboratorium, maleverksted
1,66	Fabrikk for fyrverkeri eller maling

δ_n i formel (10) er en faktor som tar hensyn til forskjellige aktive brannbekjempelsestiltak. Brannbekjempelsestiltakene er gruppert under automatisk brannsløkking, automatisk branneteksjon og –alarm og manuell brannsløkking. Faktoren δ_n er gitt ved:

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (11)$$

De ulike verdiene for δ_{ni} er gitt i tabell E.2 i NS-EN 1991-1-2, og er gjengitt i tabell 7.

Tabell 7 Funksjon for aktive brannbekjempelsestiltak

δ_{ni} Funksjon for aktive brannbekjempelsestiltak									
Automatisk brannsløkking		Automatisk branndeteksjon og -alarm			Manuell brannsløkking				
Automatisk vannsløkke-system	Uavhengig vannforsyning	Automatisk brann-deteksjon og -alarm ved varme	Automatisk brann-deteksjon og -alarm ved røyk	Automatisk alarm-overføring til brannvernstyrke	Brannvern-styrke i bygningen	Brannvern-styrke utenfor bygningen	Fri atkomst	Brann-slokke-utstyr	Røyk-ventilasjon
δ_{n1}	δ_{n2}	δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
0,61	1,0 0,87 0,7	0,87	0,73	0,87	0,61	0,78	0,9, 1 eller 1,5	1,0 eller 1,5	1,0 eller 1,5

Det står i NS-EN 1991-1-2 E.1 (4) at for vanlige brannbekjempelsestiltak som bør treffes i nesten alle tilfeller, som for eksempel fri atkomst, brannsløkkingssystemer og røykslokkesystemer i trappeoppganger, så skal verdiene i tabell 7 forutsettes å være 1,0. Om ikke, skal verdiene settes lik 1,5. I det nasjonale tillegget står det hvilke verdier som skal brukes i Norge, i tabell NA.E.2. Disse er gjengitt i tabell 8.

Tabell 8 Funksjon for aktive brannbekjempelsestiltak: Nasjonalt tillegg

δ_{ni} Funksjon for aktive brannbekjempelsestiltak									
Automatisk brannsløkking		Automatisk branndeteksjon og -alarm			Manuell brannsløkking				
Automatisk vannsløkke-system	Uavhengig vannforsyning	Automatisk brann-deteksjon og -alarm ved varme	Automatisk brann-deteksjon og -alarm ved røyk	Automatisk alarm-overføring til brannvernstyrke	Brannvern-styrke i bygningen	Brannvern-styrke utenfor bygningen	Fri atkomst	Brann-slokke-utstyr	Røyk-ventilasjon
δ_{n1}	δ_{n2}	δ_{n3}	δ_{n4}	δ_{n5}	δ_{n6}	δ_{n7}	δ_{n8}	δ_{n9}	δ_{n10}
1,0	1,0 1,0 1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Nederst i denne tabellen i Eurokoden står det er merknad, og det er som følger:

”For automatiske sløkkesystemer settes δ_{n1} normalt lik 1,0. Ved brannteknisk analyse kan det benyttes verdier ned til 0,6 forutsatt at fastsettelsen av valgt verdi for δ_{n1} inngår som en del av brannsikkerhetsstrategien for byggverket”

Det at man i Norge stiller krav til at valgt verdi skal være en del av brannsikkerhetsstrategien, er nok for å sikre at valget tas av brannrådgiver på konseptnivå, og ikke av den som detaljprosjekterer.

Når en skal bestemme t_{lim} i formel (8) må en ta hensyn til om brannen har en langsom, middels eller hurtig brannutvikling. t_{lim} er gitt ved:

$$t_{lim} = \begin{cases} 25 \text{ min ved langsom brannutvikling} \\ 20 \text{ min ved middels brannutvikling} \\ 15 \text{ min ved hurtig brannutvikling} \end{cases} \quad (12)$$

For å bestemme brannutviklingshastigheten kan tabell E.5 i NS-EN 1991-1-2 benyttes, og brannutviklingshastighetene er gjengitt i tabell 13.

Tabell 13 Brannutviklingshastighet ift. type bygning

Kategori	Brannutviklingshastighet
Bolig	Middels
Sykehus (rom)	Middels
Hotell (rom)	Middels
Bibliotek	Hurtig
Kontor	Middels
Klasserom i skole	Middels
Handlesenter	Hurtig
Teater (kino)	Hurtig
Transport (offentlig område)	Langsom

3) Temperatur-tidkurven for avkjølingsfasen

For beregning av gasstemperaturen i avkjølingsfasen er det gitt tre ulike formler avhengig av hva t_{max}^* -verdien er, og disse er gitt ved:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{for} \quad t_{max}^* \leq 0,5 \quad (13)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t_{max}^*) (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{for} \quad 0,5 < t_{max}^* < 2 \quad (14)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (t^* - t_{max}^* \cdot x) \quad \text{for} \quad t_{max}^* \geq 2 \quad (15)$$

t^* regnes ut med formel (2), t_{max}^* regnes ut med formel (7), og x er gitt ved:

$$x = 1,0 \quad \text{hvis} \quad t_{max} > t_{lim} \quad (16)$$

$$x = t_{lim} \cdot \frac{\Gamma}{t_{max}^*} \quad \text{hvis} \quad t_{max} = t_{lim} \quad (17)$$

Dersom $t_{max} > t_{lim}$ er brannen ventilasjonskontrollert, og grensen hvor den blir ventilasjonskontrollert er når $t_{max} = t_{lim}$. Der $t_{max} = t_{lim}$ erstattes t^* som er brukt i formel (2) med:

$$t^* = t * \Gamma_{lim} \quad (18)$$

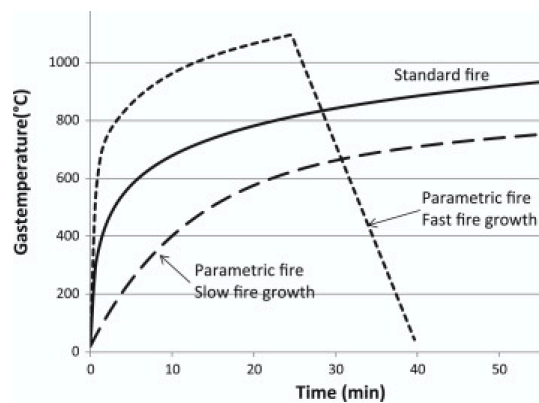
med

$$\Gamma_{lim} = \frac{\frac{O_{lim}^2}{b}}{\frac{0,04^2}{1160}} \quad (19)$$

der

$$O_{lim} = 0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{t_{lim}} \quad (20)$$

For illustrasjon er det i figur 8 et eksempel på eurokodens parametriske temperatur-tidkurve sammenlignet med en ISO 834-brann [23]. De to parametriske temperatur-tidkurvene representerer en rask og en treg brannvekst.



Figur 8 Sammenligning av nominell kurve og et eksempel på en parametriske kurve [23]

Diskusjon

Ved bruk av eurokodens parametriske temperatur-tidkurve finnes flere begrensninger. Disse begrensningene står beskrevet i NS-EN 1991-1-2 og er som følger:

- Branncellen kan ha et gulvareal opptil 500 m²
- Det skal ikke være åpninger i taket
- Branncellehøyden kan være opptil 4 m
- De termiske egenskapene $b = \sqrt{\rho c \lambda}$ skal ligge mellom 100 og 2200 J/m²s^{1/2}K
- Åpningsfaktoren $O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t}$ skal ligge mellom 0,02 og 0,20 m^{1/2}
- Ved beregning av maksimumstemperatur bør $q_{t,d}$ ligge mellom 50 og 1000 MJ/m²

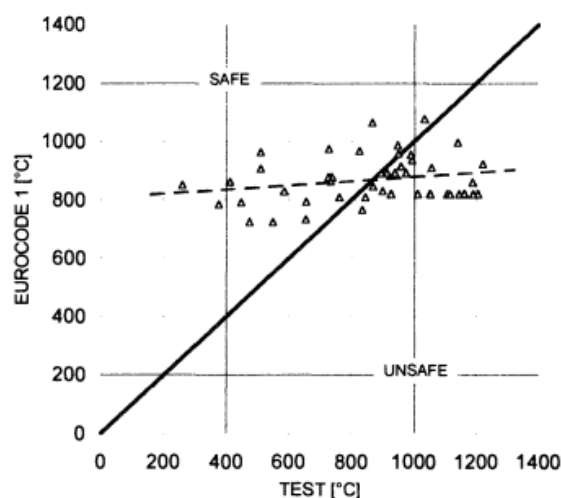
Parametriske branner er basert på at temperaturen er uniform i rommet, noe som begrenser bruken av denne metoden i rom med komplekse geometrier hvor det kan oppstå temperaturforskjeller [24]. Dersom det er mye brennbare materialer kontra ubrennbare

materialer på de områdene temperaturen er høyest, kan dette utgjøre en forskjell i brannens utvikling.

Ved modelleringen av parametrisk temperatur tid-kurve brukes brannenergien $q_{t,d}$ for å bestemme når maksimumstemperaturen inntreffer. $q_{t,d}$ er den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til den totale omhyllingsflaten i rommet. En svakhet ved denne metoden er at brannenergien som tas hensyn til er det brennbare inventaret i branncellen. Når eksponert trevirke i branncellen begynner å brenne vil den forkulle, og dette forkullende trevirket vil bidra med mer brannenergi. Dersom det forkullede trevirkets brannenergi hadde vært tatt med i beregningen i første omgang ville det resultert i en temperatur-tidkurve med lengre varighet grunnet høyere maksimumstemperatur.

Den parametriske temperatur-tidkurven har en lineær avkjølingsfase, slik man kan se i figur 8. Dette er en tilnærming av virkeligheten, og i mange tilfeller vil denne fasen være en brukbar approksimasjon av brannens utvikling og varighet. Usikkerhetene oppstår dersom det er brukt bygningsdeler av massive treelementer, eksempelvis vegger av massivtre. Massivtre er trelameller som er krysslåst, og dersom delaminering oppstår vil det bli eksponert fersk treverk som kan bidra til en overtenning nummer to [25]. Det vil si at selv mens brannen er i avkjølingsfasen kan lameller falle av og temperaturen kan være høy nok til at det ferske treverket begynner å brenne igjen. Dette kan føre til at brannforløpet forlenges, og den lineære avkjølingsfasen fra modellen vil stemme lite overens med den faktiske brannutviklingen.

For å undersøke hvor god estimering eurokodens parametriske temperatur-tidkurve gir sammenlignet med virkelige branner, har det blitt gjort sammenligning av eksperimentelle branntester og tilsvarende beregninger med eurokodens beregningsmetode [24]. Av branntestene var det totalt 48 stykk, og disse var av rom med et gulvareal mellom 12 og 13 m², åpningsfaktor mellom 0,055 og 0,157, dimensjonerende brannlast mellom 38 og 151 MJ/m², og termisk absorpsjonsevne b hovedsakelig mellom 958 og 996. Første sammenligning som ble gjort var av maksimumstemperaturen i luften, og denne er vist i figur 9.



Figur 9 Sammenligning av målte temperaturer og Eurokodens beregninger

Figur 9 viser målte temperaturer fra branntester i vertikalaksen og eurokodens beregninger i horisontalaksen. Den heltrukne lineære linjen representerer en perfekt prediksjon sammenlignet med faktisk målt verdi, punktene i grafen representerer målte verdier fra branntester og den stiplede linjen er en lineær regresjon av alle punktene. Det viser seg at det er liten sammenheng mellom beregnet verdi og målt verdi. Korrelasjonskoeffisienten er så lav som 0,23.

I en artikkel av R. Feasey og A. Buchanan [26] presenteres en modifisering av den parametriske temperatur-tidkurven gitt i eurokoden. Forslag om modifisering er basert på brannsimuleringer med programvaren COMPF2. Eurokodens beregninger for temperatur-tid antar at brannen i rommet med en åpningsfaktor $O = 0,04 \text{ m}^{0,5}$ og $b = 1160 \text{ W s}^{0,5}/\text{m}^2\text{K}$ vil gi en temperaturkurve som ligner standardkurven. Simuleringer gjort i COMPF2 viser at temperaturen i rom av betong med høy tetthet er nærmere å ligne standardkurven. Slik betong har en termisk absorpsjonsevne på rundt $b = 1900 \text{ W s}^{0,5}/\text{m}^2\text{K}$. Dermed er det foreslått en liten modifikasjon i formelen, hvor $b = 1900$ blir brukt i stedet for $b = 1160$. Eurokodens formel er gitt ved:

$$\Gamma_{eurokode} = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}$$

Foreslått endring er gitt ved:

$$\Gamma_{modifisert} = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1900}\right)^2}$$

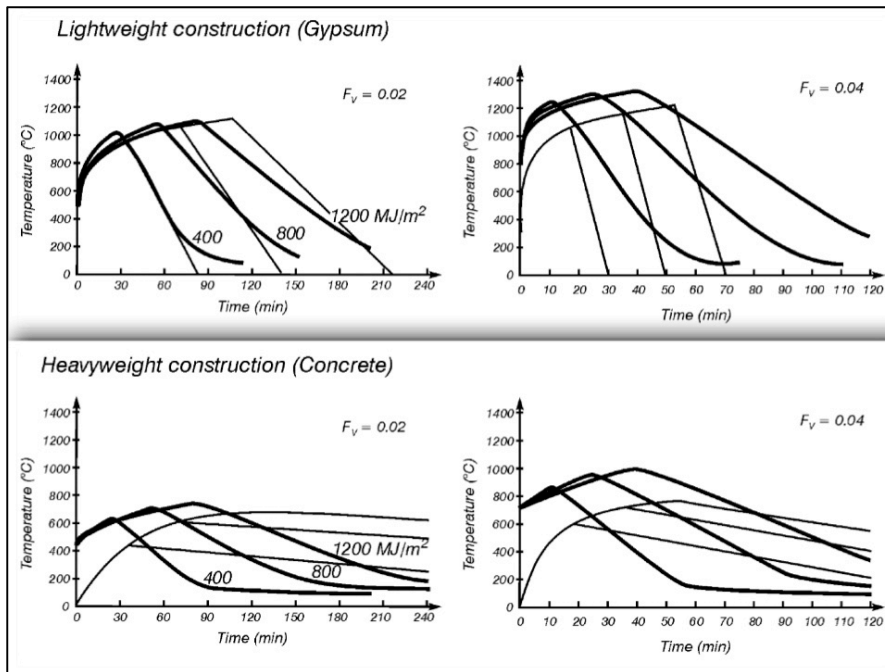
I tillegg til denne foreslåtte endringen er det foreslått en endring til, og det gjelder Γ for avkjølingsfasen. Ved prøving og feiling ble det funnet ut at å ta roten av verdiene over og under brøkstreken ville en få ut mer realistiske brannforløp. Eurokodens formel er gitt ved:

$$\Gamma_{avkjølingsfase} = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2}$$

Foreslått endring er gitt ved:

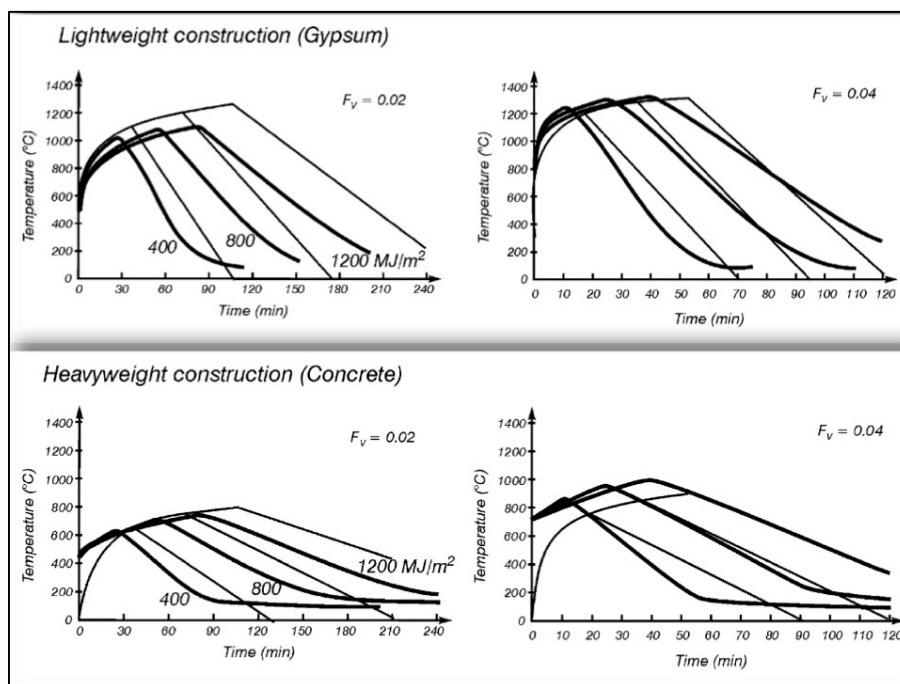
$$\Gamma_{avkjølingsfase} = \frac{\sqrt{\frac{O}{b}}}{\sqrt{\frac{0,04}{1900}}}$$

For å sammenligne eurokoden og den modifiserte formelen ble det gjort simuleringer i COMPF2. I figur 10 er det vist en sammenligning av eurokodens beregningsmetode og simuleringer i COMPF2, for henholdsvis en lettkonstruksjon (gips) og en tung konstruksjon (betong).



Figur 10 Sammenligning av Eurokodens beregninger og simuleringer i COMPF2

Videre er det presentert en sammenligning av den modifiserte formelen og simuleringer i COMPF2, og denne er vist i figur 11.



Figur 11 Sammenligning av modifisert beregningsmetode og simuleringer i COMPF2

Fra disse sammenligningene kan en se at den modifiserte formelen stemmer bedre overens med simuleringene i COMPF2.

Alternativ metode

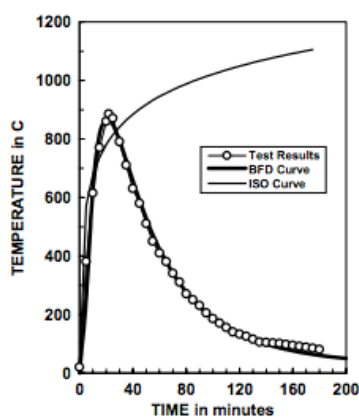
I en artikkel av C. R. Barnett [27] introduseres en metode for modellering av temperatur-tidkurve som skal passe bedre med resultater fra faktiske branntester, enn det eurokodens temperatur-tidkurve gjør. Denne kalles ”BFD curve”, eller BFD-kurve. Formen på kurven har en stor sammenheng med pyrolysekoefisienten og åpningsfaktoren. I tillegg behøves det ikke å gjøre en beregning for hver fase av brannen, slik som i eurokodens metode. Denne metoden behøver kun én formel for både oppvarmingsfasen og avkjølingsfasen. Kun tre parametere er nødvendig, og det er maksimumstemperaturen, tidspunktet når maksimumstemperaturen inntreffer og en formkonstant for kurven. For å undersøke BFD-kurven ble den brukt for sammenligning med ekte branner, og det ble laget en skala på 1-5 for hvor godt de stemte overens hvor 1 var best og 5 var dårlig. Av totalt 142 branntester havnet 87 % av BFD-kurvene under kategori 1-3 i skalaen, slik det er vist i tabell 9.

Tabell 9 Bruk av BFD-kurver for ekte branner

Summary of the data used for the BFD curve study

Fire test source	References	Total number of tests used	Fitted to categories 1, 2 or 3	% as 1-3 categories	Tests with mass loss data available
CARDI	[3]	9	8	89	9
Swedish	[4]	4	4	100	—
Kawagoe	[6]	13	12	92	13
CIB	[7]	4	3	75	4
JFRO	[10,11]	21	18	86	—
EBS	[14]	39	36	92	39
CTICM	[15]	44	36	82	44
Misc		8	7	88	13
Total		142	124	87	110

Som et eksempel på en av de bedre BFD-kurvene, under kategori 1, er vist i figur 12.



Figur 12 Eksempel på en BFD-kurve

Dette betyr at det finnes andre metoder for beregning av temperatur-tidkurver, og eurokodens metode er ikke nødvendigvis den beste. Denne metoden gjelder for alle typer konstruksjonsmaterialer, dermed er det usikkert om denne metoden er egnet for trekonstruksjoner. Dersom det var en metode å knytte denne metoden opp mot forkullingsrate og –dybde kunne denne vært egnet for trekonstruksjoner også.

Eurokodens forkullingsberegning

Ved prosjektering av trekonstruksjoner er det interessant å vite hva forkullingshastigheten og forkullingsdybden vil være under en brann. Ved å vite hvor mye av tverrsnittet som er igjen etter en brann kan en dimensjonere konstruksjonsdelene deretter. Derfor er det nødvendig med en beregningsmetode som kan gi en omtrentlig verdi for forkulling. Eurokoden presenterer to metoder for beregning av forkulling, hvor den ene er nominell og den andre er parametrisk, og disse er beskrevet i NS EN 1995-1-2 [7]. Den nominelle forkullingsdybden er en konservativ metode som bare er en funksjon av tid og en forkullingsrate for ulike typer bygningsmaterialer av tre. Den parametriske forkullingshastigheten og –dybden tar hensyn til brannlast, åpningsfaktor og termiske egenskaper av omsluttende konstruksjonsdeler, slik som for parametrisk temperatur-tidkurve. Videre er fremgangsmåten for parametrisk beregning beskrevet.

Parametrisk forkullingshastighet og –dybde

I NS EN 1995-1-2 tillegg A finnes beregningsmetode for parametrisk forkullingshastighet og –dybde. Denne er tiltenkt eksempelvis for søyler og bjelker, ikke omhyllingsflater. Forkullingshastigheten for ubeskyttet treverk under oppvarmingsfasen av en parametrisk brann er gitt ved:

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2 \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \sqrt{\Gamma} + 0,08} \quad (21)$$

Γ regnes ut med formel (3), slik som for parametrisk temperatur-tidkurve. β_n er den nominelle design forkullingsraten av ulike bygningsmaterialer av tre, og verdiene er gjengitt i tabell 10.

Tabell 10 Forkullingshastigheter

	β_0 mm/min	β_1 mm/min
a) Softwood and beech Glued laminated timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$ Solid timber with a characteristic density of $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,65	0,7 0,8
b) Hardwood Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of 290 kg/m^3 Solid or glued laminated hardwood with a characteristic density of $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,65 0,50	0,7 0,55
c) LVL with a characteristic density of $\geq 480 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
d) Panels Wood panelling Plywood Wood-based panels other than plywood	0,9 ^a 1,0 ^a 0,9 ^a	– – –
^a The values apply to a characteristic density of 450 kg/m^3 and a panel thickness of 20 mm; see 3.4.2(9) for other thicknesses and densities.		

Videre kan en regne ut forkullingsdybden. Disse er gitt ved:

$$d_{char} = \beta_{par} t \quad \text{for} \quad t \leq t_0 \quad (22)$$

$$d_{char} = \beta_{par} \left(1,5 t - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right) \quad \text{for} \quad t_0 \leq t \leq 3t_0 \quad (23)$$

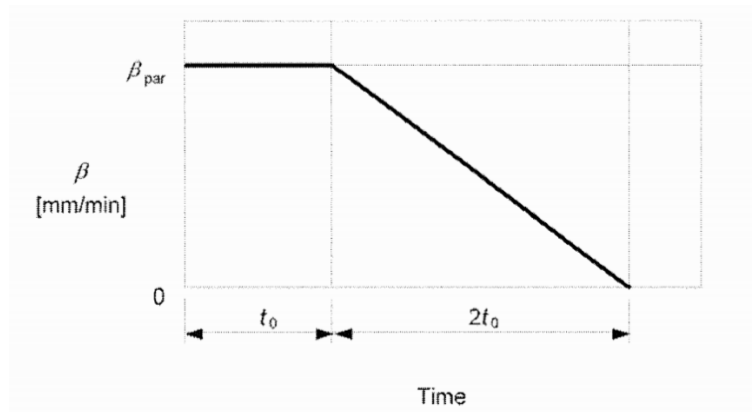
$$d_{char} = 2\beta_{par}t_0 \quad \text{for} \quad 3t_0 \leq t \leq 5t_0 \quad (24)$$

Her er d_{char} forkullingsdybden [mm], β_{par} er den parametriske forkullingshastigheten regnet ut fra formel (18) [mm/min], t er tiden [min] og t_0 er gitt ved:

$$t_0 = 0,009 \frac{q_{t,d}}{O} \quad (25)$$

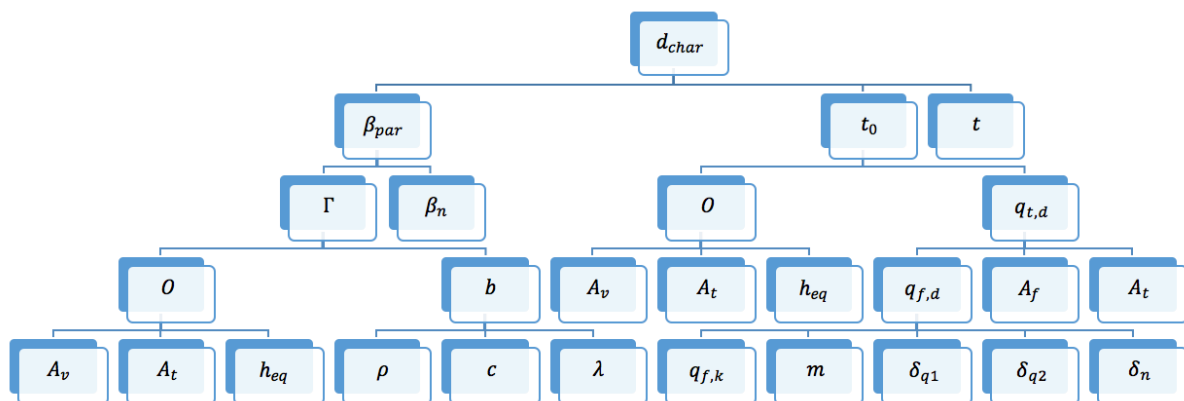
Her er t_0 tidsperioden det er konstant forkullingshastighet [min], $q_{t,d}$ er brannlasten [MJ/m^2] og regnes ut med formel (9), O er åpningsfaktoren [$\text{m}^{0,5}$] og regnes ut med formel (4).

Eurokoden presenterer også forholdet mellom forkullingshastighet og tid for parametriske branner gitt i figur 13. Forkullingsraten er konstant i en tidsperiode t_0 , deretter minker raten lineær frem til tiden $3t_0$. Dersom en har regnet ut t_0 kan en regne ut hvor lenge forkullingen vil vare, og dersom en har regnet ut β_{par} kan en også regne ut forkullingsdybden ved å regne ut arealet under grafen.



Figur 13 Forholdet mellom forkullingsrate og tid for parametrisk brannpåkjenning

En grafisk fremstilling av hvilke parametere som avhenger av hverandre for å beregne forkullingsdybde i henhold til eurokoden er vist i figur 14.



Figur 14 Parametere som brukes til beregning av forkullingsdybde

Svakheter

Det finnes noen begrensninger til denne metoden. For beregning av forkullingshastighet og – dybde må følgende begrensninger følges:

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

Her er b og h bredden og høyden av tverrsnittet.

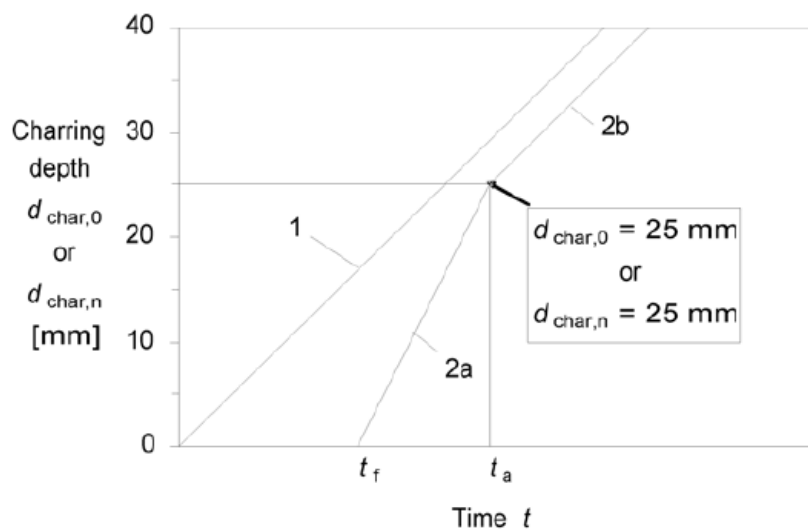
Forkullingsraten av tre avhenger av flere faktorer som blant annet hvilken tresort, densitet, fuktinnhold, permeabilitet, komposisjon og retning på varmeovergangen, dvs. parallelt eller vinkelrett på fiberretningen [28]. Det er kun noen av disse faktorene som faktisk blir tatt hensyn til i Eurokodens metode for forkullingsberegning.

Effekten av gips ved forkullingsberegning

Dersom det er overflater av tre er det ofte ønskelig å kle overflaten med gips for å beskytte mot brann. Gips er ubrennbart men ved brann vil den etter hvert falle av, og dette fører til at forkullingen av treverket forkommer senere enn om treverket ikke hadde vært beskyttet av gips. Eurokoden presenterer ulike tilnærminger for forkulling ved bruk av beskyttelse. Før beskrivelse av de ulike tilnærmingene må noen relevante parametere forklares først.

- t_{ch} er tiden når forkullingen begynner
- t_f er tiden når beskyttelsen svikter/faller av.
- t_a er tiden når forkullingsdybden blir lik den forkullingsdybden som ville vært for samme bygningsdel uten beskyttelse, eller når forkullingsdybden blir 25 mm. Den minste verdien er gjeldende. Etter denne tiden blir forkullingsraten konstant slik den er regnet ut å være.

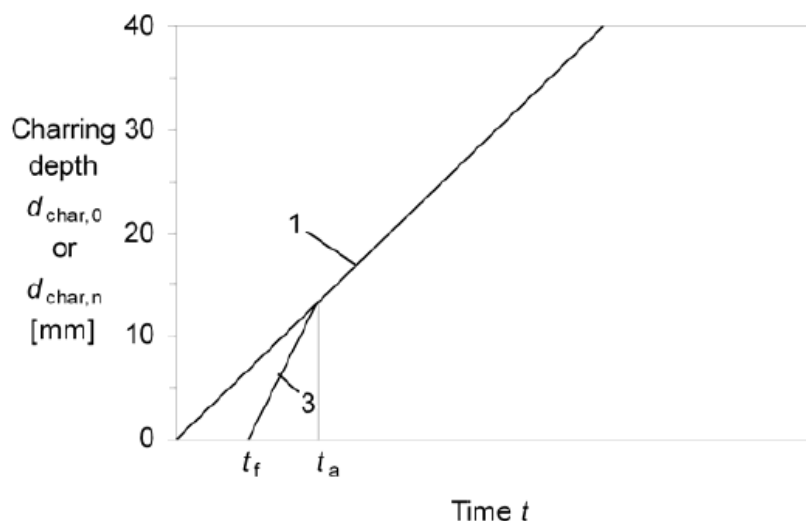
Den første tilnærmingen Eurokoden presenterer er når $t_{ch} = t_f$ og forkullingsdybden ved tiden t_a er minst 25 mm, se figur 15.



Figur 15 Forkulling ved bruk av gips - 1

Linje 1 viser forkullingsforløpet for en ubeskyttet bygningsdel. Linje 2a viser at forkullingen starter når beskyttelsen svikter. Her er forkullingsraten noe høyere enn linje 1, og fra tiden t_a er forkullingsraten den samme, etter 25 mm forkullingsdybde.

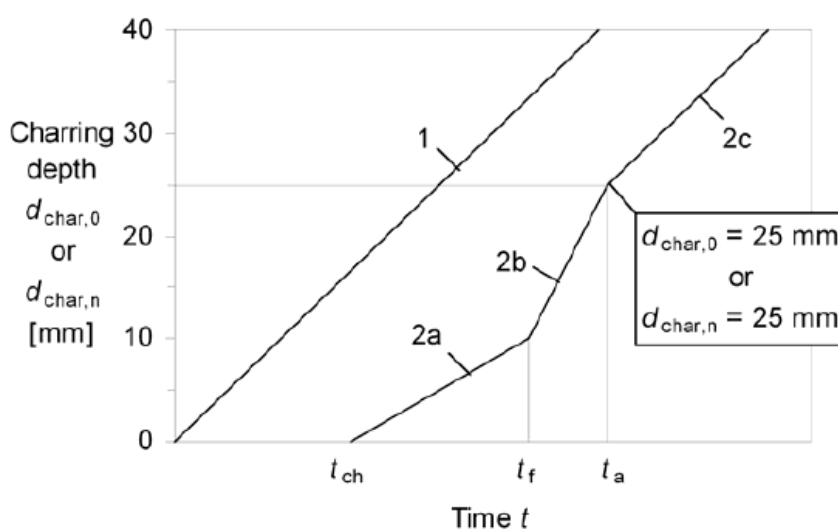
Den andre tilnærmingen Eurokoden presenterer er når $t_{ch} = t_f$ og forkullingsdybden ved tiden t_a er mindre enn 25 mm. Se figur 16.



Figur 16 Forkulling ved bruk av gips - 2

Linje 1 viser forkullingsforløpet for en ubeskyttet bygningsdel. Linje 3 viser at forkullingen starter når beskyttelsen svikter, og tiden t_a inntreffer før forkullingsdybden er 25 mm.

Den siste tilnærmingen er når forkullingen starter før beskyttelsen har sviktet, altså når $t_{ch} < t_f$, se figur 17.



Figur 17 Forkulling ved bruk av gips - 3

Linje 1 viser forkullingsforløpet for en ubeskyttet bygningsdel. Linje 2a viser forkullingsforløpet før beskyttelsen svikter, og her er forkullingsraten noe lavere enn for en ubeskyttet bygningsdel. Når beskyttelsen svikter øker forkullingsraten frem til forkullingsdybden har blitt 25 mm og t_a inntreffer.

Utrekninger for når beskyttelsen svikter og når forkullingen starter avhenger av hvilket materiale som er brukt som beskyttelse og om det er ett eller flere lag med beskyttelse. For begrensningens skyld er det valgt å studere bruken av gips som brannbeskyttelse. Det finnes

ulike typer gips som er klassifisert etter type, og det er valgt å se på gips type A. Gips type A er normale gipsplater, og har ofte en tykkelse på 12,5 mm.

For gipsplater type A kan tiden for når forkulling starter settes lik tiden når gipsen faller av.

$$t_f = t_{ch} \quad (26)$$

Videre kan tiden når forkulling starter regnes ut på følgende måte:

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 14 \quad (27)$$

Her er h_p tykkelsen av gipsplaten [mm]. Formel (27) benyttes dersom det er ett lag gips type A. Dersom det benyttes to lag med gips type A brukes samme formel, men verdien for h_p velges å være tykkelsen av det ytterste laget og 50 % av tykkelsen til det indre laget.

Når tiden for svikt av gipsplate er den samme som tiden for når forkulling starter, regnes tiden t_a på følgende måte:

$$t_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 2t_f \\ \frac{25}{k_3\beta_n} + t_f \end{array} \right. \quad (28)$$

For stadiet etter svikt av beskyttelsen ($t_f \leq t \leq t_a$) skal forkullingsraten multipliseres med en faktor $k_3 = 2$. Etter tiden t_a skal ikke faktoren brukes.

I håndboken "Brandsikre trähus" [29] er oppgitt tider for t_f og t_{ch} for typiske gipsplatekombinasjoner, og disse er presentert i tabell 11 for å se hva verdiene ligger på.

Tabell 11 Tidspunkt for når ulike gipskombinasjoner svikter

Gips	Tykkelse [mm]	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 + Type A	25,0	33,0	38,5	31,0	Ingen info
Type F + Type A	25,0	45,5	50,8	36,0	36,0
Type F + Type A	27,5	50,8	-	36,0	50,0
Type F + Type F	25,0	45,5	60	36	47
Type F + Type F	30,0	56,0	80,0	46,0	57,0

For gipskombinasjonen type F + type A (27,5 mm tykkelse) er t_f -verdien som er oppgitt i ”Brandsåkra trähus” [29] på 81 minutter. Dette ser ut til å være feil dersom en sammenligner med resten av tallene, derfor er den fjernet fra tabellen. Denne vil ligge på rundt 60-70 minutter.

Diskusjon

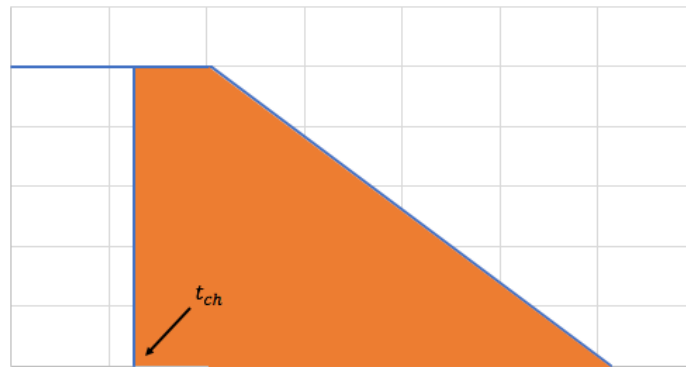
Eurokoden presenterer metode for beregning av forkullingsrate og –dybde. Ut i fra de nominelle forkullingsratene kan en vite omtrentlig hva forkullingsraten for treverk vil være, og dette vil avhenge av både romgeometri, åpninger og termiske egenskaper til materialene i rommet. Eksempelvis vil en høy åpningsfaktor føre til en rask brannvekst og høy makstemperatur, som igjen vil føre til økt forkullingsrate. I en rapport av Daniel Brandon og Birgit Östman [30] som omhandler brannsikkerhet for høye trehus, oppsummeres forkullingsrater ved ulike branntester for ubeskyttet solid tre. Dette er presentert i tabell 12.

Tabell 12 Oppsummering av testresultater for rom med ubeskyttet tre

Test name	Reference	Floor area of ignited compartment (m ²)	Opening factor	Main structural members	Movable fire load density (MJ/m ²)	Test duration (min)	Time to flashover (mm:ss)	Approximate peak temperature (°C)	Average heat release rate during fully developed fire (MW)	Approximate time to start of decay (min)	Average charring rate (mm/min)
Test A1	Lennon <i>et al.</i> (2000)	N.F.	N.F.	LTF	N.F.	64	24:00	1000	6.0	no decay	0.75
Test P2	Hox (2015)	13.3	0.070	HLT	653	115	04:10	1100	N.F.	no decay	1.1
Test B1	Hakkarainen (2002)	15.75	0.042	HLT	900**	50	04:50	1100	N.F.	no decay	0.8
Test I3	McGregor (2013)			CLT	182	53	04:55	980*	8.8***	45	0.63
Test I5	McGregor (2013) /Li <i>et al.</i> (2014)			529	63	5:00**	1000*	7.1	no decay	0.85	
Test K1	Medina Hevia (2014)			532	120	04:00	1200*	4.8	20*	0.69	
Test K2				532	56	05:00	1100*	6.3	20*	0.77	
Test K3				532	81	06:00	1100*	4.4	20	0.71	

Forkullingsratene varierer mellom 0,63 mm/min og 1,10 mm/min. Den høyeste forkullingsraten oppstår for HLT (Heavy Laminated Timber), mens for krysslaminert tre (CLT) varierer den mellom 0,63 og 0,85 mm/min.

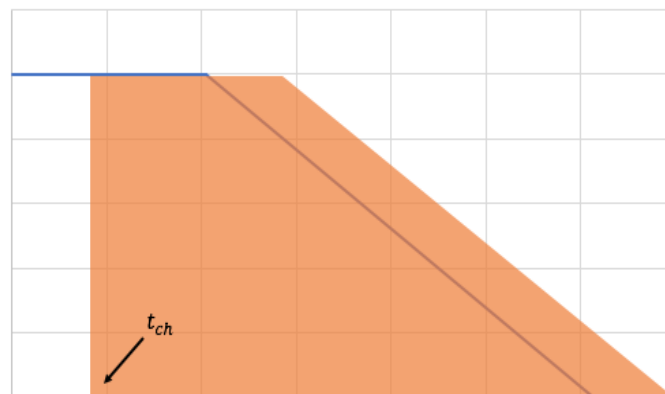
Det er presentert metoder for å beregne både tidspunkt for når gipsplater faller av eller svikter og tidspunkt for når forkullingen starter. Gipsplater er ubrennbare, men hvordan det påvirker hele brannforløpet kan diskuteres. En måte å tolke forkullingsforløpet ved bruk av gips, er at forkullingen blir forsinket. Ved å anta at forkullingen skjer i perioden $t = 0$ til $t = 3t_0$, uavhengig av gipskledningen, så kan en regne ut når forkullingen starter og trekke fra tiden før gipskledningen faller av. Dermed fås forkullingsforløpet som presentert i figur 18.



Figur 18 Forsinket forkulling

Ved å tolke på denne måten antar en at brannforløpet er upåvirket av gipskledningen, men at det kun er forkullingen som påvirkes.

En annen måte å tolke forkullingsforløpet på er at forkullingen blir forskjøvet. Da antar en at forkullingen vil skje i en tidsperiode $3t_0$ uansett. Dermed blir forkullingsforløpet som presentert i figur 19.

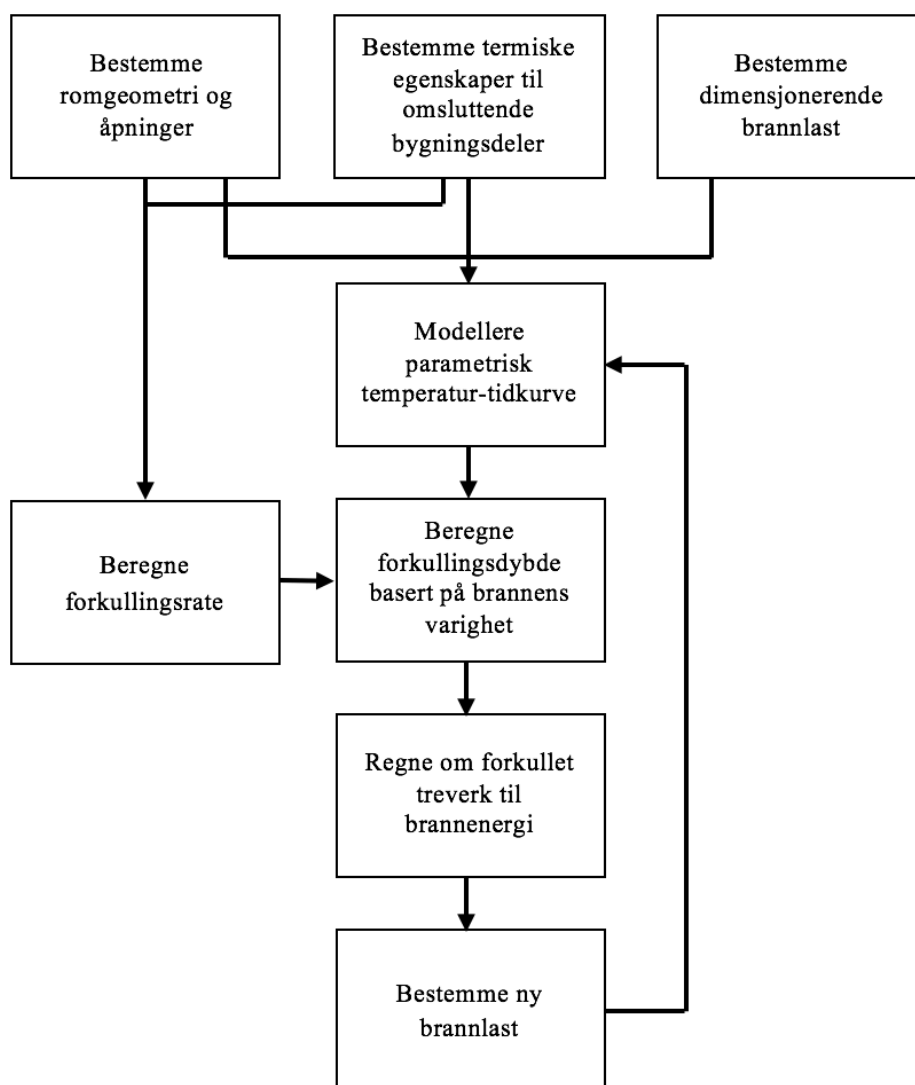


Figur 19 Forskjøvet forkulling

Dersom denne tolkningen er benyttet så vil brannforløpet i teorien bli forlenget dersom hele forkullingsforløpet blir forskjøvet. Det er usikkerheter knyttet rundt om brannen slukker av seg selv når bidraget fra inventaret opphører eller om brannen vokser i størrelse etter at både inventaret er brent opp og gipsplatene har falt av. Basert på resultater fra eksperimenter som er gjennomgått i litteraturstudiet til SP Fire Research [31] (som nå heter RISE Fire Research) vil brann i massivtreelementer ikke nødvendigvis slukke av seg selv så fort inventaret er brent opp, og i noen tilfeller vil den vokse seg i størrelse etter at det brennbare inventaret er brent opp.

Temperatur-tidkurver: Inkludering av eksponert tre

Ved eurokodens metode for beregning av temperatur-tidkurve tas brannlasten hensyn til, men kompakte vegger av massivtre eller eksponerte bjelker/søyler av limtre som vil brenne er ikke tatt med som brannlast. Den mobile brannlasten er stort sett inventaret i branncellen, men dersom det er tunge trekonstruksjoner som er eksponert i rommet bør dette tas med i modelleringen for å få en riktigere tilnærming av temperatur-tidkurven. For å ta med eksponert trevirke som brannlast er det nødvendig å beregne forkullingsdybden, og gjøre en ny modellering hvor brannlasten fra forkullet treverk tas med. Ved å iterere noen ganger vil kurven kanskje konvergere, og hvis den gjør det vil vi til slutt få en temperatur-tidkurve hvor det forkullede treverket er tatt hensyn til. Dersom brannlasten blir veldig stor er det ikke sikkert den vil konvergere. Figur 20 viser skjematisk tankegangen for denne metoden.



Figur 20 Prosedyre for iterering: Inkludere forkullet treverk som brannlast

Fremgangsmåte

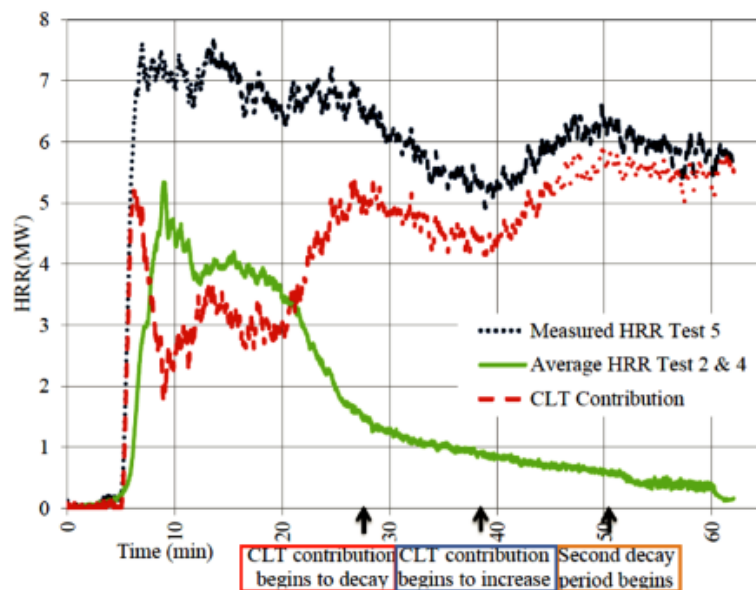
- 1) Bestemme romgeometri, åpninger og termiske egenskaper. Med følgende parametere kan en regne ut gasstemperaturen i branncellen i oppvarmingsfasen:
 - a. Areal av åpninger i veggene, A_v
 - b. Areal av gulvoverflate, A_f
 - c. Vindushøyde, h_{eq}
 - d. Totalt areal av omsluttende bygningsdeler inkludert åpninger, A_t
 - e. Omsluttende bygningsdelers massetetthet, ρ
 - f. Omsluttende bygningsdelers spesifikke varmekapasitet, c
 - g. Omsluttende bygningsdelers varmekonduktivitet, λ
- 2) Bestemme brannlast, $q_{f,d,1}$, gjennom beregning eller tabulerte verdier
- 3) Modellere parametrisk temperatur-tidkurve, $\theta_{g,1}$, basert på brannlasten i branncellen, ekskludert eksponert treverk
- 4) Beregne forkullingsraten, β_{par} , for oppvarmingsfasen
- 5) Beregne total forkullingsdybde, $d_{char,1}$, basert på brannens varighet
- 6) Bestemme ny brannlast, $q_{f,d,2}$, hvor brannlasten fra forkullet treverk tas med. Dette gjøres ved å regne om forkullet treverk til brannenergi. $q_{f,d,2} = q_{f,d,1} + q_{tre}$
- 7) Modellere ny parametrisk temperatur-tidkurve, $\theta_{g,2}$, basert på den nye brannlasten som ble funnet i punkt 6)
- 8) Beregne ny forkullingsdybde, $d_{char,2}$, basert på brannens varighet
- 9) Fortsette iterasjonen frem til det ekstra bidraget fra treverket blir relativt liten.

Diskusjon

Denne metoden å gjøre manuelle iterasjoner for å beregne temperatur-tidkurve samt forkullingsrate og –dybde gir resultater, men om dette vil stemme overens med virkeligheten er usikkert. Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve ble ikke utviklet med formål om å ta hensyn til forkullet treverk som brannenergi. For det første er det knyttet usikkerheter rundt eurokodens parametriske temperatur-tidkurve, om denne vil stemme godt overens med en virkelig brann. Det er en mulighet for at den tunge trekonstruksjonen slutter å brenne når inventaret er brent opp, eller så vil den fortsette å brenne. For det andre er det knyttet usikkerheter til eurokodens beregningsmetode for forkullingsrate og –dybde for en parametrisk brannpåkjenning, da denne gir en konstant forkullingsrate. For massivtre kan forkullingsraten ligge på mellom 0,31 og 1,1 mm/min, og forkullingsraten vil også variere avhengig av hvor i tverrsnittet forkullingen foregår.

For det første er det knyttet usikkerheter rundt eurokodens parametriske temperatur-tidkurve, og for det andre er det knyttet usikkerheter til eurokodens beregningsmetode for forkullingsrate og –dybde for en parametrisk brannpåkjenning.

For å få en bedre forståelse av branner i trekonstruksjoner må en undersøke bidraget til brannen fra trekonstruksjonen, eller fra eksponert treverk. Ved Carleton University i Canada ble det utført flere storskalaforsøk, hvor tre av disse testene inngikk i McGregors masteroppgave [25, 30]. Her skulle branner i brannceller undersøkes, hvor det ble gjort testing av rom med tildekning av gips, og rom hvor trevirket var helt ubeskyttet. Rommet hadde en grunnflate på 3,5 m x 4,5 m og en høyde på 2,5 m. Det var én åpning på veggen, og denne hadde en høyde på 2 m og en bredde på 1,07 m. Rommet var konstruert av frittstående massivtrepaneler med 3 lameller og en tykkelse på 105 mm. Brenselet i branncellen var typiske soveromm møbler og inventar som klær og bøker, og brannen klassifiseres som en naturlig brann [31]. Figur 21 viser varmeavgivelsesraten (HRR), rapportert av McGregor [25].



Figur 21 Varmeavgivelsesrate for branntest, massivtre

I figur 21 vises resultater fra branntestene, hvor en kan lese av varmeavgivelsesraten over tid. Test 5 er hvor trevirket helt ubeskyttet, test 2 og 4 er hvor trevirket er beskyttet med gipsplater, og kurven for "CLT Contribution" viser differansen mellom kurvene for test 5 og test 2 og 4, det vil si bidraget fra eksponert tre til brannen. Rundt 20 minutter ut i testen begynner varmeavgivelsen fra inventar å avta, men her begynner varmeavgivelsen fra massivtrepanelene å øke igjen. Massivtrepanelene bidro med 63 % av den totale avgitte energien i brannen [31].

Metoden for å finne forkullingsrate og –dybde er egentlig ikke ment for massivtre, som er bygget opp av lameller. Delaminering kan oppstå, det vil si når lamellene faller av under en brann, og dette vil påvirke forkullingen av trevirket. Dersom delaminering oppstår kan det føre til at varmeavgivelsen fra trevirket øker igjen, da det forkullede laget faller av og det er delvis ferskt treverk under. Dette fører til ujevn forkullingsrate, og lamellen kan falle av før den er helt forkullet. Dette fenomenet kalles *second flashover*, eller på norsk: andre overtenning [30]. Dette kan forekomme både dersom det oppstår delaminering av massivtreelementene eller dersom gipskledningen faller av. I figur 21 kan en se at ved rundt 39 minutter så oppstår en

vekstfase nummer to, og det er forårsaket av delaminering av den ytterste lamellen. Dersom det brukes temperaturfølsomt lim, eksempelvis polyuretanlim, kan delamineringen oppstå enda tidligere. Det vil si at delamineringen forekommer før en temperatur på 300°C. Da vil andre overtenning ikke forekomme grunnet forkulling, men av temperaturfølsomheten til limet [31].

Beregning av brannenergi

For beregning av parametrisk temperatur-tidkurve for en branncelle av massivtre er det ønskelig å legge til forkullet treverk som brannenergi. NS-EN 1991-1-2 tillegg E beskriver en metode for beregning av brannenergi, som videre kan benyttes for beregning av ny parametrisk temperatur-tidkurve hvor det forkullede treverket er tatt hensyn til. Karakteristisk brannenergi defineres som:

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} * H_{ui} * \Psi_i \quad (29)$$

$M_{k,i}$ er mengden brennbart materiale [kg], H_{ui} er netto brennverdi [MJ/kg] og Ψ_i er en valgfri faktor for vurdering av beskyttet brannenergi.

Når en skal beregne $M_{k,i}$ for det forkullede treverket, må en først regne ut det totale volumet av det forkullede treverket [m³]. Dette gjøres konservativt, ettersom det gjenværende kullet ikke blir trukket fra. Dette er for å vise vanlig forenkling som gjøres i bransjen. Deretter multipliseres mengden brennbart materiale med densiteten for massivtre [kg/m³].

$$M_{k,i} = d_{char} * A_{treoverflater} * \rho_{tre} \quad (30)$$

Det finnes tabulerte verdier for netto brennverdi H_u , for ulike materialer og stoffer i tabell E.3 i NS-EN 1991-1-2. For trevirke er verdien gitt som:

$$H_{u,trevirke} = 17,5 \frac{MJ}{kg}$$

Dersom en ønsker å ta hensyn til fuktinnholdet i materialet for beregning av netto brennverdi, kan netto brennverdi beregnes etter følgende:

$$H_u = H_{u0} * (1 - 0,01u) - 0,025u \quad (31)$$

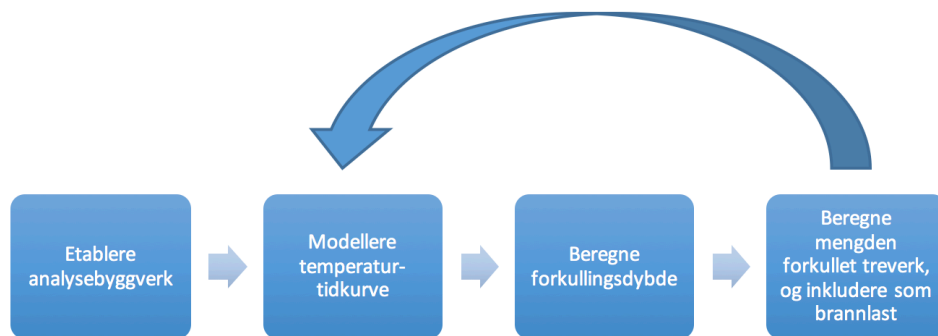
H_{u0} er netto brennverdi av tørre materialer, og kan velges å være 17,5 $\frac{MJ}{kg}$, og u er fuktinnholdet uttrykt som prosent av tørrvekt.

Når en skal legge til brannenergien fra det forkullede treverket ved beregning av temperaturtidkurve vil en ha det som karakteristisk spesifikk brannenergi relatert til gulvarealet, $q_{f,k}$, og det beregnes på følgende måte.

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A_f} \quad (32)$$

Case: Modellering av temperatur-tidkurve – Massivtrekonstruksjon

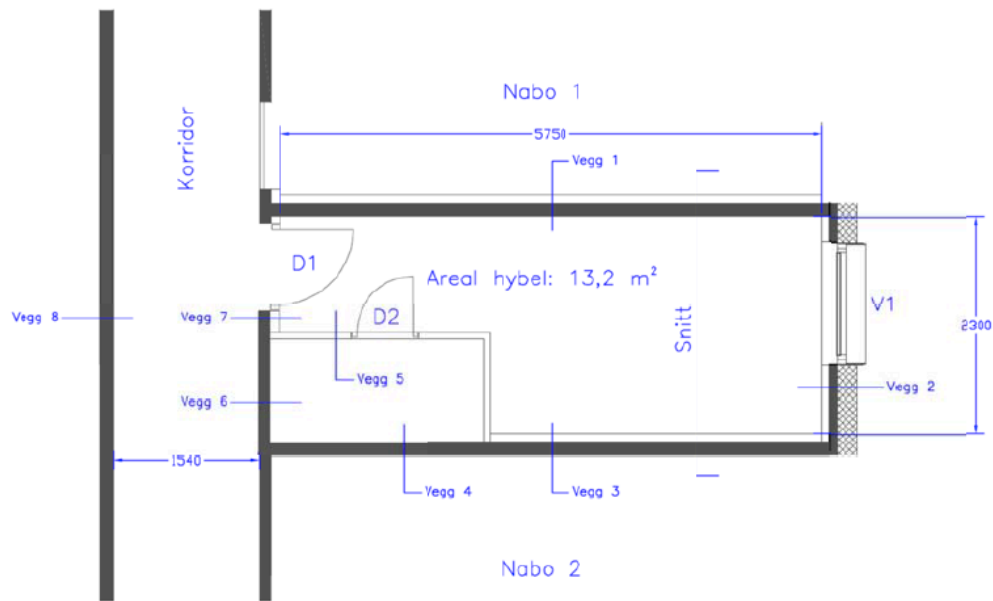
I denne casen skal det modelleres parametriske temperatur-tidkurve hvor forkullet treverk inkluderes i brannlast. En enkel skjematisk fremgangsmåte er presentert i figur 22.



Figur 22 Overordnet prosedyre for inkludering av forkullet treverk som brannlast

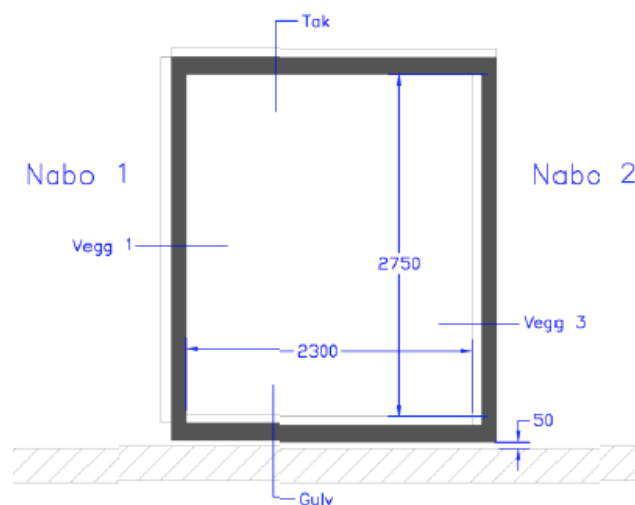
Etablering av analysebyggverk

Det er valgt å studere en typisk studenthybel, da både studenthybler og leilighetsbygg er aktuelle bruksområder for høyhus i tre. Denne studenthybelen skal være en egen branncelle som en del av et høyhus bygget av massivtre, og bygget er klassifisert som brannklasse 3. Rommets geometri tar utgangspunkt i en hybel fra Moholt 50|50 [32]. En plantegning som viser mål av en studenthybel fra Moholt 50|50 er vist i figur 23.



Figur 23 Plantegning av en hybel i Moholt 50/50

Med utgangspunkt i hybelen fra Moholt 50|50 velges gulvarealet i analysebranncellen lik $5,75 \times 2,30$. I analysebranncellen velges det å se bort i fra rommet som er i hybelen, altså badet. Videre er en snittegning fra samme hybelen vist i figur 24.



Figur 24 Snittegning av en hybel i Moholt 50/50

Takhøyden er 2,75 m, fra figur 24. I tillegg er det ett vindu i enden av hybelen, og denne har dimensjonene $1,2 \times 1,6 \text{ m}^2$.

I denne casen er det interessant å studere bidraget fra trekonstruksjonen, og hvordan dette kan tas med i beregningen av parametrisk temperatur-tidkurve. Derfor er det valgt å ha både gulv, vegger og tak bygget i massivtre. I første omgang skal situasjonen være at 50 % av overflatene skal være dekket av to lag med gipsplater type A. I andre omgang skal situasjonen være at alle

overflater er dekket. For illustrasjon er det laget en grafisk fremstilling av en tenkt studenthybel vist i figur 25.



Figur 25 Modell av analysebranncelle: Studenthybel (massivtre)

Modellering

Analysebranncellen er etablert, dermed kan de aktuelle parameterne for beregning av temperaturen i oppvarmingsfasen regnes ut.

Areal av åpninger i veggene:

$$A_v = 1,20 \text{ m} * 1,60 \text{ m} = 1,92 \text{ m}^2$$

Areal av gulvoverflate:

$$A_f = 2,30 \text{ m} * 5,75 \text{ m} = 13,23 \text{ m}^2$$

Vindushøyde:

$$h_{eq} = 1,60 \text{ m}$$

Totalt areal av omsluttende bygningsdeler inkludert åpninger:

$$A_{vegg,langside} = 5,75 \text{ m} * 2,75 \text{ m} = 15,81 \text{ m}^2$$

$$A_{vegg,kortside} = 2,30 \text{ m} * 2,75 \text{ m} = 6,33 \text{ m}^2$$

$$A_{gulv,tak} = A_f = 13,23 \text{ m}^2$$

$$A_t = 2 * (A_{vegg,langside} + A_{vegg,kortside} + A_{gulv,tak})$$

$$A_t = 2 * (15,81 \text{ m}^2 + 6,33 \text{ m}^2 + 13,23 \text{ m}^2) = 70,74 \text{ m}^2$$

De termiske egenskapene til massivtre som er valgt å bruke er hentet fra en produktkatalog [33], og er som følger:

$$\lambda = 0,13 \frac{W}{mK}$$

$$c = 1600 \frac{J}{kg K}$$

$$\rho = 471 \frac{kg}{m^3}$$

Videre kan en regne ut åpningsfaktor O , b , Γ og t^* :

$$O = \frac{A_v * \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{1,92 * \sqrt{1,60}}{70,74} = 0,0343 \text{ m}^{1/2}$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{471 * 1600 * 0,13} = 313 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = \frac{\left(\frac{0,0343}{313}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} = 10,1$$

$$t^* = t * \Gamma = 10,1t$$

Med dette kan en beregne kurven for oppvarmingsfasen. Videre må en beregne når maksimumstemperaturen vil inntreffe, og da må dimensjonerende verdi for brannenergi $q_{f,d}$ regnes ut.

Den karakteristiske spesifikke brannenergien per enhet gulvareal, $q_{f,k}$, finnes ut fra tabell 4. I denne casen velges det å bruke den Gumbel-fordelte 80 %-fraktilen:

$$q_{f,k} = 948 \frac{MJ}{m^2}$$

Anbefalt verdi for forbrenningsfaktoren er:

$$m = 0,8$$

Faktoren δ_{q1} velges ut i fra hvor stort gulvareal en har. Gulvarealet i denne casen er $13,23 m^2$, og i tabell 5 går arealene fra $25 - 10\,000 m^2$. Dermed velges det å bruke verdien for et gulvareal på $25 m^2$:

$$\delta_{q1} = 1,1$$

Faktoren δ_{q2} velges ut i fra bruk av bygg. For boliger settes verdien lik:

$$\delta_{q2} = 1,0$$

δ_n er en faktor som tar hensyn til de forskjellige aktive brannbekjempelsestiltakene. I det nasjonale tillegget er det beskrevet at faktoren skal settes lik 1,0.

$$\delta_n = 1,0$$

Dermed kan $q_{f,d,1}$ regnes ut:

$$q_{f,d,1} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n = 948 * 0,8 * 1,10 * 1,00 * 1,00 = 834,24 \frac{MJ}{m^2}$$

Videre regnes $q_{t,d}$ ut for å finne t_{max} . Ved beregning av t_{max} brukes t_{lim} lik 20 minutter, som er middels brannutvikling for boliger.

$$q_{t,d,1} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} = 834,24 * \frac{13,23}{70,74} = 156,02 \frac{MJ}{m^2}$$

$$t_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{0} \\ t_{lim} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,2 * 10^{-3} * \frac{156,02}{0,0343} \\ 0,333 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,910 \\ 0,333 \end{array} \right\} = 0,91 h$$

Maksimumstemperaturen θ_{max} inntreffer når $t^* = t_{max}^*$, og t_{max}^* er:

$$t_{max}^* = t_{max} * \Gamma = 0,91 * 10,1 = 9,19$$

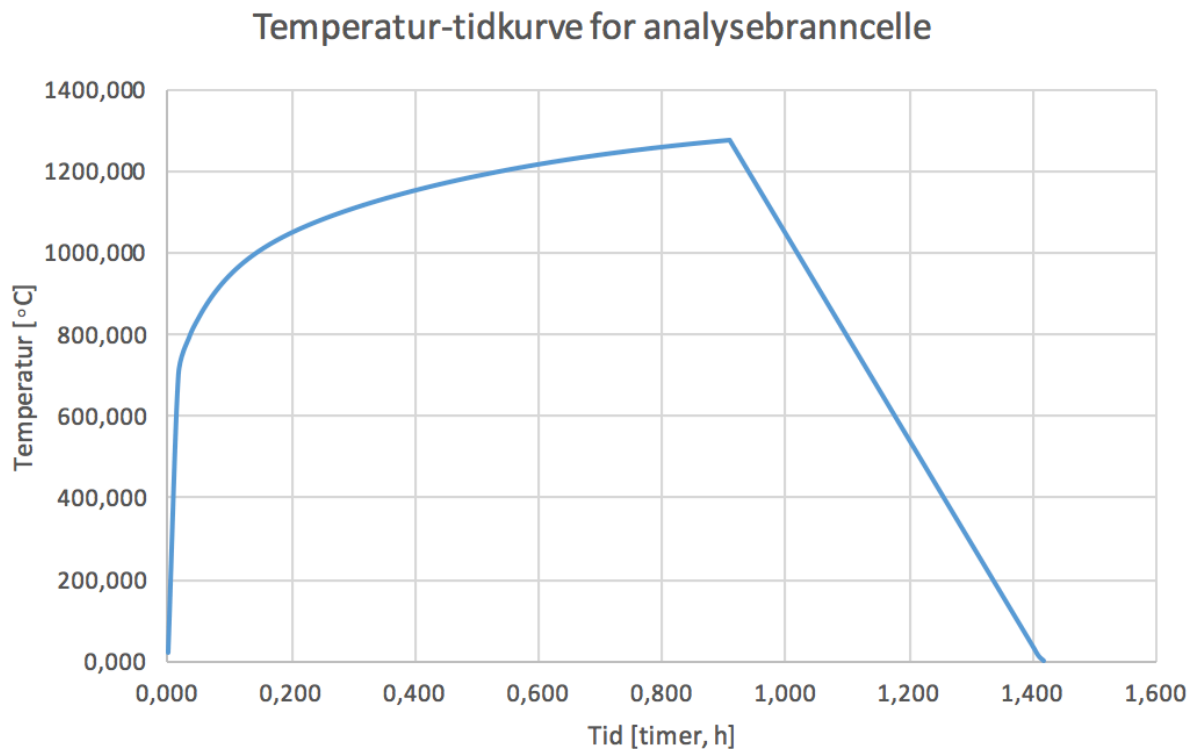
Da kan en regne ut θ_{max} :

$$\begin{aligned}\theta_g &= 20 + 1325 (1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*}) \\ &= 20 + 1325(1 - 0,324 e^{-0,2*9,19} - 0,204 e^{-1,7*9,19} - 0,472 e^{-19*9,19}) \\ &= 1276,7 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Til slutt må temperatur-tidkurven for avkjølingsfasen beregnes. t_{max}^* er større enn verdien 2, derfor brukes formel 15. Videre er $t_{max} > t_{lim}$, og da settes $x = 1,0$.

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* * x) = 1276,7 - 250(10,1t - 9,19 * 1,0)$$

Første modellering er utført, og resultatet er vist i figur 26:



Figur 26 Temperatur-tidkurve for analysebranncelle, ekskludert bidrag fra trekonstruksjon

Videre må en regne ut forkullingsraten, β_{par} . Den nominelle forkullingsraten β_n velges ut i fra tabell 10, og verdien for "Softwood – Glued laminated timber" ser ut til å være mest hensiktsmessig å velge til tross for at metoden er tiltenkt søyler og bjelker. Da settes β_n verdien lik:

$$\beta_n = 0,70 \frac{mm}{min}$$

Dermed kan β_{par} regnes ut:

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2 \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 * 0,70 * \frac{0,2 * \sqrt{10,1} - 0,04}{0,16 * \sqrt{10,1} + 0,08} = 1,06 \frac{mm}{min}$$

For å regne ut forkullingsdybden må verdien t_0 regnes ut:

$$t_0 = 0,009 * \frac{156,02}{0,0343} = 40,9 \text{ min}$$

Ved bruk av eurokodens beregningsmetode for forkullingsdybde er det satt en begrensning som sier at metoden burde brukes for $t_0 \leq 40 \text{ min}$. Dette er en svakhet med metoden, men for å fullføre den manuelle itereringen er det valgt å se bort i fra dette.

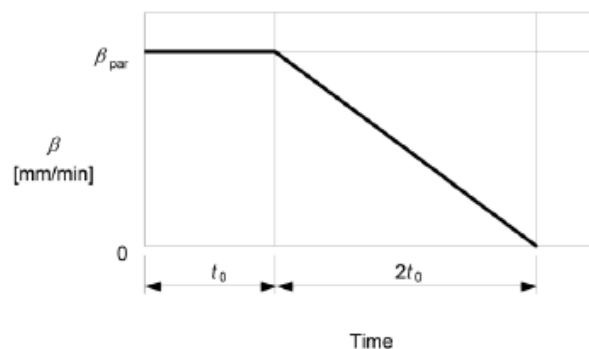
Forkullingen forekommer først når temperaturen er høy nok. Dagens praksis er å bruke en forkullingsgrense på 300°C , altså at forkullingen forekommer først når temperaturen er over 300°C [34]. Fra første itereringen av den parametriske temperatur-tidkurven i figur 26 kan en finne tiden hvor temperaturen er over 300°C . Tiden hvor temperaturen er over 300°C i denne casen er rundt 1,3 timer, og dette gjøres om til minutter:

$$t = 1,3 \text{ t} * 60 \frac{min}{t} = 78 \text{ min}$$

Da kan forkullingsdybden for det ubeskyttede massivtreet regnes ut. For $t_0 \leq t \leq 3t_0$ er forkullingsdybden:

$$d_{char,1} = \beta_{par} \left(1,5 t - \frac{t^2}{4t_0} - \frac{t_0}{4} \right) = 1,06 \left(1,5 * 78 - \frac{78^2}{4 * 40,9} - \frac{40,9}{4} \right) = 73,8 \text{ mm}$$

Eurokoden presenterer i tillegg forholdet mellom forkullingsrate og tid, og dette er gjengitt i figur 27.



Figur 27 Forholdet mellom forkullingsrate og tid

Dersom denne modellen brukes kan en finne forkullingsdybden ved å regne ut arealet under grafen, og det gjøres på følgende måte:

$$d_{char} = \beta_{par} * t_0 + \frac{1}{2} * (\beta_{par} * 2t_0) = 2 * \beta_{par} * t_0 \quad (33)$$

Dermed får en forkullingsdybden til å bli:

$$d_{char,uten\ gips} = 2 * 1,06 * 40,9 = 86,7\ mm$$

Grunnen til at denne verdien blir høyere kan være fordi det ble valgt å kun se på temperaturene over 300°C i forrige utregning. Dersom en ser på hele brannen varighet, og ikke bare for perioden over 300°C, vil en få en forkullingsdybde på 77 mm i stedet for 73,8 mm. Videre er det valgt å bruke modellen som viser sammenhengen mellom forkullingsrate og tid slik som på figur 27. Dermed benyttes $d_{char} = 86,7\ mm$.

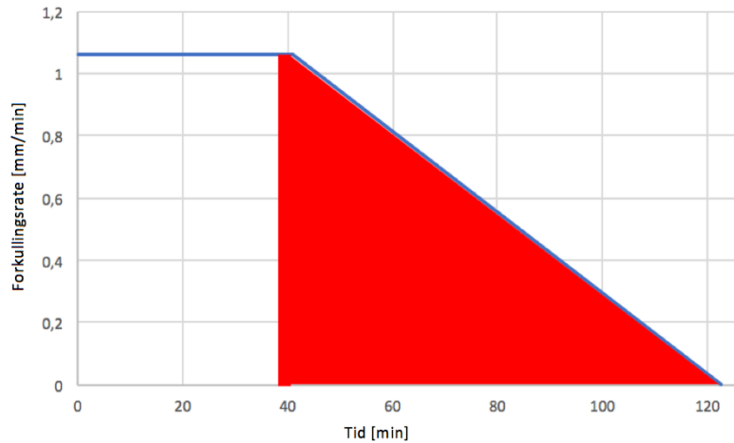
Videre må en regne ut forkullingsdybden for de bygningsdelene som er tildekket med gips. Siden det benyttes gipsplater av typen A er tiden for svikt av gipsplatene den samme som tiden for når forkullingen starter, altså $t_f = t_{ch}$. Når det er to lag med gips type A skal tykkelsen av gipsen (h_p) være tykkelsen av det ytterste laget og 50 % av det innerste laget. Tykkelsen av hver gipsplate er 12,5 mm, og dermed benyttes følgende h_p -verdi ved utregning av t_{ch} :

$$h_p = 12,5 + \frac{12,5}{2} = 18,75\ mm$$

Dermed kan tiden for når forkullingen starter regnes ut.

$$t_{ch} = 2,8 * h_p - 14 = 2,8 * 18,75 - 14 = 38,5\ min$$

Forkullingsforløpet etter svikt av gipsplater er vist i figur 28, hvor det røde feltet begynner når $t_{ch} = 38,5\ min$.



Figur 28 Case: Forsinket forkulling

Ved å regne ut arealet av det røde feltet finnes forkullingsdybden, og den er som følgende:

$$d_{char,med\ gips} = 1,06 * (40,9 - 38,5) + \frac{1}{2} * 1,06 * (40,9 * 2) = 45,9\ mm$$

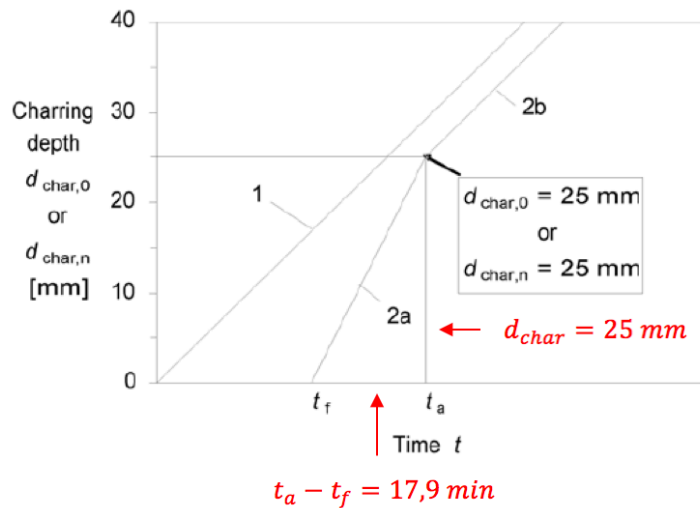
For å ta hensyn til den økte forkullingsraten når gipsplatene faller av, må en regne ut tiden t_a . Fra tiden $t_{ch} = t_f$ til t_a vil en ha en økt forkullingsrate, se figur 15.

$$t_a = \min \left\{ \frac{2t_f}{k_3\beta_n} + t_f, \min \left\{ \frac{2 * 38,5}{25} + 38,5, 77 \right\} \right\} = \min \left\{ 56,4, 77 \right\} = 56,4\ min$$

$$t_{\text{økt forkullingsrate}} = t_a - t_f = 56,4 - 38,5 = 17,9\ min$$

Dermed vil det være økt forkullingsrate i en periode på 17,9 minutter fra og med gipsen faller av ved tiden 38,5 minutter. Videre må den økte forkullingsraten regnes ut slik det er illustrert i figur 15.

Figur 29 viser stigningen, altså forkullingsraten, fra når gipsen faller av frem til tid til t_a . Ved å regne ut forholdet mellom denne forkullingsraten og $\beta_{par} = 1,06 \frac{mm}{min}$, kan en regne ut den ekstra forkullingen som vil oppstå.



Figur 29 Stigningstall for beregning av forkullingsrate

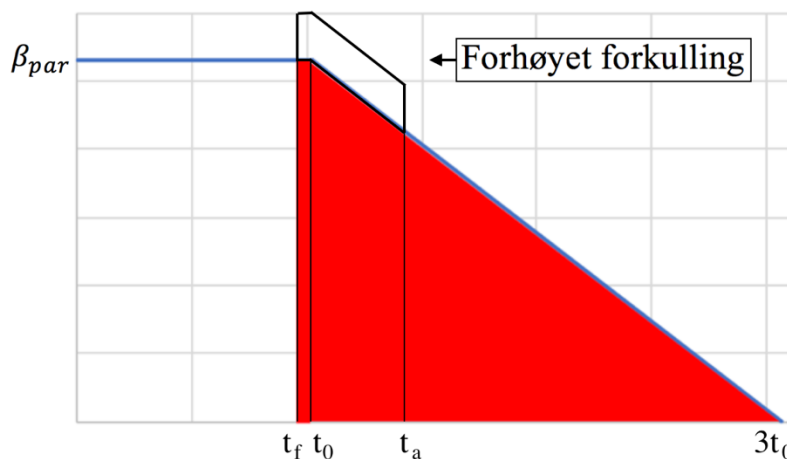
Her vil forkullingsraten være:

$$\frac{25}{17,9} = 1,397 \approx 1,4 \frac{mm}{min}$$

Forholdet mellom den økte forkullingsraten og β_{par} vil være:

$$\frac{1,4}{1,06} = 1,32$$

Dermed vil forkullingsdybden være 1,32 ganger større i perioden $t_{ch} = t_f$ til t_a (17,9 min). Videre kan den ekstra forkullingsdybden regnes ut. For illustrasjon se figur 30.



Figur 30 Forhøyet forkulling ved svikt av gips

Forkullingsraten ved tiden $t_a = 56,4$ min regnes ut først. På denne måten kan en bruke forkullingsdybden som ble regnet ut tidligere, trekke fra forkullingen fra tiden t_a til brannen

er over, multiplisere forkullingen fra tiden t_f til t_a med forholdstallet 1,32, og til slutt trekke fra forkullingen med den tidligere raten fra t_f til t_a .

Forkullingsrate ved tiden t_a regnes ut geometrisk med utgangspunkt i figur 30:

$$1,06 - (56,4 - 40,9) * \frac{1,06}{2 * 40,9} = 0,86 \frac{mm}{min}$$

Forkulling fra tiden t_a til brannen er over:

$$\frac{1}{2} * 0,86 * (3 * 40,9 - 56,4) = 28,5 \text{ mm}$$

Forkullingen fra t_f til t_a :

$$1,06 * (40,9 - 38,5) + (56,4 - 40,9) * 0,86 + \frac{1}{2} * (56,4 - 40,9) * (1,06 - 0,86) = 17,4 \text{ mm}$$

Dermed blir den ekstra forkullingsdybden lik:

$$d_{char \text{ ekstra}} = 17,4 * 1,32 - 17,4 = 5,6 \text{ mm}$$

Forkullingsdybden i dette tilfellet vil dermed bli:

$$d_{char \text{ med gips}} = 45,9 \text{ mm} + 5,6 \text{ mm} = 51,5 \text{ mm}$$

Situasjon 1: 50 % av overflatene er dekket med to lag gips type A

Nå regnes forkullet treverk om til brannenergi. For å beregne karakteristisk brannenergi må en først regne ut mengden forkullet treverk [kg].

$$M_{k,i} = \frac{A_t - A_v}{2} * (d_{char,uten \text{ gips}} + d_{char,med \text{ gips}}) * \rho_{tre} = \frac{70,74 - 1,92}{2} * (0,0867 + 0,0515) * 471 = 2240 \text{ kg}$$

Deretter beregnes netto brennverdi, og fuktinnholdet tas hensyn til. Velger et fuktinnhold på 12 % som er normalt for trevirke innendørs.

$$H_u = H_{u0} * (1 - 0,01u) - 0,025u = 17,5 * (1 - 0,01 * 12) - 0,025 * 12 = 15,1 \frac{MJ}{kg}$$

Den valgfrie faktoren Ψ_i settes lik 1, da det er tatt hensyn til gips ved beregningen av forkulling. Da får en den karakteristiske brannenergien til å være:

$$Q_{f,i,k} = M_{k,i} * H_u * \Psi_i = 2240 \text{ kg} * 15,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 1,0 = 33\,824 \text{ MJ}$$

Deretter kan den karakteristiske spesifikke brannenergien relatert til gulvarealet beregnes:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A_f} = \frac{33\,824 \text{ MJ}}{13,23 \text{ m}^2} = 2557 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Den dimensjonerende verdien for brannenergi blir:

$$\begin{aligned} q_{bidrag, massivtre} &= q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n = 2557 * 0,8 * 1,10 * 1,00 * 1,00 \\ &= 2250 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Denne verdien for brannenergi legges til i brannlasten som ble brukt ved første beregning. Den nye totale brannlasten blir dermed:

$$q_{f,d,2} = q_{f,d,1} + q_{bidrag, massivtre} = 834,24 + 2250 = 3084,24 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Til slutt gjøres brannenergien relatert til gulvarealet om til brannenergi relatert til overflatearealene:

$$q_{t,d,2} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} = 3084,24 * \frac{13,23}{70,74} = 576,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Med den nye brannlasten kan ny parametrisk temperatur-tidkurve modelleres. Planen er å bruke den nye kurven til å beregne ny forkullingsdybde og videre ny brannlast. Slik fortsetter itereringen.

Situasjon 2: 100 % av overflatene er dekket med to lag gips type A

I denne situasjonen benyttes forkullingsdybden som ble funnet tidligere, for vegger kledd med to lag gipsplater, type A.

$$d_{char, med \text{ gips}} = 51,5 \text{ mm}$$

Regner ut mengden forkullet treverk:

$$M_{k,i} = (A_t - A_v) * d_{char, med \text{ gips}} * \rho_{tre} = (70,74 - 1,92) * 0,0515 * 471 = 1669 \text{ kg}$$

Regner ut karakteristisk brannenergi:

$$Q_{f,i,k} = M_{k,i} * H_u * \Psi_i = 1669 \text{ kg} * 15,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 1,0 = 25\,201,9 \text{ MJ}$$

Regner ut den karakteristiske spesifikke brannenergien relatert til gulvarealet:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A_f} = \frac{25\,201,9 \text{ MJ}}{13,23 \text{ m}^2} = 1904,9 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Den dimensjonerende verdien for brannenergi blir:

$$\begin{aligned} q_{bidrag, massivtre} &= q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n = 1904,9 * 0,8 * 1,10 * 1,00 * 1,00 \\ &= 1676,3 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Denne verdien for brannenergi legges til i brannlasten som ble brukt ved første beregning. Den nye totale brannlasten blir dermed:

$$q_{f,d,2} = q_{f,d,1} + q_{bidrag, massivtre} = 834,24 + 1676,3 = 2510,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Til slutt gjøres brannenergien relatert til gulvarealet om til brannenergi relatert til overflatearealene:

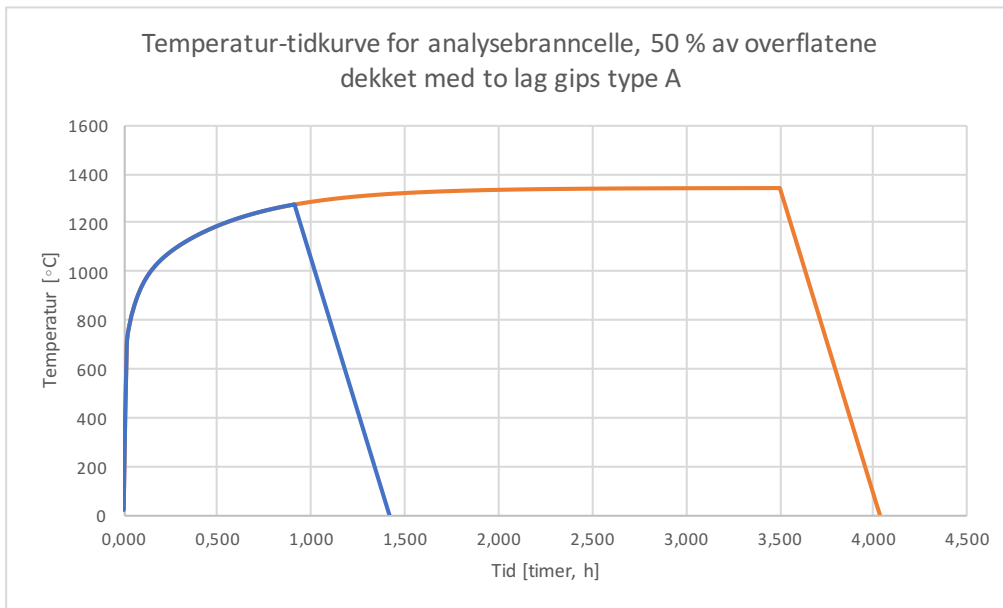
$$q_{t,d,2} = q_{f,d,2} * \frac{A_f}{A_t} = 2510,5 * \frac{13,23}{70,74} = 469,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$$

Med den nye brannlasten kan ny parametrisk temperatur-tidkurve modelleres, og med den nye kurven beregnes ny forkullingsdybde og videre ny brannlast.

Resultater

I dette studiet ble det kun gjort én iterasjon for begge tilfellene, altså når 50 % av overflatene er dekket med to lag gips og når 100 % av overflatene er dekket med to lag gips. Temperatur-tidkurvene er vist under, i figur 31 og 32.

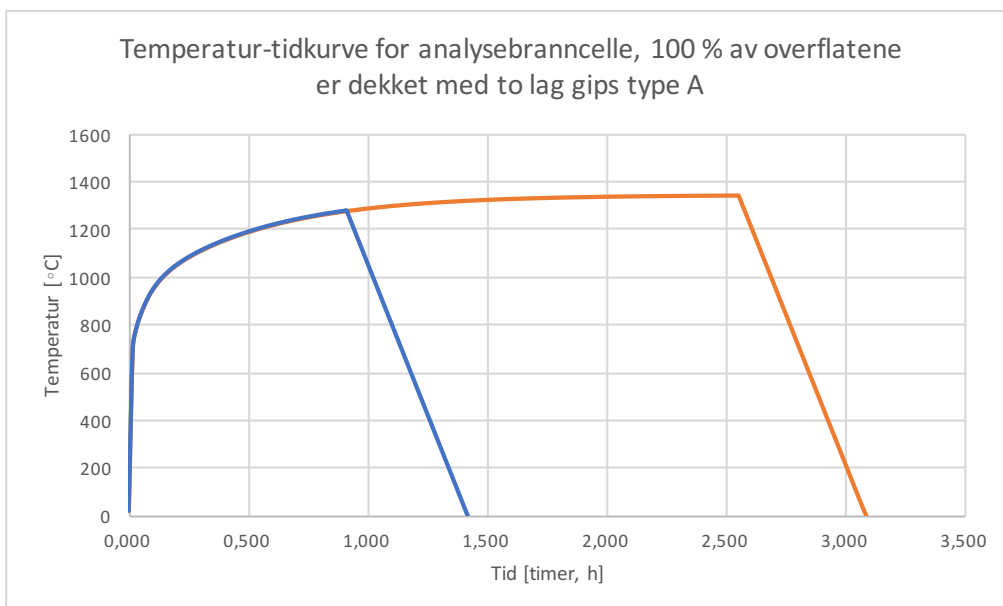
Situasjon 1: 50 % av overflatene er dekket med to lag gips type A



Figur 31 Resultat: 50 % gips

Det ble ikke utført flere iterasjoner grunnet altfor høy brannlast fra forkullet treverk. Ved andre iterering ble $q_{t,d,3} = 2063,6 \frac{MJ}{m^2}$, noe som førte til $t_{max} = 12,03 t$. Det vil si etter denne modellen ville maksimumstemperaturen først inntruffet etter 12 timer, noe som viser seg å være irrasjonelt. Hadde en fortsatt itereringen ville resultatene blitt altfor høye.

Situasjon 2: 100 % av overflatene er dekket med to lag gips type A



Figur 32 Resultat: 100 % gips

I denne situasjonen ser en at den totale varigheten av brannen nesten blir en time kortere. Ved beregninger viser det seg at selv her blir brannlasten fra det forkullede treverket altfor høy. Brannlasten ble $q_{t,d} = 1382,3 \frac{MJ}{m^2}$, noe som førte til $t_{max} = 8,06 h$. Resultatene viser at det blir irrasjonelt høye tall, og ved videre iterering ville brannen vart urealistisk lenge.

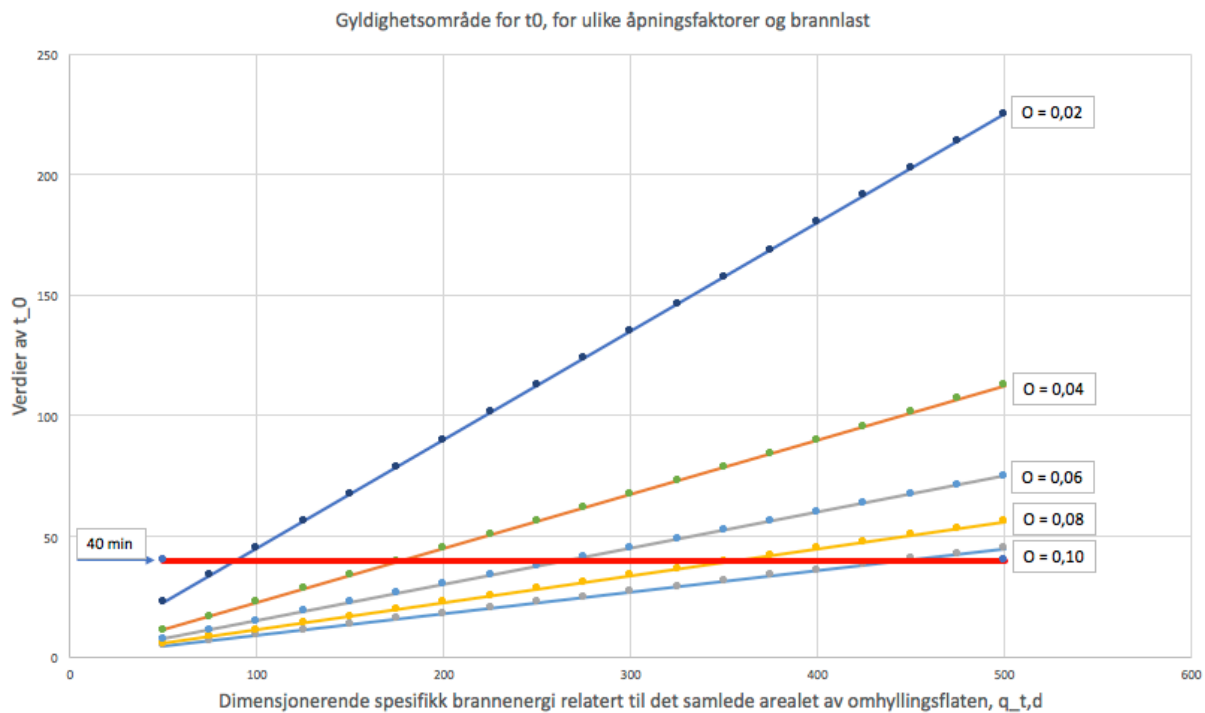
Diskusjon

For denne casen ble det forkullede treverket regnet om til brannenergi, og i begge tilfellene ble brannenergien veldig høy. Det var ønskelig å gjøre flere itereringer, slik at brannlasten kunne bli lagt til for hver iterasjon slik at den til slutt konvergente. Det var valgt å bruke massivtre i både vegger, gulv og tak – noe som er en høy andel massivtre. I tillegg er Eurokodens forkullingsberegning tiltenkt bjelker og søyler. Til tross for at det ble brukt gips, ble mengden brannenergi for høy. Hadde det blitt utført flere itereringer ville det resultert i en brann som ville vart i veldig mange timer, noe som ikke virker særlig realistisk.

Med forutsetningene om romgeometri og brannlast som ble brukt til beregninger resulterte første modellering med en brann som totalt varte i rundt 80 minutter. Dersom de manuelle iterasjonene hadde blitt gjort for en kort og intensiv brann ville det ikke nødvendigvis resultert i så stor forkullingsdybde ved første iterering, og da kunne kurven mulig ha konverget.

I en artikkel som heter *Burnout Means Burnout* [35] diskuteres det rundt om en brann i et bygg med bærekonstruksjon av massivtre vil slokke av seg selv, eller om den vil fortsette å brenne til den blir sloknet. Her står det at massivtre ikke nødvendigvis vil fortsette å brenne med mindre det finnes en ekstern energikilde, det vil si brennbart inventar som brenner og avgir varme. Derfor kan det hende at dersom det brennbare inventaret i rommet har brent opp, så er det en mulighet for at treverket slutter å brenne. Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve tar hensyn til brennbart inventar, men ved å regne om treverket i bæresystemet til brannlast så blir dette en del av det brennbare inventaret, og da blir det vanskelig å anslå med denne metoden om massivtreet vil slutte å brenne eller ikke.

Eurokoden presiserer at forkullingsberegningen kun kan benyttes for t_0 -verdier under eller lik 40 min. I casen, ved første beregning, ble $t_0 = 40,9$ min. For hver iterasjon som ble gjort økte denne verdien, dermed mister resultatene litt av påliteligheten. Med høy brannlast og lav åpningsfaktor vil t_0 -verdien bli høy. Beregningene ble foretatt til tross for begrensningene for å undersøke hva resultatene ville bli. For å undersøke hvilke brannlast og åpningsfaktorer som gir gyldige t_0 -verdier, er det presentert en graf i figur 33 som viser ulike verdier for t_0 . Den røde linjen viser hvor t_0 er lik 40, og alt som er under er innenfor gyldighetsområdet.



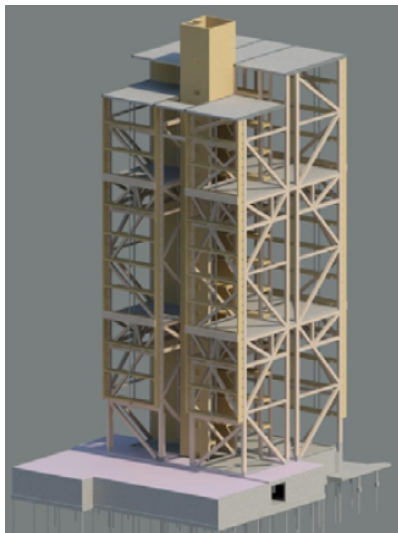
Figur 33 Gyldighetsområde for t₀, for ulike åpningsfaktorer og brannlast

Den parametriske forkullingsraten som ble brukt var $\beta_{par} = 1,06$ mm/min. Til tross for metoden som er benyttet egentlig ikke er ment for massive, så kan dette se ut til å være en god tilnærming til forkullingsraten. Ved branntesten av massive for Moholt 50|50 ble forkullingshastigheten målt [32]. På en ubeskyttet vegg, mellom 25 mm og 50 mm inn i massivtreet, var den gjennomsnittlige forkullingsraten målt å være 1,4 mm/min, og mellom 50 mm og 75 mm inn i massivtreet ble forkullingsraten målt å være 0,7 mm/min. I tverrsnittet gjennom massivtreet var forkullingsraten i gjennomsnitt 1,1 mm/min, som ikke er så langt unna verdien som ble brukt i casen.

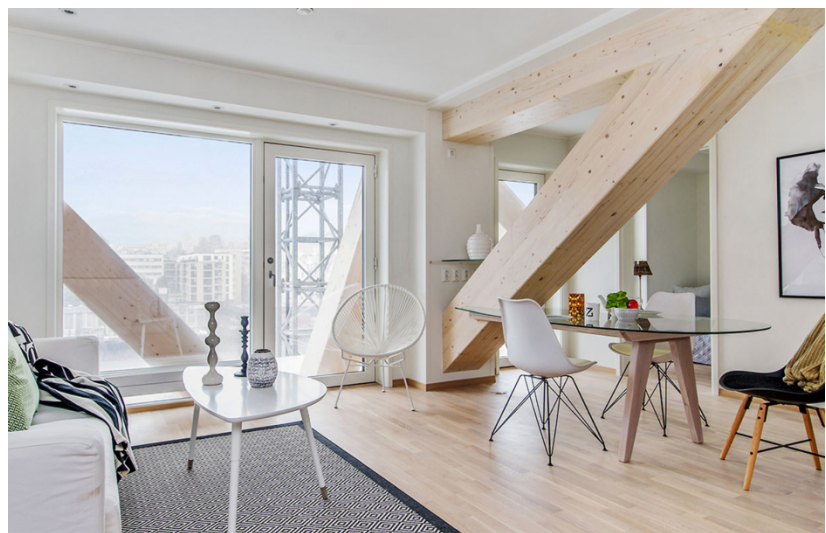
Case: Modellering av temperaturtidkurve – Limtrekonstruksjon

Etablering av analysebyggverk

I denne casen skal en branncelle med eksponert limtre undersøkes. Branncellen skal være en del av et høyhus med bjelke/søyle-system av limtre, som er klassifisert som brannklasse 3. For etablering av analysebyggverk er det tatt utgangspunkt i en leilighet fra høyhuset ”Treet” i Bergen. Som illustrasjon er det brukt bilder av Treet i Bergen, hvor figur 23 [2] viser en 3D-modell av bæresystemet og figur 23 [1] viser et av de typiske leilighetene som har eksponerte limtresøyler inne.



Figur 35 Treet: 3D-modell av bæresystem [2]



Figur 34 Treet: Leilighet med eksponert limtre [1]

For å minke kompleksiteten er det valgt enklere geometrier, samtidig som det er forsøkt å skape et realistisk rom. Rommets geometrier er presentert under.

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

Det er valgt en takhøyde på 2,6 meter, og dermed blir samlet areal av omsluttende bygningsdeler som følger:

$$\begin{aligned} A_t &= 2 * A_{\text{gulv}} + 2 * A_{\text{langvegg}} + 2 * A_{\text{kortvegg}} = 2 * 4 * 5 + 2 * 5 * 2,6 + 2 * 4 * 2,6 \\ &= 86,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Videre er det valgt et vindu som har dimensjonene 1,6 x 1,3 m². Dermed blir vindushøyden og arealet av vertikale åpninger i veggene:

$$h_{eq} = 1,6 \text{ m}$$

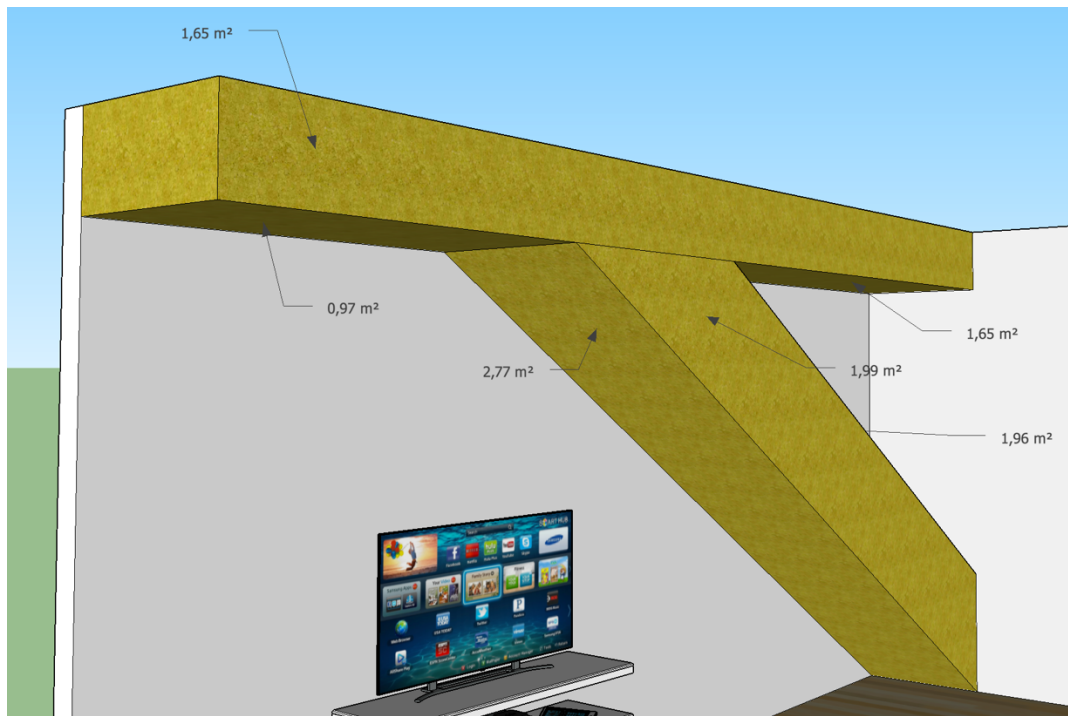
$$A_v = 1,6 \text{ m} * 1,3 \text{ m} = 2,08 \text{ m}^2$$

En modell av branncellen er laget for illustrasjon, og er vist i figur 36.



Figur 36 Modell av analysebranncelle, limtre

Ved videre beregning er det nødvendig å vite dimensjonene på søylen og bjelken som er eksponert i branncellen. I limtreboka [36] er det presentert typiske limtredimensjoner, og med utgangspunkt i bilder av "Treet" er det valgt en lamellbredde på 165 mm, og det er totalt fire lameller. For enkelhetens skyld er det valgt at halve bjelken er eksponert og søylen er kvadratisk. De nødvendige arealene ved beregning av forkulling er hentet fra modellen i figur 37.



Figur 37 Eksponerte overflater av limtre

Dermed er det totale arealet av eksponert limtre som følger:

$$A_{\text{eksponert tre}} = 1,65 + 0,97 + 2,77 + 1,65 + 1,99 + 1,96 = 10,99 \approx 11 \text{ m}^2$$

For å minske kompleksiteten er det valgt å bruke de termiske egenskapene til standard gips for alle omhyllingsflatene. Dermed blir den termiske absorpsjonsevnen for de omsluttende bygningsdelene som følger:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{800 * 1700 * 0,20} = 521,5 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \text{s}^{1/2} \text{K}}$$

Modellering

Nå som analysebranncellen er etablert kan de nødvendige parameterne beregnes. Åpningsfaktoren er som følger:

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{2,08 * \sqrt{1,60}}{86,8} = 0,03$$

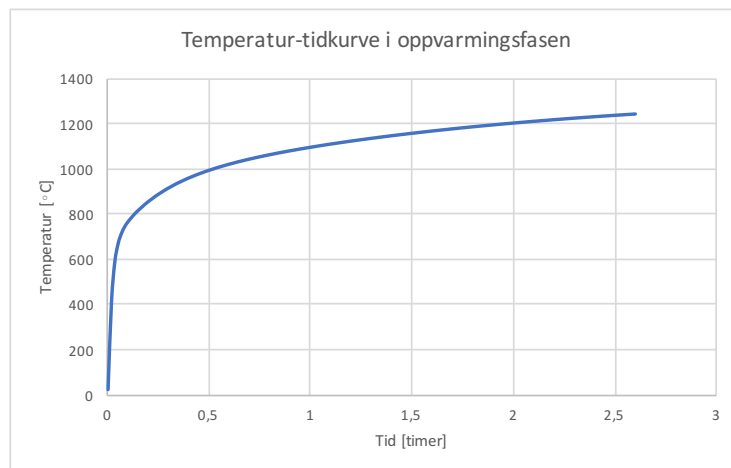
Videre kan tidsfaktorfunksjonen for åpningsfaktor O og termisk absorpsjonsevne b beregnes:

$$\Gamma = \frac{\frac{O^2}{b}}{\frac{0,04^2}{1160}} = \frac{\frac{0,03^2}{521,5}}{\frac{0,04^2}{1160}} = 2,783$$

Dermed kan oppvarmingsfasen modelleres, med:

$$t^* = t * \Gamma = 2,783t$$

Temperatur-tidkurven i oppvarmingsfasen blir som vist i figur 38.



Figur 38 Case: Temperaturutviklingen i oppvarmingsfasen

For å beregne tidspunkt for når maksimumstemperaturen inntreffer, trengs brannlasten. For den karakteristiske verdien av den spesifikke brannenergien relatert til gulvarealet benyttes den gumbel-fordelte 80 %-fraktilen for boliger, og denne regnes om til dimensjonerende verdi før den videre blir regnet om til dimensjonerende spesifikk brannenergi relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten A_t .

$$q_{f,k} = 948 \frac{MJ}{m^2}$$

For beregning av $q_{f,d}$ benyttes samme verdier som ved forrige case.

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n = 948 * 0,8 * 1,10 * 1,00 * 1,00 = 834,24 \frac{MJ}{m^2}$$

$$q_{t,d} = q_{f,d} * \frac{A_f}{A_t} = 834,24 * \frac{20}{86,8} = 192,2 \frac{MJ}{m^2}$$

Dermed kan t_{max} regnes ut, og t_{lim} velges å være 20 min:

$$t_{max} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,2 * 10^{-3} * \frac{q_{t,d}}{O} \\ t_{lim} \end{array} \right. = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,28 \\ 0,33 \end{array} \right. = 1,28 t$$

Maksimumstemperaturen inntreffer når $t^* = t_{max}^*$:

$$t_{max}^* = t_{max} * \Gamma = 1,28 * 2,783 = 3,562$$

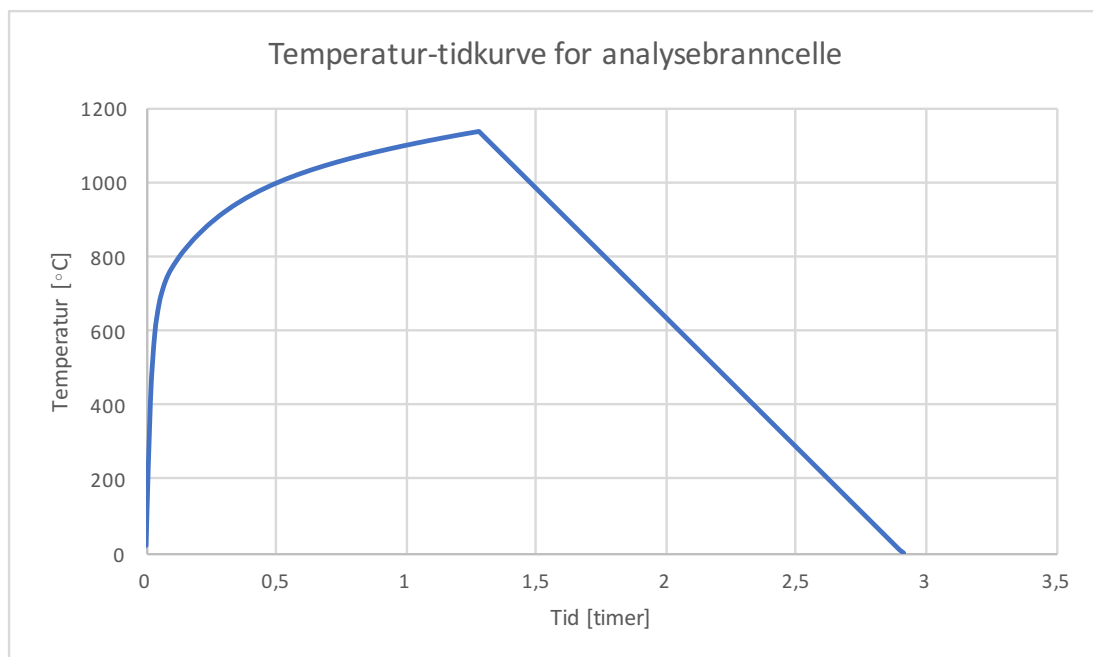
Maksimumstemperaturen blir dermed:

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= 20 + 1325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2 t^*} - 0,204 e^{-1,7 t^*} - 0,472 e^{-19 t^*} \right) \\ &= 20 + 1325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2 * 3,562} - 0,204 e^{-1,7 * 3,562} - 0,472 e^{-19 * 3,562} \right) \\ &= 1134 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Til slutt må temperatur-tidkurven for avkjølingsfasen beregnes. t_{max}^* er større enn verdien 2, derfor brukes formel 15. Videre er $t_{max} > t_{lim}$, og da settes $x = 1,0$.

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t^* - t_{max}^* * x) = 1134 - 250(2,783t - 3,562)$$

Første modellering er utført, og resultatet er vist i figur 39.



Figur 39 Case: Første modellering av temperatur-tidkurve

Videre må en regne ut forkullingsraten, β_{par} . Forkullingsraten β_n velges ut i fra tabell 10, og verdien for limtre velges. Da settes β_n verdien lik:

$$\beta_n = 0,70 \frac{mm}{min}$$

Dermed kan β_{par} regnes ut:

$$\beta_{par} = 1,5 \beta_n \frac{0,2 \sqrt{\Gamma} - 0,04}{0,16 \sqrt{\Gamma} + 0,08} = 1,5 * 0,70 * \frac{0,2 * \sqrt{2,783} - 0,04}{0,16 * \sqrt{2,783} + 0,08} = 0,89 \frac{mm}{min}$$

For å regne ut forkullingsdybden må verdien t_0 regnes ut:

$$t_0 = 0,009 * \frac{192,2}{0,03} = 57,7 \text{ min}$$

t_0 -verdien blir i denne casen også høyere enn 40 min, og til tross for at metoden egentlig ikke kan brukes for verdier høyere enn 40 min så fullføres beregningene. Forkullingsdybden regnes ut:

$$d_{char} = 2 * \beta_{par} * t_0 = 2 * 0,89 * 57,7 = 102,7 \text{ mm}$$

Det forkullede treverket skal regnes om til brannenergi, og det startes med å regne ut mengden forkullet treverk:

$$M_{k,i} = A_{eksponert \ tre} * d_{char} * \rho_{limtre}$$

Densiteten til limtre er hentet fra limtreboka [36], og densiteten til det sterkeste homogene limtreet (GL32h) er 490 kg/m^3 . Dette limtreet og tilhørende densitet er valgt.

$$M_{k,i} = 11 \text{ m}^2 * 0,1027 \text{ m} * 490 \frac{kg}{m^3} = 554 \text{ kg}$$

Deretter beregnes netto brennverdi, og et fuktinnhold på 12 % benyttes.

$$H_u = H_{u0} * (1 - 0,01u) - 0,025u = 17,5 * (1 - 0,01 * 12) - 0,025 * 12 = 15,1 \frac{MJ}{kg}$$

Den valgfrie faktoren Ψ_i settes lik 1, og da får en den karakteristiske brannenergien til å være:

$$Q_{f,i,k} = M_{k,i} * H_u * \Psi_i = 554 \text{ kg} * 15,1 \frac{MJ}{kg} * 1,0 = 8365 \text{ MJ}$$

Deretter kan den karakteristiske spesifikke brannenergien relatert til gulvarealet beregnes:

$$q_{f,k} = \frac{Q_{f,i,k}}{A_f} = \frac{8365 \text{ MJ}}{20 \text{ m}^2} = 418,3 \frac{MJ}{m^2}$$

Den dimensjonerende verdien for brannenergi blir:

$$\begin{aligned}
 q_{bidrag,limtre} &= q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n = 418,3 * 0,8 * 1,10 * 1,00 * 1,00 \\
 &= 368,1 \frac{MJ}{m^2}
 \end{aligned}$$

Denne verdien for brannenergi legges til i brannlasten som ble brukt ved første beregning. Den nye totale brannlasten blir dermed:

$$q_{f,d,2} = q_{f,d,1} + q_{bidrag,limtre} = 834,24 + 368,1 = 1202,3 \frac{MJ}{m^2}$$

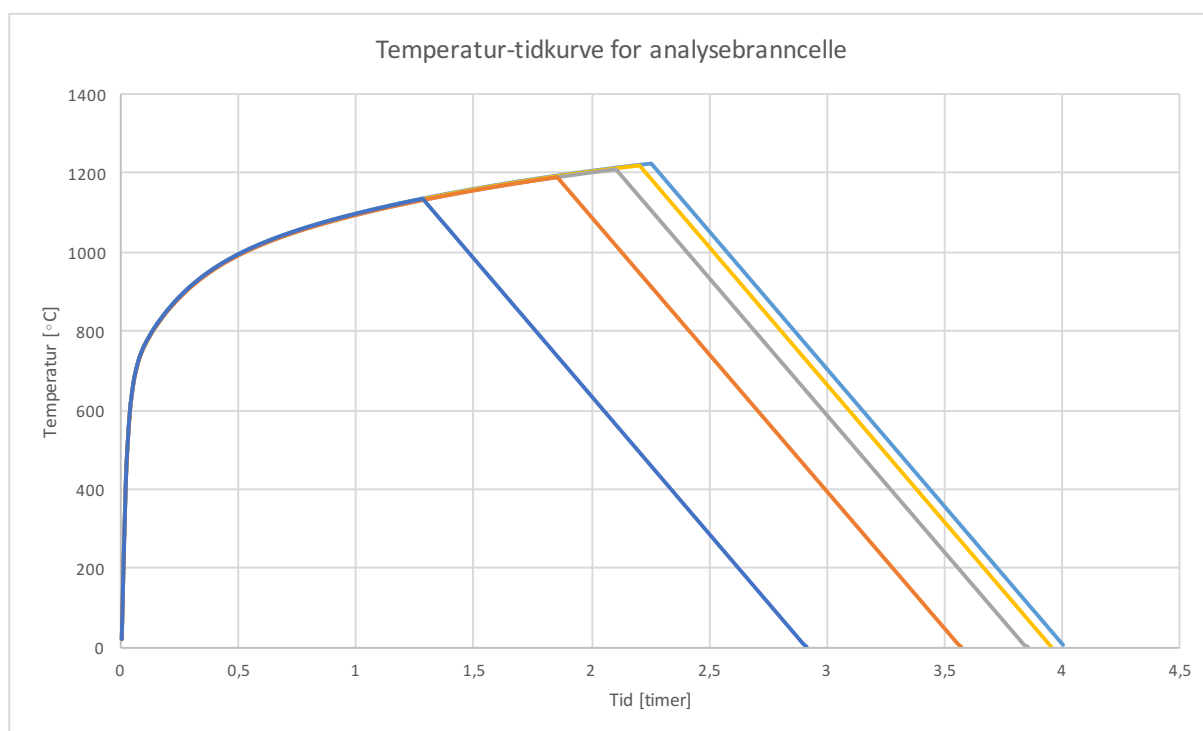
Til slutt gjøres brannenergien relatert til gulvarealet om til brannenergi relatert til overflatearealene:

$$q_{t,d,2} = q_{f,d,2} * \frac{A_f}{A_t} = 1202,3 * \frac{20}{86,8} = 277 \frac{MJ}{m^2}$$

Med den nye brannlasten kan ny parametrisk temperatur-tidkurve modelleres, og videre ny forkullingsdybde og ny brannlast. Slik fortsetter itereringen.

Resultater

Etter modelleringen av første temperatur-tidkurven ble det gjort fire itereringer, og resultatet er presentert i figur 40.



Figur 40 Resultat: Manuelle itereringer for temperatur-tidkurve

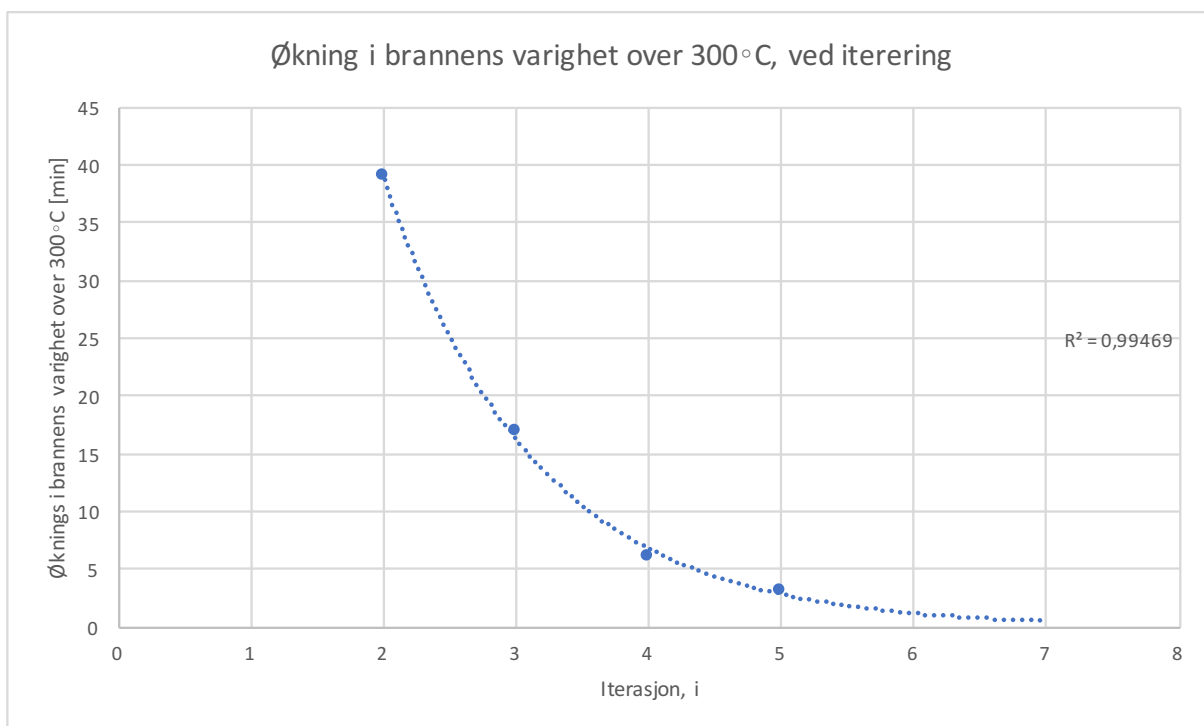
I tabell 13 kan en lese av verdier for de ulike temperatur-tidkurvene.

Tabell 13 Brannkarakteristikk for temperatur-tidkurvene

Iterasjon	Maksimums-temperatur	Brannens totale varighet	Brannens varighet over 300°C	Økning i varighet over 300°C fra forrige iterering	Forkullingsdybde
1	1134 °C	2 t 55 min	2 t 29 min	-	102,7 mm
2	1192 °C	3 t 34 min	3 t 8 min	39 min	147,9 mm
3	1212 °C	3 t 51 min	3 t 25 min	17 min	167,9 mm
4	1219 °C	3 t 57 min	3 t 31 min	6 min	176,6 mm
5	1222 °C	4 t	3 t 34 min	3 min	180,5 mm

Diskusjon

Det er modellert totalt fem parametriske temperatur-tidkurver og det kunne blitt gjort flere iterasjoner, men en kan se at kurven konvergerer. Med verdiene fra tabell 13 kan en predikere hvordan kurvene ville blitt dersom det ble gjort flere iterasjoner. Figur 41 viser hvor stor økningen i brannens varighet er for hver iterasjon. Det er i tillegg lagt til en eksponentiell trendlinje, da denne trendlinjen passet best og virket mest riktig i forhold til utviklingen. Ved å lese av grafen i figur 41 kan en se at økningen i brannens varighet over 300 °C konvergerer ved iterering nummer 7. Mellom iterering 5 og iterering 7 så øker varigheten med rundt 1 min + 0,5 min = 1,5 min.



Figur 41 Økning i brannens varighet ved iterering

Grunnen til at denne kurven konvergerer, og ikke for case med massivtre i vegger, gulv og tak, er siden mengden eksponert treverk er betydelig mindre for et rom med noen synlige limtrebjelker og –søyler.

I utgangspunktet så resulterte temperatur-tidkurven i en veldig lang brann, og brannens totale varighet økte fra 2 timer og 55 minutter til totalt 4 timer. Dette er 37 % økning i brannens totale varighet. Dersom det hadde vært en brann som i utgangspunktet varte i 1 time, og forlengelsen av brannen hadde fulgt samme relative forlengelse som i casen, ville det resultert i en brann som hadde vart i rundt 82 minutter.

Case: Monte Carlo-simuleringer for parametriske temperatur-tidkurver

Forberedelser

Før en kan gjøre Monte Carlo-simuleringer må en bestemme hvilken beregningsmodell som skal undersøkes, hva en ønsker å få ut av resultater og kartlegge hvilke variabler som inngår i beregningene. Eksempelvis kan resultatene en ønsker å få ut være gasstemperatur eller varighet av brann. Deretter må en bestemme hvilke parametere en ønsker å variere, og hvilke parametere som skal ha en bestemt verdi. Eksempelvis hvis en skal gjøre temperatur-tid simuleringer for et bestemt rom er det ikke nødvendig å variere vindusstørrelse og romarealer, men brannlasten kan variere. Men ved å vurdere sannsynlighetsfordeling for arealer og vindusstørrelser kan man gjøre beregninger for hele bygget, siden flere rom kan bli vurdert. Videre må en bestemme hvilke fordelinger de ulike parameterne skal ha. Det er ingen fasit på hvilke usikkerheter inputparameterne innehar, så dette må vurderes ved bruk av litteratur, tabulerte verdier eller subjektive antagelser. Valg av sannsynlighetsfordelinger er direkte relatert til hva en får ut av resultater. Til slutt kjøres simuleringene og resultatene må analyseres. Resultatene en får ut vil være en sannsynlighetsfordeling, og med dette kan en se hvor mye resultatene kan variere, hvilke verdier som fremkommer oftest og videre.

Programvare

For å gjøre Monte Carlo-simuleringer er programvaren @Risk av Palisade benyttet, som er et programtillegg til Microsoft Excel. Alle operasjoner foregår dermed i Microsoft Excel. Programtillegget gjør at en kan velge sannsynlighetsfordelinger for de aktuelle parameterne, og en velger ut hvilken parameter det skal gjøres Monte Carlo-simuleringer for. En velger selv antall iterasjoner som skal gjøres, og resultatene blir presentert både grafisk og med tallverdier. Programvaren er ikke gratis, men det er mulig å kjøpe en studentpakke for akademisk bruk til et rimeligere beløp. Det er studentpakken som er benyttet, og det er derfor alle resultatene videre er merket ”@RISK Student Version For Academic Use Only”.



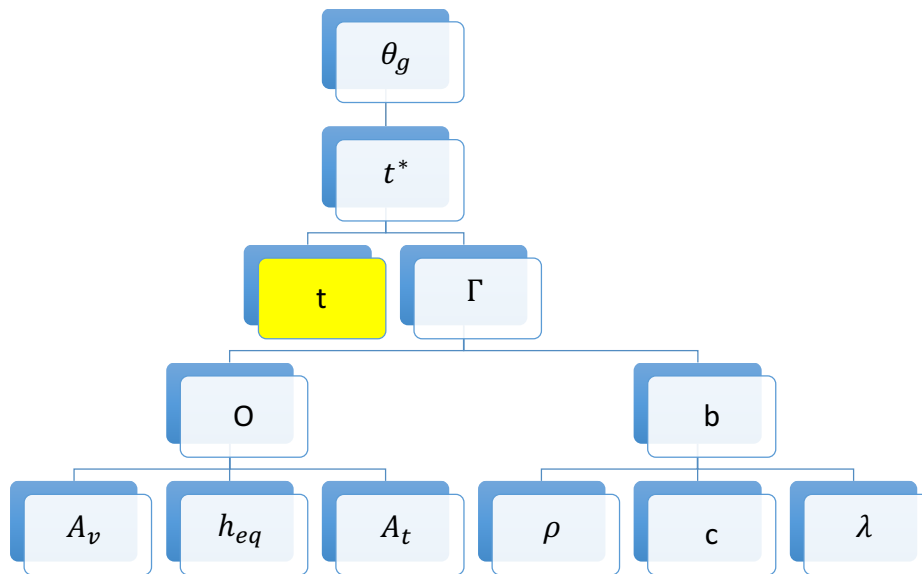
Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve

Ved modellering av temperatur-tidkurve er det nødvendig å gjøre beregninger for gasstemperaturen i oppvarmingsfasen, ved hvilket tidspunkt maksimumstemperaturen inntreffer og til slutt gasstemperaturen i avkjølingsfasen. Ved å gjøre disse tre beregningene settes til slutt alt sammen for å få ut en temperatur-tidkurve som resultat. Symbolforklaringene til de aktuelle variablene er gitt i tabell 14, og videre er det kartlagt hvilke parametere som inngår i de ulike beregningene.

Tabell 14 Symbolforklaring

Parameter	Forklaring
θ_g	Gasstemperatur i branncellen [$^{\circ}C$]
t^*	$t * \Gamma$ [h]
t	Tid [h]
Γ	Tidsfaktorfunksjon for åpningsfaktor O og termisk absorpsjonsevne b [-]
O	Åpningsfaktor [$m^{1/2}$]
A_v	Samlet areal for vertikale åpninger i veggene [m^2]
h_{eq}	Vektet gjennomsnitt av vindushøyden for alle vegger [m]
A_t	Samlet areal av omsluttende bygningsdeler, inklusive åpninger [m^2]
b	Termisk absorpsjonsevne [$\frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$]
ρ	Omsluttende bygningsdeleres massetetthet [$\frac{kg}{m^3}$]
c	Omsluttende bygningsdeleres spesifikke varmekapasitet [$\frac{J}{kgK}$]
λ	Omsluttende bygningsdeleres varmekonduktivitet [$\frac{W}{mK}$]
t_{max}^*	$t_{max} * \Gamma$ [h]
t_{max}	Tid for største gasstemperatur [h]
t_{lim}	Tid for høyeste gasstemperatur i tilfelle brenselregulert brann [min]
$q_{t,d}$	Dimensjonerende spesifikk brannenergi relatert til overflatearealet A_t [$\frac{MJ}{m^2}$]
$q_{f,d}$	Dimensjonerende spesifikk brannenergi relatert til overflatearealet A_f [$\frac{MJ}{m^2}$]
A_f	Overflatearealet av gulvet [m^2]
$q_{f,k}$	Karakteristisk spesifikk brannenergi relatert til overflatearealet A_f [$\frac{MJ}{m^2}$]
m	Forbrenningsfaktor [-]
δ_{q1}	Faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på branncellens størrelse [-]
δ_{q2}	Faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på typen bruk av branncellen [-]
δ_n	Faktor som tar hensyn til de forskjellige aktive brannbekjempelsestiltakene [-]
x	Faktor som avhenger av om brannen er styrt av brensel eller ventilasjon. Brukes for beregning av avkjølingsfasen [-]

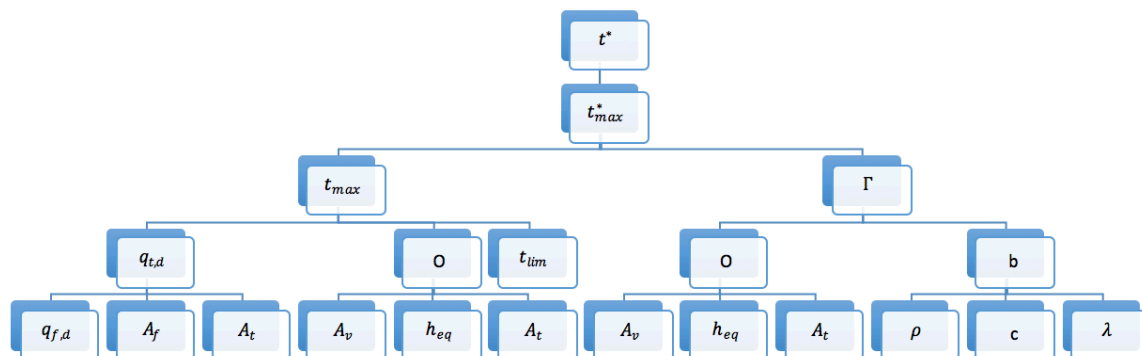
1) Gasstemperatur i oppvarmingsfasen



Figur 43 Nødvendige parametere for beregning av oppvarmingsfasen

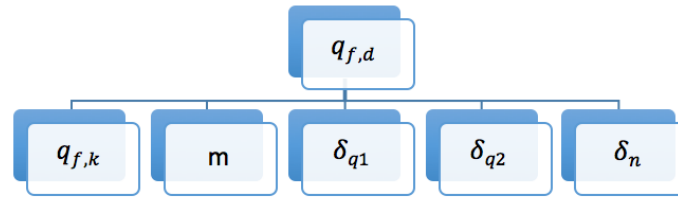
Tiden t er markert gult, siden dette er en variabel som ikke skal velges som én verdi. Tiden skal representere x-aksen i temperatur-tidkurven, og det skal plottes inn gasstemperatur for tiden $t = 0$ og oppover frem til maksimumstemperaturen inntreffer.

2) Tidspunkt når maksimumstemperatur inntreffer



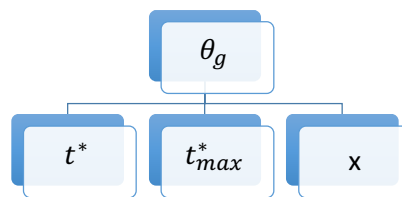
Figur 44 Nødvendige parametere for beregning av tidspunkt for maksimumstemperatur

$q_{f,d}$ kan brytes ned til flere parametere dersom det er ønskelig å ta med i simuleringen. Parameterne som inngår i den dimensjonerende brannlasten er vist i figur 45.



Figur 45 Nødvendige parametere for beregning av dimensjonerende brannlast

3) Gasstemperaturen i avkjølingsfasen



Figur 46 Parametere for beregning av avkjølingsfasen

Det er valgt å ikke ta med alle parametere for utregning av gasstemperaturen i avkjølingsfasen, siden hvilken formel som skal brukes avhenger av t^*_{max} og verdien for denne blir valgt ut i fra hva en får av resultater i de tidligere simuleringene.

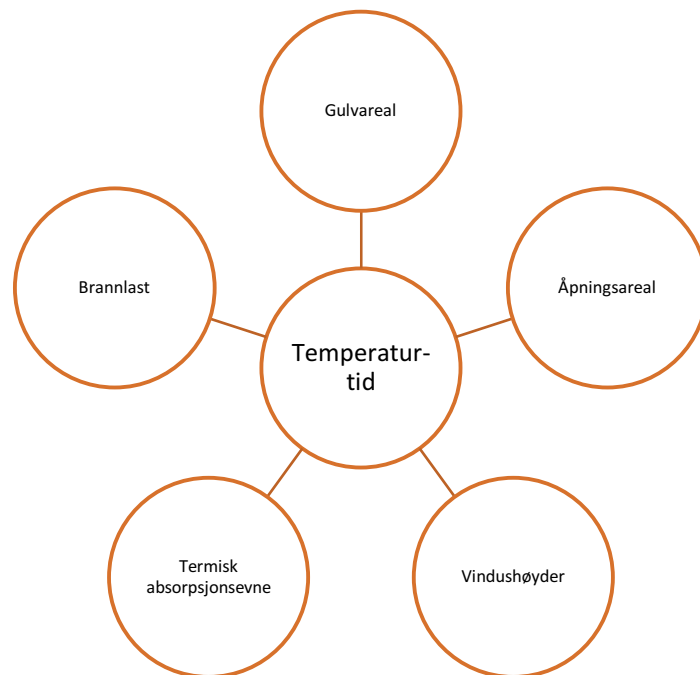
Plan for simuleringene

For å undersøke utfallet av variasjoner i inputparameterne skal det gjøres sensitivitetsanalyse ved hjelp av Monte Carlo-simuleringer. Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve modelleres med flere steg av beregninger, og parametere avhenger av hverandre. Dermed bør kompleksiteten reduseres, og dette gjøres ved å variere på få parametere og velge bestemte verdier for resten av parametere.

Å variere på for mange parametere kan skape vanskeligheter når en skal tyde resultatene, for det blir problematisk å forstå hva som fører til hva. Ved å eksempelvis kun variere på åpningsarealet så vet en hva som har ført til variasjonen i resultatene for temperatur-tid-forløpet. Et annet problem som kan oppstå dersom en varierer på flere parametere samtidig er at en kan få ut resultater for både oppvarmingsfasen, tid for når maksimumstemperaturen inntreffer og for avkjølingsfasen. Ved modelleringen ville det dermed blitt tre ulike kurver for oppvarmingsfasen, tre ulike tidspunkt for når maksimumstemperaturen inntreffer og tre ulike kurver for avkjølingsfasen. Dette ville resultert i en uoversiktlig sensitivitetsanalyse.

For å gjøre en grundig sensitivitetsanalyse av de mest relevante parametere i forhold til romgeometri, termiske egenskaper av omsluttende bygningsdeler og brannlast, presenteres videre en plan for hvilke beregninger som skal gjøres, hvilke parametere som skal varieres og

hvilke parametere som velges å være bestemte verdier. Figur 47 viser hvilke parametere som skal undersøkes.



Figur 47 Parametere som skal undersøkes i analyser

1. Gulvareal

I første omgang skal kun gulvarealet varieres for et rom i et høyhus med bjelke-søyle-system av limtre. Gulvarealet er ikke direkte en av parameterne som inngår i beregningene, men gulvarealet kan brukes for å finne A_t . Det samlede arealet av omsluttende bygningsdeler A_t velges på en forenklet måte, hvor det antas av det er et kvadratisk rom med den takhøyden som er valgt. Kvadratisk rom vil gi minste A_t , lavest varmetap og høyeste temperatur. Her benyttes formel 34.

$$A_t = 2 * A_f + 4 * \sqrt{A_f * h_{tak}} \quad (34)$$

Det er valgt en takhøyde på 2,7 meter og det er valgt å ha to vegger med vinduer hvor vindusandelen er 30 % av de to veggene. Vindushøyden er valgt å være 1,6 meter, og åpningsarealet blir bestemt avhengig av hva gulvarealet er.

Det som ønskes av resultater i Monte Carlo-simuleringene er åpningsfaktor, henholdsvis 5 %-fraktil, gjennomsnitt og 95 %-fraktil. Med åpningsfaktorene en får ut bestemmes videre tidspunkt for når maksimumstemperatur oppnår og kurven for avkjølingsfasen, og her benyttes 80 %-fraktilen av den gumbel-fordelte brannlasten for boliger. Her kunne hele fordelingen blitt

implementert men hensikten er å undersøke varierende gulvareal, derfor er det valgt å undersøke varierende brannlast senere. For omsluttende bygningsdeler velges gipsplater for enkelthetens skyld, til tross for at det vil være litt eksponerte limtrebjelker og –søylar. Det velges tabulerte verdier [37] for de termiske egenskapene til gipsplater, type normal gips.

Tabell 15 Tetthet, spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne for normal gips

Materiale	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg°C]	λ [W/mK]
Gips	800	1700	0,20

Dermed blir den termiske absorpsjonsevnen for gips som følger:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{800 * 1700 * 0,20} = 521,5 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

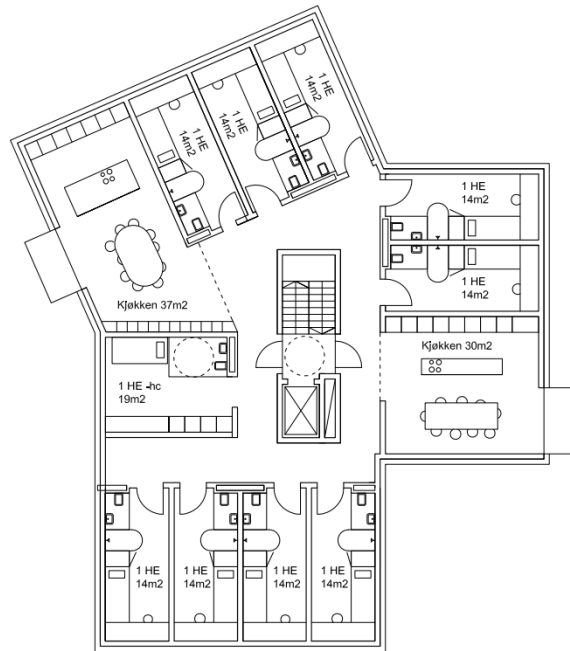
Deretter må det bestemmes hvor store variasjoner som skal brukes for gulvarealet. For å velge fornuftige størrelser undersøkes gulvarealer fra typiske leiligheter i noen høyhus som allerede finnes i Norge. Det er hentet plantegninger fra prospekter for både leilighetsbygget "Treet" i Bergen [1], studentboligblokken "Moholt 50|50" i Trondheim [13] og leilighetsbygget "Mjøstårnet" som står i Brumunddal [38].

Figur 48 viser en plantegning fra en av de typiske leilighetene fra "Treet".



Figur 48 Plantegning, Treet [1]

Figur 49 viser en plantegning fra "Moholt 50|50", for et typisk etasjeplan for et studentbolighus hvor 5 studenter deler på ett kjøkken.



Figur 49 Plantegning, Moholt 50/50 [13]

Figur 50 viser plantegning av en litt større leilighet fra ”Mjøstårnet”. Bruksarealet for denne leiligheten er på 145 m², og det finnes mindre leiligheter med bruksareal ned til 63 m². Det er ønskelig å undersøke ulike gulvarealer og derfor ble det valgt en større leilighet.



Figur 50 Plantegning, Mjøstårnet [38]

Fra plantegningene ser er at de minste rommene er boder og bad som har størrelse helt ned til 3 m² i gulvareal. Vi neglisjerer i denne omgang de aller minste rommene og fokuserer heller på soverom og større oppholdsrom. Med utgangspunkt i plantegningene velges gulvarealet A_f å variere fra 6,8 m², som er det minste soverommet fra "Treet", til 85,7 m², som er det største oppholdsrommet i "Mjøstårnet". Det velges en uniform fordeling, det vil si at ved Monte Carlo-simulering vil den velge alle mulige verdier mellom de to ytre verdiene. Dette er for å undersøke hvor mye størrelsen av rom slår ut på temperatur-tid-resultatene.

En oppsummert tabell over forutsetningene for Monte Carlo-simuleringen for åpningsfaktor er presentert i tabell 16.

Tabell 16 Input i Monte Carlo, gulvareal

Parameter	Verdier/Kommentar
Gulvareal, A_f	Uniform fordeling [6.8, 85.7]
Takhøyde, h_{tak}	2,7 m
Vindusandel, vegg 1	30 % av veggareal
Vindusandel, vegg 2	30 % av veggareal
Åpningsareal, A_v	$A_v = 2 * \left(\sqrt{A_f * h_{tak} * 30 \%} \right)$
Vindushøyde, h_{eq}	1,6 m
Areal av omsluttende bygningsdeler, A_t	$A_t = 2 * A_f + 4 * \sqrt{A_f * h_{tak}}$

2. Åpningsareal

Nå skal kun åpningsarealet, eller vindusarealet, varieres for å undersøke hvilke åpningsfaktorer det resulterer i. Ved bestemmelse av verdier for A_v ser en kun på vinduer, og antar at dør eller andre åpninger henholdsvis er lukket og ikke eksisterer. I denne analysen velges et gulvareal på 25 m² og en takhøyde på 2,7 meter. Det samlede arealet av omsluttende bygningsdeler regnes ut på lik måte som tidligere, hvor det antas konservativt et kvadratisk rom. Her benyttes også 80 %-fraktilen av den gumbel-fordelte brannlasten for boliger, og det velges verdier for gipsplater for den termiske absorpsjonsevnen b .

Grunnet vanskeligheter ved innhenting av informasjon om åpningsstørrelser fra ulike høyhus i tre blir det nødvendig å gjøre enkelte antagelser. Det tas utgangspunkt i bilder fra prospekter, og disse er presentert i figur 51.



Figur 51 Moholt 50/50, Treet og Mjøstårnet [1, 13, 38]

Fra prospektene til de ulike høyhusene er det valgt å se på bilder fra innsiden for å velge ut vindushøyder. Stuene i både Treet og Mjøstårnet bruker store vinduer, hvor vinduene går fra bakkenivå og nesten opp til himlingen. På soverommene til Treet brukes det også store vinduer, men soverommene til Mjøstårnet bruker litt mindre vinduer. Moholt 50|50 har litt ulike størrelser på vinduene, men ser ut til at vindushøyden er den samme mens bredden varierer. Vindushøyden i simuleringen er valgt å være bestemt, og verdien som velges er som følgende:

$$h_{eq} = 1,60 \text{ m}$$

Videre må variasjonen i åpningsarealet bestemmes, og det er valgt å bruke vinduer på to vegger. Disse vinduene skal variere i størrelse på 20 % til 40 % av veggens areal. Det er forsøkt å velge realistiske verdier etter beste evne for både åpningsareal og vindushøyde. En oppsummert tabell over forutsetningene for Monte Carlo-simuleringen for åpningsfaktor er presentert i tabell 17.

Tabell 17 Input i Monte Carlo, åpningsareal

Parameter	Verdier/Kommentar
Gulvareal, A_f	25 m ²
Takhøyde, h_{tak}	2,7 m
Vindusandel, vegg 1	Uniform fordeling [20 %, 40 %]
Vindusandel, vegg 2	Uniform fordeling [20 %, 40 %]
Åpningsareal, A_v	$A_v = \sqrt{A_f * h_{tak} * (Vindusandel \text{ vegg 1} + \text{vegg 2})}$

Vindushøyde, h_{eq}	1,6 meter
Areal av omsluttende bygningsdeler, A_t	$A_t = 2 * A_f + 4 * \sqrt{A_f} * h_{tak} = 104 \text{ m}^2$

3. Vindushøyde

Nå skal kun vindushøyden varieres, samtidig som det er et bestemt åpningsareal. Gulvarealet bestemmes å være 25 m^2 med en takhøyde på 2,7 m. Det samlede arealet av omsluttende bygningsdeler er 104 m^2 slik som tidligere. Åpningsarealet velges å være 30 % av to vegger, og blir dermed:

$$A_v = 2 * \left(\sqrt{25 \text{ m}^2} * 2,7 * 30 \% \right) = 8,1 \text{ m}^2$$

Videre må variasjonen i vindushøyde bestemmes. Fra figur 51 ser en at det er store variasjoner i størrelse, spesielt mellom stue og soverom. Med utgangspunkt i figur 51 velges vindushøyden å variere mellom 1 m og 2,4 m, for å undersøke utslaget til tross for at selve åpningsarealet forblir den samme.

Resultatene fra Monte Carlo-simuleringen blir åpningsfaktor. For videre modellering av temperatur-tidkurve benyttes det her også 80 %-fraktilen av den gumbel-fordelte brannlasten for boliger, og det velges verdier for gipsplater for den termiske absorpsjonsevnen b . En oppsummert tabell over forutsetningene for Monte Carlo-simuleringen for åpningsfaktor er presentert i tabell 18.

Tabell 18 Input i Monte Carlo, vindushøyde

Parameter	Verdier/Kommentar
Gulvareal, A_f	25 m^2
Takhøyde, h_{tak}	2,7 m
Vindusandel, vegg 1	30 %
Vindusandel, vegg 2	30 %
Åpningsareal, A_v	$8,1 \text{ m}^2$
Vindushøyde, h_{eq}	Uniform fordeling [1.0, 2.4]
Areal av omsluttende bygningsdeler, A_t	104 m^2

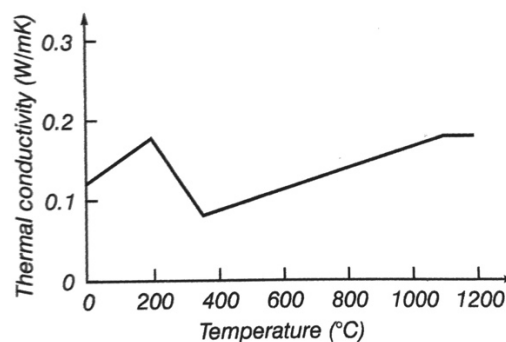
4. Termisk absorpsjonsevne

Dette er faktor $b = \sqrt{\rho c \lambda}$. Her finnes usikkerheter rundt verdiene for massetetthet ρ , spesifikk varmekapasitet c og varmekonduktivitet for tre. En annen usikkerhet er andelen eksponert treverk. I virkeligheten kan gulvet være av laminat, parkett, vinyl og lignende. For himlingen er det typisk brukt gips, men det brukes også andre materialer som sponplater og paneler. For et høyhus i tre er det tenkelig at det også er behandlede overflater og/eller brannmaling. I denne casen er det valgt å gjøre en forenkling, og det er at de omsluttende bygningsdelene enten er av eksponert tre eller gipskledning.

I første omgang undersøkes usikkerhetene for massetetthet, spesifikk varmekapasitet og varmekonduktivitet for tre, og deretter modelleres temperatur-tidkurver etter en Monte Carlo-simulering for faktor b . Til slutt undersøkes temperatur-tidkurvene for ulike andeler gips og eksponert tre med Monte Carlo.

KLH, produsent av massivtre, beskriver i en produktkatalog [33] at densiteten er 471 kg/m^3 . Structurlam [39], en annen produsent av massivtre, skriver at densiteten er omtrent 485 kg/m^3 . For limtre fra Moelven er densiteten på 470 kg/m^3 [40]. Limtreet som ble brukt i "Treet" er av klasse GL30c og GL30h [41], og fra limtreboka [36] kan en lese av densiteter for ulike typer limtre. GL30c og GL30h har henholdsvis en densitet på 430 kg/m^3 og 480 kg/m^3 . Dersom det benyttes sterkere limtre (GL32h) har denne en densitet på 490 kg/m^3 . Med utgangspunkt i disse verdiene velges variasjonen i densiteten fra 430 kg/m^3 til 500 kg/m^3 .

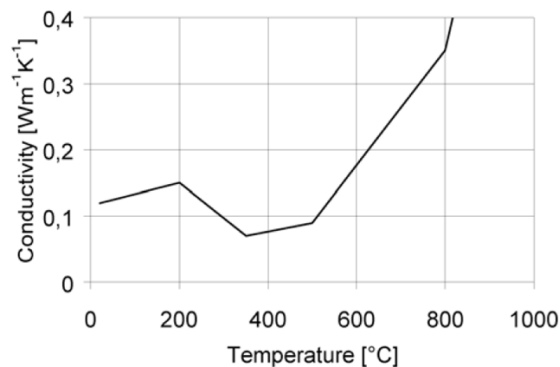
For termisk konduktivitet λ er det valgt verdier på grunnlag av dens oppførsel ved forhøyede temperaturer. NS EN 1991-1-2 tillegg A sier at ved beregning av faktor b kan massetetthet, spesifikk varmekapasitet og varmekonduktivitet for ytterflaten antas på grunnlag av den omgivende temperaturen, noe som er en forenkling til virkeligheten. Hvordan λ for tre forandrer seg ved temperaturstigning er vist i figur 52 [21]. I virkeligheten vil det dannes et kullag ytterst, med ulike lag av oppvarmet trevirke innover. Dermed vil snittet ha ulike termiske egenskaper ved de forskjellige lagene.



Figur 52 Termisk konduktivitet for tre

Fra figur 52 ser en at konduktiviteten starter på rundt $0,12 \frac{W}{mK}$ ved $0^{\circ}C$, går opp til rundt $0,18 \frac{W}{mK}$ ved $200^{\circ}C$, ned igjen til rundt $0,09 \frac{W}{mK}$ ved $350^{\circ}C$ og videre stiger den konstant opp mot rundt $0,18 \frac{W}{mK}$ ved svært høye temperaturer. Gjennomsnittlig ligger verdien på $\lambda = 0,130 - 0,135 \frac{W}{mK}$.

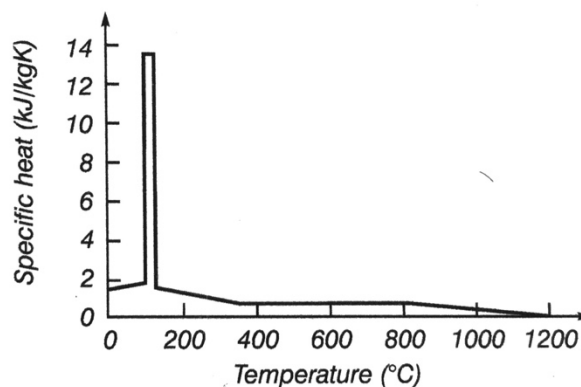
NS EN 1995-1-2 tillegg B presenterer forholdet mellom temperatur og konduktiviteten til tre og kullag, og dette er presentert i figur 53.



Figur 53 Termisk konduktivitet for tre og kullag [7]

Ved overtente branner vil temperaturen øke raskt i starten, og de mest betydningsfulle verdiene blir dermed de ved økte temperaturer. Ved veldig høye temperaturer vil treverket brenne vekk, men eurokoden presiserer at verdiene gjelder konduktiviteten til tre og kullag. Dermed antas at verdiene for de forhøyede temperaturene gjelder for kullaget. Med grunnlag i dette velges konduktiviteten å variere mellom $0,1$ og $0,35 \frac{W}{mK}$.

Den spesifikke varmekapasiteten c varierer ved økte temperaturer, men det er ikke stor variasjon bortsett fra når temperaturen er rundt $99-120^{\circ}C$. Spesifikk varmekapasitet ved forhøyet temperatur er vist i figur 54. I produktkatalogen til KLH [33] er verdien satt til å være $1600 \frac{J}{kg K}$.



Figur 54 Spesifikk varmekapasitet for tre

I NS 1995-1-2 tillegg B er det presentert en tabell som sier noe om hva den spesifikke varmekapasiteten er i forhold til temperatur. Tabellen er rettet på og finnes i rettelsesblad AC:2009, og den er presentert i tabell 19.

Tabell 19 Spesifikk varmekapasitet for tre

Temperature °C	Specific heat capacity kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	Ratio of density to dry density ^a
20	1,53	1 + ω
99	1,77	1 + ω
99	13,60	1 + ω
120	13,50	1,00
120	2,12	1,00
200	2,00	1,00
250	1,62	0,93
300	0,71	0,76
350	0,85	0,52
400	1,00	0,38
600	1,40	0,28
800	1,65	0,26
1200	1,65	0

^a ω is the moisture content

Ved overtente branner vil temperaturen øke raskt i starten, og de mest betydningsfulle verdiene blir dermed de ved økte temperaturer. Med grunnlag i dette velges spesifikk varmekapasitet å variere mellom 1400 og 1650 $\frac{J}{kg K}$.

Før modelleringen må analyserommet bestemmes. Det skal være et rom på 25 m² med en takhøyde på 2,7 m og åpningsareal på 8,1 m². Til slutt velges andelen eksponert tre å være 50 %, og andelen gips settes også lik 50 %. Den termiske absorpsjonsevnen til gips velges å være:

$$b = 521,5 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

En oppsummert tabell over forutsetningene for Monte Carlo-simuleringen for termisk absorpsjonsevne b er presentert i tabell 20.

Tabell 20 Input for Monte Carlo, termisk absorpsjonsevne

Parameter	Verdier/kommentar
Densitet, kg/m ³	Uniform fordeling [430, 500]
Konduktivitet, W/mK	Uniform fordeling [0.10, 0.35]
Spesifikk varmekapasitet, J/kgK	Uniform fordeling [1400, 1650]
b_{gips} , J/m ² s ^{1/2} K	521,5
Andel gips	50 %
Andel eksponert tre	50 %

5. Brannlast

Nå skal mengden brannlast i rommet varieres, og derfor undersøkes først hva en finner av brannlast for boliger ved et litteratursøk. Deretter undersøkes brannlastene som er oppgitt i standarden.

Det ble gjort en fullskala branntest av en treetasjes bygg av massivtre i Japan [42], og dette ble gjort for å undersøke bruken av massivtre med hensikt om å øke bruken av dette i fleretasjes bygninger. Testen ble gjort for et typisk rom i en bolig, og dette påvirket valg av brannlast i rommet. Testrommet ble utstyrt med to typiske madrasser laget av polyuretan, en del paller av tre som skulle representere den mobile brannenergien og i tillegg til gulv laget av tre. Ved utregningen av brannlast var det antatt av 50 % av gulvet bidro til brannlasten. Veggene var av gipskledning, med isolasjon under, og bak isolasjonen var det paneler av massivtre. I tabell 21 er brannlastene for testen gjengitt. Brannlasten ble regnet ut til å være $790 \frac{MJ}{m^2}$, som er ganske nære gjennomsnittsbrannlasten som er gitt i Eurocoden.

Tabell 21 Brannlast fra ulike tester

Material	Participation factor	Total weight [kg]	H_u [MJ/kg]	Q_{fi} [MJ]
Wooden flooring	0.5	94.5	17.5	827
Polyurethane mattresses	1.0	33.0	23.0	759
Additional wooden cribs	1.0	378	17.5	6613
Fire starts for fire ignition	1.0	2.5	40.0	100
Total fire load [MJ]				8299
Floor area [m ²]				10.5
Fire load density calculated over 10.5 m ² floor area [MJ/m ²]				790

I en masteroppgave fra Canada, *Fire Loads and Design Fires for Mid-Rise Buildings* [43], er det samlet inn informasjon av brannlast for ulike bruk og ulike typer rom. Disse undersøkelsene er uavhengig av materialene som er brukt i bæresystemet. Her finnes både gjennomsnittlige verdier samt variasjon, og verdiene er funnet ved å undersøke mange ulike rom. Brannlast for bebodde bygg er gjengitt i tabell 22.

Tabell 22 Brannlast for ulike typer bebodde bygg

Occupancy	Mean FLD (MJ/m ²)	Standard deviation (MJ/m ²)	80 th Percentile (MJ/m ²)	90 th Percentile (MJ/m ²)	Isolated peak values (MJ/m ²)
Children's home	400	200	600	660	800
Homes	500	250	750	825	1000
Homes for aged	400	200	600	660	800
Hotel	300	150	450	495	600
Youth hostel	300	150	450	495	600

Her ser en at for hjem generelt er gjennomsnittlig brannlast $500 \frac{MJ}{m^2}$, med et standardavvik på $250 \frac{MJ}{m^2}$. Det er stort avvik, og det ser en ved 90-prosentilet der verdien er $825 \frac{MJ}{m^2}$.

Videre er det presentert brannlast for ulike typer hjem, og dette er gjengitt i tabell 23. Tallene er funnet ved en undersøkelse i Canada, *An Extended Survey of Combustible Contents in Canadian Residential Living Rooms* [44]. Ved å undersøke 64 leiligheter er det funnet en gjennomsnittlig brannlast på $440 \frac{MJ}{m^2}$ med et standardavvik på $272 \frac{MJ}{m^2}$.

Tabell 23 Brannlast for ulike typer hjem

Table 13: Mean values of fire load and fire load density for various homes [26]

Housing category	Mean fire load (MJ)	Mean fire load density (MJ/m ²)	Standard deviation (MJ/m ²)	Number of samples
2 storey detached	7800	390	160	231
Bungalow	7790	410	270	118
Apartment	7920	440	272	64
2 storey town home	8300	490	240	58
2 storey semi-detached	7920	440	300	29
3 storey detached	8190	390	240	28
3 storey town home	6290	370	240	14
Duplex	8360	440	190	12

I en annen undersøkelse fra Canada, *Survey Results of Combustible Contents and Floor Areas in Multi-family Dwellings* [45], er det funnet brannlast for ulike typer rom i boliger, og verdiene for brannlast er gjengitt i tabell 24. Her ser en at for soverom ligger gjennomsnittet på $534 \frac{MJ}{m^2}$ til $594 \frac{MJ}{m^2}$, med standardavvik på henholdsvis $125 \frac{MJ}{m^2}$ og $146 \frac{MJ}{m^2}$. Kjøkken har en del høyere brannlast, mens stue og kjeller er lavere.

Tabell 24 Brannlast for ulike typer rom i hjem

Room	Mean FLD (MJ/m ²)	Standard Deviation (MJ/m ²)	Minimum (MJ/m ²)	Maximum (MJ/m ²)	95th Percentile	Sample Size	Mean FL (MJ)
Kitchen	807	123	420	1244	940	515	7908
Secondary bedroom	594	146	107	1000	846	129	6237
Primary Bedroom	534	125	249	920	753	347	8864
Living Room	412	127	106	897	610	397	7251
Dining Room	393	132	119	901	576	292	3812
Basement Living Room	288	96	103	633	450	130	6682

En oppsummert tabell over aktuelle brannlaster er presentert i tabell 25.

Tabell 25 Oppsummering av aktuelle brannlaster

Hva	Gjennomsnittlig brannlast	Kommentar
NS-EN 1991-1-2, brannlast for bolig	$780 \frac{MJ}{m^2}$	Uavhengig av bæresystem. Gumbelfordelt 80 %-fraktil er $948 \frac{MJ}{m^2}$.
Branntest [32]	$790 \frac{MJ}{m^2}$	Bygg av massivtre. Eksponert treverk på gulv. Vegger tildekket av gips.
Hjem, generelt [43]	$500 \frac{MJ}{m^2}$	Standardavvik på $250 \frac{MJ}{m^2}$.
Leiligheter, generelt [44]	$440 \frac{MJ}{m^2}$	Standardavvik på $272 \frac{MJ}{m^2}$.
Primære soverom [45]	$534 \frac{MJ}{m^2}$	Standardavvik på $125 \frac{MJ}{m^2}$.
Sekundære soverom [45]	$594 \frac{MJ}{m^2}$	Standardavvik på $146 \frac{MJ}{m^2}$.

Fra de ulike brannlastene som er presentert ser en at verdiene for hjem og leiligheter er noe lavere enn hva Eurocoden presenterer, siden Eurocoden er litt konservativ. Disse brannlastene gjelder generelt hjem og leiligheter og er uavhengig av hva bæresystemet er bygget av, men Eurocoden spesifiserer heller ikke brannlast ut i fra bæresystem.

NS EN 1991-1-2 tillegg E presenterer ulike spesifikke brannenergier for forskjellig bruk av bygningen. Disse verdiene er noe høye for mindre rom i leilighetsbygg og det skal nevnes at disse tallene ikke er brukt i alle land [22]. Det er oppgitt verdier for gjennomsnitt og en gumbelfordelt 80 %-fraktil. For høyhus i tre er det mest aktuelt å se på brannlasten for boliger og kontorer, og de karakteristiske brannlastene er oppgitt i tabell 26.

Tabell 26 Eurokodens karakteristiske brannlast for bolig og kontor

Bruk	Gjennomsnitt, $q_{f,k}$	80 %-fraktil, $q_{f,k}$
Bolig	$780 \frac{MJ}{m^2}$	$948 \frac{MJ}{m^2}$
Kontor	$420 \frac{MJ}{m^2}$	$511 \frac{MJ}{m^2}$

For å fremstille og implementere gumbel-fordelingen i @Risk så må det gjøres noen beregninger først, for å finne lokasjonsfaktoren μ og skaleringsfaktoren β . For å beregne disse behøver en å vite gjennomsnittet og standardavviket. Gjennomsnittsverdiene er oppgitt og standardavviket kan finnes av tabulerte verdier [46], og disse er oppgitt i tabell 27.

Tabell 27 Brannlast for ulike bruk av bygg, detaljert

	Stand. Deviation	Mean	80% fractile	90 % fractile	95 % fractile
Dwelling	234	780	948	1085	1217
Hospital	69	230	280	320	359
Hotel (room)	93	310	377	431	484
Library	450	1500	1824	2087	2340
Office (standard)	126	420	511	584	655
School	85,5	285	347	397	445
Shopping centre	180	600	730	835	936
Theatre (cinema)	90	300	365	417	468
Transport (public space)	30	100	122	139	156

For å regne ut lokasjonsfaktoren μ og skaleringsfaktoren β brukes formel 35 og 36.

$$\sigma = \frac{\beta\pi}{\sqrt{6}} \quad (35)$$

I formel 35 er σ standardavviket.

$$\text{Gjennomsnitt} = \mu + 0,5772\beta \quad (36)$$

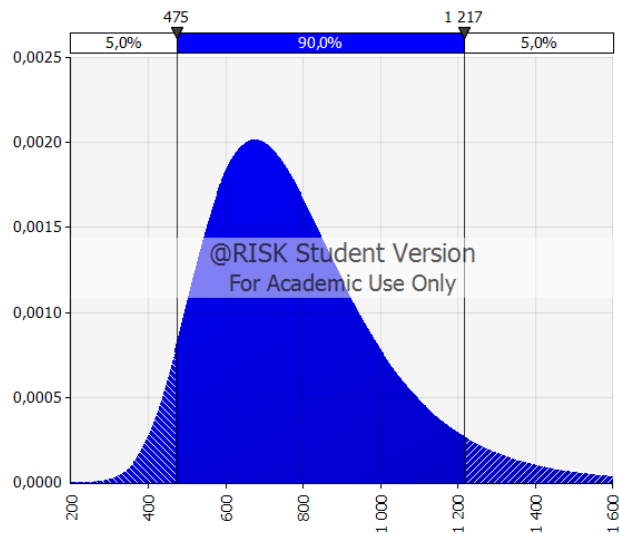
Ved beregning fås verdiene som er presentert i tabell 28.

Tabell 28 Parametere for de gumbelfordelte brannlastene

Bolig		Kontor	
β	μ	β	μ
182,45	674,70	98,24	363,30

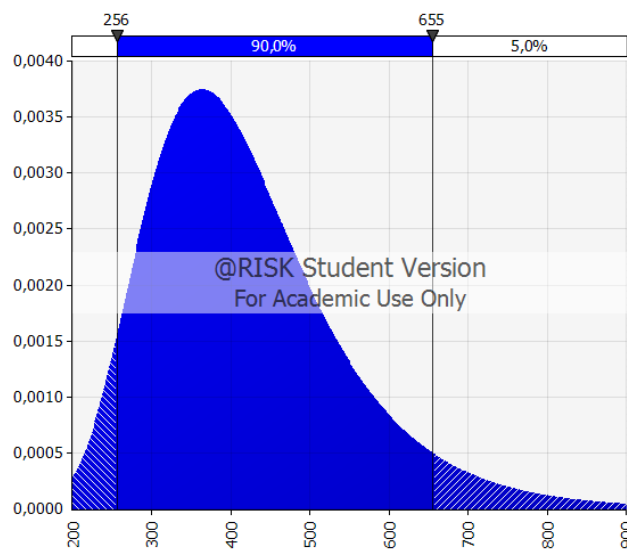
Med disse verdiene kan gumbel-fordelingene implementeres i @Risk, og fordelingene er vist i figur 55 og 56.

Gumbel-fordelt spesifikk brannenergi for boliger:



Figur 55 Gumbelfordelt brannlast, boliger

Gumbel-fordelt spesifikk brannenergi for kontorer:



Figur 56 Gumbelfordelt brannlast, kontorer

Siden det bare er brannlasten som skal varieres, kan hele analysebranncellen etableres. Rommet har et gulvareal på 25 m² og en takhøyde på 2,7 m. For å unngå intense og korte brannforløp er det valgt å redusere åpningsarealet fra 8,1 m² (som i de tidligere casene) til 4 m², og vindushøyden er 1,6 m. Det velges verdier for gipsplater for den termiske absorpsjonsevnen b .

$$b = 521,5 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

Temperatur-tidkurven for oppvarmingsfasen avhenger kun av åpningsfaktor og termisk absorpsjonsevne, så det må gjøres Monte Carlo-simulering for når maksimumstemperaturen inntreffer. Starter med å beregne åpningsfaktor, O .

$$O = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} = \frac{4 * \sqrt{1,6}}{2 * 25 + 4 * \sqrt{25} * 2,7} = 0,049 \text{ m}^{1/2}$$

Videre skal det gjøres Monte Carlo-simuleringer for når maksimumstemperaturen inntreffer, og da må simuleringene gjøres for t_{max} . Ved utregning av t_{max} brukes ikke $q_{f,k}$ -fordelingene som er oppgitt, men den dimensjonerende verdien av den spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten, $q_{t,d}$. Da må først $q_{f,k}$ regnes om til $q_{f,d}$, og videre om til $q_{t,d}$. Dette gjøres med formel 9 og 10, som blir oppgitt på nytt for bedre lesbarhet.

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

Verdiene som benyttes her er presentert i tabell 29.

Tabell 29 Verdier for parametere ved beregning av dimensjonerende brannlast

Faktor	Verdi	Kommentar
$q_{f,k}$	Gumbel-fordeling for bolig og kontor	Bolig: $[\mu, \beta] = [674.7, 182.45]$ Kontor: $[\mu, \beta] = [363.3, 98.24]$
m	0,8	Anbefalt verdi i Eurokoden. Denne verdien brukes for materialer som hovedsakelig består av cellulose.
δ_{q1}	1,10	Basert på branncellens størrelse. Denne verdien er for et gulvareal på 25 m ² .
δ_{q2}	1,00	Basert på typen bruk av branncellen. Denne verdien gjelder for <u>kontor</u> , <u>bolig</u> , hotell, papirindustri.
δ_n	1,00	Nasjonalt tillegg i Eurokoden (tabell NA.E.2) anbefaler å bruke verdien 1,00.

For å regne om fra $q_{f,d}$ til $q_{t,d}$ må en multiplisere med:

$$\frac{A_f}{A_t} = \frac{25 \text{ m}^2}{104 \text{ m}^2} = 0,24$$

I første omgang skal brannlasten for boliger undersøkes, deretter kontorer. En oppsummert tabell over forutsetningene for Monte Carlo-simuleringen for tiden t_{max} er presentert i tabell 30.

Tabell 30 Input for Monte Carlo, brannlast

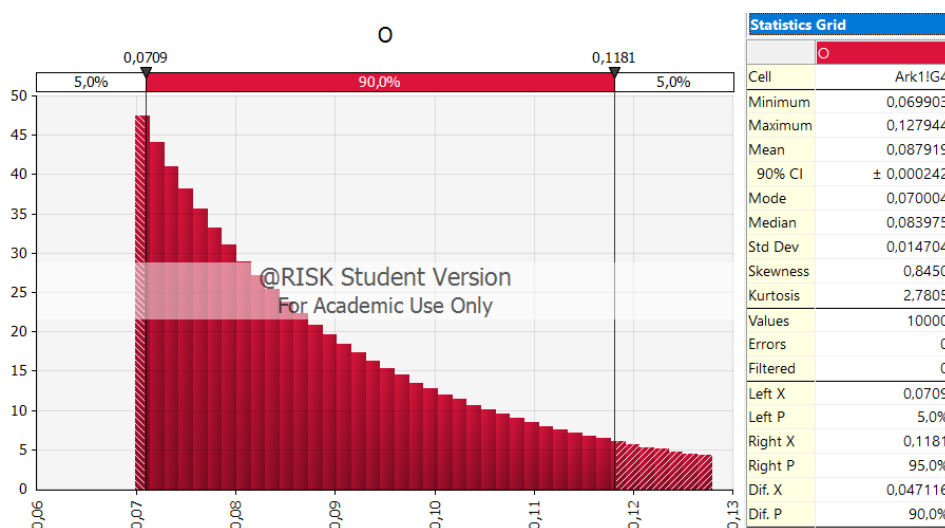
Bolig		Kontor	
$q_{f,k}$	$[\mu, \beta] = [674.7, 182.45]$	$q_{f,k}$	$[\mu, \beta] = [363.3, 98.24]$
m	0,80	m	0,80
δ_{q1}	1,10	δ_{q1}	1,10
δ_{q2}	1,00	δ_{q2}	1,00
δ_n	1,00	δ_n	1,00
A_f/A_t	0,24	A_f/A_t	0,24
O	0,049	O	0,049

Resultater

Nå skal resultatene fra Monte Carlo-simuleringene presenteres, og med grunnlag i verdier fra simuleringene skal det modelleres parametriske temperatur-tidkurver. Det er valgt å modellere temperatur-tidkurver for 5 %-fraktilen, gjennomsnittet og 95 %-fraktilen av de respektive parameterne det ble gjort simuleringer for. Ved å studere disse temperatur-tidkurvene kan en få en bedre forståelse av i hvilken grad parameterne påvirker temperatur-tid-forløpet for de valgte romgeometriene, termiske egenskapene og brannlastene.

1. Gulvareal

Det ble utført Monte Carlo-simulering for åpningsfaktor O med 10.000 iterasjoner, og resultatene er presentert i figur 58, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 31.



Figur 57 Monte Carlo-simulering, gulvareal

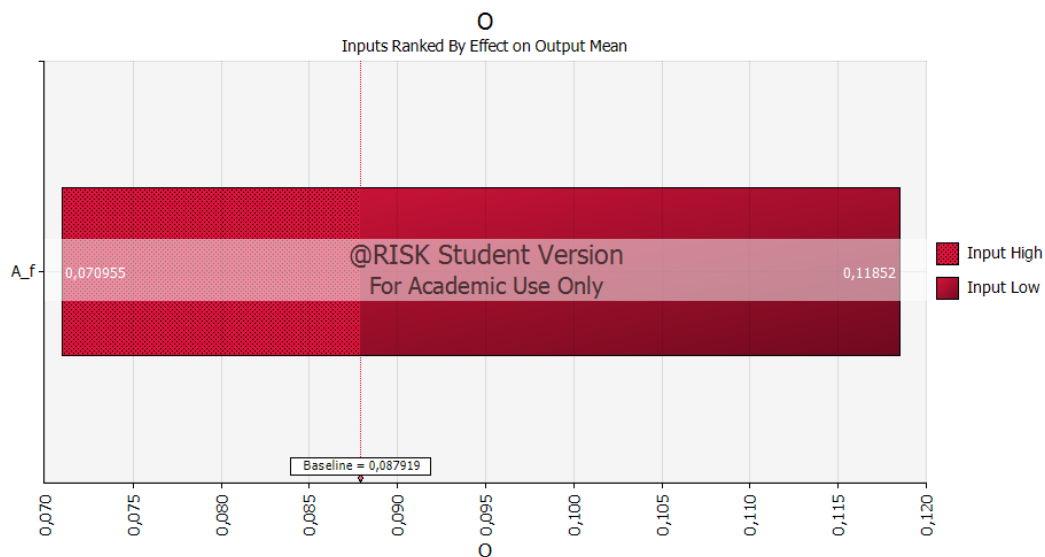
Tabell 31 Verdier fra MC-sim, gulvareal

Fraktil	Åpningsfaktor [$m^{1/2}$]
5 %	0,071
50 %	0,088
95 %	0,118

Videre når en skal regne ut når maksimumstemperaturen inntreffer, så skal den dimensjonerende verdien av den spesifikke brannenergien relatert til det samlede arealet av omhyllingsflaten ($q_{t,d}$) benyttes. Det ble bestemt at den karakteristiske spesifikke brannenergien relatert til gulvarealet skulle være $q_{f,k} = 948 \frac{MJ}{m^2}$, og denne verdien må multipliseres med $\frac{A_f}{A_t}$. Siden det er valgt et varierende gulvareal A_f , som igjen påvirker verdien av A_t , må de tilsvarende arealene finnes for de ulike åpningsfaktorene det skal modelleres temperatur-tidkurve for.

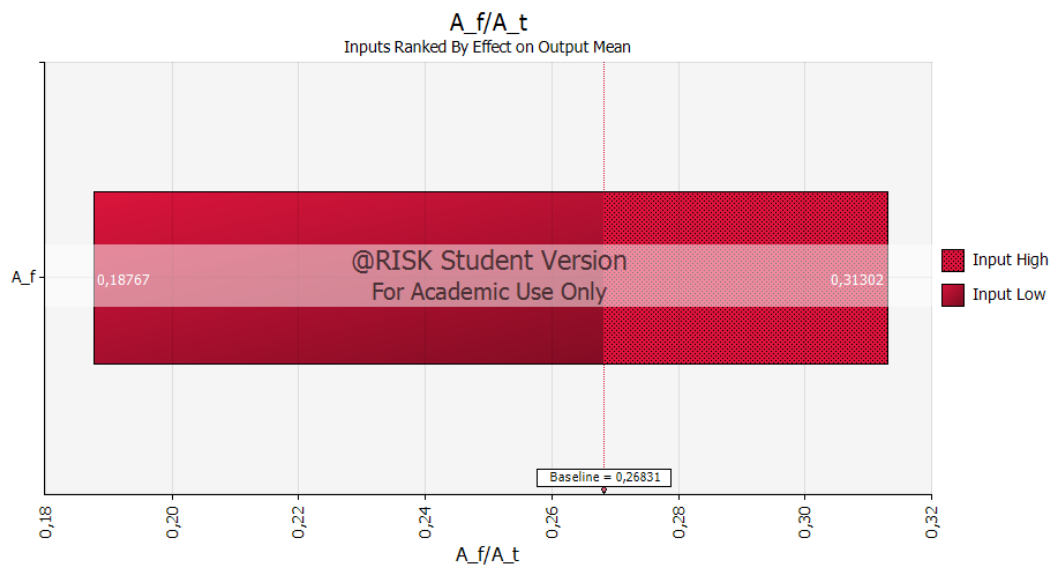
For å finne de tilsvarende arealene A_f og A_t har det blitt kjørt en Monte Carlo-simulering for både åpningsfaktoren og for $\frac{A_f}{A_t}$ hvor sensitiviteten undersøkes ved varierende gulvareal. På denne måten kan en finne hvilken verdi av $\frac{A_f}{A_t}$ som bør benyttes for de ulike åpningsfaktorene. Disse simuleringene er presentert i figur 59 og 60.

Sensitivitetsanalyse av åpningsfaktor O med varierende gulvareal:



Figur 58 Monte Carlo, sensitivitet, gulvareal

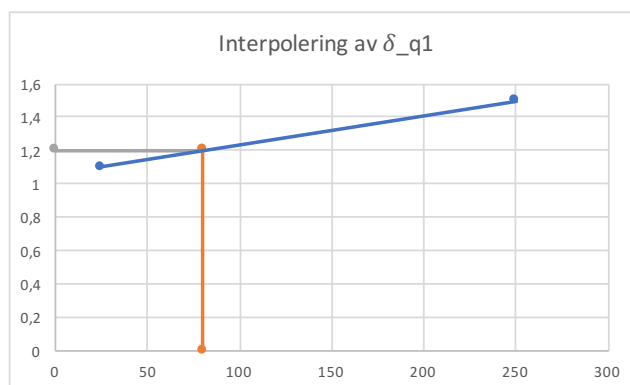
Sensitivitetsanalyse av $\frac{A_f}{A_t}$ med varierende gulvareal:



Figur 59 Monte Carlo, sensitivitet, A_f/A_t

Fra sensitivitetsanalysene ser en at stort gulvareal fører til lav åpningsfaktor og høy $\frac{A_f}{A_t}$. Dette betyr at ved modellering av temperatur-tidkurver skal den øvre verdien av $\frac{A_f}{A_t}$ brukes for den nedre verdien av åpningsfaktor.

Videre bestemmes $q_{f,d}$, og denne skal regnes ut med formel 10. Siden vi undersøker det som er karakterisert som bolig samt følger anbefalte verdier fra nasjonalt tillegg settes faktorene δ_{q2} og δ_n settes lik 1, og forbrenningsfaktoren m settes lik 0,8 siden det antas at materialene i rommet hovedsakelig består av cellulose. Faktoren som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko basert på branncellens størrelse derimot må velges for de ulike gulvarealene. Den laveste verdien som er oppgitt er for et gulvareal på 25 m^2 , dermed benyttes $\delta_{q1} = 1,10$ for lite gulvareal. Neste størrelse på gulvareal som er oppgitt er for 250 m^2 , og her settes $\delta_{q1} = 1,50$. Her kan det interpoleres for å finne δ_{q1} for et gulvareal på rundt 80 m^2 , siden det er valgt at gulvarealet skal variere opp til $85,7 \text{ m}^2$. Grunnen til at det velges å interpolere for 80 m^2 er siden de verdiene som brukes fra simuleringene er 5-, 50- og 95 %-fraktilene, og ikke de aller laveste/høyeste verdiene. Fra figur 61 ser en at $\delta_{q1} \approx 1,2$, dermed benyttes denne verdien for stort gulvareal. For 50 %-fraktilen velges det å bruke $\delta_{q1} = 1,15$.



Figur 60 Interpolering av faktor som tar hensyn til brannaktiveringsrisiko

Dermed benyttes verdiene i den oppdaterte tabellen, tabell 32. Her står også $q_{t,d}$ -verdiene som skal benyttes ved utregning av når maksimumstemperaturen inntreffer.

Tabell 32 Beregning av $q_{t,d}$ for ulike gulvarealet

Gulvareal	Fraktil	O [$m^{1/2}$]	$q_{f,d}$ [MJ/m^2]	A_f/A_t [-]	$q_{t,d}$ [MJ/m^2]
Stort	5 %	0,071	910	0,313	285
Middels	50 %	0,088	872	0,268	234
Lite	95 %	0,118	834	0,188	157

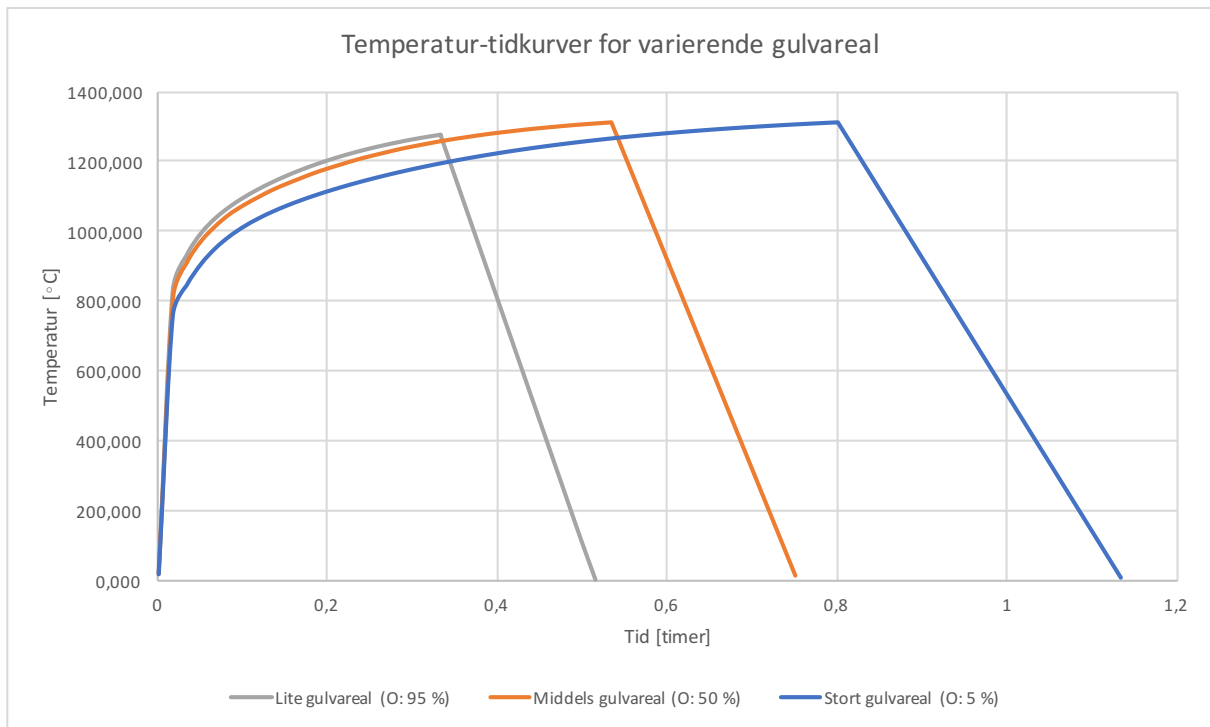
Videre kan t_{max} -verdiene regnes ut, og disse er presentert i tabell 33.

Tabell 33 Beregning av t_{max} for ulike gulvarealer

Gulvareal	Fraktil	O [$m^{1/2}$]	$q_{t,d}$ [MJ/m^2]	t_{max}
Stort	5 %	0,071	285	0,80
Middels	50 %	0,088	234	0,53
Lite	95 %	0,118	157	0,27

Dersom verdiene er lavere enn $t_{lim} = 0,33$ (20 min) settes $t_{max} = t_{lim}$. For 95 %-fraktilen (lite gulvareal) ser en at verdien er 0,27, altså under 0,33. Ved modellering av temperatur-tidkurve for dette tilfellet må O_{lim} beregnes.

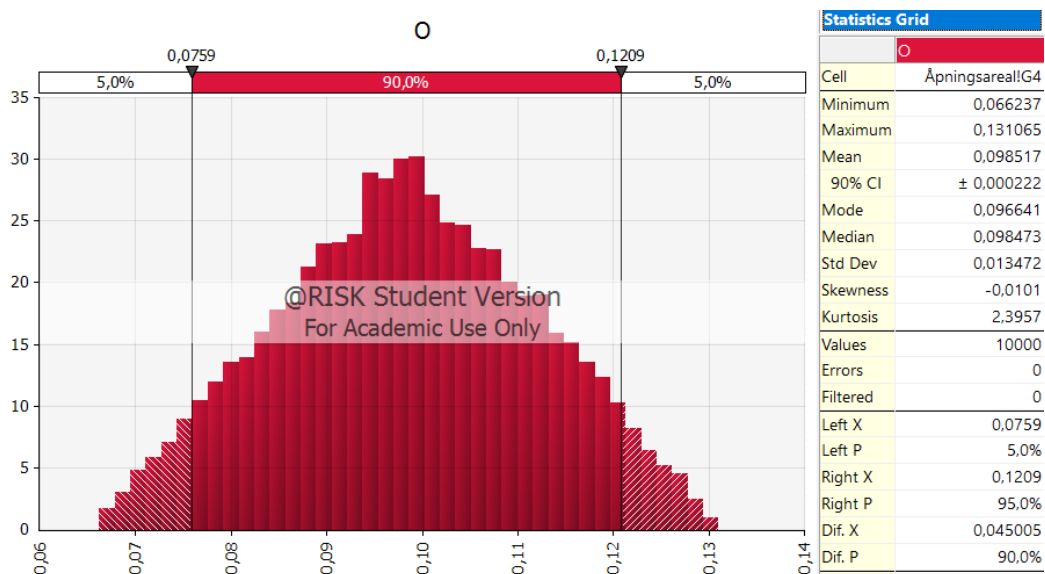
Resultatene av temperatur-tidkurvene er presentert i figur 62.



Figur 61 Temperatur-tidkurver for varierende gulvareal

2. Åpningsareal

Det ble utført Monte Carlo-simulering for åpningsfaktor O med 10.000 iterasjoner, og resultatene er presentert i figur 63, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 34.

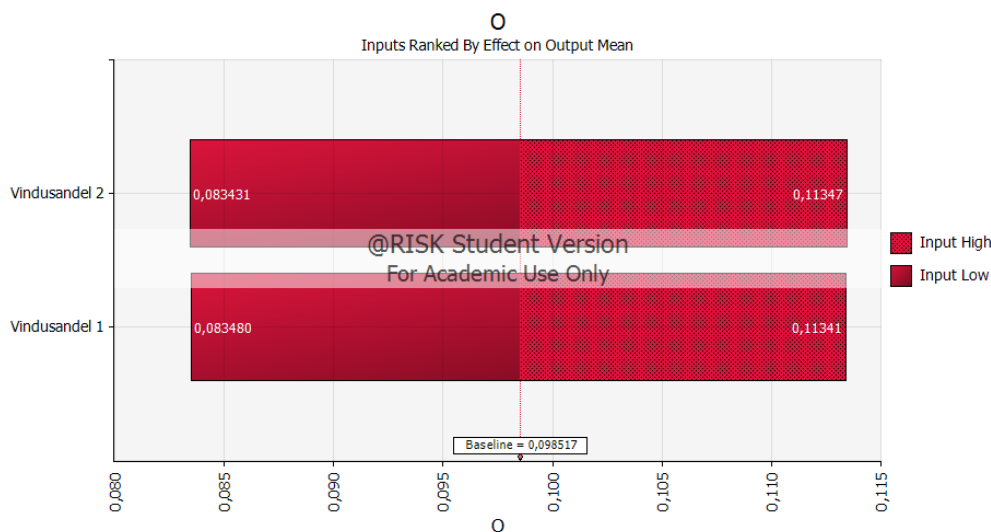


Figur 62 Monte Carlo-simulering, åpningsareal

Tabell 34 Verdier fra MC-sim, åpningsareal

Fraktil	Åpningsfaktor [$m^{1/2}$]
5 %	0,076
50 %	0,099
95 %	0,121

I tillegg kan en se på sensitiviteten av åpningsarealet og hvordan det påvirker åpningsfaktoren, se figur 65.



Figur 63 Monte Carlo, sensitivitet, åpningsareal

“Vindusandel 1” og ”Vindusandel 2” i figur 65 representerer prosentvis andelen av åpninger for de to veggene som har vinduer. Siden både vindushøyden og det samlede arealet av omsluttende bygningsdeler er faste verdier, kan en se fra formelen for åpningsfaktor at vindusarealet påvirker åpningsfaktoren lineært. Store åpningsarealer fører til høy åpningsfaktor, og små åpningsarealer fører til lav åpningsfaktor.

Ved utregning av $q_{f,d}$ benyttes følgende verdier:

Tabell 35 Verdier av parametere ved beregning av dimensjonerende brannlast

Parameter	Verdi	Kommentar
$q_{f,k}$	948 MJ/m ²	Tabulert verdi i Eurokoden. Brannlasten er gumbelfordelt 80 %-fraktil for boliger.
m	0,8	Anbefalt verdi i Eurokoden. Denne verdien brukes for materialer som hovedsakelig består av cellulose.
δ_{q1}	1,10	Basert på branncellens størrelse. Denne verdien er for et gulvareal på 25 m ² .

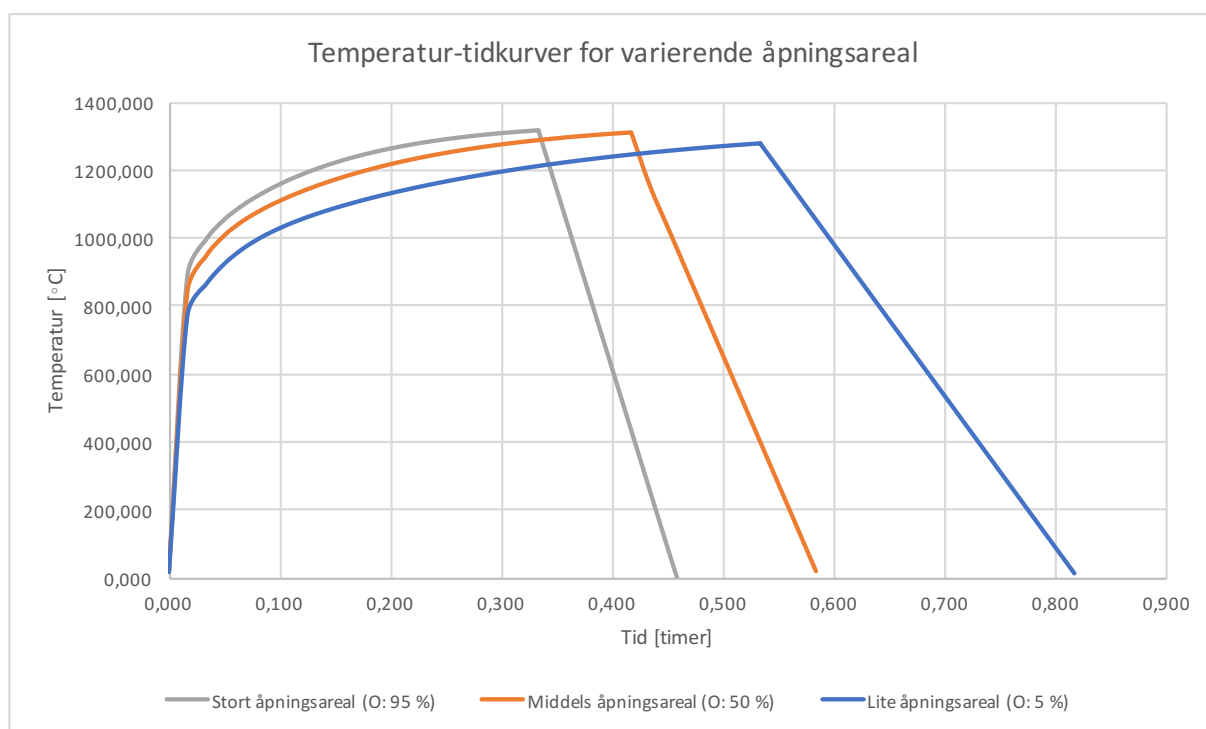
δ_{q2}	1,00	Basert på typen bruk av branncellen. Denne verdien gjelder for kontor, bolig, hotell, papirindustri.
δ_n	1,00	Nasjonalt tillegg i Eurokoden (tabell NA.E.2) anbefaler å bruke verdien 1,00.

Videre kan t_{max} -verdiene regnes ut for de ulike åpningsfaktorene som ble funnet for ulike åpningsarealer.

Tabell 36 Beregning av t_{max} for ulike åpningsarealer

Åpningsareal	Fraktil	O [$m^{1/2}$]	$q_{t,d}$ [MJ/m^2]	t_{max}
Lite	5 %	0,076	200,5	0,53
Middels	50 %	0,099	200,5	0,41
Stort	95 %	0,121	200,5	0,33

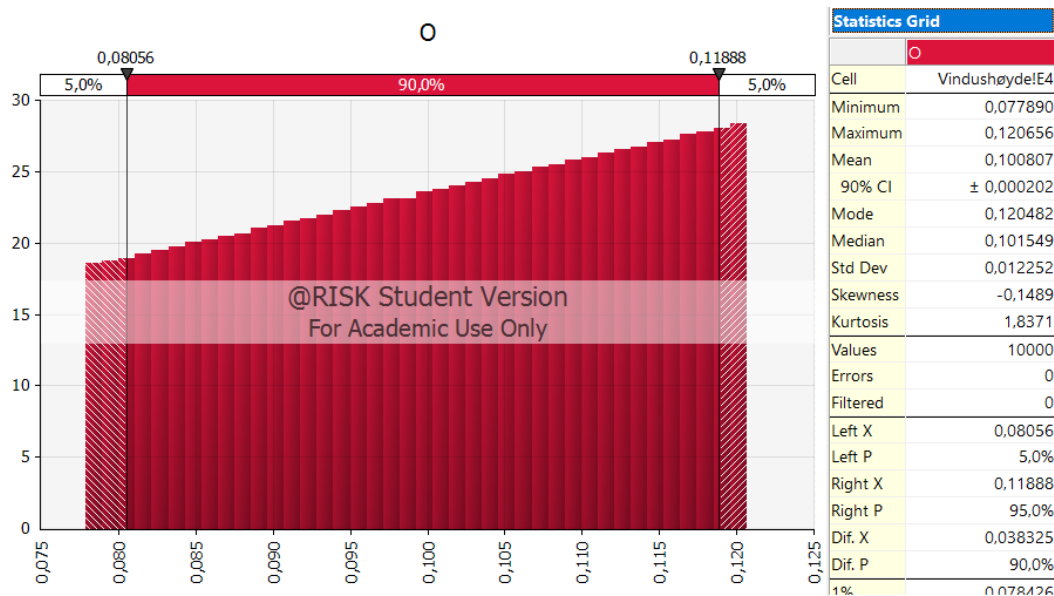
Resultatene av temperatur-tidkurvene er presentert i figur 64.



Figur 64 Temperatur-tidkurver for varierende åpningsareal

3. Vindushøyde

Det ble utført Monte Carlo-simulering for åpningsfaktor O med 10.000 iterasjoner, og resultatene er presentert i figur 65, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 38.

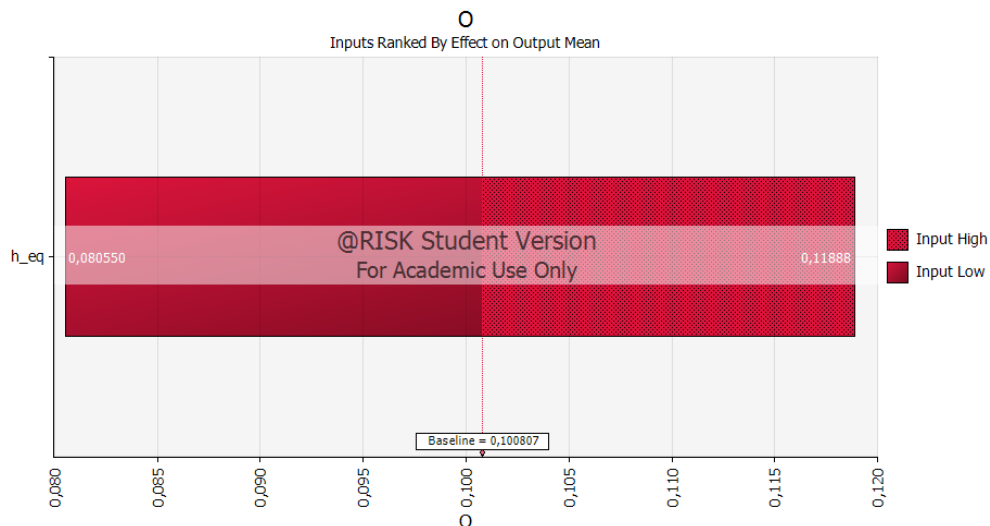


Figur 65 Monte Carlo-simulering, vindushøyde

Tabell 37 Verdier fra resultatene av MC-sim, vindushøyde

Fraktil	Åpningsfaktor [$m^{1/2}$]
5 %	0,081
50 %	0,101
95 %	0,119

I tillegg kan en se på sensitiviteten av vindushøyden og hvordan det påvirker åpningsfaktoren, se figur 66.

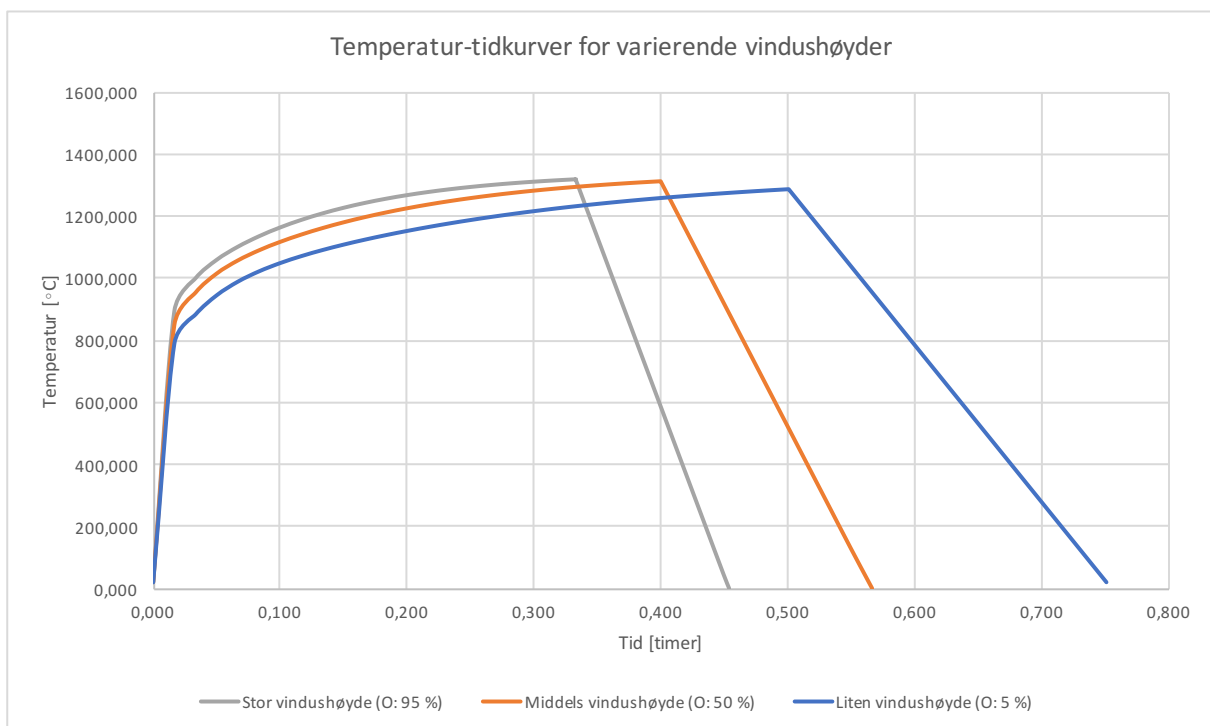


Figur 66 Monte Carlo, sensitivitet, vindushøyde

Fra figur 66 kan en se at høyere vinduer fører til høyere åpningsfaktorer. I dette tilfellet er det valgt et bestemt åpningsareal, det vil at høye og smale vinduer fører til høyere åpningsfaktorer enn lave og brede vinduer.

Ved beregning av når maksimumstemperaturen inntreffer brukes samme brannlast $q_{t,d}$ som da varierende åpningsareal ble undersøkt da det er det samme rommet det skal modelleres for. Dermed settes brannlasten lik $q_{t,d} = 200,5 \text{ MJ/m}^2$.

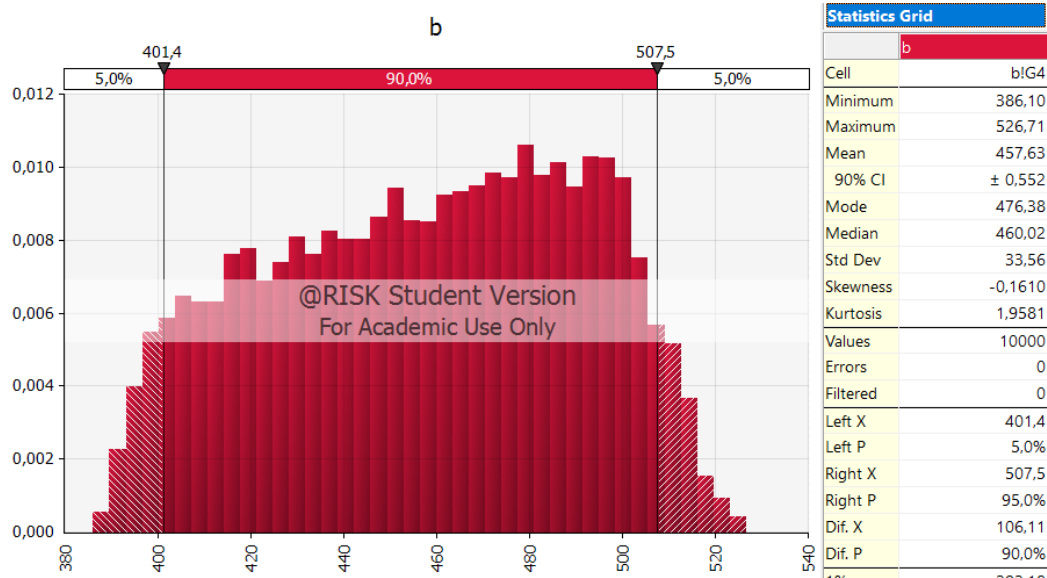
Resultatene av temperatur-tidkurvene er presentert i figur 67.



Figur 67 Temperatur-tidkurver for varierende vindushøyder

4. Termisk absorpsjonsevne

Det ble utført Monte Carlo-simulering for termisk absorpsjonsevne b med 10.000 iterasjoner, og resultatene er presentert i figur 68, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 39.

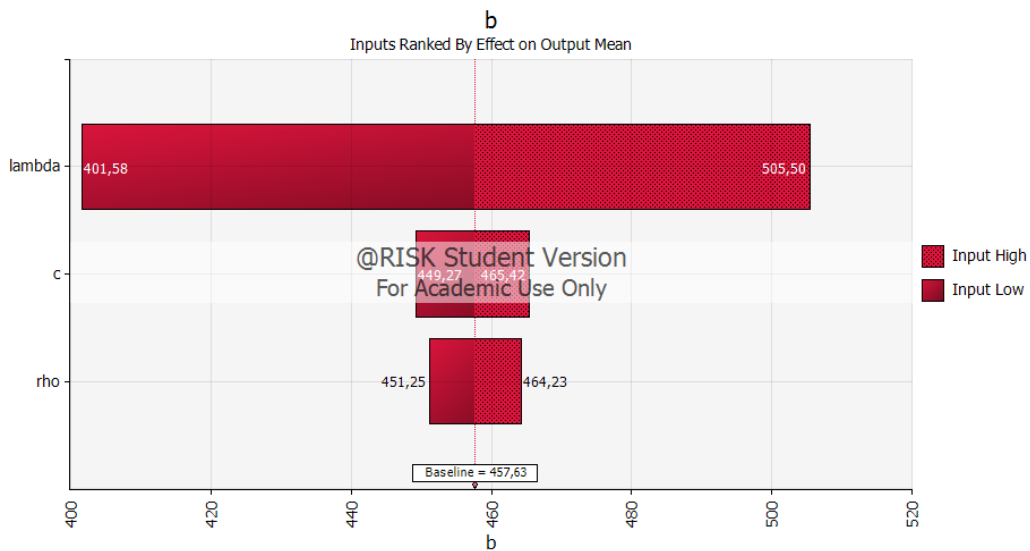


Figur 68 Monte Carlo-simulering, termisk absorpsjonsevne

Tabell 38 Verdier fra resultatene av MC-sim, termisk absorpsjonsevne

Fraktil	b [$\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$]
5 %	401,4
50 %	457,6
95 %	507,5

I tillegg kan en se på sensitiviteten av parameterne som inngår i beregningen av termisk absorpsjonsevne, se figur 69.



Figur 69 Monte Carlo, sensitivitet, termisk absorpsjonsevne

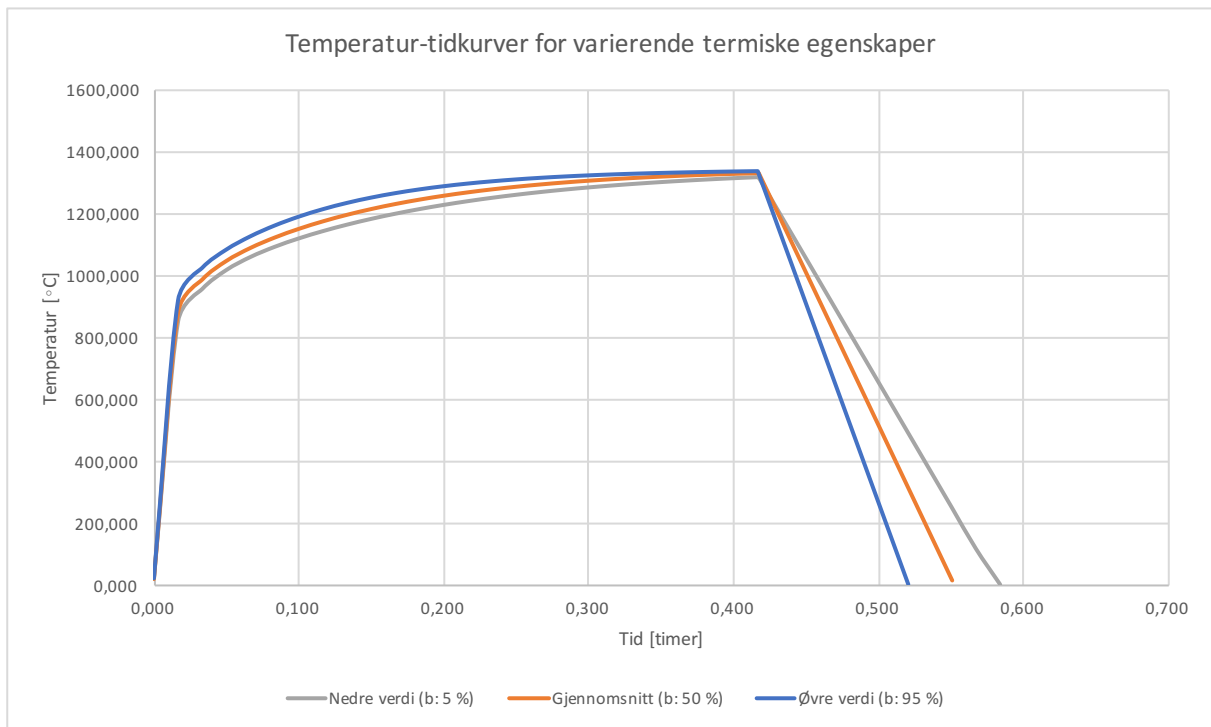
Fra figur 69 ser en at usikkerheten av treets varmekonduktivitet fører til størst endringer i resultatet.

I denne casen er hele rommet bestemt med verdier som er presentert i tabell 40.

Tabell 39 Åpningsfaktor, analysebyggverk

A_v	8,1 m ²
h_{eq}	1,6 m
A_t	104 m ²
O	0,099 m ^{1/2}

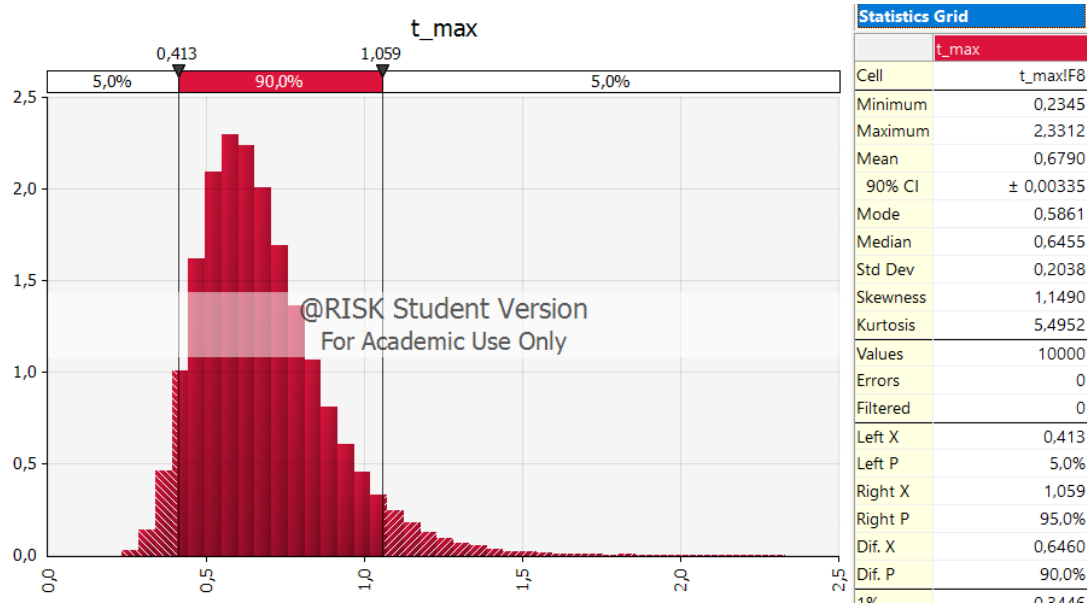
Resultatene av temperatur-tidkurvene er presentert i figur 70.



Figur 70 Temperatur-tidkurver for varierende termisk absorpsjonsevne

5. Brannlast

Nå skal det undersøkes hvilke t_{max} -verdier en får for den gumbel-fordelte brannlasten for henholdsvis boliger og kontorer. Det ble utført Monte Carlo-simulering for tiden t_{max} med 10.000 iterasjoner, og resultatene med brannlast for boliger er presentert i figur 71, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 41.

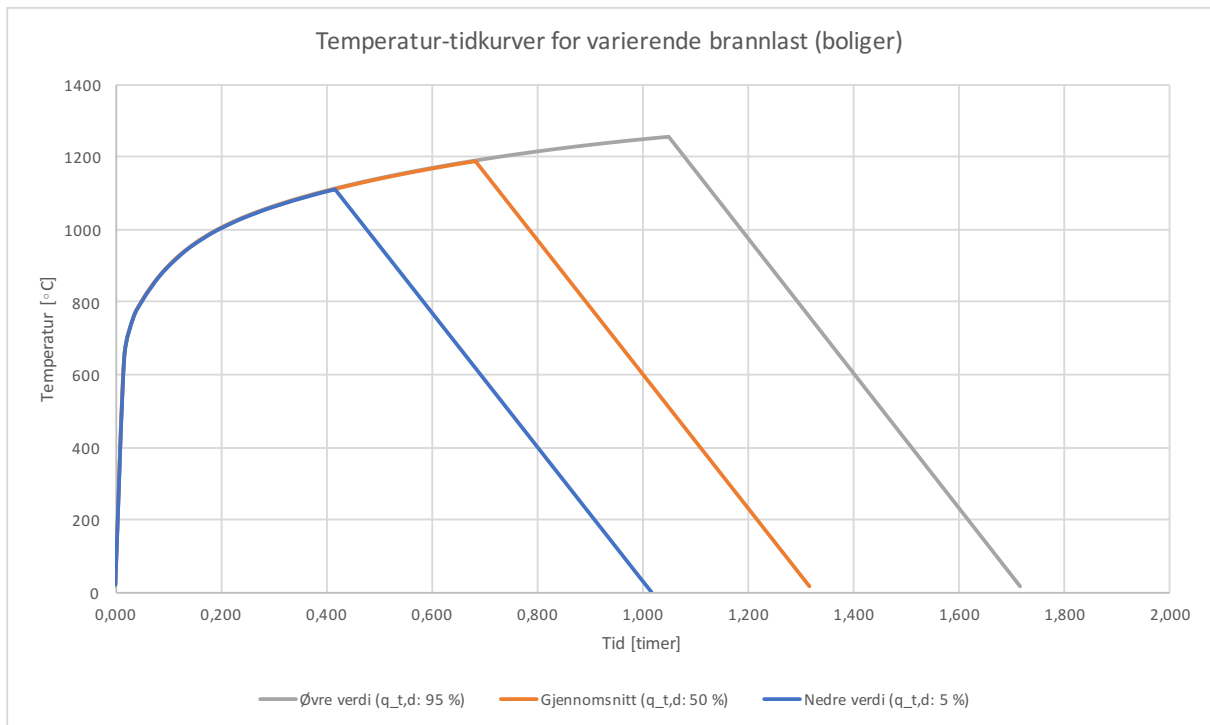


Figur 71 Monte Carlo-simulering, brannlast for boliger

Tabell 40 Verdier fra MC-sim, brannlast for boliger

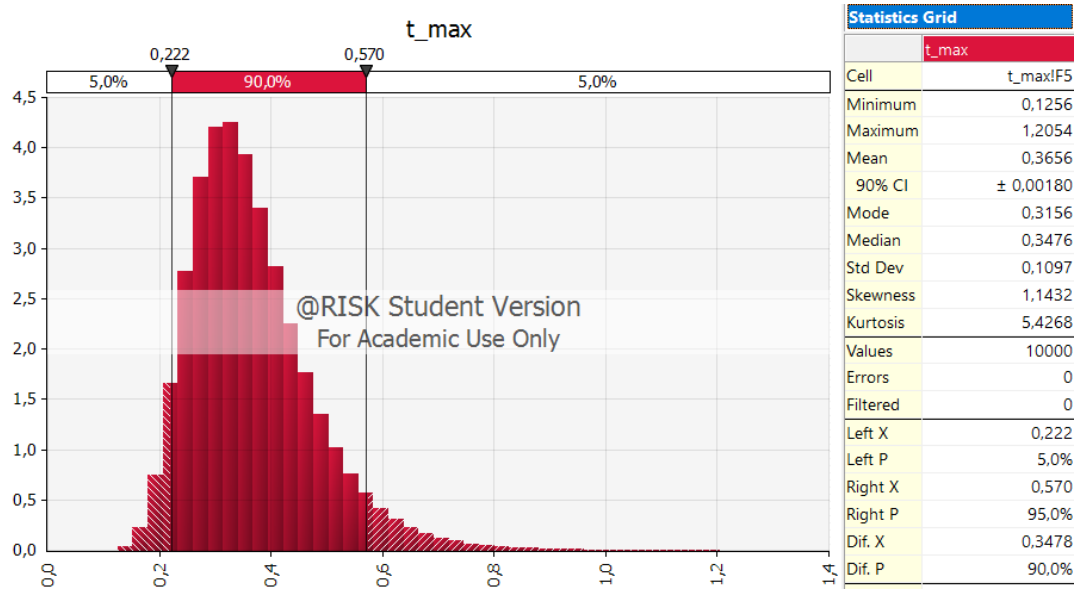
Fraktil	t_{max}
5 %	0,413
50 %	0,679
95 %	1,059

Resultatet av temperatur-tidkurvene ved varierende brannlast for boliger er presentert i figur 72.



Figur 72 Temperatur-tidkurver for varierende brannlast, boliger

Nå skal brannlasten for kontorer brukes for å modellere temperatur-tidkurver, som videre kan brukes for å sammenligne resultatet med boliger. Det ble utført Monte Carlo-simulering for tiden t_{max} med 10.000 iterasjoner, og resultatene med brannlast for kontorer er presentert i figur 73, og de aktuelle verdiene er presentert i tabell 42.



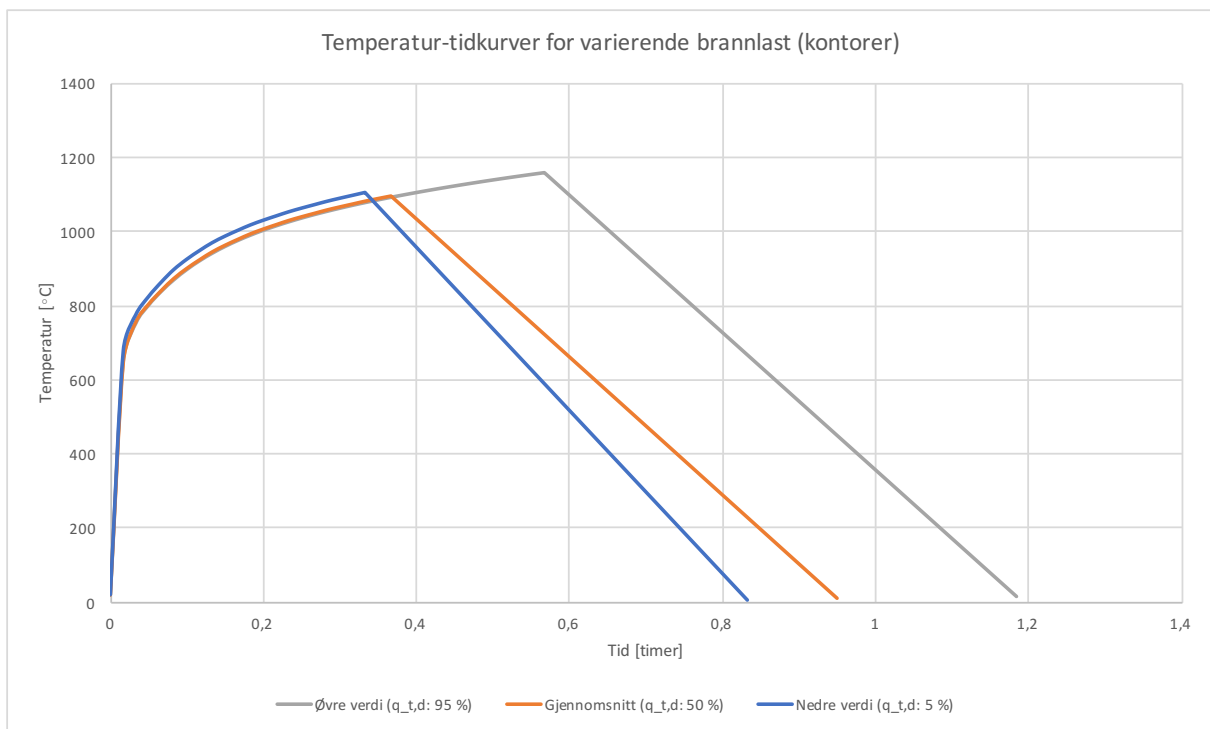
Figur 73 Monte Carlo-simulering, brannlast for kontorer

Tabell 41 Verdier fra MC-sim, brannlast for kontorer

Fraktil	t_{max}
5 %	0,222
50 %	0,366
95 %	0,570

Den nedre verdien av t_{max} i dette tilfellet er lavere enn $t_{lim} = 0,33$ (20 min). Det betyr at O_{lim} må regnes ut før en kan fortsette modelleringen. O_{lim} avhenger av brannlasten, og det er valgt å bruke gjennomsnittsverdien av brannlast for kontorer.

Resultatet av temperatur-tidkurvene ved varierende brannlast for kontorer er presentert i figur 74.



Figur 74 Temperatur-tidkurver for varierende brannlast, kontorer

Diskusjon

Det har blitt gjort sensitivitetsanalyse av Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve, hvor Monte Carlo har blitt brukt som verktøy. Dette er en måte å undersøke hvor mye påvirkning de ulike parameterne har på resultatet, men alt avhenger av hvilke variasjoner en har valgt at de ulike parameterne skal ha. Det er forsøkt å bruke realistiske verdier eller verdier som virker hensiktsmessige. Resultatet fra sensitivitetsanalysene avhenger direkte av hvilke verdier en velger å benytte seg av, derfor er dette en viktig del av analysen. I disse analysene har

parameterne relativt store variasjoner, siden hensikten var å undersøke variasjonen i resultatet. Eksempelvis ble gulvarealet valgt å variere fra en veldig lite rom til et større oppholdsrom på over 80 m². Derfor er det viktig å lese nøye gjennom hvilke variasjoner som er valgt for de respektive parameterne før en leser av temperatur-tidkurvene.

For termisk absorpsjonsevne ble det valgt å bruke uniform fordeling med relativt store variasjoner for tetthet, spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne. Dersom en vet hvilken produsent en skal bruke kan en få de termiske egenskapene for det produktet oppgitt, med ved å variere på de ulike parameterne kan en få ut resultater som kan brukes selv før produsenten er valgt ut. Det at det er brukt en uniform fordeling er en forenkling til virkeligheten, eksempelvis kunne det passet bedre med en normalfordeling eller lignende for massetettheten.

Ut i fra alle temperatur-tidkurvene ser en at åpningsfaktoren, altså rommets geometri og åpninger, påvirker brannforløpet i mye større grad enn variasjoner i termisk absorpsjonsevne.

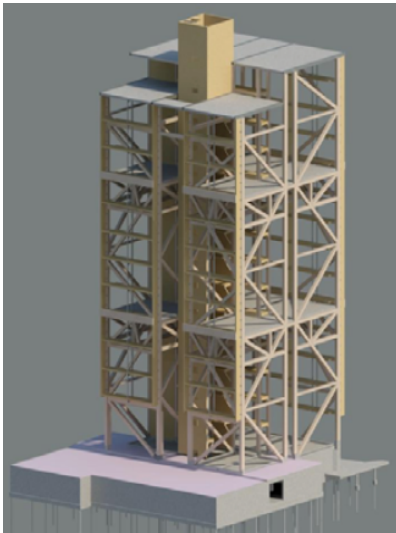
Case: Monte Carlo-simuleringer for forkulling

Forkullingsrate

I denne casen skal det etableres en analysebranncelle i et høyhus hvor det er brukt limtre som søyle/bjelke-system. For denne branncellen skal det undersøkes hvor store variasjoner en får i forkullingsrate ved bruk av ulike vindusstørrelser. Forkullingsraten skal beregnes for en parametrisk brann i henhold til Eurokoden.

Etablering av analysebranncelle

Denne branncellen skal være en del av et høyhus hvor bærekonstruksjonen er bygget opp som et søyle/bjelke-system av limtre. Som illustrasjon er det brukt bilder av Treet i Bergen, hvor figur 75 [2] viser en 3D-modell av bæresystemet og figur 76 [1] viser et av de typiske leilighetene som har eksponerte limtresøyler inne.



Figur 75 Treet: 3D-modell av bæresystem [2]



Figur 76 Treet: Leilighet med eksponert limtre[1]

I denne casen skal analysebranncellen ha eksponerte limtresøyler, og for å minske kompleksiteten er det valgt å bruke de termiske egenskapene til standard gips for alle omhyllingsflatene. Dermed blir den termiske absorpsjonsevnen for de omsluttende bygningsdelene som følger:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{800 * 1700 * 0,20} = 521,5 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

Arealet av gulvplanet er satt til å være:

$$A_f = 4 * 5 = 20m^2$$

Videre er det valgt en takhøyde på 2,75 m, som gir et samlet areal av omsluttende bygningsdeler på:

$$A_t = 2 * (A_{vegg,langside} + A_{vegg,kortside} + A_{gulv,tak}) = 2 * (5 * 2,75 + 4 * 2,75 + 4 * 5) = 89,5 m^2$$

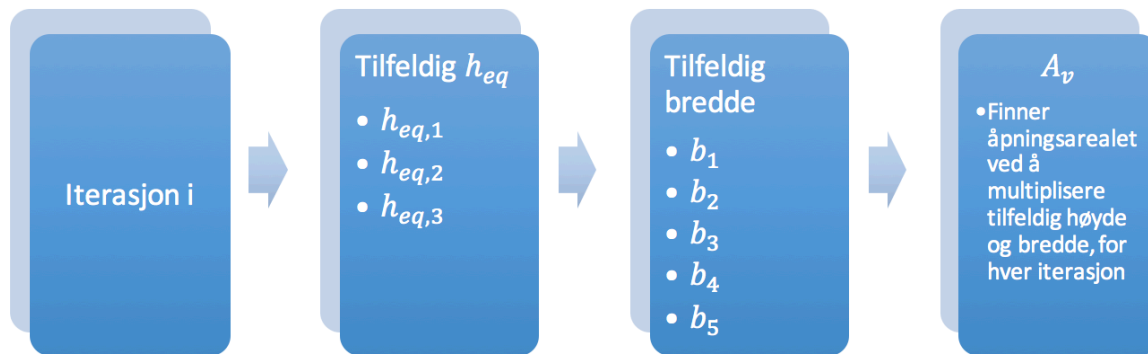
Monte Carlo-simulering

Det er interessant å undersøke hva variasjonen i forkullingsraten vil være for ulike vindusstørrelser for et bestemt rom, for å se hvor stor innvirkning det har på resultatene. Det er valgt ut noen vindushøyder og –bredder som er presentert i tabell 43. Med bakgrunn i disse er det valgt ut ulike åpningsarealer som videre skal brukes i Monte Carlo-simuleringen.

Tabell 42 Åpningsarealer for ulike høyder og bredder

Vindushøyde, h_{eq}	Vindusbredde	Åpningsareal, A_v
1,25 m	1,2 m	1,500 m ²
	1,5 m	1,875 m ²
	1,8 m	2,250 m ²
	2,1 m	2,625 m ²
	2,4 m	3,000 m ²
1,50 m	1,2 m	1,800 m ²
	1,5 m	2,250 m ²
	1,8 m	2,700 m ²
	2,1 m	3,150 m ²
	2,4 m	3,600 m ²
1,75 m	1,2 m	2,100 m ²
	1,5 m	2,625 m ²
	1,8 m	3,150 m ²
	2,1 m	3,675 m ²
	2,4 m	4,200 m ²

For å få ut riktig åpningsareal for en tilfeldig vindushøyde, er det programmert i Excel (med @Risk) at den først velger en av de tre valgte vindushøydene tilfeldig, deretter finner den åpningsarealet A_v ved å multiplisere med en tilfeldig verdi av de fem ulike vindusbreddene, se figur 77. Dette er for å unngå eksempelvis en vindushøyde på 1,75 m og et åpningsareal på 1,5 m². Åpningsarealene som står oppgitt i tabell 43 er alle de ulike åpningsarealene som er mulig å få ut for de ulike vindushøydene og –breddene.



Figur 77 Beregning av åpningsareal for Monte Carlo

Monte Carlo-simuleringene skal kjøres for β_{par} som beregnes etter formel 21, og formelen er gjengitt her for bedre leservennlighet:

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

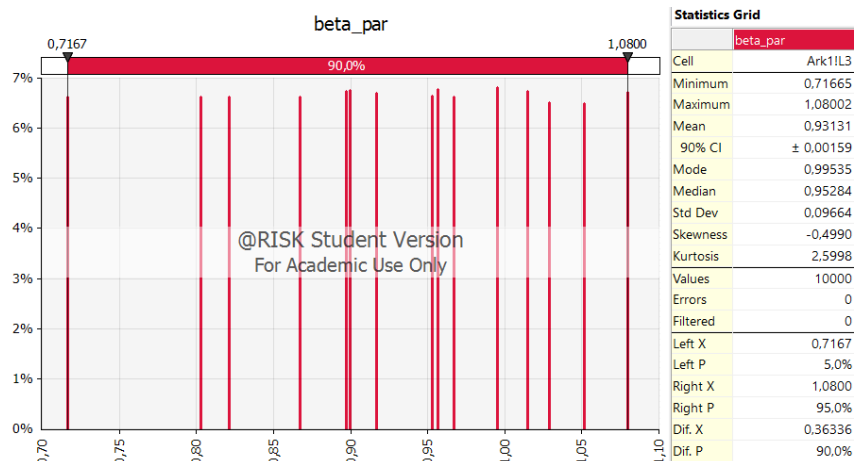
Valgte verdier og sannsynligheter som implementeres i @Risk er presentert i tabell 44.

Tabell 43 Verdier for Monte Carlo: β_{par}

Parameter	Valgte verdier	Sannsynlighetsfordeling	Kommentar
β_n	[0.70]	[1.0]	Limtre
h_{eq}	[1.25, 1.50, 1.75]	[0.33, 0.33, 0.33]	-
b	[1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4]	[0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2]	-
A_t	[89,50]	[1.0]	-
ρ	[800]	[1.0]	Standardgips
c	[1700]	[1.0]	Standardgips
λ	[0,20]	[1.0]	Standardgips

Resultater

Ved å kjøre Monte Carlo-simulering for β_{par} med 10.000 iterasjoner for en resultatene som er presentert i figur 78.



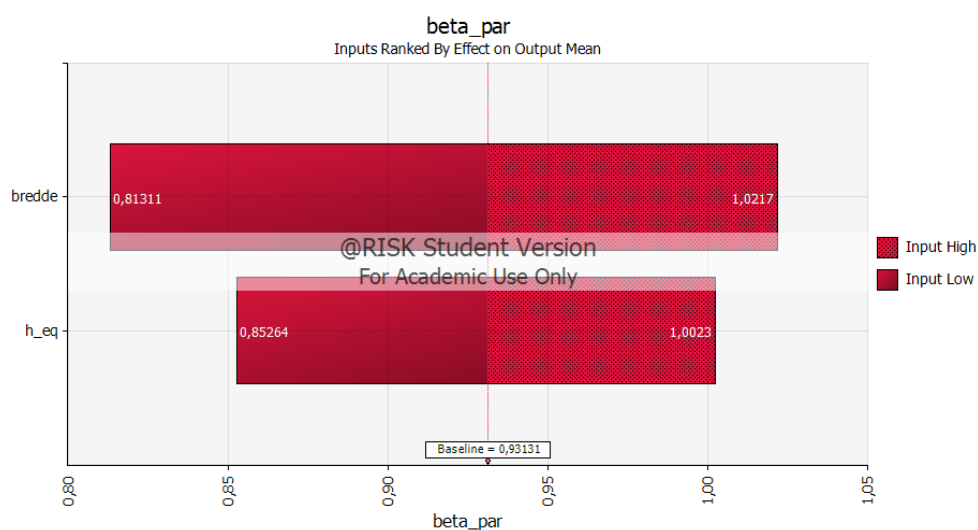
Figur 78 Resultater: Monte Carlo for β_{par}

I figur 78 ser en at det er begrenset antall resultater for forkullingsraten. Grunnen til det er at det er få parametere som varieres, og disse parameterne har en diskret sannsynlighetsfordeling med et begrenset antall verdier. Fra simuleringen kan en lese av hvor store variasjoner en kan få som forkullingsrate, ved å kun endre på vindusstørrelsen for en bestemt branncellestørrelse.

Tabell 44 Verdier for β_{par}

	β_{par}
Minimumsverdi	0,717 mm/min
Gjennomsnitt	0,931 mm/min
Maksimumsverdi	1,080 mm/min

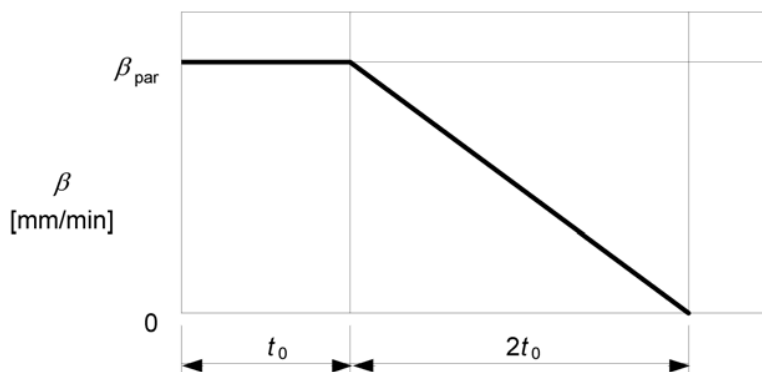
Ved å se på sensitiviteten i figur 79 kan en lese av hvor mye vindusbredde og –høyde påvirker forkullingsraten. I denne casen påvirker bredden resultatet mer enn høyden på vinduet.



Figur 79 Sensitivitet av parametere for beregning av β_{par}

Forkullingsdybde

For beregning av forkullingsdybde er det valgt å benytte Eurokodens modell som viser sammenhengen mellom forkullingsrate og tid. Frem til tid t_0 er forkullingsraten β_{par} konstant, og fra tiden t_0 til $3t_0$ går forkullingsraten lineært ned mot null. Tiden t_0 avhenger av brannlast og åpningsfaktor, og videre når en skal regne ut dybden trengs forkullingsraten β_{par} .



Figur 80 Forholdet mellom forkullingsrate og tid

Det er valgt å undersøke t_0 -verdiene en får ved forskjellige åpningsfaktorer, og de ulike åpningsfaktorene som skal brukes er presentert i tabell 46.

Tabell 45 Åpningsfaktorer som skal brukes i case

Åpningsfaktorer	
O_1	$0,02 m^{1/2}$
O_2	$0,04 m^{1/2}$
O_3	$0,06 m^{1/2}$
O_4	$0,08 m^{1/2}$

Tiden t_0 regnes ut med formel 25, og den er gjengitt her:

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

I formelen inngår $q_{t,d}$, altså den dimensjonerende spesifikke brannenergien relatert til overflatearealet A_t . Analysebranncellen er valgt å være den samme som fra forrige case ved beregning av forkullingsrate. Dermed får en et gulvareal som følger:

$$A_f = 4 * 5 = 20m^2$$

Takhøyden er på 2,75 m, som gir et samlet areal av omsluttende bygningsdeler på:

$$A_t = 2 * (A_{vegg,langside} + A_{vegg,kortside} + A_{gulv,tak}) = 2 * (5 * 2,75 + 4 * 2,75 + 4 * 5) = 89,5 \text{ m}^2$$

Videre benyttes Gumbel-fordelingen for brannenergi i boliger slik det er oppgitt i Eurokoden. Denne er oppgitt som karakteristisk spesifikk brannenergi $q_{f,k}$. Denne må først regnes om til den dimensjonerende brannenergien $q_{f,d}$, og dette gjøres ved å bruke formel 10 som en gjengitt her:

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

Den dimensjonerende spesifikke brannenergien $q_{f,d}$ er relatert til gulvarealet og denne må regnes om til $q_{t,d}$, det vil si brannenergien relatert til overflatearealet A_t . Dette gjøres ved å multiplisere $q_{f,d}$ med $\frac{A_f}{A_t}$.

Monte Carlo-simulering

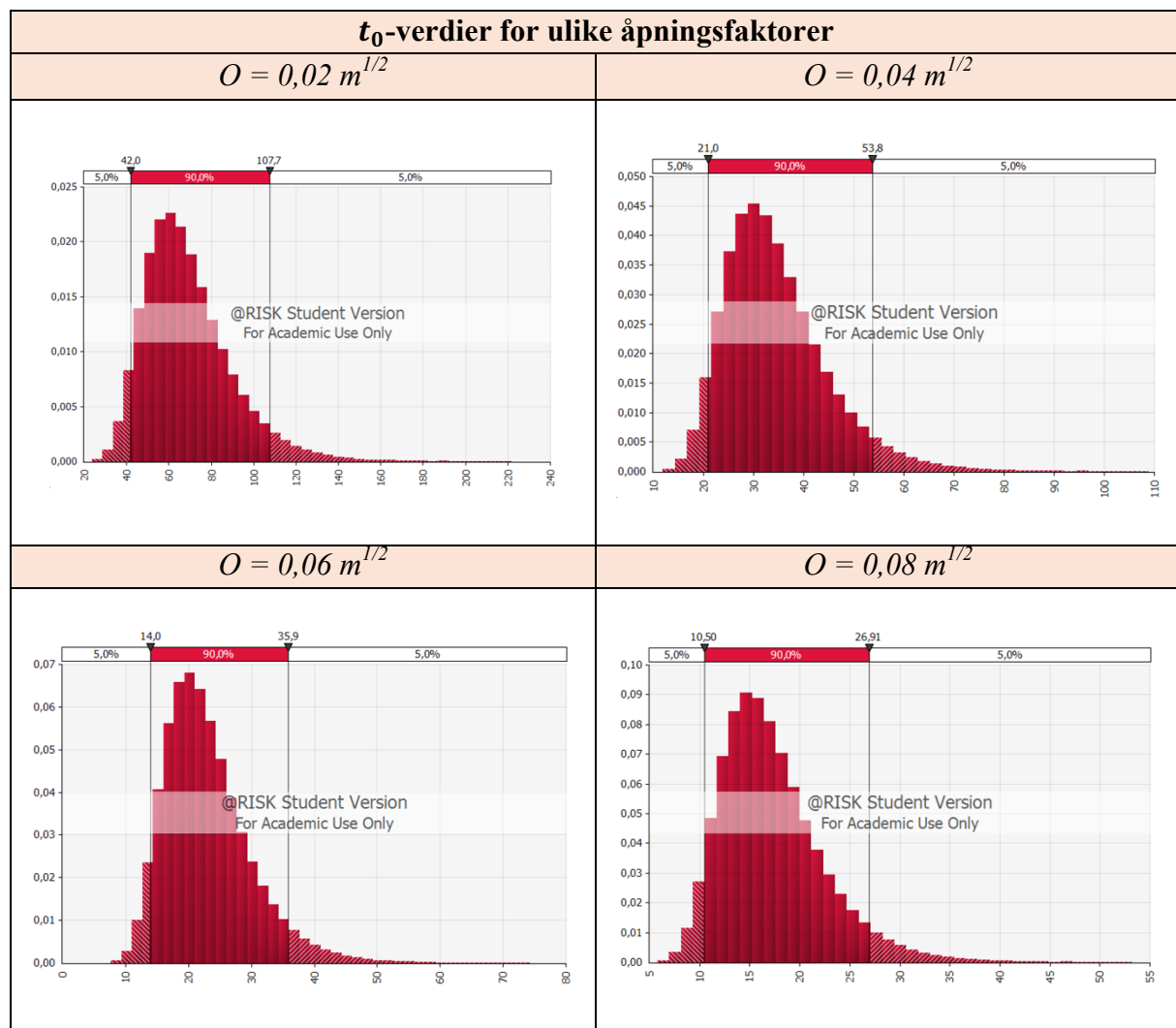
De verdiene og sannsynlighetene som er benyttet er vist i tabell 47. Simuleringen gjøres fire ganger for de ulike åpningsfaktorene, med 10.000 iterasjoner.

Tabell 46 Verdier for Monte Carlo: t_0

Parameter	Verdier
O	0.02 0,04 0.06 0,08
$q_{f,k}$	Gumbel-fordeling: $[\mu, \beta] = [674.7, 182.45]$
m	0.8
δ_{q1}	1.10
δ_{q2}	1.00
δ_n	1.00
A_f	20 m ²
A_t	89,5 m ²

De resulterende t_0 -verdiene er presentert i tabell 48.

Tabell 47 Resultater fra Monte Carlo, t_0 -verdier



Fra simuleringene kan en trekke ut verdier for t_0 , og i tabell 49 er det oppsummert med 5 %-fraktilene, 50 %-fraktilene og 95 %-fraktilene.

Tabell 48 t_0 -verdier for ulike åpningsfaktorer

t_0-verdier for ulike åpningsfaktorer			
Åpningsfaktor, O	5 %-fraktil	50 %-fraktil	95 %-fraktil
$0,02 m^{1/2}$	42 min	69 min	107,7 min
$0,04 m^{1/2}$	21 min	34,5 min	53,8 min
$0,06 m^{1/2}$	14 min	23 min	35,9 min
$0,08 m^{1/2}$	10,5 min	17,3 min	26,9 min

Med verdiene som er oppgitt i tabell 49 kan en regne ut forkullingsdybden i henhold til Eurokoden. Dette gjøres ved å regne ut arealet under grafen i figur 80, men først må en bestemme hvilken verdi en skal bruke for forkullingsraten β_{par} . Derfor er det valgt å regne ut β_{par} for alle fire åpningsfaktorene, og resultatene er presentert i tabell 50. Antar gipskledning på overflatene, dermed brukes:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{800 * 1700 * 0,20} = 521,5 \frac{J}{m^2 s^{1/2} K}$$

Tabell 49 Forkullingsrater for ulike åpningsfaktorer

O [$m^{1/2}$]	b [$J/m^2 s^{1/2} K$]	Γ	β_n [mm/min]	β_{par} [mm/min]
0,02	521,5	1,237	0,7	0,74
0,04	521,5	4,95	0,7	0,96
0,06	521,5	11,13	0,7	1,07
0,08	521,5	19,79	0,7	1,13

Videre kan forkullingsdybden finnes ved å regne ut arealet under grafen.

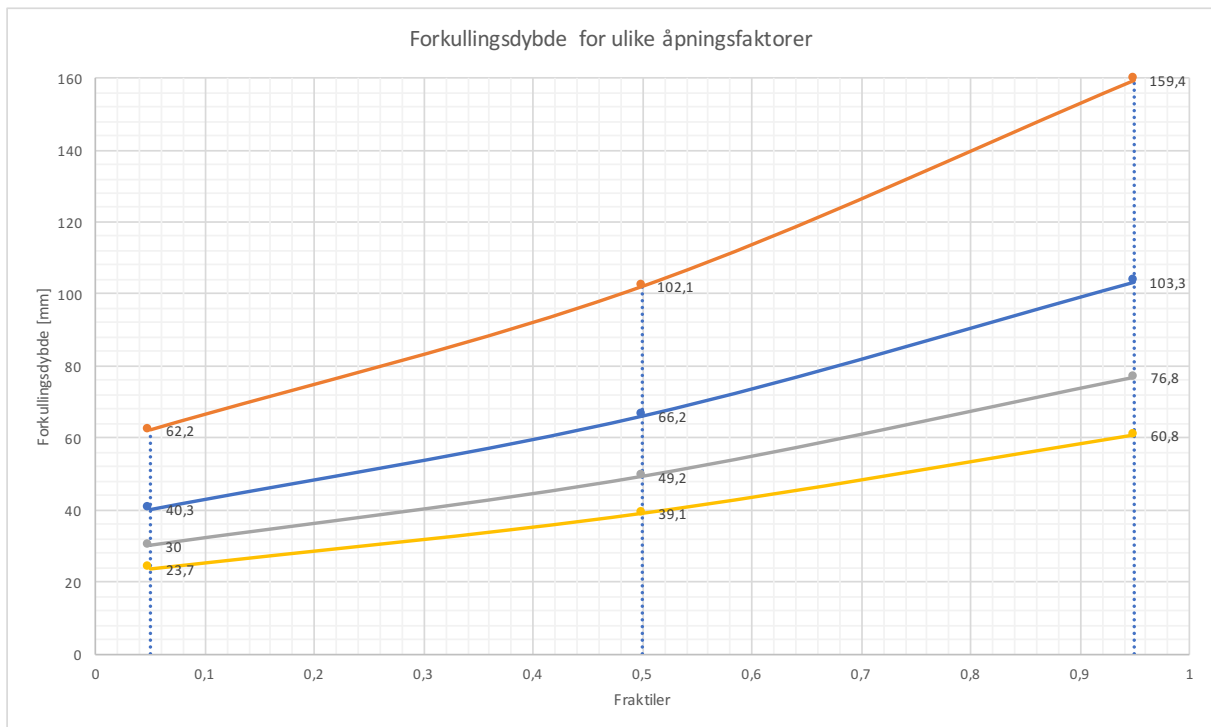
Resultater

Resultatene er presentert i tabell 51. Det er regnet ut for både 5 %, 50 % og 95 %-fraktilen for å undersøke variasjonen grunnet varierende brannlast. For de ulike åpningsfaktorene brukes tilhørende β_{par} . I siste kolonne er variasjonen mellom 5 %-fraktilen og 95 %-fraktilen oppgitt.

Tabell 50 Forkullingsdybde for ulike åpningsfaktorer

Forkullingsdybde for ulike åpningsfaktorer					
Åpningsfaktor, O	β_{par}	5 %-fraktil	50 %-fraktil	95 %-fraktil	Variasjon
$0,02 m^{1/2}$	0,74 mm/min	62,2 mm	102,1 mm	159,4 mm	97,2 mm
$0,04 m^{1/2}$	0,96 mm/min	40,3 mm	66,2 mm	103,3 mm	63,0 mm
$0,06 m^{1/2}$	1,07 mm/min	30,0 mm	49,2 mm	76,8 mm	46,8 mm
$0,08 m^{1/2}$	1,13 mm/min	23,7 mm	39,1 mm	60,8 mm	37,1 mm

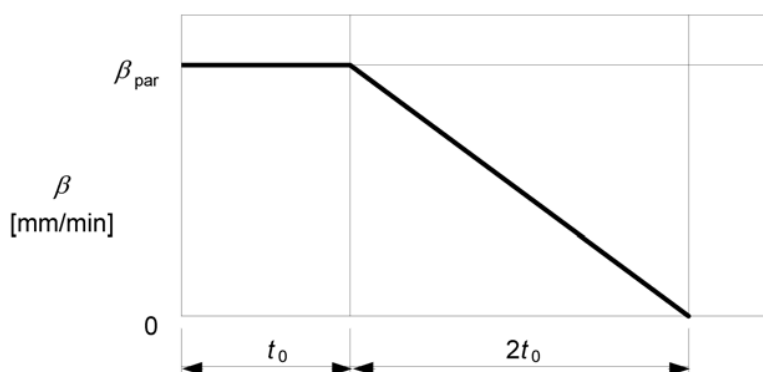
En grafisk fremstilling er presentert i figur 81. De ulike fraktilene i x-aksen er markert med stiplede linjer og forkullingsdybden kan leses av i y-aksen.



Figur 81 Forkullingsdybde for ulike åpningsfaktorer

Forkullingsvarighet

Igjen undersøkes modellen som er presentert i Eurokoden, som viser forholdet mellom forkullingsraten og -varigheten. Denne gangen skal varigheten av forkullingen stå i fokus, da dette kan være bakgrunn for verifikasjon av brannsikkerhet. Eurokoden presenterer ulike gumbelfordelte brannlaster avhengig av type bruk, og siden det er mest relevant med enten leilighets- eller kontorbygg for høyhus i tre velges det å undersøke forkullingsvarigheten for både brannlast for boliger og brannlast for kontorer. Gumbelfordelte brannlaster implementeres i Monte Carlo-simuleringen.



Figur 82 Forholdet mellom forkullingsrate og -varighet

Ved bruk av denne modellen er det kun brannlast og åpningsfaktor som er inputparametere, se formel 25. Det må fremdeles gjøres noen begrensninger i forhold til romgeometri. For beregning av $q_{t,d}$ behøver en å vite forholdet mellom gulvareal og samlet areal av omsluttende bygningsdeler, $\frac{A_f}{A_t}$. For å bestemme hvilke verdier som skal benyttes i simuleringen er det regnet ut ulike verdier av $\frac{A_f}{A_t}$ for ulike gulvarealer for et rom med en takhøyde på 2,7 meter. Det er valgt konservativt et kvadratisk rom, og verdiene er presentert i tabell 52.

Tabell 51 Ulike verdier av A_f/A_t

A_f	h_{tak}	A_t	A_f/A_t
15,00	2,70	71,83	0,209
20,00	2,70	88,30	0,227
25,00	2,70	104,00	0,240
30,00	2,70	119,15	0,252
35,00	2,70	133,89	0,261
40,00	2,70	148,31	0,270
45,00	2,70	162,45	0,277
50,00	2,70	176,37	0,283
55,00	2,70	190,09	0,289
60,00	2,70	203,66	0,295
65,00	2,70	217,07	0,299
70,00	2,70	230,36	0,304
75,00	2,70	243,53	0,308
80,00	2,70	256,60	0,312
85,00	2,70	269,57	0,315

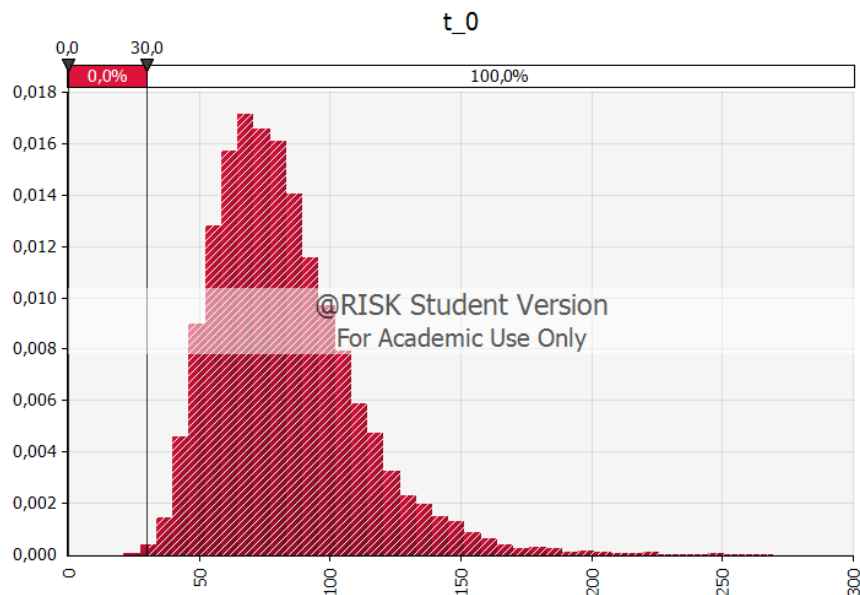
90,00	2,70	282,46	0,319
95,00	2,70	295,27	0,322
100,00	2,70	308,00	0,325

Dermed velges verdien for $\frac{A_f}{A_t}$ å variere mellom 0,209 og 0,325. Dette behøver ikke bety at det kun gjelder for kvadratiske rom med et gulvareal fra 15 til 100 m². Dersom det er et mindre rom, men som ikke er kvadratisk, kan det ha høyere verdier av $\frac{A_f}{A_t}$ siden det kan være høyere andel veggareal dersom rommet har en mer kompleks geometri.

Videre skal det gjøres Monte Carlo-simuleringer for t_0 , hvor det undersøkes prosentvis hvor ofte t_0 er lavere enn 30 minutter. Dersom t_0 er lavere enn 30 minutter, vil den totale varigheten av forkullingsforløpet være under 90 minutter. Brannlasten velges å være den fordelingen som er oppgitt i Eurokoden, og det undersøkes for både boliger og kontorer. For hver simulering skal åpningsfaktoren være bestemt.

Resultater

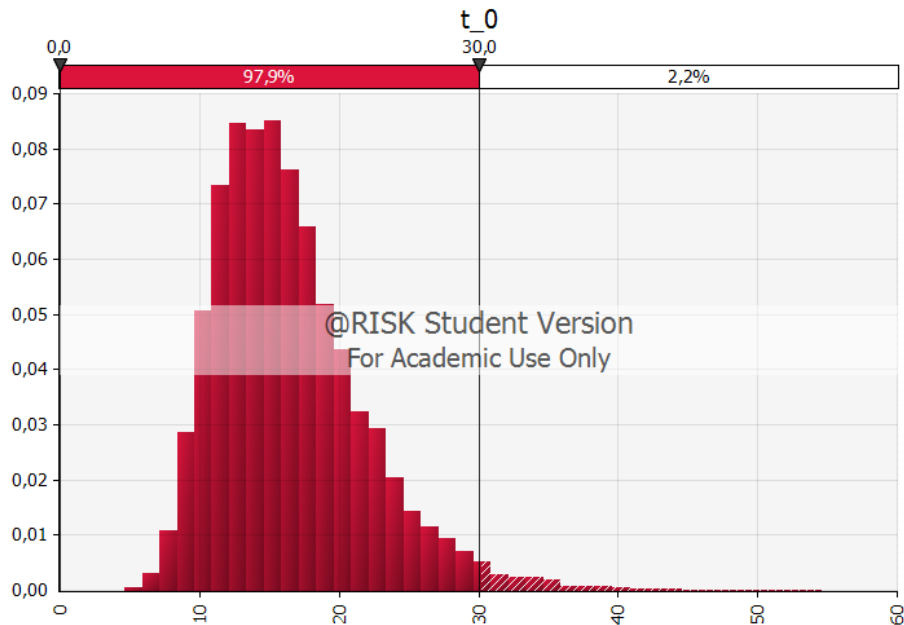
Det ble undersøkt hvor ofte t_0 var lavere enn 30 minutter, for åpningsfaktorer mellom 0,02 m^{1/2} og 0,10 m^{1/2}. Funnet var at ved lave åpningsfaktorer så blir t_0 veldig ofte høyere enn 30 minutter. Eksempelvis kan en se t_0 -verdiene for brannlasten til boliger, når åpningsfaktoren settes lik $O = 0,02$ m^{1/2} i figur 83.



Figur 83 Monte Carlo-simulering av t_0 , med $O=0,02$

Med en så lav åpningsfaktor så blir t_0 langt høyere enn 30 minutter, og simuleringen viser at med våre forutsetninger blir t_0 høyere enn 30 minutter 100 % av gangene. Dersom det benyttes

større åpningsfaktorer blir brannen ofte intens og kortvarig, og figur 84 viser t_0 -verdiene når det benyttes en åpningsfaktor på $0,10 \text{ m}^{1/2}$.



Figur 84 Monte Carlo-simulering av t_0 med $O=0,10$

Med $O = 0,10 \text{ m}^2$ er t_0 lavere enn 30 minutter i 97,9 % av alle tilfellene. Videre er det presentert i tabell 53 hvilke resultater som ble oppnådd med de ulike åpningsfaktorene.

Tabell 52 Hvor ofte $t_0 < 30$, for ulike åpningsfaktorer. Boliger.

Brannlast for boliger	
Åpningsfaktor [$\text{m}^{1/2}$]	Prosentvis andel når $t_0 < 30 \text{ min}$
0,02	0,0 %
0,03	3,4 %
0,04	19,5 %
0,05	44,9 %
0,06	67,5 %
0,07	82,5 %
0,08	91,0 %
0,09	95,5 %
0,10	97,9 %

Dette kan gjøres med brannlasten for kontorer i henhold til Eurokoden, og da fås resultatene som er presentert i tabell 54.

Tabell 53 Hvor ofte $t_0 < 30$, for ulike åpningsfaktorer. Kontorer.

Brannlast for kontorer	
Åpningsfaktor [m^{1/2}]	Prosentvis andel når $t_0 < 30$ min
0,02	13,5 %
0,03	59,0 %
0,04	86,7 %
0,05	96,3 %
0,06	98,9 %
0,07	99,8 %
0,08	99,9 %
0,09	100 %
0,10	100 %

Diskusjon

Ved å bruke Monte Carlo som verktøy for å undersøke variasjoner i forkullingsrate, -dybde og –varighet kan en undersøke hvor store variasjoner en får i resultatene. Jo mer en vet om rommet og materialene, jo mindre trenger en å variere på parameterne. Dette fører til mindre variasjoner i resultatene.

Beregningsmodellene som brukes er det som er oppgitt i Eurokoden. Fordelen ved å bruke Eurokoden er at det er kjente verktøy som benyttes internasjonalt. Ulempen er at det er en forenkling til virkeligheten, og det vil være usikkerheter knyttet til hva forkullingsraten vil være avhengig av type treverk, fuktinnhold mm. Sensitivitetsanalysen kan benyttes for å se hva 95 %-fraktilen viser, for da vil en være på sikker side.

I første gang ble det undersøkt hva den parametriske forkullingsraten ville være for analysebyggverket, med varierende åpningsarealer og med en brannlast for boliger. Analyserommet har et gulvareal på 20 m² og åpningsarealene varierer mellom 1,5 m² og 4,2 m², med vindushøyder som varierer mellom 1,25 m og 1,75 m. Dette vil si at åpningsfaktoren varierer mellom 0,019 m^{1/2} og 0,062 m^{1/2}. Resultatet varierer mellom 0,717 mm/min og 1,080 mm/min. Tallene virker realistiske og er ikke for ekstreme, sammenlignet med de nominelle forkullingsratene.

Videre blir forkullingsdybden undersøkt. Det samme rommet og brannlasten blir brukt, men nå varieres åpningsfaktoren mellom 0,02 m^{1/2} og 0,08 m^{1/2}. For lav åpningsfaktor ser en at variasjonen mellom nedre og øvre verdi blir ganske høy, og variasjonen minker for høyere

åpningsfaktor. Grunnen til at en får større variasjoner er fordi den gumbel-fordelte brannlasten som er oppgitt i Eurokoden blir brukt, og denne har i utgangspunktet ganske stor variasjon og dermed blir resultatene tilsvarende. Ved å undersøke forkullingsrate og –dybde for ulike åpningsfaktorer, kan dette brukes som en pekepinn for hvilke romgeometrier som bør benyttes. Dette er en av grunnene til at brannrådgiver bør inkluderes tidlig i prosjekteringsfasen.

Til slutt undersøkes varigheten av forkullingen. Modellen er laget i samsvar med den parametriske temperatur-tidkurven og den benytter de samme parameterne. Denne måten å bruke Monte Carlo på viser ikke en nedre- og øvre verdi, men heller hvor ofte treet vil forkulle i mindre enn totalt 90 minutter. Fordelen med denne metoden å regne ut varigheten er at det er en enkel modell med få inputparametere, og det er ikke en kompleks prosess for å undersøke hvilke åpningsfaktorer og brannlaster som gir ulike forkullingsvarigheter. Ulempen er at Eurokodens verktøy for beregning av temperatur-tid og forkullingsforløp antar at brannen vil nå en avkjølingsfase etter at inventaret er brent opp. For byggverk med bærekonstruksjon av tre som er eksponert i leiligheten er det mulighet for at treverket fortsetter å brenne til tross for at det brennbare inventaret er brent opp. Høye åpningsfaktorer resulterer i intense og korte brannforløp, men dette vil også øke sannsynligheten for at det brennbare, eksponerte bæresystemet vil fortsette å brenne.

Diskusjon

Det ble utført to caser hvor inkluderingen av forkullet treverk som brannlast ble gjort ved itereringer. I første case ble det undersøkt for et rom med massivtre i vegger, tak og gulv. Til tross for at det var beskyttet med to lag normalgips, så var det stor andel av overflatene som forkullet som videre førte til veldig høy brannlast. Denne temperatur-tidkurven konvergente ikke. Den høye brannlasten førte til at brannforløpet ble veldig langt ved neste iterering, og resultatene virket ikke særlig realistiske. I neste case ble det samme undersøkt for et rom med eksponert bjelke-søyle-system, som er betydelig mindre eksponert tre enn en branncelle med overflater av massivtre. Denne temperatur-tidkurven konvergerer til slutt, og på denne måten kan en se hvor mye brannforløpet endrer seg ved bruk av brennbare bærekonstruksjoner. Underveis i beregningene overgås begrensningen om at t_0 skal være mindre enn 40 minutter, som er tiden med konstant forkullingsrate. Jo høyere brannlasten blir, jo større er sannsynligheten for at begrensningen overgås. Begrensningen ble oversett i begge casene, og dette gjør at resultatet blir mindre pålitelig enn om alle beregningene hadde vært innenfor begrensningene. I virkeligheten er det en mulighet for at den bærende trekonstruksjonen fortsetter å brenne selv etter at det brennbare inventaret har brent opp, da det vil få tilgang til oksygen gjennom knuste vinduer. Det er også mulig at brannen slukker siden temperaturen vil synke når det brennbare inventaret har brent opp, og brannen kan kreve en ekstern varmekilde for å opprettholdes.

Videre undersøkes temperatur-tidkurver og forkulling ved bruk av Monte Carlo-simuleringer. For modellering av temperatur-tidkurver ble det valgt å undersøke variasjoner i resultatet ved å variere på gulvarealet, åpningsarealet, vindushøyden, termisk absorpsjonsevne og brannlast. Her tas det ikke hensyn til hva bæresystemet er bygget opp av. Videre ble Monte Carlo brukt for forkullingsrate og -dybde, hvor det varieres på både brannlast og åpningsfaktor. Alle resultatene en får ut avhenger direkte av hva en velger av verdier og sannsynlighetsfordelinger for de aktuelle parameterne, så dette er en viktig del av arbeidet. I casene var hensikten å undersøke sensitiviteten, og noen av fordelingene har store variasjoner, andre har mindre. Jo mer informasjon en har om bygget som skal analyseres, jo smalere fordelinger kan velges for romgeometrier og åpninger som videre fører til mindre variasjoner i resultatene. Det ble også brukt en del uniforme og diskrete fordelinger, men for de termiske egenskapene til omhyllende bygningsdeler er det hensiktsmessig med eksempelvis normalfordelinger. Leverandøren kan oppgi forkullingsrate for sine produkter, men ved å ta hensyn til variasjoner i materialeegenskapene kan en gjøre analyser i tidlig fase selv før leverandør er valgt. Romgeometrien og åpningsstørrelsene for et bestemt rom vil ikke forandre seg, men ved å vurdere sannsynlighetsfordeling for disse kan en gjøre beregninger for hele bygget. Eksempler kan være variasjon på størrelse av leiligheter og rom eller om dører står åpne eller om de er lukket.

Konklusjon

Høye trehus på 5 etasjer eller mer tilhører brannklasse 3, og dersom en følger de preaksepterte ytelsene i VTEK skal konstruksjonen ha et ubrennbart bæresystem med en brannmotstand på 90 minutter. Forskriften sier at konstruksjonen skal kunne opprettholde bæreevne og stabilitet gjennom et fullstendig brannforløp, slik dette kan modelleres. Dersom en kan dokumentere at forskriftskravet er tilfredsstillt gjennom analytisk prosjektering behøver en ikke å følge de preaksepterte ytelsene. I oppgaven undersøkes modelleringen av fullstendig brannforløp. Det var valgt å bruke Eurokoden da det er internasjonalt kjente modeller, og det er ønskelig å undersøke om disse er anvendelige på høye trehus med brennbare og eksponerte bærekonstruksjoner.

Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve benyttes for å undersøke fullstendig brannforløp, men modellen har noen begrensninger i forhold til branncellestørrelse, termiske egenskaper til materialer, åpninger og brannlast. Dette gjør at modellen ikke alltid er anvendelig. Den er også basert på at temperaturen er uniform i hele rommet, noe som gjør at resultatet ikke nødvendigvis stemmer for brannceller med komplekse geometrier. For høyhus i tre med eksponert treverk inne vil treverket forkulle, og den parametriske temperatur-tidkurven tar ikke hensyn til den ekstra brannlasten som vil oppstå.

For å ta hensyn til den ekstra brannlasten fra forkullet treverk er det gjort manuelle itereringer hvor det forkullede treverket inkluderes som brannlast. Eurokodens parametriske forkullingsberegning har en begrensning til perioden med konstant forkullingsrate. Denne avhenger av både brannlast og åpningsfaktor, og ved itereringer hvor forkullet treverk inkluderes som brannlast kan begrensningen overgås. Dersom dette overses kan itereringene gjøres, men resultatene vil være mindre pålitelige. Det ble gjort manuelle itereringer for både et rom med eksponerte massivtreoverflater ikledd gips og for et rom med eksponerte limtresøyler og -bjelker. Det var kun kurven til rommet med limtresøyler og -bjelker som konvergente, da det ikke var like mye eksponert treverk som i rommet med massivtreoverflater.

Videre undersøkes hvordan en kan anvende probabilistiske metoder for beregninger av både temperatur-tidkurve og forkulling. Den probabilistiske metoden som ble brukt var Monte Carlo, og hensikten var både å undersøke sensitiviteten av de respektive parameterne og for å undersøke Monte Carlo-verktøyet og hvordan dette kan benyttes i brannsikkerhetssammenheng. Ved beregninger av brannforløp er Monte Carlo et nyttig verktøy, da branner er uforutsigbare og alle rom er forskjellige. Monte Carlo-simuleringer tillater implementering av sannsynlighetsfordelinger for parametere, og dette er gunstig da eurokoden presenterer gumbelfordelte brannlaster for ulike typer bruk av bygg. En kan også implementere diskrete fordelinger, uniforme fordelinger eller konstruere egne fordelinger dersom dette er fordelaktig. Verktøyet kan brukes for å gjøre probabilistiske sensitivitetsanalyser ved å variere på én eller flere parametere, og resultatet blir fremstilt som en fordeling. Med fordelingen kan en trekke ut nedre verdi, gjennomsnitt, øvre verdi eller hvilken som helst fraktil. Dette kan videre brukes eksempelvis for modellering av parametriske temperatur-tidkurver.

Parametere som ble undersøkt med Monte Carlo-simuleringer var gulvareal, åpningsareal, vindushøyder, termisk absorpsjonsevne og brannlast. Det som gir størst utslag ved sensitivitetsanalyse er de parametrene som inngår i åpningsfaktoren, det vil si gulvareal, åpningsareal og vindushøyde. Variasjoner i brannlast gir også store utslag siden gumbelfordelingene utgjør et stort spenn av størrelse på brannlast. Ved å benytte brannlast for kontorer får en betydelig kortere brannforløp enn for boliger, og dette åpner for muligheter ved bygging av kontorbygg. For varierende termisk absorpsjonsevne er konsekvensene relativt små.

Videre arbeid

Som forslag til videre arbeid er det interessant å undersøke usikkerhetene som har vært aktuelle i denne oppgaven. I tillegg åpner bruken av probabilistisk metode for mange muligheter innen brannsikkerhet. Videre er forslag til videre arbeid presentert.

Hva skjer med brannforløpet i trekonstruksjoner når alt inventaret er brent opp?

- Her kan det gjøres litteraturstudie hvor det sees på faktiske storskalaforsøk. Stor åpningsfaktor resulterer i intense og korte temperatur-tidkurver, men gjelder dette også for brannceller med eksponert treverk?

Hvilke andre metoder finnes for beregning av temperatur-tidkurve, og hvor gode er disse i forhold til Eurokodens parametriske temperatur-tidkurve?

- Det finnes ulike metoder for beregning av brannforløp, og et eksempel er BFD-kurven. Det hadde vært interessant å sammenligne Eurokodens beregninger, BFD-kurven og brannforløpet for en storskala branntest. Dersom det benyttes andre beregningsmodeller for temperatur-tid er det videre interessant å undersøke hvordan disse kan knyttes opp mot forkullingsrate.

Hvor stor forskjell utgjør forslagene til modifiseringer av Eurokodens temperatur-tidkurve?

- Det hadde vært interessant å undersøke variasjonen i resultatet ved bruk av de foreslåtte modifiseringene. Videre kan resultatene sammenlignes med resultater fra andre branntester.

Ved beregning av dimensjonerende brannlast benyttes en faktor δ_n som avhenger av aktive brannsikringstiltak. Denne er anbefalt å settes lik 1,0 i Norge, men ved brannteknisk analyse kan det benyttes verdier helt ned til 0,6 ved bruk av automatiske vannslukkesystemer, så lenge valgt verdi inngår som en del av brannsikkerhetsstrategien for byggverket. Når kan denne faktoren benyttes og settes lik 0,6?

- Dette bør undersøkes nærmere. Dersom det hadde vært mulig å benytte $\delta_n = 0,6$ så blir den dimensjonerende brannlasten 60 % av den opprinnelige mengden, og dette kan føre til store differanser ved modellering av brannforløpet.

Kan Monte Carlo anvendes til andre beregninger innen brannsikkerhet som gir verdi for brannrådgiveren?

- Det har hovedsakelig blitt gjort sensitivitetsanalyser av temperatur-tidkurven med Monte Carlo i denne oppgaven. Hvilke andre beregningsmodeller kan undersøkes med Monte Carlo?

Termisk absorpsjonsevne har blitt valgt forenklet i denne oppgaven. Det bør gjøres litteraturstudium for å undersøke densitet, spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne for typiske materialer som blir brukt til vegger, gulv og tak, og hvilke variasjoner disse kan ha.

Referanser

1. TreetSameie, *Treet Prospekt*.
2. R. B. Abrahamsen, K.A.M., *Structural design and assembly of «Treet» - A 14-storey timber residential building in Norway*. 2014.
3. Commission, E., *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings* 2010: p. 1.
4. DirektoratetForByggkvalitet, *Byggteknisk forskrift (TEK17) § 11-4. Bæreevne og stabilitet* 2017.
5. Sweco, *Rapport: Fullstendig brannforløp i limtrekonstruksjoner. Vurdering av resultater fra branntest* 2017.
6. StandardNorge, *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner. Del 1-2: Allmenne laster. Laster på konstruksjoner ved brann*. . 2002.
7. StandardNorge, *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. 2004.
8. DirektoratetForByggkvalitet, *Byggteknisk Forskrift (TEK17) § 11-2. Risikoklasser*. 2017.
9. DirektoratetForByggkvalitet, *Byggteknisk Forskrift (TEK17) § 11-3. Brannklasser*. 2017.
10. Treteknisk, *Trebaserte konstruksjonselementer*. 2011.
11. Moelven. *Massivtre*. 2018; Available from: <http://www.moelven.com/no/Produkter-og-tjenester/Limtre-og-Kerto/Massivtre/>.
12. Treteknisk, *Massivtre*. 2008.
13. Trondheim, S.i., *Moholt 50/50 Tun og Tårn*.

14. TekniskUkeblad. *Tre som byggemateriale: Boligblokk i tre tok halvparten så lang tid å bygge som «naboblokka» i betong*. 2015; Available from:
<https://www.tu.no/artikler/boligblokk-i-tre-tok-halvparten-sa-lang-tid-a-bygge-som-naboblokka-i-betong/276082>.
15. StandardNorge, *NS-EN 386:2001 Limtre - Ytelseskrav og minstekrav til produksjon*. 2001.
16. Byggmakker. *Limtre: Furu 90X200 Trykkimp Limtre*. 2018.
17. Parker, D., *Structural timber: Technical growth pays off*. 2014.
18. Etat, S.B., *HO-3/2007. Rettledning for tilsyn i byggesaker. Prosjektering - brannsikkerhetsstrategi. Temarettledning*. 2007.
19. Standards, B., *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 7: Probabilistic risk assessment*. 2003.
20. Salem, A.M., *Use of Monte Carlo Simulation to assess uncertainties in fire consequence calculation*. 2016.
21. Buchanan, A.H., *Structural Design for Fire Safety*. 2002.
22. Sweden, S.T.R.I.o., *Fire Safety in Timber Buildings. Technical Guideline for Europe*. 2010.
23. C. Maraveas, Y.C.W., T. Swailes, *Reliability based determination of material partial safety factors for cast iron beams in jack arched construction exposed to standard and natural fires*. 2017.
24. Franssen, J.-M., *Improvement of the Parametric Fire of Eurocode 1 based on Experimental Test Results*. 2000.
25. McGregor, C.J., *Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires*. 2013.
26. Roger Feasey, A.B., *Post-flashover fires for structural design*. 2002.

27. Barnett, C.R., *BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures*. 2002.
28. Paulo B. Cachim, J.-M.F., *Assessment of Eurocode 5 Charring Rate Calculation Methods*. 2008.
29. Birgit Östman, J.K., Joachim Schmid, *Brandsäkra trähus*. Vol. 3. 2012.
30. Daniel Brandon, B.Ö., *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings - Phase 2: Task 1 - Literature Review*. 2016.
31. Espen Daaland Wormdahl, K.H., Anne Steen-Hansen, Greg Baker, Mette Kristin Ulfsnes, *Brannsikkerhet i bygg med massivtre*. 2017.
32. Hox, K., *Branntest av massivtre*. 2015.
33. KLH, *Cross-Laminated Timber*. 2012.
34. Friquin, K.L., *Charring Rates for Cross-Laminated Timber Panels Exposed to Standard and Parametric Fires*. 2015.
35. A. Law, R.H., *Burnout Means Burnout*. 2017.
36. NorskeLimtreprodusentersForening, *Limtreboka*. 2015. **II**.
37. Project, L.d.V.P., *Implementation of Eurocodes Handbook 5 - Design of Buildings for the Fire Situation*. 2005.
38. Mjøstårnet, *Prospekt*.
39. Structurlam, *Crosslam CLT Technical Design Guide*. 2016.
40. Moelven, *Tekniske data - Limtre fra Moelven Limtre*.
41. K. A. Malo, R.B.A., M. A. Bjertnæs, *Some structural design issues of the 14-storey timber framed building «Treet» in Norway*. 2016.
42. Frangi, A., *Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building*. 2008.
43. Ocran, N., *Fire Loads and Design Fires for Mid-Rise Buildings*. 2012.

44. Bwalya, A.C., *An Extended Survey of Combustible Contents in Canadian Residential Living Rooms*. 2004.
45. Bwalya, A.C., *Survey Results of Combustible Contents and Floor Areas in Multi-family Dwellings*. 2008.
46. O. Vassart, L.G.C., M. Brasseur, *Thermal & Mechanical Actions*. 2005.