



Høgskulen på Vestlandet

Master Thesis

ING5002

Predefinert informasjon

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

Deltaker

Navn:	Åge Mikael Hjellevad
Kandidatnr.:	14
HVL-id:	230648@hvl.no

Informasjon fra deltaker

Tittel *:	Bruk av tremateriale som passiv brannbeskyttelse av bærende stålkonstruksjoner		
Engelsk tittel *:	Use of wooden material as passive fire protection of load-bearing steel systems		
Tro- og lovetilsvarende *:	Ja	Inneholder besvarelsen konfidensiell materiale?:	Nei
Jeg bekrefter at jeg har registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:	Ja		

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min *

Ja

BRUK AV TREMATERIALE SOM PASSIV BRANNBESKYTTELSE AV BÆRENDE STÅLKONSTRUKSJONER



Åge Mikael Hjellestad
Høgskulen på Vestlandet
Masteroppgave i Brannsikkerhet

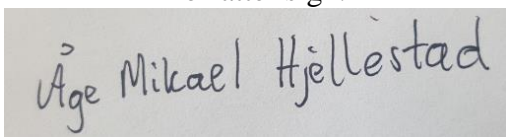
Haugesund
Juni 2018



Høgskulen
på Vestlandet

Bruk av tremateriale som passiv brannbeskyttelse av bærende stålkonstruksjoner

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Åge Mikael Hjellevstad	Forfatter sign. 
Oppgaven uttatt: Høst/Vår 2017/2018	Åpen oppgave
Veileder: Bjarne Christian Hagen Ekstern veileder:	
Stikk ord: passiv brannbeskyttelse, stålkonstruksjoner, lastbærende evne, konstruksjonsvirke, forkulling,	Antall sider: 90 + Vedlegg: 10 Haugesund, 01.06.2018 Sted/Dato/År
Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.	

Forord

Denne oppgaven er en avslutning av masterstudiet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven har et omfang på 60 studiepoeng, og har blitt gjennomført høsten 2017 og våren 2018. Ideen til oppgaven har oppstått etter personlig erfaring med den aktuelle problemstillingen gjennom flere års erfaring med praktisk arbeid i bygg- og anleggssektoren.

Det har vært interessant å gå dypt inn i en problemstilling i forhold til en utfordring det er gjort veldig lite undersøkelser rundt tidligere. Året har vært veldig spennende og lærerikt, spesielt kan her planleggingen og gjennomføringen av det praktiske forsøket nevnes. Dette bød på mange nye utfordringer, men endte etter hvert bra.

Jeg vil takke min veileder ved Høgskulen på Vestlandet, Bjarne Christian Hagen, for god hjelp med oppgaveskrivingen, støtte og tips. I tillegg vil jeg takke Arjen Kraaijeveld og Odd Schive Kiperberg for å holde meg under oppsyn under de praktiske forsøkene, samt Fønix Brannsikring ved daglig leder Helge Bauge og Monter Haugesund for lån av utstyr og sponsing av materiell. Til slutt vil jeg takke familie og venner for god støtte og oppmuntring underveis i prosessen.

Haugesund, mai 2018

Åge Mikael Hjellevad

Sammendrag

Hensikten med denne masteroppgaven har vært å undersøke hvilken brannmotstand som kan oppnås for bærende konstruksjoner av stål, dersom det benyttes trematerialer som passiv brannbeskyttelse av slike komponenter.

Bærende hovedsystem i større bygninger, som leilighetskompleks og næringsbygg, utføres ofte i stål. Eksponert for brann vil stålets bæreevne svekkes allerede etter kun kort tid, og det må derfor beskyttes ved hjelp av et passivt brannsikringssystem for å forhindre at dette skjer. Dette gjøres normalt ved bruk av hardpressede steinullsplater. Søylor og bjelker blir ofte integrert i en løsning bestående av utfyllende bindingsverk av tre, lokalisert i bygningenes vegger. Av ulike grunner kan det i enkelte tilfeller være ønskelig å montere komponenter av det utfyllende bindingsverket, som sviller og stendere, direkte mot deler av stålkonstruksjonen, uten et mellomliggende lag av brannisolasjon, og det er dette som danner grunnlaget for den overordnede problemstillingen.

Det har blitt gjennomført litteraturstudie for å undersøke hvilket arbeid som er gjort i forhold til denne utfordringen tidligere, samt å identifisere relevante krav og regler i forhold til denne problemstillingen. Dette arbeidet har avdekket at det er svært lite litteratur tilgjengelig i forhold til dette temaet, og at det absolutt er en utfordring som bør undersøkes videre.

Det har også blitt gjennomført praktiske forsøk for å se hvilken brannmotstand en stålbjelke kan oppnå, dersom det benyttes konstruksjonsvirke som passiv brannbeskyttelse på undersiden av denne. Resultatet av forsøkene viste at et 30-minutters krav kan tilfredsstilles med god sikkerhetsmargin, her ga også trematerialet bedre resultat enn for tilsvarende forsøk med bruk av hardpressede steinullsplater. Det ble også konkludert med at et 60-minutters krav tilfredsstilles, men her var det adskillig mindre sikkerhetsmargin, og flere parametere måtte vurderes nøye før denne slutningen kunne trekkes.

Det må bemerkes at denne oppgaven kun bør regnes som et forprosjekt i forhold til videre arbeid og undersøkelser i forhold til denne problemstillingen. I slutten av oppgaven beskrives forslag til videre arbeid.

Abstract

The purpose of this master thesis has been to investigate which fire resistance that can be obtained for load-bearing steel systems, if wood materials are used as passive fire protection of such components.

Load-bearing systems in larger buildings, such as apartment complex and commercial buildings, are often made in steel. Exposed to fire, the load bearing capacity of the steel will be reduced after only a short period of time, and steel must therefore be protected by a passive fire protection system to prevent this to happen. This is usually done by using hard-pressed boards of rockwool. Columns and beams are often located in the walls of the building, integrated in a solution which also consists of a wooden frame. For various reasons, it may be desirable to assemble components of the wooden frame directly to parts of the load-bearing steel system, without an intermediate layer of fire insulation, and this forms the basis for the overall problem investigated in this study.

A literature study has been conducted to investigate what previous work has been done in relation to this challenge, and to identify relevant requirements and rules in relation to this issue. This work has revealed that there is very little literature available in relation to this topic, and that it is certainly a challenge that should be investigated further.

Practical experiments have also been made to see what fire resistance a steel beam can achieve if frames of softwood are used as passive fire protection on the underside of this. The results of the experiments showed not only that a 30-minute load-bearing requirement could be satisfied with a good margin of safety, but the wood material also provided better results than for similar tests with the use of hard-pressed boards of rockwool . It was also concluded that a 60-minute load-bearing requirement was met, but in this situation there was a much smaller margin of safety, and several parameters has to be considered carefully before this solution can be implemented.

It should be noted that this work should only be regarded as a preliminary project in relation to further work and investigations in relation to this issue. At the end of the assignment, suggestions for further work are described.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Bildetekstliste	IX
Definisjoner	XII
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Problemstilling	3
2. Teori	5
2.1. Samvirkekonstruksjon og materiallære	5
2.1.1. Stål som byggemateriale	6
2.1.2. Tre som byggemateriale	11
2.1.3. Betong som byggemateriale	16
2.2. Passiv brannsikring	16
2.2.1. Brannmotstand	17
2.2.2. Passiv brannbeskyttelse av stål	18
2.3. Varmetransport, branneffekt og temperaturanalyse	20
2.3.1. Konduksjon	20
2.3.2. Konveksjon	21
2.3.3. Stråling	21
2.3.4. Branneffekt	22
2.3.5. Temperaturanalyse	22
2.4. Regelverk og standarder	27
2.4.1. Nasjonalt Lovverk	27
2.4.2. Eurokoder	29
3. Eksperimentell metode	31
3.1. Forsøksoppsett	31
3.1.1. Prosjektering av brennkammer	31
3.1.2. Bygging av brennkammer	32
3.1.3. Stålbjelke	34
3.1.4. Prøvestykke	35
3.1.5. Brannkilde	37

3.1.6. Instrumentering.....	39
3.1.7. Samlet oversikt over forsøksoppsett.....	45
3.2. Gjennomføring av forsøk.....	46
3.2.1. Prosedyre.....	47
4. Forkullingsberegninger etter Eurokode 5	50
4.1. Ubeskyttede overflater	50
4.2. Beskyttede overflater.....	52
5. Numeriske beregninger.....	55
6. Resultat.....	57
6.1. Resultater fra forsøket med Conlit som prøvestykke.....	57
6.1.1. Temperatur i brennkammeret	57
6.1.2. Temperatur i stålbjelkens tverrsnitt.....	58
6.2. Resultater fra forsøk med 30 minutters varighet.....	60
6.2.1. Temperatur i brennkammeret	60
6.2.2. Temperatur og forkulling i prøvestykket.....	61
6.2.3. Temperatur i stålbjelke	63
6.3. Resultater fra forsøk med 60 minutters varighet.....	65
6.3.1. Temperatur i brennkammeret	65
6.3.2. Temperatur og forkulling i prøvestykket.....	65
6.3.3. Temperatur i stålbjelke	68
6.4. Forkulling.....	70
6.4.1 Forkulling i ubeskyttet tremateriale.....	70
6.4.2. Forkulling i tremateriale beskyttet av ett lag standard A gips	71
7. Diskusjon	75
8. Konklusjon	83
9. Fremtidig arbeid	85
10. Referanser	87
11. Vedlegg.....	A

Bildetekstliste

Figur 1 Tilslutning mellom utfyllende bindingsverk og bærende konstruksjoner i stål	2
Figur 2 Samvirkekonstruksjon av stål og betong, med utfyllende bindingsverk av tre	5
Figur 3 Spenning/tøyning digram for stål med lav og høy fasthet	7
Figur 4 Bjelkeprofiler	8
Figur 5 Søyleprofiler	8
Figur 6 Spesifikk varmekapasitet stål som funksjon av temperatur	10
Figur 7 Varmeledningsevne stål som funksjon av temperatur	11
Figur 8 Grad av fuktinnhold i trevirkets celler	12
Figur 9 Forkulling av tre	13
Figur 10 Spesifikk varmekapasitet tre som funksjon av temperatur	15
Figur 11 Varmeledningsevne tre som funksjon av temperatur	15
Figur 12 Reduksjonsrate tre for tetthet som funksjon av tid	15
Figur 13 Reduksjonsfaktor for stålets bæreevne som funksjon av temperatur	18
Figur 14 Nominelle temperaturkurver som funksjon av tid	24
Figur 15 Illustrert førsteutkast av eksperimentelt forsøksoppsett	31
Figur 16 Modellert temperatur i brennkammer som funksjon av tid	32
Figur 17 Brennkammer sett forfra og fra siden	33
Figur 18 Utsparinger i brennkammerets bakre vegg	33
Figur 19 Brennkammer under oppføring	34
Figur 20 Lokalisering av hull i bjelkens nedre flens	35
Figur 21 Tverrsnittsskisse av stålbejelke	36
Figur 22 Oppsett klargjort for gjennomføring av forsøk	37
Figur 23 Oppstilling av gassflasker	38
Figur 24 Styringsenhet for mating av gass	38
Figur 25 Lokalisering av gassbrenner i brennkammer	38
Figur 26 Skisse av gassbrenner	39
Figur 27 Gassbrenner i brennkammer	39
Figur 28 Platetermometer	40
Figur 29 Lokalisering av platetermometer (PT) og termoelement (TE) i brennkammer	41
Figur 30 Punktveising av termoelement i stålbejelke	42
Figur 31 Tverrsnittsskisse	42
Figur 32 Lokalisering av termoelementer i bjelkens lengderetning	43
Figur 33 Oversiktsskisse over forsøksoppsett	45
Figur 34 Boring av hull i prøvestykket	47
Figur 35 Liming av termoelementer	47
Figur 36 Permanent innfestet prøvestykke	48
Figur 37 Brennkammer under forsøk	49
Figur 38 En-dimensjonal og nominell forkullingsdybde	52
Figur 39 Utsnitt av regneark konstruert for numeriske beregninger	55
Figur 40 Temperatur som funksjon av tid for forsøk med Conlit	57
Figur 41 Temperatur i stålbejelkens tverrsnitt som funksjon av tid for forsøk med Conlit	58
Figur 42 Beregnede og målte temperaturer som funksjon av tid for for forsøk med Conlit	59

Figur 43 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid under gjennomføring av 30 minutters forsøk.	60
Figur 44 Prøvestykkets underside etter gjennomføring av 30 minutters forsøk	61
Figur 45 Prøvestykkets innfesting etter gjennomføring av 30 minutters forsøk	61
Figur 46 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, 30 minutters forsøk.....	62
Figur 47 Prøvestykkets tverrsnitt etter gjennomført 30 minutters forsøk	63
Figur 48 Temperatur i stålbjelkens tverrsnitt som funksjon av tid, 30 minutters forsøk	64
Figur 49 Temperaturmålinger i bjelkens lengderetning som funksjon av tid, 30 minutters forsøk	64
Figur 50 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, 60 minutters forsøk.....	65
Figur 51 Prøvestykke like etter endt 60 minutters forsøk.....	66
Figur 52 Prøvestykkets innfesting etter gjennomføring av 60 minutters forsøk	66
Figur 53 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, 60 minutters forsøk.....	67
Figur 54 Deler av prøvestykke etter endt 60 minutters forsøk.....	68
Figur 55 Temperatur i stålbjelkens tverrsnitt som funksjon av tid, 60 minutters forsøk	68
Figur 56 Temperaturmålinger i bjelkens lengderetning som funksjon av tid	69
Figur 57 Bakside av prøvestykke etter endt 60 minutters forsøk	71
Figur 58 Forkullingsdybde som funksjon av tid for beskyttet og ubeskyttet konstruksjonsvirke.....	72
Figur 59 Temperatur i prøvestykket for forsøk med beskyttet og ubeskyttet tremateriale.....	72
Figur 60 Kritisk område og forkullingsretning på bakgrunn av teori og forsøk.....	80
Figur 61 Inndatafil FDS	B
Figur 62 Utsnitt av stålbjelkens datablad	C
Figur 63 Utsnitt av Conlit produkt datablad.....	D
Figur 64 Produktdatablad for standard 13 mm A gips	E
Figur 65 Ytelseserklæring for konstruksjonsvirke	F
Figur 66 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min	G
Figur 67 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min	G
Figur 68 Temperatur i stålbjelkens sentertverrsnitt som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min.....	H
Figur 69 Temperatur i stålbjelkens lengderetning som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min.....	H
Figur 70 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min	I
Figur 71 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min	I
Figur 72 Temperatur i stålbjelkens sentertverrsnitt som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min.....	J
Figur 73 Temperatur i stålbjelkens lengderetning som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min.....	J
Tabell 1 Reduksjonsfaktorer ved forhøyet temperatur for spenning-tøyningsforhold for karbonstål.....	9
Tabell 2 Temperaturfaser i forbrenningsprosessen av tre	14
Tabell 3 Ytelser med krav til brannmotstand	17
Tabell 4 Bærende hovedsystems krav til brannmotstand avhengig av brannklasse	18
Tabell 5 Forskrifter som omhandler brann sikkerhet i bygninger	27
Tabell 6 Valgte inndata i Conlit beregningsprogram	35
Tabell 7 Gruppering av prøvestykker	36
Tabell 8 Oversikt over instrumentering.....	43
Tabell 9 Forklaring til oversiktsskisse	46
Tabell 10 Forsøksoversikt med beskrivelse	46
Tabell 11 En-dimensjonal og nominell forkullingshastighet	51

Tabell 12 Grenseskille mellom bruk av endimensjonal og nominell forkullingsrate for ulike dimensjoner av konstruksjonsvirke	51
Tabell 13 Verdier for parametere benyttet i numeriske beregninger	55
Tabell 14 Målte og beregnede verdier i stålbjelkens tverrsnitt ved ulike tidspunkt for forsøk med Conlit	59
Tabell 15 Forkullingshastighet 60 minutters forsøk	67
Tabell 16 Forkullingsberegninger for ubeskyttet tremateriale	70
Tabell 17 Forkullingsresultater fra forsøk med 30 minutters varighet	71
Tabell 18 Forkullingsfrontens posisjon i prøvestykket	73

Definisjoner

Isotropisk materiale	Materiale med like verdier for mekaniske og termiske materialegenskaper i alle retninger.
Svart legeme	Legeme som absorberer alt av lys, og all elektromagnetisk stråling det blir truffet av, uavhengig av frekvens eller innfallsvinkel.
Legering	Kombinasjon av to eller flere grunnstoffer, hvor av minst ett skal være et metall.

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

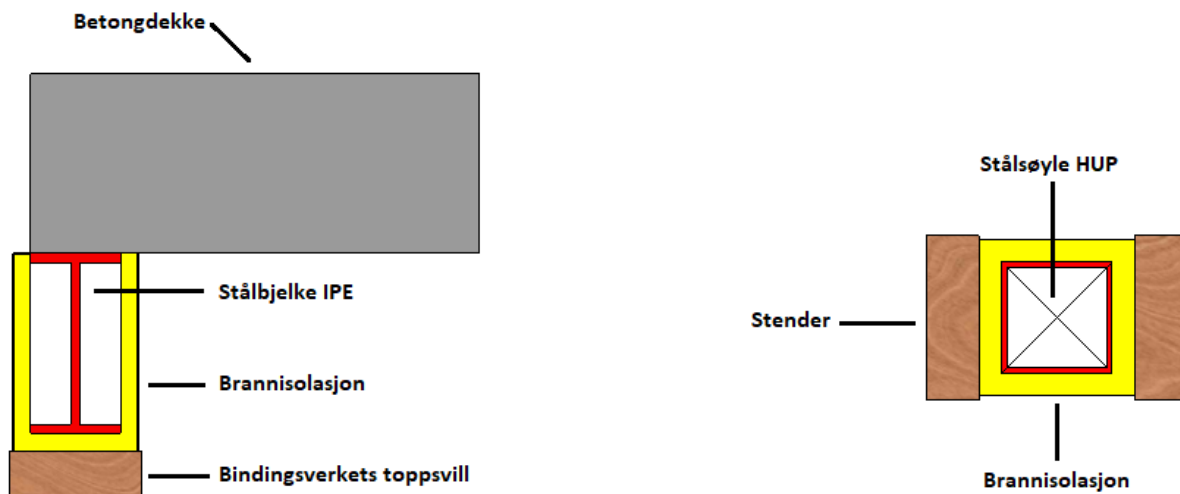
Samvirkekonstruksjoner bestående av betong-, stål- og trematerialer er en byggemetode brukt mye i de senere tiår, spesielt i større bygninger som f.eks. leilighetsbygg og næringsbygg. En typisk konstruksjon består av trapperom, sjakter og etasjeskillere utført i betong, understøttet av stålkonstruksjoner med bærende funksjon. I konstruksjoner hvor etasjeskillere plasstøpes, understøttes disse av stålsøyler som støpes inn i dekket, mens det for etasjeskillere bestående av prefabrikkerte elementer benyttes et system med både søyler og dragere i stål som bærende understøtting av disse. Disse stålkomponentene, som er en del av det bærende hovedsystemet, er ofte lokalisert i bygningens yttersone, og blir dermed integrert i ytterveggene. Søyler som er lokalisert andre steder, blir ofte integrert i skillevegger inne i bygningen.

Bygningsdeler som er en del av bygningens bærende hovedsystem, vil ha et brannmotstandskrav i forhold til sin lastbærende evne. Denne skal opprettholdes i minimum 30, 60 eller 90 minutter, avhengig av bygningens bruk og størrelse. Det kritiske temperaturområdet for de fleste belastede stålkomponenter vil være ved en temperatur på 500 °C, noe avhengig av kapasitetsutnyttelsen, og stålet vil her ha mistet rundt 50 % av bæreevnen. Stålkonstruksjoner som ikke er brannbeskyttet vil vanligvis ikke kunne oppnå en høyere brannmotstand enn 10 til 15 minutter (SINTEF Byggforsk, 2004). For å oppnå tilstrekkelig brannmotstand må stålet derfor brannisoleres ved hjelp av passiv brannbeskyttelse.

Det eksisterer mange ulike løsninger for generell passiv brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner, men siden konstruksjonene det fokuseres på i denne rapporten er omsluttet av utfyllende bindingsverk, reduseres aktuelle løsninger. Løsninger som innpussing med spesialmørtel, eller bruk av brannbeskyttende malinger er ikke gunstige løsninger fordi innpussing med spesialmørtel er tid- og ressurskrevende, og brannbeskyttende maling må kunne ekspandere fritt ved brannpåkjenning, noe som er vanskelig da veggens bindingsverk vil kunne komme i veien. Bruk av gipsplater kan være et bra alternativ, men også dette er et tidkrevende alternativ, med en noe komplisert innfestingsmetode som kan by på utfordringer, og det vil ofte være behov for flere lag for å oppnå tilstrekkelig motstandsevne. En praktisk og mye brukt metode er bruk av hardpressede plater av steinull. Disse platene tilpasses enkelt ved hjelp av kniv eller sag til passende størrelser, og monteres raskt, enten ved punktsveising, eller ved bruk av lim. Platene produseres i ulike tykkelser, og ulike produsenter har utviklet beregningsprogrammer, hvor parametre som f. eks. stålkonstruksjonens dimensjoner legges inn, og man

får utdata i form av nødvendig tykkelse på platene i forhold til gitt brannmotstandskrav. Dette fører til en effektiv prosess fra prosjektering til utførelse, og er derfor en foretrukket løsning.

I Datablad 523.254 Utfyllende bindingsverk (SINTEF Byggforsk, 2007) gis godkjente løsninger for oppbygging av yttervegger med utfyllende bindingsverk i tre. Figur 1 under er inspirert av figurer fra dette databladet og viser henholdsvis til venstre godkjent løsning for tilslutning mellom bindingsverket og betongdekke understøttet av stålbejler, og til høyre hvordan stålsøyler bygges inn i vegger.



Figur 1 Tilslutning mellom utfyllende bindingsverk og bærende konstruksjoner i stål

I løsningen med prefabrickerte elementer hviler disse direkte på toppen av drageren, mens det er brannisolasjon på inn- og utsiden, samt under, mellom drageren og bindingsverkets toppsvill. For søyler beskrives brannisolasjon på fire sider, og eventuelle stender inntil denne. I enkelte tilfeller kan det være et ønske fra utførende tømmer om å montere trematerialer direkte i stålkonstruksjonen, uten et mellomliggende lag bestående av brannisolasjon. På undersiden av dragere kan det være ønskelig å montere bindingsverkets toppsvill direkte i stålet, da man på denne måten vil kunne oppnå en stivere og enklere innfesting. Selv om platene er hardpressede kan de oppleves å være noe porøse. For søyler kan det være plassmangel i f.eks. hjørner som skaper et ønske om å fjerne brannisolasjon på en eller flere sider, og montere stender direkte i stålet.

Med lav forkullingsrate og varmeledningsevne vil trematerialer kunne antas å ha en bra isoleringsevne for bakenforliggende stålkomponenter, som i ovennevnte situasjoner. Trematerialer vil dermed kunne bidra til at konstruksjonen opprettholder sin tiltenkte lastbærende funksjon over et lengre tidsintervall.

1.2. Problemstilling

I denne oppgaven skal det ses på hvordan stålkonstruksjoners brannmotstand påvirkes av at trematerialer monteres direkte på disse, og dermed får isolerende funksjon. Det foretas en litteraturstudie, for å finne ut hva som er gjort med tanke på denne problemstillingen tidligere, og det gjennomføres modellering og forsøk.

2. Teori

2.1. Samvirkekonstruksjon og materiallære

Samvirkekonstruksjoner er en kombinasjon av to eller flere materialer som sammen bidrar til konstruksjonens bæreevne og stivhet, hvor de ulike materialkomponentene knyttes sammen på en slik måte at man får en kostnadseffektiv konstruksjon, med en best mulig utnyttelse av hvert materiales egenskaper. Samvirkekonstruksjoner av stål og betong er en anerkjent konstruksjonsløsning, og det er laget en egen prosjekteringstandard i Eurokodene i forhold til dette. Løsningen er ofte foretrukket i bygninger og broer, og prosjekteringsstandarden fokuseres derfor opp mot dette (Standard Norge, 2004).

I Figur 2 vises en samvirkekonstruksjon bestående av bærende hovedsystem i stål, dekker og trapperom i betong, samt utfyllende bindingsverk oppført i trematerialer. Den bærende stålkonstruksjonen integreres ofte i bygningens vegg-løsninger, og den vil dermed ikke være synlig. Dette vil være lette, ikke-bærende vegger bygget opp av utfyllende bindingsverk med stendere, losholter og topp- og bunnsvill.



Figur 2 Samvirkekonstruksjon av stål og betong, med utfyllende bindingsverk av tre

2.1.1. Stål som byggemateriale

Opp gjennom historien har metaller spilt en viktig rolle, og bruk av stål som byggemateriale har tradisjoner langt tilbake i tid. Den industrielle revolusjon på begynnelsen av 1800-tallet, som ga mulighet for masseproduksjon av jern, samt nye og bedre teknikker for å få smibart stål, førte til at stål virkelig fikk en betydningsfull rolle. Mot slutten av 1800-tallet var det i hovedsak broer som ble bygget i dette materialet, mens det nå til dags i tillegg brukes til konstruksjon av alt fra maskiner og småhus til skyskrapere og oljeplattformer (Arntsen, 2000).

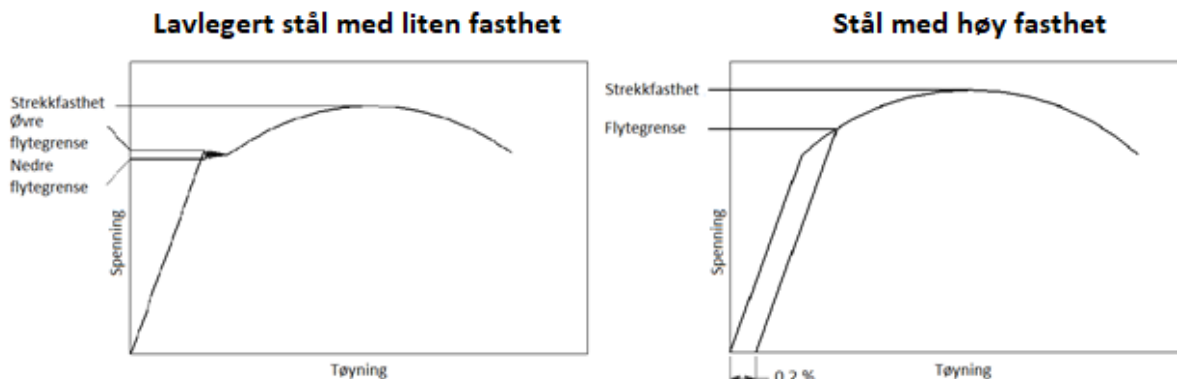
I tillegg til muligheten for masseproduksjon, er mulighetene for å variere produktet en viktig grunn til at stålet har fått en betydningsfull rolle. Ved sammensetning av ulike legeringer og ved egnet varmebehandling, kan egenskapene tilpasses innenfor et stort område. Anvendelsen baseres på kombinasjoner av styrke, form- og sveisbarhet og pris. Bløtt og ulegert stål som mellom annet brukes til konstruksjoner i form av profiler, plater, tråd, blikk og rør står for størstedelen av den totale verdensproduksjonen. Konstruksjonsstål, som kan brukes til søyler og bjelker, stiller større krav til styrke, seighet og sveisbarhet, og står for en vesentlig mindre andel av den totale stålproduksjonen (Almar-Næss & Christensen, 2018).

Materialens egenskaper

Utsatt for en ytre belastning vil stålkomponenter bli deformert. Graden av deformasjon vil være avhengig av størrelsen på belastningen, og det skilles mellom elastisk og plastisk deformasjon. En elastisk deformasjon kan ses på som en midlertidig deformasjon; når belastningen som danner grunnlaget for deformasjonen fjernes, vil komponenten gå tilbake til sin opprinnelige form. En plastisk deformasjon vil derimot medføre en varig deformasjon av komponenten. Overgangen mellom disse fasene kalles materialets flytegrense, og er sammen med bruddgrensen, hvor komponenten brytes i stykker, de viktigste mekaniske materialparametere for konstruksjonsstål (Grøndalen, 2002).

Etter at flytegrensen er nådd vil materialets styrke og hardhet øke på grunn av den plastiske deformasjonen, dette kalles fastning. Som vist i Figur 3, øker spenningen, og maksimalverdien den oppnår øverst på spennings-tøyningskurven kalles materialets strekkfasthet (Arntsen, 2000). I praksis vil dette bety at dersom det skulle oppstå en overbelastning konstruksjonen ikke er dimensjonert for, vil fastningen kunne sørge for at skaden ikke umiddelbart medfører brudd, forutsatt at overbelastningen ikke er altfor stor.

Fasthetsegenskapene vil være av avgjørende betydning når man statisk skal dimensjonere bærende konstruksjoner. De mekaniske materialegenskapene kan oversiktlig presenteres i et spenning/-tøyingsdiagram, og Figur 3 viser dette for lavlegert stål med liten fasthet og stål med høy fasthet og aluminiumslegeringer. For stål med høy fasthet vil det ikke være noen markert flytegrense, og den blir derfor definert som 0,2 % deformasjon i materialet (SINTEF Byggforsk, 2013).



Figur 3 Spenning/tøyning digram for stål med lav og høy fasthet

Konstruksjonsstål

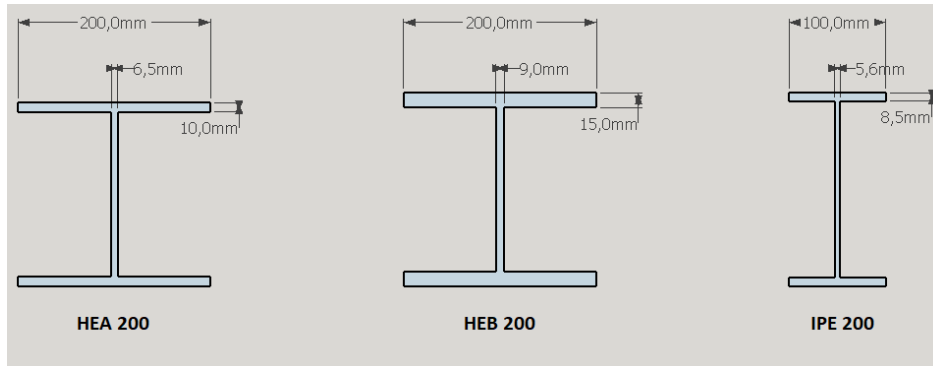
Konstruksjonsstål defineres som sveisbare legeringer av jern og karbon, i tillegg til flere andre legeringstilsetninger. Legeringen vil inneholde elementer som har en gunstig innvirkning på stålets egenskaper, som silisium, mangan, aluminium og krom, men også elementer som vil forringe stål kvaliteten, som fosfor, svovel og nitrogen. Legeringssammensetningen vil dermed være avgjørende i forhold til stålets mekaniske egenskaper, noe som også påvirkes av den termomekaniske bearbeidingen av stålet (Larsen, 2008).

Konstruksjonstål klassifiseres normalt etter flytegrense, og de mest brukte typene i Norge er stål med betegnelser mellom S235 - S460. Bokstavbetegnelsen S angir at det er konstruksjonsstål, mens sifferene bak angir stålets flytespenning i N/mm^2 . For valsede profiler som bjelkeprofiler og plater produseres konstruksjonsstål etter spesifikasjoner i standarden NS-EN 10025:2004 (Standard Norge, 2005).

Profiler av konstruksjonsstål

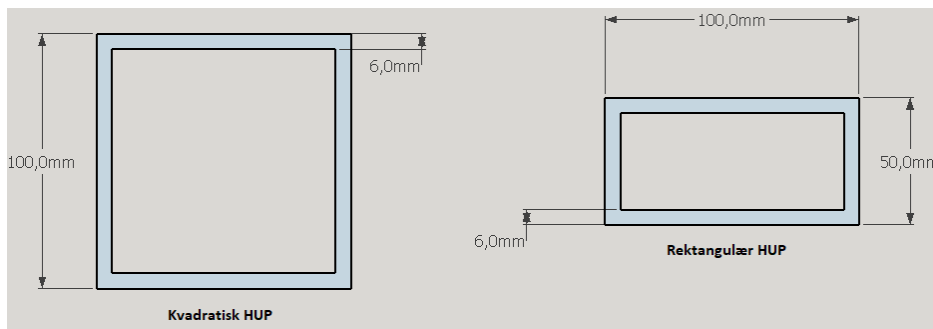
Valsede produkter av konstruksjonsstål som plater, rør og bjelkeprofiler leveres standardisert etter mellom annet dimensjonering, geometrisk form og toleranse. Stålbjelker kategoriseres etter utformingen av tverrsnittets areal, hvor de ulike typene er tilpasset ulike krav og behov. De mest brukte bjelketypene i bærende konstruksjoner er symmetriske profiler bygget opp med to flenser og et steg, hvor den øvre flensen belastes med trykkrefter, og den nedre flensen med strekkrefter. Disse profilene

går under betegnelsene HEA, HEB og IPE, som vist i Figur 4. Hver profiltipe finnes videre i mange ulike dimensjoner, hvor valg av type vil være avhengig av belastningen stålbejlen skal tåle å bli utsatt for (Arntsen, 2000).



Figur 4 Bjelkeprofiler

HEA- og HEB-bjelkene er bredflensede profiler med en utforming som minner om en liggende H. Forskjellen på disse er at HEA er en lettere profil, med mindre godstykkelse både i steg og flenser, enn den noe mer kompakte og tyngre HEB profilen. IPE profilen har middels brede flenser, i tillegg til en lav godstykkelse både i steg og flenser (Arntsen, 2000).



Figur 5 Søyleprofiler

H-bjelker kan også brukes som søyler med bærende formål, men det er langt vanligere å bruke hulprofiler til dette formålet. De ulike typer hulprofiler er vist i Figur 5, og kommer i standardiserte dimensjoner, med mulighet for å velge godstykkelse, som kan velges utifra prosjektert belastning (Arntsen, 2000).

Stålets branntekniske egenskaper

Alle interessante materialegenskaper for stål, som flytegrense, bruddgrense, varmeutvidelseskoeffisient, spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne er temperaturavhengige. Det eneste unntaket er massetettheten (Kodur & Harmathy, 2016).

Kritisk temperatur, hvor stålkomponentens fasthet om lag er halvert, er en parameter som brukes mye når bærende stålkonstruksjoner skal prosjekteres. SINTEF Byggforsk angir denne temperaturen til å være 500 °C i datablad 520.315 Brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner (SINTEF Byggforsk, 2004), mens amerikanske standarder oppgir en verdi på 538 °C for konstruksjonsstål (Kodur & Harmathy, 2016). Ved bruk av reduksjonsfaktor for helning av elastisk område, og interpolering av oppgitte verdier i Eurokode 4, kommer man frem til reduksjonsfaktor på 0,5 ved 534 °C (Standard Norge, 2009).

Temperaturøkningen i en stålkomponent vil være avhengig av forholdet mellom arealet som blir eksponert, og komponentens volum. Kritisk temperaturnivå for en ubeskyttet stålkomponent vil oppnås raskt i en brann, og det vil derfor være behov for bruk av et beskyttelsessystem. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 2.2. som omhandler passiv brannsikring (SINTEF Byggforsk, 2004).

For å bestemme endringene i fasthets- og deformasjonsegenskapene kan reduksjonsfaktorene for spennings- tøyingsforholdet gitt i Tabell 1 benyttes for å beregne de nye materialverdiene.

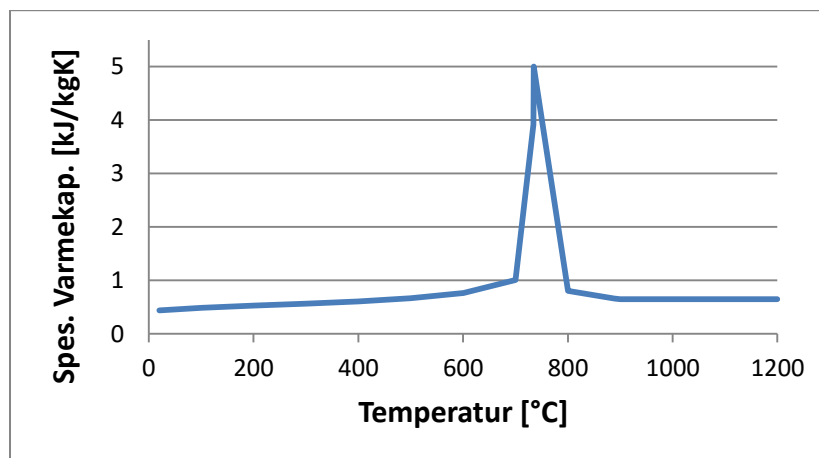
Reduksjonsfaktorene beskriver forholdstallet mellom verdi ved opphøyet temperatur, og verdi ved standard omgivelsestemperatur på 20 °C (Standard Norge, 2009).

Tabell 1 Reduksjonsfaktorer ved forhøyet temperatur for spenning-tøyingsforhold for karbonstål

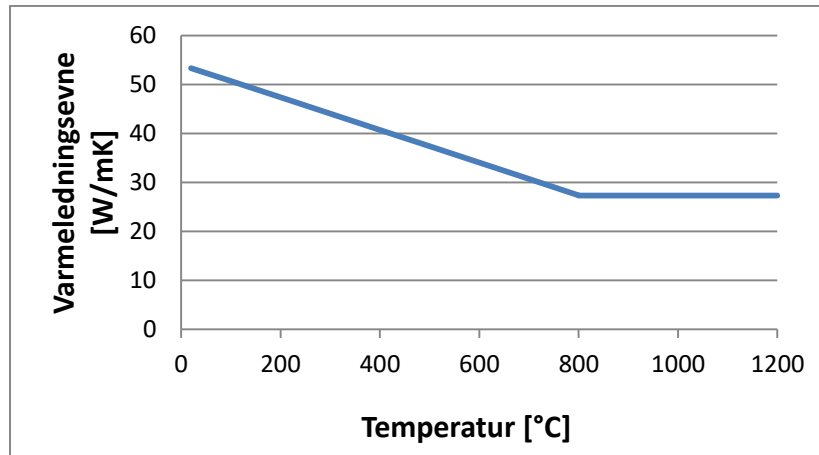
Ståltemperatur [°C]	Reduksjonsfaktor for effektiv flytegrense	Reduksjonsfaktor for proporsjonalitetsgrense	Reduksjonsfaktor for helningen av elastisk område
θ_a	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$K_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1	1	1
100	1	1	1
200	1	0,807	0,9
300	1	0,613	0,8

400	1	0,42	0,7
500	0,78	0,36	0,6
600	0,47	0,180	0,31
700	0,23	0,075	0,13
800	0,11	0,05	0,09
900	0,06	0,0375	0,0675
1000	0,04	0,025	0,045
1100	0,02	0,0125	0,0225
1200	0	0	0

Andre termiske temperaturavhengige egenskaper for karbonstål, som spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne, er i branttillegget i Eurokode 3 beskrevet ved hjelp av formler for ulike temperaturintervaller. Disse er lagt til grunn for utviklingen av Figur 6 og Figur 7 som beskriver spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevne for stål som funksjon av tid.



Figur 6 Spesifikk varmekapasitet stål som funksjon av temperatur



Figur 7 Varmeledningsevne stål som funksjon av temperatur

2.1.2. Tre som byggemateriale

Bruk av tre som byggemateriale har lange tradisjoner i Norge, sannsynligvis mye grunnet god tilgang på råmaterialer, da rundt 20 % av landets areal er produktiv skog (Hoen, 2018). I tillegg er råmaterialet lett å bearbeide, og det har høy styrke i forhold til egenvekten. I nyere tid har i tillegg miljøhensynet dannet et grunnlag for økt bruk av bærekraftige materialer. I en temaartikkel publisert av Landbruks- og matdepartementet i mars 2018, påpekes det at tre er et fornybart og klimavennlig råmateriale, som det stadig oppleves en økende etterspørsel etter. Departementet har et mål om å øke bruken av tre for å erstatte material som anses som mer klimaskadelige, og har en visjon om at Norge skal være et foregangsland når det kommer til verdiskapende foredling, samt å utvikle nye bruksområde for trevirke i byggebransjen. For å stimulere til dette finansierer styresmaktene utviklingsprosjekter, og alle bedrifter som arbeider for å øke bruken av tre har mulighet for å søke om tilskudd i forbindelse med dette (Landbruks- og matdepartementet, 2018).

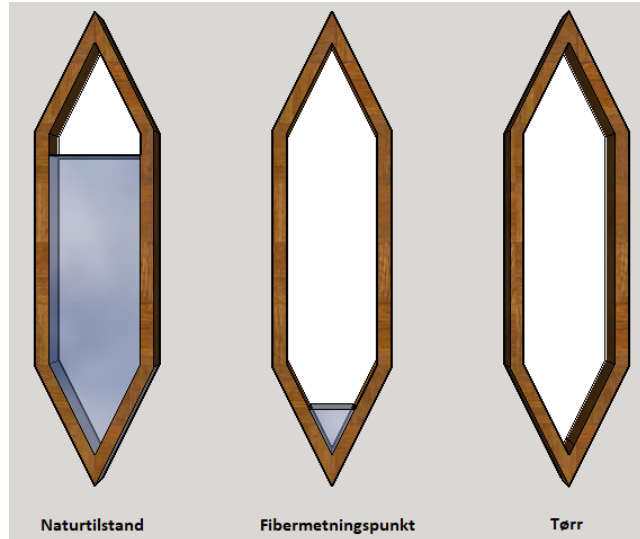
Materiallegenskaper

De vanligste treslagene brukt til bygningsformål i Norge er gran og furu, og som konstruksjonsvirke benyttes disse som likeverdige tresorter. Trevirkets oppbygging er vist i består av langstrakte celler i materialets lengderetning, med enkelte celler som går på tvers av disse. De langstrakte cellene, ofte benevnt trakeider, utgjør den største delen av trevirket, og danner fibre. Cellene på tvers kalles margstråleceller, og danner margstråler. Porer med membran som kan åpne og lukke for væsketransport lokalisert mellom cellene. Veggene i cellene består av hovedsakelig av cellulose og ligning, og er bygd opp av flere sjikt. Det er disse som gir trevirket styrke, og utformingen av cellene danner i tillegg grunnlag for mange av trevirkets øvrige egenskaper. Dette danner også grunnlaget for at trevirke er et

anisotropt materiale, altså at det har ulike mekaniske egenskaper i og på tvers av fiberretningen (SINTEF Byggforsk, 2015).

Trevirkets densitet vil være varierende for ulike typer treslag. Selve celleveggen har tilnærmet lik densitet hos alle treslag, og forholdet mellom denne og volumet av cellehulrom i treet vil dermed være avgjørende for treslagets densitet. I tillegg vil densiteten påvirkes av at trevirket har mulighet til å ta opp fuktighet, og det må derfor angis ved hvilket fuktinnhold densiteten gjelder. (Norsk Treteknisk Institutt, 1999)

Fukten i trevirket forekommer både i form av bundet og fritt vann. Fritt vann finnes i cellenes hulrom, og det er dette som først fordampes når trevirket tørkes. Tilstanden når alt dette vannet er fordampet bort kalles fibermetningspunkt, og gran- og furumateriale vil ved dette punktet ha et fuktinnhold på om lag 30 %. De ulike tilstandene er illustrert i Figur 8. Trevirkets fuktighet angis i prosent etter massen i absolutt tørr tilstand, altså massen når det ikke er forekomst av hverken fritt eller bundet vann. Dette medfører at man i levende tre, med cellerom fylt med vann, kan få fuktighetsverdier på 110 – 130 % i deler av veden. Ved tørking utover fibermetningspunktet vil det bundne vannet i celleveggene starte å fordampe, og trevirket vil starte å krympe (SINTEF Byggforsk, 2015).



Figur 8 Grad av fuktinnhold i trevirkets celler

Konstruksjonsvirke

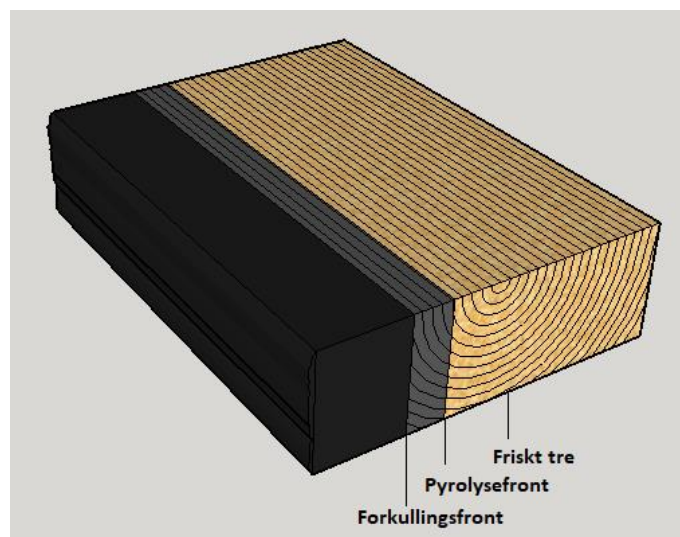
Trelast som er styrkesortert for å kunne anvendes i bærende konstruksjoner, vanligvis justert skurlast, kalles konstruksjonsvirke. Justert skurlast er trelast som er skåret direkte fra den rå tømmerstokken, og deretter høvlet på minimum to sider for mellom annet å oppnå nøyaktige tverrsnittsmål.

Konstruksjonsvirke brukes vanligvis som taksperer, i bjelkelag og som stendere. For stendere og sviller som ikke er bærende, som i utfyllende bindingsverk, stilles det ingen krav til styrke, men her til lands er det likevel normalt å bruke styrkesortert trevirke i slike konstruksjoner (Øvrum, 2012).

Med bakgrunn i dette sorteres derfor trevirket, enten maskinelt eller visuelt, og klassifiseres i fasthetsklasser utifra svakheter som kan være av betydning for styrke og stivhet. Fasthetsklassene benevnes C14, C18, C24, C30 og C40, hvor tallene angir den karakteristiske bøyefastheten i N/mm². Andre karakteristiske fastheter for de ulike klassene kan finnes i standarden NS-EN 338:2016 Konstruksjonstrevirke – Fasthetsklasser (Standard Norge, 2016).

Treets branntekniske egenskaper

Når trevirket utsettes for brann vil det forekomme en termisk nedbryting hvor materialet etter hvert omdannes til brennbare gasser og et fast forkullet lag. Dette kalles pyrolyse, og er dekomposisjon av organisk materiale uten tilgang på oksygen. Det unike med tre i forhold til mange andre materialer er at det er en direkte faseovergang fra fast form til gass form. Tremateriale brenner med en tilnærmet jevn hastighet, og det nevnte forkullende laget vil, i tillegg til at tre har en lav varmeledningsevne, føre til at det bakenforliggende friske trevirket påvirkes i mindre grad, som illustrert i Figur 9. Hastigheten for overgangen fra friskt tre til forkullende lag kalles forkullingshastighet, og er en viktig parameter i branntekniske beregninger. Denne vil være avhengig av flere variabler, hvorav de viktigste kan nevnes å være densitet, fuktinnhold og fiberretning (Kodur & Harmathy, 2016).



Figur 9 Forkulling av tre

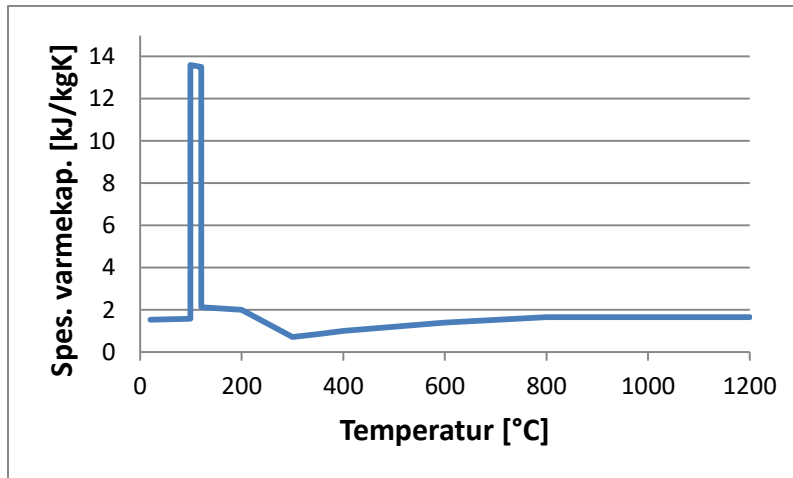
Nedbrytningen av trematerialet og forbrenningsprosessen foregår i ulike faser, definert av temperaturnivået, som beskrevet i Tabell 2 (Glasø, 2005).

Tabell 2 Temperaturfaser i forbrenningsprosessen av tre

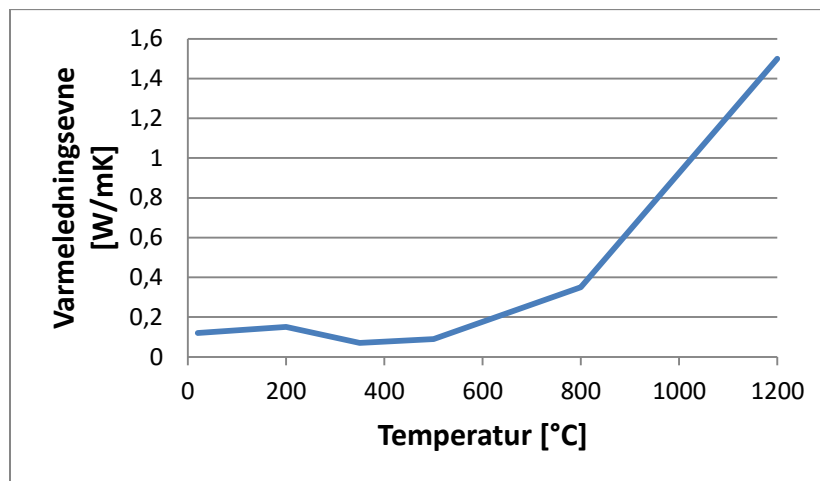
Temperaturnivå	Fasebeskrivelse
Ca. 0 – 110 °C	Vannet i trevirket drives ut i denne fasen. Det vil ikke være mulig å oppnå høyere temperaturer før alt vannet er fordampet.
Ca. 110 – 230 °C	Pyrolyse. Nedbrytningen av treet begynner, ved at enkelte bestanddeler begynner å omdannes til ulike gasser.
Ca. 230 – 260 °C	Flammepunkt nås i dette intervallet, men forbrenningen er ikke kraftig nok til å være selvgående.
Ca. 260 – 290 °C	Brennpunktet nås i dette intervallet, og forbrenningen vil kunne opprettholde seg selv, med et overskudd av varme.
Ca. 350 – 450 °C	I dette temperatur-regimet vil gassene som er i kontakt med luft selvantenne.

Utsatt for en standardbrann vil verdien til betydningsfulle materialeegenskaper som tetthet, spesifikk varmekapasitet og varmeledningsevnen variere med temperaturen gjennom forløpet. Den spesifikke varmekapasiteten ligger jevnt på omtrent lik verdi hele tiden, bortsett i fra regimet rundt 100 °C, hvor det forekommer en faseovergang og vanninnholdet fordampes, en prosess som krever ekstra energi. Varmeledningsevnen er økende etter at treet har blitt forkullet, grunnet sprekker og hull i forkullingslaget, som vil medføre en høyere tilførsel av energi. Verdier for spesifikk varmekapasitet, varmeledningsevne og reduksjonsrate for tetthet som funksjon av temperatur kan finnes i branntillegget i Eurokode 5. Figur 10 – Figur 12 er laget med bakgrunn i nevnte verdier (Standard Norge, 2004).

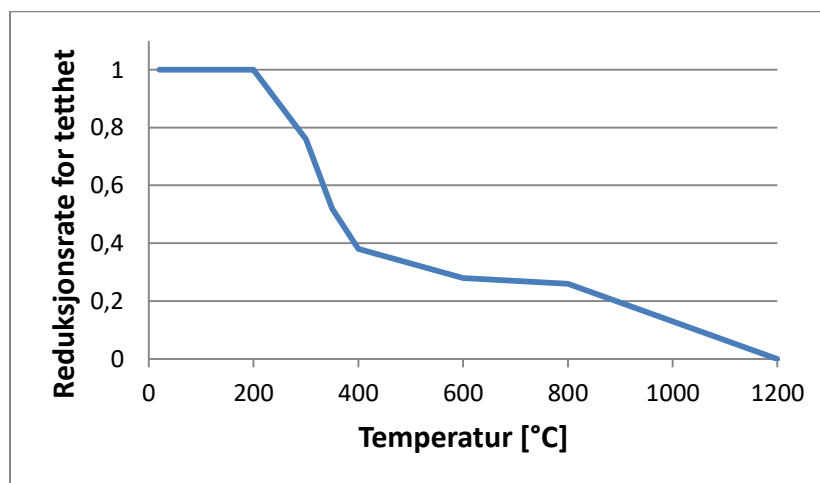
Reduksjonsraten er gyldig for bartre, og i tillegg må andel av fuktinnhold legges til for intervallet frem til fordampingsprosessen er gjennomført. Eksempelvis vil tremateriale med et opprinnelig fuktinnhold på 12 prosent starte med en faktor på 1,12, som vil synke ned til 1,0 når fordampingen av fukten er unnagjort, og videre følge den normale utviklingen i reduksjonsrate for tetthet som funksjon av tid (Standard Norge, 2004).



Figur 10 Spesifikk varmekapasitet tre som funksjon av temperatur



Figur 11 Varmeledningsevne tre som funksjon av temperatur



Figur 12 Reduksjonsrate tre for tetthet som funksjon av tid

2.1.3. Betong som byggemateriale

Da fokuset i denne rapporten er rettet mot trematerialer og stålkomponenter, gis det kun en kort introduksjon av betong som byggemateriale. Råmaterialene i betong, stein og sand, bindes sammen ved hjelp av et finkornet pulver kalt sement, som omdannes til et festemiddel når det tilsettes vann. Råmaterialene finnes stort sett over hele verden, og dette har i kombinasjon med materialets varierende bruksområde ledet til at betong er et av vår tids mest brukte byggematerialer (Søpler, 2004).

Sementlignende bindemiddel er sporet helt tilbake til år 5000 f. Kr., men det var først etter oppdagelsen av hvordan stålstenger kunne benyttes til å armere betongen, og dermed gjøre den sterkere, at betong fikk sitt store gjennombrudd som byggemateriale. Denne løsningen ble patentert rundt 1870, og kombinerer betongens evne til å tåle høye trykkrefter med armeringsjernets evne til å stå imot strekkrefter (Søpler, 2004).

På samme måte som forkulling er et særegent fenomen i forhold til trematerialer i en brannsituasjon, vil avskalling være et særegent fenomen i knyttet til betong, gitt brann. Avskalling defineres som sprekk-og fraksjonsdannelser i betongens overflate, og oppstår når det ytterste laget utsettes for høye temperaturer. Det antas at årsaken til dette er at det bygges opp trykk i betongens porer ved oppvarming. Når biter av betongens ytre sjikt faller av vil sjikt som dypere mot kjernen av betongkomponenten eksponeres, og lede til en raskere oppvarming av denne. Dersom armeringsjernet blir direkte eksponert for brann vil dette oppta varme og miste sin bæreevne, og dermed brannmotstand, svært raskt (Kodur & Harmathy, 2016).

2.2. Passiv brannsikring

Generell brannsikkerhet kan økes ved implementering av aktive eller passive brannsikringstiltak. Aktive tiltak kan defineres som tiltak som har behov for å aktiveres for å utføre sin tiltenkte funksjon, eksempelvis sløkkeutstyr og brannalarmanlegg. Passive tiltak trenger ikke noen form for aktivering, og er ofte integrert i bygningskonstruksjoner og bygningsdeler. Eksempler på passive tiltak kan være brannvegger, branndører og brannbeskyttelse av konstruksjonselementer. Felles for begge typene av tiltak er at de har til hensikt å begrense utviklingen og spredningen av en eventuell brann, og øke tiden som går frem til kritiske tilstander oppstår, og dermed øke den tilgjengelige rømningstiden. For komponenter som inngår i en bygnings bærende konstruksjon vil det spesielt være viktig med brannsikringstiltak som har til hensikt å forsinke temperaturøkning i denne, da styrken til materialet komponenten vil svekkes i takt med at temperaturen øker (Kodur & Harmathy, 2016).

2.2.1. Brannmotstand

For bygningsdeler vil det være viktig å kunne opprettholde sine vesentlige ytelser i forhold til bæreevne, isolasjonsevne, integritet og evne til å motstå mekanisk motstand over en viss tid gitt et behov ved brann. Dette kalles bygningsdelens brannmotstand, og angis i minutter. De ulike ytelseskravene er kort beskrevet i Tabell 3 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Tabell 3 Ytelser med krav til brannmotstand

Ytelse	Ytelseskrav
Integritet (E)	Integritet defineres som en brannskillende bygningsdels evne til å stå imot brannpåkjenning på en av sine sider, uten at dette fører til at brannen sprer seg gjennom bygningsdelen på grunn av gjennomstrømming av varme gasser eller flammer
Isolasjonsevne (I)	Integritet defineres som en brannskillende bygningsdels evne til å stå imot brannpåkjenning på en av sine sider, uten at dette fører til at brannen sprer seg gjennom bygningsdelen på grunn av varmeledning i denne.
Lastbærende evne (R)	Søyler og bjelker vil vanligvis kun ha krav til lastbærende evne, og denne defineres som en bygningsdel evne til å stå imot brannpåkjenningh på en eller flere sider, uten at den mister den bæreevne og stabilitet som er nødvendig, når den i tillegg belastes med en mekanisk last.
Mekanisk motstand (M)	Brannvegger og seksjoneringsvegger må kunne motstå en normert mekanisk belastning. Dette er for å sikre at disse bygningsdelene skal tåle å bli truffet av andre bygningsdeler som bryter sammen og faller ned.

Det stilles også krav til produkter og materialers branntekniske egenskaper. Et felles system med «Euroklasser» er utviklet for å harmonisere dette. Hovedklassene i dette systemet benevnes A1, A2, B, C, D, E og F, utifra hvor mye komponenten vil bidra i ulike stadium av en brann. Produkter klassifisert i klasse A1 vil ikke gi noen bidrag under et fullstendig brannforløp, mens i motsatt ende av skalaen vil produkter klassifisert som F ikke ha noen bestemt ytelse når det kommer til branntekniske egenskaper. I tillegg er det underklasser for røykproduksjon (s), og brennende dråper (d). Røykproduksjon klassifiseres på en skala fra 1-3, hvor s1 betyr liten eller ingen røykproduksjon, mens det i klasse s3 ikke er noen

begrensning i forhold til dette. Skalaen for produksjonen av brennende dråper går fra 0-2, hvor det med klassifisering d0 menes at det ikke oppstår flammende dråper eller partikler, mens det i klasse d2 ikke eksisterer noen begrensninger (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

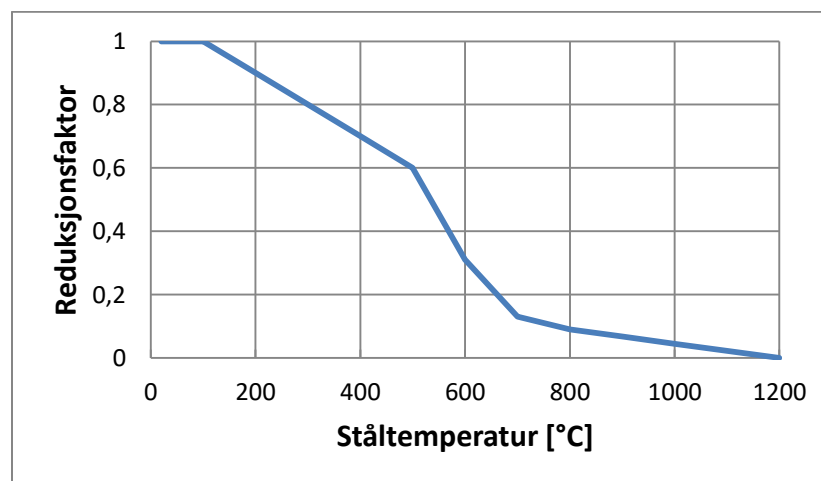
Bærende hovedsystem i byggverk, som søyler og bjelker, må være i overensstemmelse med ytelser gitt i Tabell 4 (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Tabell 4 Bærende hovedsystems krav til brannmotstand avhengig av brannklasse

Brannklasse 1	Brannklasse 2	Brannklasse 3
R 30	R 60	R 90 A2 – s1,d0

2.2.2. Passiv brannbeskyttelse av stål

Den kritiske temperaturen for lastbærende bygningsdeler av stål varierer i forhold til kapasitetsutnyttelsen. Eksempelvis vil en overdimensjonering av konstruksjonselementene føre til at disse vil tåle å oppnå høyere temperaturer, før det oppstår kritiske tilstander. Flytegrensen til stålet svekkes etter hvert som temperaturen øker, og legger man tidligere nevnte reduksjonsfaktorer fra Eurokode 3 til grunn vil man få en reduksjonsutvikling i stålets bæreevne som vist i Figur 13 (Standard Norge, 2009)



Figur 13 Reduksjonsfaktor for stålets bæreevne som funksjon av temperatur

Ubeskyttede komponenter av stål vil raskt oppnå kritisk temperatur ved belastning etter for eksempel standard tempertur-tidkurven, dersom de ikke har noen form for beskyttelse. Tiden frem til den kritiske tilstanden oppstår, vil være avhengig av den såkalte profilmotstanden A/V , forholdet mellom komponentens

eksponerte overflate og dens volum. For uisolerte konstruksjonsdeler vil den eksponerte overflaten for stålprofilet og stålprofilets volum, med betegnelse A_m/V , utgjøre beregningen av profilm faktoren. For isolerte komponenter betegnes profilm faktoren A_p/V , og beregnes som forholdet mellom isolasjonens indre areal og stålprofilets volum. Profilm faktoren er avgjørende i forhold til beregning av nødvendig tykkelse av isolasjon for å oppnå ønsket brannmotstand (SINTEF Byggforsk, 2004).

Ulike løsninger

Det finnes mange alternativer for passiv brannbeskyttelse av stålkomponenter. Tre av de mest brukte løsningene; gips, steinull og brannhemmende maling er kort beskrevet i videre avsnitt. Andre eksempel på gode, men mindre brukte løsninger, kan være fylling av søyler, med enten vann eller betong, slik at fyllingsmediet kan absorbere deler av varmen som transporteres i systemet, og dermed fungerer som et varmesluk (Milke, 2016).

Gipsplater

Gips er en blanding av vann og kalsiumsulfat, og gipsplater er plater som består av en kjerne av gips, dekket av et lag med pappkartong. Basert på gipsens sammensetning og tykkelse klassifiseres gipsen etter ytelsesevne. Vanninnholdet gjør gips til et utmerket brannbeskyttelsesmaterial, da energi vil gå med til å fordampe vannet, og tiden det tar til et underliggende konstruksjonselement varmes opp vil forlenges (Kodur & Harmathy, 2016).

Dimensjonering av nødvendig antall platelag kan enkelt gjøres ved hjelp av leverandørtabeller. Utfordringen ved bruk av gipsplater er at det kreves større plass i forbindelse med innfesting, i forhold til lignende løsninger, da platene ikke monteres direkte til stålkomponentene, men festes i mellomliggende profiler og beslag. Dette medfører også at det går med mer tid til montering ved bruk av denne løsningen.

Steinull

Plater av steinull er en foretrukket løsning, da dette er løsningen som opptar minst ekstra plass, og har den mest effektive metoden for innfesting. Det skiller mellom lette plater med massetetthet på 140-300 kg/m^3 , og hardpressede plater med en massetetthet på minimum 420 kg/m^3 . Platene festes normalt med sveisepinner som punktsveises til stålkomponenten, men det er også mulig å skru platene sammen i hverandre, som en innkassing, eller de kan limes fast (SINTEF Byggforsk, 2004).

Dimensjonering av nødvendig tykkelse kan enten gjøres ved hjelp av beregningsverktøy og tabeller utgitt av ulike leverandører. Skal det brukes produkter hvor dette ikke foreligger fra leverandørens side, kan det gjennomføres temperaturanalyse, gitt at man har alle nødvendige materialdata.

Brannhemmende maling

Synlige konstruksjoner av stål kan beskyttes ved hjelp av brannhemmende maling. Ved 200 °C starter malingen å svulle, og danner et 30-50 mm beskyttende skum på stålets overflate. Skummet har lav konduktivitet, og beholder sin isolerende evne opp til temperaturer på om lag 900 °C. Maling anbefales ikke brukt i tilfeller med krav til høyere brannmotstand enn 60 minutter (SINTEF Byggforsk, 2004).

2.3. Varmetransport, branneffekt og temperaturanalyse

Begrepet varmetransport omhandler transport, utveksling og omfordeling av termisk energi. De tre måtene dette kan forekomme på betegnes konduksjon, konveksjon og stråling. Varmetransport i form av konduksjon kan bare skje gjennom et medium, i motsetning til stråling, som ikke krever et medium. Konduksjon kan forekomme uansett om mediet er i fast, væske, eller gassform, og den karakteristiske forskjellen mellom konduksjon og konveksjon er i forhold til om mediet har noen form for strømning eller masseforflytning (Ezekoye, 2016).

Av definisjonen av temperatur kommer det at varme transporteres fra steder med høyere temperatur, til steder med lavere temperatur, slik at temperaturforskjeller vil kunne sies å være drivkraften bak varmetransport (Wikstrøm, 2016).

2.3.1. Konduksjon

Konduksjon kan beskrives som en molekylær prosess hvor energi blir overført fra partikler med høy energi til partikler med lav energi. Molekyl med høyere temperatur enn de nærliggende nabomolekylene vil besitte en høyere grad av molekylær energi, og når disse kolliderer med hverandre vil det forekomme en energioverføring (Wikstrøm, 2016).

Fouriers lov for konduksjon sier at varmefluksen er proporsjonal med temperaturgradienten, altså temperaturforskjellen per lengdeenhet i strømningsretningen. For et endimensjonalt, homogent og isotropisk objekt kan dette uttrykkes med Formel 2.1. (Ezekoye, 2016)

$$\dot{q}'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [W/m^2] \quad (2.1.)$$

Proporsjonalitetsfaktoren mellom varmekraften og temperaturforskjellen per lengdeenhet, k , kalles varmeledningsevne. For enkelte materialer som glass, luft og vann er varmeledningsevnen isotropisk, men den vil være temperaturavhengig. For anisotropiske materialer, som f.eks. tre, er den termiske konduktiviteten både avhengig av den lokale temperaturen, samt orienteringen i materialet. Årsaken til dette er fiberstrukturen i treet; den termiske konduktiviteten avhenger av om temperaturforskjellene er i retning parallelt, eller vinkelrett i forhold til fibrenes retning. I tillegg oppstår det kjemiske forandringer når tre varmes opp, og man kan dermed si at den termiske konduktiviteten for dette materialet avhenger av temperatur, orientering og sammensetning (Ezekoye, 2016).

2.3.2. Konveksjon

Varmetransport i form av termisk konveksjon spiller en svært viktig rolle i branner. Frigjort kjemisk energi transporteres på denne måten fra en brann til omgivelsene ved hjelp av bevegelse av varme gasser. Det skilles mellom naturlig, eller fri, og tvungen konveksjon. Forflytninger i egenskap av brannen selv, f.eks. induisert av temperaturforskjeller, kalles naturlig, eller fri, konveksjon. Dersom forflytningen styres av en ekstern kilde kalles dette tvungen konveksjon (Atreya, 2016)

Varmefluksen i form av konveksjon fra et fluid til overflaten av et fast stoff er avhengig av temperaturforskjellen mellom disse, og er ofte antatt å være direkte proporsjonal med forskjellen i disse to temperaturene i henhold til Newton's kjølingslov. I sin enkleste form vil dermed den respektive konvektive varmekraften i lineær form kunne uttrykkes med Formel 2.2. (Wikstrøm, 2016)

$$\dot{q}'' = h_c(T_g - T_a) \quad [W/m^2] \quad (2.2.)$$

hvor h_c er den konvektive varmeoverføringskoeffisienten som beskriver den termiske tregheten i overgangen, og er avhengig av mellom annet både egenskapene til fluidet og den faste overflatens geometri.

2.3.3. Stråling

Termisk stråling er transport av varme gjennom elektromagnetisk bølger, og skiller seg fra konduksjon og konveksjon ved at det ikke er behov for et transportmedium. Den maksimale varmekraften utstrålt fra overflaten til et svart legeme er ifølge Stefan-Boltzmann lov som gitt i Formel 2.3 (Wikstrøm, 2016)

$$\dot{q}''_{bb,emi} = \sigma \cdot T_s^4 \quad [W/m^2] \quad (2.3)$$

hvor σ er Stefan-Boltzmann konstant, og T_s er legemets absolutte overflatetemperatur ([K]).

Varmefluksen utstrålt fra overflaten til et virkelig legeme vil være noe lavere, og uttrykkes som i Formel 2.4 (Drysdale, 1998)

$$\dot{q}''_{emi} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad [W/m^2] \quad (2.4)$$

hvor ε_s er overflatens emissivitet, som beskriver legemets strålingsevne i forhold til et svart legeme med samme temperatur. Netto varmefluks til en overflate i form av stråling er differansen mellom innkommende og utgående stråling, og beregnes ved hjelp av Formel 2.5 (Standard Norge, 2008)

$$\dot{q}''_{rad} = \varepsilon_s \cdot \sigma (T_r^4 - T_s^4) \quad [W/m^2] \quad (2.5)$$

hvor T_r er den effektive strålingstemperaturen i området rundt den eksponerte overflaten.

I beregninger av varmetransport ved konduksjon og konveksjon ses det på temperaturforskjeller av første grad, mens det for stråling benyttes temperaturforskjeller av fjerde grad. Dette vil føre til at stråling vil være dominerende i forhold til konveksjon når det kommer til varmetransport i regimer med høye temperaturer ved en brann (Wikstrøm, 2016).

2.3.4. Branneffekt

Branneffekt, ofte også benevnt varmeproduksjon eller varmeavgivelsesrate, beskriver energien som frigjøres i en brann og kan beregnes ved hjelp av Formel 2.6 (Karlsson & Quintiere, 1999)

$$\dot{Q} = A_f \dot{m}'' \chi \Delta H_c \quad [W] \quad (2.6)$$

hvor A_f er brannens areal, \dot{m}'' er brenselets massetapsrate, χ er forbrenningseffektiviteten og ΔH_c er brenselets forbrenningsvarme. Forbrenningseffektiviteten er materialavhengig og forteller hvor stor del av den lagrede energien i et stoff som blir frigjort ved en forbrenningsprosess (Karlsson & Quintiere, 1999).

2.3.5. Temperaturanalyse

For å bestemme temperaturutviklingen i en bestemt bygningsdel på bakgrunn av forventet varmetransport, samt aktuelle branntekniske egenskaper både for bygningsdelen og eventuelle brannbeskyttende materialer, kan det gjennomføres temperaturanalyse (Standard Norge, 2008).

I en prosjekteringsprosess vil man forsikre seg om at valgt konstruksjonsløsning vil være i stand til å opprettholde sin funksjon i et gitt tidsintervall. Det vil i slike tilfeller være nødvendig å se på belastning

fra branner av en viss størrelse, da mindre branner som ikke utvikler seg til en overtenningsfase, sjelden vil kunne skape forhold som setter f.eks. konstruksjonens bæreevne på spill. Fastsatte standardbranner fokuserer derfor på brannforløp som raskt vokser, og inkluderer denne fasen (Wikstrøm, 2016) .

Standardbranner

Standardbranner er definerte brannforløp, som kan være gitt i ulike nasjonale og internasjonale standarder, med en forhåndsbestemt temperaturutvikling i forhold til tid. NS-EN 1991-1-2 Eurokode 1, Del 2: Laster på konstruksjoner ved brann (Standard Norge, 2008) beskriver termiske og mekaniske laster for dimensjonering av konstruksjoner med tanke på brann, på bakgrunn av ulike temperatur-tidkurver. Betinget av representasjonen av de termiske lastene ved dimensjonering, skilles det i standarden mellom nominelle og parametriske brannkurver.

Nominelle brannkurver

Nominelle brannkurver, som standard temperatur-tidkurven, kurve for utvendig brann, og hydrokarbonbrannkurven kan brukes for å bestemme brannmotstand for forskjellige bygningsdeler, og beskriver et brannforløp uten avkjølingsfase, hvor det ikke tas hensyn til variabler som branncellens geometri og ventilasjonsåpninger. Det gis i Eurokode 1 formler for nevnte nominelle brannkurver, og i disse er θ_g den gjennomsnittlige gasstemperaturen i branncellen, og t er tiden målt i minutter. Varmeoverføringskoeffisienten ved konveksjon er for standard temperatur-tidkurve og utvendig brannkurve er oppgitt til å være $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, mens tilsvarende verdi for brannkurve for hydrokarbonbrann er $\alpha_c = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Standard temperatur-tidkurven representerer en normal rombrann og er gitt ved Formel 2.7 (Standard Norge, 2008)

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.7)$$

hvor θ_g er den gjennomsnittlige gasstemperaturen og t er tiden målt i minutter. Ser man bort ifra USA og Canada er denne temperatur-tid relasjonen utvilsomt den mest brukte når det kommer til testing og klassifisering av bygningsdeler med skillende og lastbærende funksjoner (Wikstrøm, 2016). NS-EN 1363-1 Prøving av brannmotstand, Del 1: Generelle krav (Standard Norge, 2012) angir at det er denne kurven som skal legges til grunn ved generell prøving av brannmotstand. Da standarden angir bruk av plate termometer for å kontrollere temperaturen i ovnen, kan gasstemperaturen og strålingstemperaturen antas å være like.

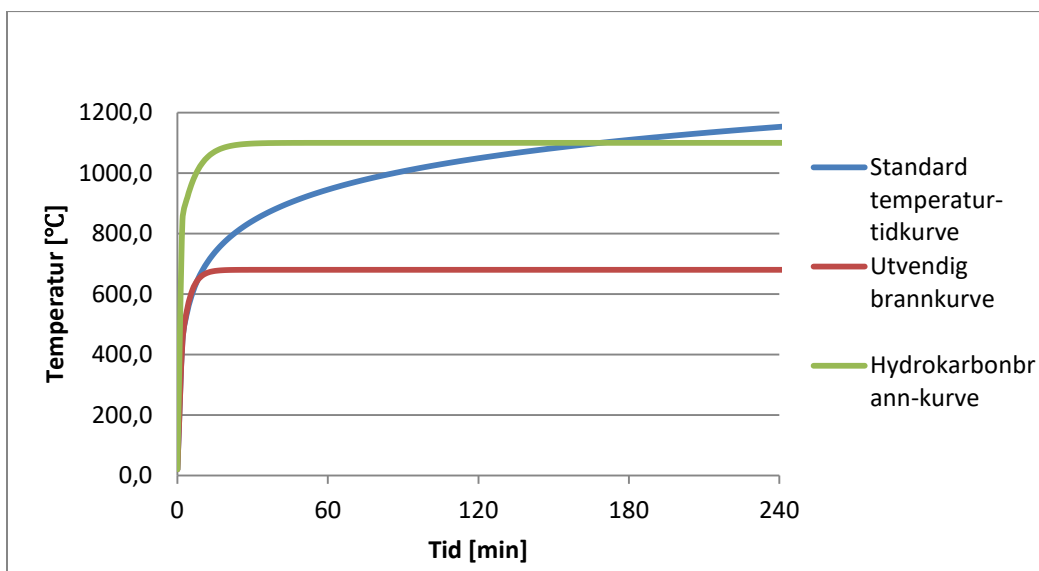
Den utvendige brannkurven er temperatur-tidforløpet beregnet for utsiden av skillende yttervegger som kan bli eksponert for brann fra ulike deler av fasaden, og er gitt ved Formel 2.8 (Standard Norge, 2008)

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.8)$$

hvor θ_g er den gjennomsnittlige gasstemperaturen og t er tiden målt i minutter. Brannkurven for hydrokarbonbrann beskriver temperatur-tidkurven for et forløp som tilnærmet vil stemme overens med virkningene av en hydrokarbonbrann. Forholdet er beskrevet ved hjelp av Formel 2.9 (Standard Norge, 2008)

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.9)$$

En sammenstilling av de ulike nominelle brannkurvene beskrevet i Eurokode 1 er vist i Figur 14.



Figur 14 Nominelle temperaturkurver som funksjon av tid

Parametriske brannkurver

Parametriske brannkurver utledes på grunnlag av brannmodeller, samt de fysiske variablene som karakteriserer forholdene i branncellen som eksempelvis spesifikk brannenergi og ventilasjonsforhold. I tillegg til Eurokode 1, Del 2 vises fremgangsmåten for å fremstille brannkurver for hele brannforløp, inkludert avkjølingsfasen, ved hjelp av ligninger som beskriver den løpende temperaturen i oppvarmings- og nedkjølingsfasen, i tillegg til antatt tid for oppnåelse av maksimumstemperatur.

Forenklet temperaturanalyse beskrevet i Eurokode 1

I prosedyre for temperaturanalyse beskrevet i Eurokode 1 angis relevant standard brann som dimensjonerende brann for konstruksjoner med krav til brannmotstand fastsatt av nasjonale myndigheter. Dimensjoneringen av konstruksjonen må gjøres i henhold til en brann av varighet lik den som danner grunnlaget for temperaturanalysen, og brannmotstanden kan enten påvises ved tid, kapasitet eller temperatur, ved at den dimensjonerte verdien er lavere enn kritisk/påkrevd verdi (Standard Norge, 2008).

Varmeoverføringen til bygningsdelens overflate beskrives ved netto varmestrøm, \dot{h}_{net} , og denne bestemmes ved å beregne varmetransport gjennom konveksjon og stråling som gitt i Formel 2.10 (Standard Norge, 2008)

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2.10)$$

hvor $\dot{h}_{net,c}$ er netto konvektiv varmestrøm som bestemmes ved Formel 2.2, og $\dot{h}_{net,r}$ er netto varmestrøm ved stråling som bestemmes ved Formel 2.3 (Standard Norge, 2008)

Numeriske beregninger

Den stadig økende tilgjengeligheten av data for temperaturavhengige materialtekniske egenskaper ved høyere temperaturer har ført til at det er mulig med en matematisk tilnærming og løsning når det kommer til å vurdere brannmotstanden for ulike konstruksjonselementer. Dette er mindre tid- og ressurskrevende enn å gjennomføre branntester, og det har derfor blitt stadig mer akseptert å gjøre bruk av numeriske metoder i forbindelse med dette arbeidet (Kodur & Harmathy, 2016).

I numeriske beregninger bruker man approksimasjon og iterative beregninger over et valgt tidsintervall inndelt i tidssteg til å løse matematiske problemer. For komplekse problemer med flerdimensjonal varmetransport lønner det seg å bruke dataprogrammer, mens det for endimensjonal varmestrøm kan benyttes enkle regneark eller håndberegninger. For søyler og bjelker, som det fokuseres på i denne rapporten, kan man ved å anta at disse er av uendelig lengde og har en uniform termisk kapasitet, forenkle situasjonen til å være endimensjonal (Drysdale, 1998).

Med at et legeme har uniform termisk kapasitet menes en identisk temperaturforandring i hele legemets masse når det eksponeres for et miljø med en forskjellig temperatur fra legemet selv, og det dermed enten varmes opp eller kjøles ned. Dette vil være mest gyldig i forhold til faste stoffer med god ledningsevne, og godt blandede fluider (Subramanian).

For uisolerte stålkomponenter med uniform termisk kapasitet kan stålteperaturen ved tidssteget $(j + 1)$ slutt beregnes ved hjelp av Formel 2.11 (Wikstrøm, 2016)

$$T^{j+1} = T^j + \frac{A}{V(c\rho)} \left[\varepsilon\sigma \left((T_r^j)^4 - (T^j)^4 \right) + h_c(T_g^j - T^j) \right] \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.11)$$

hvor Δt er tidsstegets lengde, og T_r^j og T_g^j er henholdsvis strålingstemperatur og gasstemperatur fra brannen, og T^j er den eksponerte komponentens temperatur. For tilfeller hvor bygningsdeler er fullstendig innhyllet i brannen kan det antas $T_r^j = T_g^j$ (Standard Norge, 2008).

For situasjoner hvor stålkomponenter er isolert kan varmeoverføringen forenklet antas å være proporsjonal med temperaturforskjellen mellom den uniforme stålteperaturen, og temperaturen på isolasjonens overflate. Stålteperaturen ved tidssteget $(j + 1)$ slutt beregnes ved hjelp av Formel 2.12 (Wikstrøm, 2016)

$$T^{j+1} = T^j + \frac{A}{V(c\rho)} \times \frac{k_{in}}{d_{in}} (T_s - T^j) \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.12)$$

Hvor k_{in} og d_{in} er isolasjonens konduktivitet og tykkelse. Lengden på tidssteget, Δt , må være mindre enn et situasjonsbetinget kritisk intervall, gitt som Formel 2.13 (Wikstrøm, 2016) for isolerte komponenter

$$\Delta t_{cr} = \frac{V \times c \times \rho \times d_{in}}{k_{in} \times A} \quad [s] \quad (2.13)$$

og for uisolerte komponenter gitt som Formel 2.14 (Wikstrøm, 2016)

$$\Delta t_{cr} = \frac{V \times c \times \rho}{h_{tot} \times A} \quad [s] \quad (2.14)$$

Beregningsmodeller for fluiddynamikk

Ved bruk av CFD-modeller (Computational Fluid Dynamics) kan det gjøres analyse av komplekse systemer som omfatter væskestrøm og varmeoverføring. Volumet som skal analyseres deles inn i mindre celler, og ligninger for fysikkens grunnleggende konserveringslover løses numerisk for hver enkelt celle i volumet. Ligningene beskriver i tillegg til konservering av masse, at summen av kreftene som virker på en væskepartikkel er lik momentums endringshastighet, og at summen av varmeøkningen og hastigheten som utføres på en væskepartikkel er lik energiens endringshastighet (Standard Norge, 2008).

Denne modelleringsformen foregår som oftest over tre etapper; ved hjelp av en pre-prosessor hvor inndata og forutsetninger blir lagt inn, en solver som modellerer og beregner, og en post-prosessor som fortolker og gjengir resultatene solveren har kommet frem til.

FDS, Fire Dynamics Simulator, er en CFD-modell designet spesielt med tanke på modellering av brann, og strømninger som oppstår i fluider på grunn av brannens termiske krefter. Programvaren er utviklet av det amerikanske National Institute of Standards and Technology (NIST), og er fritt tilgjengelig. I tillegg til at utdataene man får fra programmet kan åpnes direkte i MS Excel, kan man få animasjoner av simuleringen i post-prosessoren Smokeview (National Institute of Standards and Technology, 2018). Pyrosim er et program utviklet av Thunderhead Engineering med grafisk brukergrensesnitt hvor man kan bygge modeller som kan lastes direkte opp i FDS (Thunderhead Engineering, 2018).

2.4. Regelverk og standarder

2.4.1. Nasjonalt Lovverk

Det nasjonale regelverket som inneholder retningslinjer for oppføring og bruk av bygninger i forhold til det branntekniske er hjemlet i Plan- og bygningsloven og Brann- og eksplosjonsvernloven. Aktuelle forskrifter med hjemmel er beskrevet i Tabell 5.

Tabell 5 Forskrifter som omhandler brannikkerhet i bygninger

Forskrift	Hjemmel	Beskrivelse
Forskrift om byggesak (SAK 10)	Plan- og bygningsloven	<i>Byggesaksforskriften</i> er generell for alle fagdisipliner, og utfyller plan- og bygningslovens regler i forhold til byggesaksbehandling, kvalitetssikring og kontroll, tilsynsregler, krav for godkjenning av ansvarsrett for foretak, samt muligheter for straffereaksjoner der reglene ikke blir fulgt (Direktoratet for byggkvalitet, 2011).
Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK 17)	Plan- og bygningsloven	<i>Byggteknisk forskrift</i> angir minimumskravene for hvilke egenskaper et byggverk må inneha for og lovlig kunne bli oppført i Norge (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Forskriften ble oppdatert i 2017, men det vil i en overgangsperiode frem til 31. desember 2018 være valgfritt for utbygger om man vil legge den nye eller gamle

		<p>utgaven til grunn når nye byggverk planlegges. Det er fastsatt krav på alle betydningsfulle felter innen helse, miljø, sikkerhet og brukbarhet. Lovverket er funksjonsbasert, det vil si at krav gitt i forskriften er overordnede og kvalitative funksjonskrav, mens det i veiledningen til forskriften gis preaksepterte løsninger som vil dekkende i forhold til minimumskravene. I praksis betyr dette at dersom man velger den foreslåtte preaksepterte løsningen, vil det ikke være noe behov for å dokumentere at kravene i Byggteknisk Forskrift er ivaretatt. Dersom det derimot velges enn annen løsning enn den preaksepterte, må det dokumenteres at den alternative løsningen, eventuelt sammen med et kompensereende tiltak, er minst like god. På enkelte funksjonsområder kan ytelser være gitt i standard, og ikke i veiledning (Direktoratet for byggkvalitet, 2012).</p>
Forskrift om brannforebygging (FOB)	Brann- og eksplosjonsvernloven	<i>Forskrift om brannforebygging</i> erstattet fra 1.januar 2016 Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn, FOBTOT. Forskriften stiller krav til både eiere og brukere av et bygg, herunder krav til sikker bruk av bygget, samt at bruken er i tråd med byggets forutsetninger (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2015).
Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter (Internkontrollforskriften)	Brann- og eksplosjonsvernloven med flere	<i>Internkontrollforskriften</i> stiller krav om at den som er ansvarlig for virksomhet, plikter å sørge for systematisk oppfølging av gjeldende krav i relevante lover. I følge forskriften skal byggeier gjennom internkontroll dokumentere byggverkets branntekniske egenskaper (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2015).
Forskrift om organisering og dimensjonering av	Brann- og eksplosjonsvernloven	Forskrift om organisering av brannvesen skal sørge for at den risiko og sårbarhet som foreligger legges til grunn for

brannvesen

dimensjoneringen og organiseringen av brannvesenet, slik at det oppnås et tilfredsstillende sikkerhetsnivå (Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2002).

2.4.2. Eurokoder

For å harmonisere tekniske spesifikasjoner og for å fjerne handelshindringer har det blitt utviklet felles europeiske standarder for prosjektering av byggverk og bæreevne/styrke for produkter som benyttes til konstruksjonsformål. Eurokodene gir et felles reglement både for prosjektering av konstruksjonsdeler og komplette konstruksjoner (Standard Norge, 2008).

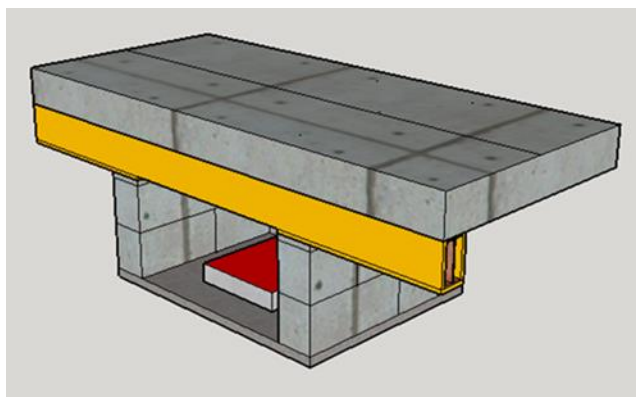
Med sine nasjonale tillegg har alle Eurokodene blitt Norsk Standard, og erstattet tidligere nasjonale standarder for konstruksjonsteknikk. Det forutsettes også at standardene benyttes for å dokumentere konstruksjoners sikkerhet i henhold til krav i byggeforskriften. Bortsett fra NS-EN 1990 er hver Eurokode inndelt i ulike underdeler, og de fleste har herunder en egen del for brannteknisk dimensjonering. Forutsatt at det nasjonale tillegget med de nasjonalt bestemte parameterene legges til grunn for prosjekteringen kan reglene i Plan- og bygningsloven med tilhørende Teknisk forskrift anses oppfylt dersom det benyttes metoder og utførelse i samsvar med Norsk Standard/Eurokodene i serien NS-EN 1990 til NS-EN 1999. En samlet oversikt over de ulike Eurokodene er gjengitt i listeform under (Standard Online AS, 2018).

- NS-EN 1990 – Eurokode 0 - Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner
- NS-EN 1991 – Eurokode 1 - Laster på konstruksjoner
- NS-EN 1992 – Eurokode 2 - Prosjektering av betongkonstruksjoner
- NS-EN 1993 – Eurokode 3 - Prosjektering av stålkonstruksjoner
- NS-EN 1994 – Eurokode 4 - Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong
- NS-EN 1995 – Eurokode 5 - Prosjektering av trekonstruksjoner
- NS-EN 1996 – Eurokode 6 - Prosjektering av murkonstruksjoner
- NS-EN 1997 – Eurokode 7 - Geoteknisk prosjektering
- NS-EN 1998 – Eurokode 8 - Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning
- NS-EN 1999 – Eurokode 9 - Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner

3. Eksperimentell metode

3.1. Forsøksoppsett

Forsøksoppsettet ble utviklet med et ønske om å gjennomføre forsøk som i størst mulig grad kunne gjenspeile et reelt scenario, samt å gi mulighet til å samle inn gode data til bruk i modelleringsdelen av forsøksoppsettet. Førsteutkastet var fokusert rundt en konstruksjon bestående av et brennkammer med tre tette vegger og en overliggende tett takflate, bygget opp av Ytong Porebetong. En isolert stålbjelke av representativ type og størrelse var tenkt lokalisert tett oppunder takkonstruksjonen, i brennkammerets åpne side, som vist i Figur 15.



Figur 15 Illustrert førsteutkast av eksperimentelt forsøksoppsett

På denne måten får man en konstruksjon som kan sammenlignes med et rom hvor man har en bærende stålkomponent i den ene vegg, og man vil kunne teste effekten av ulike passive brannsikringstiltak ved å erstatte deler av brannisolasjonen med alternative løsninger i ulike forsøk.

Ulike typer brannkilder som diesel og parafin ble vurdert, men av økonomiske og praktiske årsaker falt valget til slutt ned på propan. Med et begrenset budsjett førte lavere kostnad til utvidede muligheter for å gjøre flere gjennomkjøringer av samme forsøk, og i tillegg var nødvendig utstyr som gassbrenner og styringsenhet for mating av gass lett tilgjengelig.

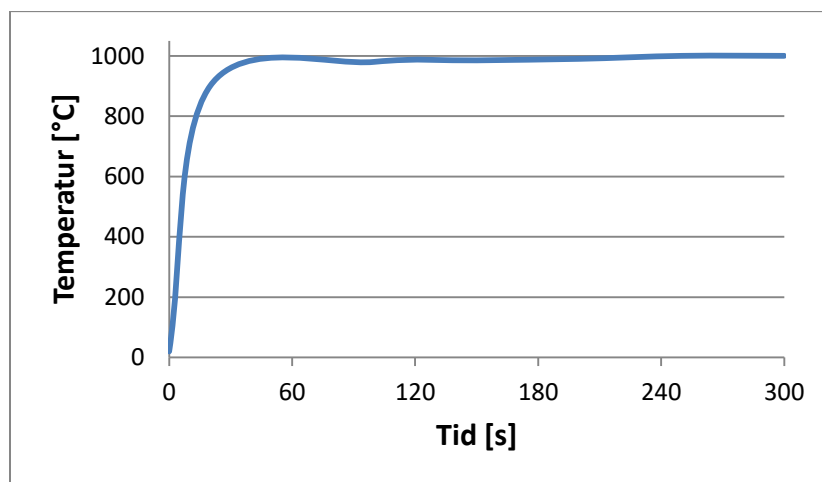
3.1.1. Prosjektering av brennkammer

Dimensjoneringen og utformingen av brennkammeret ble gjort ved hjelp av simuleringer i FDS av ulike alternative løsninger konstruert i den grafiske brukergrensesnittmodellen PyroSim, se Vedlegg 1 for inndatafil. Det ble tatt utgangspunkt i at hvert forsøk skulle vare i maksimalt 60 minutter, og at det i løpet av denne tiden ikke skulle brukes mer enn 20 kg gass. Propan, C_3H_8 , har forbrenningsvarme, ΔH_{ch} , lik 46,3 kJ/g (Hurley, 2016), og vil ved en branneffekt på 230 kW ha en massetapsrate på 5,2 g/s i følge

Formel 2.6. En gassflaske med 20 kg propan vil da kunne opprettholde denne effekten i 64 minutter. Ønsket temperaturkapasitet i brennkammeret var rundt 950 °C, da temperaturen 60 minutter ut i en standardbrann er angitt å være 945 °C i følge standard temperatur-tidkurven (Standard Norge, 2008). Da det benyttes en styringsenhet som gjør det mulig å kontrollere matingen av gass til brenneren under forsøkene vil det ikke være noe problem å holde en lavere effekt og temperatur om dette er ønskelig. Nøyaktige simuleringer i FDS for scenarier som går over lengre tid, kan ta lang tid å utføre. I dette tilfellet kan det antas at man etter kun kort tid ut i forsøket vil oppnå en stabil tilstand, og det vil derfor ikke være nødvendig med simulering utover tiden det tar før denne tilstanden oppnås.

Et brennkammer med et gulvareal på 0,9 x 1,0 meter, med en innvendig høyde på 0,75 meter, ga i simuleringen en temperatur på rundt 1000 °C etter at konstante forhold var etablert, som vist i

Figur 16 under. Brannkilden ble i simuleringen angitt å være en propanbrenner av en størrelse på 0,5 x 0,5 meter, med konstant effekt på 230 kW.



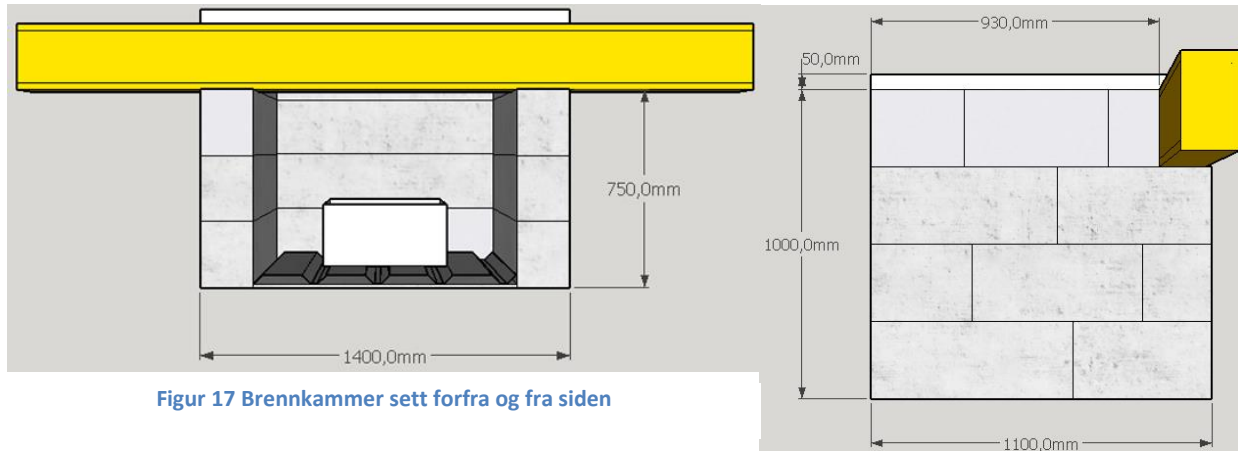
Figur 16 Modellert temperatur i brennkammer som funksjon av tid

3.1.2. Bygging av brennkammer

Brennkammeret ble oppført, og forsøkene gjennomført, i Høgskulen på Vestlandets nye forsøkshall. Hallen er av en størrelse på 20 x 15 meter, med 9 meters høyde, og gjør det mulig å gjennomføre forsøk uten å måtte ta hensyn til variasjoner i vær- og vindforhold. I hallen er det installert en avtrekksvifte med et avsugsareal på 6 x 6 meter, og brennkammeret ble oppført sentrert under avtrekksketten.

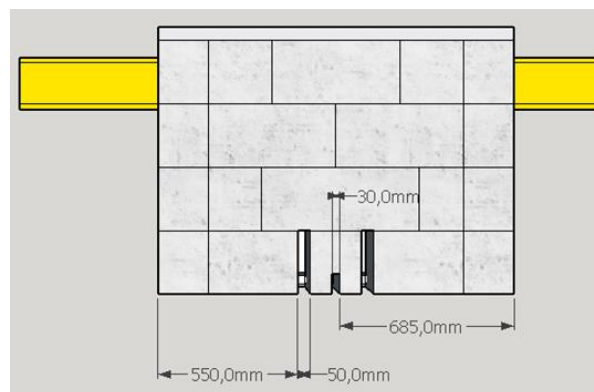
Brennkammerets vegger ble bygget opp av Ytong Porebetongblokker med dimensjonene 0,6 m x 0,2 m x 0,25 m. I stedet for den planlagte innvendige høyden på 0,75 m. ble det oppført en konstruksjon med

fire blokker i vegg høyden, noe som gir en innvendig bruttohøyde på 1,0 m. Målsatte skisser av brennkammeret kan observeres i Figur 17.



Figur 17 Brennkammer sett forfra og fra siden

Grunnen til at det ble oppført en konstruksjon som var høyere enn det som var prosjektert er at det ble bestemt at gulvet innvendig i brennkammeret skulle beskyttes ved å dekke dette med både gips og en korrugert stålplate, som vist i Figur 17, noe som til sammen bygget opp om lag 0,05 m. I tillegg hadde gassbrenneren en høyde på 0,25 m, og dette medførte dermed at brannkilden kom på et mye høyere nivå enn det som ble lagt til grunn i prosjekteringen. Ved å legge inn en ekstra rad med blokker i høyden ble det derfor antatt at man fikk en konstruksjon som stemte bedre overens med den prosjekterte. I den nederste raden med blokker ble det i langveggen laget to utsparinger på 0,05 x 0,25 m for ekstra lufting. I mellom disse ble det i tillegg laget en mindre utsparing for innførsel av slangen som skulle kobles til gassbrenneren i brennkammeret, for mating av gass. Disse utsparingene kan ses fra baksiden av brennkammeret i Figur 18.



Figur 18 Utsparinger i brennkammerets bakre vegg

En brannmursplate med tykkelse på 0,05 m ble brukt som takkonstruksjon, da tenkt løsning med Ytong elementer viste seg å være vanskelig å få til. Ytong elementene hadde en masse som krevde ekstra løfteutstyr for å kunne flytte på disse. Under forsøkene var det ønskelig med en takkonstruksjon som lett kunne fjernes mellom hvert enkelt forsøk, for og enkelt kunne få tilgang til stålbjelken som var lokalisert på undersiden. Figur 19 er et bilde tatt under arbeidet med oppføringen av brennkammeret, og man kan her mellom annet se utsparingene som er lokalisert i den bakre veggen. Ferdig oppsett kan ses i Figur 22.

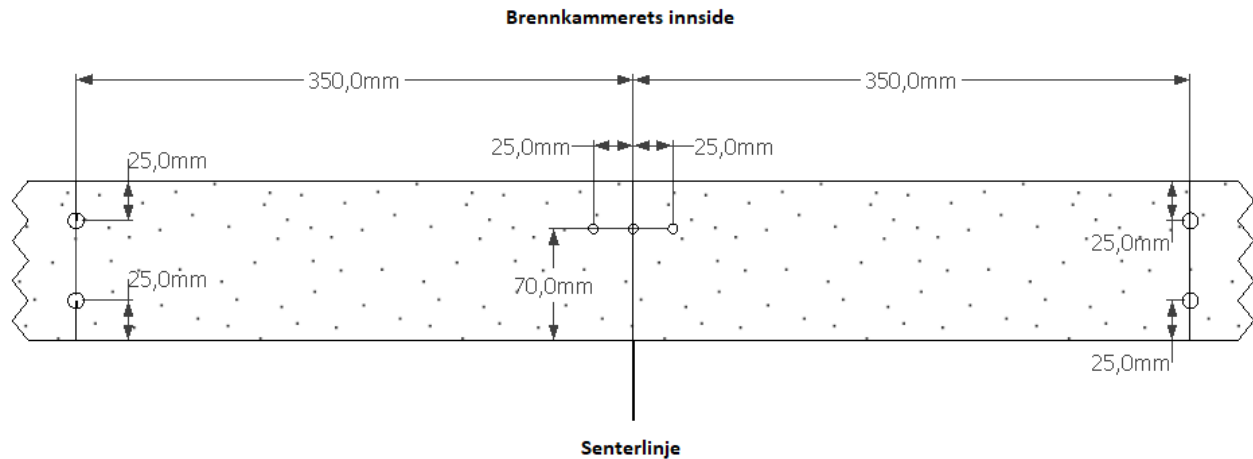


Figur 19 Brennkammer under oppføring

3.1.3. Stålbjelke

Stålbjelken som ble brukt i forsøkene var av typen IPE 200, med en lengde på 2,8 m. Denne dimensjonen av IPE-bjelker har en høyde på 0,2 m, og bredde på 0,1 m. Flenser og steg er henholdsvis 0,0085 m og 0,0056 m tykke. Utdrag av relevante data fra stålbjelkens datablad kan finnes i Vedlegg 2. I et reelt brannscenario vil vanligvis ikke hele bjelkens lengde være direkte eksponert for brann, og det vil dermed være konduktiv varmetransport i lengderetning bort fra det mest utsatte området. Dette ble tatt hensyn til ved å la bjelken stikke 0,9 m ut fra hver side av brennkammerets lysåpning. I tillegg ble det lagt opp til ekstra temperaturmålinger for å kunne se nærmere på energioverføringen i lengderetningen, noe som er nærmere beskrevet i avsnittet som omhandler instrumenteringen i forsøket.

Det ble til sammen boret syv hull i bjelkens nedre flens. Fire av disse var av en størrelse på 10 mm, og var ment for bruk i forbindelse med innfesting av prøvestykke, mens de resterende tre var av en størrelse på 6 mm, og ga muligheten til å kunne installere termoelementer fra oversiden og ned i prøvestykket. Lokaliseringen av hullene kan ses i Figur 20, som viser et utsnitt av bjelkens nedre flens sett ovenfra.



Figur 20 Lokalisering av hull i bjelkens nedre flens

3.1.4. Prøvestykke

Før gjennomføringen av forsøkene ble bjelken brannisolert på alle fire sider med 25 mm tykk Rockwool Conlit 150, i hele bjelkens lengde, bortsett i fra bjelkens underside inne i brennkammeret.

Produktdatablad for Conlit kan finnes i Vedlegg 3. Krav i forhold til forskriftsmessig tykkelse ble funnet ved hjelp av beregningsprogrammet Conlit brannsikring (Rockwool, 2018). Dette beregningsprogrammet dimensjonerer nødvendig tykkelse på Conlit brannisolasjon for å tilfredstille stålkonstruksjoners ulike bærende krav i henhold til forskriftene, ved hjelp av ulike parametere brukeren av programmet kan regulere. Valgte inngangsdata som er brukt i beregningsprogrammet for å bestemme denne tykkelsen er gjengitt i Tabell 6. Isolasjonen som var direkte eksponert for flammer under forsøket, på innsiden og utsiden av brennkammerets lysåpning, ble skiftet mellom hvert forsøk.

Tabell 6 Valgte inndata i Conlit beregningsprogram

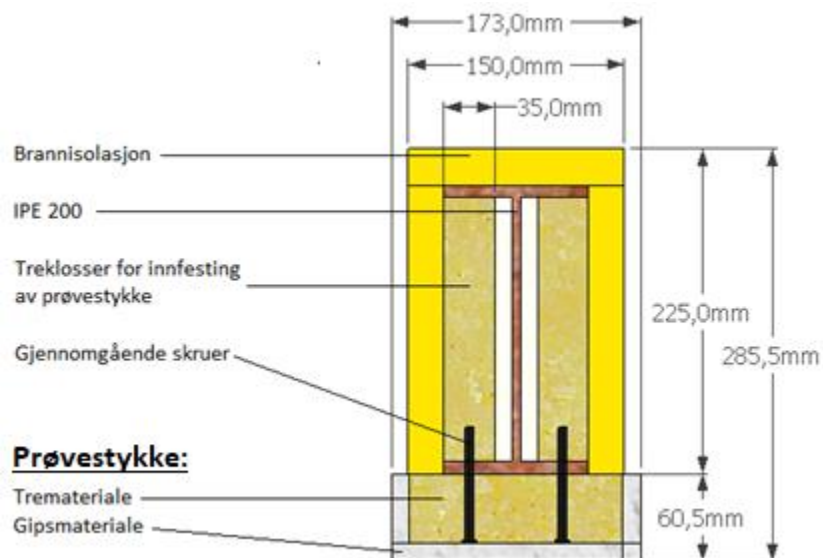
Variabel	Inndata
Festemetode:	Sveisemetode
Brannklasse:	R60
Maksimal ståltemperatur:	500 ^o C
Profil:	IPE
Dimensjon:	200: 200 x 100
Am/V:	176
Antall sider:	3 sider

På undersiden av stålbjelken, innenfor brennkammerets vegger, ble det før hvert enkelt forsøk montert et prøvestykke. De tre ulike typene prøvestykker er beskrevet i Tabell 7.

Tabell 7 Gruppering av prøvestykker

Type	Spesifikasjon:	Bakgrunn
1. Conlit	Conlit 150 – 25 mm tykkelse	Brannisolasjon med nødvendig tykkelse for å tilfredsstille lastbærende krav i 60 minutter.
2. Trevirke	48 x 148 mm C 24 Konstruksjonsvirke	Dimensjonering og valg av trevirke i henhold til forskriftsmessig konstruksjon av utfyllende bindingsverk.
3. Trevirke beskyttet av gips	48 x 148 mm C 24 Konstruksjonsvirke innkledd i ett lag 12,5 mm standard A gips	Valgt for å kunne observere hvordan forkullingen i trematerialet og stålbjelken påvirkes av et beskyttende lag.

Produktdatablad for gipsplatene og ytelseserklæring for konstruksjonsvirke kan finnes i Vedlegg 4 og Vedlegg 5. Snittegning av den isolerte bjelken med påmontert prøvestykke kledd med gips klargjort for forsøk kan ses i Figur 21.


Figur 21 Tverrsnittsskisse av stålbjelke

I Figur 21 kan også prøvestykkets innfesting observeres, med gjennomgående skruer montert opp i treklosser som står i spenn mellom bjelkens øvre og nedre flens. Dette blir beskrevet nærmere i senere

avsnitt som omhandler gjennomføring av forsøk. I dette avsnittet finnes også en oversikt over hvilke typer prøvestykker som ble benyttet i hvert forsøk.

I Figur 22 kan man se oppsettet klargjort for gjennomføring av forsøk, med brannisolert stålbejelke og påmontert prøvestykke av tremateriale på undersiden av denne, i lengden av brennkammerets lysåpning.



Figur 22 Oppsett klargjort for gjennomføring av forsøk

3.1.5. Brannkilde

Som tidligere beskrevet ble det valgt gassbrenner med propan som brensel til brannkilde. Dette oppsettet bestod i utgangspunktet av tre komponenter; gassflasker, en styringsenhet for å kontrollere tilførselen av gass, samt en gassbrenner. Gassflaskene som ble benyttet under forsøkene rommet i oppfylt tilstand 17 kg gass. I det første forsøket som ble gjennomført for å teste at oppsettet fungerte, ble det avdekket at det ikke var mulig å opprettholde den tiltenkte jevne tilførselen av gass med en rate på 5,2 g/s over et lengre tidsintervall. Det ble et for høyt trykk- og temperaturfall i flasken, og det dannet seg et lag av is med en tykkelse på 2 cm på utsiden av flasken, noe som medførte en lavere tilførselsrate utover i forsøket. For å hindre store temperaturendringer i den kondenserte propanen ble gassflasken plassert i et vannbad med temperatur på ca. 25 °C. I tillegg ble det koblet på en reserveflaske som kunne åpnes for ekstra tilførsel ved behov, denne var plassert i et kar med omgivelsestemperert vann. Den endelige løsningen er avbildet i Figur 23.



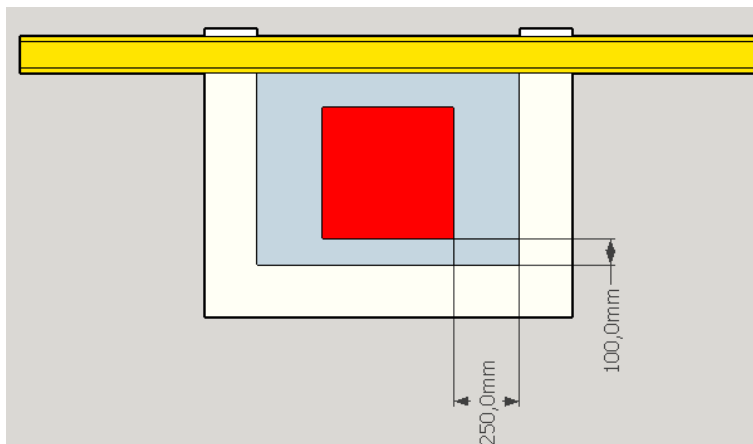
Figur 23 Oppstilling av gassflasker



Figur 24 Styringsenhet for mating av gass

Under testforsøket ble det observert at en tilførselsrate på 5,2 g/s førte til temperaturer på over 1000 °C i området rundt prøvestykket, og at en tilførsel på rundt 4,0 g/s var nok til å gi en temperatur på mellom 900 og 950 °C. Det ble derfor besluttet å ha en konstant tilførsel av gass med denne raten under gjennomføringen av forsøkene. I Figur 24 kan styringsenheten for gasstilførsel observeres, markert med rød pil.

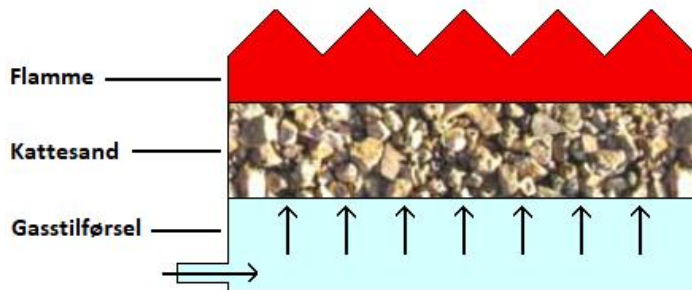
Gassbrenneren var en sandbrenner, som bestod av et kar med grunnflate på 0,5 x 0,5 m, som avbildet i Figur 27. Karet hadde vegger med en høyde på rundt 0,25 m, og var lokalisert på gulvet i midten av brennkammeret, som vist i Figur 25.



Figur 25 Lokalisering av gassbrenner i brennkammer

Nær bunn av karet var det et inntak hvor det var mulighet for å koble til en gasslange, og dette ble koblet opp mellom styringsenheten og brenneren for forsyning av gass. Den videre oppbyggingen av en

gassbrenner av denne typen består av en finmasket rist som dekker hele karetts åpning, liggende på en høyde omtrent 0,1 m over karetts bunn. Deretter fylles karet med en ønsket mengde og type sand, som blir liggende på risten. Gassen vil dermed komme inn og fordele seg i det åpne volumet nederst, før den sprer seg gjennom ulike veier opp gjennom sanden, som vist i Figur 26



Figur 26 Skisse av gassbrenner



Figur 27 Gassbrenner i brennkammer

Tykkelsen på laget med sand, og type sand, vil dermed ha innvirkning på hvor jevnt forbrenningen fordeles ut over brennerens areal. Under gjennomføringen av forsøkene ble det brukt et lag med 0,1 m «kattesand», dette fungerte veldig bra, og det var ikke nødvendig å gjøre noen justeringer i forhold til dette underveis.

3.1.6. Instrumentering

For å kunne overvåke brannbelastningen og temperaturutviklingen ble det benyttet 18 termoelementer og to platetermometer.

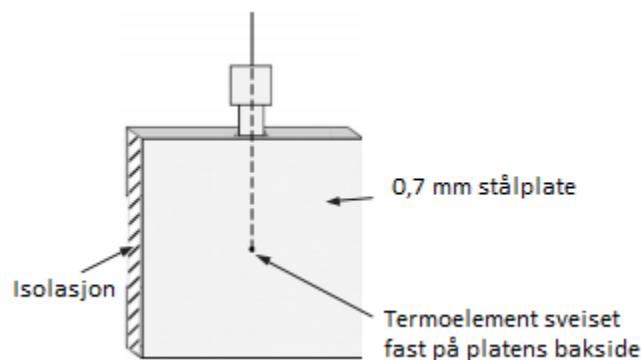
Et termoelement består av to metalltråder laget av ulike materialer, koblet sammen i et målepunkt og et referansepunkt med kjent temperatur, slik at det dannes en strømkrets. Ved ulik temperatur i sammenkoblingspunktene vil det oppstå en elektromotorisk spenning i kretsen. Denne spenningen vil være avhengig av både temperaturforskjellen, og materialene trådene i kretsen er satt sammen av. Termoelement blir mye brukt i branntesting og forskning, da de har forholdsvis lav kostnad, kan brukes flere ganger, er lette å bruke og har et vidt bruksområde. Da de er små av størrelse kan de plasseres de fleste ønskede plasser, samt de absorberer lite varme. Sammenkoblingen i målepunktet kan enten være innebygget i et fast materiale, eller de kan være direkte montert og eksponert i området de skal måle temperatur i (Wikstrøm, 2016).

NS-EN 1363-1:2012 Prøving av brannmotstand (Standard Norge, 2012) angir at standard plate-termometer skal brukes for å måle og kontrollere temperaturen i ovner som brukes til testing av brannmotstand etter standard temperatur-tidkurven. Platetermometer ble utviklet, og foreslått tatt i bruk, for om lag 30 år siden, da det viste seg at termoelementene som var angitt i standardene til nevnte formål på den tiden, egnet seg dårlig til dette arbeidet. Ved testing i ulike ovner i omtrent en time, etter samme brannkurve, kunne man oppleve at oppnådd brannmotstandstid kunne variere med inntil 10 minutter for identiske prøvestykker (Wickstrøm, 1988).

Det ble påpekt at en stor del av varmeoverføringen til et prøvestykke i en ovn skjer gjennom stråling, og at dette ikke var noe de små termoelementene var i stand til å ta tilstrekkelig høyde for.

Måleinstrumentene bør i størst mulig grad gjenspeile den reelle belastningen prøvestykket blir utsatt for, og det ble derfor argumentert for at måleinstrumentene burde ha en stor overflate, samt være orientert på en måte som gjør at man fanger opp den samme belastningen det aktuelle prøvestykket skal utsettes for.

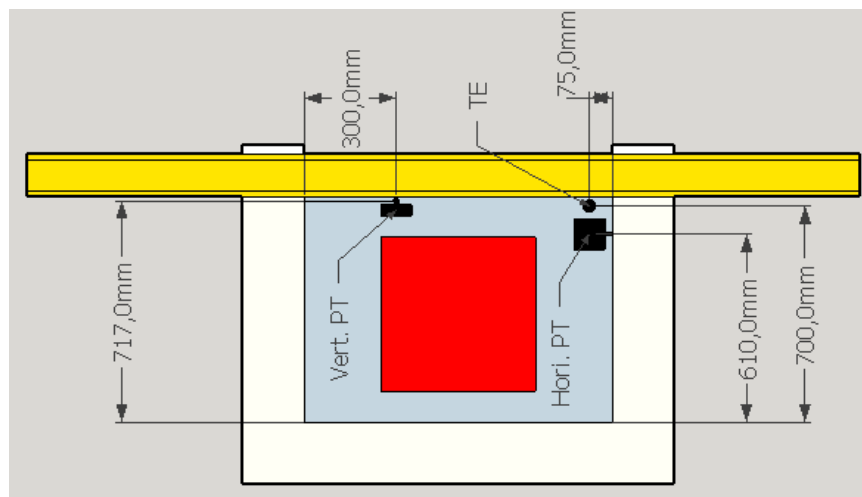
Et typisk platetermometer er vist i Figur 28, og består av et termoelement som er festet i senter av en 0,7 mm tykk metallplate, med en størrelse på 100 x 100 mm. Denne siden isoleres med 10 mm isolasjon, mellom annet for å hindre tilbakestråling fra prøvestykket, og kan anses som termometerets bakside, som skal vende mot prøvestykket ved bruk i forbindelse med brannmotstandstesting.



Figur 28 Platetermometer

Med sin store overflate måler et platetermometer en temperatur som ligger mellom strålings- og gasstemperaturen. Denne temperaturen har fått navnet adiabatisk overflatetemperatur, og er temperaturen til en overflate som ikke kan absorbere varme (Wickstrøm, 2016).

For å forsøke å få et reelt bilde av brannbelastningen prøvestykket ble utsatt for, ble det valgt å installere både et horisontal- og et vertikallorientert platetermometer. For å få realistiske målinger vil det være viktig å velge en plassering som kan representere belastningen stålbjelken og prøvestykket blir utsatt for, altså både nær disse komponentene, og i nærheten av forbrenningssonen. Det må i tillegg tas hensyn til at overflaten på 100 x 100 mm tar opp betydelig plass i et forsøksoppsett av denne størrelsen, og dette er også viktig å ta hensyn til ved valg av plassering. De må ikke ha en plassering hvor de oppnår en funksjon hvor det kan tenkes at de påvirker forsøket i nevneverdig grad. Det er derfor valgt å trekke de noe unna aksen mellom prøvestykkets og gassbrennerens senter. Det vertikalt orienterte termometeret ble festet til en stang som kom ned gjennom brennkammerets takkonstruksjon. Det horisontalt orienterte termometeret var planlagt lokalisert under prøvestykket, like ved det vertikale. Problemer med å få en stabil innfesting førte til at ble valgt en ny plassering, med innfesting via en stang gjennom en av brennkammerets vegger. I det vertikale planet var platetermometerene plassert i en høyde på 0,75 m fra bakkenivå til underkant av termometerene. Lokaliseringen av platetermometerene i det horisontale planet kan ses i Figur 29.



Figur 29 Lokalisering av platetermometer (PT) og termoelement (TE) i brennkammer

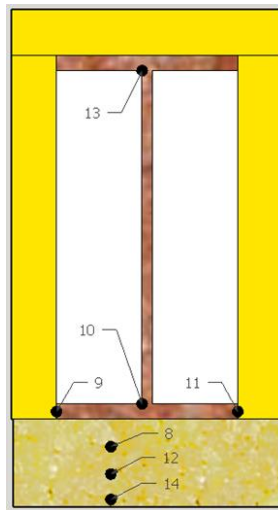
Det ble benyttet to ulike typer termoelementer under forsøket. Inne i brennkammeret ble det montert en vertikal rekke med termoelementer i posisjon markert i Figur 29. Disse ble installert for hver 0,25 m avstand fra gulvet, samt 0,05 m under taket, og var av typen manteltermoelement med en innkapslet sensitiv føler i enden. Den samme typen termoelement ble brukt for å foreta temperaturmålinger i ulike dybder i prøvestykket. Disse ble forsøkt plassert i dybder på henholdsvis 15, 30 og 44 mm fra prøvestykkets overside, bortsett fra i forsøkene hvor det ble benyttet gips, da det i disse tilfellene ble utført målinger i overgangen mellom tre og gips i stedet for dybden på 44 mm. For å overvåke

temperaturen i ulike punkter i stålbjelken ble det brukt termoelementer av typen med ubeskyttede følere som tvinnes og sveises sammen. Disse ble i tillegg punktsveiset fast i stålet ved hjelp av et sveiseapparat, som vist i Figur 30.



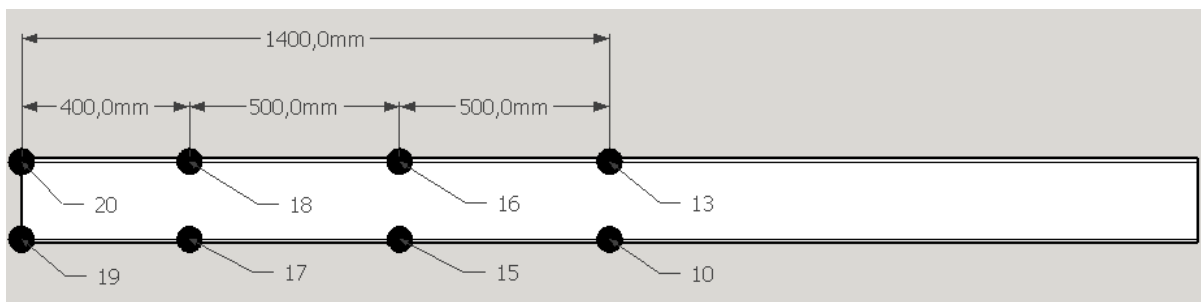
Figur 30 Punktsveising av termoelement i stålbjelke

Det ble lagt ekstra vekt på å ha mange målinger i tverrsnittet av bjelkens og prøvestykkets senter. I Figur 31 vises en skisse av dette snittet, med markerte punkter for termoelementenes posisjonering. For at de tre hullene i prøvestykket ikke skulle komme i konflikt med hverandre ble det øverste og nederste hullet, nummer 8 og 14, trukket 25 mm ut i bjelkens lengderetning til hver sin side.



Figur 31 Tverrsnittskisse

For å kunne følge med på varmetransporten i lengderetningen av stålbjelken ble det plassert termoelementer identisk med posisjonen til elementene 10 og 13, for hver 0,5 m ut til den ene siden, samt i enden av samme side, som vist i Figur 32.



Figur 32 Lokalisering av termoelementer i bjelkens lengderetning

Dette kan i tillegg delvis observeres på bildet i Figur 30. Fra og med det femte forsøket ble termoelement 10 flyttet 20 mm høyere opp i steget da det lett kom i konflikt med termoelementene som gikk ned i prøvestykket, og løsnet.

For å måle omgivelsestemperatur under hvert forsøk ble det montert et termoelement i en avstand på 1,5 m fra brennkammeret. Samtlige termoelement og platetermometer ble koblet opp mot en felles koblingsboks, som igjen var viderekoblet mot en skanner som leste av temperaturen hvert 5. sekund. Denne var igjen koblet opp mot software på en bærbar datamaskin, og temperaturmålingene kunne dermed både følges i sanntid under forsøkene, samt lagres for videre evaluering i etterkant. En fullstendig oversikt over benyttet instrumentering med en kort forklaring kan ses i Tabell 8, og vil sett i sammenheng med Figur 29, Figur 31 og Figur 32 gi en fullstendig oversikt over forsøkets instrumenteringsoppsett.

Tabell 8 Oversikt over instrumentering

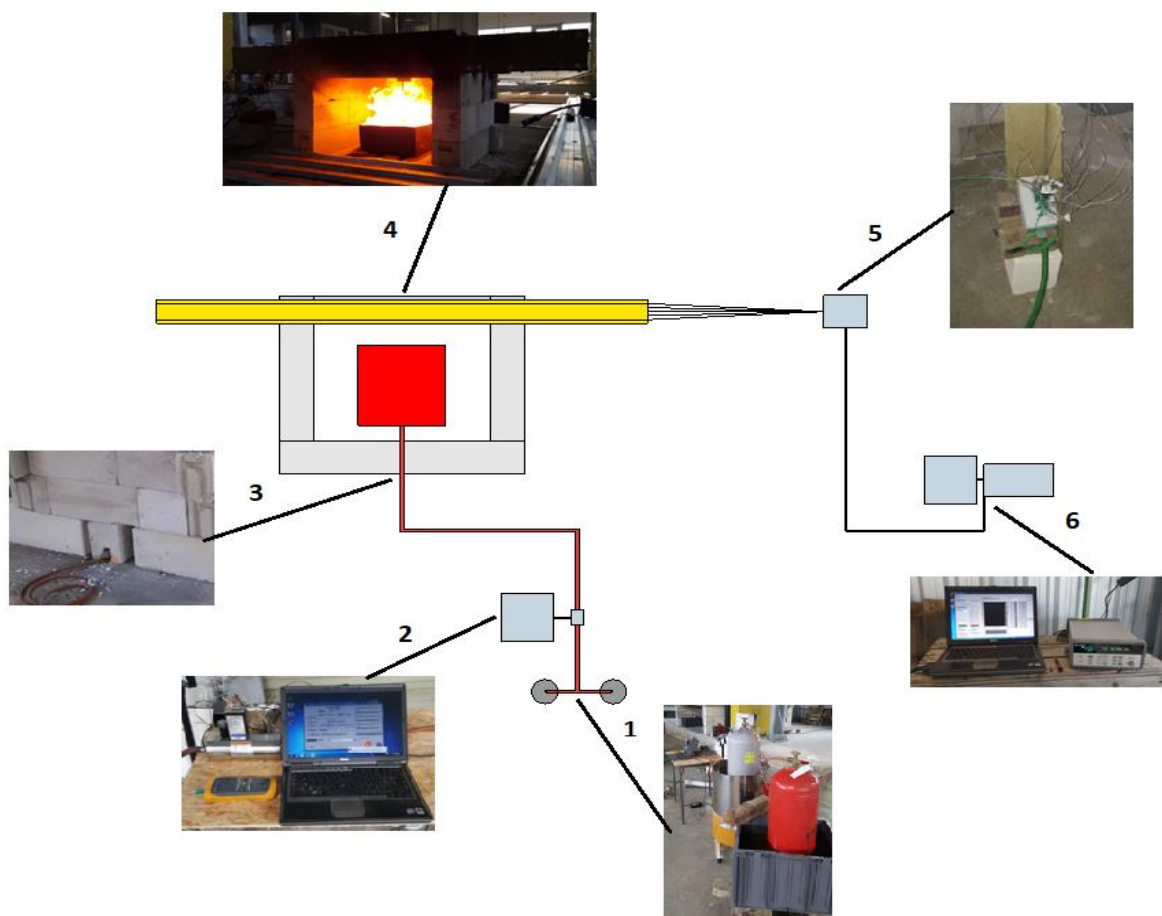
Punkt	Plassering	Beskrivelse
1	0,25 m over bakkeplan i brennkammer	Termoelement 1 -4 er plassert i en vertikal rekke i ulike høyder inne i brennkammeret
2	0,50 m over bakkeplan i brennkammer	
3	0,75 m over bakkeplan i brennkammer	
4	0,95 m over bakkeplan i brennkammer	

5	Horisontalt orientert i nærheten av prøvestykket i brennkammer	Platetermometer 5 og 6 er plassert i nærheten av prøvestykket for å registrere adiabatisk overflatetemperatur
6	Vertikalt orientert i nærheten av prøvestykket i brennkammer	
7	Utsiden av brennkammer	Termoelement plassert i en avstand på 1,2 m fra siden av brennkammeret, for å registrere omliggende temperatur
8	Prøvestykket	Termoelement bort ned i prøvestykket fra oversiden, i en dybde på ca. 0,015 m
9	Stålbjelkens sentertverrsnitt	Termoelement plassert på kortsiden av nedre flens, på siden vendt inn mot brennkammer
10	Stålbjelkens sentertverrsnitt	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og nedre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
11	Stålbjelkens sentertverrsnitt	Termoelement plassert på kortsiden av nedre flens, på siden vendt ut fra brennkammer
12	Prøvestykket	Termoelement bort ned i prøvestykket fra oversiden, i en dybde på ca. 0,03 m
13	Stålbjelkens sentertverrsnitt	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og øvre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
14	Prøvestykket	Termoelement bort ned i prøvestykket fra oversiden, i en dybde på ca. 0,045 m
15	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og nedre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
16	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og øvre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
17	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og nedre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer

18	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og øvre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
19	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og nedre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer
20	Stålbjelken	Termoelement plassert i overgangen mellom steg og øvre flens, på siden av steg vendt inn mot brennkammer

3.1.7. Samlet oversikt over forsøksoppsett

Komponentene beskrevet i tidligere avsnitt er montert sammen. Figur 33 viser en totaloversikt over forsøksoppsettet, med tilhørende beskrivelse av hver komponent i Tabell 9. Det påpekes at skissen ikke er skalert.



Figur 33 Oversiktsskisse over forsøksoppsett

Tabell 9 Forklaring til oversiktsskisse

Nr.	Navn	Kommentar
1	Gassforsyning	To gassflasker koblet sammen med en T-forbindelse. Den ene flasken er en reserveflaske som bare åpnes i tilfelle hvor hovedflasken ikke klarer å opprettholde nødvendig gassforsyning
2	Kontrollstasjon	Styringsenhet koblet opp mot software på en bærbar PC, som gjorde det mulig å kontrollere gasstrømningsraten gjennom systemet.
3	Utsparinger	Utsparinger for ekstra lufttilførsel til brennkammer, samt for å muliggjøre innførsel av gasslange til gassbrenner.
4	Brennkammer	Innebygget rom med gassbrenner og en åpen vegg.
5	Koblingsboks	Boks hvor alle 18 termoelement og 2 plate termometere ble tilkoblet for mottak og videresending av signal.
6	Temperaturscanner	Mottok og scannet signalene fra koblingsboksen, presenterte dette i form av temperaturmålinger i sanntid via software på bærbar PC.

3.2. Gjennomføring av forsøk

Det ble gjennomført totalt ni forsøk, da det var ønskelig med flest mulig repetisjoner for å få flere sett data. Første prioritet var forsøk med en eksponeringstid på 60 minutter, for å få registreringer av temperaturdata i stålbjelken som kan knyttes opp mot 60 minutters lastbærende krav. I tillegg ble det gjort forsøk med 15- og 30 minutters eksponeringstid. Formålet med disse forsøkene var å kunne observere hvordan forkullingsfronten beveger seg i prøvestykket. Liste over de ulike forsøkene og konfigurasjonene kan ses i Tabell 10.

Tabell 10 Forsøksoversikt med beskrivelse

Navn	Oppsett	Eksponeringstid
Forsøk 1	Hel-isolert stålbjelke uten prøvestykke	60 min
Forsøk 2	48 x 148 mm prøvestykke av tre	60 min
Forsøk 3	48 x 148 mm prøvestykke av tre	60 min
Forsøk 4	48 x 148 mm prøvestykke av tre	60 min
Forsøk 5	48 x 148 mm prøvestykke av tre	30 min

Forsøk 6	48 x 148 mm prøvestykke av tre	30 min
Forsøk 7	48 x 148 mm prøvestykke av tre, med gipskledning	30 min
Forsøk 8	48 x 148 mm prøvestykke av tre	15 min
Forsøk 9	48 x 148 mm prøvestykke av tre, med gipskledning	60 min

3.2.1. Prosedyre

Hvert forsøk startet med klargjøring av prøvestykke. Dette innebar at trematerialet som skulle bli brukt under forsøket ble kappet i riktig lengde, fuktinnholdet målt, og deretter fastlåst i ønsket posisjon under stålbjelken ved hjelp av to tvinger. Senter i de tidligere nevnte hull i bjelkens nedre flens ble markert på oversiden av prøvestykket ved å slå et par lette slag på en spiss spiker, som ble midtstilt gjennom disse hullene fra oppsiden. Prøvestykket ble deretter frigjort igjen, og det klargjort for forboring. All boring i prøvestykket ble gjennomført ved hjelp av en håndholdt batteridrill. De fire hullene som var tiltenkt en funksjon for innfesting av prøvestykket ble forboret gjennom hele prøvestykkets tykkelse med trebor med diameterstørrelse på 5 mm. I de tre hullene hvor det skulle plasseres termoelementer ned fra oppsiden ble det forsøkt å få treffe dybder på henholdsvis 15 mm, 30 mm og 44 mm ned i trematerialet. Disse dybdene var markert på flere trebor med en diameterstørrelse på 3 mm, og det ble i tillegg tatt en kontrollmåling for hvert hull ved å stikke et termoelement ned i dette, som vist i Figur 34, markere punktet hvor tråden forsvant ned i hullet, for så å dra denne opp igjen og måle avstand fra dette punktet til termoelementets sensitive ende.



Figur 34 Boring av hull i prøvestykket



Figur 35 Liming av termoelementer

Etter at forboringen var unnagjort ble det lagt en streng med lim på den delen av prøvestykkets overflate som skulle anordnes mot undersiden av stålbjelken, og prøvestykket ble deretter fastlåst i ønsket posisjon ved hjelp av to tvinger, samt at det ble sjekket at termoelementene som skulle være i

prøvestykket under forsøket lett kunne monteres. Det ble så kappet til fire innfestingsstykker i tre av samme størrelse, med en grunnflate på 48 x 35 mm, og en høyde på 183 mm. Disse ble festet i spenn i steget mellom øvre og nedre flens, som vist i Figur 36, sentrert over senter av de fire hullene ment for innfesting, og prøvestykket ble så permanent festet ved hjelp av fire skruer. Dette var 6,0 x 80 mm treskruer som ble skrudd fra undersiden av prøvestykket, opp gjennom de forborede hullene i tre- og stålmaterialet, og videre inn i innfestingsstykkene. Etter at prøvestykket var permanent festet ble termoelementer stukket ned i de tre hullene, som ble fylt opp med keramisk lim i toppen, som vist i Figur 35. Denne type lim tåler en temperatur på 1100 °C, samt at den hardnet ganske raskt. Ved å lime termoelementene fast i stålbjelken ble det sikret at termoelementene ville være i samme posisjon, både før, under og etter forsøket. På denne måten kunne man kontrollmåle lengden de stakk ned nedenfor undersiden av stålbjelken i etterkant av forsøket, og dermed få en nøyaktig måling av lokaliseringen av termoelementene i prøvestykket.



Figur 36 Permanent innfestet prøvestykke

Etter at alt arbeidet med prøvestykket var avsluttet, ble de delene av stålbjelken hvor brannisolasjonen var fjernet isolert på nytt. All isolasjon ble inspisert mellom hvert forsøk, og vurdert i forhold til om det var nødvendig å bytte den ut. Brannisolasjonen mest utsatt for brannpåkjenning, på innsiden og utsiden av stålbjelken i brennkammerets lysåpning, måtte alltid fjernes mellom hvert forsøk, for tilkomst for innfesting av prøvestykke og termoelementer. Isolasjonen ble fastmontert ved hjelp av sveiseapparat og sveisestifter. Omtrent samtidig med at dette arbeidet ble påbegynt, ble i tillegg varmeelementet skrudd på i vannbadet som gassflasken skulle være plassert i, slik at oppvarmingen av dette vannet ble igangsatt. Etter at den manglende brannisolasjonen var erstattet, ble takkonstruksjonen lagt på plass.

Massen til begge gassflaskene ble målt og notert før tilkobling, og som en sikkerhetsbarriere ble det koblet til en brannslange til et vannuttak like utenfor hallen forsøkene ble utført i, og det ble satt trykk

på denne. Viften i hallen ble deretter satt i drift på om lag 60 % av maksimal ytelse. Dette var det siste som ble gjort av forberedelser, før selve gjennomføringen av forsøket kunne settes i gang.

Denne startet med at det ble igangsatt loggføring av temperaturmålinger fra scanneren som overvåket platetermometerene og termoelementene, på den bærbare datamaskinen denne var koblet sammen med. En opptenningsbrikett ble satt fyr på, og plassert på sanden i gassbrenneren. Deretter ble ventilen i gassflasken som skulle stå for forsyning av gass åpnet, og man kunne etter kort tid observere at gassen nådde frem til den brennende briketten i kammeret og antente, som vist i Figur 37.



Figur 37 Brennkammer under forsøk

Under gjennomføringen av forsøket ble temperaturen i vannet som skulle sørge for oppvarming av gassflasken jevnlig målt, og dersom temperaturen nærmet seg 25 °C ble varmeelementet skrudd av. Foretatte observasjoner ble notert på forsøksskjema, og det ble jevnlig fulgt med på temperaturmålingene fra scanneren, samt sjekket at styringsenheten for mating av gass fungerte som tiltenkt.

Forsøket ble avsluttet ved at ventilen på gassflasken som forsynte systemet ble skrudd til lukket posisjon. På denne måten ble transportsystemet tømt for gass. Takkonstruksjonen ble trukket bort fra brennkammeret for rask utlufting, og prøvestykket ble forsøkt nedkjølt ved hjelp av å spraye på vann fra håndholdte sprayflasker, og rasket mulig skrudd løst og fjernet fra posisjonen under stålbjelken. Brannisolasjonen på innsiden og utsiden av brennkammerets lysåpning ble fjernet, mellom annet for å kunne observere og ta ut innfestingsklossene.

Loggføringen av temperaturdata ble stoppet og lagret på minnepenn, og gassflaskenes masse ble på nytt målt og notert. Avslutningsvis ble viften stoppet, og brannslangen frakoblet og tømt for vann.

4. Forkullingsberegninger etter Eurokode 5

Metoder og data for å utføre teoretiske forkullingsberegninger finnes i Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner – Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering, og metoder beskrevet i dette kapittelet følger fremgangsmåter gitt i denne standarden, i tillegg er alle oppgitte formler hentet fra denne standarden (Standard Norge, 2004).

Forkullingsfronten defineres i denne standarden til å følge posisjonen til 300 °C-isotermen, og forkullingsdybden er distansen fra opprinnelig ytre overflate til nevnte forkullingsfront.

Ved beregninger må det tas hensyn til at hastigheten forkullingsfronten beveger seg gjennom trematerialet med, vil være ulik for beskyttede og ubeskyttede overflater. For beskyttede overflater vil forkullingsraten være ulik før og etter svikt i beskyttelsen. For bindingsverk hvor hulrommene er fylt med isolasjon er det beskrevet en detaljert beregningsprosedyre i ett av standardens tillegg.

4.1. Ubeskyttede overflater

For ubeskyttede overflater er endimensjonal forkullingsdybde gitt med Formel 4.1,

$$d_{char,0} = \beta_0 t \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

hvor $d_{char,0}$ er den endimensjonale forkullingsdybden, β_0 er den endimensjonale forkullingsraten ved belastning etter standard temperatur-tidkurven, og t er tid.

Formel 4.1 kan også benyttes på beregninger av forkullingsdybde i tverrsnitt, gitt at dette er av en viss størrelse, slik at den ekstra belastningen som vil oppstå i form av belastning fra flere retninger ikke er nødvendig å ta hensyn til. Kravet vil være en minste bredde i tverrsnittet som til enhver tid skal være over:

1. $2 d_{char,0} + 80$ for $d_{char,0} \geq 13 \text{ mm}$
2. $8,15 d_{char,0}$ for $d_{char,0} < 13 \text{ mm}$

For beregninger etter at minimumskravet ikke lenger er innfridd benyttes nominell forkullingsrate, og forkullingsdybden kan beregnes ved hjelp av Formel 4.2

$$d_{char,n} = \beta_n t \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

hvor $d_{char,n}$ er den nominelle forkullingsdybden, β_n er den nominelle forkullingsraten.

Forkullingsratene for konstruksjonsvirke av gran og furu er oppgitt i Eurokoden og gjengitt i Tabell 11

Tabell 11 En-dimensjonal og nominell forkullingshastighet

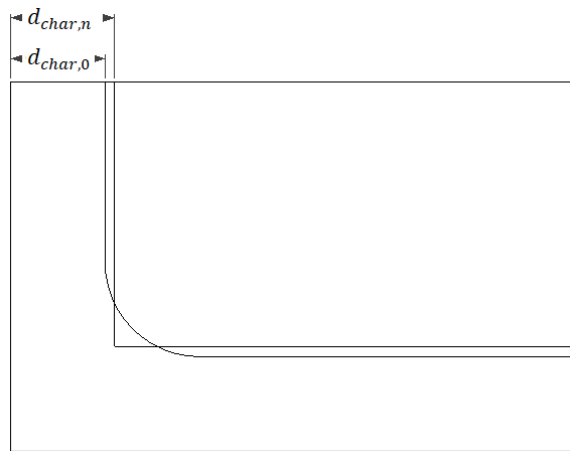
	β_0	β_n
Bartre med tetthet ≥ 290 kg	0,65 mm/min	0,80 mm/min

Beregninger for å bestemme grensen mellom anvendelse av de to ulike typene forkullingsrate er gjort i Tabell 12.

Tabell 12 Grenseskille mellom bruk av endimensjonal og nominell forkullingsrate for ulike dimensjoner av konstruksjonsvirke

Materialdimensjon	$d_{char,0}$	Ny bredde	Krav:
48x148 mm	12,9 mm	$(148 - (2 \cdot 12,9))\text{mm} = 122,2 \text{ mm}$	$8,15 \cdot 12,9 \text{ mm} = 105,1 \text{ mm}$
	13,0 mm	$(148 - (2 \cdot 13))\text{mm} = 122,0 \text{ mm}$	$((2 \cdot 13) + 80)\text{mm} = 106,0 \text{ mm}$
For å finne krysningspunktet mellom den nye bredden og kravet kan man løse:			
$148 \text{ mm} - 2d_{char,0} = 80 \text{ mm} + 2d_{char,0}$ $d_{char,0} = 17 \text{ mm}$			
Tidspunktet for når dette vil inntreffe blir da etter:			
$\frac{17 \text{ mm}}{0,65 \text{ mm/min}} = 26,1 \text{ min}$			
48x198 mm	12,9 mm	$(198 - (2 \cdot 12,9))\text{mm} = 172,2 \text{ mm}$	$8,15 \cdot 12,9 \text{ mm} = 105,1 \text{ mm}$
	13,0 mm	$(198 - (2 \cdot 13))\text{mm} = 172,0 \text{ mm}$	$((2 \cdot 13) + 80)\text{mm} = 106,0 \text{ mm}$
For å finne krysningspunktet mellom den nye bredden og kravet kan man løse:			
$198 \text{ mm} - 2d_{char,0} = 80 \text{ mm} + 2d_{char,0}$ $d_{char,0} = 29,5 \text{ mm}$			
Tidspunktet for når dette vil inntreffe blir da etter:			
$\frac{29,5 \text{ mm}}{0,65 \text{ mm/min}} = 45,4 \text{ min}$			

Ved bruk av den endimensjonale forkullingsraten i tversnitt skal det tas hensyn til avrundig i hjørnene, og radiusen i disse skal være lik forkullingsdybden. De ulike situasjonene er vist i Figur 38.



Figur 38 En-dimensjonal og nominell forkullingsdybde

4.2. Beskyttede overflater

For beskyttede overflater vil forkullingsprosessen settes i gang på et forsinket tidspunkt, t_{ch} , i forhold til situasjoner med ubeskyttede overflater. Forkulling kan fortsatt forekomme før beskyttelsen svikter ved tiden t_f , men da med en lavere rate enn verdier angitt i Tabell 11. Etter at beskyttelsen svikter vil forkullingsraten akselerere til en hastighet som er høyere enn verdier i nevnte tabell, frem til et tidspunkt t_a , hvor hastigheten igjen vil reduseres, og stabiliseres på nivå som angitt i Tabell 11. Tidspunktet t_a er definert som den korteste tiden det tar til at forkullingsdybden enten er den samme som for en identisk komponent uten beskyttelse, eller er maksimalt 25 mm.

For standard A gipsplater kan tiden det tar frem til den forsinkede oppstarten av forkulling beregnes ved hjelp av Formel 4.3

$$t_{ch} = 2,8 h_p - 14 \text{ [min]} \quad (4.3)$$

hvor h_p er platetykkelsen i mm.

For situasjoner med to lag plater beregnes h_p som tykkelsen av det ytre laget pluss halvparten av det indre laget for standard A gipsplater.

Svikt i beskyttelsen kan komme som følge av forkulling og nedbryting av beskyttelsesmaterialet, bruk av for korte innfestingsmidler, eller for lang avstand mellom disse. For standard A gipsplater er t_f i følge Eurokoden definert til å være lik t_{ch} , når denne er beregnet etter Formel 4.3. Forkullingsberegninger i

tiden etter svikt utføres ved å benytte verdier hentet fra Tabell 11, multiplisert med en faktor $k_3=2$ som for å ta hensyn til den økte hastigheten som oppstår i tiden etter svikt. Dette brukes frem til tiden t_a . For tilfeller med identisk tidspunkt for oppstart av forkulling og svikt i beskyttelse, stilles det minimumskrav i forhold til tidsbegrensningen t_a , som beregnes som minimumsverdien gitt av Formel 4.4

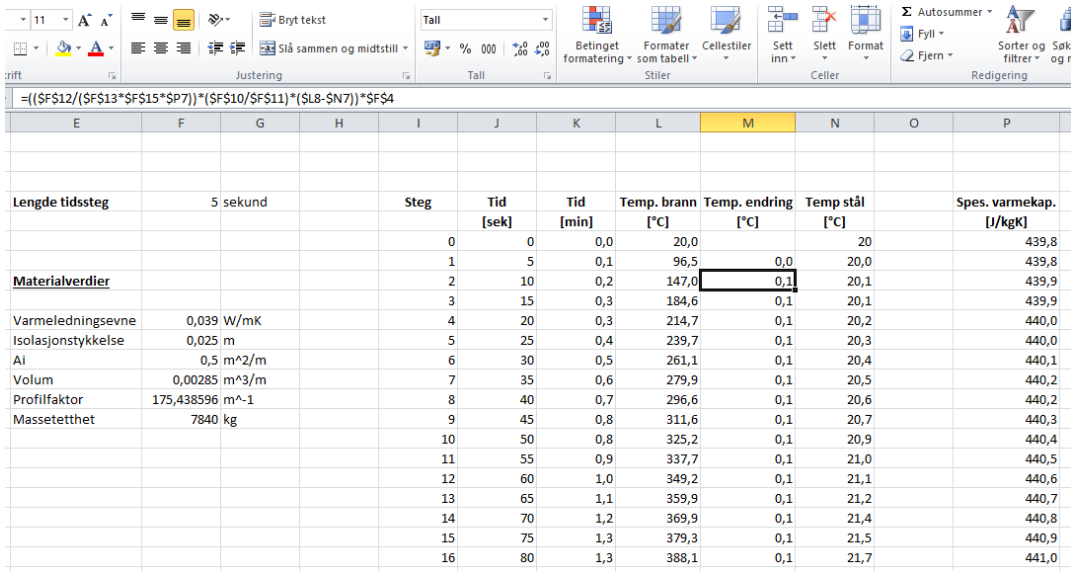
$$t_a = \min \left\{ \begin{array}{l} 2t_f \\ \frac{25}{k_3\beta_n} + t_f \end{array} \right. \quad (4.4)$$

5. Numeriske beregninger

For å kunne vurdere den teoretisk beregnede temperaturutviklingen i stålbjelken når denne er isolert med Conlit, og utsatt for en brannbelastning etter standard temperatur-tidkurven, opp mot resultater fra det utførte forsøket, gjennomføres det numeriske beregninger. Formel 2.12 legges til grunn for disse beregningene, og i Tabell 13 er nødvendige data listet opp. Figur 39 viser utsnitt av de numeriske beregningene gjennomført i Ms Excel.

Tabell 13 Verdier for parametere benyttet i numeriske beregninger

A	Eksponert overflate	0,5	m ² /m
V	Stålkomponentens volum	2,85*10 ⁻³	m ³ /m
A/V	Profilfaktor	175	m ⁻¹
ρ	Masstetthet, stål	7840	kg/m ³
k_{in}	Varmeledningsevne, Conlit	0,039	W/mK
d_{in}	Isolasjonstykkelse, Conlit	0,025	m
c	Spesifikk varmekapasitet: Temperaturavhengig, bestemmes for intervallet mellom 20 °C ≤ θ _a < 600 °C ifølge Eurokode 3 av Formel 5.1 (Kilde) $c = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad \left[\frac{J}{kgK} \right] \quad (5.1)$		



Lengde tidssteg	5 sekund	Steg	Tid [sek]	Tid [min]	Temp. brann [°C]	Temp. endring [°C]	Temp stål [°C]	Spes. varmekap. [J/kgK]
		0	0	0,0	20,0		20	439,8
		1	5	0,1	96,5	0,0	20,0	439,8
Materialverdier		2	10	0,2	147,0	0,1	20,1	439,9
		3	15	0,3	184,6	0,1	20,1	439,9
Varmeledningsevne	0,039 W/mK	4	20	0,3	214,7	0,1	20,2	440,0
Isolasjonstykkelse	0,025 m	5	25	0,4	239,7	0,1	20,3	440,0
Ai	0,5 m ² /m	6	30	0,5	261,1	0,1	20,4	440,1
Volum	0,00285 m ³ /m	7	35	0,6	279,9	0,1	20,5	440,2
Profilfaktor	175,438596 m ⁻¹	8	40	0,7	296,6	0,1	20,6	440,2
Massetetthet	7840 kg	9	45	0,8	311,6	0,1	20,7	440,3
		10	50	0,8	325,2	0,1	20,9	440,4
		11	55	0,9	337,7	0,1	21,0	440,5
		12	60	1,0	349,2	0,1	21,1	440,6
		13	65	1,1	359,9	0,1	21,2	440,7
		14	70	1,2	369,9	0,1	21,4	440,8
		15	75	1,3	379,3	0,1	21,5	440,9
		16	80	1,3	388,1	0,1	21,7	441,0

Figur 39 Utsnitt av regneark konstruert for numeriske beregninger

6. Resultat

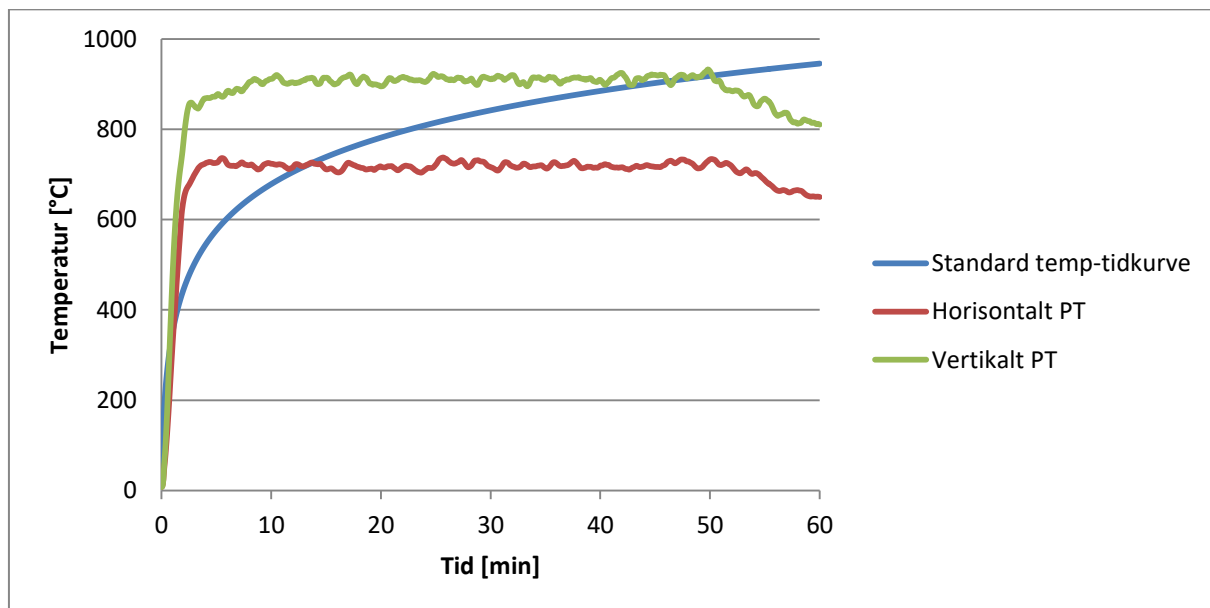
I resultatdelen gjennomgås først data fra tre enkeltforsøk; forsøket med Conlit som prøvestykke, samt forsøk med 30- og 60 minutters varighet. Avslutningsvis i dette kapitlet sammenlignes resultater fra teoretiske forkullingsberegninger med resultater fra utførte forsøk. I Vedlegg 6 til Vedlegg 13 presenteres gjennomsnittresultater fra forsøk med 30- og 60 minutters varighet.

6.1. Resultater fra forsøket med Conlit som prøvestykke

I dette delkapitlet blir det gjennomgått resultater fra forsøket med Conlit som prøvestykke og 60 minutters gjennomføringstid.

6.1.1. Temperatur i brennkammeret

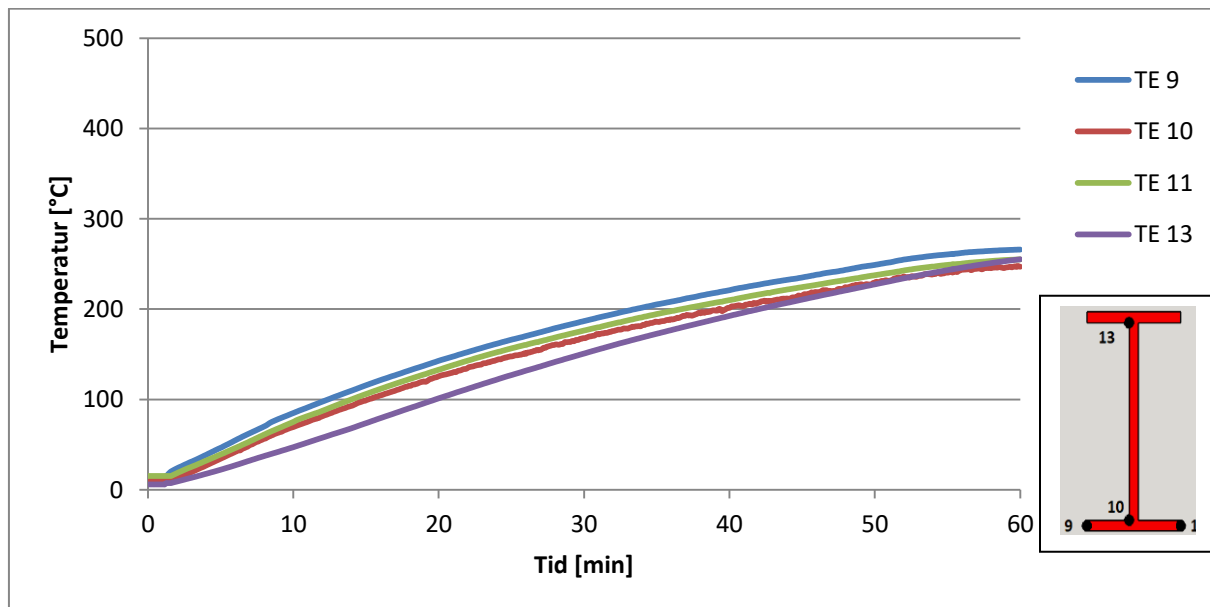
I Figur 40 presenteres temperaturen registrert av de to platetermometerene i brennkammeret som funksjon av tid. I tillegg er standard temperatur-tidkurven inntegnet i samme figur for enkel sammenligning. Da det gjenstod ti minutter av forsøket oppstod det en svikt i gassforsyningen, og det ble levert gass med en synkende rate ut forsøkets varighet. Dette resulterer i synkende temperaturer i det siste ti-minutters intervallet.



Figur 40 Temperatur som funksjon av tid for forsøk med Conlit

6.1.2. Temperatur i stålbejelkens tverrsnitt

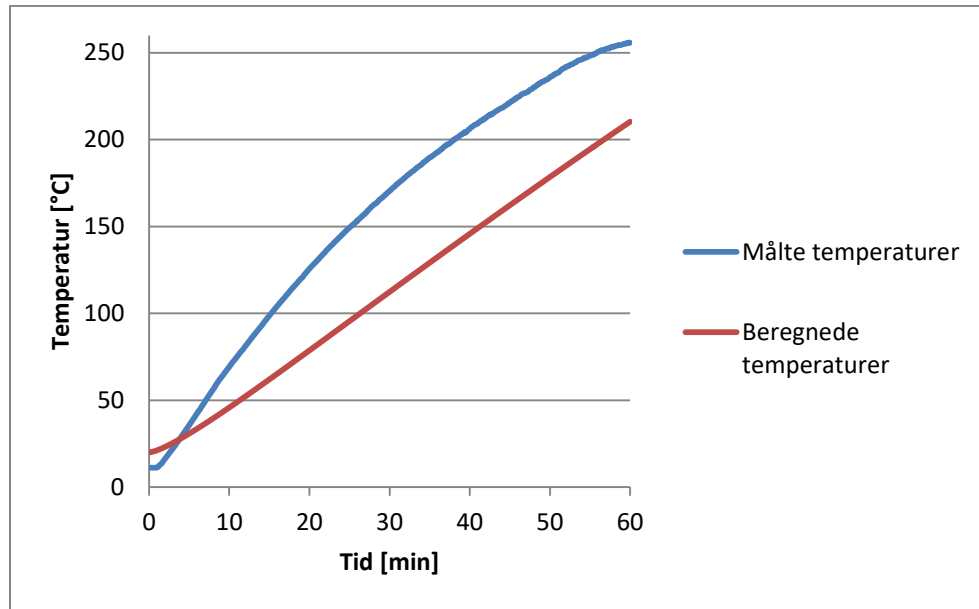
I Figur 41 presenteres temperaturen registrert av de fire termoelementene i stålbejelkens sentertverrsnitt som funksjon av tid. Det kan observeres at det etter hvert oppstår en tilnærmet uniform temperatur i de fire målepunktene.



Figur 41 Temperatur i stålbejelkens tverrsnitt som funksjon av tid for forsøk med Conlit

For forsøksoppsettet med Conlit er det også utført numeriske beregninger i forhold til forventet temperaturutvikling i stålbejelken. Dette er gjennomført i Ms Excel, hvor verdiene fra Tabell 13 i kapittel fem er benyttet som inngangsparametere for beregningene. Den temperaturavhengige spesifikke varmekapasiteten bestemmes løpende ved hjelp av Formel 5.1, og varierer fra 439,8 J/kgK ved oppstart til 533,5 J/kgK ved avslutning, gitt et tidssteg på 5 sekund.

Beregnet temperatur som funksjon av tid presenteres i Figur 42. I denne figuren er også gjennomsnittet av de fire målepunktene under forsøket tegnet inn for sammenligning.



Figur 42 Beregnede og målte temperaturer som funksjon av tid for for forsøk med Conlit

Gjennomsnittstemperaturen i tverrsnittet målt under forsøket ligger på et høyere nivå enn det som kommer frem av de numeriske beregningene. Sammenlignes dataene fra forsøket med de beregnede dataene kommer det frem at temperaturen øker med en høyere rate under forsøket i intervallet 0-minutter. I Tabell 14 er det listet opp målte og beregnede temperaturverdier for hvert tiende minutt. Det kommer tydelig frem at i intervallet 0-30 minutter er det en mye høyere vekstrate for de reelle verdiene fra forsøket, enn de numerisk beregnede. Temperaturen i stålbjelken øker i forsøket med 66,9 °C mer enn i beregningene. I de to neste ti-minutters intervaller er det en jevnere rate, før det i det siste intervallet, mellom 50 og 60 minutter, er den beregnede verdien som øker mest, med en økning på 12 °C mer enn den målte.

Tabell 14 Målte og beregnede verdier i stålbjelkens tverrsnitt ved ulike tidspunkt for forsøk med Conlit

Tidspunkt [min]	Målt verdi [°C]	Beregnet verdi [°C]	Differanse [°C]
0	11,2	20	-8,8
10	69,2	45,8	23,4
20	125,7	78,7	47,0
30	170,5	112,4	58,1
40	206,2	145,8	60,4
50	235,8	178,5	57,5
60	255,8	210,3	45,5

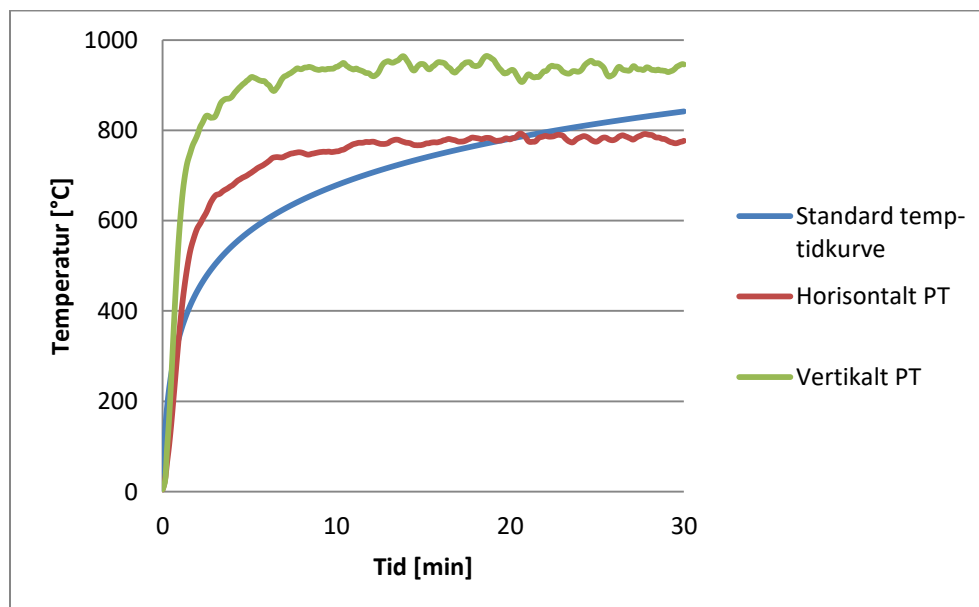
Mye av grunnen til dette ligger nok i at de beregnede verdiene tar utgangspunkt i brannbelastning fra standard temperatur-tidkurven, mens det i forsøkene ble benyttet en konstant brannbelastning. Dette betyr at det frem til en viss tid vil være en høyere varmetransport til stålbjelken under forsøket, mens det etter denne tiden vil være størst varmetransport til stålbjelken gitt av belastning fra standardbrannen. I følge dataene kan dette krysningstunktet antas å være etter rundt 40 minutter. I det siste ti-minutters intervallet gasstilførselsraten synkende for dette forsøket, noe som nok fører til at den målte verdien ligger noe lavere enn det som hadde vært reelt dersom en jevn tilførselsrate hadde blitt opprettholdt. I tillegg kan det antas at den totale brannbelastningen ved valgte konstante forsyningsrate av gass gir en høyere brannbelastning enn standard temperatur-tid kurven.

6.2. Resultater fra forsøk med 30 minutters varighet

I dette delkapittelet blir det gjennomgått resultater fra et enkeltforsøk med 30 minutters gjennomføringstid.

6.2.1. Temperatur i brennkammeret

I Figur 43 presenteres temperaturen registrert av de to platetermometerene i brennkammeret som funksjon av tid. I tillegg er standard temperatur-tidkurven inntegnet i samme figur for enkel sammenligning.



Figur 43 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid under gjennomføring av 30 minutters forsøk

6.2.2. Temperatur og forkulling i prøvestykket

Det ble hørt spraking fra prøvestykket under gjennomføringen av forsøket, og ved forsøkets slutt kunne man observere sprekkdannelse i forkullingslaget. Prøvestykket var forbrent i hele dets lengde, noe som kan ses i Figur 44, som er et bilde tatt mot prøvestykkets underside etter at dette ble fraskilt stålbejelken. Størst reduksjon av tverrsnittet ble observert å være i senter av prøvestykket, hvor brannbelastningen kan antas å være på det høyeste.



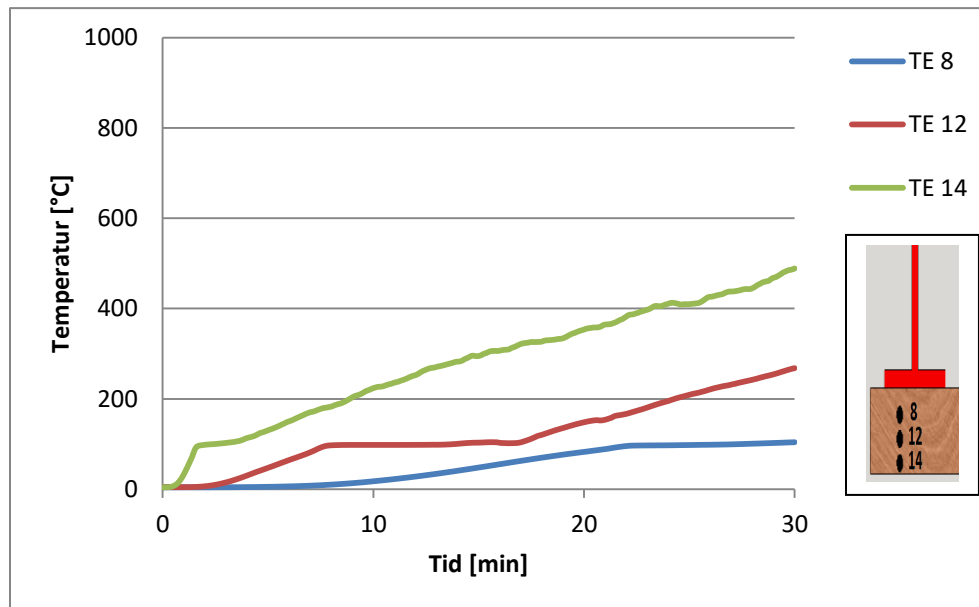
Figur 44 Prøvestykkets underside etter gjennomføring av 30 minutters forsøk

De fire trestykkene montert mellom stålbejelkens øvre og nedre flens, for bruk til innfesting av prøvestykket, ble også fraskilt stålbejelken etter at gjennomføringen av forsøket var over. Disse er avbildet og kan observeres i Figur 45. De to trestykkene til venstre var lokalisert på den siden av stålbejelken som vendte inn mot brennkammeret, mens de to trestykkene til høyre var plassert på motsatt side av stålbejelken. De to sistnevnte var upåvirket av forsøket, og var i sin helhet bestående av friskt tre også etter at de var fraskilt stålbejelken. På de to andre trestykkene ble det, som det kan ses på Figur 45, observert påbegynt forkulling på den ene siden. Dette var på den siden som vendte inn mot steget i bejelken, og var kun helt overfladisk, men med noe sprekkdannelse av en dybde på 3-4 mm inn i materialet.



Figur 45 Prøvestykkets innfesting etter gjennomføring av 30 minutters forsøk

Resultatene fra termoelementene som var lokalisert i ulike dybder i prøvestykket er presentert som funksjon av tid i Figur 46. Termoelement 14 er lokalisert bare 4 mm innenfor prøvestykkets eksponerte underside, og varmes raskt opp. Det observeres også at fordampningsfasen for innholdet av fukt er mye kortere i dette området.



Figur 46 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, 30 minutters forsøk

Forkullingsfronten beveger seg oppover gjennom prøvestykket, og i prosjekteringsstandarder er denne angitt å bevege seg i takt med 300 °C-isotermen (Standard Norge, 2004). I dette forsøket oppnår termoelement 8 en temperatur på 300 °C etter 15 min 20 sek., mens ingen av de andre termoelementene oppnår denne temperaturen. Etter at prøvestykket var avkjølt ble det delt i to for å kunne gjøre observasjoner av forkullingsfronten i tverrsnittet. Resultatet av dette er vist i Figur 47 hvor man tydelig kan se pyrolysefronten og forkullingsfronten, etterfulgt av det forkullede laget. Da det forkullede laget var noe porøst, falt det av noen i biter i prosessen med å dele prøvestykket i to, og det fremstår noe mer ujevnt på bildet enn det var i opprinnelig tilstand.

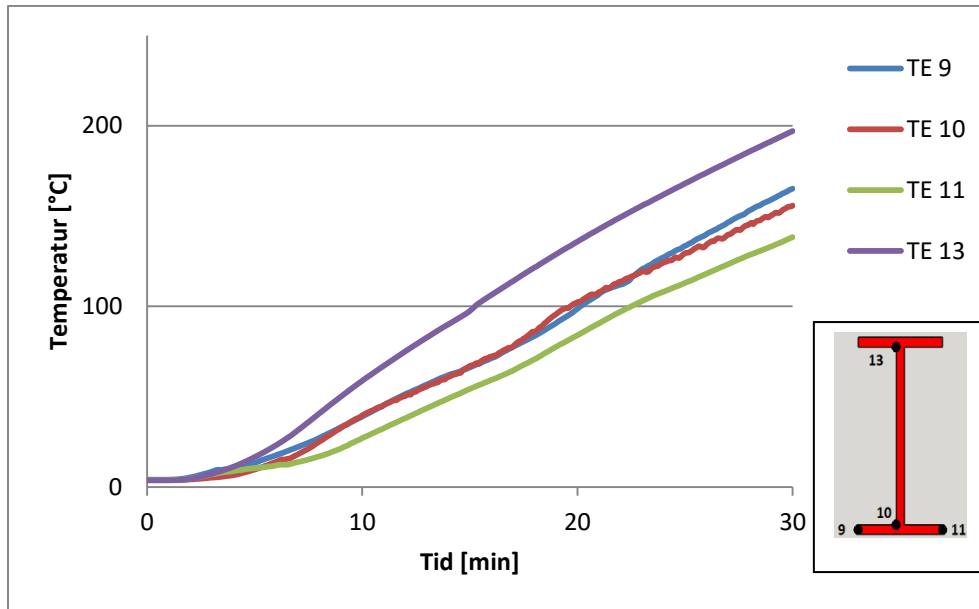


Figur 47 Prøvestykkets tverrsnitt etter gjennomført 30 minutters forsøk

Det nominelle resttverrsnittet som ligger innenfor forkullingsfronten ble i dette forsøket målt til å være 30 x 102 mm. På Figur 47 kan man ovenfor 9 cm merket på tommestokken skimte hullet hvor termoelement 10 var lokalisert. Da disse hullene i følge Figur 20 er lokalisert 2 cm fra stålbjelkens og prøvestykkets senter, kan opprinnelig senter av prøvestykket antas å være ved 7 cm merket på tommestokken. Det kommer tydelig frem at forkullingsprosessen har en høyere hastighet på den siden av prøvestykket som er vendt innover i brennkammeret, og er mest eksponert. Avstanden fra opprinnelig senter til forkullingsfronten på denne siden er omtrent 4,4 cm, mens den samme avstanden på siden som vender ut fra brennkammeret er på 5,8 cm. Det må påpekes at prosessene med pyrolyse og forkulling kan ha pågått i noe ekstra tid utover 30 minutter, i forbindelse med nedkjøling og framontering av prøvestykke.

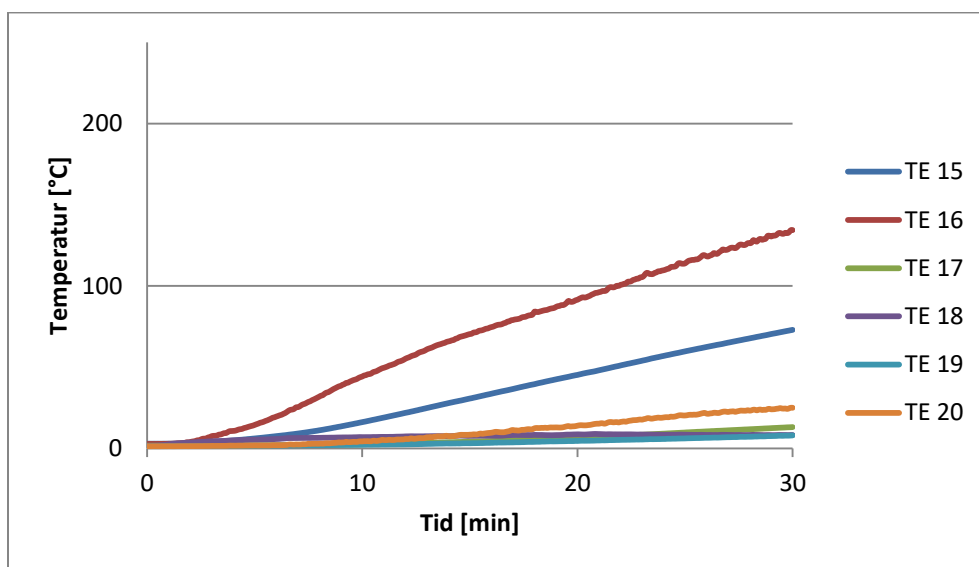
6.2.3. Temperatur i stålbjelke

Registrert temperatur fra de fire termoelementene lokalisert i bjelkens sentertverrsnitt er fremstilt som funksjon av tid i Figur 48. Den høyeste temperaturen i tverrsnittet blir gjennom hele forsøket registrert av termoelement 13 som ligger på den øvre flensen, i nærheten av overgangen til bjelkens steg. Det registreres her en temperatur på oppimot 200 °C. Det at det er det øverst lokaliserte termoelementet som registrerer høyest temperatur kan komme av dominerende varmetransport horisontalt gjennom brannisolasjonen, og inn i hulrommet i bjelkens steg. Energien vil da samle seg i hulrommet øverste kant, opp under den øvre flensen.



Figur 48 Temperatur i stålbjelkens tverrsnitt som funksjon av tid, 30 minutters forsøk

Registrert temperatur fra termoelementene lokalisert utover i bjelkens lengderetning er presentert som funksjon av tid i Figur 49. Termoelementene som ligger 0,5 m ut til siden fra bjelkens senter, i flukt med innsiden av brennkammerets sidevegg, har de største utslagene, med sluttemperatur på rundt 135 °C for det høyest plasserte termoelementet, og tilsvarende verdi på rundt 75 °C for det lavest plasserte termoelementet. For termoelementene lokalisert i en større avstand fra bjelkens senter ble det kun registrert en mindre temperaturøkning. For en fullstendig oversikt over lokaliseringen av termoelementene plassert i bjelkens lengderetning henvises det til Figur 32 i kapittel 3.1.6.



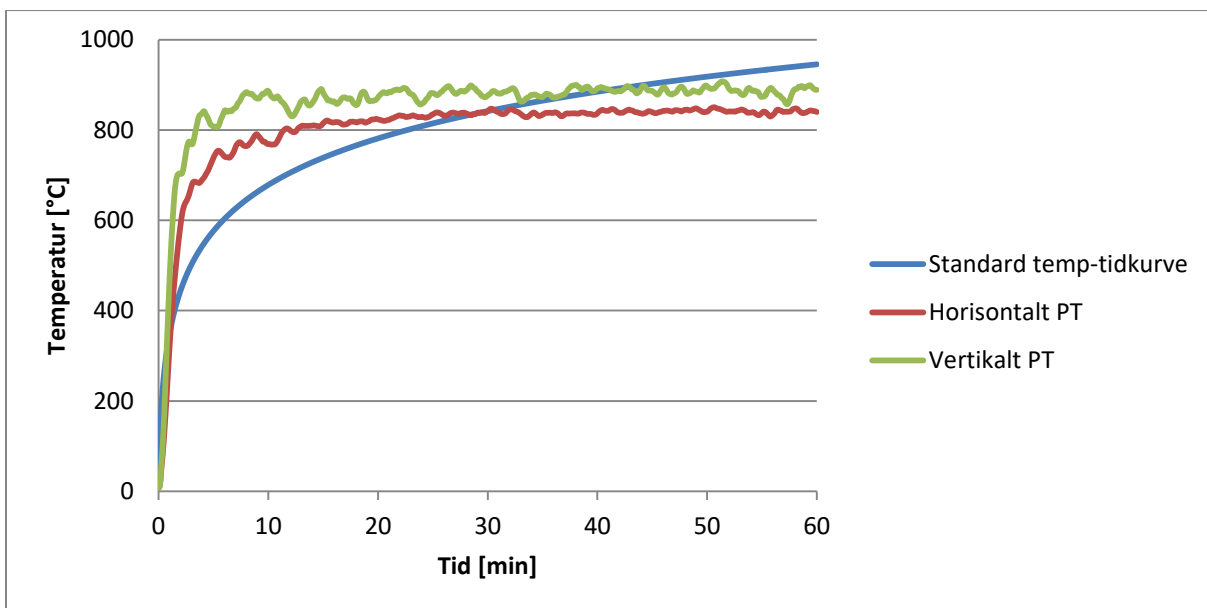
Figur 49 Temperaturmålinger i bjelkens lengderetning som funksjon av tid, 30 minutters forsøk

6.3. Resultater fra forsøk med 60 minutters varighet

I dette delkapittelet blir det gjennomgått resultater fra et enkeltforsøk med 60 minutters gjennomføringstid.

6.3.1. Temperatur i brennkammeret

I Figur 50 presenteres temperaturen registrert av de to platetermometerene i brennkammeret som funksjon av tid. I tillegg er standard temperatur-tidkurven inntegnet i samme figur for enkel sammenligning.



Figur 50 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, 60 minutters forsøk

6.3.2. Temperatur og forkulling i prøvestykket

Det ble hørt spraking fra prøvestykket under hele gjennomføringen av forsøket, og mot forsøkets slutt kunne man observere avskalling av gnistbiter. Prøvestykket var sterkt forbrent og forkullet i hele dets lengde, noe som kan ses i Figur 51, som er et bilde tatt av prøvestykkets mens det fremdeles er fastmontert under stålbjelken, kort tid etter at gasstilførselen ble stoppet.



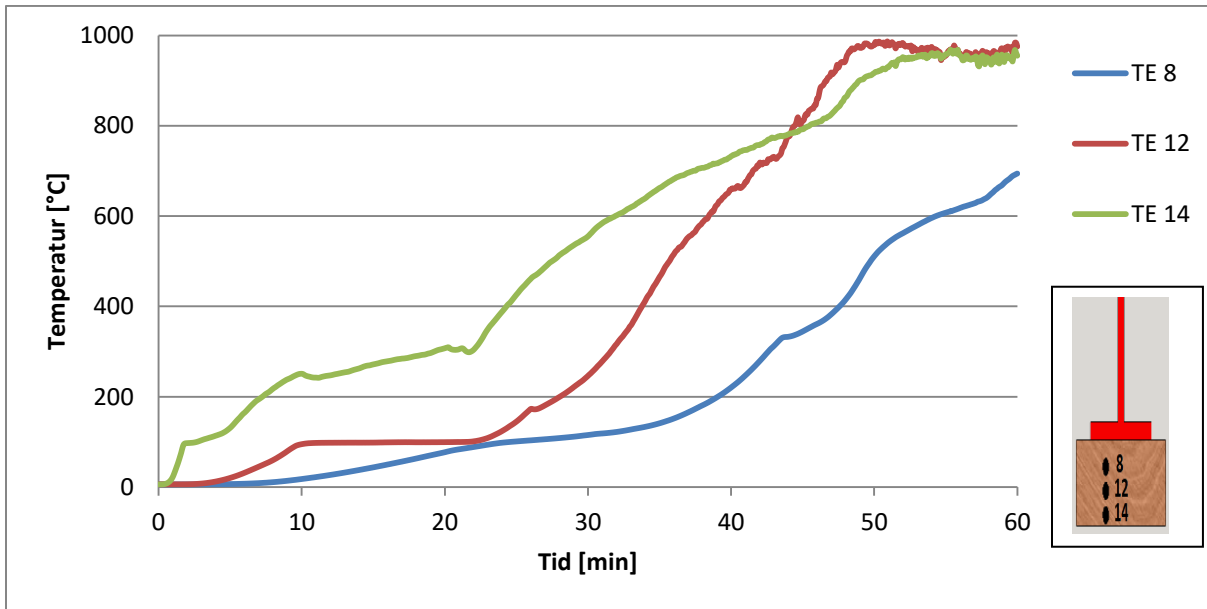
Figur 51 Prøvestykke like etter endt 60 minutters forsøk

De fire trestykkene brukt til innfesting er avbildet i Figur 52, hvor deler av prøvestykket også kan observeres rett før det frammonteres. Under dette forsøket ble alle fire trestykkene påvirket av brannen. De to trestykkene lokalisert på siden vendt inn mot brennkammeret fekk et forkullende lag med sprekkdannelse på inntil 1 cm på siden som vendte mot stålbejls steg. De to andre trestykkene ble misfarget på siden vendt inn mot steget, antageligvis grunnet påbegynt fase med pyrolyse.



Figur 52 Prøvestykkets innfesting etter gjennomføring av 60 minutters forsøk

Resultatene fra termoelementene som var lokalisert i ulike dybder i prøvestykket er presentert som funksjon av tid i Figur 53. Termoelement 14 er lokalisert bare 5 mm innenfor prøvestykkets eksponerte underside, og varmes raskt opp. Det observeres også at det ikke er noen markert fordampningsfase for innholdet av fukt i dette området. For de to målepunktene lokalisert høyere i prøvestykket, kan det ses at disse har en litt ulik utvikling etter hvert som det nås høyere temperaturregimer; det foregår en raskere temperaturøkning i det midterste punktet. En mulig årsak til dette kan være sprekkdannelse i trematerialet og i forkullingslaget. Dette underbygges også av at man i kurvene kan se at det midterste punktet har blitt eksponert direkte for brannen før det nederste målepunktet.



Figur 53 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, 60 minutters forsøk

Tidspunktet for når forkullingsfronten, definert som 300 °C-isoterme, passerer hvert målepunkt på sin vei oppover i prøvestykket er gjengitt i Tabell 15. Her angis også den vertikale avstanden fra prøvestykkets eksponerte overflate til lokaliseringen av hvert enkelt målepunkt. Disse verdiene er brukt til å beregne den gjennomsnittlige hastigheten forkullingsfronten har hatt frem til hvert enkelt punkt. Utifra tabellens verdier kan det ses at forkullingshastigheten øker etter hvert som forkullingsfronten beveger seg oppover i prøvestykket.

Tabell 15 Forkullingshastighet 60 minutters forsøk

Termoelement	Avstand	Tid	Gj. hastighet
14	5 mm	19 min 20 sek	0,26 mm/min
12	17 mm	31 min 40 sek	0,54 mm/min
8	31 mm	42 min 40 sek	0,72 mm/min

Det var utfordrende å få gode målinger på restvernsnittet, da nedkjølingsfasen tok lang tid, og det falt av flere biter. De framonterte restene av prøvestykket som var i brukbar stand kan observeres i Figur 54. På dette bildet mangler 35 cm av prøvestykkets midtre del. Det observeres at det er et veldig ujevnt restvernsnitt, hvor den tykkeste delen ligger i intervallet 20-30 cm inn fra brennkammerets vegg på den ene siden. Som i det tidligere gjennomgåtte forsøk et med 30 minutters varighet, var det også i dette

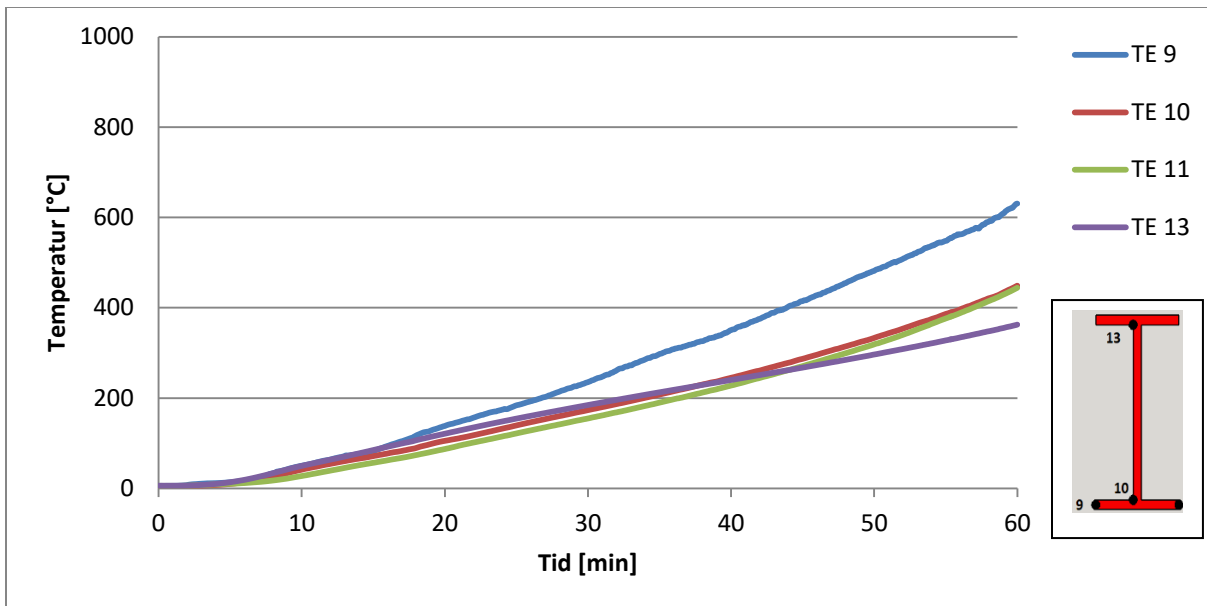
tilfellet ikke et restverrsnitt som var sentrert rundt prøvestykkets originale senterpunkt, men et restverrsnitt som var forskjøvet i retning ut fra brennkammeret.



Figur 54 Deler av prøvestykke etter endt 60 minutters forsøk

6.3.3. Temperatur i stålbjelke

Registrert temperatur fra de fire termoelementene lokalisert i bjelkens sentertverrsnitt er fremstilt som funksjon av tid i Figur 55. I dette forsøket registrerer termoelement 9 den høyeste temperaturen gjennom hele forsøket, men også denne gang gir termoelement 13 lenge høyere verdier enn de andre målepunktene i tverrsnittet.

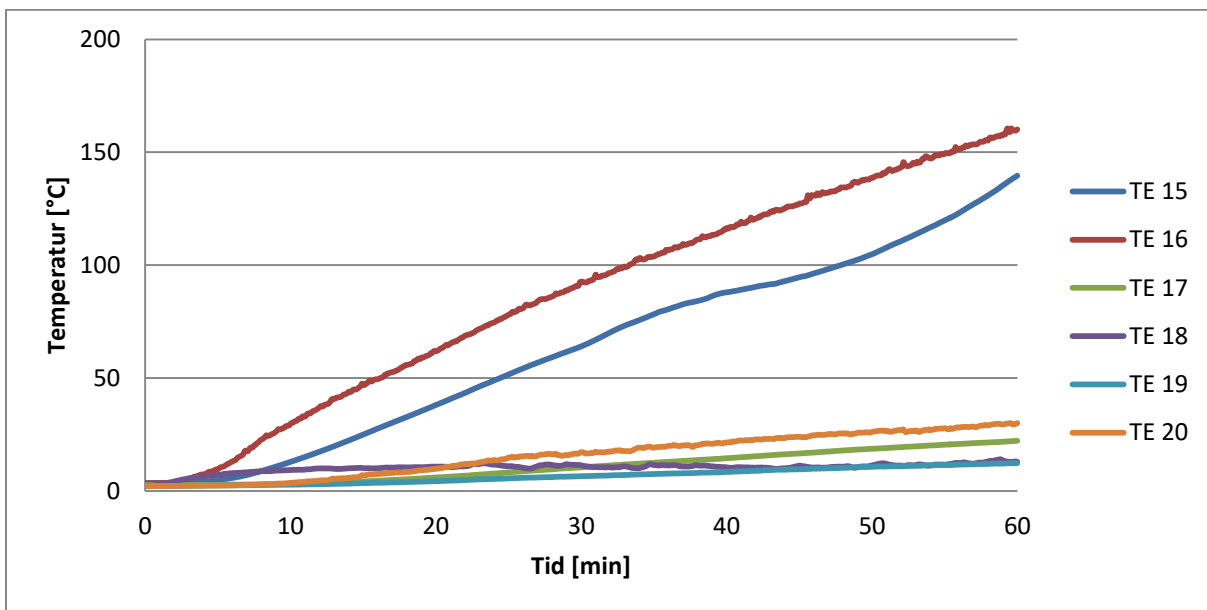


Figur 55 Temperatur i stålbjelkens tverrsnitt som funksjon av tid, 60 minutters forsøk

Det at kurvene for de andre målepunktene etter hvert krysser kurven til det høyest lokaliserte målepunktet, underbygger antagelsen som ble gjort i presentasjonen av resultatene fra med 30

minutters varighet. I den første fasen er det størst varmetransport til stålbjelken horisontalt gjennom brannisolasjonen på den siden som vender inn mot brennkammeret, og i mindre grad vertikalt opp gjennom det friske trematerialet på undersiden. Etter hvert som brannisolasjonen varmes opp på innsiden, vil den luften som ligger innestengt i hulrommet i steget også varmes opp, og stige oppover mot undersiden av den øvre flensen. Den vil videre også bevege seg horisontalt i stegets lengderetning. Dette underbygges også av målingene gjort på langs av bjelken. For målepunktene utenfor brennkammeret er det registrert høyest verdi i det øverste punktet ved enden av bjelken.

Temperatur registrert av termoelementene lokalisert utover i bjelkens lengderetning, er presentert som funksjon av tid i Figur 56. Det at punkt 20, som er lokalisert øverst helt i enden av bjelken registrerer høyere temperaturer enn punktene som er lokalisert i et tverrsnitt 0,4 m nærmere brennkammeret, underbygger teorien om at luften i steget varmes opp, og beveger seg horisontalt utover, noe som fører til at det dermed blir en oppsamling i enden, og etter hvert også tilbakestrømning.



Figur 56 Temperaturmålinger i bjelkens lengderetning som funksjon av tid

6.4. Forkulling

6.4.1 Forkulling i ubeskyttet tremateriale

For å vurdere teoretiske resultater opp mot resultater fra de praktiske forsøkene er det gjort forkullingsberegninger ved hjelp av metodene beskrevet i Eurokode 5 (Standard Norge, 2004). Det er beregnet teoretisk størrelse på nye tverrsnitt etter henholdsvis 30- og 60 minutters belastning for 48 x 148 konstruksjonsvirke, og fremgangsmåte og resultater kan ses i Tabell 16. I kapittel fire ble grenseskillet mellom når det kan benyttes endimensjonal forkullingsrate, og når det må brukes nominell forkullingsrate for denne dimensjonen av tremateriale funnet å være 26,1 minutt. Endimensjonal forkullingsdybde frem til dette tidspunkt, $d_{char,0}$, og nominell forkullingsdybde, $d_{char,n}$, for tiden etter dette beregnes ved hjelp av forkullingshastigheter hentet fra Tabell 11, og utifra dette kan det nye tverrsnittet innenfor forkullingsfronten bestemmes.

Tabell 16 Forkullingsberegninger for ubeskyttet tremateriale

Dimensjon	Tid	$d_{char,0}$	$d_{char,n}$	Totalt:	Nytt tverrsnitt
48 x 148 mm	60 min	26,1 min x 0,65 mm/min=17 mm	33,9 min x 0,80 mm/min = 27,1 mm	44,1 mm	3,9 x 59,8 mm
	30 min	26,1 min x 0,65 mm/min=17 mm	3,9 min x 0,80 mm/min= 3,1 mm	20,1 mm	27,9x 107,8 mm

De målte verdiene for begge forsøkene med en gjennomføringstid på 30 minutter, og ubeskyttet prøvestykke av tre er gjengitt i Tabell 17. Det kunne observeres at det var forekommet en dypere forkulling på kortsiden som vendte inn mot brennkammeret, enn kortsiden som vendte bort fra brennkammeret. I tabellen er det derfor tatt med verdi for justert resttverrsnitt. Dette er dimensjonen resttverrsnittet ville hatt dersom forkullingshastigheten på kortsiden som vender inn mot brennkammeret hadde vært gjeldende også for den motsatte siden. Resultatene viser at belastningen på den siden som vender inn mot brennkammeret fører til en hurtigere forkulling enn den som beregnes ved hjelp av teorien.

Tabell 17 Forkullingsresultater fra forsøk med 30 minutters varighet

Forsøk	Målt resttverrsnitt	Justert resttverrsnitt
5	28 x 102 mm	28 x 88 mm
6	30 x 110 mm	30 x 96 mm

Det er vanskelig å fastsette et bestemt mål for resttverrsnittet etter forsøk med 60 minutters varighet, da det er veldig varierende i både bredde og høyde. I Figur 57 kan baksiden av prøvestykket, som under forsøkene har vendt mot flensen, observeres etter et forsøk. Friskt tre kan delvis observeres, særlig de første 0,3 m inn fra sidene. I midtsonen er det en mørkere farge som resultat av pyrolyse, og helt i senter kan det ses antydning til forkulling. Det tok rundt 10 minutter før prøvestykket var nedkjølt, og framontert stålbjelke, slik at det nok har pågått en forkullingsprosess utover de 60 minuttene forsøket varte.


Figur 57 Bakside av prøvestykke etter endt 60 minutters forsøk

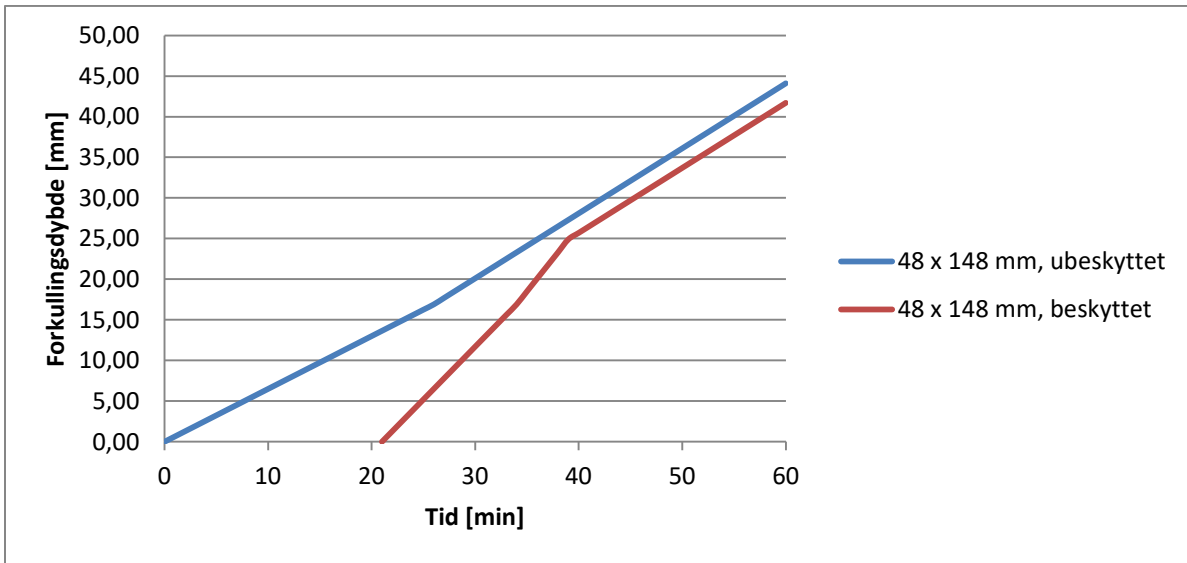
6.4.2. Forkulling i tremateriale beskyttet av ett lag standard A gips

Tiden det tar frem til den forsinkede oppstarten av forkullingsprosessen beregnes ved hjelp av Formel 4.3:

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

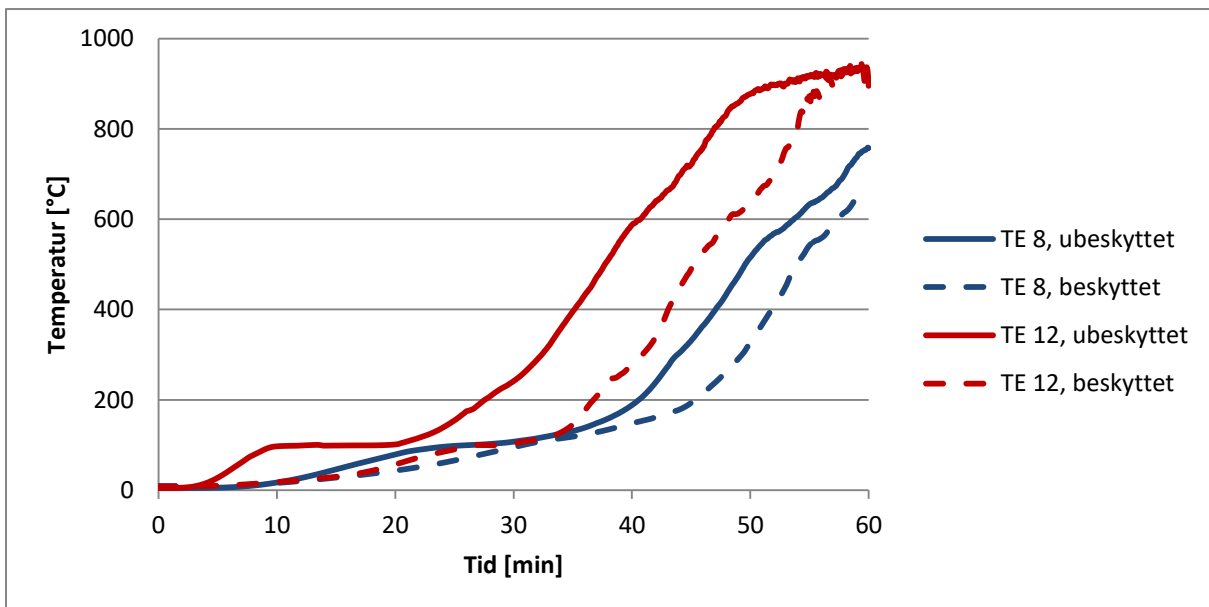
$$t_{ch} = 2,8 \times 12,5 - 14 = 21 \text{ min}$$

Etter dette tidspunktet starter forkullingene med doblet hastighet, frem til et av minimumskravene i Formel 4.4 oppfylles. Doblet en-dimensjonal hastighet kan benyttes frem til tverrsnittet blir så redusert at det må brukes dobbel nominell hastighet. I Figur 58 vises Forkullingsdybde som funksjon av tid for 48 x 148 mm konstruksjonsvirke både med og uten beskyttelse av ett lag standard 12,5 mm A gips. Etter 30 minutter vil det være betydelig forskjell på forkullingene i forhold til om trematerialet er beskyttet av gips eller ikke. Etter rundt 40 minutter avtar den forhøyede forkullingsraten for situasjonen med beskyttet trevirke, men da er forkullingene allerede nesten kommet på nivå med situasjonen med ubeskyttet tremateriale.



Figur 58 Forkullingsdybde som funksjon av tid for beskyttet og ubeskyttet konstruksjonsvirke

I Figur 59 presenteres temperaturen målt i prøvestykket, både fra forsøk hvor prøvestykket har vært ubeskyttet og fra forsøk hvor det var kledd inn med ett lag standard A gipsplater. Det kan tydelig observeres en forsinket oppvarming for situasjonen hvor trematerialet er beskyttet av ett lag med gips. Forskjellen er størst for det nederste målepunktet, som vil eksponeres først, mens det er mindre forskjell for det øverste målepunktet.



Figur 59 Temperatur i prøvestykket for forsøk med beskyttet og ubeskyttet tremateriale

Dersom man definerer forkullingsfronten til å være ved 300 °C-isotermen, slik det gjøres i standarden, vil man ved hjelp av resultatene kunne se når den passerer de ulike målepunktene. Dette er gjengitt i Tabell 18. Ved passering av målepunktet som ligger nærmest den eksponerte overflaten er det tidsmessig en forskjell på 8,6 minutter for beskyttet og ubeskyttet trevirke. Ved neste målepunkt er denne forskjellen kortet ned til 5,5 minutter. Dette samsvarer med teorien i forhold til at forkullingshastigheten er raskere i en viss periode etter svikt i beskyttelsen.

Tabell 18 Forkullingsfrontens posisjon i prøvestykket

	Tidspunkt for 300 °C
TE 12, ubeskyttet	32,3 min
TE 12, beskyttet	40,9 min
TE 8, ubeskyttet	43,8 min
TE 8, beskyttet	49,3 min

7. Diskusjon

Utgangspunktet for denne oppgaven var å undersøke hvorvidt konstruksjonsvirke som benyttes i bindingsverk kan inneha en funksjon i forhold til passiv brannbeskyttelse av bærende stålkonstruksjoner. I litteraturstudiet som ble gjennomført i den innledende fasen ble det avdekket at det er lite tilgjengelig litteratur og data i forhold til denne problemstillingen. Det er skrevet noen få artikler i forhold til beregning av brannmotstandskrav for innvendige kledninger av tre, men ingen som går spesifikt inn på det relevante temaet.

Formålet med forsøkene som ble gjennomført var å bestemme om temperaturen i en stålbjelke ville overstige kritisk temperatur i den tiden som er nødvendig for å tilfredsstille brannmotstandskravet for den lastbærende evnen, dersom det benyttes konstruksjonsvirke direkte montert i denne. Det ble gjennomført forsøk med gjennomføringstid på 30 og 60 minutter. Dette for å kunne vurdere i forhold til kravet i brannklasse 1 på 30 minutters brannmotstand, og kravet i brannklasse 2 på 60 minutters brannmotstand.

Utfra resultatene av forsøkene tilfredsstilles brannmotstandskravet for begge nevnte brannklasser. 30-minutterskravet oppnås med god margin, mens det for 60-minutterskravet er resultater nærliggende opp mot den kritiske grensen, noe som resulterer i en mindre sikkerhetsmargin i forhold til usikkerhetene knyttet opp mot hvorvidt forsøkene gjenspeiler en reell situasjon.

Det største datagrunnlaget fra forsøkene er i forhold til 30-minutterskravet, hvor data fra fem forsøk kan vurderes. Etter 30 minutter er det ingen målepunkt i stålbjelkens sentertverrsnitt som registrerer temperatur over 200 °C. I tillegg kan det sammenlignes data opp mot forsøket hvor det ble brukt Conlit på undersiden av stålbjelken. Etter 30 minutter skiller det kun 2 °C i tverrsnittstemperatur mellom de to ulike forsøkskonfigurasjonene, dersom denne beregnes som gjennomsnittet av de fire målepunktene lokalisert i tverrsnittet. Forsøket med Conlit ga den høyeste verdien, på 170 °C. Utviklingen frem til dette tidspunktet er derimot noe ulik for de to forskjellige materialene med en isolerende funksjon. I første halvdel av 30 minutters intervallet er den momentane temperaturøkningen høyest i oppsettet med Conlit, mens det er motsatt utvikling de siste 15 minuttene. Dette betyr at treet beskytter bedre i oppstartsfasen. Tykkelsen på de ulike materialene er ulik, men Conlit har en lavere varmeledningsevne. Vannfordampingsfasen vil også spille inn i forhold til dette, da det går med mye energi til å få fordampert vanninnholdet i trevirket.

Det ble benyttet 25 mm tykk isolasjon under forsøket med Conlit, da dette var nødvendig tykkelse for å tilfredsstille et 60 minutters brannmotstandskrav for stålkonstruksjonens lastbærende evne. Gitt et brannmotstandskrav på 30 minutter, hadde den nødvendige tykkelsen på isolasjonen, i følge Conlit beregningsprogram vært på 20 mm. For varmetransporten inn gjennom isolasjonen på sidene av stålbjelken vil dette være uvesentlig i sammenligningen av data fra de to forsøksoppsettene, mens det for den vertikale varmetransporten opp til undersiden av den nedre flensen vil utgjøre en forskjell, da prøvestykke av tremateriale måles opp mot brannisolasjon som er 5 mm tykkere enn det som ville vært aktuelt å bruke. Dette ville sannsynligvis ført til en større temperaturforskjell enn 2 °C på de to konfigurasjonene etter 30 minutter, og gitt et enda bedre resultat for tremateriale i forhold til Conlit.

For å vurdere brannmotstandskravet i brannklasse 2 ble det gjennomført tre forsøk med en lengde på 60 minutter. Temperaturmålingene viser en ujevn temperaturfordeling i tverrsnittet. Som forventet registreres det høyest temperatur på den siden av den nedre flensen som vender inn mot brennkammeret, med en gjennomsnittlig temperatur beregnet fra de tre forsøkene på 576 °C etter 60 minutter. Temperaturen stiger raskt i dette punktet mot slutten av forsøket, kun 3,5 minutter før forsøkets slutt var den registrerte temperaturen 100 °C lavere. Dette tyder på at denne delen av stålkomponenten ikke lenger er like beskyttet av det forkullende laget, og at dette er i ferd med å bevege seg videre bortover flensen, og dermed legger bak seg områder med flere sprekker og åpninger, og etter hvert forsvinne helt. Temperatur registrert på de to andre målepunktene i den nedre flensen er henholdsvis 442 °C i overgang flens/steg, og 425 °C i målepunktet som ligger helt i enden på den siden som vender ut fra brennkammeret. I den øvre delen av bjelken viser målepunktet lokalisert i overgangen mellom steg og øvre flens er den registrerte temperaturen 343 °C.

Ved en temperaturanalyse av en stålbjelke er det viktig å ta hensyn til at hver av bjelkens komponenter, de to flensene og steget, har ulike funksjoner i forhold til å ta opp og fordele krefter. Når det oppstår temperaturer over en viss størrelse vil det være nødvendig å ikke bare vurdere gjennomsnittstemperatur for tverrsnittet, men også vurdere temperaturen i de ulike komponentene hver for seg. Legger man til grunn et kritisk temperaturområde på 500-550 °C, vil den nedre flensen, og dermed hele bjelken opprettholde sin evne ved passering av 60 minutters grensen. Målepunktet som er ubeskyttet pga sviktende funksjon i det isolerende trematerialet angir en høy punktverdi på enden av flensen, men ved 60 minutter har ikke denne energien spredd seg horisontalt i underflensen. Det at det er en kraftig temperaturøkning, på hele 100 °C på 3,5 minutter mot slutten av forsøket, tyder på at det forkullede, beskyttede laget sprekker opp og forbrenner fullstendig, noe som vil bety at det blir en stadig økende

direkte eksponering av undersiden av den nedre flensen, og det kan antas at oppvarming av stålbjelken vil skje i en hurtigere rate etter dette først har inntruffet.

Sammenlignes resultatene fra forsøkene med tremateriale og Conlit, ser man at det er en mye jevnere oppvarming av hele tverrsnittet i forsøket med Conlit. Alle registrerte temperaturer i tverrsnittet ligger innenfor et intervall mellom 255 °C og 265 °C ved forsøkets slutt etter 60 minutter. Sammenlignes de registrerte verdiene fra målepunktet i overgangen mellom øvre flens og steg, vises en forskjell på 88 °C, med den laveste verdien gitt av forsøk med Conlit. Tatt i betraktning den sviktende gassforsyningsraten siste ti minutter av forsøket med Conlit, hadde den forskjellen vært enda lavere. I den nedre flensen ligger temperaturforskjellene på verdier opp mot 200 °C. Dette betyr at den belastningen med ekstra varmetransport fra undersiden, ikke umiddelbart sprer seg oppover i bjelken, men at det tar noe tid før dette skjer.

Vurderingen av at trematerialet kan erstatte annen brannisolasjon, og beskytte tilstrekkelig til at stålbjelken vil kunne opprettholde den krevde graden av lastbærende evne i 60-minutter er utelukkende gjort på grunnlag av resultatene fra forsøkene. For å kunne si noe om gyldighetsgraden av utførelsen av disse, er det en rekke parametere som må vurderes, både individuelt og samlet. Resultatene fra de gjennomførte forsøkene vil ikke fullt ut kunne verifisere hvorvidt det er mulig å bruke trematerialer til passiv brannsikring av bærende stålkonstruksjoner, da dette må gjøres under standardiserte forhold i godkjente brannovner. Resultatene fra forsøkene gir likevel en god pekepinn på hvorvidt det kan være interessant å legge ned ressurser i forhold til et slikt arbeid.

Blant parameterne som må vurderes er brannbelastningen prøvestykket blir utsatt for under forsøkene. I en standardisert test vil brannbelastningen være gitt av standard temperatur-tid kurven, og øke etter hvert utover i forsøket. Da det i forsøkene ble benyttet en konstant brannbelastning, er det viktig at denne i snitt gir en høyere tilførsel av energi totalt i 60-minutters intervallet, enn ved bruk av standardbrannen. Det horisontalt orienterte platetermometeret registrerer temperatur som ligger over standardbrannen frem til rundt 30 minutter, mens det vertikalt orienterte platetermometeret registrerer temperaturer som ligger over standardbrannen frem til et krysningspunkt etter rundt 40 minutter. Ser man på dette grafisk gjennom forskjellen på arealet under kurvene i et diagram, vil man kunne vurdere totalbelastningen fra de ulike utgangspunktene opp mot hverandre. For det horisontalt orienterte platetermometeret vises et ganske jevnt bilde. For det vertikalt orienterte platetermometeret vises en klart høyere belastning for gjennomførte forsøk, enn det ville blitt ved belastning etter standardbrann. Arealet mellom brannkurvene i intervallet frem til krysningspunktet ved rundt 40 minutter, er rundt fire

ganger større enn forskjellen i arealet i intervallet etter krysningspunktet. Med dette lagt til grunn kan det antas at belastningen prøvestykkene har blitt utsatt for har vært høyere enn det som er påkrevd i et godkjent testscenario.

Platetermometeren ble i tillegg trukket ut til sidene for å ikke påvirke forsøket ved å skjerme prøvestykket. Resultatene fra disse blir derfor heller et mål på den minste belastningen prøvestykket utsettes for, enn den reelle belastningen i senter av brennkammeret. I det siste forsøket, hvor trestykket var kledd inne i et lag med gips, ble det i tverrsnittet montert et termoelement i overgangen mellom gips og tre. Når gipsen sviktet og falt av, ble dette termoelementet direkte eksponert for den gjeldende brannbelastningen i senter av prøvestykket. Temperaturene målt av dette viser verdier rett i underkant av 1000 °C fra 40 minutter og utover til forsøkets slutt, og dersom dette legges til grunn som relevant brannbelastning, vil belastningen ligge langt over standardbrannen for hele forsøkets varighet. I en gitt situasjon med brann i en branncelle, må det forventes høy belastning over hele bjelkens lengde innenfor branncellen, og dette gjenspeiles også i de standardiserte testene, hvor det er gjennomsnittet av alle målinger utført i forhold til belastningstemperaturen som danner grunnlaget for sammenligning med standard temperatur-tidkurven. Det vil i dette tilfellet derfor være mer riktig å legge vekt på dataene innhentet av platetermometerene.

Stålbjelken stakk ut 0,7 m utenfor brennkammeret under forsøkene, og dette åpnet for varmetransport bort fra den eksponerte delen inne i brennkammeret, både i form av varmeledning i stålbjelken, og i form av strømning av varm luft inne i steget av bjelken. Brennkammeret representerer en branncelle, og grunnen til at det blir valgt en lengde på bjelken som gjør at den stikker ut av brennkammeret er at bærende stålbjelker ofte enten strekker seg, eller er koblet sammen, i lengder som går gjennom flere brannceller. I en reell situasjon vil det dermed kunne oppleves varmeledning i bjelken bort fra det området som vil være innenfor rammene av den branncellen hvor det vil være brannbelastning, dersom stålbjelken strekker seg utover dette rommets grenser. Ved å se nærmere på hvor stor denne varmetransporten er, kan det også vurderes om resultatene vil være gyldige dersom bjelken ikke har en lengde utover den lengden som vil bli belastet i et brannscenario.

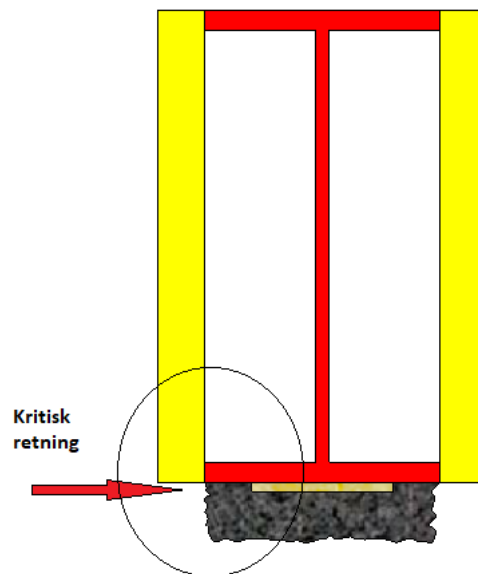
I temperaturmålingene i bjelketverrsnittet som ligger nøyaktig jevnt med innsiden av brennkammerets vegger registreres det en temperatur på om lag 150 °C i overgangen mellom nedre flens og steget, og om lag 180 °C i overgangen mellom den øvre flensen og steget. Dette er vesentlig lavere verdier enn det man finner i tverrsnittet av bjelkens senter. Belastningen dette ytterpunktet utsettes for må allikevel vurderes å være høy, på bakgrunn av verdiene fra platetermometerene, som ligger lokalisert nært denne

posisjonen. I 0,5 meters avstand videre utover i bjelken, samt i bjelkens ende vises mindre temperaturendringer på opptil maksimalt 35 °C. Mye av denne varmetransporten foregår gjennom strømninger i luften som er innestengt i steget, og dette samler seg noe opp i enden av bjelken. Legger man temperaturen i tverrsnittet jevnt med innsiden av brennkammerets vegger til grunn, sammen med den beskjedne temperaturøkningen videre utover i bjelken, kan det antas at brannmotstandskravet også kan opprettholdes for situasjoner hvor det ikke vil være den samme muligheten for varmetransport i bort fra brennkammeret.

Som nevnt i det forrige avsnittet er det ikke noe materiale tilstedeværende i bjelkens steg, og luften sirkulerer fritt innvendig når den blir varmet opp. Gitt at stålbjelken er lokalisert i en yttervegg vil det være naturlig at denne fylles med et isolerende materiale, som for eksempel 50 mm steinull. Dette materialet vil da ta opp mye mer av varmen enn det som ellers vil bli transportert rundt, både i luften og i bjelken. Videre forsøk i forhold til den aktuelle problemstillingen bør vurdere å ha denne løsningen med i forsøksoppsettet.

Utfra resultatene av forsøkene virker det som det er forkullingen som beveger seg horisontalt gjennom prøvestykket fra kortsiden som vender inn mot brennkammeret, og dermed utsettes for den høyeste belastningen som er avgjørende i forhold til oppvarmingsraten av den nedre flensen. Prøvestykkets bredde er jevnt fordelt ut på hver side av stålbjelken, og stikker 24 mm ut fra flensens ytterkant. Denne lengden er halvparten av prøvestykkets tykkelse, og dette vil da være mer sensitivt i forhold til svikt i det beskyttende laget inn fra denne siden, enn fra undersiden. Dette underbygges også av de teoretiske beregningene av forkulling, hvor det fremkommer at det etter 60 minutter vil være et tverrsnitt innenfor forkullingsfronten på ca. 4,0 x 60 mm. Fordeles dette jevnt utfra senter av den nedre flensens underside, vil det forkullingsfronten være i en posisjon 20 mm inn fra flensens ytterkant. I målinger av det forkullende laget etter forsøkene kunne det observeres at dette hadde en tykkelse på ca. 20 mm, og ses dette i sammenheng med de teoretiske beregningene, vil den ytre kanten av flensen eksponeres helt åpent mot brannbelastningen i tiden rundt 60 minutter. I Figur 60 illustreres dette ved hjelp av en skisse utviklet med bakgrunn i resultatene fra både teori og forsøk. Det kritiske området fra forsøkene, i hjørnet av den innovervendte nedre flensen, hvor temperaturen steg kraftig i forsøkets siste minutter, er markert med en sirkel. Den kritiske forkullingsretningen er markert i den horisontale retningen, da det er denne som først vil føre til en sviktende beskyttelse av stålbjelkens underside. For en situasjon hvor stålbjelken vil bli omsluttet av en brann på tre sider, kan det forventes like rask forkulling på begge sider, og dette er illustrert i figuren, med utgangspunkt i forkullingshastigheten for den mest belastede siden

fra forsøkene. Det vil da oppstå to kritiske områder, og en enda raskere oppvarming av stålbejlkens nedre flens.



Figur 60 Kritisk område og forkullingsretning på bakgrunn av teori og forsøk

Det at det er i denne retningen den kritiske forkullingen, og dermed svikten i det beskyttende laget, oppstår betyr at det vil være mer hensiktsmessig å legge til ytterligere avstand i retning horisontalt utover fra flensens sidekant, enn å legge til et tykkere lag med tremvirke vertikalt. Benyttes det for eksempel en 48 x 198, kan man få 2,5 cm ekstra tykkelse med tremateriale i bredden ut fra stålbejlkens. Dette ville sannsynligvis ført til langt bedre resultater, utfra det som er kommet frem under gjennomføringen av forsøkene i denne oppgaven.

Forsøksoppsettet er konstruert i forhold til at den belastede stålbejlkens ligger i en yttervegg, hvor brannbelastningen i branncellen denne er lokalisert i har retning ut av denne, og omslutter stålbejlkens når energien transporteres ut av rommet. Det viser seg i forsøket at det blir en mye større belastning på innsiden enn utsiden av prøvestykket. Dette er naturlig da retningen på energien fra brannkilden først går opp under taket, for så å bevege seg horisontalt under taket bort til bejlkens, og videre ned rundt denne og ut av rommet. Ved en annen konfigurasjon, som at bejlkens er plassert mer midt over brannkilden, må det tas hensyn til dette. Man vil da kunne oppleve den samme belastningen i den nedre flensens hjørne som vender utover. Det er derfor viktig at man sikrer tilstrekkelig dekning av trematerialer også utover fra denne siden. Brukes det for eksempel en 48 x 198 mm toppsvill, som

fordeles jevnt ut på begge sider av stålbjelken, vil man trolig kunne overholde kravet i forhold til 60 minutters brannmotstand med god margin.

Det er spesielt i to ulike situasjoner hvor dette vil være ønskelig bruke trematerial direkte montert på stålkomponenter; inntil bærende søyler som følge av plassmangel, enten i hjørner eller ved vindus- og døråpninger, eller under bærende stålbjelker, for direkte innfesting av det utfyllende bindingsverkets toppsvill. Da det er det siste som har blitt lagt til forsøkene, er det i forhold til dette forsøksresultatene vil være gyldige. For vertikale stendere vil det være andre forutsetninger, men det kan allikevel tenkes at det også her er bredden stenderen går forbi stålkomponenten som er avgjørende, og ikke tykkelsen vinkelrett mot stålsøylen.

Den kritiske temperaturen vurderes til å ligge intervallet 500-550 °C, og stålkomponenten vil her ha mistet 50 % av sin lastbærende evne. Kapasitetsutnyttelsen av stålet vil spille inn i forhold til dette; er ikke kapasiteten fullt utnyttet, vil stålkomponenten kunne tåle å miste mer av sin lastbærende kapasitet.

Resultatene for tremateriale montert direkte mot stål er positive og spennende, og utfra undersøkelsene i denne rapporten er det absolutt noe som undersøkes videre. Forslag til videre arbeid er beskrevet i kapittel ni.

8. Konklusjon

I følge dataene fremkommet fra gjennomføringen av forsøkene kan trematerialer brukes til passiv brannbeskyttelse av bærende stålkonstruksjoner i brannklasse 1 og 2.

I brannklasse 1, hvor det er krav om opprettholdelse av lastbærende evne for stålkomponenten i 30 minutter, oppfylles kravet med god margin. Sammenligning med Conlit brannisolasjon viser at trematerialet står seg bedre enn denne over et brannforløp av denne varigheten. I brannklasse 2, hvor det er krav om opprettholdelse av lastbærende evne for stålkomponenten i 60 minutter, er resultatene langt mer usikre. En temperaturøkning på 100 °C i den nedre flensens hjørne i løpet av forsøkets siste 3,5 minutter fører til en sluttemperatur i dette punktet på 576 °C etter 60 minutter. Dette kommer av den horisontale forkullingsprosessen inn fra trestykkets kortsida, som fører til en stadig økende eksponering av aktuelt hjørne. Den høye varmetransporten inn i bjelken fra dette området vil etter hvert føre til raskere økning i hele bjelketverrsnittet, men etter 60 minutter har denne energien ikke rukket å bevege seg bortover flensen. Da brannbelastningen i tillegg er antatt å være høyere enn belastningen som legges til grunn ved branntesting, velges det å konkludere med at kravet blir tilfredsstilt også i dette tilfellet.

Benyttes det materiale med en tykkelse på 48 mm ser det ifølge forsøkene ut til at det vil være lengden trematerialet stikker utenfor stålbjelken i horisontal retning, og ikke tykkelsen på materialet i vertikal retning under flensen, som vil være mest sensitiv i forhold til hvorvidt stålbjelken beskyttes mot varmetransport i den nødvendige tiden.

9. Fremtidig arbeid

Det anbefales at det gjøres videre undersøkelser i forhold til 60-minutters kravet. I tillegg bør det gjøres ytterligere forsøk med andre konfigurasjoner, f.eks. eksperimentelle oppsett som inkluderer integrering av stålkomponenter i gipsplatede vegger av bindingsverk med isolasjon i hulrom, frittstående søyler o.l. Det bør undersøkes mer i forhold til andre dimensjoner av konstruksjonsvirke, og sensitiviteten i forhold til hvor lang avstand trematerialet stikker ut i horisontal retning på undersiden av flensen.

Det bør gjøres undersøkelser i forhold til om det er mulig å bruke modelleringsprogrammer for å få data i forhold til denne problemstillingen. Simuleringsprogrammer kan ofte være en god løsning, men i forhold til forbrenning av tre kan det oppstå problemer, da programmene ikke alltid fanger opp at treet brenner opp, og massen etter hvert forsvinner.

Prosjektet kan videreføres gjennom flere bachelor- eller masteroppgaver. Resultatene i denne oppgaven danner også grunnlag for at dette kan være verdt å ta med seg inn i standardiserte former, for å få en godkjent sertifisering av løsningen, for de som måtte ha ressurser og interesser i forhold til dette.

10. Referanser

- Almar-Næss, A., & Christensen, N. (2018, Mars 21). *Store norske leksikon*. Hentet fra <https://snl.no/st%C3%A5l>
- Arntsen, G. R. (2000). *Stålboka*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Atreya. (2016). Chapter 3 Convection Heat Transfer. I D. G. M. Hurley (ed), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (s. 3510). New York: Springer.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2011). *Byggesaksforskriften (SAK10) Veiledning om byggesak*. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2012). *HO-2/2012 Tilsyn*. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Oslo: Direktoratet for byggkvalitet.
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. (2002). *Forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen*. Justis- og beredskapsdepartementet.
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. (2015). *Forskrift om brannforebygging*. Oslo: Justis- og beredskapsdepartementet.
- Drysdale, D. (1998). *An Introduction to Fire Dynamics*. Edinburg: John Wiley & Sons.
- Ezekoye, O. (2016). Chapter 2 Conduction of heat in solids. I D. G. M. Hurley (ed), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (s. 3510). New York: Springer.
- Glasø, G. (2005, April). Nr. 37 Tre og brann. *Fokus på brann*.
- Grøndalen, Ø. (2002). *Materiallære*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Hoen, H. F. (2018, Mars 14). *Store norske leksikon*. Hentet fra https://snl.no/Skogbruk_i_Norge
- Hurley, M. (2016). Appendix. I M. Hurley, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (s. 3510). New York: Springer.
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Kodur, V., & Harmathy, T. (2016). Chapter 9 Properties of building materials. I D. G. M. Hurley (ed), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (s. 3510). New York: Springer.
- Landbruks- og matdepartementet. (2018, Mars 14). *Regjeringa.no*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/skogbruk/innsikt/bruk-av-tre/id2009518/>
- Larsen, P. K. (2008). *Konstruksjonsteknikk*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Milke, J. A. (2016). Chapter 54 Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members. I D. G. M. Hurley (ed), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (s. 3510). New York: Springer.

- National Institute of Standards and Technology . (2018, Mai 4). *NIST*. Hentet fra NIST:
<https://pages.nist.gov/fds-smv/>
- Norsk Treteknisk Institutt. (1999). *Treteknisk Håndbok*. Oslo: Norsk Treteknisk Institutt.
- Rockwool. (2018, Februar 27). *Conlit brannsikring*. Hentet fra <http://www.rockwool.no/teknisk-service/beregningsprogram/conlit-brannsikring-beregningsprogram-iframe-based/>
- SINTEF Byggforsk. (2004). *Datablad 520.315 Brannbeskyttelse av stålkonstruksjoner*.
- SINTEF Byggforsk. (2007). *Datablad 523.254 Utfyllende bindingsverk*. SINTEF Byggforsk.
- SINTEF Byggforsk. (2013). *321.025 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av prosjektering, utførelse og kontroll - oversikt*.
- SINTEF Byggforsk. (2013). *Datablad 321.025 Brannsikkerhet. Dokumentasjon av prosjektering, utførelse og kontroll - oversikt*.
- SINTEF Byggforsk. (2013). *Datablad 571.404 Metaller til bygningsbruk. Bruksmål og prosjektering*. Oslo: SINTEF.
- SINTEF Byggforsk. (2015). *Datablad 571.523 Trevirke. Treslag og materialeegenskaper*. Oslo: SINTEF.
- SINTEF Byggforsk. (2015). *Datablad 571.524 Trelast. Typer og egenskaper*. SINTEF Byggforsk.
- Standard Norge. (2004). *Eurokode 4: Prosjektering av samvirkekonstruksjoner av stål og betong*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2004). *Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner, Del 1-2 Brannteknisk dimensjonering*. Oslo: Standard Norge .
- Standard Norge. (2005). *NS-EN 10025-1:2004 Varmvalsede produkter av konstruksjonstål*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2008). *Eurokode 1: Laster på konstruksjoner Del 1-2: Allmenne laster Laster på konstruksjoner ved brann*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2009). *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2009). *NS-EN 13501-1:2007+A1:2009 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler Del 1: Klassifisering ved bruk av resultater fra prøving av materialers egenskaper ved brannpåvirkning*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2012). *NS-EN 1363-1:2012 Prøving av brannmotstand Del 1 Generelle krav*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Norge. (2016). *NS-EN 338:2016 Konstruksjonstrevirke fasthetsklasser*. Oslo: Standard Norge.
- Standard Online AS. (2018, April 15). *Standard.no*. Hentet fra <https://www.standard.no/fagomrader/bygg-anlegg-og-eiendom/eurokoder1/>

Subramanian, R. S. (u.d.). *Unsteady Heat Transfer: Lumped Thermal Capacity Model*. Clarkson: Department of Chemical and Biomolecular Engineering.

Søpler, B. (2004). *Betongboka*. Oslo: Gyldendal Undervisning.

Thunderhead Engineering. (2018, Mai 6). *Thunderhead*. Hentet fra Pyrosim:
<https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-features/>

Wickstrøm, U. (1988). *The Plate Thermometer - A simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests, SP REPORT 1989:03*. Borås: Swedish National Testing Institute Fire Technology.

Wikstrøm, U. (2016). *Temperature Calculation in Fire Safety Engineering*. Luleå: Springer Nature.

Øvrum, T. (2012). Konstruksjonsvirke. *Fokus på tre nr. 43*.

11. Vedlegg

Vedleggsnr.	Vedlegg	Side
1	Inndatafil FDS	B
2	Utsnitt av stålbjelkens datablad	C
3	Produktdatablad Conlit	D
4	Produktdatablad standard A gips	E
5	Ytelseserklæring konstruksjonsvirke	F
6	Temperatur i brennkammer, gjennomsnitt frem til 30 minutter	G
7	Temperatur i prøvestykket, gjennomsnitt frem til 30 minutter	G
8	Temperatur i sentertverrsnitt, gjennomsnitt frem til 30 minutter	H
9	Temperatur i lengderetning, gjennomsnitt frem til 30 minutter	H
10	Temperatur i brennkammer, gjennomsnitt frem til 60 minutter	I
11	Temperatur i prøvestykket, gjennomsnitt frem til 60 minutter	I
12	Temperatur i sentertverrsnitt, gjennomsnitt frem til 60 minutter	J
13	Temperatur i lengderetning, gjennomsnitt frem til 60 minutter	J

Vedlegg 1 Inndatafil FDS

```
Alternativ_2.fds - Notisblokk
Fil Rediger Format Vis Hjelp
Alternativ_2.fds
Generated by PyroSim - Version 2017.2.1115
21.jan.2018 11:56:05

&HEAD CHID='Alternativ_2'/
&TIME T_END=600.0/
&DUMP RENDER_FILE='Alternativ_2.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.TRUE., DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/

&MESH ID='Test 1', IJK=32,28,22, XB=0.0,1.6,0.0,1.4,0.0,1.1/

&REAC ID='Reaction1',|
      FUEL='REAC_FUEL',
      FORMULA='C3H8'/

&DEVC ID='THCP', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.74/
&DEVC ID='THCP01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.7/
&DEVC ID='THCP02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.65/
&DEVC ID='THCP03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.6/
&DEVC ID='THCP04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.55/
&DEVC ID='THCP05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.5/
&DEVC ID='THCP06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.45/
&DEVC ID='THCP07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.32,0.26,0.4/
&DEVC ID='THCP08', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.35,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP09', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.45,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP10', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.55,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP11', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.65,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP12', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.75,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP13', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.85,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP14', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.95,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP15', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.05,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP16', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.15,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP17', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.25,0.17,0.52/
&DEVC ID='THCP18', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.74/
&DEVC ID='THCP19', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.7/
&DEVC ID='THCP20', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.6/
&DEVC ID='THCP21', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.5/
&DEVC ID='THCP22', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.4/
&DEVC ID='THCP23', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.3/
&DEVC ID='THCP24', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.2/
&DEVC ID='THCP25', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.8,0.26,0.1/

&SURF ID='ADIABATIC',
      COLOR='GRAY 80',
      ADIABATIC=.TRUE./
&SURF ID='Gassbrenner',
      COLOR='RED',
      HRRPUA=900.0/

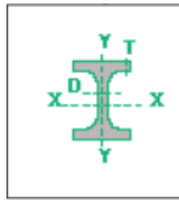
&OBST ID='Obstruction', XB=0.1,0.3,0.1,1.3,0.0,0.76, SURF_ID='ADIABATIC'/ Vegg
&OBST ID='Obstruction', XB=1.3,1.5,0.1,1.3,0.0,0.76, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.3,1.3,1.0,1.2,0.0,0.76, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.3,1.3,0.1,1.1,0.0,0.01, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.55,1.05,0.4,0.9,0.01,0.11, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.3,1.3,0.1,0.24,0.54,0.76, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.1,1.5,0.1,1.3,0.76,0.96, SURF_ID='ADIABATIC'/

&VENT ID='Vent01', SURF_ID='Gassbrenner', XB=0.55,1.05,0.4,0.9,0.11,0.11/
&VENT ID='Vent02', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,1.6,0.0,0.0,0.0,1.1/
&VENT ID='Vent03', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,1.6,1.4,1.4,0.0,1.1/
&VENT ID='Vent04', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,0.0,1.4,0.0,1.1/
&VENT ID='Vent05', SURF_ID='OPEN', XB=1.6,1.6,0.0,1.4,0.0,1.1/
&VENT ID='Vent06', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,1.6,0.0,1.4,1.1,1.1/

&TAIL /
```

Figur 61 Inndatafil FDS

Vedlegg 2 Utsnitt av stålbjelkens datablad



BJELKER IPE

STATISKE VERDIER

Dimensjon	KG/M	Tverrsn. F cm ²	Tregm.moment J _x ⁴ cm ⁴	J _y ⁴ cm ⁴	Motst.moment W _x ³ cm ³	W _y ³ cm ³
IPE 80 H=80 B=46 D=3,8 T=5,2 MM	6,15	7,64	80,1	8,49	20,0	3,69
IPE 100 H=100 B=55 D=4,1 T=5,7 MM	8,29	10,3	171	15,9	34,2	5,79
IPE 120 H=120 B=64 D=4,4 T=6,3 MM	10,64	13,2	318	27,7	53,0	8,65
IPE 140 H=140 B=73 D=4,7 T=6,9 MM	13,26	16,4	541	44,9	77,3	12,3
IPE 160 H=160 B=82 D=5 T=7,4 MM	16,17	20,1	869	68,3	109	16,7
IPE 180 H=180 B=91 D=5,3 T=8 MM	19,28	23,9	1320	101	146	22,2
IPE 200 H=200 B=100 D=5,6 T=8,5 MM	22,90	28,5	1940	142	194	28,5

STÅL

MEKANISKE VERDIER

Kvalitet	Slagseighet		Min.		Min. A5%
	grader C	J min.	Re N/mm ²	Rm N/mm ²	
S235JRG2	20	27	235	340-470	26
NVA	20		235	400-520	22
NVD	-20	27	235	400-520	22
NVE	-40	27	235	400-520	22
RSt 37-2	20	27	235	340-470	
St 37-3	-20 *	27	235	340-470	
S275J263	-20	27	275	410-560	22
S275J2H	-20	27	275	410-560	22
P265GH	0	27	265	410-530	23
E295			295	470-610	20
St 50-2			295	490-660	
St44-3	-20 *	27	275	410-540	
S355J2G3	-20	27	355	490-630	22
S355J2G4	-20	27	355	490-630	22
S355N	-20	40	355	470-630	22
S355J2H	-20	27	355	490-630	22
S355NH	-20	40	355	470-630	22
386P ARCTIC	-60	40	355	490-620	22
P 355 NLI	-40	34	355	490-630	22
NVD 36	-20	34	355	490-620	21

Figur 62 Utsnitt av stålbjelkens datablad

Vedlegg 3 Produktdatablad Conlit

CONLIT 150

CONLIT 150

PRODUKT

CONLIT® 150 er hardpressede plater av ubrennbar fukt-og vannavvisende ROCKWOOL steinull. Produktet er 100 % dimensjonsstabil og har meget gode brannbeskyttende egenskaper. CONLIT 150 (25-50 mm) kan også leveres med glassfiberduk.

ANVENDELSE

CONLIT 150 benyttes hovedsakelig til brannbeskyttelse av bærende stålkonstruksjoner til brannklasse R30 til R180. Produktdokumentasjon SINTEF 010-0253. Kan også benyttes til brannbeskyttelse av stålplatetak og betongkonstruksjoner. Nemko sertifiseringslisens 368.

Les om fordelene med [CONLIT Brannsikring](#)

TEKNISKE EGENSKAPER

Område	Beskrivelse	Standard
Varmekonduktivitet	$\lambda_D=39$ mW/mK	EN 12939
Brannklasse	A1	EN 13501-1



Figur 63 Utsnitt av Conlit produktdatablad

Vedlegg 4 Produktdatablad for standard 13 mm A gips

NORGIPS

PRODUKTDATABLAD **STANDARD 13 MM** 1

PRODUKTDATA

Mål
 Benevnelse 13 mm
 Tykkelse 12,5 mm
 Bredder 900/1200 mm
 Lengde Se produktoversikt
 Vekt 9 kg/m²

Toleranser
 Tykkelse ±0,5 mm
 Bredder +0/-4 mm
 Lengde +0/-5 mm
 Vekt ± 2 %
 Langside, parallelitet 0 mm
 Kortkant, vinkelavvik 2,5 mm/m bredde

Styrke
 Bøyingsstyrke på langs 550 N
 Bøyingsstyrke på tvers 210 N
 Forskyvningsstyrke ved innfesting 500 N
 Trykkstyrke på tvers av platens plan 2,0 MPa

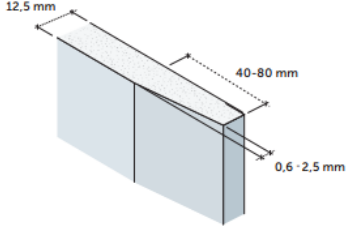
Varme
 Varmeledning, λ-verdi 0,25 W/m·K
 Varmemotstand (R) 0,05 m² K/W
 Max. påvirkning, 5-10 min < 120 °C
 Max. påvirkning varig < 45 °C

Fukt
 Dampgjennomgangsmotstand Sd 0,078 m
 Lengdeutvidelse ved variasjon i RF på 30-90% 0,04 %
 Tykkelseutvidelse ved variasjon i RF på 30-90% 1,1 %
 Kritisk relativ fuktighet ved romtemperatur 70% RF

Brann
 Materiale A2-s1,d0

Standard
 Deklarert type etter EN 520 A

Gipsplate type A



Kartongklede, forsenede langkanter og skårne kortkanter

PRODUKTBESKRIVELSE
 Bygningsplate bestående av en gipskjerne, beskyttet på for og bakside og langsider av kartong som er fast forbundet med platens kjerne, og overlappet og limt mot hverandre på platens bakside.

ANVENDELSE


- Innendig kledning til nybygg og rehabilitering.
- Vegg- og himlingskonstruksjoner med brannkrav

BEARBEIDING
 Håndtering, bearbeiding og montering av Norgips gipsplater er beskrevet i Norgips montasjehåndbok og på www.norgips.no/montasje.

LAGRING
 Alle pakker med gipsplater skal lagres på plant underlag med understøtte på maks 600 mm mellom sentre av disse. Produktet må lagres tørt. Ved utvendig lagring skal det være lufting mellom pakkene og tildekkingen, og pakkene skal plasseres slik at det er god lufting mellom pakkene og bakken.

GODKJENNINGER OG KLASIFISERINGER

- Produktet er klassifisert i henhold til EN 13501-1
- Sintef TG 20081. NEMKO Sertifiseringslisens 614
- Brannklasse: A2-s1, d0.



YTTELSESERKLÆRING
 DOP 0001 A 0301 Standard 13 A 2013-5-1

RESIRKULERING
 Avfallskode EWC 170802,170904. Se også www.norgips.no/miljø og kvalitet.

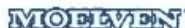
CE

TDD_PDB_0005_A MAR 2017

Norgips Norge AS – Postboks 655 Strømsø, 3003 Drammen – Tel.: 33 78 48 00 – Epost: norgips@norgips.com – www.norgips.no

Figur 64 Produktdatablad for standard 13 mm A gips

Vedlegg 5 Ytelseserklæring for konstruksjonsvirke



YTELSESERKLÆRING

Nr. 110CPR130527

- Entydig identifikasjonskode for produkttypen: **Styrkesortert konstruksjonstrevirke med rektangulært tverrsnitt.**
- Type-, parti- eller serienummer eller en annen form for angivelse som muliggjør identifisering av byggevaren i samsvar med artikkel 11 nr. 4: **Konstruksjonsvirke leveres med pakkelapp som angir pakkenummer og produksjonsdato for å ivareta sporingen tilbake til produksjonstidspunktet.**
- Produsentens tilsiktede bruksområder for byggevaren, i samsvar med den relevante harmoniserte tekniske spesifikasjonen
Broer og bygninger.
- Navn, registrert varemerke og kontaktadresse til produsenten i henhold til artikkel 11 nr. 5:
Moelven Wood AS, Sagvegen, 2074 Eidsvoll Verk, E-post: post.wood@moelven.no
- Det eller de systemer for vurdering og kontroll av byggevarens konstante ytelse, som fastsatt i vedlegg V,
System 2+
- Dersom ytelseserklæringen gjelder en byggevare som omfattes av en harmonisert standard:
NS-EN 14081-1
Utpekt kontrollorgan nummer 1070, Norsk Treteknisk Institutt, har utført innledende kontroll av fabrikk og produksjonskontroll, utfører løpende overvåking av produksjonskontrollen og har utstedt et sertifikat for denne produksjonskontrollen.

7. Angitt ytelse

Vesentlige egenskaper	Ytelse	Harmonisert teknisk spesifisering
Fasthetsklasse ihht. NS-EN 338	C14, C24, C30	NS-EN 14081-1:2005+A1:2011
Dimensjon (tykkelse i mm X bredde i mm)	36-98 X 73-223	
Sorteringsmetode	Tørrsortert på maskin	
Treslagskode	PCAB (gran) eller PNSY (furu)	
Biologisk holdbarhet etter NS-EN 350-2	Holdbarhetsklasse 5	
Brannmotstand (tabell C1 i NS-EN 14081-1)	D-s2, d0	
Avgassing av skadelige stoffer	NPD	

8. Ytelsen for varen som angitt i nr. 1 og 2, er i samsvar med ytelsen angitt i nr. 7.

Denne ytelseserklæringen er utstedt på eget ansvar av produsenten, som angitt i nr. 4.

Undertegnet for og på vegne av produsenten av:

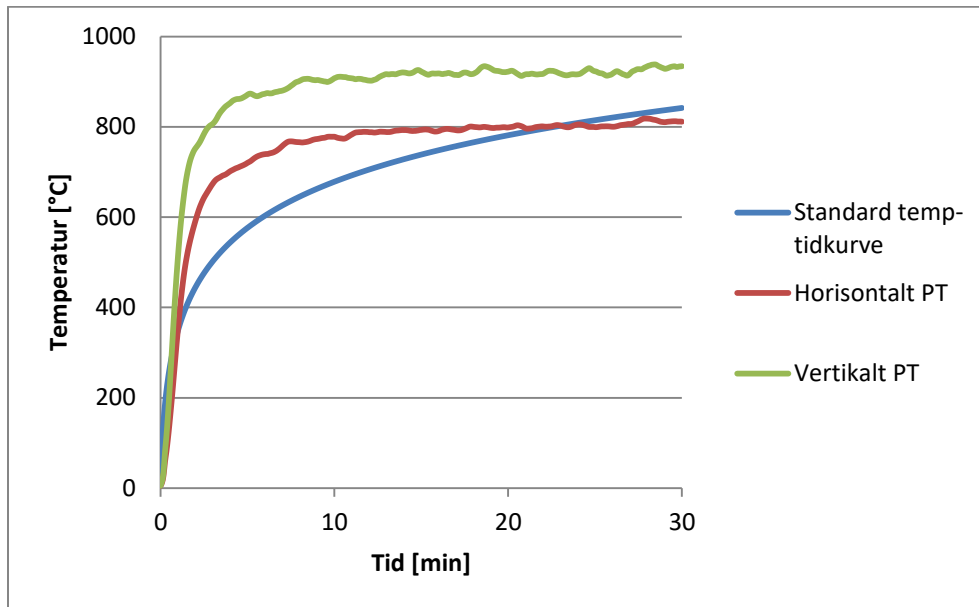
Adm. Dir. Bjarne Hønningstad

(underskrift)

Eidsvoll Verk 2015.06.25

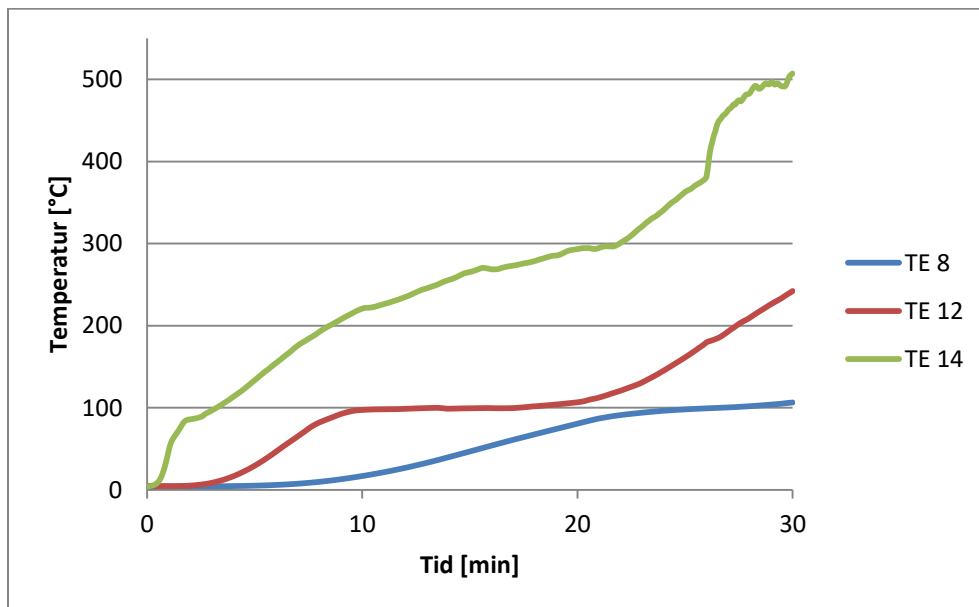
Figur 65 Ytelseserklæring for konstruksjonsvirke

Vedlegg 6 Temperatur i brennkammer, gjennomsnitt frem til 30 min



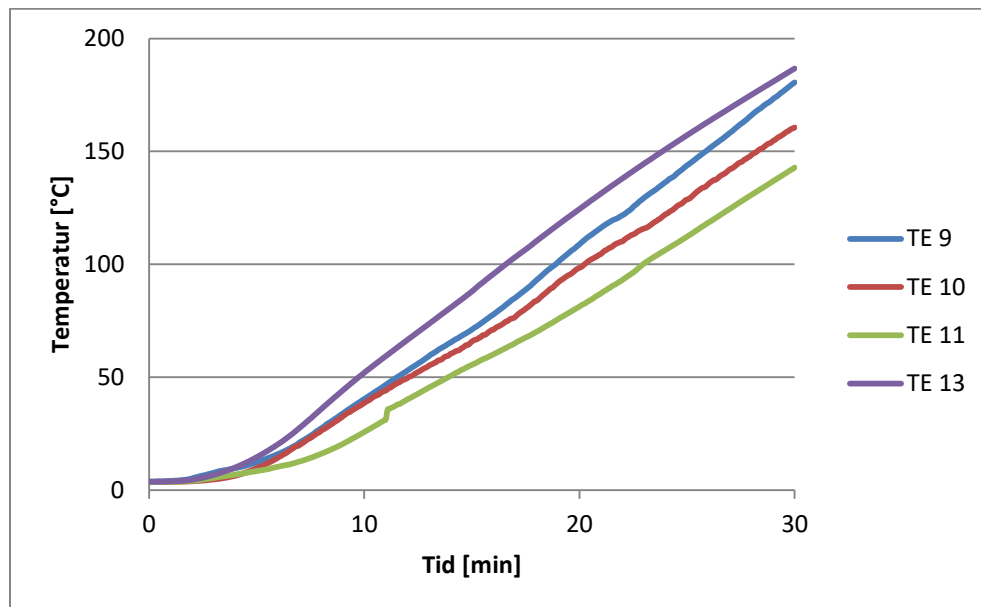
Figur 66 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min

Vedlegg 7 Temperatur i prøvestykket, gjennomsnitt frem til 30 min



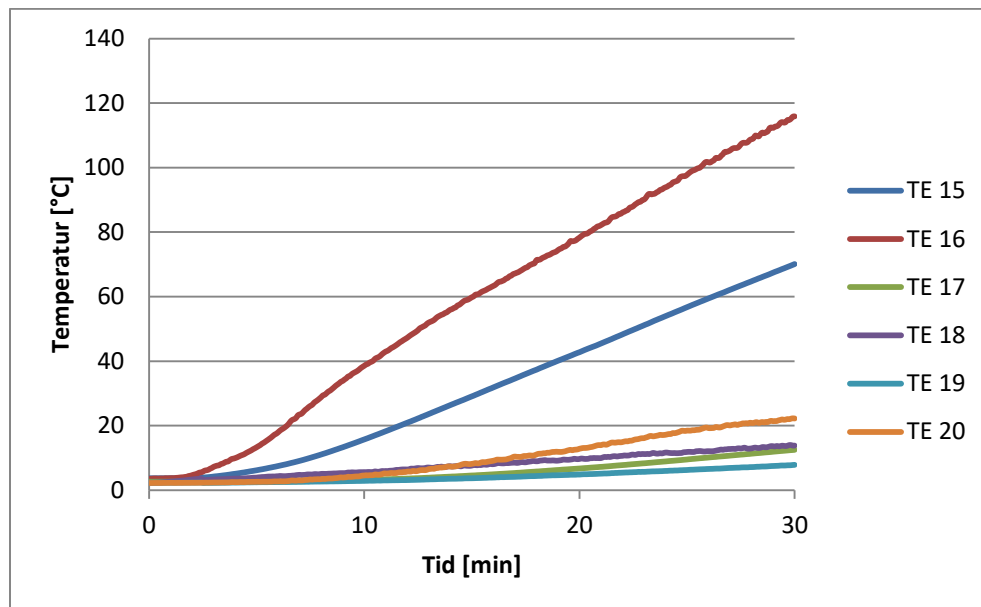
Figur 67 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min

Vedlegg 8 Temperatur i sentertverrsnitt, gjennomsnitt frem til 30 min



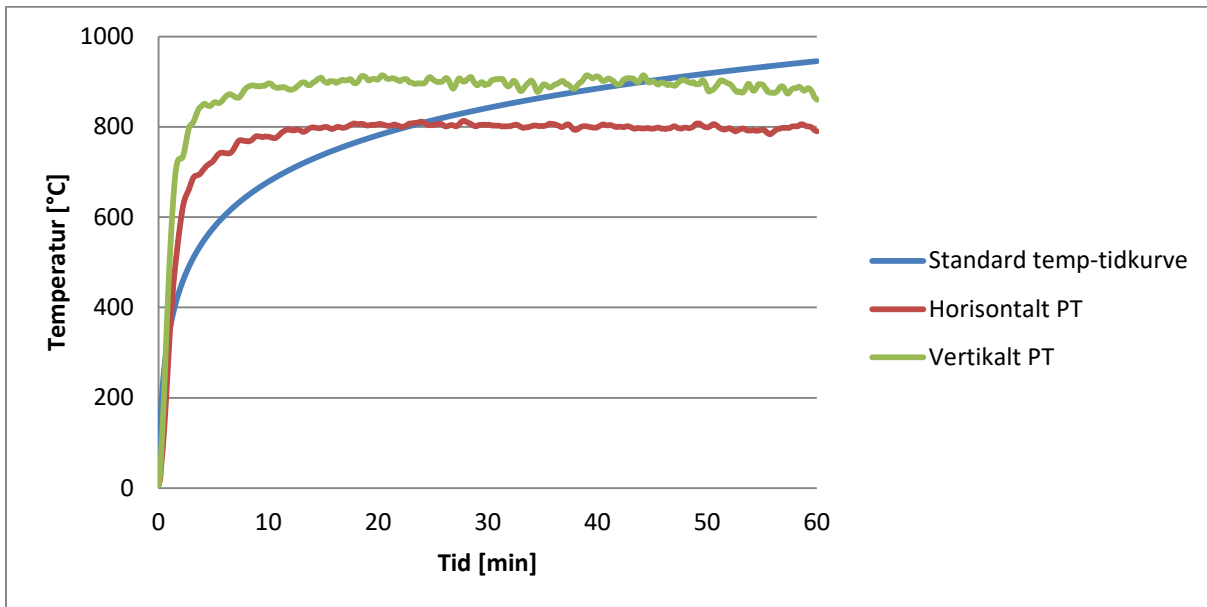
Figur 68 Temperatur i stålbjelkens sentertverrsnitt som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min

Vedlegg 9 Temperatur i lengderetning, gjennomsnitt frem til 30 min



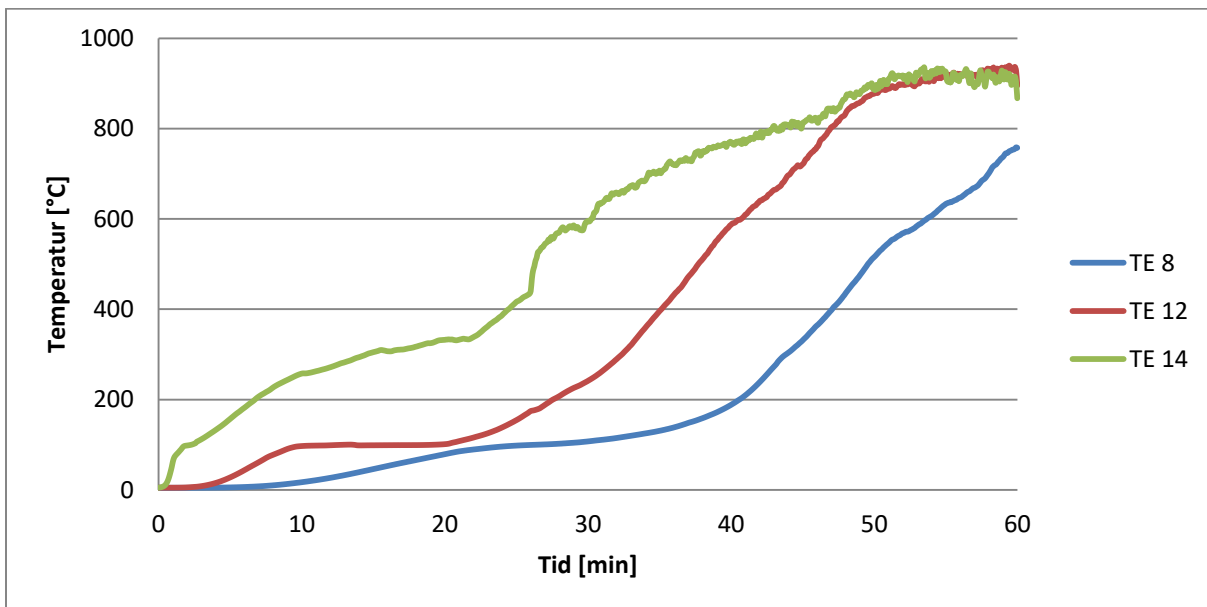
Figur 69 Temperatur i stålbjelkens lengderetning som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 30 min

Vedlegg 10 Temperatur i brennkammer, gjennomsnitt frem til 60 min



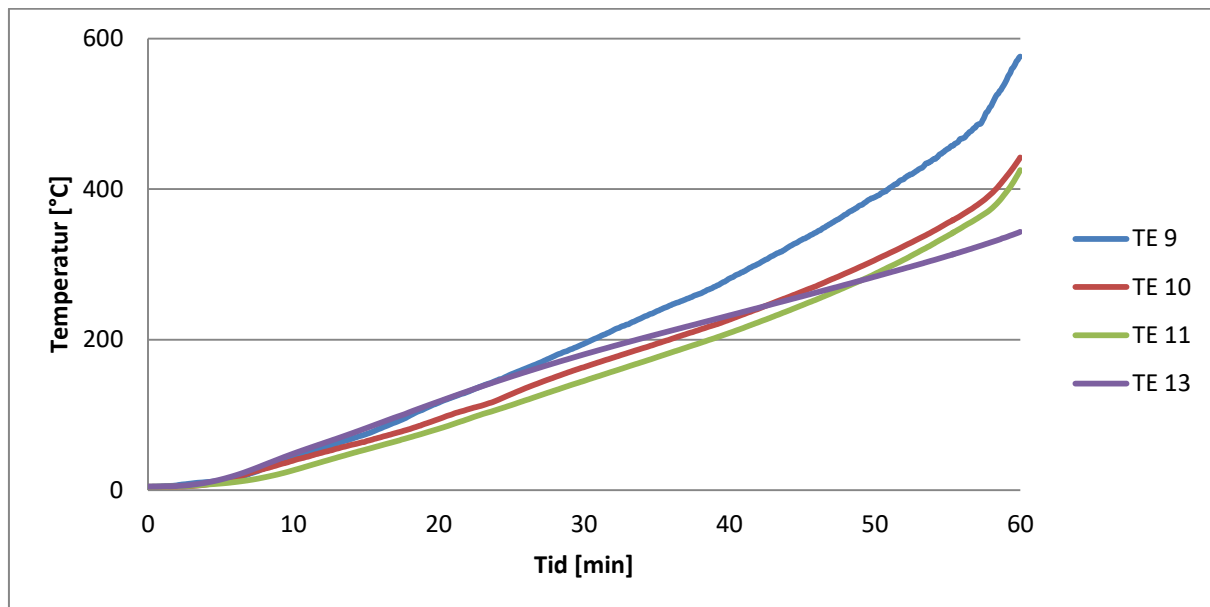
Figur 70 Temperatur i brennkammer som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min

Vedlegg 11 Temperatur i prøvestykket, gjennomsnitt frem til 60 min



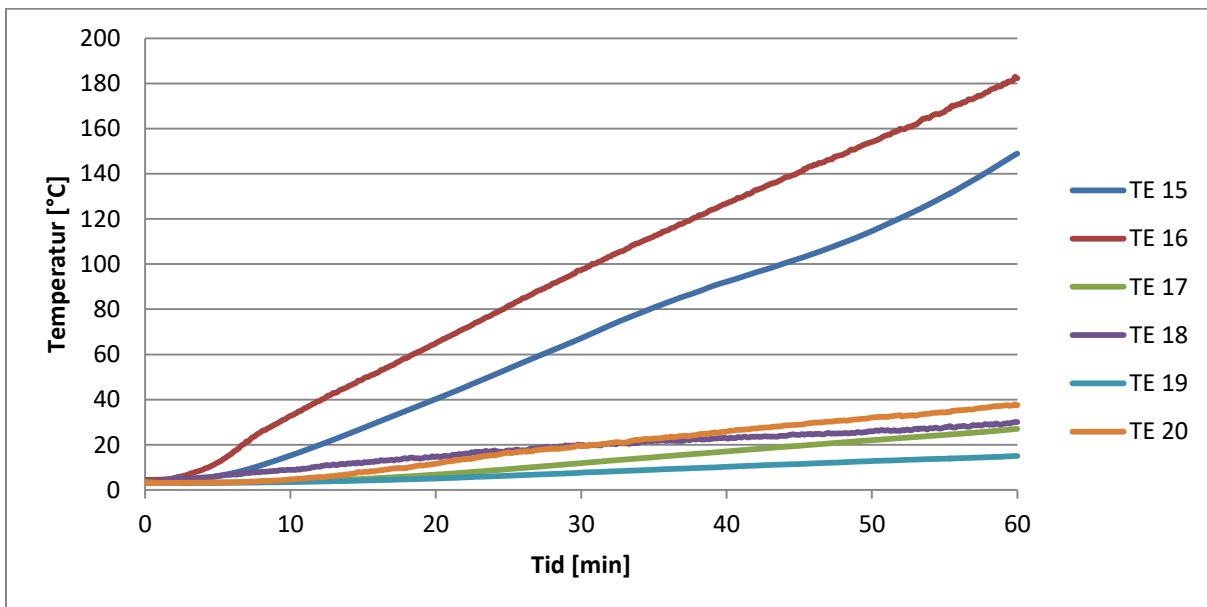
Figur 71 Temperatur i prøvestykket som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min

Vedlegg 12 Temperatur i sentertverrsnitt, gjennomsnitt frem til 60 min



Figur 72 Temperatur i stålbjelkens sentertverrsnitt som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min

Vedlegg 13 Temperatur i lengderetning, gjennomsnitt frem til 60 min



Figur 73 Temperatur i stålbjelkens lengderetning som funksjon av tid, gjennomsnitt frem til 60 min