



Høgskulen på Vestlandet

ING5002D - Master Thesis

ING5002D

Predefinert informasjon

Startdato:	15-05-2023 12:00 CEST	Termin:	2023 VÅR
Sluttdato:	01-06-2023 14:00 CEST	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Masteroppgave		
Flowkode:	203 ING5002D 1 MOPPG 2023 VÅR		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Kandidatnr.:	203
---------------------	-----

Informasjon fra deltaker

Antall ord *:	14087
----------------------	-------

Egenerklæring *: Ja

Jeg bekrefter at jeg har Ja registrert oppgavetittelen på norsk og engelsk i StudentWeb og vet at denne vil stå på vitnemålet mitt *:

Jeg godkjenner avtalen om publisering av masteroppgaven min *

Ja

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

Ja, Builder – Building Design for At Risk Groups

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

Nei

Ulming i konstruksjonsvirke som følge av ekstern branneksponering - Forsøk med krysslaminert-trevirke

Smoldering in structural timber as a result of external fire exposure - Experiments with cross-laminated timber



Marianne Dypå

Høgskulen på Vestlandet

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Haugesund
31. mai 2021



Ulming i konstruksjonsvirke som følge av ekstern branneksponering

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Marianne Dypå	Forfatter sign.
Oppgaven uttatt: Høst 2021	Åpen oppgave
Veileder: Bjarne Christian Hagen, Vidar Frette og Sveinung Erland Ekstern veileder: NA	
Stikk ord: <ul style="list-style-type: none">• Krysslaminert tre• KLT• Ulmebrann• Delaminering	Totalt 103 sider inkludert vedlegg Haugesund, 31.05.2023
Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten(e) står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.	

Forord

Denne oppgaven er min avsluttende oppgave ved Høgskulen på Vestlandet innen masterprogrammet for brannsikkerhet. Masterprogrammet er gjennomført som deltidsstudent over 4 år, parallelt med full jobb. Det har vært kjekt og lærerikt å få muligheten til å gjennomføre en praktisk oppgave, få lov til å bli skitten og lukte røyk, noe som er langt utenfor min normale kontortilværelse.

Masteroppgaven er eksperimentell og alle forsøk ble gjennomført i Høgskulens Hall of Flames sammen med Therese Rød som har gjort en tilsvarende oppgave [1], men med et annet trevirke. Begge oppgavene er en del av et større forskningsprosjekt *Builder – Building Design for At Risk Groups* som er finansiert av Norges Forskningsråd.

Jeg vil takke:

- Våre veiledere Vidar Frette, Bjarne Christian Hagen og Sveinung Erland for råd og tips underveis, og når forsøkene skulle omformes til en rapport.
- Anita Katharina Meyer som stod på pinne for å tilrettelegge og fikse eventuelle utfordringer med utstyr og fasiliteter under gjennomføring av selve forsøkene i Hall of Flame.
- Min medstudent Therese Rød som drog meg i gang for 4 år siden og har holdt ut med meg gjennom de normale og unormale årene vi fikk oppleve de årene studiet har pågått.
- Og til slutt min evig tålmodige samboer som nå har oppmuntret meg gjennom hele to masterløp.

Bergen 31. mai 2023

Marianne Dypå

Sammendrag

Det er et mål å erstatte klimaskadelige byggemateriale med klimavennlig råstoff som kan defineres som grønne, fornybare og bærekraftige. Det blir stadig mer populært å føre opp høye bygg hvor konstruksjonsmaterialet er trevirke, i motsetning til stål/betong som har vært dominerende tidligere. Bruk av krysslaminert tre (KLT) blir stadig mer vanlig, og selv om det er kjent at ubeskyttede trekonstruksjoner kan være bidragsyttere i et brannforløp. Denne oppgaven hadde til hensikt å vurdere hvordan direkte eksponering for brann påvirker krysslaminert trevirke. Oppgaven hadde hovedfokus på ulming i etterkant av at initiell brann er slukket.

I samarbeid med Therese Rød [1] ble det utført 20 forsøk, for hvert forsøk var det totalt seks tresøyler i brannrommet, tre stykk søyler i krysslaminert trevirke og tre stykk søyler i heltre. Det vil si at det for denne oppgaven var totalt 60 søyler. Selve forsøkene ble utført i et nedskalert ISO-rom og det ble benyttet en gassbrenner for å oppnå en brannbelastning i rommet tilsvarende som for standard ISO-brannkurve i henhold til ISO-834. Brannlasten ble opprettholdt i 20 minutter, så ble gassbrenneren slukket.

Det ble plassert to stykk termoelementer i hver tresøyle og åtte stykk termoelementer i selve brannrommet. Basert på en definisjon av nedre tenntemperatur på 250 °C for ulmebrann, og en øvre temperatur på 700 °C før ulmebrann går over i flammibrann, så var det flere forsøk hvor det ble påvist tilstedeværelse av ulmebrann i forventet nedkjølingsperiode etter en brann.

Det ble observert flere tilfeller av delaminering fra KLT i løpet av de første 20 minuttene. For flere av forsøkene hvor rommet var lukket gjennom forventet nedkjølingsfase, observert firkantede forkullede rester på gulvet når rommet ble åpnet. Dette kan skyldes delaminering, men også naturlig avskalling av forkullet materiale.

Det anbefales at det utføres videre forsøk for å bekrefte funn fra denne oppgaven, men også for å undersøke hvordan endrede metodeoppsett kan innvirke. Det anbefales å utføre forsøk med færre søyler i brannrommet, da for å få større innbyrdes avstand mellom søylene, samt at det da vil være mindre brennbart materiale til stede i rommet.

Abstract

It is an overall goal to replace climate-damaging building materials with climate-friendly raw materials that can be defined as green, renewable and sustainable. It is becoming increasingly popular to erect tall buildings where the construction material is wood, in contrast to steel/concrete which has been dominant in the past. The use of cross-laminated timber (CLT) is becoming increasingly common, even though it is a known fact that unprotected wood structures will be contributors during a fire. The purpose of this thesis was to assess how direct exposure to fire affects cross-laminated timber. Main focus for the thesis was to identify the presence of smouldering after the initial fire had been extinguished.

In collaboration with Therese Rød [1], 20 experiments were carried out, for each experiment there were a total of six wooden columns in the fire compartment, three columns in cross-laminated timber and three columns in solid wood. This means that for this thesis there were a total of 60 columns. The experiments themselves were carried out in a scaled-down ISO room and a gas burner was used to achieve a fire load in the room similar to that of the standard ISO fire curve according to ISO-834. The fire load was maintained for 20 minutes, then the gas burner was extinguished.

Two termocouples were placed in each wooden column and eight termocouples in the fire compartment itself. Based on a definition of a lower ignition temperature of 250 °C for a smouldering fire, and an upper temperature of 700 °C before a smouldering fire turns into a flame fire, there were several experiments where the presence of a smouldering fire was demonstrated during the expected cooling period after a fire.

Several cases of delamination from CLT were observed during the first 20 minutes of fire exposure. For several of the experiments where the room was closed during the expected cooling phase, square charred remains were observed on the floor when the room was opened. This can be due to delamination, but can also be natural flaking of charred material.

It is recommended that further experiments are carried out to confirm findings from this thesis, but also to investigate how changes to the experiment setup can affect the results. It is recommended to carry out tests with fewer columns in the fire room to achieve more free space/distance between the columns, this will also give less combustible material present in the room.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	iv
Sammendrag.....	vi
Abstract.....	viii
Innholdsfortegnelse.....	x
Figurliste.....	xii
Tabelliste.....	xiii
Forkortelse og Definisjoner.....	xiv
1 Innledning.....	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.2 Grensesnitt mellom oppgavene.....	1
1.3 Oppgavens struktur.....	3
2 Teori.....	4
2.1 Brannkjemi.....	4
2.1.1 Brannforløp.....	4
2.1.2 Temperatur i trevirke.....	5
2.1.3 Pyrolyse og forkulling.....	6
2.1.4 Delaminering.....	7
2.2 Standard brannkurver.....	8
2.2.1 ISO-834 brannkurve.....	9
2.2.2 EN-1363 brannkurve.....	10
2.3 Brannrom.....	11
2.4 Trevirke.....	12
2.4.1 Limtre.....	12
2.4.2 Krysslaminert elementer.....	12
2.4.3 Heltre.....	13
3 Eksperimentelt oppsett.....	14
3.1 Forsøksrom.....	14
3.1.1 Plassering av brenner og mengde-måler.....	16
3.1.2 Plassering og sikring av søyler.....	16
3.1.3 Plassering av termoelementer i brannrom.....	17
3.1.4 Plassering av termoelementer i søyler.....	18
3.2 Bygging av bokser/kasser for etterulming.....	20

4	Resultat	21
4.1	Hovedfunn.....	21
4.2	Tid/temperaturkurver	25
5	Diskusjon	28
5.1	Initiell brannbelastning	28
5.2	Innvendig søyletemperatur gjennom hele forsøket	31
5.3	Innvendig søyletemperatur i vekstfase av forsøk	34
5.4	Avstand til brenner	38
5.5	Delaminering.....	39
5.6	Logging av vekttap i etterkant av initiell brann	40
6	Konklusjon.....	42
7	Fremtidig arbeid.....	43
7.1	Granulat i brenner.....	43
7.2	Endret oppsett - Eksponeringstid	43
7.3	Endret oppsett – Avstand	43
8	Referanser	44
9	Vedlegg	47
	Vedlegg A. Materialdatablad	48
	Vedlegg B. Metode for gjennomføring av forsøk.....	50
	Vedlegg C. Resultater for hvert enkelt forsøk.....	56
	Vedlegg D. Brannbelastning	77
	Vedlegg E. Innvendig søyletemperatur for hele brannforløpet	83

Figurliste

Figur 1-1: Oppgavens struktur	3
Figur 2-1: Kategorisering av branntyper. Glødebrann plassert som underkategori til ulmebrann.	4
Figur 2-2: Typisk brannutvikling [15].....	5
Figur 2-3: Transient temperatur i søyle som funksjon av eksponert omgivelsestemperatur over tid [14, Fig. 2.7].....	5
Figur 2-4: Forkulling/pyrolyse [19].....	6
Figur 2-5: Forkullet KLT med eksempel på delaminering (Bilde fra [18])	7
Figur 2-6: Forkullingsdybde som funksjon av tid av ubeskyttet tre basert på (2.1)	8
Figur 2-7: Forkullingsdybde som funksjon av tid for ubeskyttet trevirke, men med delaminering	8
Figur 2-9: ISO 834 - Standard tid/temperatur-kurve	9
Figur 2-8: Sammenligning av reelt brannforløp og ISO 834 kurve [22]	10
Figur 2-10: EN 1363-2 - HC tid/temperatur-kurve	11
Figur 2-11: Brannrom i henhold til ISO 9705	11
Figur 2-12: Skisse av limtre [29].....	12
Figur 2-13: Skisse av KLT [31].....	13
Figur 2-14: Skisse av heltre [33].....	13
Figur 3-1: Skisse av brannrom.....	15
Figur 3-2: Stålblater på toppen av brannrommet.....	15
Figur 3-3: Isolasjon plassert over stålblater.....	15
Figur 3-4: Ferdig brannrom med takplate.....	15
Figur 3-5: Brenner	16
Figur 3-6: Gass-regulator/logger.....	16
Figur 3-7: Brenneren er plassert sentrert på bakre vegg.....	16
Figur 3-8: Plassering av de bakerste prøvestykkene, samt brenner. Sett gjennom takåpningen.	17
Figur 3-9: Plassering av prøvestykkene mitt i rommet, sett gjennom takåpningen.....	17
Figur 3-10: Plassering av patentbånd. Sett ovenifra.....	17
Figur 3-11: Plassering av termoelementer i rom	17
Figur 3-12: Plassering av søyler og termoelementer i brannrommet.....	18
Figur 3-13: Prøvestykker plassert i brannrommet	18
Figur 3-14: Skisse for plassering av termoelementer	18
Figur 3-15: Termoelementer festet til prøvestykker	18
Figur 3-16: Venstre side av ISO-rom, sett fra dør åpningen; Viser plasseringen av tremoelementene.....	19
Figur 3-17: Høyre side av ISO-rom, sett fra dør åpningen; Viser plasseringen av tremoelementene.....	19
Figur 3-18: Skisse for boks/kasse	20
Figur 3-19: Bokser	20
Figur 3-20: Boks med innvendig isolasjon over søylen	20
Figur 3-21: Boks med innvendig isolasjon under søylen.....	20
Figur 4-1: Plassering av både heltre (til venstre; V1, V2 og V3) og KLT (til høyre; H1, H2 og H3) søyler i brannrommet.....	21
Figur 4-2: Initiell brann (t<20min) observert gjennom branndør	22
Figur 4-3: Dør til brannrommet steng med gipsplate (Fra forsøk #07).....	22
Figur 4-4: Bilde tatt ovenfra etter fjerning av tak for forsøk #11	22
Figur 4-5: Søyler fra forsøk #09. Stykkene ble løftet ut etter ca. 5 timer	22

Figur 4-6: Tid/temperaturkurver for forsøk #01	26
Figur 4-7: Tid/temperaturkurver for forsøk #02	26
Figur 4-8: Tid/temperaturkurver for forsøk #11	27
Figur 5-1: Fra forsøk #05. Temperaturmålinger under tak i brannrom sammenfaller med EN 1363 standard brann kurve.....	29
Figur 5-2: Fra forsøk #13. Temperaturmålinger under tak i brannrom som sammenfaller med ISO 834 standard brann kurve.....	30
Figur 5-22: Fra forsøk #01. Temperaturer som indikerer at forsøket ganske enkelt gikk gjennom nedkjølingsperiode uten utvikling av hverken flamme eller ulmebrann.....	31
Figur 5-23: Fra forsøk #13. Temperaturer som indikerer ulmebrann.....	32
Figur 5-24: Fra forsøk #17. Temperaturer som indikerer både flammebrann og ulmebrann.....	32
Figur 5-25: Tid/temperaturkurve for forsøk #08	35
Figur 5-26 Tid/temperaturkurve for forsøk #08 og gradienter for hver enkelt kurve.....	35
Figur 5-27: Kun gradient for hver enkelt tid/temperaturkurve i forsøk #08	36
Figur 5-30: Plassering av termoelementer i KLT (tak og høyre vegg fjernet)	38
Figur 5-31: Kategori fordelt på plassering og termoelement	39
Figur 5-28: Delaminering i forsøk #18.....	40
Figur 5-29: Delaminering i forsøk #10.....	40

Tabelliste

Tabell 4-1: Sammendrag	23
Tabell 5-1: Sammenligning opp mot ISO 834 og EN 1363-2	30
Tabell 5-2: Sammendrag	33
Tabell 5-3: Kategori og gradient ved $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$ og $T_2 = 70^{\circ}\text{C}$	37

Forkortelse og Definisjoner

IMRoD	Introduksjon, Metode, Resultater og Diskusjon
KLT	Krysslaminert tre
HC	Hydro Carbon

1 Innledning

Det er et mål å erstatte klimaskadelige byggemateriale med klimavennlig råstoff som kan defineres som grønne, fornybare og bærekraftige. Det blir stadig mer populært å føre opp høye bygg hvor konstruksjonsmaterialet er trevirke, i motsetning til stål/betong som har vært dominerende tidligere. Skog tar opp og binder CO₂ gjennom vekstfasen og krever lite til ingen energi å produsere, CO₂ som er lagret i trevirket forblir i trevirket [2].

Som følge av den store bybrannen i Ålesund var det ulovlig å bygge trehus med mer enn 2 etasjer i norske byer i 100 år, forbudet ble opphevet i 1997 og det er nå et uttalt ønske fra den norske regjeringen å stimulere til økt bruk av trevirke som byggemateriale [3]. Trevirke benyttes i dag både som fasademateriale og til bærende konstruksjon, det har vært en utvikling mot stadig større konstruksjoner. I Bergen stod boligblokken «Treet» ferdig i 2015, bygget er 51 meter høyt og var definert som verdens høyeste av sitt slag. I 2018 overtok Mjøstårnet tittelen, for senere å se seg slått av høyhuset Ascent (Milwaukee) i 2018 et bygg på hele 86,5 meter.

I Byggeteknisk forskrift (TEK17) §11-4 stilles det krav til at bærende konstruksjon skal ha tilstrekkelig styrke og stabilitet til å kunne motstå et forventet brannlast, det vil si: bygget skal ikke kollapse under en brann, det skal være tilstrekkelig tid til rømning, redning og slukking [4].

En vanlig tilnærming har vært å anta at den strukturelle reststyrken i bærende konstruksjon av stål/betong, når en brann er slukket, opprettholdes. Bjørn Røste Dalen skrev en masteroppgave med tittelen *Overflatebehandling av krysslaminert tre* ved Høgskulen på Vestlandet våren 2021 [5]. I forsøkene utført av Dalen var det tegn til ulmebrann i noen av KLT-søylene etter at den gassmatede brenneren var slukket. Dersom bærende konstruksjon fortsetter å brytes ned etter, at en brann ansees som å være slukket, vil dette så vil dette kunne redusere muligheten til å bevege seg inn i et brannskadd bygg i etterkant av en brann.

1.1 Problemstilling

Opgaven har til hensikt å vurdere hvordan direkte eksponering for brann påvirker krysslaminert trevirke med hovedfokus på ulming i forventet nedkjølingsfase.

1.2 Grensesnitt mellom oppgavene

Alle eksperimentene ble utført som et samarbeid mellom Therese Rød og Marianne Dypå. Utføring av forsøk i brannhallen til Høgskulen på Vestlandet krever av sikkerhetsmessige årsaker tilstedeværelse av minimum to personer. Oppbygging av selve brannrommet og håndtering av varme gjenstander tilsa også at det var fornuftig å ha et visst samarbeid. Det var også et ønske fra Høgskulen på Vestlandet at det skulle gjennomføres forsøk med to forskjellige materialer.

Det ble totalt utført 20 forsøk og for hvert forsøk ble det brent tre søyler av heltre og tre søyler av krysslaminert tre. Ved å utføre forsøkene med to forskjellige materialer i brannrommet har en også et direkte sammenlignbart datamateriell for to tretyper/materiell.

Resultater for heltresøylene er beskrevet og diskutert i Masteroppgaven til Therese Rød [1], mens resultater for limtresøyer blir beskrevet i denne masteroppgaven.

Etter som forsøkene er utført sammen vil enkelte av kapitlene i disse to masteroppgavene være like eller ha likhetstrekk, dette er avklart med eksamenskontoret.

1.3 Oppgavens struktur

Oppgaven er rettet mot personer med brannfaglig bakgrunn, og det antas leseren av oppgaven har en grunnleggende forståelse av brannodynamikk/fysikk og -sikkerhet.

Figur 1-1 viser disposisjonen til oppgaven, denne er i grove trekk basert på IMRod-modellen [6].



Figur 1-1: Oppgavens struktur

2 Teori

I dette kapitlet gis det en beskrivelse av teori som er relevant for diskusjon av oppgavens problemstilling og resultater.

2.1 Brannkjemi

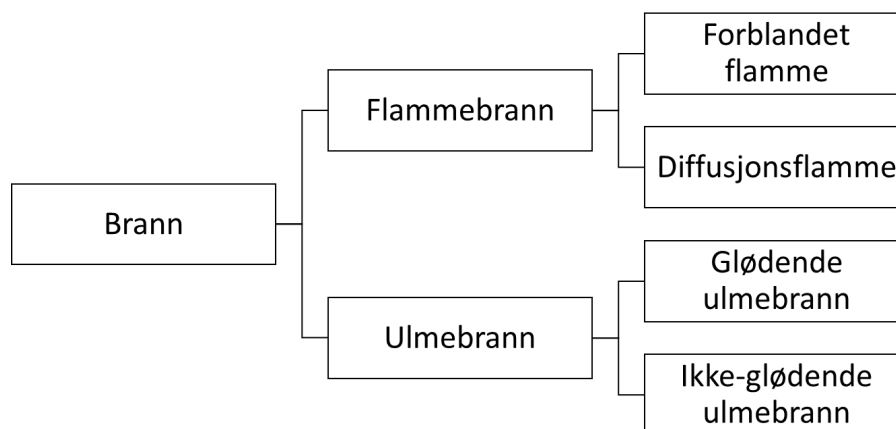
En brann er en eksoterm, kjemisk reaksjon og er aldri et entydig fenomen. Selve brannforløpet er avhengig av blant annet brenselstype, brenselmengde, rommets geometri, overflater og ventilasjon [7] [8].

Brann kan deles i to underkategorier; Ulmebrann og flammebrann.

Ulmebrann er en sakte, flammeløs forbrenningsreaksjon. Sammenlignet med flammebrann har den lav temperatur. Mens oksideringsprosessen skjer i gassfasen for en flammebrann, skjer den direkte på brenseloverflaten for en ulmebrann.

Avhengig av hvilken temperaturer en legger til grunn og hvordan en definerer ulming, så kan glødebrann defineres som en tredje type brann eller en kan plasseres som en underkategori til ulmebrann [9] [10] [11].

De forskjellige definisjonene er vist skjematisk i Figur 2-1.



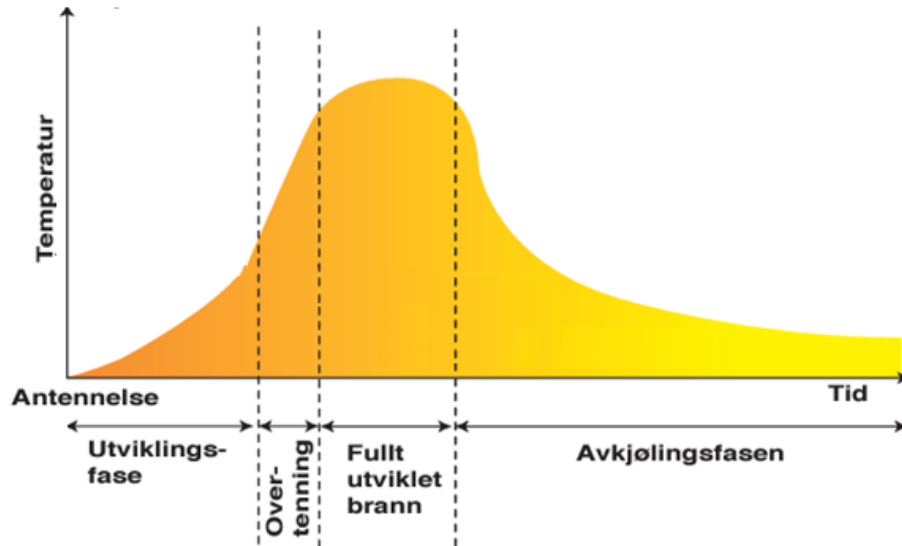
Figur 2-1: Kategorisering av branntyper. Glødebrann plassert som underkategori til ulmebrann.

Minimum tenn-temperatur for ulming er kun etablert for noen få materialer, for trevirke er nederste temperatur identifisert til 250 °C ved hjelp av en ASTM D1929 forsøk [12] og har et øvre sjikt mellom 450-700 °C [11] før en vil se en overgang til flammebrann [13].

2.1.1 Brannforløp

Figur 2-2 viser en tid/temperaturutvikling for en fullt utviklet rombrann. Brannforløpet begynner med en antennelse og en mindre brann som er lokalisert rundt arnestedet, dersom det er tilstrekkelig brensel vil brannen vokse og bevege seg gjennom overtenning til en fullt utviklet brann hvor brannen er regulert av tilgang på oksygen. Etter at en brann har oppstått er det tre mulige måter den kan utvikle seg på; 1) den kan dø ut uten å antenne andre omkringliggende objekter, 2) dersom det ikke er tilstrekkelig oksygen vil brannen utvikle seg svært langsomt eller kveles, eller 3) dersom det er både tilstrekkelig brensel og oksygen kan brannen utvikle seg til en fullt utviklet rombrann [14, Kap. 9].

Ved overtenning vil alle brennbare flater i rommet brenne og flammer vil oppstå på utsiden av eventuelle åpninger i rommet. Etter hvert som brenselet i rommet brukes opp vil brannforløpet bevege seg over i avkjølingsfasen, i henhold til Drysdale inntretr avkjølingsfasen etter at gjennomsnittstemperaturen i rommet har sunket til under 80% av rombrannens toppetemperatur [14, Kap. 9]..

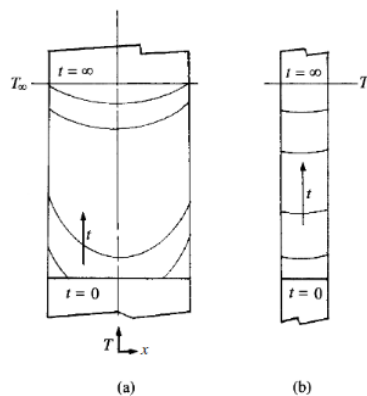


Figur 2-2: Typisk brannutvikling [15]

2.1.2 Temperatur i trevirke

Trevirke har en lav varmeledningsevne sammenlignet med for eksempel kobber, stål, stein og glass. [14, Tab. 2.1]

Temperatur i en KLT-søylen som funksjon av tid er beskrevet som termisk konduksjon eller varmeledning [14, Kap. 2.2], dette er vist i Figur 2-3. Hvor fort et materiale blir gjennomvarmt vil blant annet avhenge av materialets tverrsnitt/tykkelse og hvor mange sider av KLT-søylen som er eksponert.



Figur 2-3: Transient temperatur i søyle som funksjon av eksponert omgivelsestemperatur over tid [14, Fig. 2.7]

2.1.3 Pyrolyse og forkulling

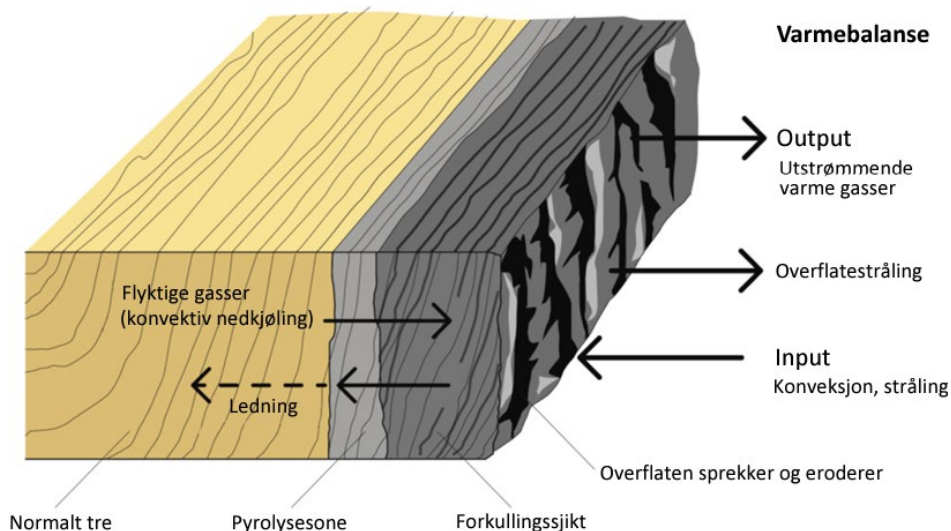
For å antenne et fast materiale må materialet omdannes til brennbare gasser. Denne nedbrytningen omtales som pyrolyse er en kjemisk nedbrytning av fast materiale

Ved pyrolyse foregår det en spalting av fast organisk materiale som følge av oppvarming, innenfor brannteknisk fagmiljø benyttes uttrykket pyrolyse med og uten tilstedeværelse av oksygen. Pyrolyse krever energi. For at pyrolyseprosessen skal bli selvgående, må energien som frigis når pyrolyseproduktene oksideres, overstige energien som kreves for videre pyrolyse [16].

For at tre skal brenne må eventuell fuktighet i trevirket først fordampe, denne faseendringen fra væske til damp forekommer ved konstant temperatur. Ved atmosfærisk trykk fordamper vann fra væske til gass ved 100 °C. Ved oppvarming av tre vil en se et temperaturen flater ut og blir liggende på samme nivå inntil vannet er fordampet. Det er først når temperaturen begynner å stige igjen at nedbrytningen av selve pyrolysen starter [16]. Trevirke har en spesifikk varmeverdi på ca. 17,5 MJ/kg og massetapsraten er 14 g/m²s [17].

For trevirke vil forbrenning skje fra utsiden og innover i materialet. Etter hvert som pyrolysen beveger seg innover trevirket vil overflaten forkulles, dette laget med forkullet trevirke har en isolerende effekt og forsinker videre varmetransport [7]. Når overflaten er blitt forkullet foregår eventuell videre pyrolyse like under det forkullede laget. Varmeledningsevnen til kull er 0,07 W/°C, dette er halvparten av varmeledningsevnen til trevirke 0,14 W/°C [16]. Forkullet trevirke fremstår sprøtt og porøst

Figur 2-4 viser pyrolysesjikt, oppbygging av forkullingssjikt og bevegelse av pyrolysefront inn i uskadet trevirke. Figur 2-5 viser eksempel på KLT i etterkant av forsøk utført av NFPA [18].



Figur 2-4: Forkulling/pyrolyse [19]

Hastigheten til pyrolysefronten innover i trevirket varierer mellom forskjellige treslag og påvirkes blant annet av fuktnivået i trevirket, fronten beveger seg innover i trevirket proporsjonelt med tidsforløpet og ligger typisk mellom 0,4-0,8 mm/minutt [7]. Eurocode 5 [20] oppgir forkullingshastigheten i limtre og KLT til 0,65 mm/s.

Formel (2.2) er hentet fra Eurocode5 [20] og er en av to formler som oppgis i standarden for beregning av forkulningsdybde, uttrykket i (2.2) er for endimensjonal eksponering.

$$d_{char,0} = \beta_0 * t \quad (2.1)$$

der:

$d_{char,0}$	Endimensjonal forkulningsdybde	[mm]
β_0	Forkullningshastighet	[mm/minutt]
t	Tid	[minutt]

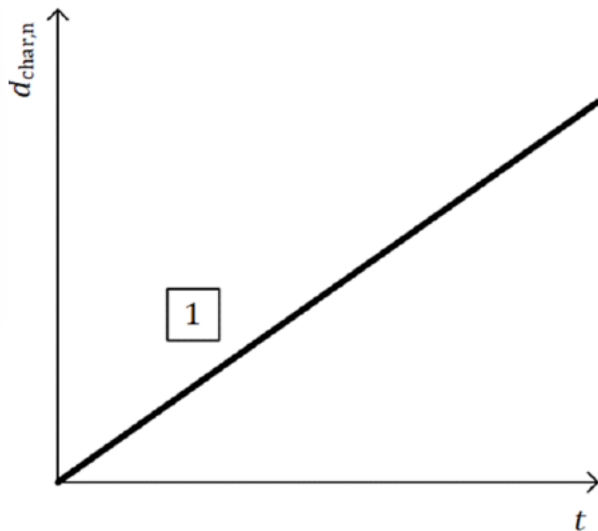
2.1.4 Delaminering

Krysslaminert tre er bygd opp av lameller som ligger lag på lag, ved brannbelastning kan det forekomme at deler av det eksponerte laget faller av. Delaminering skyldes at limet som er benyttet mellom lamellene svikter som følge av høye temperaturer, dette må ikke forveksles med naturlig avskaling av forkullet materiale. Ved delaminering faller det beskyttende laget med forkullet trevirke ned og friskt trevirke eksponeres, og resulterer i økt forbrenning av eksponert tømmer. Dette har vist seg å være årsaken til forlengelse av fasen *fullt utviklet brann* og at "nye branner oppstår" i *avkjølingsfasen*, altså en sekundær overtenning [18].

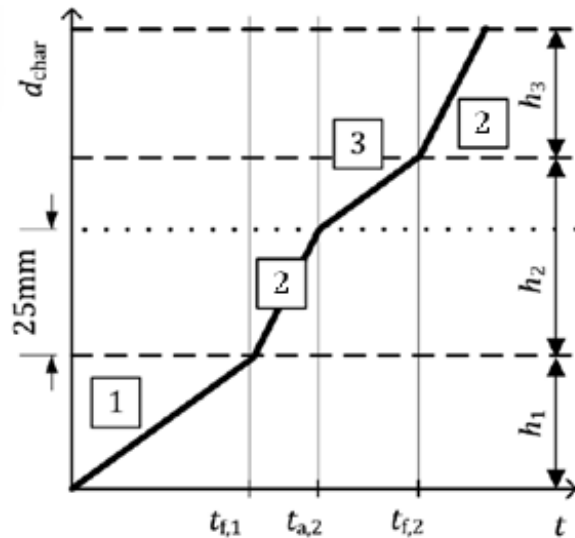
Figur 2-5 er hentet fra *Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire* og viser delaminering av krysslaminert tre [18].



Figur 2-5: Forkullet KLT med eksempel på delaminering (Bilde fra [18])



Figur 2-6: Forkullingsdybde som funksjon av tid av ubeskyttet tre basert på (2.1)



Figur 2-7: Forkullingsdybde som funksjon av tid for ubeskyttet trevirke, men med delaminering

Figur 2-6 viser lineær forkulling som funksjon av tid, mens Figur 2-7 hvordan forkullingshastigheten vil variere dersom delaminering skulle inntreffe [20].

De forskjellige fasene i Figur 2-6 og Figur 2-7 er

- Fase 1) Normal forkullingshastighet
- Fase 2) Forkulling etter delaminering; Hastighetseskalering.
 - Ved delaminering eksponeres friskt trevirke for en fullt utviklet brann uten beskyttelse fra et lag forkullet trevirke. Forkullingshastigheten er derfor hurtigere enn i fase 1.
- Fase 3) Konsolidering; Inntreffer ved en kulldybde på 25 mm
 - Dybde på nytt forkullet trevirke er tilstrekkelig til å ha oppnådd funksjon som isolerende lag og videre forkulling skjer ved samme hastighet som for fase 1.

2.2 Standard brannkurver

Det er utarbeidet flere typer brannkurver som er ment å gjengi et standardisert eksempel på varmeavgivelse fra en brann i form av temperatur som en funksjon av tid.

Brannkurver er ikke ment å gi et bilde av hvordan tid/temperatur vil utvikle seg i reelle brannscenarier, men er ment som et verktøy for å kunne sammenligne resultater fra forskjellige tester.

Eksempler på standarder som beskriver brannkurver:

- ISO-834 Fire-resistance tests - Elements of building construction
- NS-EN 1991 Eurocode 1
- NS-EN 469-1:2012 Fire resistance tests for loadbearing elements

- BS 476: part 20 Fire Tests on Building materials and structures – Part 20. Method of forsøk for determination of the fire resistance of elements of construction
- DIN 4102 Fire behavior of building materials and elements Section 1: Classification of building materials Requirements and tests
- AS 1530 Fire Test to Building Material
- EN-1363 Fire resistance tests

2.2.1 ISO-834 brannkurve

Tid/temperaturkurve fra ISO-834 er ment å gjengi termisk last på bygningselementer ved tester utført i fullskala-rom og var i utgangspunktet utarbeidet for testing av betongkonstruksjoner. Når det plasseres søyler av trevirke i forsøk-rommet, vil trevirke bidra til økt brannbelastning og ytterligere brannforløp etter at ISO-834 brannen er slukket.

Formel (2.2) er hentet fra ISO-834, kurven er ment å reflektere en cellulosebrann [21].

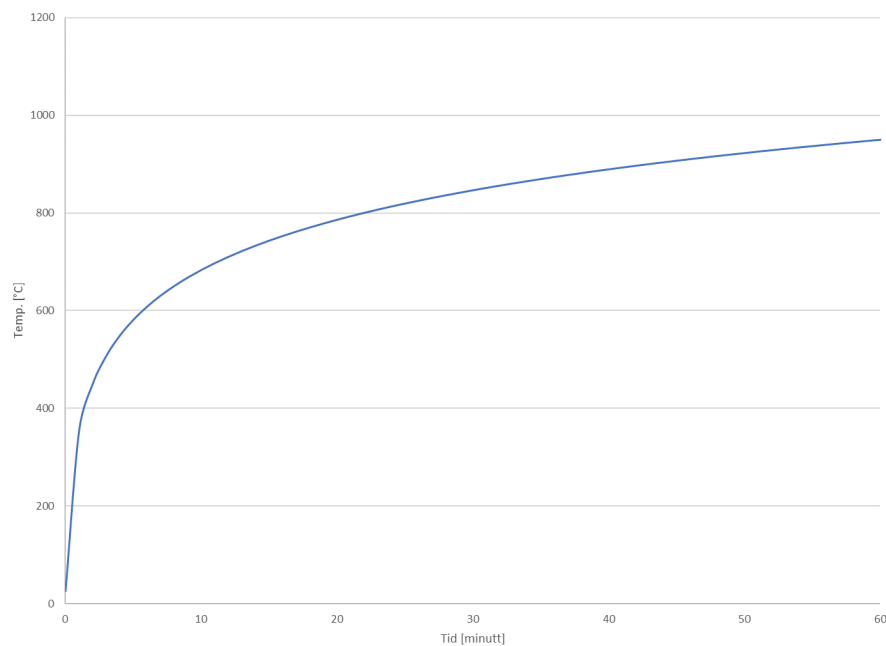
$$T - T_0 = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (2.2)$$

der:

T Temperatur ved tiden t [°C]

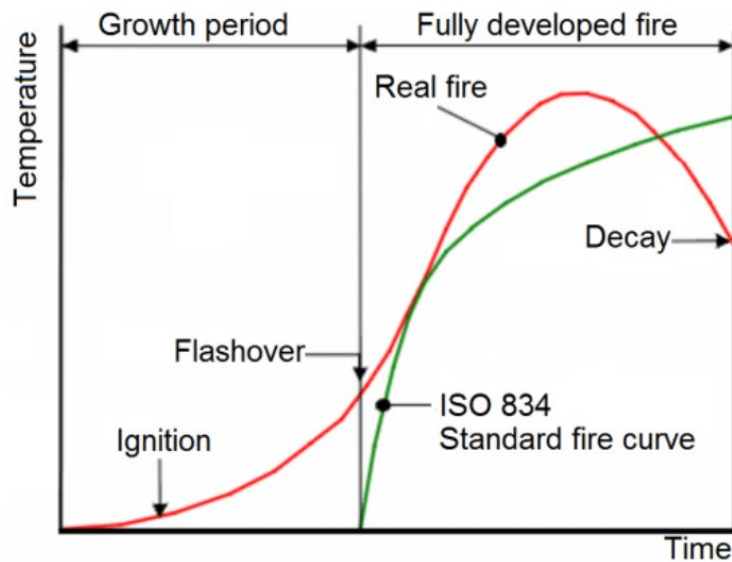
T_0 Start-temperatur ved ved $t=0$ [°C]

t Tid [minutt]



Figur 2-8: ISO 834 - Standard tid/temperature-kurve

Figur 2-9 viser en sammenligning av ISO 834-kurven og en forventet temperaturutvikling for et reelt brannforløp. ISO 834-kurven inkluderer ikke vekstperiode frem til overtenning eller avkjølingsperiode. Dette er en vanlig forenkling for standard tid/temperaturkurver [22].



Figur 2-9: Sammenligning av reelt brannforløp og ISO 834 kurve [22]

2.2.2 EN-1363 brannkurve

Ved branner i hydrokarboner (HC) er brannhastigheten/stigningstall betraktelig høyere enn for cellulose.

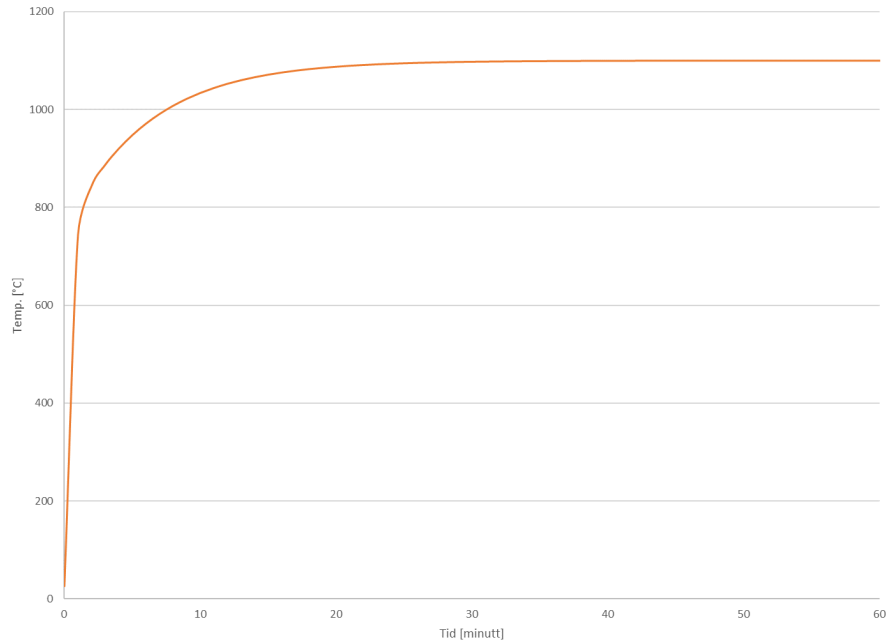
Formel (2.3) er fra EN-1363-2 [23] og beskriver en tid/temperaturkurve med betraktelig raskere vekstfase enn for ISO 834-kurven. Kurven representerer en vekstfase en forbinder med HC-branner.

$$T = 20 + 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.67e^{-2.5t}) \quad (2.3)$$

der:

T Temperatur ved tiden t [°C]

t Tid [minutt]

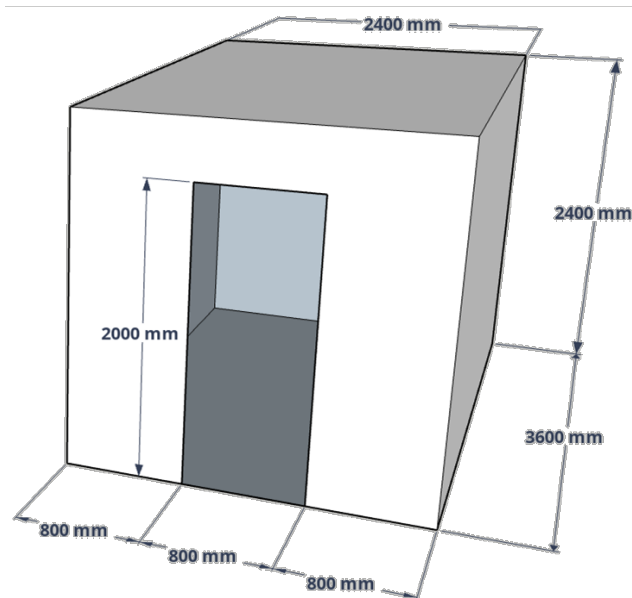


Figur 2-10: EN 1363-2 - HC tid/temperatur-kurve

2.3 Brannrom

ISO 9705 beskriver testoppsett for en romhjørnetest for vegg- og takforingsprodukter. Dimensjonene for brannrommet har etablert seg som en bransjestandard for gjennomføring av branntester.

Figur 2-11 viser innvendig mål for brannrommet beskrevet i ISO 9705 [24].



Figur 2-11: Brannrom i henhold til ISO 9705

Fullskalaforsøk er direkte sammenlignbar med reelle situasjoner, men fullskalaforsøk er kostbare og tidskrevende, og det er blitt vanlig å gjennomføre småskala tester for å forutsi mulige resultater før en

eventuelt utfører en fullskala forsøk. I et småskalaforsøk kan en lettere kontrollere/styre parametere som kan påvirke resultatene av forsøket. [25]

Formålet med brannforsøk er ofte å avdekke grunnleggende egenskaper ved testmateriellet. Det ville vært både praktisk og kostbesparende dersom en fullt ut kunne erstatte fullskalatester med tester i mindre skala [26].

Brannutviklingen i nedskalerte rom vil ofte være raskere enn i et fullskala-rom, eksempelvis vil en oppleve raskere brannutvikling og tiden det tar å røykfylle rommet er også mindre enn det en vil se med et fullskalarom.

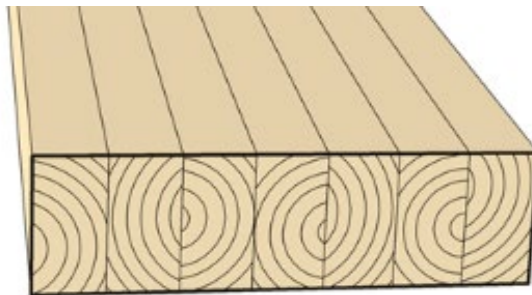
2.4 Trevirke

Det er lang tradisjon i Norge for bruk av treprodukter som byggemateriale, hovedsakelig for mindre lettere konstruksjoner. Men de norske stavkirkene er eksempler på større bygg som ble satt opp med trevirke som bærende konstruksjon så lang tilbake som i middelalderen [27].

Tremateriale kan deles opp i to hovedtyper: Bearbeidet og ikke-bearbeidet. Kapittel 2.4.1 til 2.4.3 gir en kort beskrivelse av limtre, krysslaminert tre og heltre.

2.4.1 Limtre

Limtre produseres ved at enkeltbord med en tykkelse på typisk 20-50 mm limes sammen. Fiberretningen til enkeltbordene legges i omtrentlig samme retning, se Figur 2-12. Limtre er blant annet benyttet i Vikingskipet i Hamar og Oslo Lufthavn Gardermoen [28]

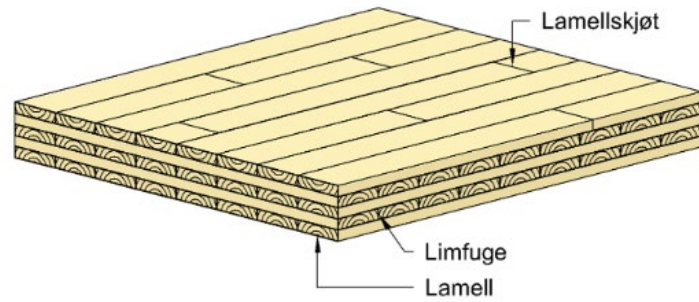


Figur 2-12: Skisse av limtre [29]

2.4.2 Krysslaminert elementer

Krysslaminert tre (KLT) produseres ved at enkeltbord/planker festes ved hjelp av lim, spiker, treplugger eller andre sammenføyningsmetoder. KLT skiller seg fra limtre ved at fiberretningen ikke legges i samme retningen, men krysses i forhold til hverandre. KLT omtales også som massivtre [30].

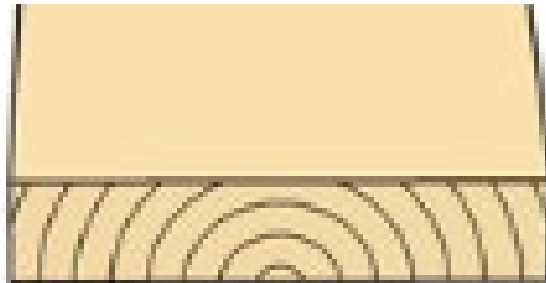
Figur 2-13 viser oppbygging av KLT en ser at lamellene til de forskjellige lagene er lagt 90° på hverandre.



Figur 2-13: Skisse av KLT [31]

2.4.3 Heltre

Heltre er som navnet indikerer helt trevirke som ikke har blitt laminert eller limt, se Figur 2-14. Heltre sages ut direkte, i langsgående retning, fra en trestamme [32].



Figur 2-14: Skisse av heltre [33]

3 Eksperimentelt oppsett

Formålet med oppgaven er å se nærmere på hvordan søyler av ulikt trevirke påvirkes av langvarig varmeeksponering. Forsøkene er gjennomført ved å plassere tresøyler i et brannrom bygget opp av lettbetongelementer, søylene ble så eksponert for ekstern brannbelastning fra en brenner i 20 minutter.

Forsøkene i denne rapporten bygger videre på arbeidet til Bjørn Røste Dalen (Dalen, 2021), med et tilsvarende oppsett. Første del av metoden er satt opp for å etterligne forsøkene beskrevet i Dalens Master oppgave, mens del 2, er særegen for denne oppgaven.

En eksperimentell tilnærming er valgt for oppgaven og dette kapitlet beskriver oppsett for forsøk. Prosedyren er utformet slik at forsøkene skal kunne etterprøves av andre. Forsøk ble gjennomført i henhold til metode beskrevet i Vedlegg B.

3.1 Forsøksrom

Figur 3-1 viser en satt skisse av rommet. Hvor forsøkene ble gjennomført. Forsøksrommet ble laget av Siporex-blokker. Siporex er et porebetongprodukt og ble benyttet da materialet har lav vekt, det er lett å sage/tilpasse, er motstandsdyktig mot vann og har gode varmeisolerende egenskaper.

To typer Siporex-blokker ble benyttet for å bygge forsøk-rommet:

- Gulv: 600 x 400 x 25mm
- Vegg: 200 x 200 x 600mm

Blokkene ble tilpasset slik at ønsket størrelse og form på brannrommet ble oppnådd. Som festemiddel ble det benyttet Infra Fliselim. De innvendige målene tilsvarer 1/3 ISO-rom.

Utvendige mål:

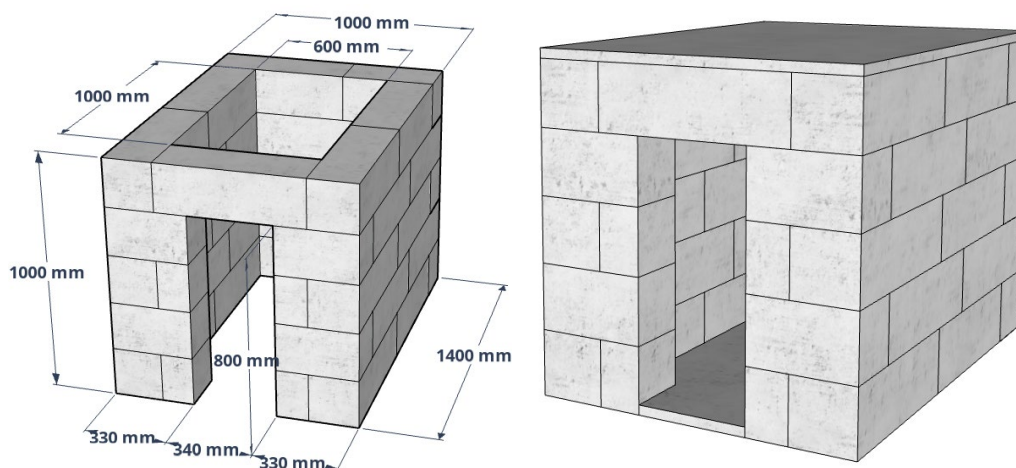
- Bredder: 1000 mm
- Lengde: 1400 mm
- Høyde: 1000mm

Innvendige mål:

- Bredder: 600 mm
- Lengde: 1000 mm
- Høyde: 975mm

Døråpning:

- Bredder: 340 mm
- Dybde: 200 mm
- Høyde: 800 mm



Figur 3-1: Skisse av brannrom

Som fundament for brannrommet ble de benyttet en Euro-pall. Videre ble det plassert to lag med sponplater som ble festet til pallen ved hjelp av skruer. Rommet ble bygget på en Europalle for å muliggjøre flytting av rommet. Fotavtrykket til rommet var noe større enn overflaten på Europallen, noe som etter hvert ga strukturelle utfordringer. Det anbefales at dersom en tilsvarende brannrom skal bygges opp må arealet av Europallen være større enn foravtrykket til brannrommet.



Figur 3-2: Stålplater på toppen av brannrommet



Figur 3-3: Isolasjon plassert over stålplater



Figur 3-4: Ferdig brannrom med takplate

Som takkonstruksjon ble det benyttet en kombinasjon av stålplater og en større Siporex-plate med en tykkelse på 25 mm. Tre stykk stålplater (1000 mm x 500 mm x 2 mm) ble lagt med overlapp slik at de dekket hele takåpning, disse hadde som hensikt å skjerme selve Siporex-platen for direkte flammer, dette er vist i Figur 3-2 til Figur 3-4. Et lag isolasjon ble lagt på toppen av rommet før stålplatene ble lagt på (Figur 3-2), et nytt lag isolasjon ble så lagt oppå stålplatene (Figur 3-3) og til slutt ble siporexplate lagt på (Figur 3-4). Dette ble gjort for å tette igjen så godt som mulig for å forhindre røyk fra å komme ut; for å tette rommet.

3.1.1 Plassering av brenner og mengde-måler

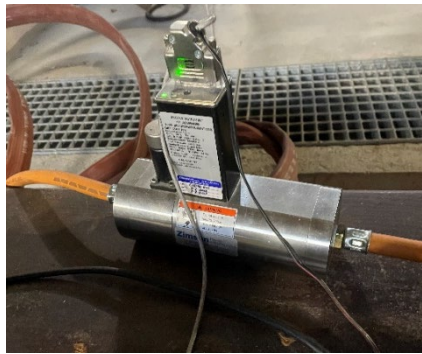
Figur 3-5 viser et bilde av brenneren som ble benyttet, denne ble plassert innerst i rommet. Som granulat for å fordele gassen som mates inn i brenneren ble det benyttet kattesand. Plassering av brenner i rom er vist på Figur 3-8. Som brenngass ble det benyttet propan (C_3H_8), mengde brenngass ble regulert gjennom en flow-ventil styrt med Brooks 52xx (programvare). Figur 3-6 viser gass-regulatoren som ble benyttet.

Mål brenner:

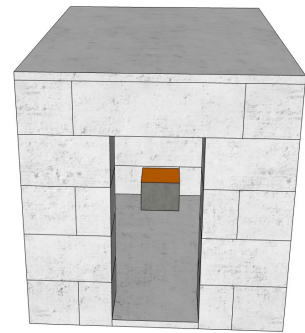
- Høyde 160 mm
- Bredde 205 mm
- Lengde 205 mm



Figur 3-5: Brenner



Figur 3-6: Gass-regulator/logger



Figur 3-7: Brenneren er plassert sentrert på bakre vegg.

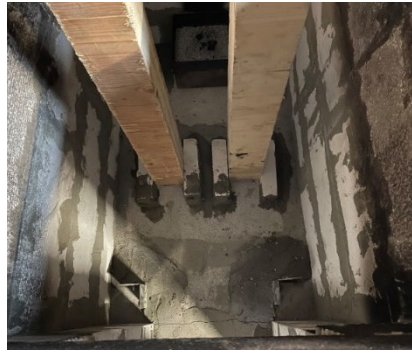
3.1.2 Plassering og sikring av søyler

For å sikre at prøvestykkene beholdt plasseringen under forsøkene er det plassert mindre stykker med Siporex og vinkelhjern på gulvet, se Figur 3-8 til Figur 3-10.

I overkant av søylene ble det benyttet patentbånd for å hindre stykkene fra å velte, søylene ble festet til patentbåndet med skruer. Ref figur Figur 3-10



Figur 3-8: Plassering av de bakerste prøvestykkene, samt brenner. Sett gjennom takåpningen.



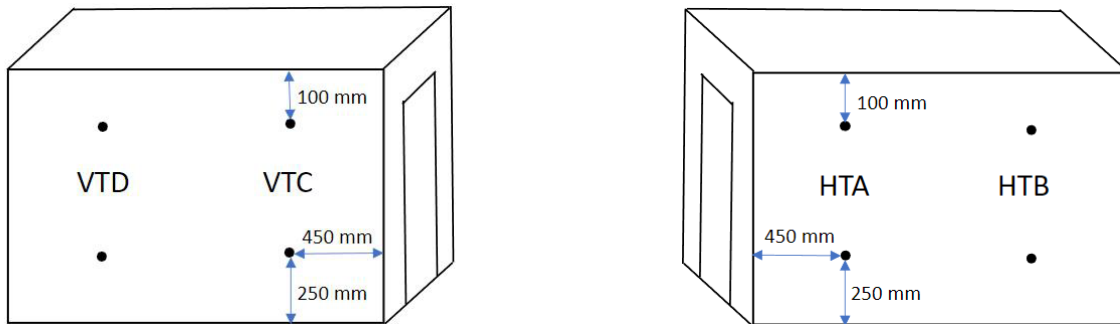
Figur 3-9: Plassering av prøvestykkene mitt i rommet, sett gjennom takåpningen.



Figur 3-10: Plassering av patentbånd. Sett ovenifra.

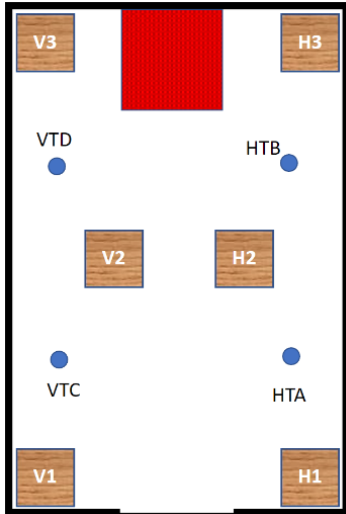
3.1.3 Plassering av termoelementer i brannrom

Det ble plassert åtte termoelementer i selve brannrommet. Termoelementene ble plassert i to nivåer. Det fire nederste/laveste ble plassert ca. 250 mm opp fra gulvet og det øverste nivået ble plassert ca. 100 mm ned fra taket. Elementene ble plassert ca. 450 mm fra endeveggene og ca. 70 mm inn i rommet, ref. Figur 3-11.



Figur 3-11: Plassering av termoelementer i rom

Figur 3-12 viser plassering av søyler, brenner og termoelementer sett ovenfra. V1, V2 og V3 viser plassering av heltresøyler. H1, H2 og H3 viser plassering av KLT-søyler. De blå prikkene HTA, HTB, VTC og VTD viser plassering av termoelementene rommet. Den røde firkanten viser plasseringen av brenneren. Den enkle streken mellom V1 og H1, viser plassering av døren. Figur 3-13 viser oppsett med både heltre og KLT-søyler.



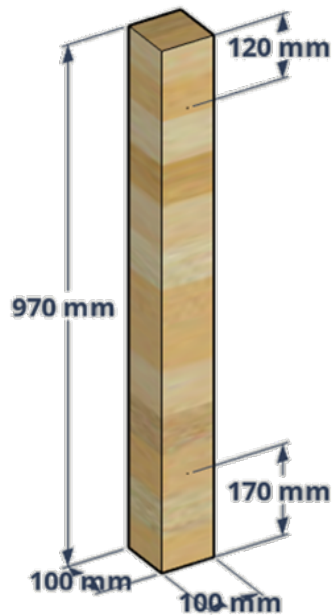
Figur 3-12: Plassering av søyler og termoelementer i brannrommet



Figur 3-13: Prøvestykker plassert i brannrommet

3.1.4 Plassering av termoelementer i søyler

Det plasseres to termoelementer i forberede hull i hvert av prøvestykkene. Det øverste hullet er plassert ca. 120 mm fra topp av søylen, og det nederste hullet er plassert ca. 170 mm opp fra bunn av søylen, ref. Figur 3-14 og Figur 3-15.



Figur 3-14: Skisse for plassering av termoelementer



Figur 3-15: Termoelementer festet til prøvestykker

Termoelementene ble navngitt med respektivt kanalnavn fra programvaren som benyttes av temperaturloggeren, plassering av de forskjellige temperaturelementene ble så merket opp på utsiden av rommet, ref. Figur 3-16 og Figur 3-17.



Figur 3-16: Venstre side av ISO-rom, sett fra dør åpningen; Viser plasseringen av tremoelementene.



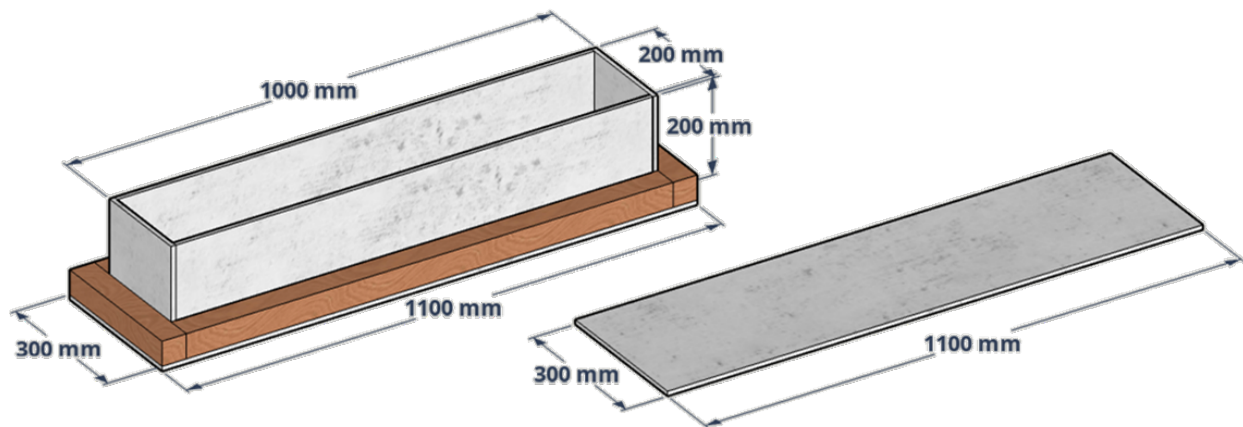
Figur 3-17: Høyre side av ISO-rom, sett fra dør åpningen; Viser plasseringen av tremoelementene.

3.2 Bygging av bokser/kasser for etterulming

Det ble planlagt at noen av søylene skulle legges i bokser/kasser etter brannforløpet, dette for å kunne logge et eventuelt massetap gjennom nedkjølingsperioden (eventuell ulme-periode).

Boksene ble bygd opp av en treramme som ble plassert på en gipsplate, på innsiden av trerammen ble det så plassert gips-plater. For å tette sammenføyningene i kassen ble det benyttet akryl. For å tette sprekkene. Det ble også skjært til lokk til boksene. Det ble lagt isolasjon i bunnen av boksene og et lag over søylene når disse var lagt i boksen. Se Figur 3-18 for mål og Figur 3-19 til Figur 3-21 for endelig resultat.

Trevirket som ble benyttet hadde ett tverrsnitt på 50x50 mm og tykkelse på gipsplater var 10 mm.



Figur 3-18: Skisse for boks/kasse



Figur 3-19: Bokser



Figur 3-20: Boks med innvendig isolasjon over søylen

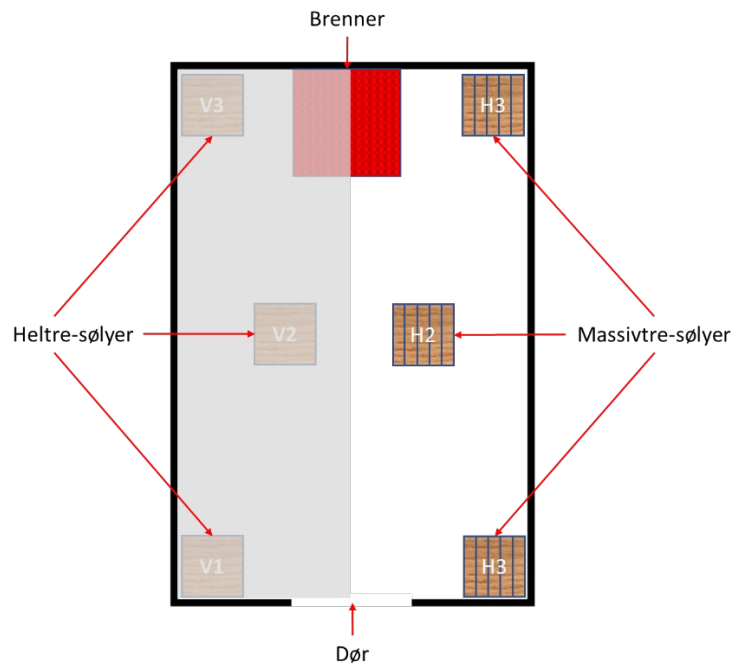


Figur 3-21: Boks med innvendig isolasjon under søylen

4 Resultat

Det ble totalt gjennomført 20 forsøk, i dette kapitlet presenteres hovedtrekkene fra forsøkene

Forsøkene ble gjennomført i samarbeid med Therese Rød [1], brannrommet inneholdt dermed tre heltre-søyler og tre KLT-søyler. Figur 4-1 viser plasseringen av søylene og retning på lamellene i KLT-søylene, grått område indikerer plasseringen av heltre-søylene. Resultater for disse blir ikke videre beskrevet eller diskutert i denne oppgaven, det refereres til *Ulming i trekonstruksjon som følge ekstern brannekspnering - Forsøk med heltre søyler* [1] for disse.



Figur 4-1: Plassering av både heltre (til venstre; V1, V2 og V3) og KLT (til høyre; H1, H2 og H3) søyler i brannrommet

4.1 Hovedfunn

Felles for alle forsøkene var den initielle brannen på 20 minutter, Figur 4-2 viser eksempel på brannforløp i tidlig vekstfase vekstfasen før brenner ble slukket ($t < 20$ minutter). For enkelte forsøk ble åpningen i brannrommet lukket med en "gips-dør" etter at brenner var slukket, Figur 4-3 viser eksempel på dette ($t > 20$ min).



Figur 4-2: Initiell brann ($t < 20 \text{ min}$) observert gjennom brandør



Figur 4-3: Dør til brannrommet steng med gipsplate (Fra forsøk #07)

Hva som gjenstod etter endt forsøk varierte helt fra bare noen små forkullede rester på gulvet av rommet til KLT-søylor som fremstod som forholdsvis hele, Figur 4-4 og Figur 4-5 viser eksempler på dette.



Figur 4-4: Bilde tatt ovenfra etter fjerning av tak for forsøk #11



Figur 4-5: Søylor fra forsøk #09. Stykkene ble løftet ut etter ca. 5 timer

Varighet på forsøkene varierte ut fra hvordan forsøkene utviklet seg. Da forsøkene ble utført i samarbeid med Therese Rød [1] forekom det at det var temperaturutvikling i søylor av heltre i etterkant av at brenner var slukket og omvendt. På grunn av dette kan varighet av enkelte forsøk fremstå som betraktelig lengre enn andre, selv om det ser ut som det ikke var noe grunn til å fortsette logging av data.

Det var også enkelte forskjeller mellom forsøkene som ble utført. Eksempelvis varierte det om åpning i brannrommet ble lukket eller ikke. Tabell 4-1 gir en oppsummering av hovedtrekkene fra forsøkene,

Tabell 4-1: Sammendrag

Forsøk	Dør	Vann	Boks	Varighet	Vekttap	Kommentar
#01	x	--	--	5t 0min	--	• Forsøket var ment som et testforsøk og det ble ikke notert vekter.
#02	x	--	--	10t 0min	H1: 25% H2: 56% H3: 40%	--
#03	x	--	--	4t 50min	H1: 26% H2: 44% H3: 52%	--
#04	x	x	--	3t 40min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Forsøket ble avbrutt da det oppstår full brann etter ca. 2 timer og 20 minutter. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet
#05	x	x	--	2t 35min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Forsøket ble avbrutt da det oppstår full brann etter ca. 2 timer og 40 minutter. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet
#06	x	--	--	2t 40min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Rommet ble lukket ca. 15 minutter etter at brenner var slukket. • Forsøket ble avbrutt etter ca. 2 timer og 35 minutter da det ble observert rødglødende takplater. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet.
#07	x	--	--	8t 20min	H1: 63% H2: 58% H3: 52%	• Granulat i brenner ble byttet før forsøk.
#08	x	x	--	14t 25min	H1: 59%	<ul style="list-style-type: none"> • Rommet ble åpnet etter ca. 3 timer og 30 minutter. • Full brann når dør fjernes, det ble kastet vann inn i brannrommet. • Kun forkullede rester av H2 og H3 på gulvet av brannrommet.
#09	x	--	--	5t 20min	H1: 15% H2: 27% H3: 23%	--
#10	--	x	--	1t 45min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat ble rensset og delvis byttet ut før forsøk. • Full brann i rommet etter ca. 1 time. • Det ble kastet vann inn i rommet for å slukke flammene. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet

Forsøk	Dør	Vann	Boks	Varighet	Vekttap	Kommentar
#11	x	x		1t 40min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat i brenner ble byttet før forsøk • Rommet ble åpnet etter ca. 1 timer og 40 minutter. • Full brann når dør fjernes, det ble kastet vann inn i brannrommet. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet
#12	--	x	--	6t 00min	H1: 78% H3: 87%	<ul style="list-style-type: none"> • Taket ble løftet av etter ca. 55 minutter • Da det er åpne flammer og disse tiltar i intensitet når taket blir løftet av, ble det kastet vann inn i brannrommet. • Kun forkullede rester av H2 på gulvet av brannrommet
#13	--	x	x	3t 35min	H1: 69% H2: 83% H3: 47%	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat i brenner ble byttet før forsøk • Taket ble løftet av etter ca. 60 minutter • Da det var åpne flammer og disse tiltok i intensitet når taket ble løftet av, ble det kastet vann inn i rommet. • Prøvestykkene ble så løftet over i boksene.
#14	--	--	x	2t 35min	H1: 26% H2: 45% H3: 34%	<ul style="list-style-type: none"> • Taket blir løftet av like etter at brenner er skrudd av. • Prøvestykkene ble løftet direkte over i boksene.
#15	--	x	x	5tt	H1: 57% H2: 69% H3: 48%	<ul style="list-style-type: none"> • Da det var åpne flammer og disse tiltok i intensitet, blir det kastes vann inn i brannrommet. • Prøvestykkene ble løftet over i boksene.
#16	x	x	--	3t 25min	H3: 78%	<ul style="list-style-type: none"> • Etter ca. 1 time og 45 minutter kommer det flammer ut av en glippe ved døren. • Rommet ble åpnet og det ble kastet vann inn i brannrommet og taket ble fjernet. • Kun forkullede rester igjen av H1 og H2 på gulvet av brannrommet
#17	x	x	--	6t 40min	H1: 63% H2: 80% H3: 78%	<ul style="list-style-type: none"> • Etter ca. 6 timer og 40 minutter åpnes rommet. • Det var kun mindre deler/elementer igjen av søylene. • Det ble kastet vann inn i brannrommet.

Forsøk	Dør	Vann	Boks	Varighet	Vekttap	Kommentar
#18	x	--	--	14t 45min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat i brenner ble byttet før forsøk • Rommet ble åpnet etter ca. 13 timer og 50 minutter • Det var kun mindre deler/elementer igjen av søylene. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester igjen på gulvet av brannrommet
#19	--	x	--	2t 30min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Taket i rommet var rødgjødende. • Det blir kastet vann inn rommet like etter at gassbrenner var skrudd av for å slukke flammene. • Flammene blusset senere opp igjen. • Etter ca. 2 timer og 20 minutter avsluttes forsøket. • Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester igjen på gulvet av brannrommet.
#20	x	--	--	19t 50min	--	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat i brenner ble byttet før forsøket • Rommet fikk stå i ca. 20 timer. • Når rommet ble åpnet, var det kun mindre mengder hvit aske igjen på gulvet av rommet.

4.2 Tid/temperaturkurver

Det var plassert to stykk termoelementer i hvert av søylene som ble plassert i rommet, en høyt og en lavt. I tillegg var det åtte termoelementer plassert i selve rommet. Fire stykker fordelt høyt i rommet og 4 stykker fordelt lavt i rommet.

I dette underkapitlet vises målinger fra 3 av 20 forsøk, disse er representative for hovedtrekkene fra forsøkene. Vedlegg C inneholder tid/temperaturkurver for alle de utførte forsøkene.

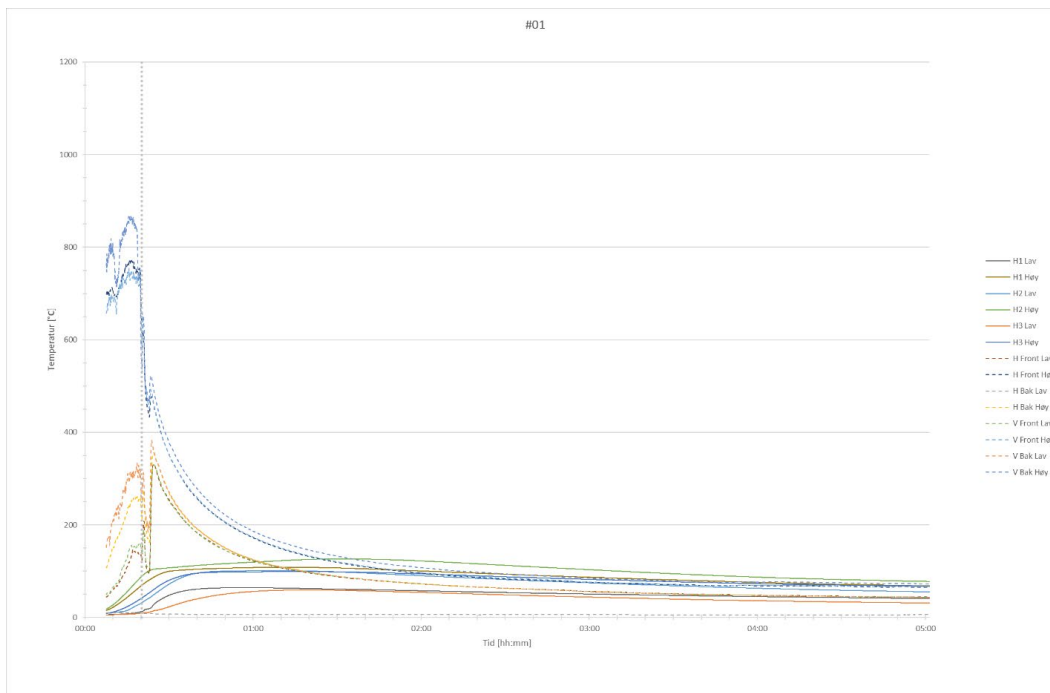
Tid for start av forsøkene er justert slik at 0 på x-aksen sammenfaller med antennelse av brenner.

Under vises tid/temperaturkurver for forsøk #01, #02 og #11. Felles for disse er at den stiplede, grå, vertikale linje ved $t = 20$ minutter viser tid når brenner ble skrudd av. Stiplede linjer med blålige farger og med rødoransje farger viser resultat fra termoelementene som var plassert i selve rommet og heltrukne linjer viser resultat fra termoelementene plassert i selve søylene.

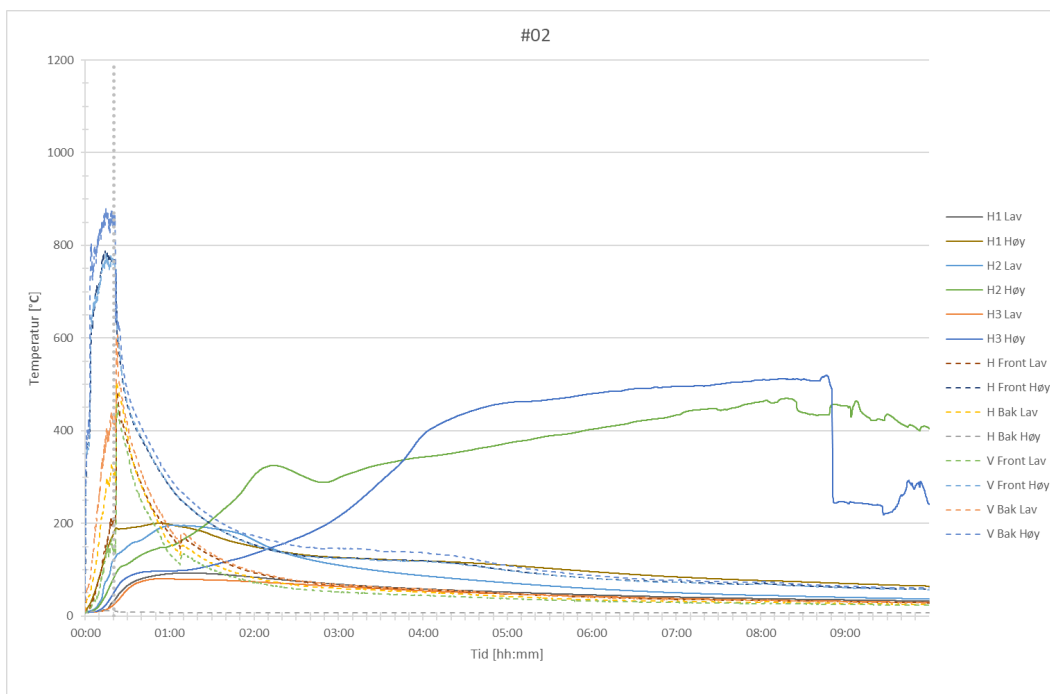
Figur 4-6 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #01. For dette forsøket er det ingen indikasjon til utvikling av hverken ulmebrann eller flammebrann i forventet nedkjølingsperiode.

Figur 4-7 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #02. For dette forsøket ser en hvordan to termoelementer indikerer tydelig temperaturutvikling etter at brenner er skrudd av og hvordan det ikke er utvikling i andre termoelementer.

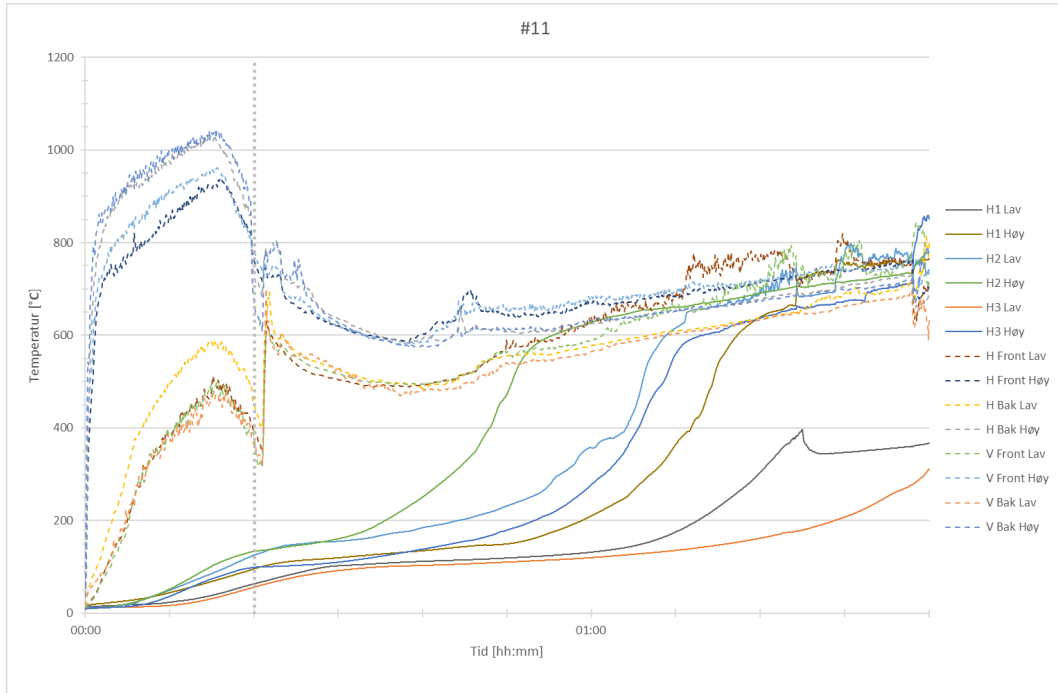
Figur 4-8 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #1. For dette forsøket ser en en voldsom temperaturutvikling for alle termoelementene, både i selve rommet og i elementene som er plassert i KLT-søylene. Dette indikerer at vedvarende brann i rommet etter at brenner er skrudd av.



Figur 4-6: Tid/temperaturkurver for forsøk #01



Figur 4-7: Tid/temperaturkurver for forsøk #02



Figur 4-8: Tid/temperaturkurver for forsøk #11

5 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatene ved hjelp av teorien presentert i kapittel 2 med fokus på oppgavens problemstilling.

Utgangspunktet for denne oppgaven var funn gjort i oppgaven *Overflatebehandling av krysslaminert tre - en eksperimentell studie* [5] fra 2021. Ut fra disse funnen ble formål med denne masteroppgaven å vurdere hvordan direkte eksponering for brann påvirker krysslaminert trevirke med hovedfokus på ulming i forventet nedkjølingsfase.

Det ble derfor utføre forsøk med tilsvarende oppsett og metode som for forsøkene utført i foregående oppgave for å undersøke konsekvenser for konstruksjonsvirke som følge av en initiell ekstern branneksposering, da med hovedfokus på ulming.

Alle forsøkene ble initiert med en 20 minutt brann for å etterligne tid/temperaturkurven til ISO-834. Dette ble gjort ved å benytte en gassbrenner hvor det ble brent propan, gassmengden var regulert til 1,23 g/s

Da det kun ble utført småskalaforsøk i 2021, ble det gjennomført småskalaforsøk i denne oppgavens problemstilling også.

Trevirke benyttet i forsøkene for denne oppgaven er massivtre i form av krysslaminert heltre av norsk gran, produsert av Splitkon. Krysslaminatet bestod av fem lag som er sammenføyd med lim, Vedlegg A inneholder ytelseserklæring fra produsent.

5.1 Initiell brannbelastning

Standard tid/temperaturkurver benyttes for å gi faste rammer for brannlaster ved testing av materiell. For enkelte av forsøkene ble det observert en svært rask og voldsom brannutvikling i løpet av de første 5 minuttene av forsøkene. For å kunne sammenligne resultater er en av forutsetningene at resultatene er basert på omtrentlig samme parameter. ISO-834 er den tid/temperaturkurven som hovedsakelig benyttes i Norge for branntester av materiale som skal benyttes i bygninger. Det var også denne som ble benyttet av Dalen i oppgaven fra 2021 [5].

For å avgjøre hvorvidt initiell brannlast var noenlunde lik for de 20 forsøkene er temperaturene i selve brannrommet, for de første 30 minuttene av forsøkene, sammenlignet med to standard tid/temperaturkurver:

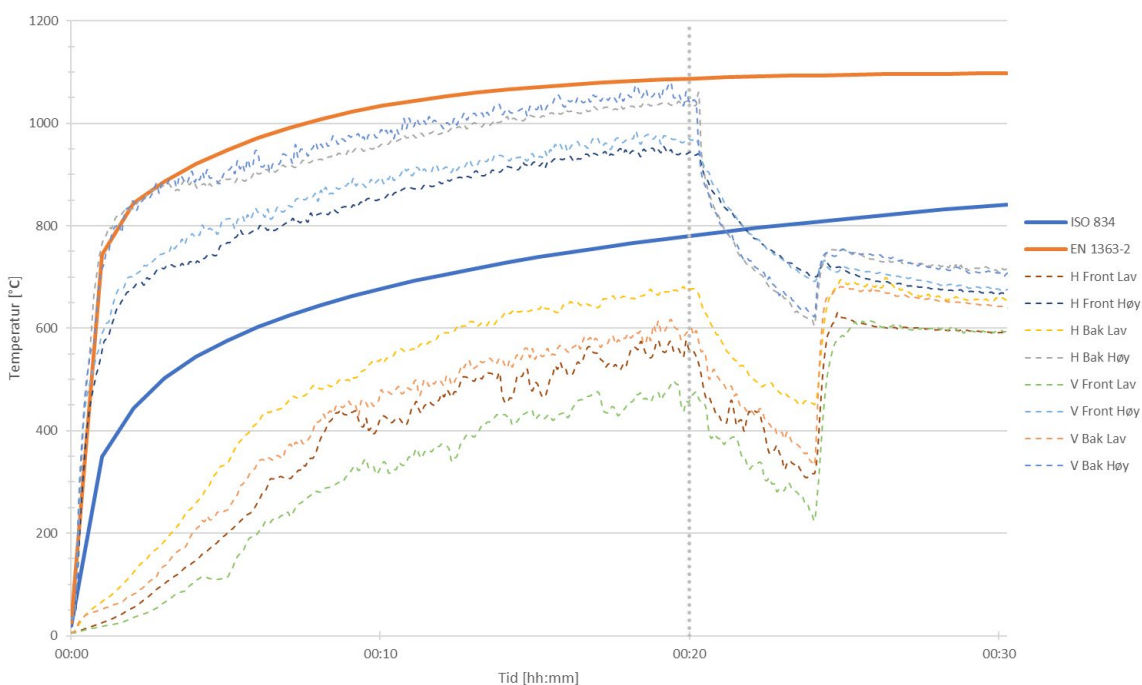
- ISO 834 som hovedsakelig benyttes for branntesting av materialer som skal benyttes i bygninger
- EN-1363 som benyttes for materialer som skal kunne motstå en hydrokarbonbrann

Begge disse kurvene er definert som nominelle kurver, det vil si at de ikke tar hensyn til romgeometri, eventuelle åpninger, type brensel eller termiske egenskaper. Funksjonene er kun basert på en variabel; tid. Kurvene gir en forenklet tilnærming og inneholder ikke nyanser som vekstfasen frem til overtenning eller avkjølingsperioden. De nominelle kurvene er forenklede metoder og ansett som konservative da de gir en større belastning enn hva en forventer ved ordinære branner [34].

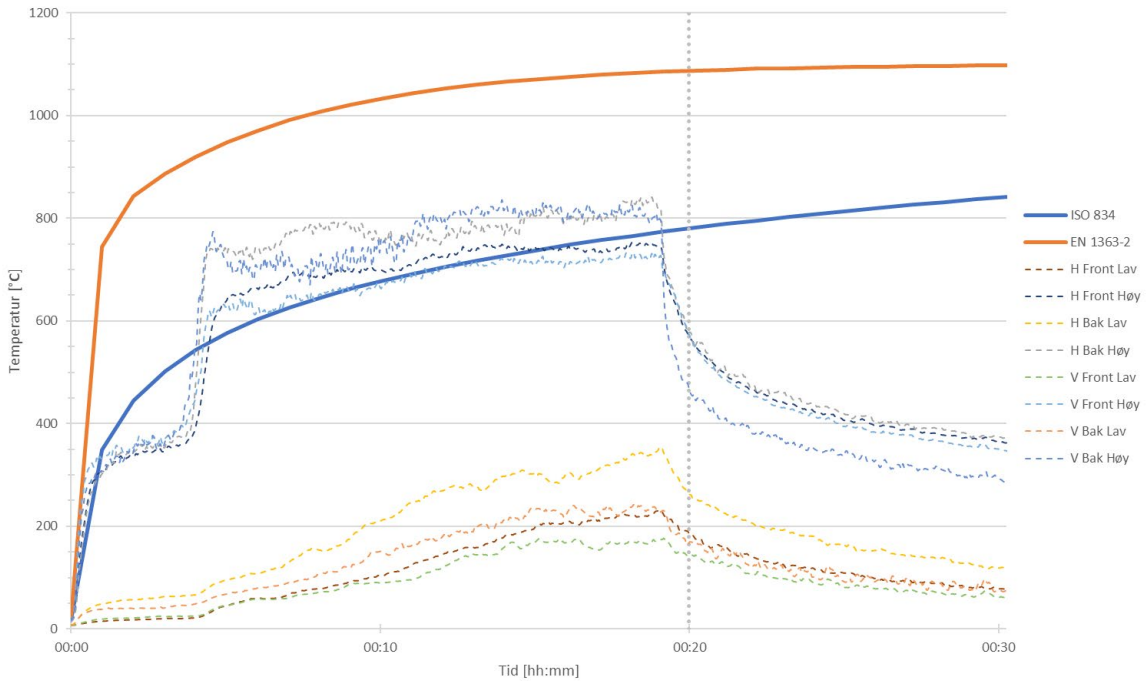
For de utførte forsøkene ble det benyttet en gassbrenner for å simulere initiell brannbelastning, denne var fylt med et granulat i form av kattesand. Et granulat benyttes for å spre gassen over brennerens areal. Gasstilførselen ble styrt av en reguleringsventil som ga konstant mengde gass pr. tidsenhet; 1,23 g

propan/sekund. Granulatet ble ikke planlagt byttet ut før hvert forsøk. Men etter tre forsøk hvor «alt bare tok helt av» begynte vi å diskutere mulige hva som kunne være årsak til det vi mente vi observerte. Mistanken ble etter hvert rett mot granulatet og det ble spekulert i hvorvidt dette ble brutt ned for hvert forsøk og om det burde byttes ut oftere. Det ble valgt å bytte ut granulatet oftere, men da oppgavens fokus ikke var å vurdere nedbryting eller valg av type granulat ble dette ikke vurdert videre.

Figur 5-1 og Figur 5-2 er tatt med for å vise de hvordan de målte temperaturene i brannrommet har blitt sammenlignet med de to standard brannkurvene. I de to figurene ser en tydelig forskjell på hvor raskt temperaturen steg i brannrommet, og forskjell i makstemperatur. Figuren viser to grupperinger; de stiplede linjene i blånyanser er elementene som var plassert oppe under taket i rommet og de rødlige var elementer som var plassert nede ved gulvet.



Figur 5-1: Fra forsøk #05. Temperaturmålinger under tak i brannrom sammenfaller med EN 1363 standard brann kurve.



Figur 5-2: Fra forsøk #13. Temperaturmålinger under tak i brannrom som sammenfaller med ISO 834 standard brann kurve.

Det viste seg at 14 av de 20 utførte forsøkene fulgte vekstfasen til ISO 834, mens 6 av de 20 utførte forsøkene fulgte vekstfasen til EN 1363-2. Resultatene fra sammenligningen av vist i Tabell 5-1.

Tabell 5-1: Sammenligning opp mot ISO 834 og EN 1363-2

Forsøk	ISO 834	EN 1363-2
#01	X	--
#02	X	--
#03	X	--
#04	--	X
#05	--	X
#06	--	X
#07	X	--
#08	X	--
#09	X	--
#10	--	X

Forsøk	ISO 834	EN 1363-2
#11	--	X
#12	--	X
#13	X	--
#14	X	--
#15	X	--
#16	X	--
#17	X	--
#18	X	--
#19	X	--
#20	X	--

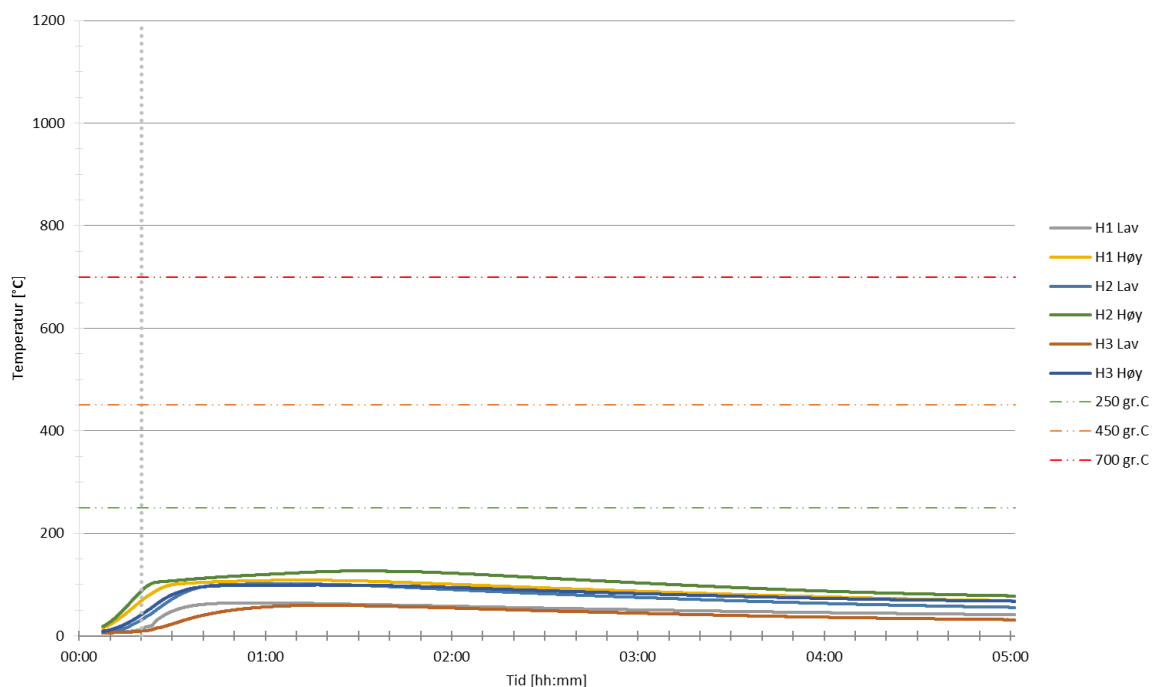
5.2 Innvendig søyletemperatur gjennom hele forsøket

I dette underkapitlet gjøres det en evaluering og klassifisering av hvorvidt det er sannsynlig at det oppstod ulming i noen av de tre søylene i etterkant av at brenner var slukket. For de forsøkene hvor rom ikke ble lukket kunne det enkelt observeres hvorvidt det var flamme eller eksempelvis glødebrann i rommet, men for de forsøkene hvor rommet ble er det kun logget data som kan gi en indikasjon. I dette underkapitlet er det gjort en kategorisering av alle 20 forsøkene basert på temperaturutviklingen inne i selve tresøylene. Det var to stykk termoelementer per søyle som var plassert 450mm inn i søylene. Disse var alle plassert mot brannrommets høyre vegg. Det vil si at for søyle H1 og H3 så stod disse helt inn mot vegg.

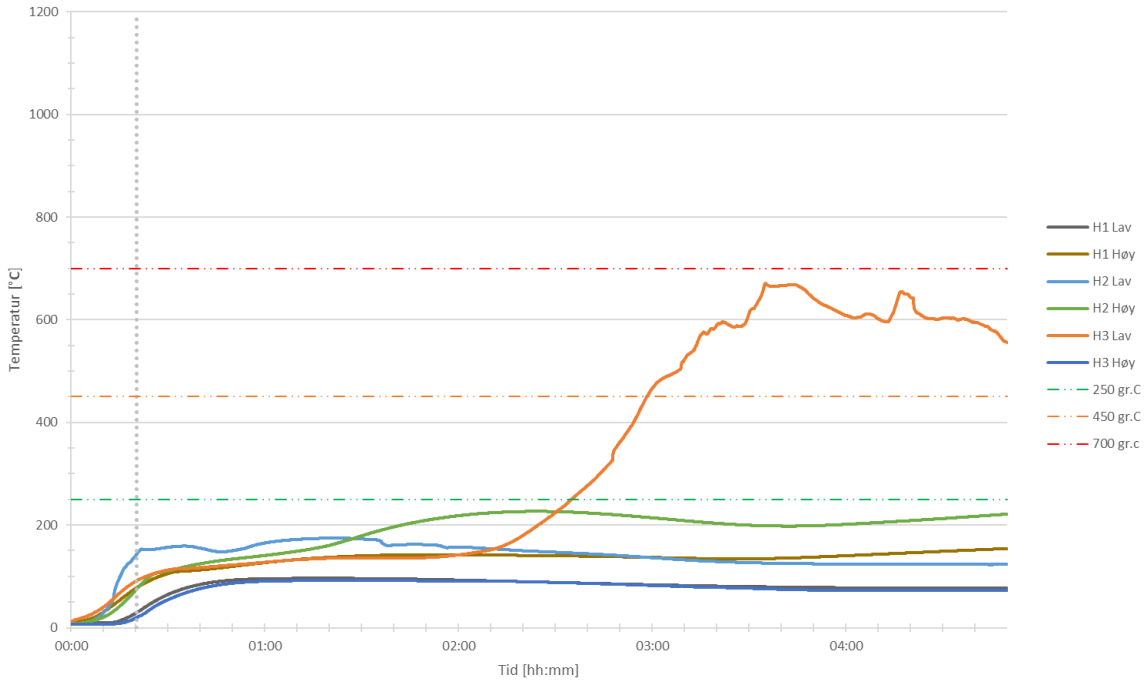
Det valgt å se bort fra forsøkene hvor den initielle brannlasten sammenfalt med EN-1363, felles de forsøkene var at de alle sammen endte i voldsomme brannforløp og at alt trevirket brant opp på forholdsvis kort tid.

Basert på en nedre temperatur for ulming på 250 °C [35], og en øvre temperaturgrense på 700 °C [13] er alle forsøkene blitt kategorisert som enten sannsynlig tilstedeværelse av ulmebrann eller flammebrann. En tredje kategori er ganske enkelt at brannrommet gikk gjennom en rolig avkjølingsperiode hvor det ikke var noe videre utvikling etter at gassbrenner var blitt slukket.

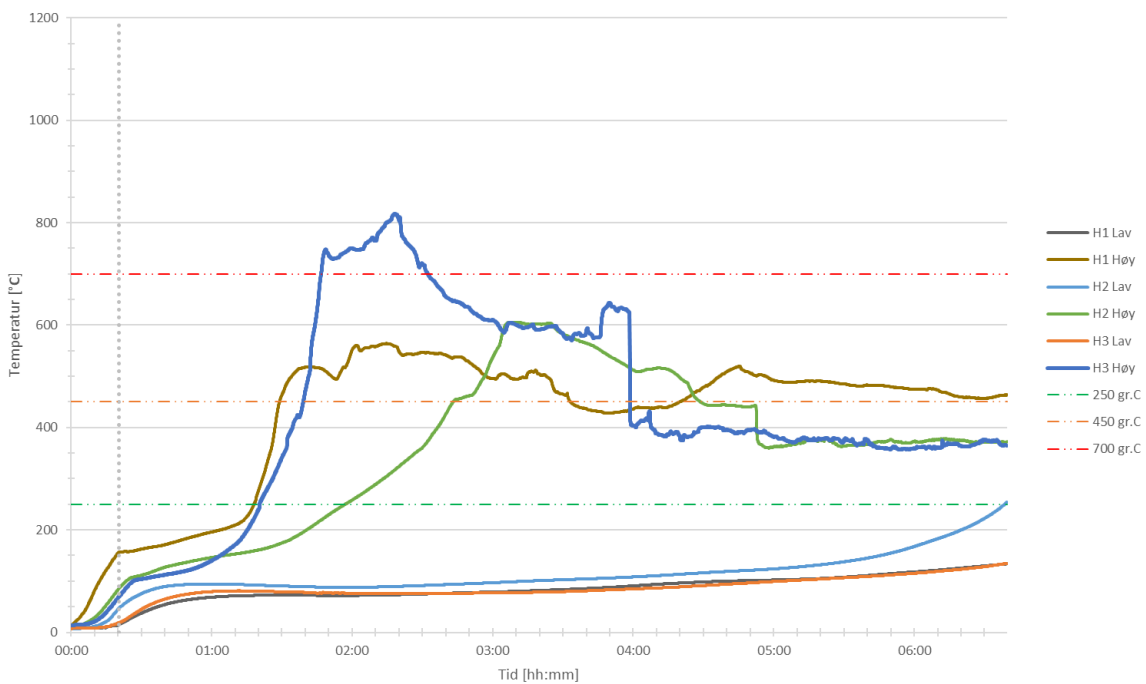
Figur 5-3-Figur 5-5 viser tid/temperaturkurver for tre av de utførte forsøkene. Disse er valgt da de viser tydelige eksempler på de tre kategoriene. Vedlegg E viser tilsvarende kurver for alle de utførte forsøkene.



Figur 5-3: Fra forsøk #01. Temperaturer som indikerer at forsøket ganske enkelt gikk gjennom nedkjølingsperiode uten utvikling av hverken flamme eller ulmebrann.



Figur 5-4: Fra forsøk #13. Temperaturer som indikerer ulmebrann.



Figur 5-5: Fra forsøk #17. Temperaturer som indikerer både flammebrann og ulmebrann.

For de forsøkene som er blitt vurdert som flammebrann er det viktig å ha i mente at disse også har passert gjennom det definerte temperaturområdet for ulming.

Tabell 5-2 viser en oppsummering av hvor det har blitt definert tilstedeværelse av ulmebrann og flammebrann. Oppsummert er 7 av forsøkene kategorisert som forsøk med tilstedeværelse av ulming og 4 av forsøkene er kategorisert som forsøk hvor det utviklet seg flammebrann. Forsøk #17 trekkes frem som et eksempel på at temperaturmålingene indikerer både tilstedeværelse av ulming og flammebrann.

Tabell 5-2: Klassifisering av forsøk i forhold til indikasjon av tilstedeværelse av ulmebrann eller flammebrann.

Forsøk	Ulming	Flamme
#01	--	--
#02	X	--
#03	X	--
#04	Data for vekstfasen for forsøk #04 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1.	
#05	Data for vekstfasen for forsøk #05 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1.	
#06	Data for vekstfasen for forsøk #06 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1..	
#07	X	--
#08	X	--
#09	--	--
#10	Data for vekstfasen for forsøk #10 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1.	

Forsøk	Ulming	Flamme
#11	Data for vekstfasen for forsøk #11 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1.	
#12	Data for vekstfasen for forsøk #12 tilsvarer EN-1363 og er ikke vurdert nærmere, ref. kapitel 5.1..	
#13 ¹	--	X
#14 ¹	--	--
#15 ¹	--	--
#16	--	X
#17	X	X
#18	X	--
#19	--	X
#20	X	--

¹ Søylen for forsøk #13, #14 og #15 ble lagt i kasser, ref. kapittel 5.3

5.3 Innvendig søyletemperatur i vekstfase av forsøk

I følge Babrauskas [12, Kap. Initiation of smoldering] vil trevirke tilslutt begynne å ulme dersom den varmes opp med en lav varmeeeksponering. Og med høy nok varmeeeksponering ($\sim 25 \text{ kW/m}^2$) går antennelsesprosessen direkte til flammebrann.

I løpet av de 20 forsøkene som ble utført satt vi igjen med en mistanke om at det var mulig å forutsi hvorvidt et forsøk ville ende med å kjøles ned, ulme eller bryte ut i flammebrann basert på hvor fort den innvendige temperaturen i søylene steg i brannforløpets vekstfase.

Innvendig temperaturmålinger i søylene viste en forsinket temperaturstigning i forhold til målingene av temperatur i selve brannrommet. Dette var å forvente da målingene ble gjort 450 mm inn i selve søylene, og trevirke har lav varmeledningsevne.

For å undersøke hypotesen ble følgende utført for alle termoelementene i alle 20 forsøkene:

- 1) Gradient ble bestemt basert på to punkter langs tid/temperaturkurven til hver enkelt termoelement; (t_1, T_1) og (t_2, T_2) .

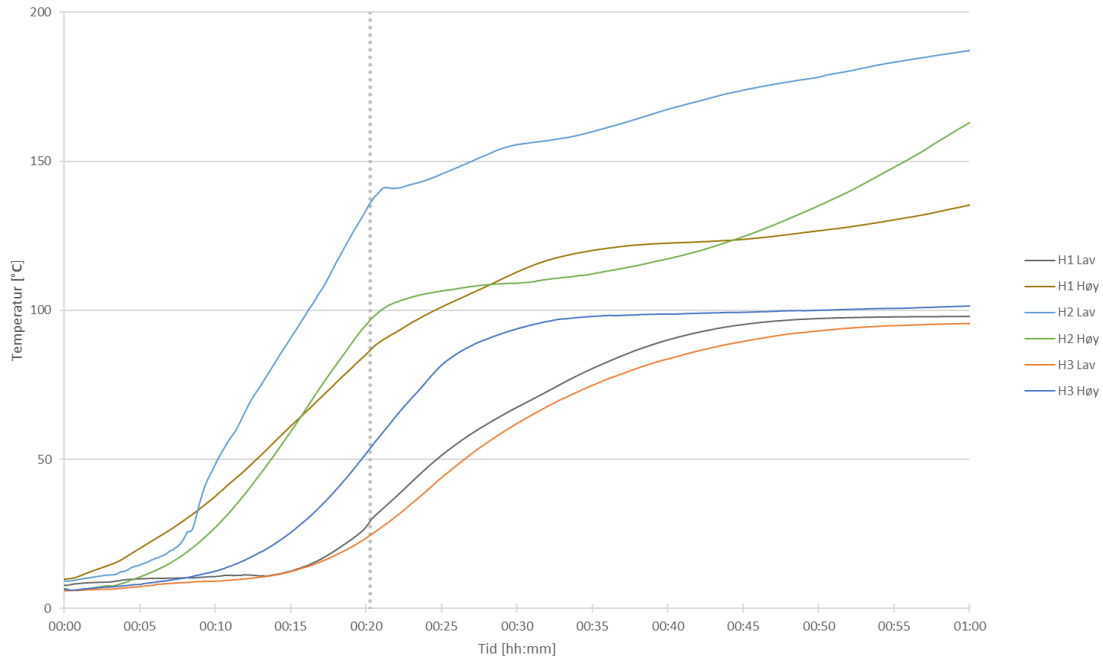
T_1 og T_2 ble valgt for å oppnå en funksjon som tangerte vekstfasen ved å benytte (5.1).

$$f(x) = ax + b \quad (5.1)$$

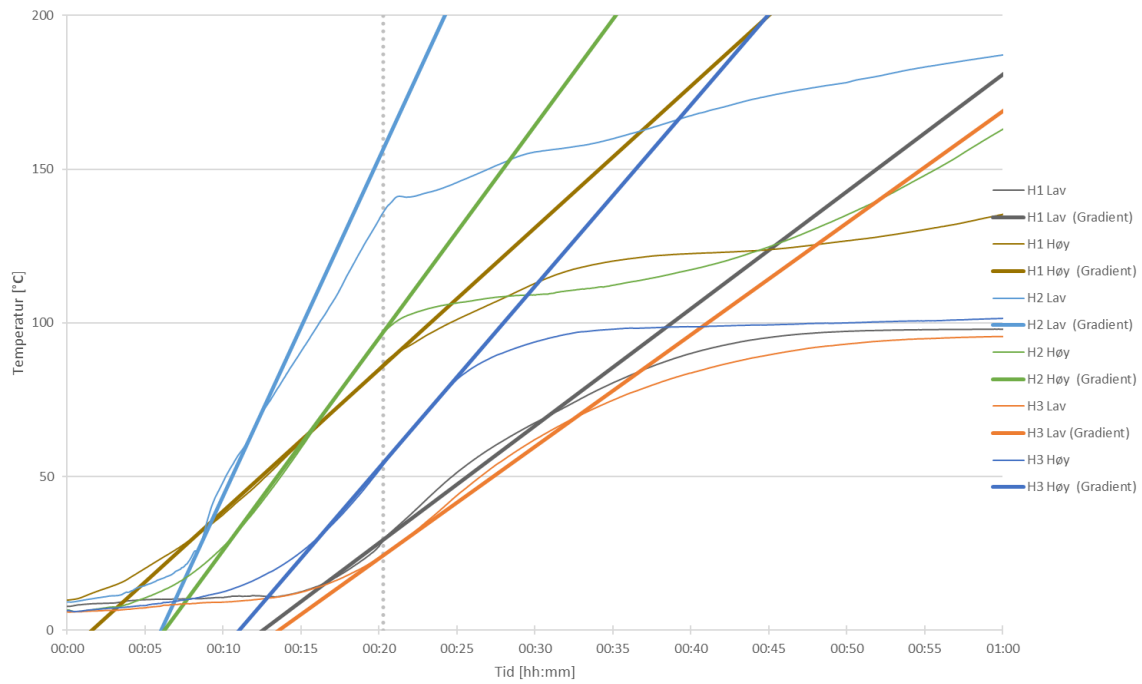
der:

$f(x)$	Funksjonens verdi ved gitt x-verdi	
a	Stigningstall / Gradient	
x	Posisjon på x-akse	[minutt]
b	Verdi av $f(x)$ ved $x = 0$	[°C]

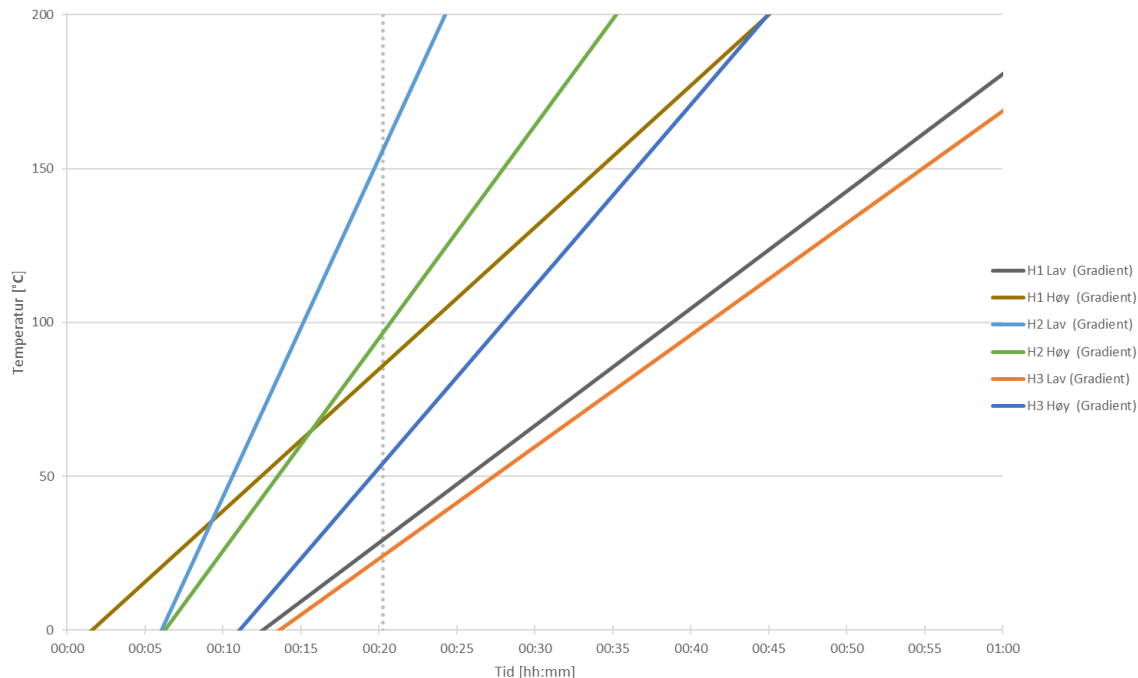
For å visualisere viser Figur 5-6 tid/temperaturkurvene for de første 60 minuttene av forsøk #08. Mens Figur 5-7 også viser gradientene basert på formel (5.1) og $T_1 = 30 \text{ °C}$ og $T_2 = 70 \text{ °C}$. Og til slutt viser Figur 5-8 kun gradientene. Tilsvarende ble gjort for alle de 20 forsøkene



Figur 5-6: Tid/temperaturkurve for forsøk #08



Figur 5-7 Tid/temperaturkurve for forsøk #08 og gradienter for hver enkelt kurve



Figur 5-8: Kun gradient for hver enkelt tid/temperatururve i forsøk #08

- 2) Alle tid/temperaturkurvene ble kategoriser i forhold til hvorvidt makstemperaturen gjennom hele forsøket var under 200 °C, mellom 200 °C og 700 °C, eller over 700 °C.

Minimum tenntemperatur for ulming er kun etablert for noen få materialer, for trevirke er nederste temperatur identifisert til 250 °C ved hjelp av en ASTM D1929 forsøk [12], ulmebrann går over til flammebrann ved 700 °C [11] [13].

Basert på denne informasjonen er tid/temperaturkurven for hvert av termoelementene kategorisert.

- | | |
|---|----------------|
| Kategori A. $T < 250 \text{ °C}$ | → Ingen ulming |
| Kategori B. $250 \text{ °C} < T < 700 \text{ °C}$ | → Ulming |
| Kategori C. $T > 700 \text{ °C}$ | → Flammebrann |

Tabell 5-3 vise verdi for alle gradientene, samt kategori. Det er viktig å ha i mente at en søyle kan være innom flere av disse tre kategoriene, eksempelvis ulmebrann, før det bryter ut flammebrann.

Tabell 5-3: Kategori og gradient ved $T_1 = 30^\circ\text{C}$ og $T_2 = 70^\circ\text{C}$

Forsøk	H1 Lav		H1 Høy		H2 Lav		H2 Høy		H3 Lav		H3 Høy	
	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]	Kategori	Gradient [$^\circ\text{C}/\text{min}$]
#01	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
#02	A	3,24	A	8,73	A	11,43	B	6,00	A	2,87	B	4,80
#03	A	3,48	A	4,71	A	12,00	A	5,85	B	5,00	A	3,04
#04 ²	--	--	C	5,22	--	--	C	6,76	C	3,53	C	6,49
#05 ²	C	4,66	C	4,71	C	5,65	C	7,27	C	4,40	C	5,93
#06 ²	C	4,40	C	5,65	C	5,71	C	7,16	C	4,29	C	4,75
#07	A	2,08	C	5,78	A	7,16	B	7,27	A	2,57	B	4,00
#08	A	3,78	B	4,57	B	10,90	B	6,86	B	3,61	B	5,85
#09	A	1,33	A	5,05	A	4,62	A	5,65	A	2,30	A	3,97
#10 ²	A	3,93	C	5,58	B	8,00	C	8,14	A	5,39	C	6,95
#11 ²	A	4,57	C	4,40	C	6,76	C	8,14	A	4,85	C	7,50
#12 ²	A	4,45	C	4,93	C	8,58	C	7,82	A	5,14	C	5,07
#13 ³	B	10,67	C	5,10	A	5,03	C	5,88	A	3,48	A	4,73
#14 ³	--	--	A	5,43	--	--	A	6,00	A	3,02	A	5,72
#15 ³	A	4,47	A	5,06	A	6,06	A	6,50	A	4,88	A	5,41
#16	B	3,56	C	7,62	B	5,22	B	6,66	A	4,17	C	5,22
#17	A	1,20	B	8,28	A	3,90	B	5,39	A	2,07	C	5,33
#18	B	2,36	B	5,05	B	3,90	B	5,78	B	3,29	B	5,05
#19	C	5,45	C	5,93	C	6,32	C	7,50	C	3,66	C	4,49
#20	B	3,90	B	6,40	B	5,52	B	6,58	B	5,39	B	5,11

*For celler som inneholder -- oppnådde aldri trevirket $T_2 = 70^\circ\text{C}$

Flere verdier for T_1 og T_2 er testet ut, andre verdier har gitt tilsvarende størrelsesorden for gradientene.

3) Gjennomsnittsverdi for gradientene for de tre kategoriene ble så bestemt.

Basert på data fra Tabell 5-3 får en da følgende snittverdi for gradientene til de tre kategoriene:

$$\overline{Gradient}_A = 4,75 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{minutt}$$

$$\overline{Gradient}_B = 5,69 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{minutt}$$

$$\overline{Gradient}_C = 5,86 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{minutt}$$

² EN-1363-2 forsøk, ref. kapittel 5.1..

³ Søylene ble lagt i isolerte bokser.

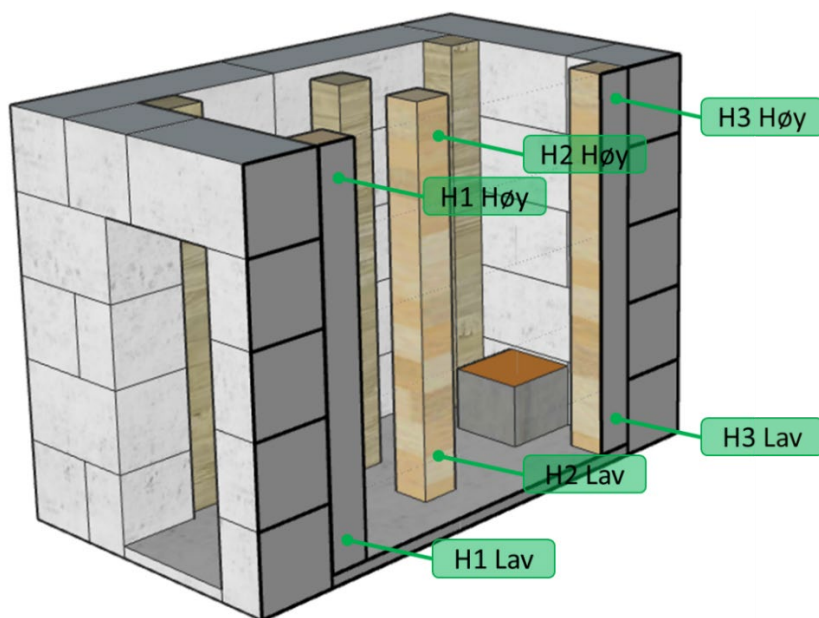
Tverrsnitt for alle søylene var $10 \times 10 \text{ cm}^2$, fuktivå i stykkene varierte noe, men ikke nevneverdig mye. I følge Figur 2-3 skulle en forventet samme stigning dersom parametere som tverrsnitt, fuktighet og ytre varmpåvirkning var ca. tilsvarende for de forskjellige forsøkene.

For denne vurderingen er forsøkene som hadde en initiell brannbelastning i henhold til EN 1363 også tatt med.

5.4 Avstand til brenner

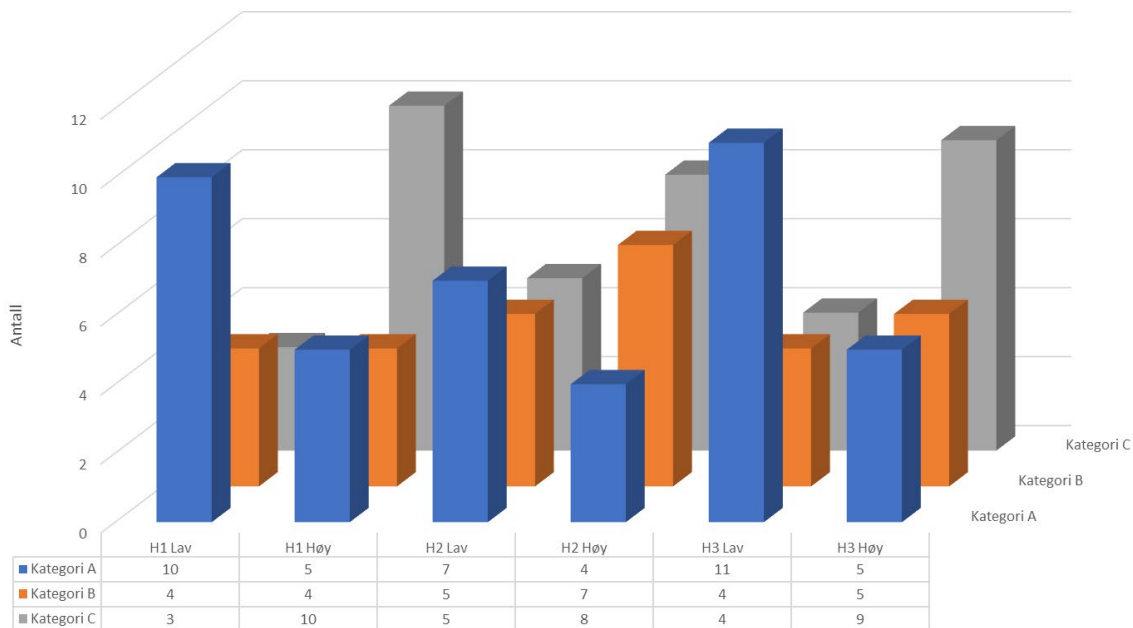
I et forsøk på å vurdere om avstand til brenner noe betydning for hvor det oppstår ulming ble kategoriene fra kapittel 5.3 sortert i forhold til termoelementenes plassering i rommet, dette er vist i Figur 5-10. Figur 5-9 viser plasseringen til termoelementene.

Som en generell kommentar er det observert at innvendige temperaturer i H2-søylen, i flesteparten av forsøkene, hadde en raskere temperaturstigning enn H1- og H3-søylen. Da H2-søylen ble eksponert for brann på alle fire sider, mens H1- og H3-søylen kun opplevde brannlast på to av fire sider var dette resultatet til en viss grad å forvente. Termoelementene var alle plassert på høyre side av søylene. Det vil si at for H1 og H3 var termoelementene plassert i en ikke-eksponert side.



Figur 5-9: Plassering av termoelementer i KLT (tak og høyre vegg fjernet)

Ut fra Figur 5-10 kan en lese at flammebrann oftest forekommer høyt i rommet. Dette kan ha sammenheng med at dynamikken til brannrøyk er slik at den stiger opp, og dermed er det her søylene opplever de høyeste temperaturene. Nå ble det også benyttet stålplater for å skjerme Siporexplatene som ble benyttet til tak på brannrommet, ved flere forsøk ble det observert at disse var rødglødende. Varmeledningsevnen til jern og lettbetong er svært forskjellige, og det har nok vært en forsterkende effekt med tilbakestråling fra disse under forsøkene. En kan også lese at nedre del av søylene som kun ble eksponert på to sider oftest opplevde temperaturer under $200 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figur 5-10: Kategori fordelt på plassering og termoelement

5.5 Delaminering

Delaminering er en kjent utfordring forbundet med KLT, i forsøkene utført av Dalen [5] ble det ikke observert delaminering.

For flere av forsøkene utført for denne masteroppgaven ble det observert delaminering allerede i løpet av de første 20 minuttene av forsøket, mens for andre ble det observert at det lå firkantede forkullede rester på gulvet av brannrommet når forsøket var avsluttet. Figur 5-11 og Figur 5-12 viser eksempler fra branner hvor det begynte å "poppe" firkanter med treverk løs fra KLT-søylene i løpet av de første 20 minuttene.

Det ble for flere forsøk observert at heltresøylene fremdeles stod når en test ble avsluttet, mens KLT-søylene var så godt som forsvunnet og det lå tydelige, forkullede, firkanter på gulvet. For forsøk hvor rommet var blitt lukket igjen, kan det ikke konkluderes med om delamineringen skyldes svikt i festematerialet som er benyttet eller om det er naturlig avskalling av forkullet trevirke som har forekommet. Men da det ble observert delaminering allerede i de innledende 20 minuttene er dette en god indikasjon på at det er delaminering som har forekommet.



Figur 5-11: Delaminering i forsøk #18



Figur 5-12: Delaminering i forsøk #10

5.6 Logging av vekttap i etterkant av initiell brann

I et forsøk på å logge vekttap og temperatur etter det initielle brannforløpet er slutt, ble søylene løftet ut av brannrommet og lagt over i bokser og dekket med isolasjon og lokk, for så å bli veid ca. hver halve time.

Vekt på boksene inkludert søyle var i størrelsesorden 14-15 kg.

Tabell 5-4: Data for forsøk hvor søyler ble lagt i boks

Forsøk	Dør	Vann	Boks	Kommentar
#13	--	x	x	<ul style="list-style-type: none"> • Granulat i brenner ble byttet før forsøk • Taket ble løftet av etter ca. 60 minutter • Da det er åpne flammer og disse tiltar i intensitet når taket blir løftet av blir det kastet inn i rommet. • Prøvestykkene løftes så over i boksene.
#14	--	--	x	<ul style="list-style-type: none"> • Taket blir løftet av like etter at brenner er skrudd av. • Prøvestykkene løftes direkte over i boksene.
#15	--	x	x	<ul style="list-style-type: none"> • Da det er åpne flammer og disse tiltar i intensitet blir det kastet vann inn i rommet. • Prøvestykkene løftes så over i boksene.

Vektavlesningene ble av variabel kvalitet, noen ganger svakt opp og noen ganger svakt ned. Det ble vurdert som at valgt metode ikke var hensiktsmessig og etter tre forsøk ble det bestemt å ikke gjennomføre flere forsøk med dette oppsettet.

Søylene gikk fra vertikal til horisontal stilling når de ble lagt over i bokser.

Å kunne måle både vekttap og temperaturutvikling i timene etter brannforløpet er slutt er av interesse, men dersom dette skal gjøres anbefales det å ha en vekt pr. boks.

6 Konklusjon

Hensikt med oppgaven var å vurdere hvordan direkte eksponering for brann påvirker krysslaminert trevirke med hovedfokus på ulming i forventet nedkjølingsfase. For å undersøke dette ble det gjennomført 20 forsøk. Totalt ble 60 søyler av KLT eksponert for en 20 minutters ISO-834 brannkurve, før forsøket fikk lov til å utvikle seg videre i den tid det tok brannrommet å kjøle seg ned.

Følgende kan konkluderes:

- Rommet ble ikke tettet igjen for 3 av forsøkene hvor søylene ble stående i rommet
 - For de forsøkene hvor rommet ikke ble lukket igjen oppførte brannen seg som en fullt utviklet brann også etter at brenner var slukket, søylene ble en bidragsyter til brannforløpet og det ble ikke noe igjen av søylene.
- Rommet ble tettet igjen for 14 av forsøkene hvor søylene ble stående i rommet
 - For flere av forsøkene hvor rommet ble tettet igjen ble det observert en innvendig temperaturstigning i flere av søylene som indikerer at det oppstod ulming.
- Søylene ble løftet over i isolerte kasser for 3 av forsøkene
 - For tre forsøk ble søylene overført til isolerte gipskasser. Hensikten med dette var å logge massetap, samtidig som en kunne logge temperaturutvikling i søylene. Dette lot seg ikke gjøre med de fasilitetene som var tilgjengelig. Det var vellykket å overføre søylene til kassene med termoelementene på plass, men med kun en vekt ble det ikke håndterbart å flytte kassene frem og tilbake på vekten.
- Andre observasjoner:
 - Det ble observert delaminering av flere søyler i flere forsøk, både under de første 20 minuttene og etter fullført forsøk.
 - Gradient for innvendig temperaturstigning ble regnet ut for basert på medgått tid mellom $T_1 = 30^\circ\text{C}$ og $T_2 = 70^\circ\text{C}$ for hvert termoelement. Resultatene viser $\overline{Gradient}_{Ingen\ ulming} < \overline{Gradient}_{Ulming} < \overline{Gradient}_{Flamme\ brann}$. Dette indikerer at dersom temperatureksponeringen ikke er tilstrekkelig under vekst fase og den tiden det er et brannforløp i brannrommet, ligger det ikke til rette for ulmebrann i nedkjølingsfasen. Og dersom temperatureksponeringen er for intens i samme periode er det en sannsynlighet for at det oppstår flammebrann og søylen kan medvirke til å forlenge fasen *full utviklet brann* eller bidra til en sekundær overtenning.
 - Det ble observert at det søylene som kun ble eksponert for brann på to sider var hadde de laveste temperaturene. Dette resultatet var likt for søylen som var plassert nærmest og lengst fra brenneren.

7 Fremtidig arbeid

I underkapitlene er det presentert forslag til videre arbeid.

7.1 Granulat i brenner

For 6 av 20 forsøk ble det logget tid/temperaturkurver i rommet de første 20 minuttene som tilsvarer EN-1363 kurven. Det ble spekulert i hvorvidt granulatet som benyttes i brenner for spredning av gass brytes ned ved gjentatt bruk og dermed ikke sprer gassen tilstrekkelig. Valg av type granulat og hvorvidt denne brytes ned bør undersøkes nærmere.

7.2 Endret oppsett - Eksponeringstid

Denne oppgaven repliserer oppsettet fra *Overflatebehandling av krysslaminert tre, en eksperimentell studie*, alle forsøkene startet med en 20 min brann matet med 1,23 g gass/s.

Da resultater i denne oppgaven har gitt indikasjoner på at en sakte oppvarming kontra en intens, rask oppvarming kan påvirke mulig utvikling av ulmebrann anbefales det å utføre forsøk hvor en reduserer gasmengden, men forlenger tiden på den initielle eksponeringen.

7.3 Endret oppsett – Avstand

Det var plassert totalt seks tresøyler i rommet. Selv om trevirke har sine fortrinn i en brann, vil det også kunne delta i et brannforløp. Det anbefales å gjennomføre forsøk hvor:

- Avstand mellom brenner og eksponerte tresøyler er større
- Avstand mellom søyler i rommet er større, dette oppnås ved å redusere antall søyler i rommet.

8 Referanser

- [1] T. Rød, «Ulming i trekonstruksjon som følge ekstern branneksplosjon - Forsøk med heltre søyler.», Masteroppgave i Brannsikkerhet, Høgskulen Vestlandet, Haugesund, 2023.
- [2] J. L. Skullestad, «Bygging av høyhus i tre som et klimatiltak En sammenliknende LCA av bæresystemer i tre og betong for bygg med varierende antall etasjer Bygging av høyhus i tre som et klimatiltak», Master i energi og miljø, NTNU, Trondheim, 2016. [Online]. Tilgjengelig på: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmllui/bitstream/handle/11250/2407885/14670_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] «Bruk av tre - regjeringen.no», 2. oktober 2018. <https://www.regjeringen.no/no/tema/mat-fiske-og-landbruk/skog-og-utmarksressurser/innsikt/bruk-av-tre/id2009518/> (åpnet 22. mai 2023).
- [4] *Byggteknisk Forskrift*. Direktoratet for Byggkvalitet, 2017. [Online]. Tilgjengelig på: <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17>
- [5] B. R. Dalen, «Overflatebehandling av krysslaminert tre - en eksperimentell studie», Masteroppgave i Brannsikkerhet, Høgskulen på Vestlandet, Haugesund, 2021.
- [6] E. L. Everett og I. Furseth, *Masteroppgaven: hvordan begynne - og fullføre*, 2. utg. Oslo: Universitetsforlaget, 2012.
- [7] B. C. Hagen, *Grunnleggende brannteknikk*, 2. utg. Haugesund: B.C. Hagen, 2018. [Online]. Tilgjengelig på: https://bibsys-almaprimo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?docid=BIBSYS_ILS71565639850002201&context=L&vid=NB&lang=no_NO&search_scope=default_scope&adaptor=Local%20Search%20Engine&isFrbr=true&tab=default_tab&query=any,contains,990419524564702202&sortby=date&facet=frbrgroupid,include,208581114&offset=0
- [8] J. Warnatz, U. Maas, og R. W. Dibble, *Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*, 4th ed. Berlin ; New York: Springer, 2006.
- [9] V. Babrauskas, *Ignition handbook: principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah, WA: Fire Science Publishers, 2003.
- [10] G. Rein, «Smouldering Combustion Phenomena in Science and Technology», *International Review of Chemical Engineering*, bd. 1, jan. 2009.
- [11] G. Rein, «Smoldering Combustion», i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J. M. Watts, og C. Wiecek, Red., New York, NY: Springer, 2016, s. 581–603. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0_19.
- [12] V. Babrauskas, «Smoldering Fires: Factors and Fuels», *Fire Engineering*, bd. 175, nr. 6, s. 56–59, jun. 2022, [Online]. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/361381511_Smoldering_Fires_Factors_and_Fuels
- [13] B. C. Hagen og A. K. Meyer, «From smoldering to flaming fire: Different modes of transition», *121*, 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103292.
- [14] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011.
- [15] G. Glasø og H. Landrø, «Tre og brann», bd. Nr.37, s. 8, feb. 2012, [Online]. Tilgjengelig på: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/37-Tre-og-brann.pdf>

- [16] *Bygge med massivtreelementer. Hefte 4: Håndbok : Brann*. Oslo: Treteknisk, 2009. [Online]. Tilgjengelig på: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/teknisk-handbok/Hefte-4-Brann.pdf>
- [17] K. I. Edvardsen og T. Ramstad, *Trehus*, bd. Håndbok 5. i SINTEF Byggforsk Håndbo, vol. Håndbok 5. SINTEF akademisk forlag, 2014.
- [18] D. Brandon og C. Dagenais, «Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 5 – Experimental Study of Delamination of Cross Laminated Timber (CLT) in Fire», National Fire Protection Association (NFPA), FPRF-2018-05, mar. 2018. [Online]. Tilgjengelig på: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFTallWoodBuildingsTask5.pdf>
- [19] *Limtreboka*, Ver. 2., bd. 2, 3 bd. Norske Limtreprodusenters Forening, 2015. [Online]. Tilgjengelig på: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.limtreforeningen.no/images/Limtreboka_versjon_2.pdf
- [20] «Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design». Standard Norge, 3. januar 2010.
- [21] «ISO 834-1:99 Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements». Standard Norge, 30. september 1999.
- [22] B. Nagy og E. Tóth, «Finite Element Analysis of Composite Ceramic-Concrete Slab Constructions Exposed to Fire», *AMM*, bd. 861, s. 88–95, des. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.861.88.
- [23] «NS-EN 1363-2:1999 Prøving av brannmotstand - Del 2: Alternative prosedyrer og tilleggsprosedyrer». Standard Norge, 10. november 1999.
- [24] «ISO 9705-1:2016 Reaction to fire tests — Room corner test for wall and ceiling lining products — Part 1: Test method for a small room configuration». Standard Norge, 18. februar 2016.
- [25] N. Johansson, «Fire Dynamics of Multi-Room Compartment Fires», Doctoral Thesis, Lund University, Lund, 2015.
- [26] S. Nam, J. De Ris, P. Wu, og R. Bill, «From Bench-scale Test Data To Predictors Of Full-scale Fire Test Results», *Fire Saf. Sci.*, bd. 8, s. 469–480, 2005, doi: 10.3801/IAFSS.FSS.8-469.
- [27] S. Tschudi-Madsen, «Stavkirke – Store norske leksikon», *Stoire Norske Leksikon*. Store Norske Leksikon, 16. februar 2022. Åpnet: 16. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/stavkirke>
- [28] «limtre – Store norske leksikon». <https://snl.no/limtre> (åpnet 16. april 2023).
- [29] «520.222 Bjelker av tre. Dimensjonering - Byggforskserien». Sintef, Mai 2011. Åpnet: 16. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.byggforsk.no/dokument/304/bjelker_av_tre_dimensjonering
- [30] «Hva er massivtre?» <https://inspirasjon.byggebolig.no/hva-er-massivtre> (åpnet 16. april 2023).
- [31] «Straye Trebygg - Næringsbygg i massivtre en miljøvennlig løsning». <https://straye.no/trebygg/> (åpnet 16. april 2023).
- [32] «571.524 Trelast.Typer og egenskaper - Byggforskserien». https://www.byggforsk.no/dokument/3236/trelasttyper_og_egenskaper (åpnet 16. april 2023).

- [33] «522.351 Trebjelkelag. Dimensjonering og utførelse - Byggforskserien». Sintef. Åpnet: 16. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på:
https://www.byggforsk.no/dokument/334/trebjelkelag_dimensjonering_og_utfoerelse
- [34] B. Karlsson og J. G. Quintiere, *Enclosure fire dynamics*. i Environmental and energy engineering series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [35] V. Babrauskas, *Smoldering fires*. New York, NY: Fire Science Publishers, 2021.

9 Vedlegg

Vedlegg A.	Materialdatablad	48
Vedlegg B.	Metode for gjennomføring av forsøk	50
Vedlegg C.	Resultater for hvert enkelt forsøk	56
Vedlegg D.	Brannbelastning	77
Vedlegg E.	Innvendig søyletemperatur for hele brannforløpet	83

Vedlegg A. Materialdatablاد

**LIMTREPRODUKTER**
— TIL ALLE BYGGEFORMÅL

YTELSESERKLÆRING / DECLARATION OF PERFORMANCE (DOP)

Krysslimt tre / Massivtre

Tilsiktet bruk: For bærende og ikke-bærende konstruksjoner i bygninger og anlegg utført i henhold til Eurokode 5 (NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:20100).

Produsent: Splitkon AS
Industriveien 3
3340 Åmot
www.splitkon.no

Representant: Daglig leder Morten L. Johansen

Teknisk beskrivelse:

prEN 16351, NS 16351:2015 (ikke godkjent i EN, derav ikke tilfredsstillende for CE-merking)
EAD 130005-00-0304, 2015, Solid wood slab to be used as a structural element in buildings

Teknisk kontrollorgan: Internt kontrollsystem for vurdering og fortløpende kontroll av byggproduktets ytelse i hht prEN16351, med Norsk Treteknisk Institutt som uavhengig kontrollorgan.

Ytelser: I henhold til Teknisk dokumentasjon, se vedlegg.

Vesentlige egenskaper:	Ytelse (deklarasjonsverdier)
Holdbarhet	EN 350:2016
Treslag/treslagsgruppe	Norsk gran (<i>Picea abies L. Karst</i>)
Vekstregion:	Norge
Ytre lameller:	T22 i hht. NS 338:2016
Midtre lameller:	T22 / T15 i hht. NS 338:2016
Toleranser:	NS 3516:2017
Limtype:	Melamin urea formaldehyd, Dynea Prefere 4546 og 5020
Avgassing:	Formaldehydklasse M1
Reaksjon ved brannpåvirkning	D-s2, d0, etter NS-EN 13501-1:2007+A1:2009
Overflatekvalitet:	Høvlet/pusset

Ytelser for denne byggevaren, som er anført ovenfor, er i overensstemmelse med de angitte ytelsene. Denne ytelseserklæringen er utarbeidet i overensstemmelse med forordning (EU) nr. 568/2014 under eneansvar til produsenten, som er anført ovenfor.

Åmot, 3. juni, 2019


Morten Johansen

Vedlegg B. Metode for gjennomføring av forsøk

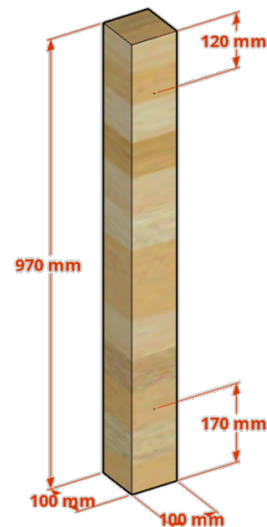
1 Forberedelse av forsøk

Del 1 av metodeskrivet gir en enkel forklaring av aktiviteter som må gjennomføres i forkant av hvert forsøk.

1.1 Søyler

- 1) Sag til søylene
 - H = 97 cm
 - B = 10 cm
 - L = 10 cm

- 2) Forbor for plassering av termoelementer i søyle
 - a. Plasser hvert elementsentrisk på bredden av prøvestykket
 - i. 12 cm fra topp av prøvestykke
 - ii. 17 cm fra bunn av prøvestykke



Figur 1-1: Søyلة med plassering for termoelement

Mål fuktighet og vekt, noter dette ned, ref.

- 3) Tabell 1-1

Tabell 1-1: Eksempel på logg av Vekt og fuktighet

#xx	KLT / Heltre	Vekt [kg]	Fukt [%]
V1.	Heltre		
V2.	Heltre		
V3.	Heltre		
H1.	KLT		
H2.	KLT		
H3.	KLT		

4) Noter informasjon på ende/topp og langsida, ref. Figur 1-2 og Figur 1-3



Figur 1-2 Merking av søylene



Figur 1-3 Merking av bunnen av søylene

1.2 Termoelementer

5) Plasser termoelementer i henhold til Tabell 1-2 og, og Figur 1-5.

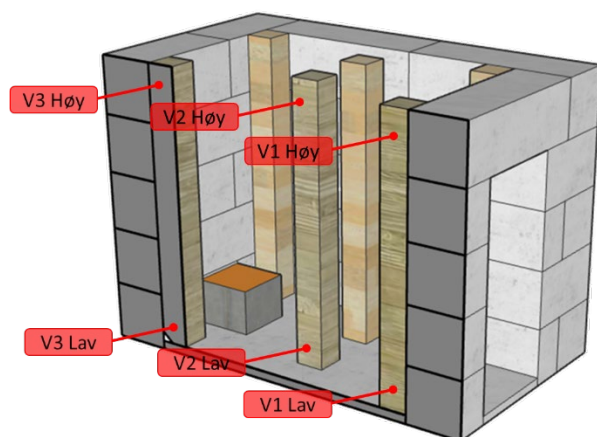
Tabell 1-2: Plassering av termoelementer i søyler

#	Plassering	Probe No.
V1	Høy	19
	Lav	20
V2	Høy	15
	Lav	16
V3	Høy	11
	Lav	12
H1	Høy	10
	Lav	9
H2	Høy	6
	Lav	5
H3	Høy	1
	Lav	2

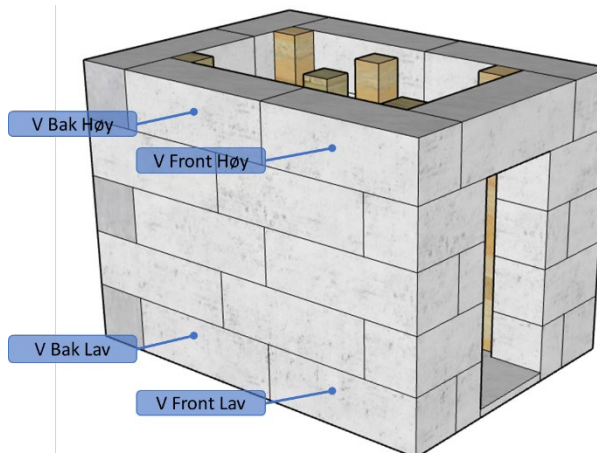
Tabell 1-3: Plassering av termoelementer i brannrom

#	Plassering	Probe No.
V Bak	Høy	7
	Lav	8
V Front	Høy	3
	Lav	4
H Bak	Høy	17
	Lav	18
H Front	Høy	13
	Lav	14

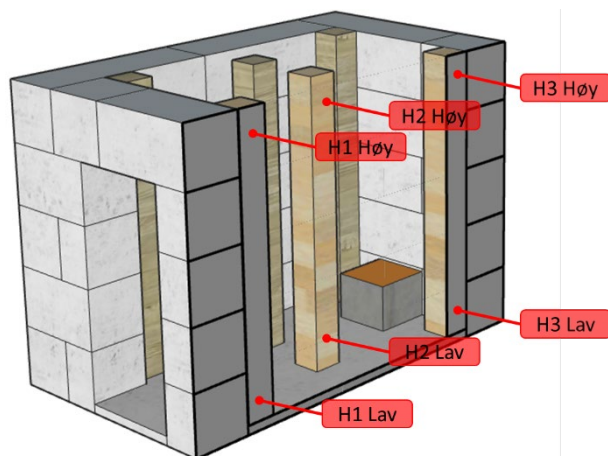
6) Plasser søylene i henhold til Figur 1-4 og Figur 1-6.



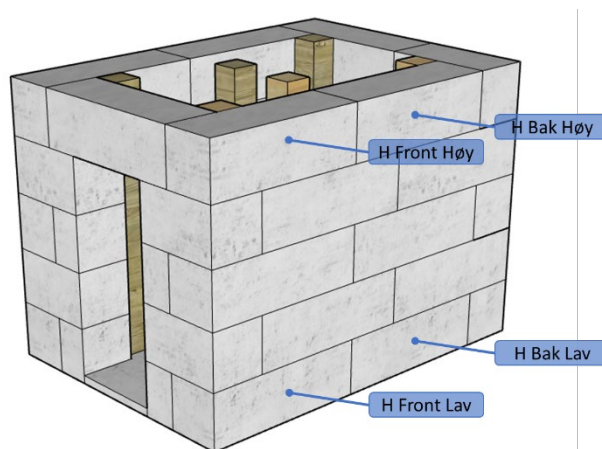
Figur 1-4: Plassering av termoelementer i heltre



Figur 1-5: Plassering av termoelementer i rom, gjennom vegg (Venstre side)



Figur 1-6: Plassering av termoelementer i KLT



Figur 1-7 Plassering av termoelementer i rom, gjennom vegg (Høyre side)

7) Plasser "takkonstruksjon" (isolasjon, stålplate og siporexplate)

8) Verifiser at gass og cockpit (datamaskiner, loggeapparater og reguleringsventil) er koblet til

2 Gjennomføring av forsøk

Del 2 av metodeskrivet gir en enkel forklaring av aktiviteter som utgjør selve forsøket. Etter 20 minutters brannekspnering er det tre forskjellige fremgangsmåter.

2.1 Eksponering av søyler for ekstern brannlast i 20 minutter

- 1) Start logging av temperatur.
- 2) Tenn på tennbrikett og før denne inn i brenner ved hjelp av lang pinne.
- 3) Åpne for gass og verifiser flowmengde: 1.23 g/.
- 4) Steng gasstilførsel etter 20 minutter

2.2 Etter 20 minutter; Alternativ 1) Blokker døråpning

- 5) Sett i dør (gipsplate) i brannrommets åpning.
- 6) Monitorer forsøket, varighet av hvert forsøk avhenger av hvordan forsøket utvikler seg. Stopp logging av data når dette vurderes som hensiktsmessig.
- 7) Ta av tak.
- 8) Ta ut søyler og noter vekt på eventuelle rester av søyler, ref. Tabell 2-1.

Tabell 2-1: Eksempel på logg til bruk etter brannforløp (alternativ 1)

#	Vekt [kg]	Kommentar
V1.		
V2.		
V3.		
H1.		
H2.		
H3.		

2.3 Etter 20 minutter; Alternativ 2) La døråpning stå åpen

- 5) La døråpning stå åpen etter at gass er stengt av.

- 6) Monitorer forsøket, varighet av hvert forsøk avhenger av hvordan forsøket utvikler seg. Stopp logging av data når dette vurderes som hensiktsmessig.
- 7) Ta av tak.
- 8) Ta ut søyler og noter vekt på eventuelle rester av søyler, ref. Tabell 2-1.

2.4 Etter 20 minutter; Alternativ 3) Løft søyler over i bokser

- 5) Løft av tak. Hvor lenge en venter før tak løftes av vurderes for hvert enkelt forsøk. Tid i forhold til start av forsøk noteres ned.
- 6) Ta ut søylene og vei hvert enkelt søyle før det legges i egen isolert boks. NB! Vær varsom med termoelementene! Ønskelig at disse blir stående i søylen.
- 7) Vei boks+søyle, gjenta veiing ca. hvert 30 minutt. Noter vekt og tidspunkt, ref. Tabell 2-2

Tabell 2-2: Eksempel på logg til bruk etter brannforløp

#	Vekt [kg]	Tid [minutt]	Kommentar
V1.			
V2.			
V3.			
H1.			
H2.			
H3.			

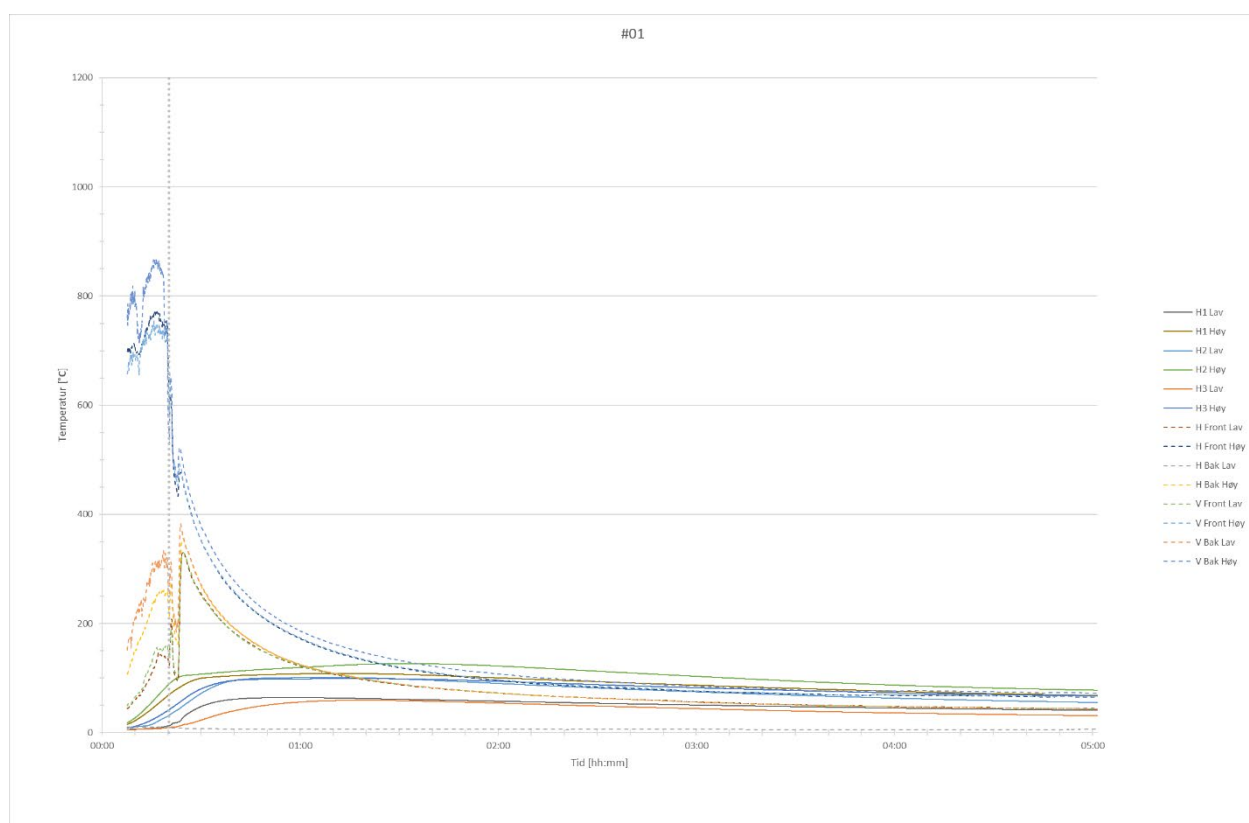
Vedlegg C. Resultater for hvert enkelt forsøk

1 Forsøk #01

Temperaturen i rommet var 48 °C ved start av forsøk #01. Denne avlesningen er ikke korrekt da det var problemer med logging av data og de første målingene er først 10 minutter ut i forløpet. Dette forsøket var en første test og søylene ble ikke veid.

1.1 Tid/temperaturkurver

Figur 1-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #01. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i søylene.



Figur 1-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #01

2 Forsøk #02

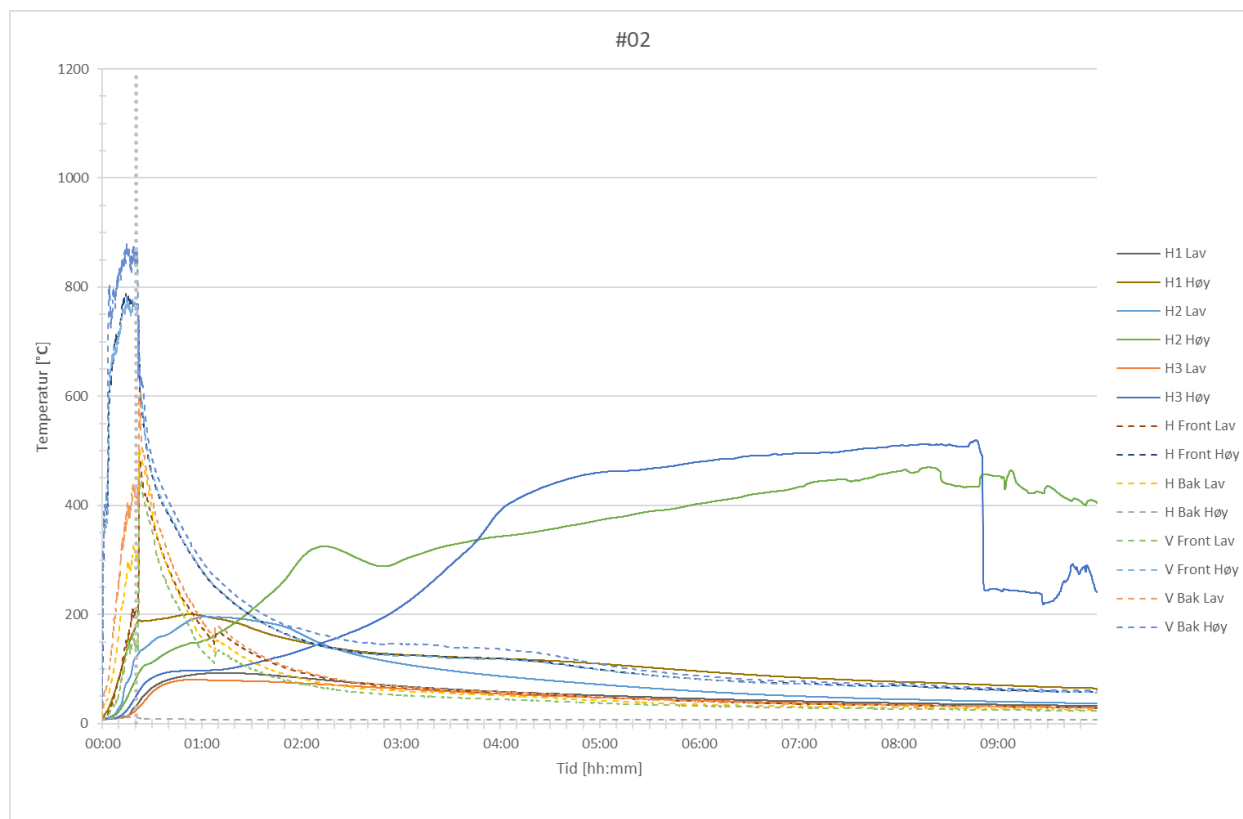
Tabell 2-1 viser data for de tre søylene i forsøk #02.

Tabell 2-1: Data for søyler i forsøk #02

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4771	15	3558	1213	25
H2	4516	14	1993	2523	56
H3	4903	15	2964	1939	40

2.1 Tid/temperaturkurver

Figur 2-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #02. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 2-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #02

3 Forsøk #03

Temperaturen i rommet var 11 °C ved start av forsøk #03.

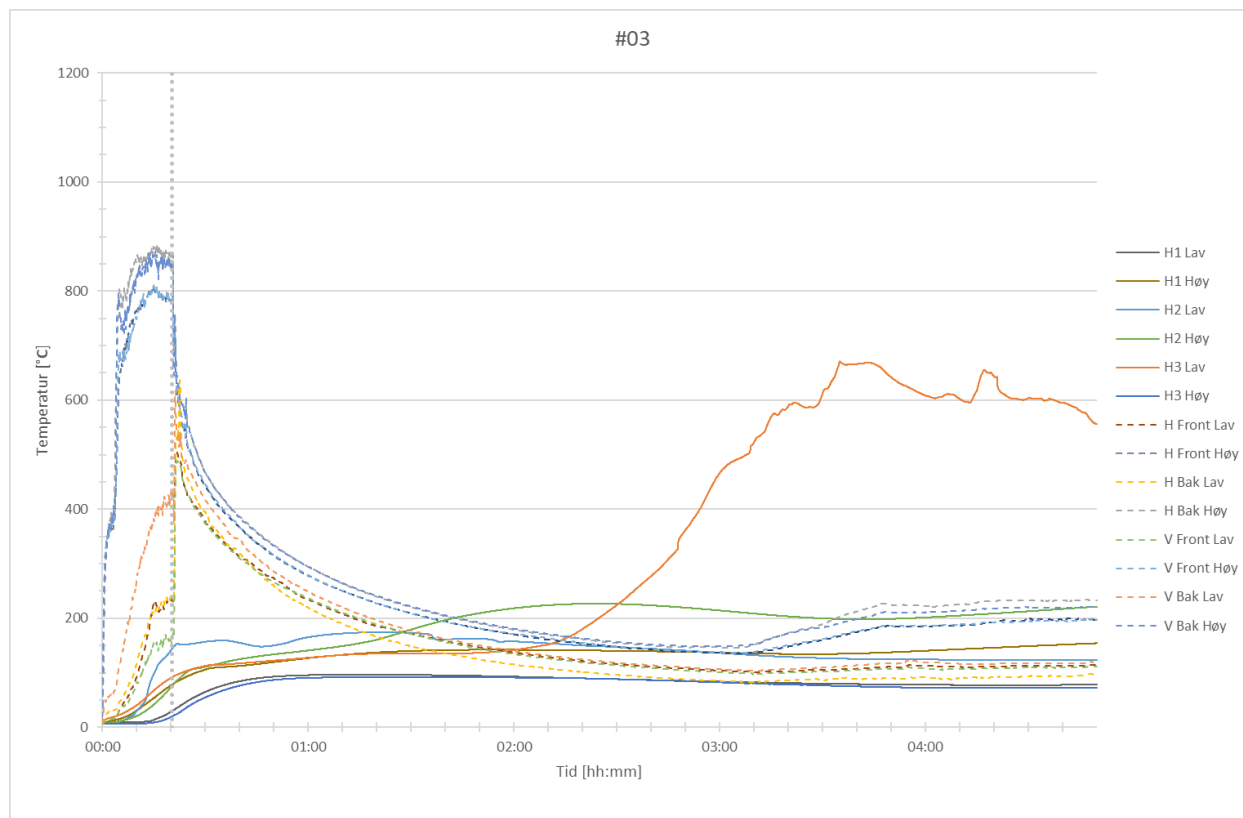
Tabell 3-1 viser data for de tre søylene i forsøk #03.

Tabell 3-1: Data for søyler i forsøk #03

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4377	14	3251	1126	26
H2	4640	17	2577	2063	44
H3	4734	12	2268	2466	52

3.1 Tid/temperaturkurver

Figur 3-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #03. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 3-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #03

4 Forsøk #04

Temperaturen i rommet var 5 °C ved start av forsøk #04.

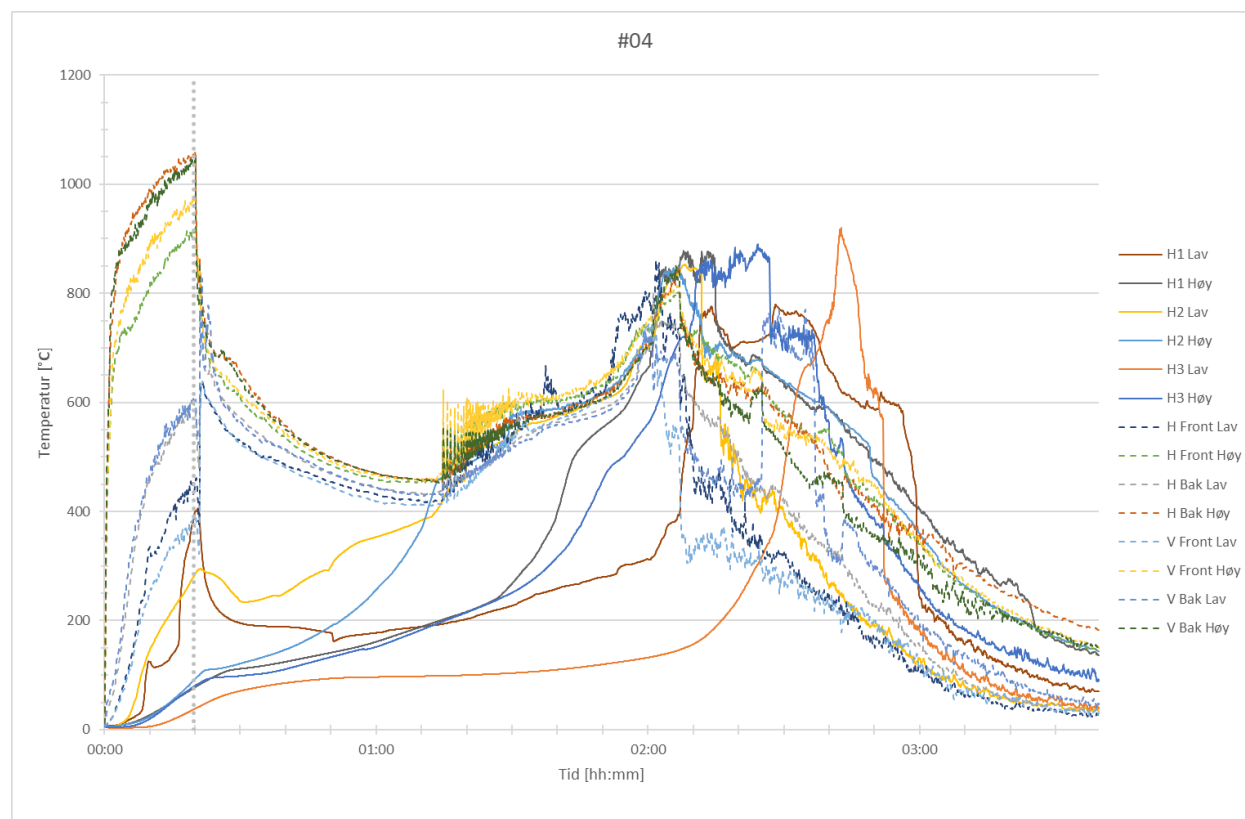
Tabell 4-1 viser data for de tre søylene i forsøk #04.

Tabell 4-1: Data for søyler i forsøk #04

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4377,4	17,6	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet -		
H2	4575,4	15,1			
H3	4468,3	16,5			

4.1 Tid/temperaturkurver

Figur 4-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #04. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 4-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #04

5 Forsøk #05

Temperaturen i rommet var 20 °C ved start av forsøk #05.

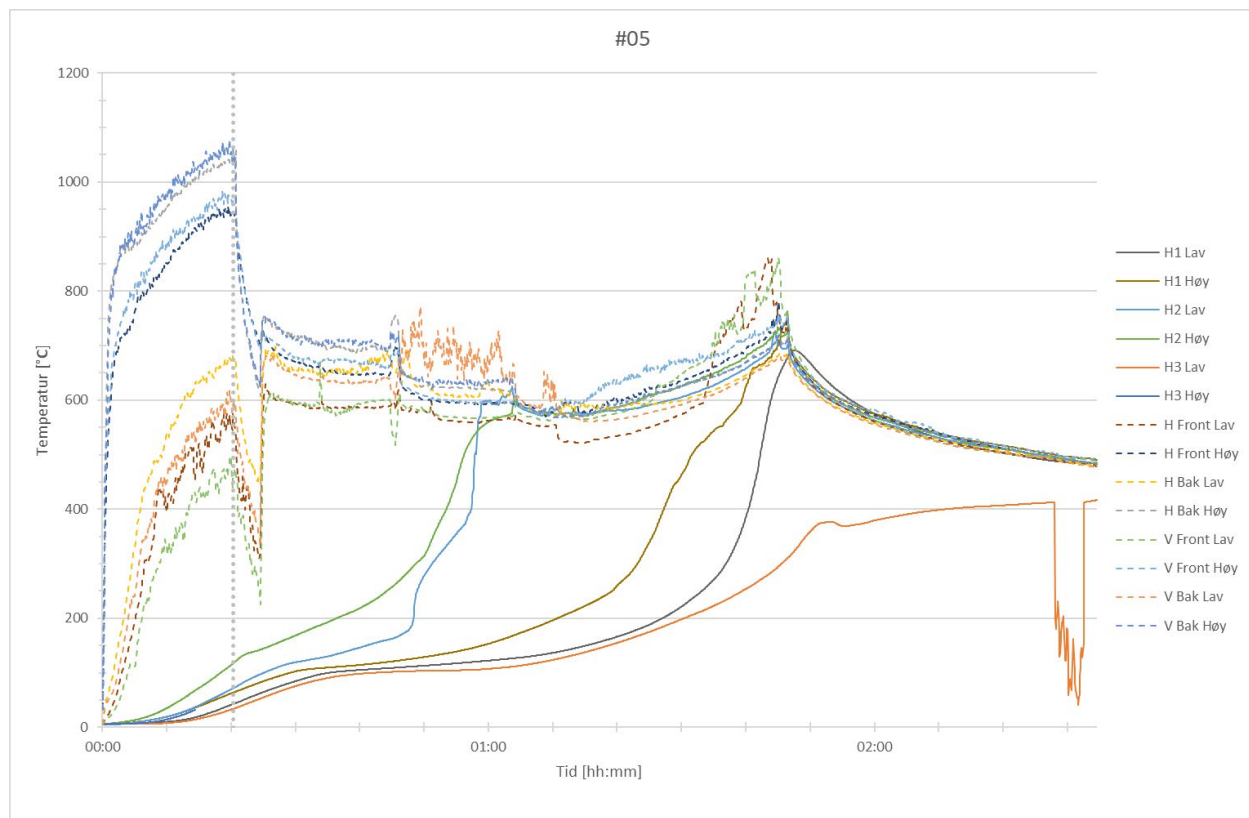
Tabell 5-1 viser data for de tre søylene i forsøk #05.

Tabell 5-1: Data for søyler i forsøk #05

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	5079,1	11,4	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	5117,1	13,2			
H3	4665,0	12,5			

5.1 Tid/temperaturkurver

Figur 5-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #05. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 5-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #05

6 Forsøk #06

Temperaturen i rommet var 17 °C ved start av forsøk #06.

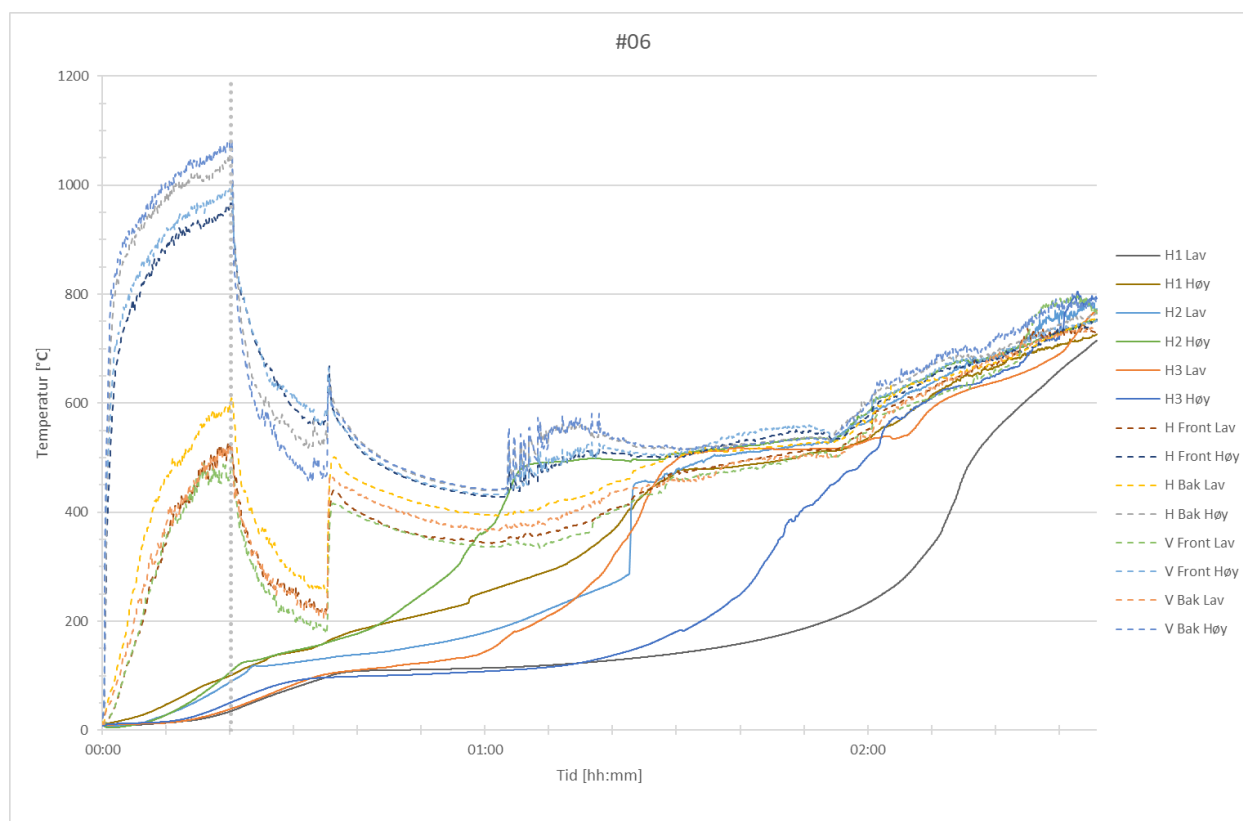
Tabell 6-1 viser data for de tre søylene i forsøk #06.

Tabell 6-1: Data for søyler i forsøk #06

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4889,1	12,2	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4996,0	12,5			
H3	5582,5	13,0			

6.1 Tid/temperaturkurve

Figur 6-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #06. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 6-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #06

7 Forsøk #07

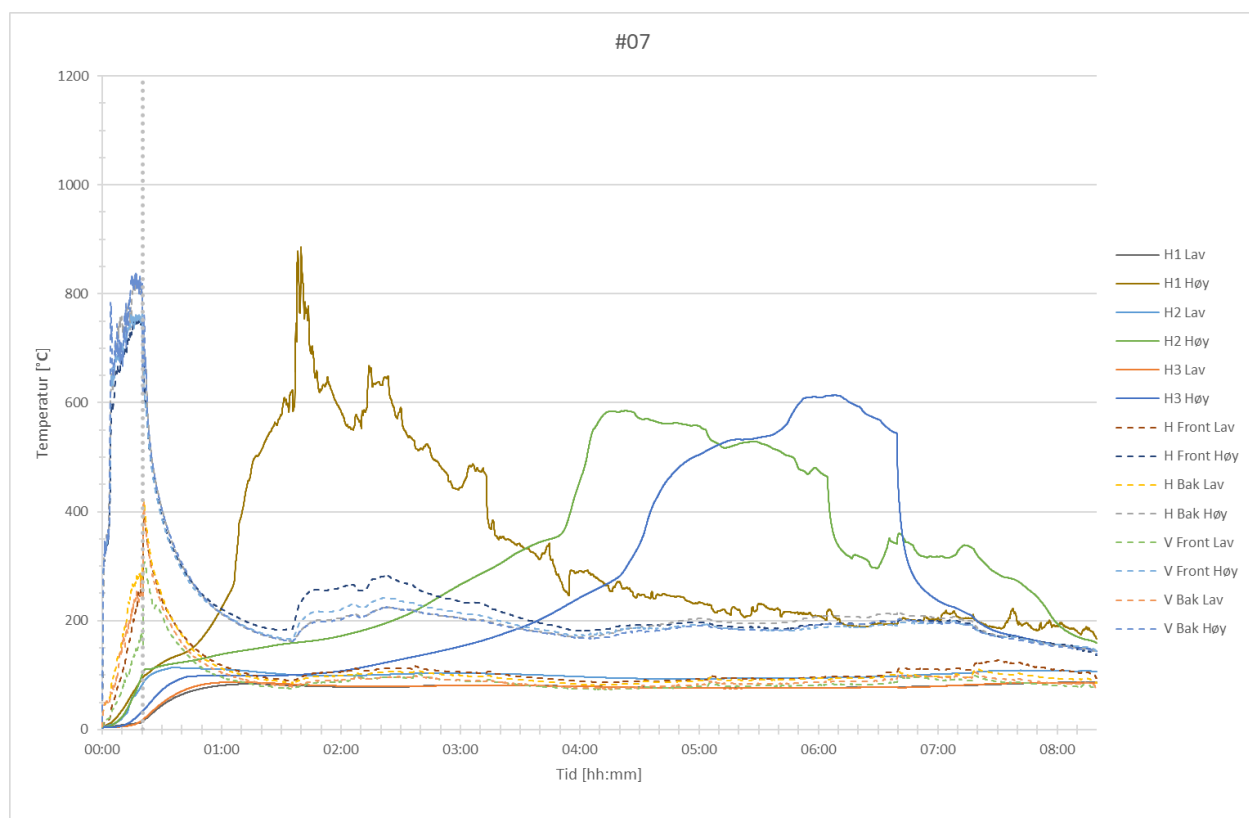
Temperaturen i rommet var 9 °C ved start av forsøk #07. Tabell 7-1 viser data for de tre søylene i forsøk #07.

Tabell 7-1: Data for søyler i forsøk #07

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4580	13	1693	2888	63
H2	4704	13	1996	2708	58
H3	4813	12	2326	2487	52

7.1 Tid/temperaturkurve

Figur 7-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #07. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 7-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #07

8 Forsøk #08

Temperaturen i rommet var 9 °C ved start av forsøk #08.

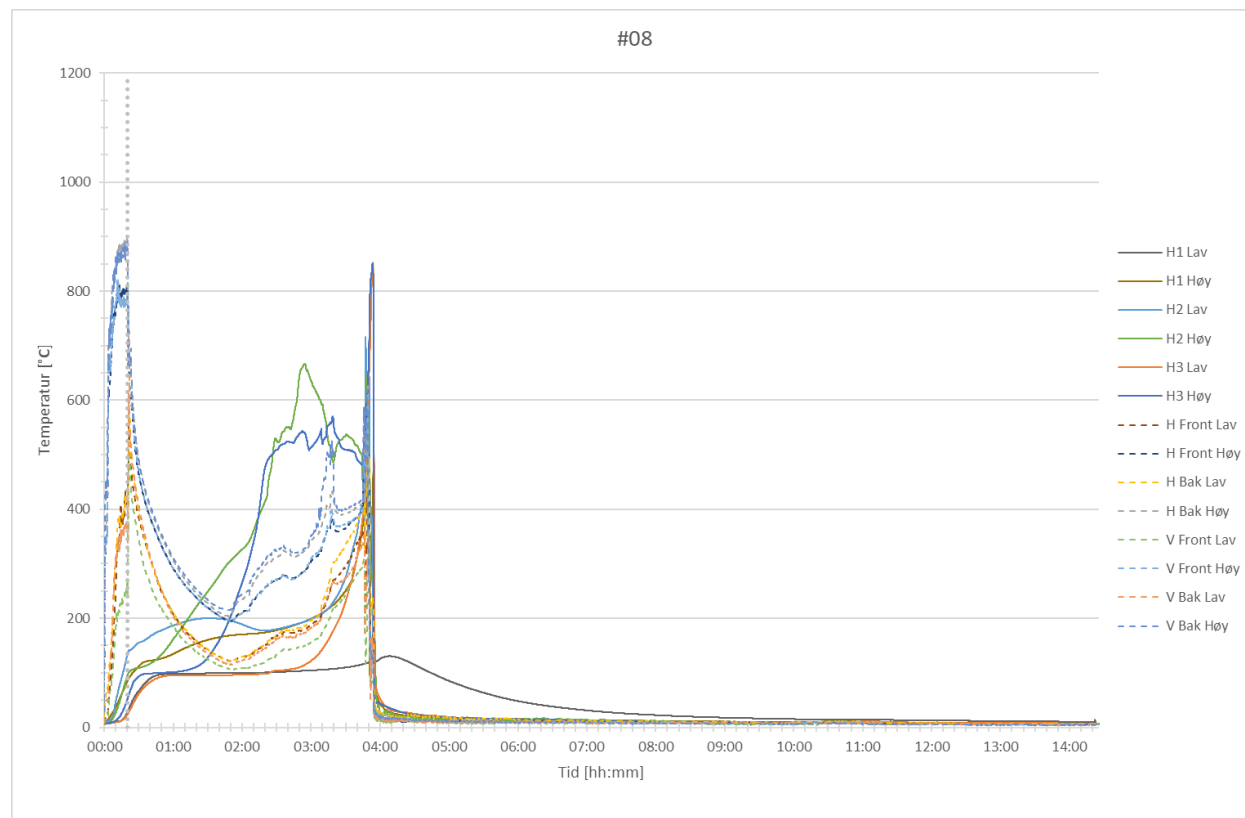
Tabell 8-1 viser data for de tre søylene i forsøk #08.

Tabell 8-1: Data for søyler i forsøk #08

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4987	16	2054	2933	59
H2	4700	13	Kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H3	5123	13			

8.1 Tid/temperaturkurver

Figur 8-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #08. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 8-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #08

9 Forsøk #09

Temperaturen i rommet var 10 °C ved start av forsøk #09.

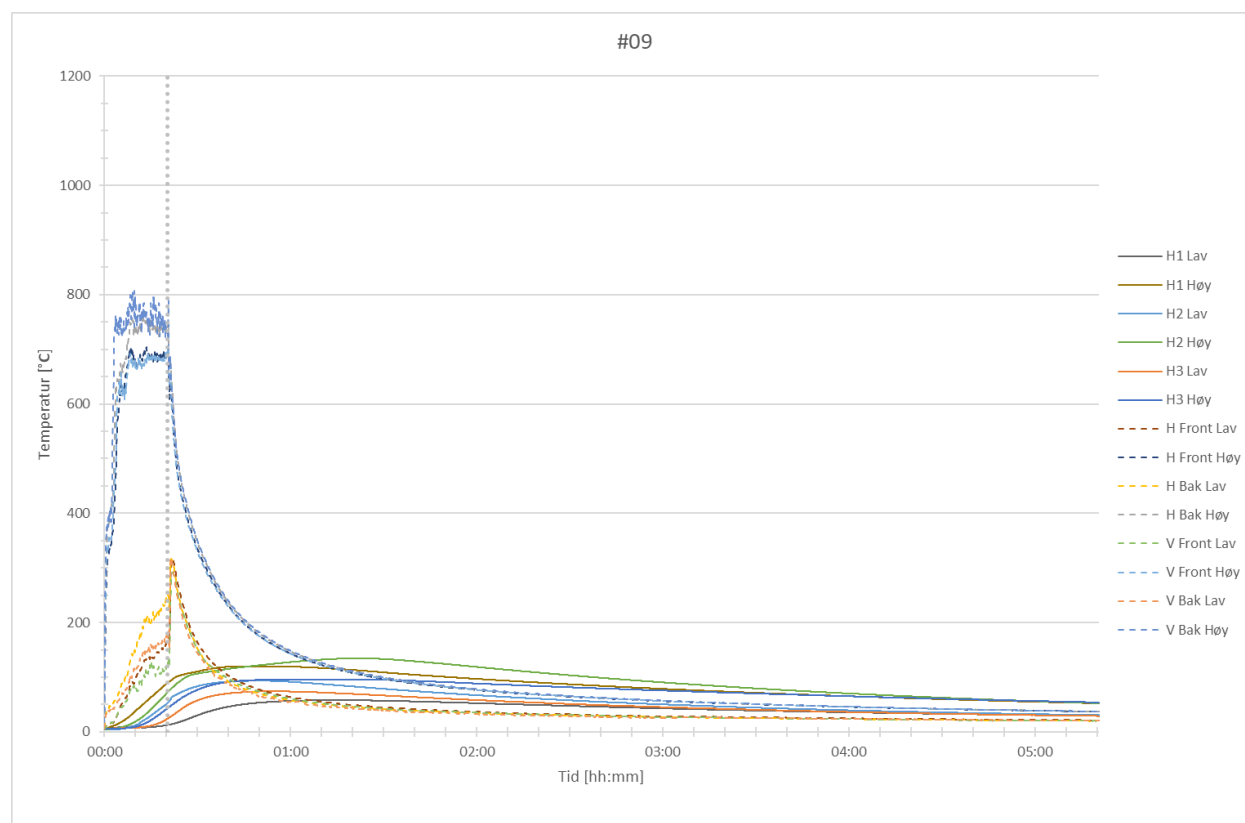
Tabell 9-1 viser data for de tre søylene i forsøk #09.

Tabell 9-1: Data for søyler i forsøk #09

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	5062	15	4299	764	15
H2	4709	14	3431	1277	27
H3	4607	13	3542	1065	23

9.1 Tid/temperaturkurver

Figur 9-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #09. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 9-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #09

10 Forsøk #10

Temperaturen i rommet var 13 °C ved start av forsøk #10.

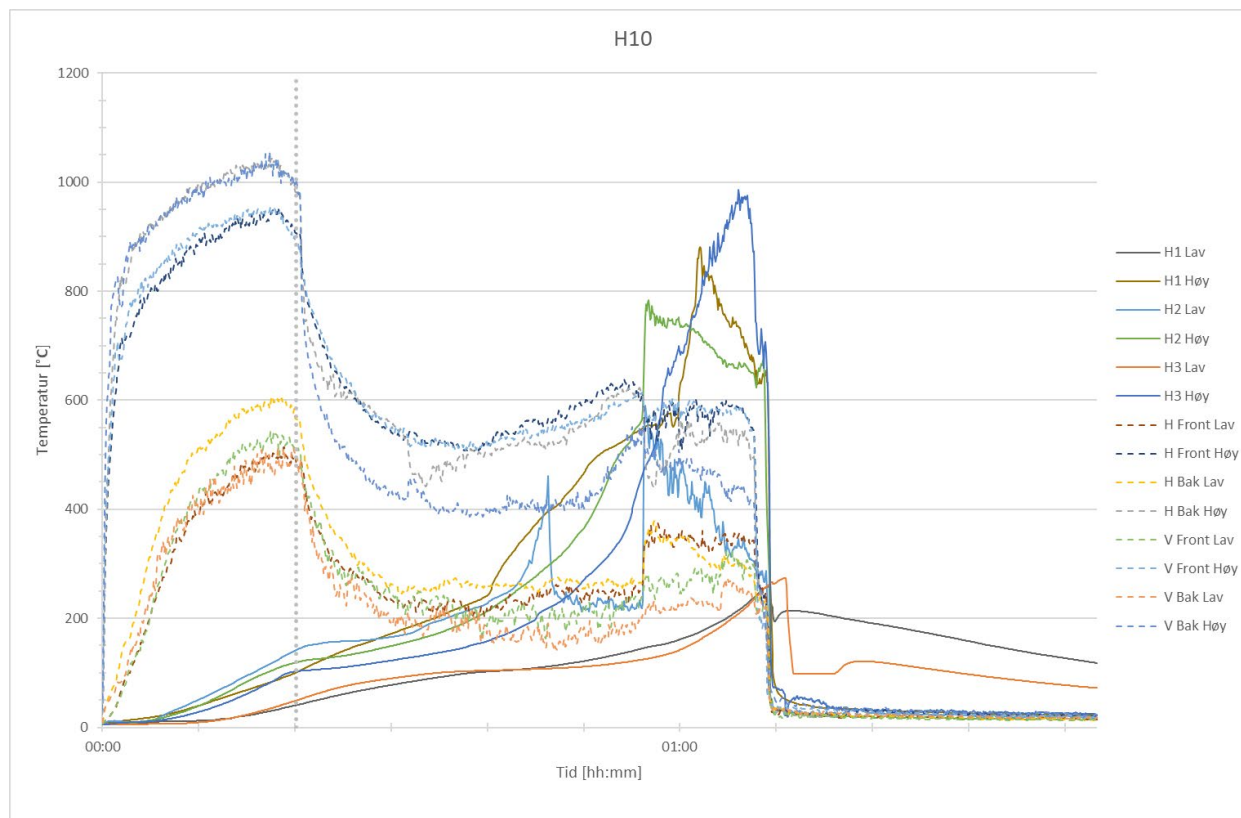
Tabell 10-1 viser data for de tre søylene i forsøk #10.

Tabell 10-1: Data for søyler i forsøk #10

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4441	13	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4363	11			
H3	4214	11			

10.1 Tid/temperaturkurver

Figur 10-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #10. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 10-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #10

11 Forsøk #11

Temperaturen i rommet var 26 °C ved start av forsøk #11.

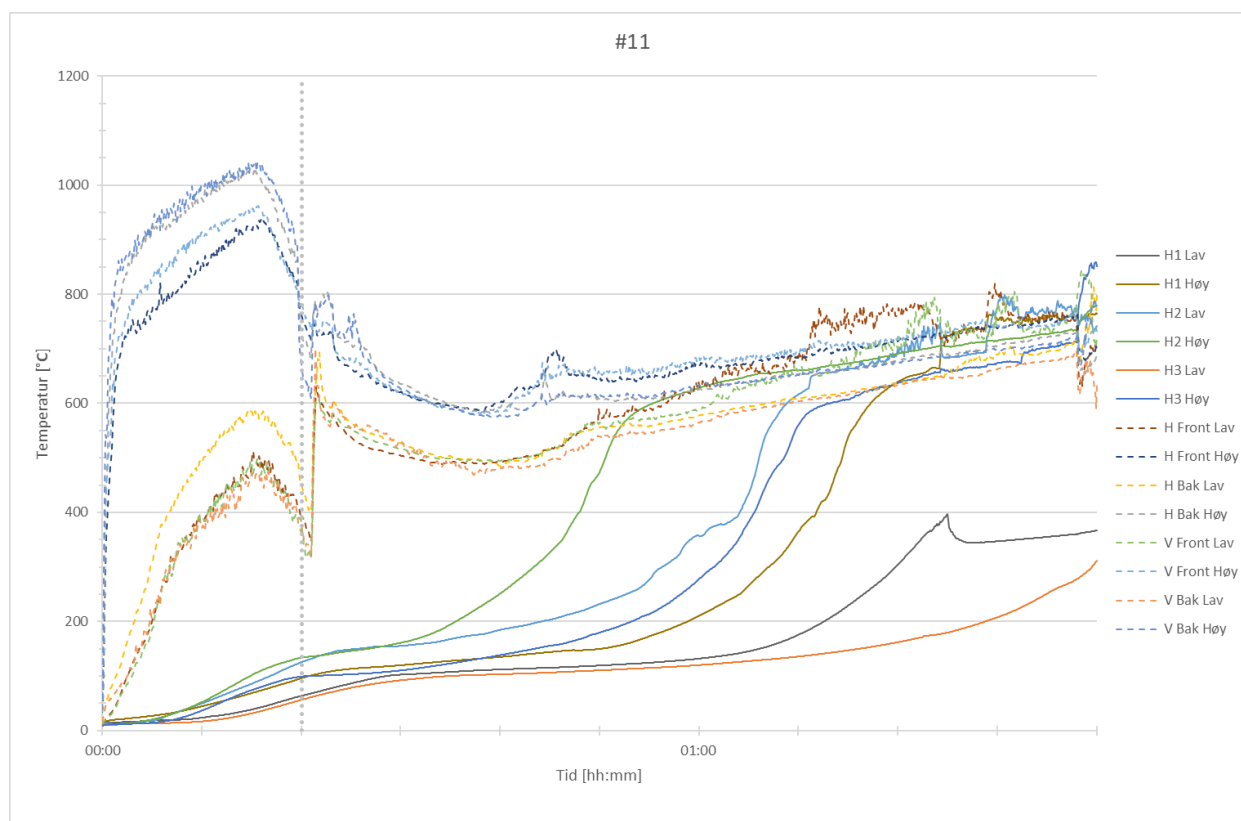
Tabell 11-1 viser data for de tre søylene i forsøk #11.

Tabell 11-1: Data for søyler i forsøk #11

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1.	4191	12	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2.	4312	11			
H3.	4429	13			

11.1 Tid/temperaturkurver

Figur 11-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #11. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 11-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #11

12 Forsøk #12

Temperaturen i rommet var 8 °C ved start av forsøk #12.

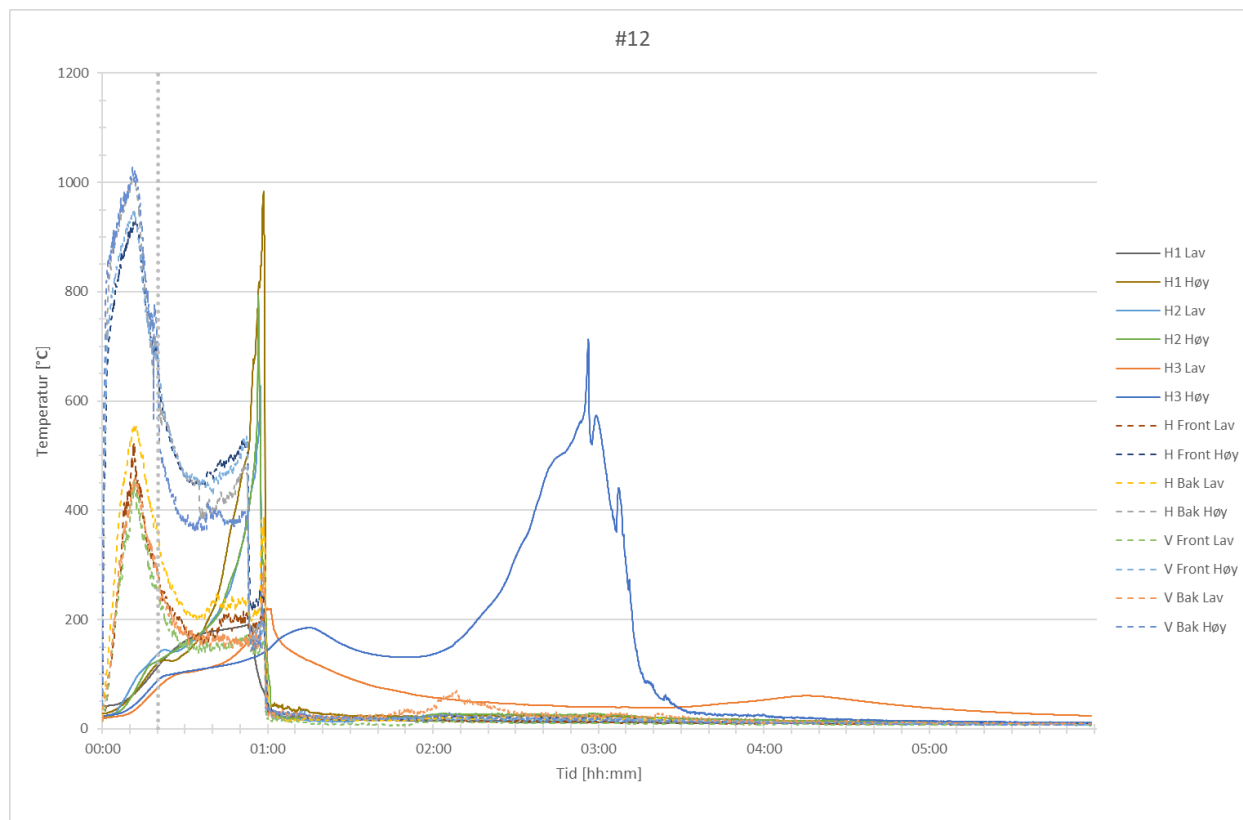
Tabell 12-1 viser data for de tre søylene i forsøk #12.

Tabell 12-1: Data for søyler i forsøk #12

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4313	11	958	3355	78
H2	4069	11	Kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H3	4255	12	538	3716	87

12.1 Tid/temperaturlurve

Figur 12-1 viser tid/temperaturlurver for alle termoelementene i forsøk #12. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 12-1: Tid/temperaturlurver for forsøk #12

13 Forsøk #13

Temperaturen i rommet var 10 °C ved start av forsøk #13.

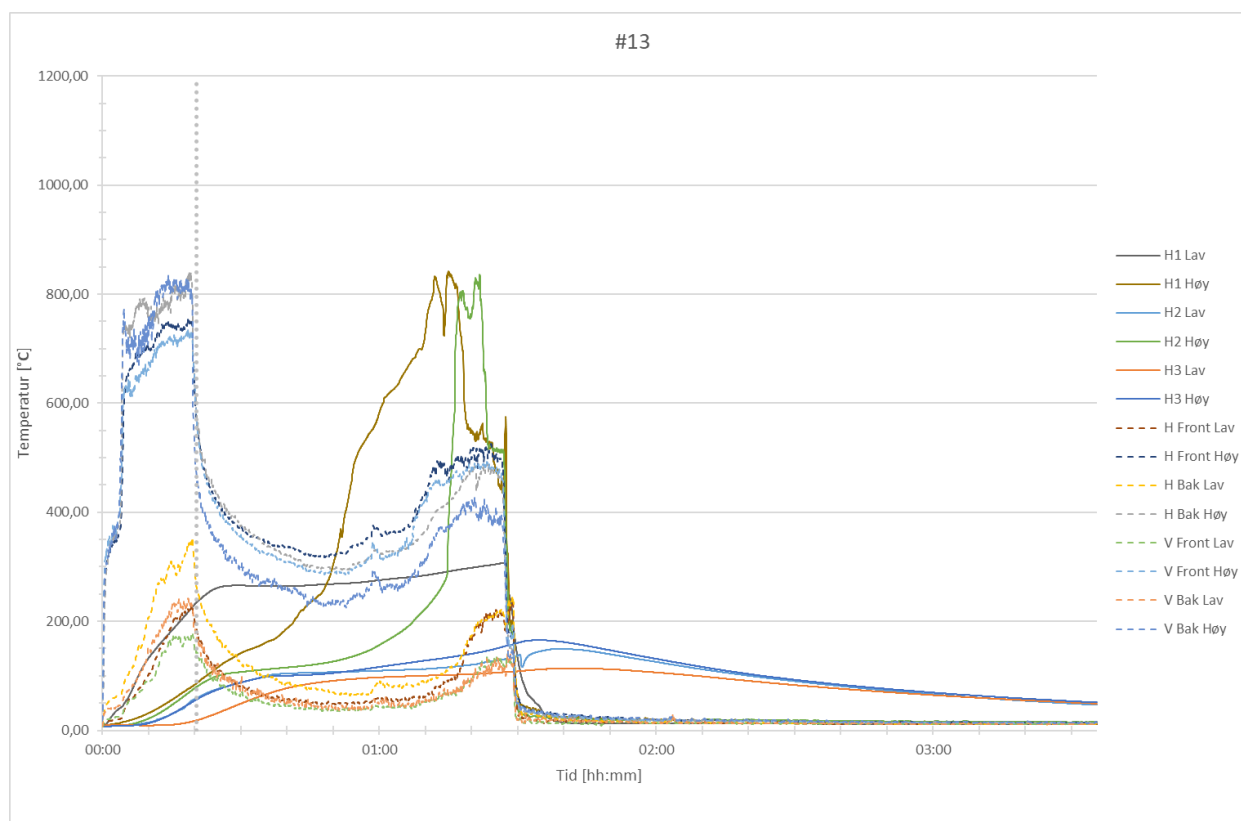
Tabell 13-1 viser data for de tre søylene i forsøk #13.

Tabell 13-1: Data for søyler i forsøk #13

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4309	14	1341	2969	69
H2	4442	13	744	3698	83
H3	4424	12	2361	2064	47

13.1 Tid/temperaturkurve

Figur 13-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #13. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 13-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #13

14 Forsøk #14

Temperaturen i rommet var 13 °C ved start av forsøk #14.

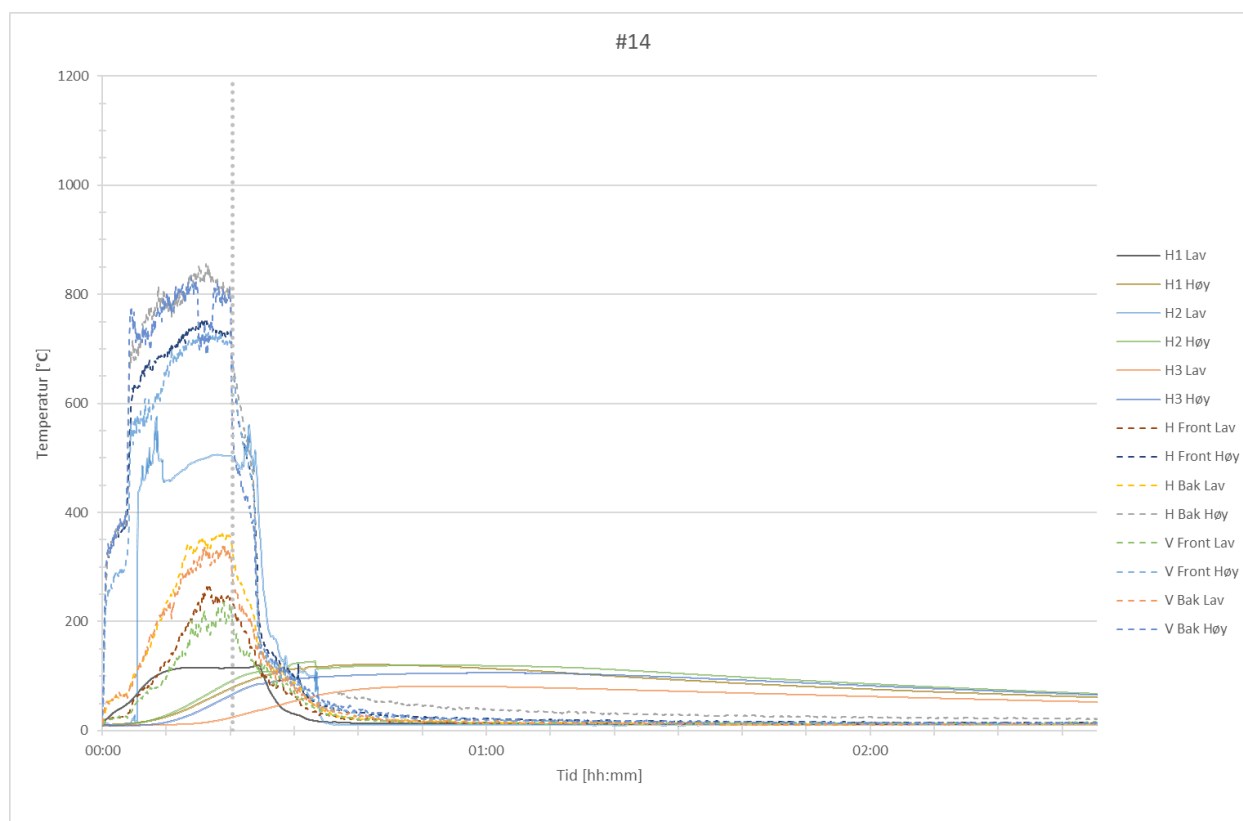
Tabell 14-1 viser data for de tre søylene i forsøk #14.

Tabell 14-1: Data for søyler i forsøk #14

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4156	11	3088	1068	26
H2	4229	13	2336	1893	45
H3	4410	10	2902	1509	34

14.1 Tid/temperaturkurver

Figur 14-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #14. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 14-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #14

15 Forsøk #15

Temperaturen i rommet var 9 °C ved start av forsøk #15.

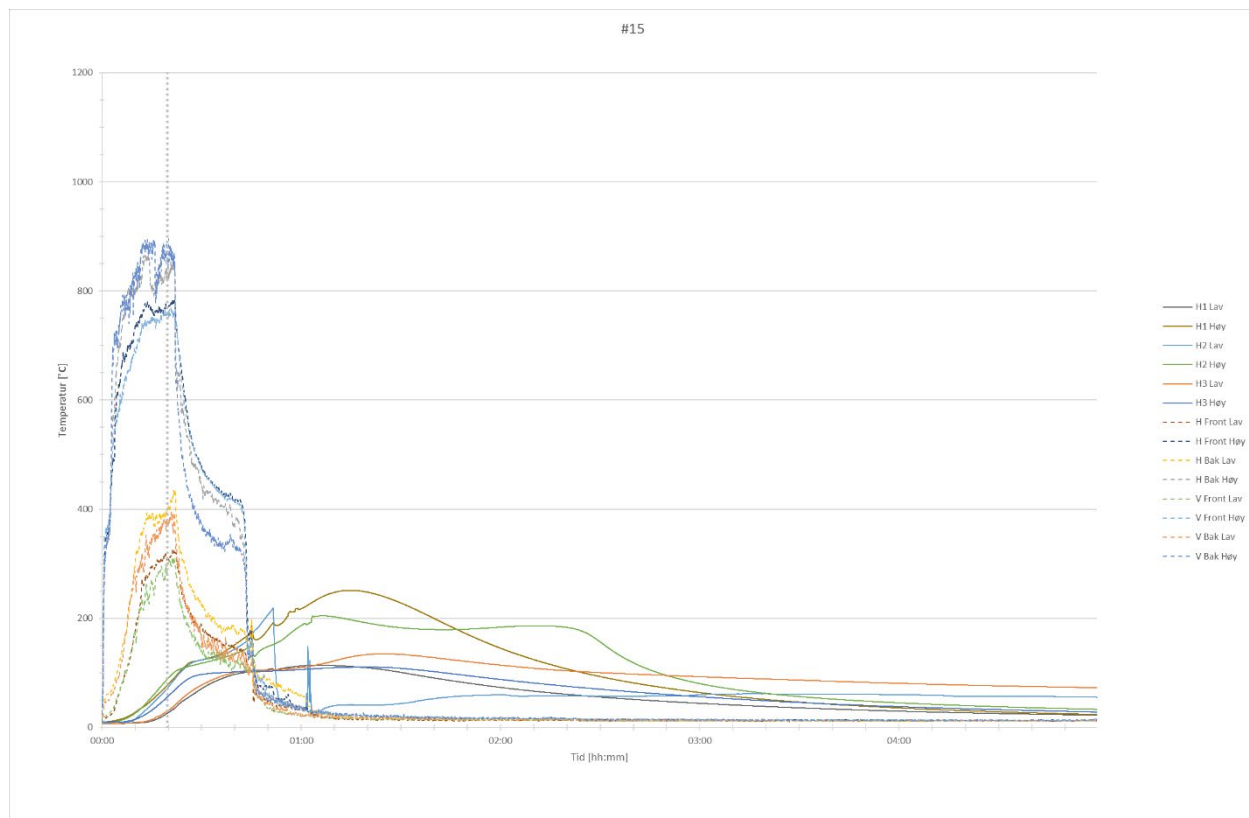
Tabell 15-1 viser data for de tre søylene i forsøk #15.

Tabell 15-1: Data for søyler i forsøk #15

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4088	10	1738	2349	57
H2	4254	10	1325	2929	69
H3	4227	11	2189	2038	48

15.1 Tid/temperaturkurver

Figur 15-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #15. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 15-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #15

16 Forsøk #16

Temperaturen i rommet var 42 °C ved start av forsøk #16. Dette var forsøk nr. 2 denne dagen og rommet var derfor forholdsvis varmt.

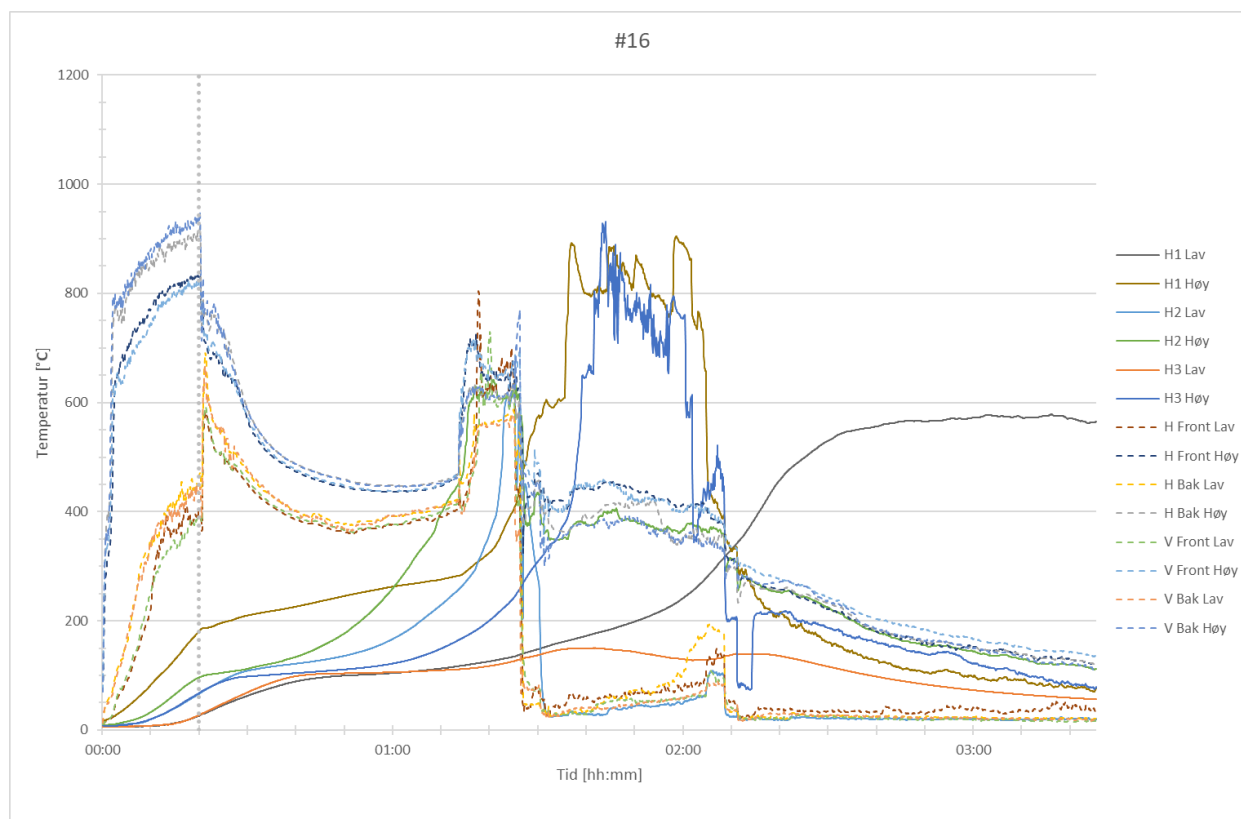
Tabell 16-1 viser data for de tre søylene i forsøk #16.

Tabell 16-1: Data for søyler i forsøk #16

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4737	11	Kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4567	11			
H3	4644	10	1024	3620	78

16.1 Tid/temperaturkurve

Figur 16-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #16. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 16-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #16

17 Forsøk #17

Temperaturen i rommet var 12 °C ved start av forsøk #17.

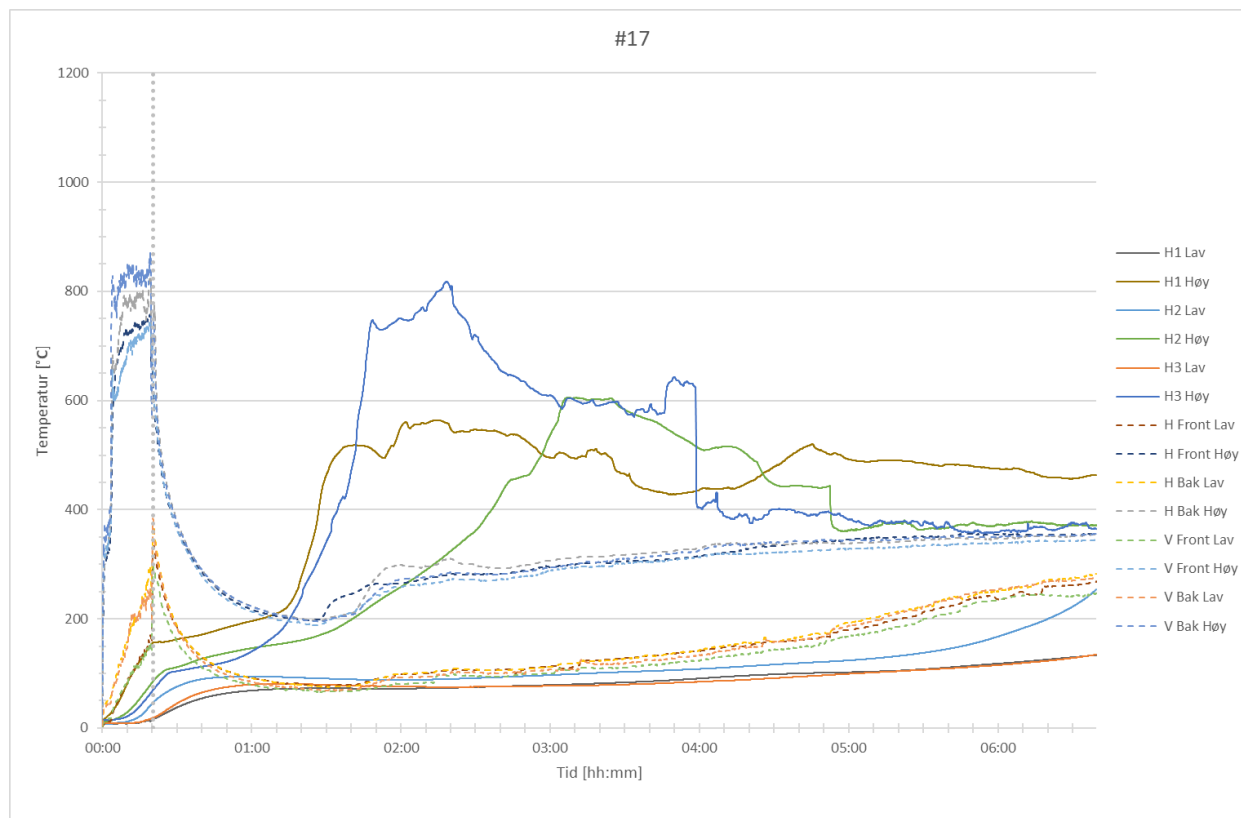
Tabell 17-1 viser data for de tre søylene i forsøk #17.

Tabell 17-1: Data for søyler i forsøk #17

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4690	12	1748	2943	63
H2	4754	11	968	3785	80
H3	4686	12	1045	3641	78

17.1 Tid/temperaturkurver

Figur 17-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #17. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 17-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #17

18 Forsøk #18

Temperaturen i rommet var 30 °C ved start av forsøk #18. Dette var forsøk nr. 2 denne dagen og rommet var derfor forholdsvis varmt.

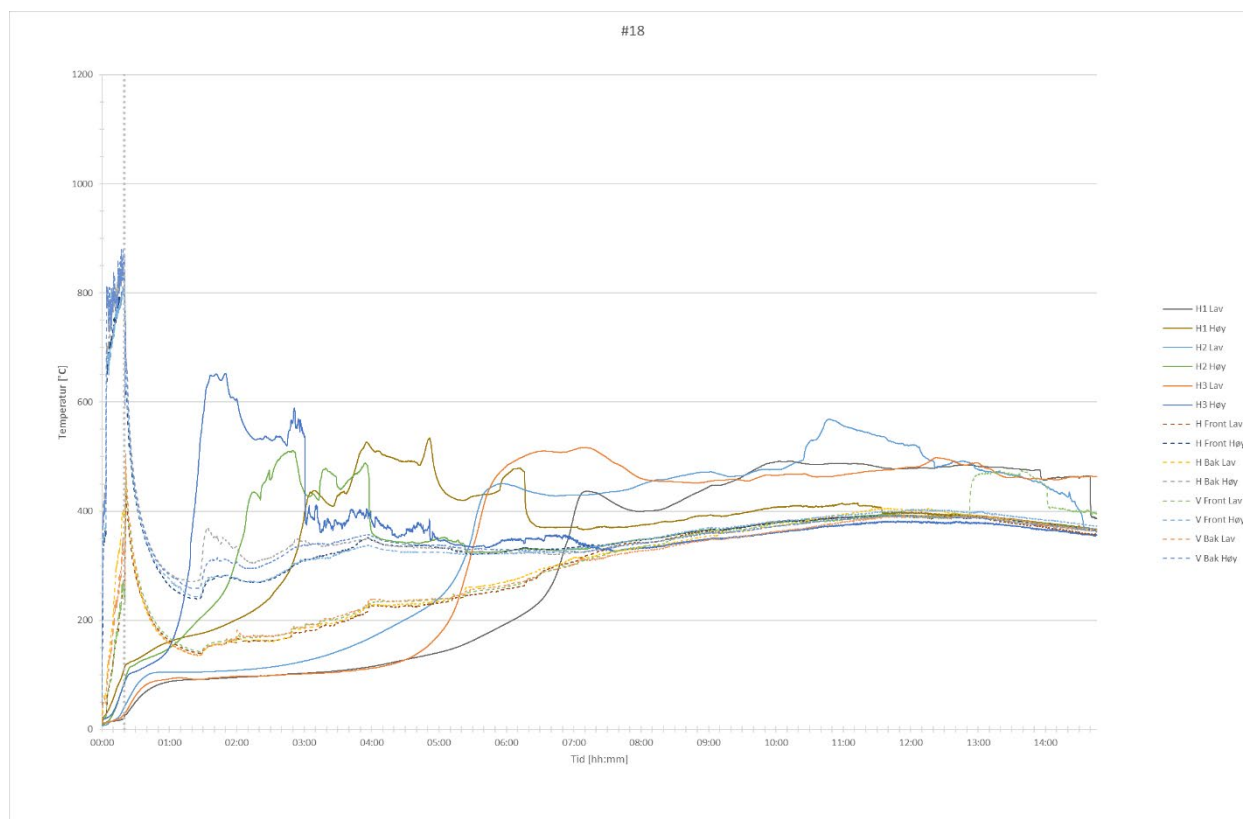
Tabell 18-1 viser data for de tre søylene i forsøk #18.

Tabell 18-1: Data for søyler i forsøk #18

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4747	10	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4807	12			
H3	4421	12			

18.1 Tid/temperaturkurver

Figur 18-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #18. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 18-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #18

19 Forsøk #19

Temperaturen i rommet var 26 °C ved start av forsøk #19. Dette var forsøk nr. 3 denne dagen og rommet var derfor forholdsvis varmt.

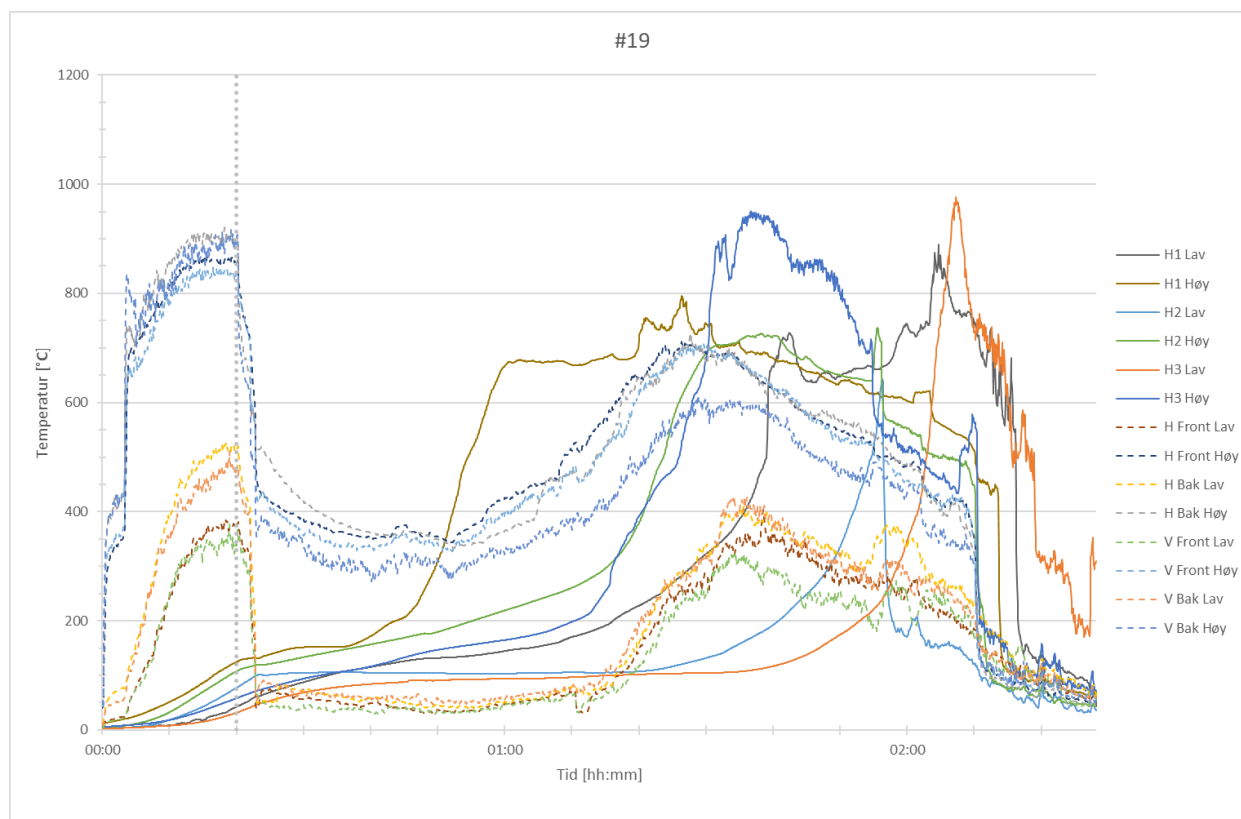
Tabell 19-1 viser data for de tre søylene i forsøk #19.

Tabell 19-1: Data for søyler i forsøk #19

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4651	10	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4336	10			
H3	4784	9			

19.1 Tid/temperaturkurver

Figur 19-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #19. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



Figur 19-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #19

20 Forsøk #20

Temperaturen i rommet var 27 °C ved start av forsøk #20.

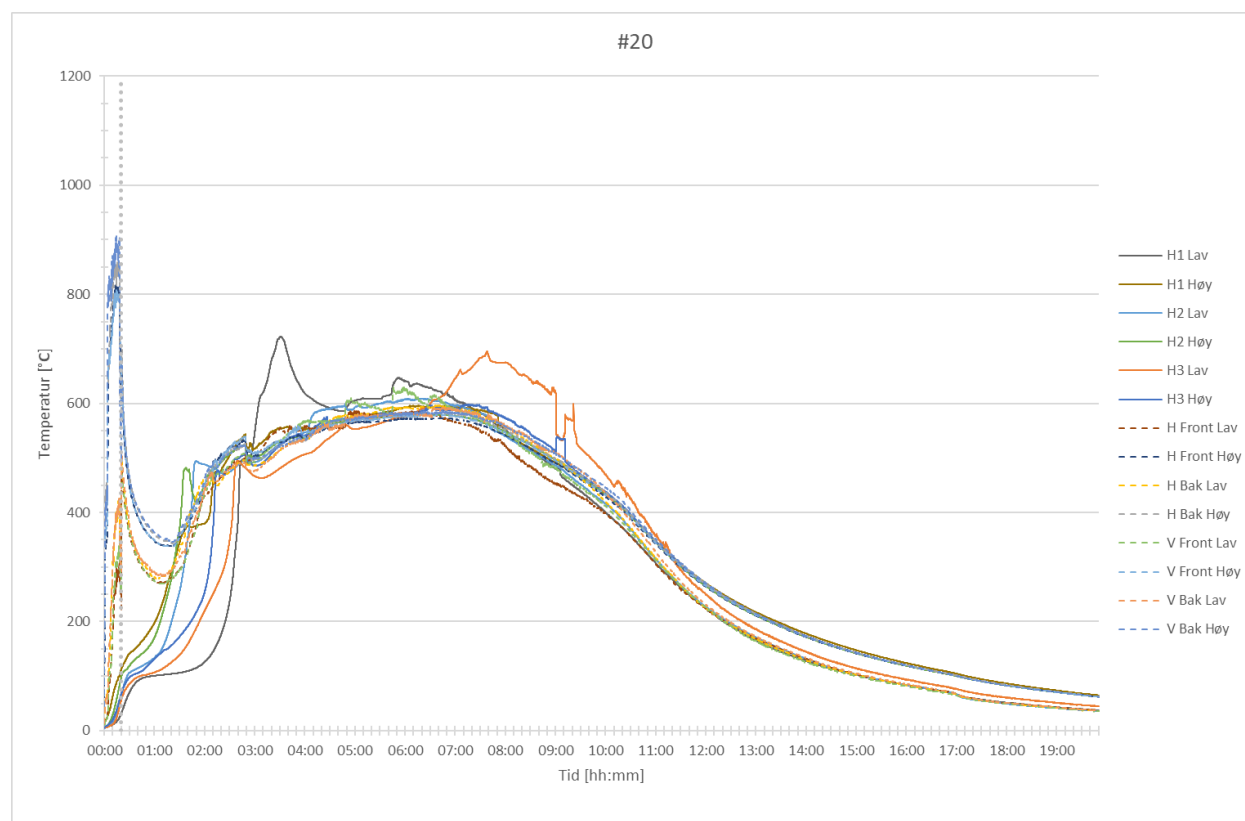
Tabell 20-1 viser data for de tre søylene i forsøk #20.

Tabell 20-1: Data for søyler i forsøk #20

Posisjon	Pre-forsøk		Post-forsøk		
	Vekt [g]	Fukt [%]	Vekt [g]	Vekttap [g]	Vekttap [%]
H1	4311	11	Brannrommet var utbrent ved endt test, kun forkullede rester på gulvet av brannrommet		
H2	4225	10			
H3	4326	10			

20.1 Tid/temperaturkurver

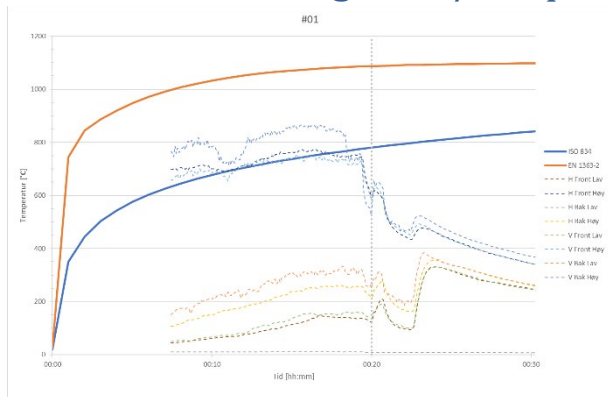
Figur 20-1 viser tid/temperaturkurve for alle termoelementene i forsøk #20. Stiplede linjer er målinger i selve rommet, mens heltrukne linjer er målinger fra termoelementer plassert inne i selve søylene.



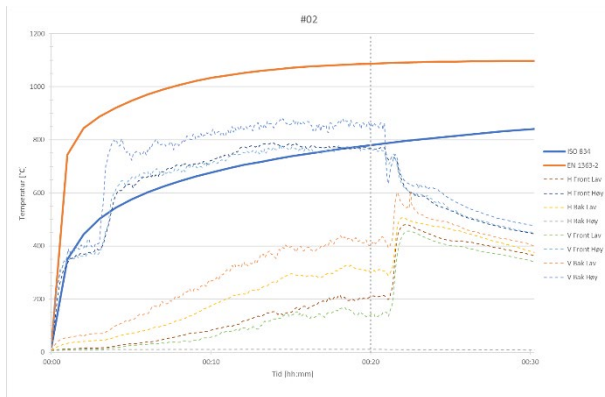
Figur 20-1: Tid/temperaturkurver for forsøk #20

Vedlegg D. Brannbelastning

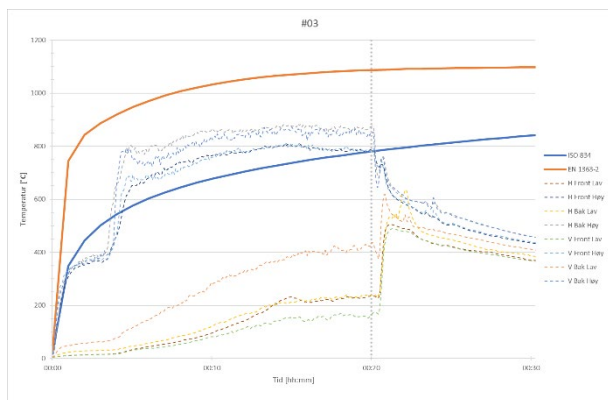
1. Brannbelastning – Tid/temperaturkurver



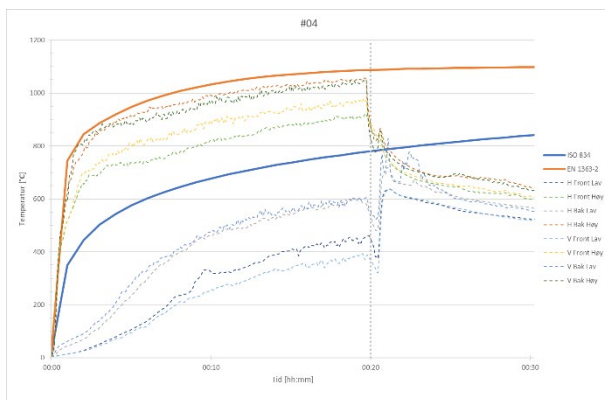
Figur 1-1: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #01



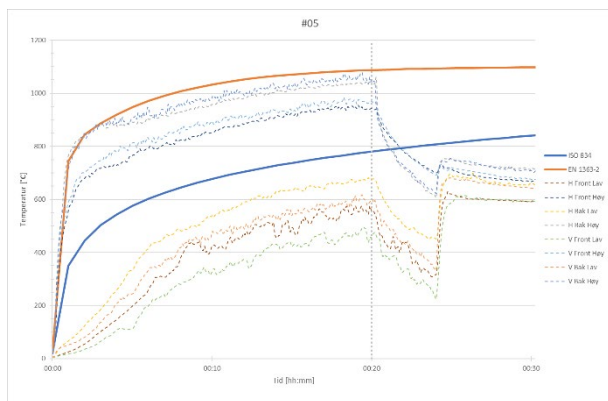
Figur 1-2: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #02



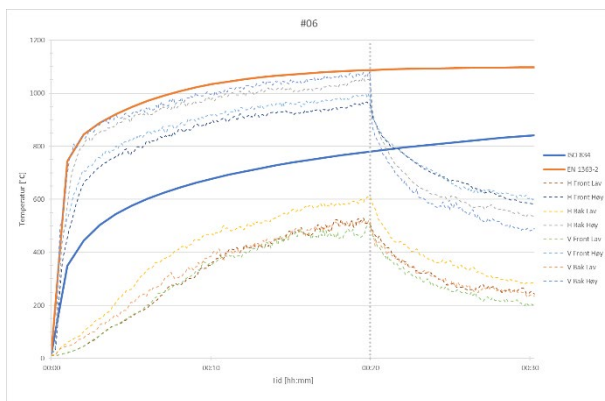
Figur 1-3: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #03



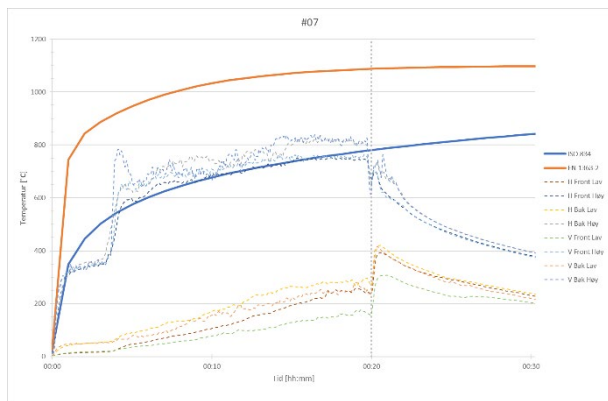
Figur 1-4: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #04



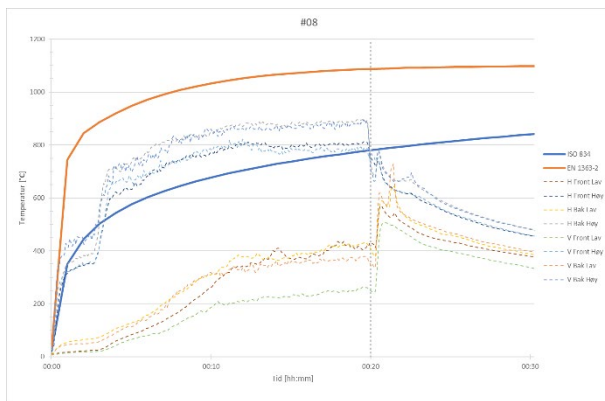
Figur 1-5: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #05



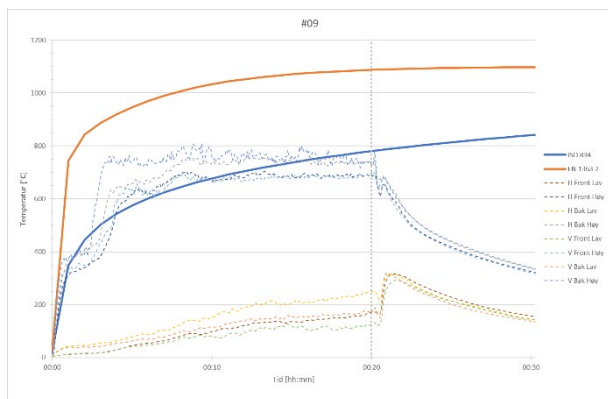
Figur 1-6: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #06



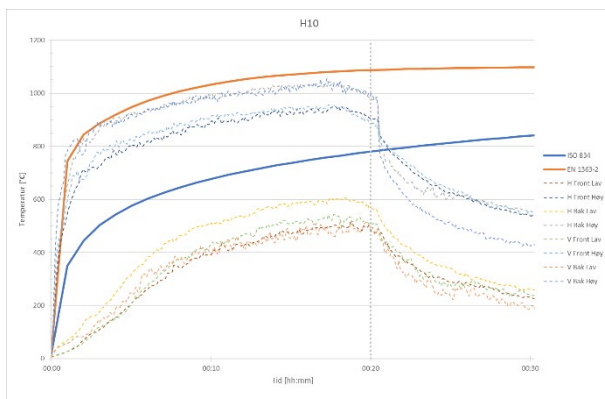
Figur 1-7: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #07



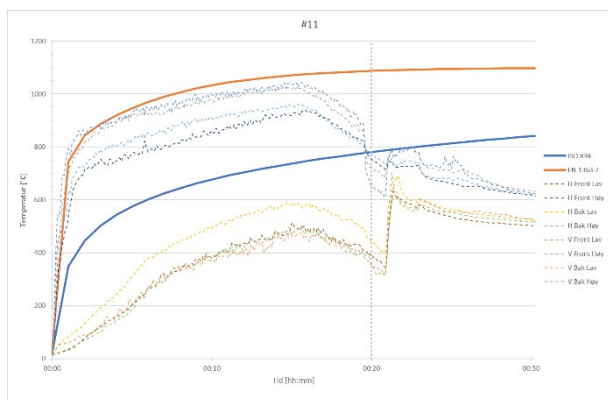
Figur 1-8: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #08



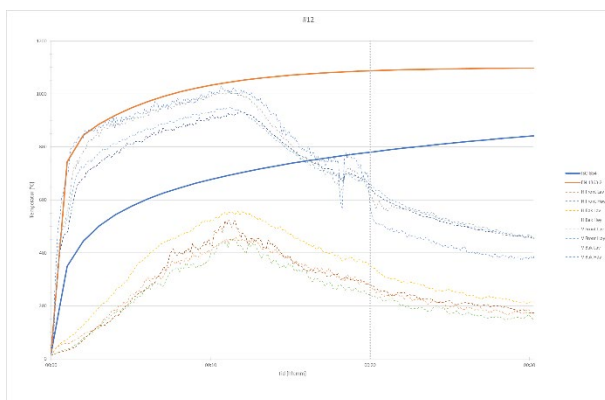
Figur 1-9: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #09



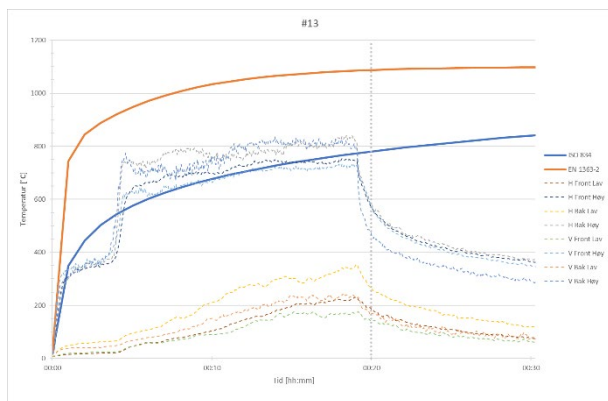
Figur 1-10: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #10



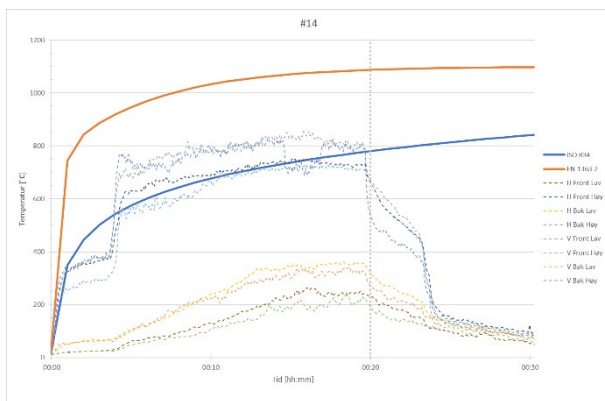
Figur 1-11: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #11



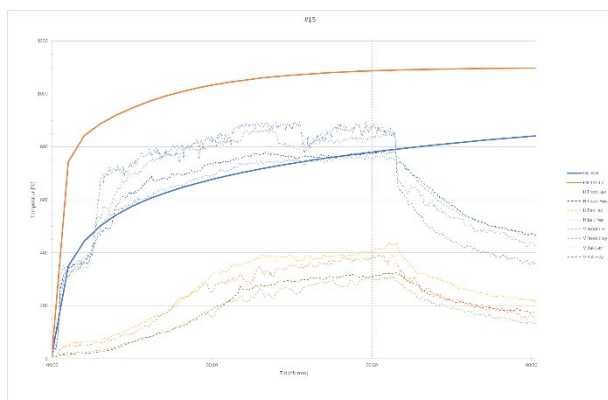
Figur 1-12: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #12



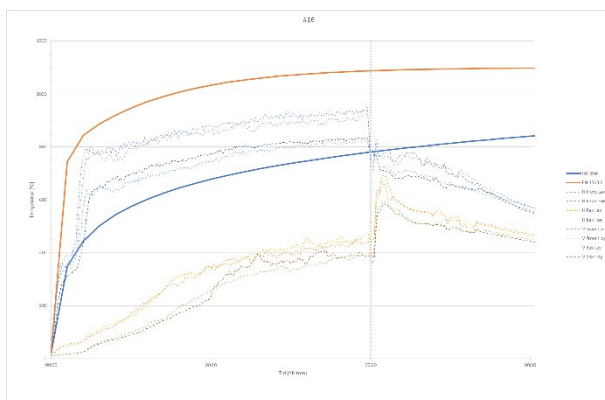
Figur 1-13: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #13



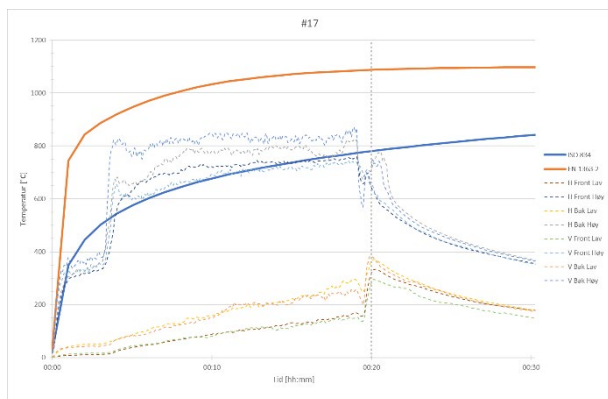
Figur 1-14: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #14



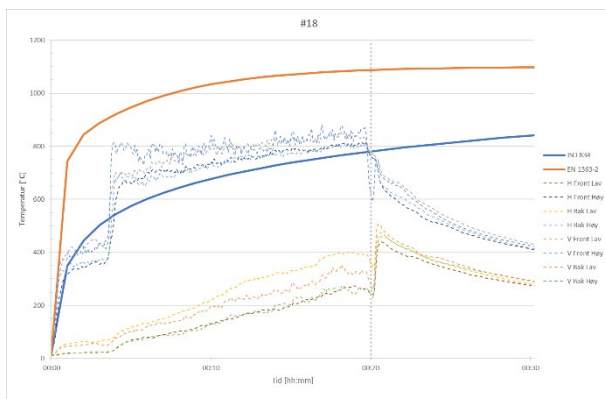
Figur 1-15: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #15



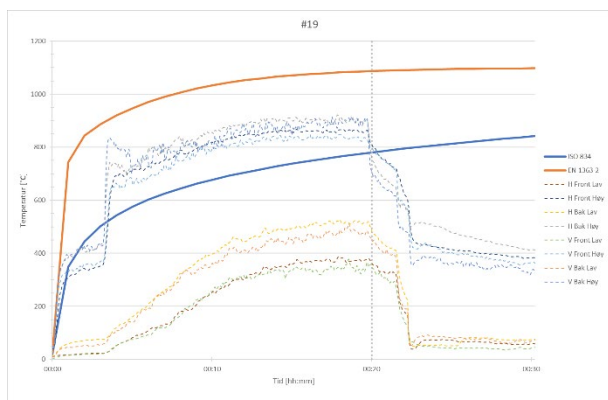
Figur 1-16: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #16



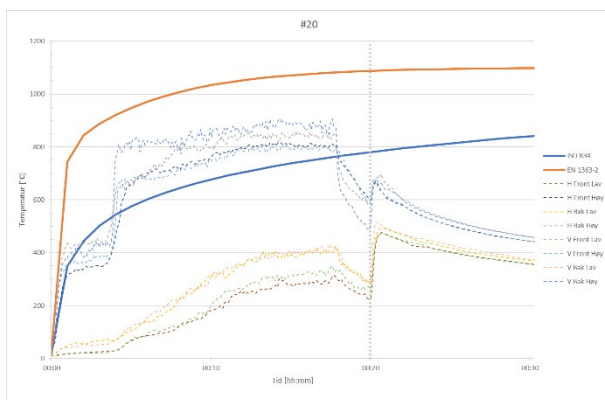
Figur 1-17: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #17



Figur 1-18: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #18



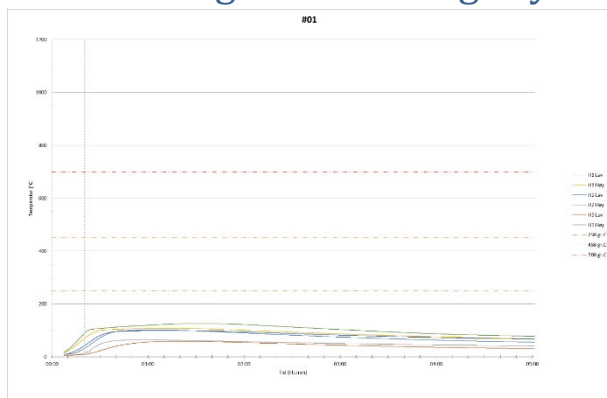
Figur 1-19: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #19



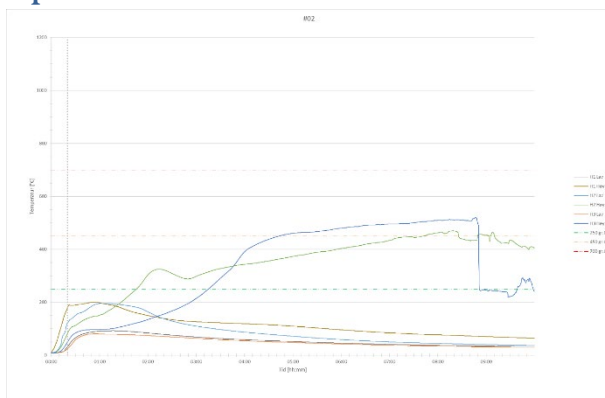
Figur 1-20: Sammenligning av tid/temperaturkurver for brannrom i forsøk #20

Vedlegg E. Innvendig søyletemperatur for hele brannforløpet

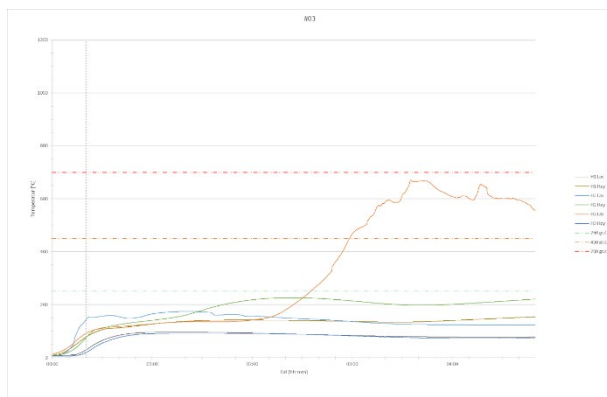
1. Vurdering av innvendig søyletemperatur



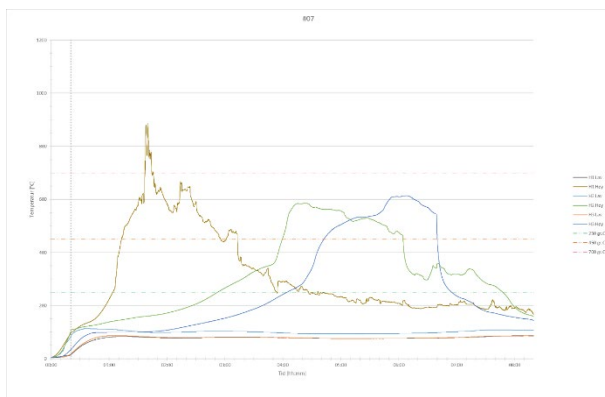
Figur 1-1: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #01 mot temperaturkriteriet for ulming



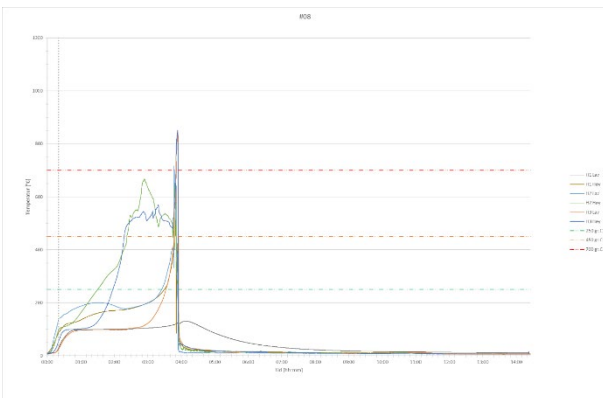
Figur 1-2: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #02 mot temperaturkriteriet for ulming



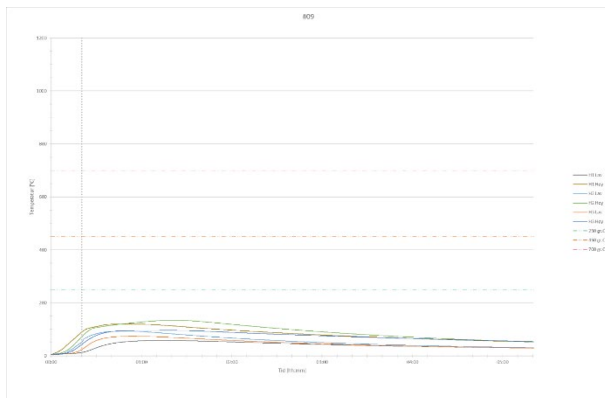
Figur 1-3: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #03 mot temperaturkriteriet for ulming



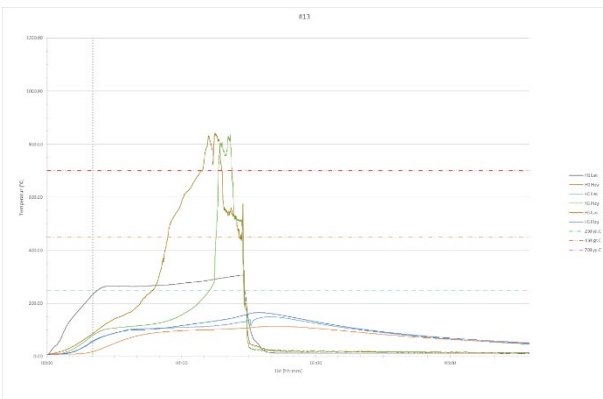
Figur 1-4: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #07 mot temperaturkriteriet for ulming



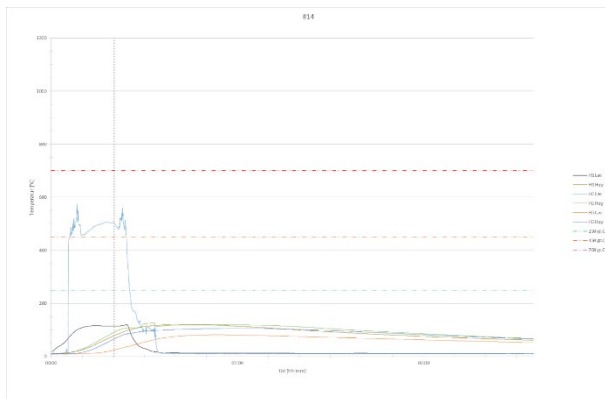
Figur 1-5: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #08 mot temperaturkriteriet for ulming



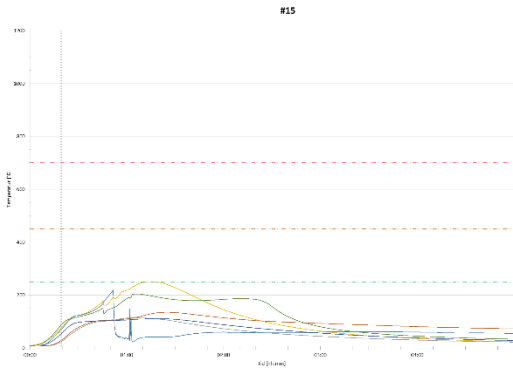
Figur 1-6: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #09 mot temperaturkriteriet for ulming



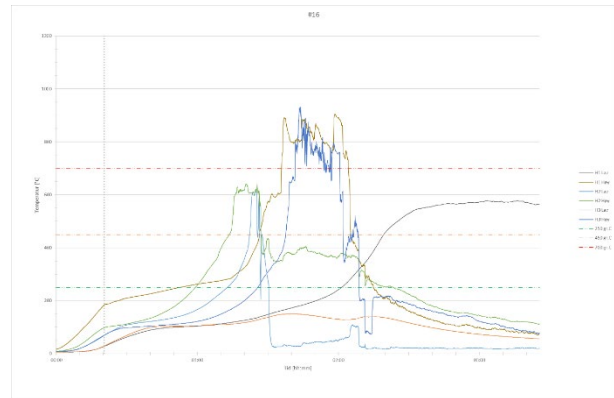
Figur 1-7: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #13 mot temperaturkriteriet for ulming



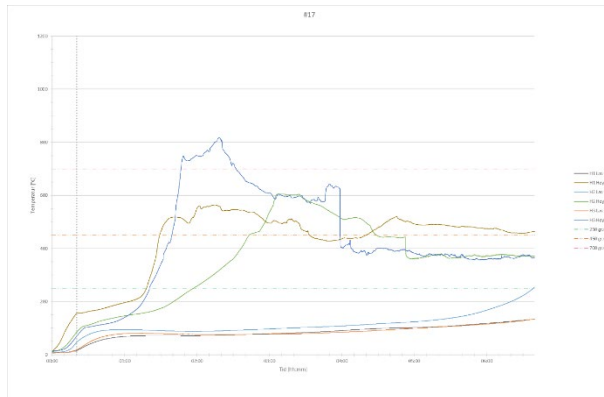
Figur 1-8: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #14 mot temperaturkriteriet for ulming



Figur 1-9: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #15 mot temperaturkriteriet for ulming



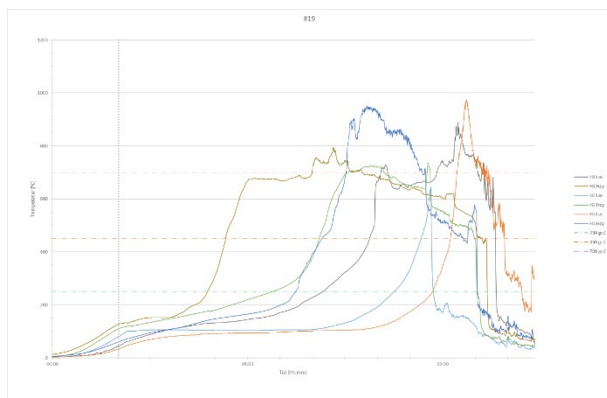
Figur 1-10: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #16 mot temperaturkriteriet for ulming



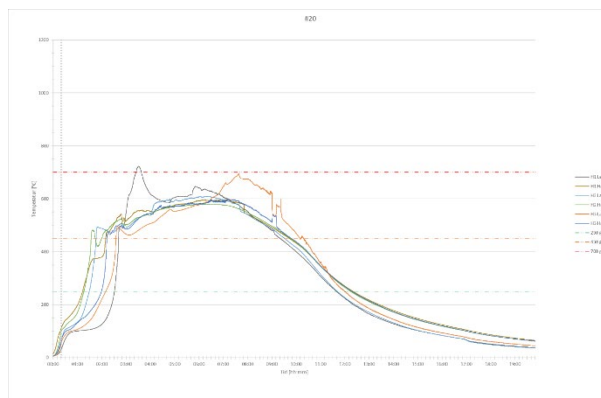
Figur 1-11: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #17 mot temperaturkriteriet for ulming



Figur 1-12: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #18 mot temperaturkriteriet for ulming



Figur 1-13: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #19 mot temperaturkriteriet for ulming



Figur 1-14: Sammenligning av tid/temperaturkurver for søyler i #20 mot temperaturkriteriet for ulming