IR-teknik som hjälpmedel vid brandbekämpning

Albin Gudmundsson

Pontus Studahl

Department of Fire Safety Engineering

Lund University, Sweden

Brandteknik

Lunds tekniska högskola

Lunds universitet

Report 5490, Lund 2015

IR-teknik som hjälpmedel vid brandbekämpning

Albin Gudmundsson

Pontus Studahl

Lund 2015

Titel: IR-teknik som hjälpmedel vid brandbekämpning

Title: IR technology as a tool for firefighting

Författare / Authors: Albin Gudmundsson & Pontus Studahl

Report 5490

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG / TVBB—5490—SE

Antal sidor / Number of pages: 60

Figurer / Illustrations: Om inget annat anges är bilder tagna av författarna. Foton från försöket är tagna av Mikael Linder med tillstånd av SÄRF. Foton från FLIR T-640-kamerorna är tagna av Per Stenberg, KIMO. Samtliga bilder som används i rapporten visas med tillstånd.

Sökord: Infraröd, IR-kamera, brandbekämpning, takfotsventilation, emissionsförmåga, reflektionsförmåga, våglängd, övertändning, syrekontrollerad, skärsläckare, räddningsledare, räddningstjänst, brandman, värmevåg, termisk tröghet.

Keywords: Infrared, IR camera, firefighting, roof ventilation, eaves, emissivity, reflectivity, wave length, cutting extinguisher, firefighter, flashover, fire service, thermal inertia.

Abstract

The aim of this report is to increase the knowledge about the use of infrared cameras within fire services. A construction made up of several different types of walls and ceilings was built and used in a large scale fire test. The actual temperature was measured with thermocouples and compared to the temperature given by infrared cameras. The heat wave and the infrared images themselves were also evaluated separately. The report concludes that temperature measurement with infrared cameras isn't precise without perfect settings but is still very useful. The heatwave can be seen in the weaknesses of a construction long before the entire construction is heated which takes very long time for some materials.

Författarna ansvarar för innehållet i rapporten

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2015.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

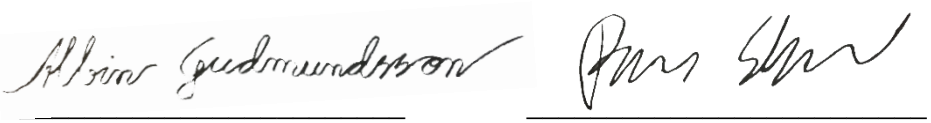
Department of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

Förord

Arbetet är en del av kursen *Examensarbete – Brandteknik VBMR01* som ges vid avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola och omfattar 22,5 högskolepoäng. Det har varit ett lärorikt och spännande arbete som involverat många människor. Därför skulle vi vilja passa på att tacka våra handledare **Göran Holmstedt** (LTH) och **Krister Palmkvist** (SÄRF).

Vi skulle även vilja tacka följande personer för all hjälp på olika sätt och vis under projektets gång. **Sven-Ingvar Granemark** (LTH) & **Stefan Svensson** (LTH) för hjälp med mätutrustning, **Dan Löfgren och Viskastrandsgymnasiets elever** för byggnationen, **Lennart Hällfors**, **David Jarhult och övrig personal** på Guttasjön för hjälp kring försöket, **Mikael Linder** (Ringhals) för fotografering, **Per Stenberg** (KIMO) för hjälp med IR-kamerorna samt **Bo Andersson** (MSB).

Lund, februari 2015



Albin Gudmundsson Pontus Studahl

Sammanfattning

Denna rapport har haft som mål att öka förståelsen och ge råd kring användandet av IR-teknik hos räddningstjänsten. Användandet av IR-teknik inom räddningstjänsten har tidigare haft störst fokus på eftersök av personer vid rökdykning samt lokalisering av glödbränder. Idag är scanning från utsidan av byggnader en viktig metod för att ge underlag till beslutstagande vid insats. Bland annat är det av intresse att undvika personal i brandutsatta utrymmen och istället bekämpa brand utifrån med exempelvis skärsläckare.

Med hjälp av litteraturstudier har ett antal väggar och tak valts ut som ingick i ett större försök där ett flertal IR-kameror dokumenterade förloppet. Den faktiska temperaturen mättes med traditionell mätteknik för att kunna utvärdera kamerornas temperaturavläsning samt värmeledningen genom konstruktionen. Försöket genomfördes på brandövningsfältet Guttasjön utanför Borås. I försöket ingick sju olika väggar samt fyra olika tak. Dessa väggar och tak valdes ut då de representerar olika tidstypiska konstruktioner i Sverige. De byggdes samman till ett mindre hus på änden av en container i vilken en gasolbrännare var placerad.

Resultaten från försöket visar att det tar lång tid för en värmevåg att gå genom en konstruktion. Det tar minst 20 minuter för en värmevåg att ta sig genom vanliga väggar under förutsättning att ingen övertändning har skett. Ett oisolerat tak kan släppa igenom värme genom dess konstruktion, så att en förhöjd temperatur på två grader uppstår, inom två minuter. Ett vanligt isolerat tak släpper inte igenom värme de första tio minuterna. Värmevågen går betydligt snabbare igenom svagheter som exempelvis ventilation. Vid scanning är det därför bra att titta på svagheterna under det tidiga brandförloppet. IR-kameran ser temperaturskillnader innan rök blir synligt.

För att få en noggrann temperaturangivelse från en IR-kamera krävs kunskap om parametrar som emissionsförmåga och bakgrundsstrålning. Därför ger inte kameran ett korrekt värde på ett objekts temperatur. Dock är det sällan nödvändigt att få en exakt temperatur i brandsammanhang och temperaturskillnader är i regel mer intressanta.

Det går att utläsa små temperaturvariationer med högupplösta IR-kameror, men för att denna kunskap ska kunna utnyttjas krävs det mycket av användaren. Förslag till framtida forskning är att utveckla metoderna kring användandet av högupplösta kameror. Ett annat intressant användningsområde är IR-kameror monterade på drönare för scanning ovanifrån.

Summary

This report has aimed to increase the understanding of and advising on the use of infrared technology for fire services. The use of infrared technology within fire services has previously focused on finding persons hidden in smoke due to fire. Today, scanning from the outside of buildings is an important method to provide a basis for decision-making at a fire scene. Among other things, it is of interest to avoid staff in burning buildings and instead fight fire with, for example cutting extinguishers from outside the building.

With the help of literature, a number of walls and ceilings were selected as part of a larger fire test in which several infrared cameras documented the process. The actual temperature was measured by traditional measurement techniques to evaluate the cameras temperature reading and the heat conduction through the structure. The fire test was conducted on the fire training area Guttasjön outside Borås. The test included seven different walls and four different roofs. These walls and ceiling were selected because they represent different typical constructions from several decades in Sweden. They were built together into a smaller house at the end of a cargo container which had a gas burner placed inside.

The results of the experiment show that it takes a long time before an increase in temperature can be noticed on one side of a construction because of high temperature on the opposite side due to heat conduction through the material. It takes at least 20 minutes for a heat wave to pass through most normal walls, provided that no flashover occurred. The heat wave may pass through an uninsulated roof, so that an elevated temperature of two degrees occurs, within two minutes. A normal insulated roof does not pass heat the first ten minutes. The heat wave is considerably faster through weaknesses such as ventilation. For this reason it is good to focus at the weaknesses in the early stages of a fire when scanning a building from outside. An IR camera can detect a temperature difference long before smoke becomes visible.

To get an accurate temperature reading from an IR camera a lot of knowledge about parameters such as emissivity and background radiation is required. Therefore, do not consider the temperature given by the camera as the correct value of the object's temperature. However, it is usually not necessary to obtain a precise temperature reading in most fire situations, it is rather the temperature differences that are of interest.

It is possible to detect small temperature variations with high resolution infrared cameras, but for this knowledge to be obtained it requires a lot of user knowledge. Suggestions for future research is to develop methods on the use of high-resolution cameras. Another interesting use is infrared cameras mounted on drones scanning from above.

Innehållsförteckning

1. Inledning 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Syfte & mål 1
1.3 Problemformulering/frågeställningar 1
1.4 Metod 2
1.5 Målgrupp 4
1.6 Begränsningar 4
1.7 Avgränsningar 4
2. Teori 5
2.1 Strålning 5
2.2 IR-teknik 6
2.3 Erfarenheter 8
2.3.1 Exempel på lyckad insats – Vindelgatan 49, Borås 8
2.4 Värmeledning 11
2.4.1 Värmeledning i betong 12
3. Konstruktioner 13
3.1 Väggar 13
3.1.1 Lockläkt på trävägg - Landshövdingehus yngre (1920-1930) 13
3.1.2 Träpanel på regelvägg - Lamellhus (1995-nutid) 13
3.1.3 Puts på lättbetong - Punkthus (1945-1950) 14
3.1.4 Fasadtegel på regelvägg 14
3.1.5 Plåt på industrivägg 15
3.1.6 Asfaltboard på regelvägg 15
3.1.7 Lockläkt på takstol – Radhus 15
3.2 Tak 16
3.2.1 Oisolerat tak med plåt 16
3.2.2 Isolerat tak med plåt 16
3.2.3 Isolerat tak med betongpannor 17
3.2.4 Oisolerat tak med betongpannor 17
4. Försök 19
4.1 Framtagande av försöksuppställning 19
4.2 Utrustning & material 21
4.2.1 Kameror 21
4.2.2 Termoelement 23

4.2.3 Brännare 24
4.3 Försöksuppställning 25
4.3.1 Detaljer i konstruktionen 29
4.3.2 Mätpunkter 31
4.3.3 Kameraplacering 32
4.4 Genomförande 33
5. Resultat 37
5.1 Temperaturkurvor enligt traditionell mätteknik 37
5.2 IR-bilder 42
6. Diskussion 49
6.1 Konstruktion 49
6.2 Försök 49
6.3 Resultat 50
6.3.1 Temperaturkurvor enligt traditionell mätteknik 50
6.3.2 IR-bilder 51
6.4 Användning 52
7. Slutsats 55
8. Förslag till framtida forskning 57
Referenser 59
Bilaga A. Konstruktionsritningar 61
Bilaga B. Tillverkning av material 67
B.1 Platt-termoelement 67
B.2 Brännare 69
Bilaga C. Simuleringar 71
C.1 CFAST 71
C.1.1 Indata till försök 5 i CFAST 72
C.2 FDS 75
C.2.1 Resultat för samtliga simuleringar i FDS 79
C.2.2 Indatafil FDS 83
Bilaga D. Mätpunkters placering 87
Bilaga E. Mätdata från försöket 91
Bilaga F. Bilder från försöket 115
Bilaga G. Kalibrering 121
Bilaga H. Programvara 125
H.1 CFAST 125

H.2 FDS 125
H.3 FLIR Tools 125

1. Inledning

Rapporten behandlar användande av infraröda kameror som fortsättningsvis benämns IR-kameror. Arbetet är en del av ett samarbetsprojekt som involverar Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (MSB), Södra Älvsborgs Räddningstjänstförbund (SÄRF) och Brandteknik på Lunds Tekniska Högskola (LTH). Vidare har Viskastrandsgymnasiet och kameratillverkaren FLIR genom företaget KIMO involverats. Ett stort försök har genomförts på övningsfältet Guttasjön som drivs av SÄRF och är beläget strax söder om Borås.

1.1 Bakgrund

Användningsområdet för IR-kameror inom räddningstjänsten har breddats under senare år. Under en längre tid har kamerorna använts av rökdykande brandmän för att söka efter personer i rökfyllda utrymmen, hitta glödbränder i konstruktioner med mera. De områden där användningen av IR-teknik har ökat inkluderar scanning från utsidan av byggnader för att ge underlag åt räddningsledare vid beslutstagande och utvärdering av genomförda släckinsatser. Kunskapen kring användandet av IR-tekniken är väldigt varierad och dåligt dokumenterad varför ett behov av mer forskning har identifierats inom området. Eftersom emissionsförmågan varierar kraftigt mellan material (Lide, 2005) blir bilden i kameran svårtolkad då två olika material med samma temperatur kan generera olika bilder. En annan påverkande faktor vid användandet av IR-kameror är materialens termiska tröghet som påverkar den tid det tar för en värmevåg att ta sig igenom ett material.

1.2 Syfte & mål

Målet med arbetet är att öka kunskapen och ge råd för hur en brand i byggnad bör tolkas med hjälp av IR-teknik. Råden ska innehålla felkällor som påverkar temperaturen en IR-kamera avläser. Arbetet ska även kvantifiera tiden det tar för värmen att gå genom ett antal typiska konstruktioner som utsätts för en brand på ena sidan. Det är även av intresse att dokumentera genomföringar och svagheters strålningsbeteende vid brand. Ett viktigt syfte med arbetet är att insamla rådata som kan användas i andra projekt.

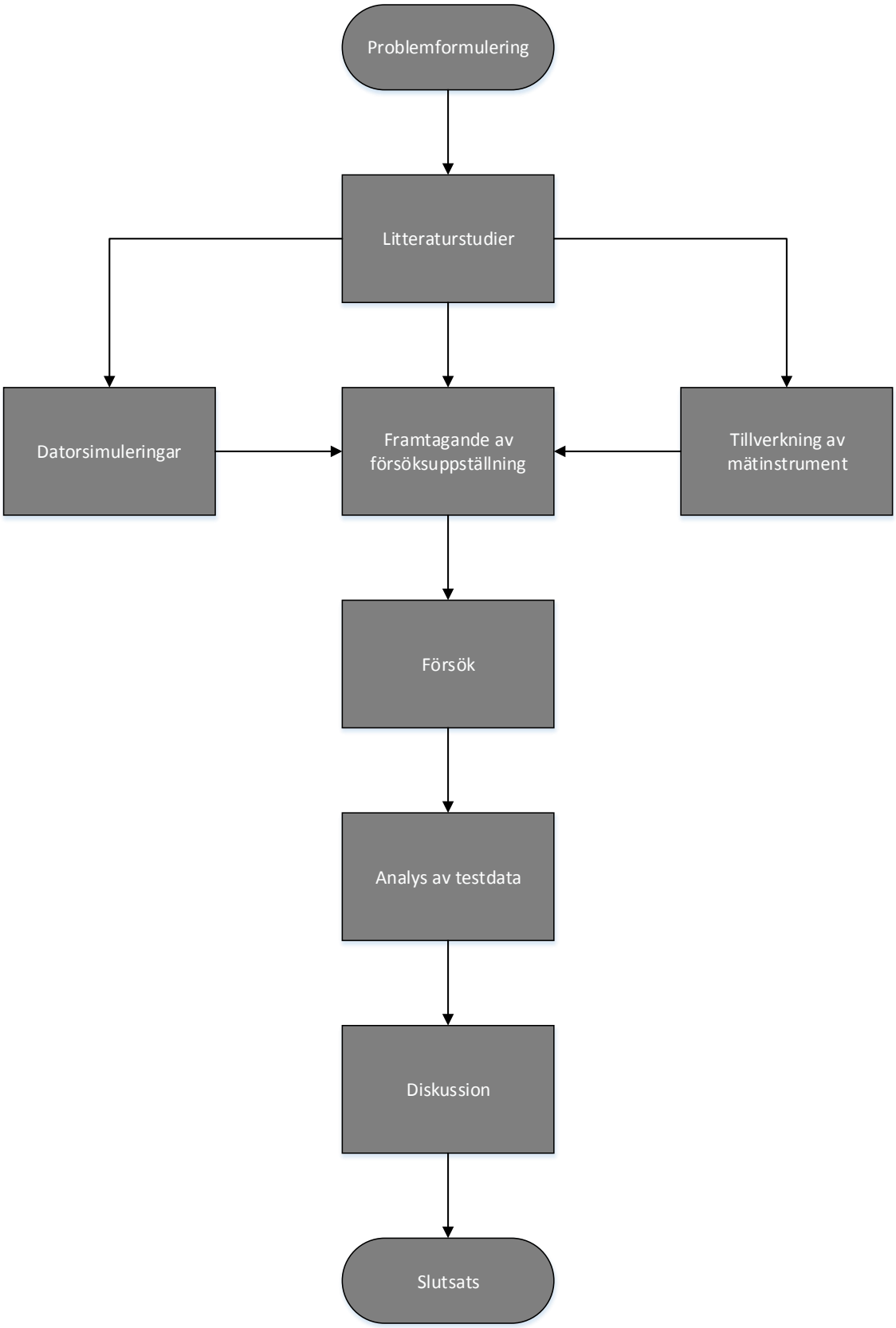
1.3 Problemformulering/frågeställningar

De frågeställningar som ligger till grund för arbetet är:

- Hur skiljer sig temperaturen som mäts upp med mätinstrument med den som IR-kameran visar?
- Hur skiljer sig olika materials förmåga att stråla inom det infraröda våglängdsområdet vid brand?
- Hur lång tid tar det för en IR-kamera att upptäcka en brand på andra sidan av en yttervägg/tak?
- Hur beter sig ventilationsöppningar vid brand?
- Går det att mäta skillnader i temperatur för olika nivåer i brandrummet med hjälp av IR-kamera?
- Kan konkreta råd upprättas för hur en byggnad bör scannas vid brand?

1.4 Metod

En översikt över arbetsgången visas i figur 1. Ett antal lämpliga frågeställningar sätts upp som genom litteraturstudier och ett större försök ska besvaras. Genom litteraturstudier väljs ett antal intressanta och tidstypiska vägg- och takkonstruktioner ut som sedan ska ingå i testet. En plan för hur försöket ska ske samt hur försöksuppställningen ska se ut genomförs samtidigt som mätinstrument tillverkas, datorsimuleringar utförs och konstruktionsritningar utformas. Simuleringarna som görs i CFAST och FDS genomförs för att bestämma hur stor effekt som ska användas och hur stor öppning för tilluft som krävs i byggnaden. Under försöken studeras de olika konstruktionerna med konventionella termoelement, platt-termoelement och IR-kameror. Författarna ansvarar för termoelementen medan IR-kamerorna sköts av fotograf. Informationen som samlas in under försöken analyseras sedan för att besvara de befintliga frågeställningarna. Med hjälp av analysen diskuteras resultaten för att sedan mynna ut i en slutsats.



Figur 1. Översikt av arbetsgången.

1.5 Målgrupp

Rapporten riktar sig främst till personal inom räddningstjänsten, såväl operativ som inom förebyggande avdelningar. Arbetet innehåller mycket data som förhoppningsvis kan hjälpa till att utveckla räddningstjänstens kunskaper inom användandet av IR-kameror i tjänst.

1.6 Begränsningar

Antalet försök begränsades till ett enda eftersom kostnad och tidsåtgång för att uppföra tak och väggar är för stor för att kunna upprepa försöket för verifiering av resultat. Bränslet som används är gasol vilket medför att en normal släckning inte går att genomföra och utvärderas i IR-kamerorna.

1.7 Avgränsningar

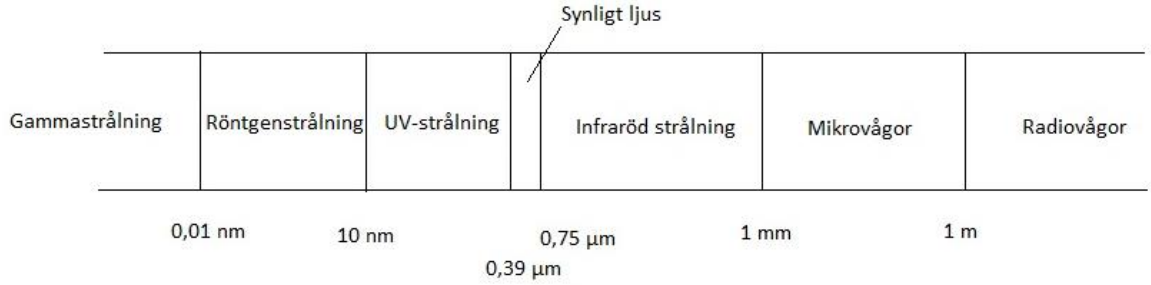
Konstruktionen förses inte med ett bjälklag och försöken ger därför inte någon ny kunskap kring brandspridning till vind. Konstruktionen förses inte heller med dörrar och fönster och därför behandlas inte dessa. Försöket kommer ge väldigt mycket data i form av IR-bilder, temperaturmätningar och videofilmer. Allt material kommer inte analyseras i detalj i denna rapport.

2. Teori

År 1800 upptäckte en astronom vid namn Sir William Herschel att temperaturen i ett spektrum, skapat av ett prisma i solljus, ökade när han mätte temperaturen från violett till röd. Han upptäckte även att temperaturen ökade när han gick förbi det sista synliga ljuset. Herschel visade att det finns någon form av relation mellan temperatur och våglängd. Energin som upptäcktes efter den synliga regionen kom att kallas för Infraröd. Under 1830-talet blev det känt att infraröd strålning emitteras från alla kroppar i form av värmestrålning (Schlessinger, 1995).

2.1 Strålning

Det infraröda våglängdsområdet sträcker sig från ungefär 0.75µm till 1 mm vilket är mellan rött ljus och mikrovågsområdet, se figur 2 (Nordling, 2014).



Figur 2. Våglängdsområden för elektromagnetisk strålning.

Alla föremål med en temperatur över den absoluta nollpunkten avger infraröd strålning. Denna strålning är en kombination av strålning som strålas från objektet själv, strålning som reflekteras i objektet samt eventuell strålning som transmitteras genom objektet. Summan av dessa tre blir alltid 1 (Schlessinger, 1995).

$$\rho + \tau + \varepsilon = 1 \qquad \text{Ekvation 1}$$

Där $\rho\,[-]$ är reflektionsförmåga, $\tau\,[-]$ är transmissionsförmåga och $\varepsilon\,[-]$ är emissionsförmåga.

Enligt Kirchhoffs lag är ett objekts absorptionsförmåga densamma som förmågan att emittera strålning (Schlessinger, 1995).

$$\alpha = \varepsilon \qquad \text{Ekvation 2}$$

Där $\alpha\,[-]$ är ett objekts absorptionsförmåga.

Detta innebär att ett föremål som har bra reflektionsförmåga emitterar lite strålning (Hyll, 2012).

Den totala strålningsenergin som emitteras från en kropp kan beskrivas med Stefan Boltzmanns ekvation.

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \qquad \text{Ekvation 3.}$$

Där E är den totala energin $[kW/m^2]$, ε [-] är emissionsfaktorn, σ $[W/m^2K^4]$ är Stefan Boltzmanns konstant och T [K] är temperaturen. Emissionsfaktorn är ett enhetslöst mått mellan 0 och 1 som visar hur effektivt en yta emitterar strålning där värdet 1 innebär svartkroppsstrålning. Emissiviteten förändras med bland annat olika material, ytstruktur,

våglängd och temperatur (Drysdale, 2011). I tabell 1 visas ett antal olika värden på den totala emissiviteten för några material vid olika temperatur.

Tabell 1. Emissivitet för olika material vid angivna temperaturer.

Yta	Temperatur (˚C)	Emissivitet
Polerat rostfritt stål	100	0,07
Polerat stål	425-1025	0,14–0,38
Polerat gjutjärn	200	0,21
Obehandlad stålplatta	38-370	0,94–0,97
Asbestskiva	24	0,96
Obehandlat rött tegel	20	0,93
Glaserat tegel	1100	0,75
Eldfast tegel	1000	0,75
Betongkakel	1000	0,63
Puts	10-90	0,91
Hyvlad ek	20	0,90

(Drysdale, 2011)

En IR-kamera mäter ofta strålning inom våglängdsområdet 8-14 µm vilket brukar benämnas det långa infraröda våglängdsområdet (Amon, Bryner, Hamins, & Lock, 2008). Emissiviteten förändras beroende på våglängd och i tabell 2 nedan listas emissivitet inom IR-kamerans våglängdsområde för några material.

Tabell 2. Emissivitet för olika material inom våglängdsområdet 8-14 µm.

Material	Emissivitet
Polerat stål	0,10
Rostfritt stål	0,10–0,80
Asbest	0,95
Betong	0,95
Trä	0,90–0,95
Gips	0,80–0,95
Oxiderat gjutjärn	0,60–0,95
Obehandlat rött tegel	0,95
Polerat aluminium	0,16
Opolerat åldrat aluminium	0,81

(Raytek Corporation, 2014; Simone Kotthaus, 2014)

2.2 IR-teknik

En kamera som omvandlar IR-strålning från det objekt som avbildas till en bild på en skärm kallas för värmekamera, IR-kamera och ibland termisk kamera. I detta arbete används det mindre specifika uttrycket IR-kamera eftersom det finns fler parametrar än temperaturen som avgör vilken bild som projiceras av kamerans display. Eftersom en IR-kamera genererar en bild utifrån den IR-strålning som objekten avger istället för synligt ljus som människans öga normalt uppfattar kan man med IR-kameror se saker som vi normalt inte kan uppfatta. Användningsområdena för IR-kameror har breddats med åren och fler uppkommer ständigt. Ett viktigt användningsområde som funnits länge är inspektion av värmeisolering i byggnader där lokala brister kan identifieras. Inspektion av elledningar är ett annat område med stor användning där extra varma punkter kan identifieras. En varm punkt kan tyda på att ett ökat motstånd finns som i längden kan leda till att utrustning fallerar (Huda & Taib, 2012). Inom medicinen uppkommer också fler användningsområden kontinuerligt. Ofta grundar sig

metodiken i att cirkulationsrubbningar uppstår nära huden till följd av sjukdom som påverkar hudens temperatur (Öhman, 2014).

Majoriteten av all värmeöverföring genom strålning sker inom det infraröda våglängdsområdet. Detta gör IR-kameror till ett bra instrument för mätning av temperatur eftersom värmestrålningen ökar med temperaturen enligt ekvation 3.

Emissionsfaktorn en IR-kamera använder sig av vid avläsning kan ges olika värden. Eftersom det är svårt att veta vilken emissionsfaktor ett objekt har bör inte IR-kameror användas för att bestämma en exakt temperatur på ett objekt. Ett standardvärde på emissionsfaktorn som IR-kameror ofta ges är 0,95 men eftersom det verkliga värdet skiljer sig för olika objekt så blir inte kamerans avläsning av temperaturen helt korrekt. Två olika objekt som egentligen har olika temperatur kan ges samma temperatur av kameran om emissivitet och reflektionsvärden skiljer sig åt. (Amon, Bryner, Hamins, & Lock, 2008).

Det är lättare att uppmärksamma temperaturvariationer *inom* ett objekt som består av samma material, eftersom emissionsförmågan kan förväntas vara likartad inom objektet, än variation *mellan* olika objekt.

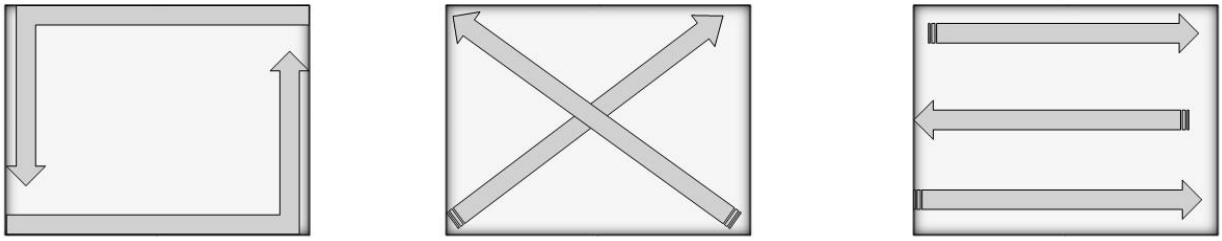
Ju högre reflektionsförmåga ett material har desto lägre emissionsförmåga har det enligt ekvation 1. En tumregel som ofta stämmer är att ett blankt material, som har hög reflektionsförmåga och låg emissionsförmåga, troligtvis förefaller kallare än vad det egentligen är (Amon, Bryner, Hamins, & Lock, 2008). Detta är dock en förenkling av det verkliga förhållandet och stämmer inte alltid eftersom det finns fler parametrar som avgör hur mycket strålning som infaller mot kamerans lins och hur kameran omvandlar detta till en temperatur. Om en noggrann temperatur vill mätas med en IR-kamera är de två viktigaste parametrarna som måste ställas in emissivitet och skenbar reflekterad temperatur. Skenbar reflekterad temperatur kallas även bakgrundsstrålning och den påverkas bland annat av hur mycket himmel som reflekteras i objektet som avläses samt om solen är närvarande (FLIR, 2008). Dessa parametrar ställs noggrant in vid viss termografering men är inte aktuellt för användning inom räddningstjänsten.

IR-kameror för användning inom brandbekämpning är ofta utformade så att de endast avläser strålning i våglängdsområdet 8-14 µm istället för hela det infraröda våglängdsområdet. En av anledningarna till detta är att kolmonoxid, koldioxid och vattenånga har hög transmittans i detta våglängdsområde. Det gör att dessa gaser inte skymmer sikten mot bakomliggande föremål i samma utsträckning (Amon, Bryner, Hamins, & Lock, 2008).

De flesta IR-kameror går att ställa in så att displayen visar antingen gråskala, färg eller en kombination av de båda för att underlätta för användaren att lokalisera heta områden. Det går även att importera data från en IR-kamera så att det går att analysera insatser i efterhand. Med hjälp av datorprogram, exempelvis FLIR Tools, går det att redigera parametrar som emissivitet för att analysera dess påverkan av bilden (FLIR, 2014)

2.3 Erfarenheter

Användning av IR-kamera inom räddningstjänsten har främst använts av rökdykande enheter för att upptäcka folk i rökfyllda utrymmen. På senare år har användningsområdena utökats till att bland annat innefatta personal som scannar en byggnad vid brand för att underlätta beslutsfattande. Idag används tre huvudsakliga tekniker när en byggnad scannas i fält; att scanna en ram, ett kryss eller med pensling, se figur 3 (Lindström, Appel, Palmkvist, & Bialas, 2013). Det vanligaste vid en insats är att leta efter svagheter i konstruktioner vid scanning som exempelvis ventilation, anslutningar och övriga läckage eftersom det är här värmevågen går igenom konstruktionen först (Palmkvist, 2014).



Figur 3. Tre olika sätt att scanna en byggnad; scanna en ram, scanna ett kryss och pensling.

Informationen som erhålls från en IR-kamera ger ett beslutstöd under insats. Exempel på information som kan erhållas är om branden är ventilations- eller bränslekontrollerad, brandens spridningsmönster och om släckningen har haft önskad effekt (Lindström, Appel, Palmkvist, & Bialas, 2013).

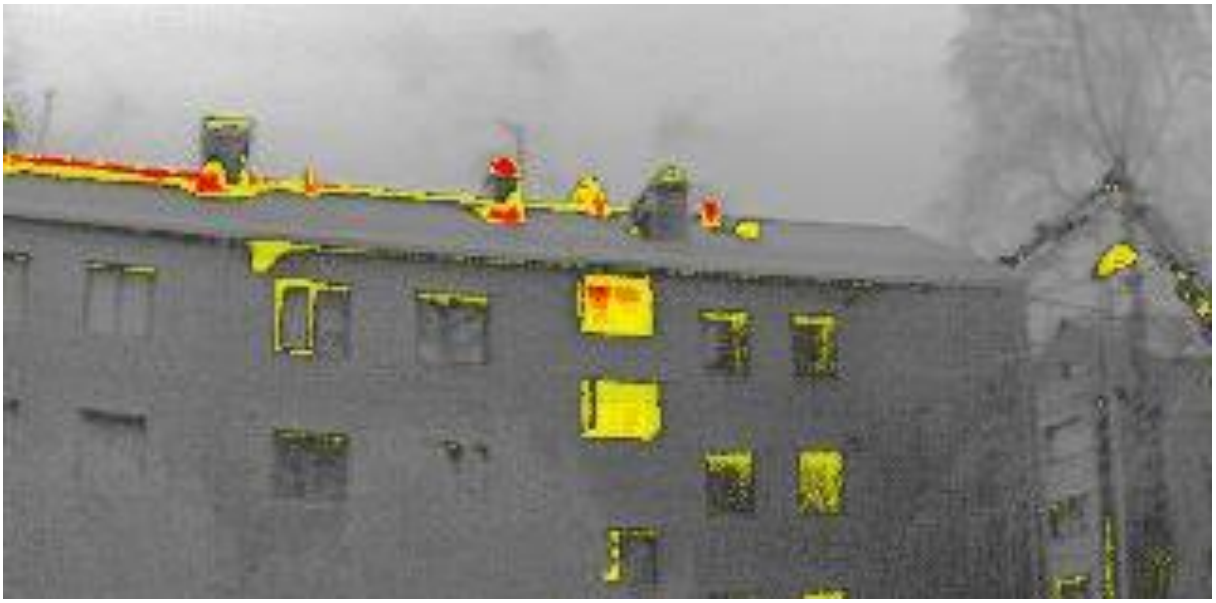
Ett arbetssätt vid insats mot brand i medelstor tillsluten lokal som används av Södra Älvsborgs Räddningstjänstsförbund (SÄRF) är att först använda scanning av byggnad för att se var det är hetast och lämpligt att använda skärsläckare. När skärsläckaren har kylt och inerterat brandgaserna används IR-kameran återigen för att se om det finns några temperaturförändringar. När temperaturen är tillräckligt låg för att möjliggöra en invändig insats används övertrycksventilering för att få bort brandgaser så att personal kan gå in i byggnaden med en förbättrad arbetsmiljö (Södra Älvsborgs Räddningstjänstförbund - SÄRF, 2010).

2.3.1 Exempel på lyckad insats – Vindelgatan 49, Borås

I april 2010 inkommer larm om rökutveckling i flerfamiljshus på Vindelgatan. Vid framkomst observeras rök utströmmandes ur ventilation på vindsvåningens gavel i takhöjd. Rök observeras även i trapphuset, se figur 4.

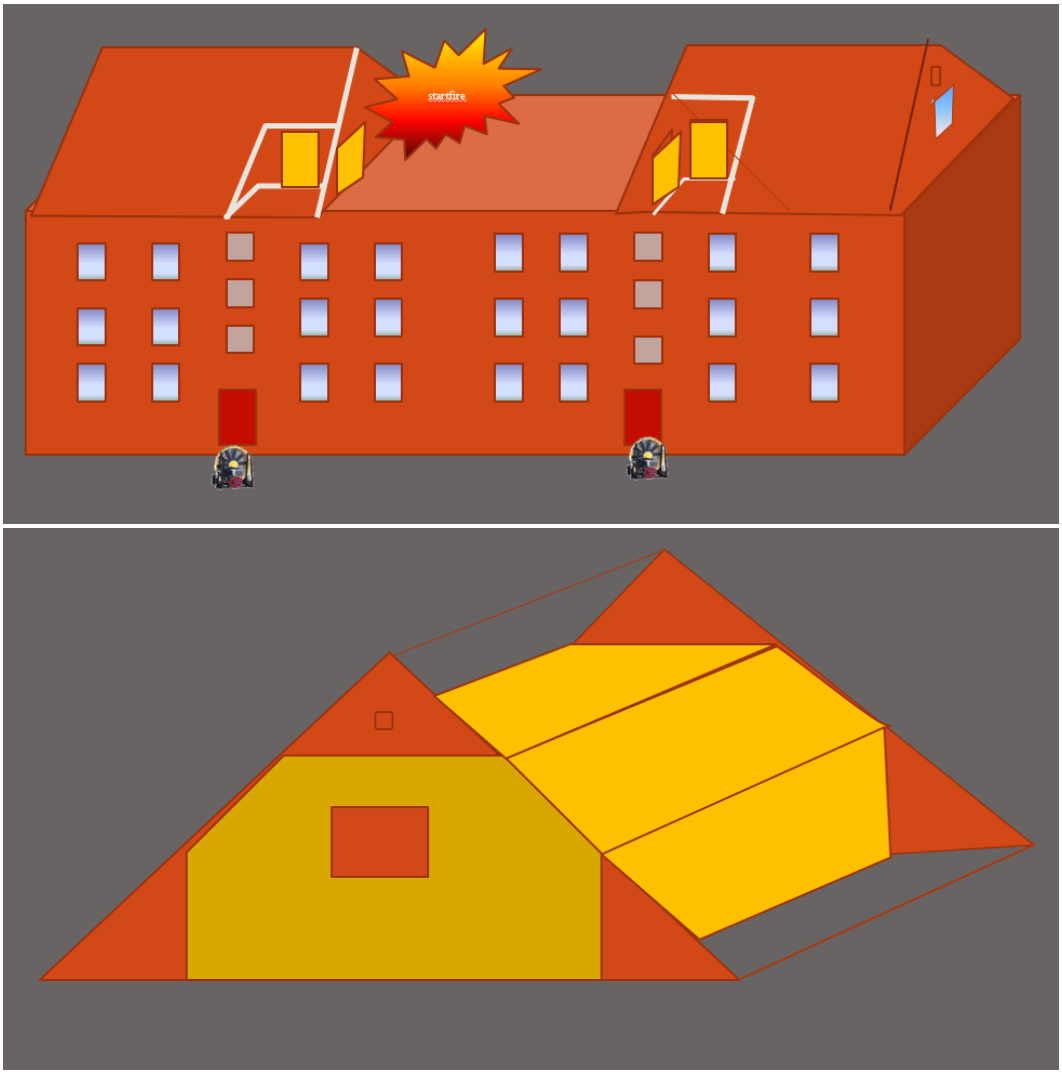
Figur 4. Ventilationsöppning där utströmmande rök först observerades till vänster och trappuppgång till höger (foto SÄRF, används med tillstånd).

I fönstret under ventilationen på den inredda vindsvåningen befinner sig en person som innebär att första insatsen blir att med hjälp av stegbil lyfta ner denna person. Under tiden scannas byggnaden av insatsledare med IR-kamera. Det som observeras med blotta ögat antyder att branden pågår nära gaveln där det strömmar ut brandgaser. I IR-kameran syns däremot att det varmaste området är beläget i husets mittparti, se figur 5.



Figur 5. Byggnaden visualiserad i IR-kameran. Heta rödfärgade partier syns på husets mitt men inte där stegbilen livräddar på husets gavel vid de utströmmande brandgaserna (foto SÄRF, används med tillstånd).

Insats med skärsläckare koncentreras därför till detta område samtidigt som fläktar används för övertryckssättning av trapphusen i mittpartiet på huset i anslutning till den varma vindsdelen. När temperaturen sjunkit tillräckligt till följd av skärsläckarinsatsen går rökdykare in och genomför invändig släckning. Det visar sig att vindsvåningen består av en förrådsdel i mittenpartiet där branden startat och två inredda lägenheter på var sida med en mindre vindsdel ovanpå, se figur 6.



Figur 6. Vindsvåningens utformning (illustration SÄRF, används med tillstånd).

De inredda vindsvåningarna blev minimalt rökskadade samtidigt som vattenskadorna var försumbara. Röken som strömmade ut vid gaveln hade gått via vindsdelen ovanpå lägenheterna. Utrymmet där branden startat blev desto mer påverkat, se figur 7.

Figur 7. Skador av branden i startutrymmet (foto SÄRF, används med tillstånd).

Med hjälp av IR-kamera bedömdes branden vara ventilationskontrollerad eftersom bilden i IR-kameran antydde brandgastemperaturer kring 500-600 ˚C samt avsaknad av synliga lågor. Detta gjorde att branden bekämpades utan att öppna upp för syretillförsel genom att använda skärsläckaren. Utan IR-kameran hade kanske insatsen först satts in i vindslägenheten vilket eventuellt hade utsatt räddningstjänst och boende för onödiga faror samt att branden kunnat sprida sig. Även om branden inte spridit sig så hade stora vattenskador på grund av släckvatten kunnat uppstå till ingen nytta (Palmkvist, 2014).

2.4 Värmeledning

Värmeledning är den värmetransport som sker genom en fast kropp och styrs av temperaturdifferenser. Endimensionellt kan ett värmeflöde genom en kropp beskrivas genom Fouriers lag.

$$\dot{q}_x^{"} = -k(\frac{\Delta T}{\Delta x}) \qquad \text{Ekvation 4.}$$

Där $\dot{q}_x^{"}$ är värmeflödet [W/m^2] i riktningen x, ΔT [K] är temperaturdifferensen över avståndet Δx [m] och k är värmekonduktivitet [W/m K] (Drysdale, 2011).

När material värms används den allmänna värmeledningsekvationen för att beräkna exempelvis vilken tid det tar för en temperatur att uppstå på ett visst avstånd från ytan.

$$\left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2}\right) = \left(\frac{1\delta T}{\alpha \delta t}\right) \qquad \text{Ekvation 5.}$$

Där T [K] är temperatur, x [m] är materialets tjocklek, t [s] är tid och α [m^2/s] är värmediffusivitet (k/cρ) (Wickström, 2012).

Ett materials termiska tröghet beror av dess värde på kρc och har enheten W^2s/m^4K^2 (Klason & Johansson, 2011). Denna variabel benämns ibland värmeinträngningskoefficient. Ett antal typiska kρc-värden redovisas i tabell 3. Ett lägre värde på kρc innebär att det tar längre tid för värme att ta sig igenom ett material. I praktiken finns fler parametrar som spelar roll för temperaturen på utsidan av exempelvis en vägg så som avkylning genom konvektion.

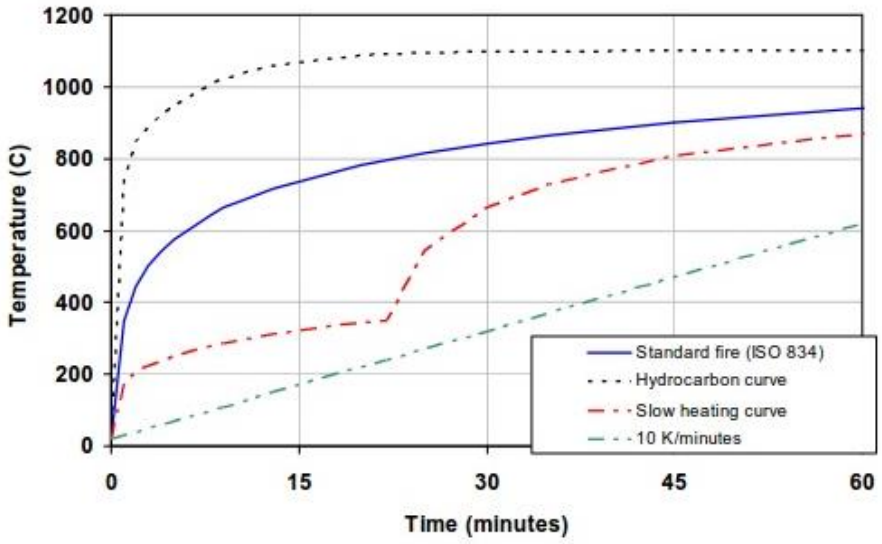
Tabell 3. kρc-värden för några olika material.

Material	**kρc [W^2s/m^4K^2]**
Koppar	$1{,}3 \cdot 10^9$
Stål	$1{,}6 \cdot 10^8$
Betong	$2{,}0 \cdot 10^6$
Tegel	$9{,}3 \cdot 10^5$
Gipsskiva	$5{,}8 \cdot 10^5$
Ek	$3{,}2 \cdot 10^5$
Lättbetong	$7{,}5 \cdot 10^4$
Mineralull, plattor	$3{,}3 \cdot 10^3$

(Drysdale, 2011; Karlsson & Quintiere, 2000)

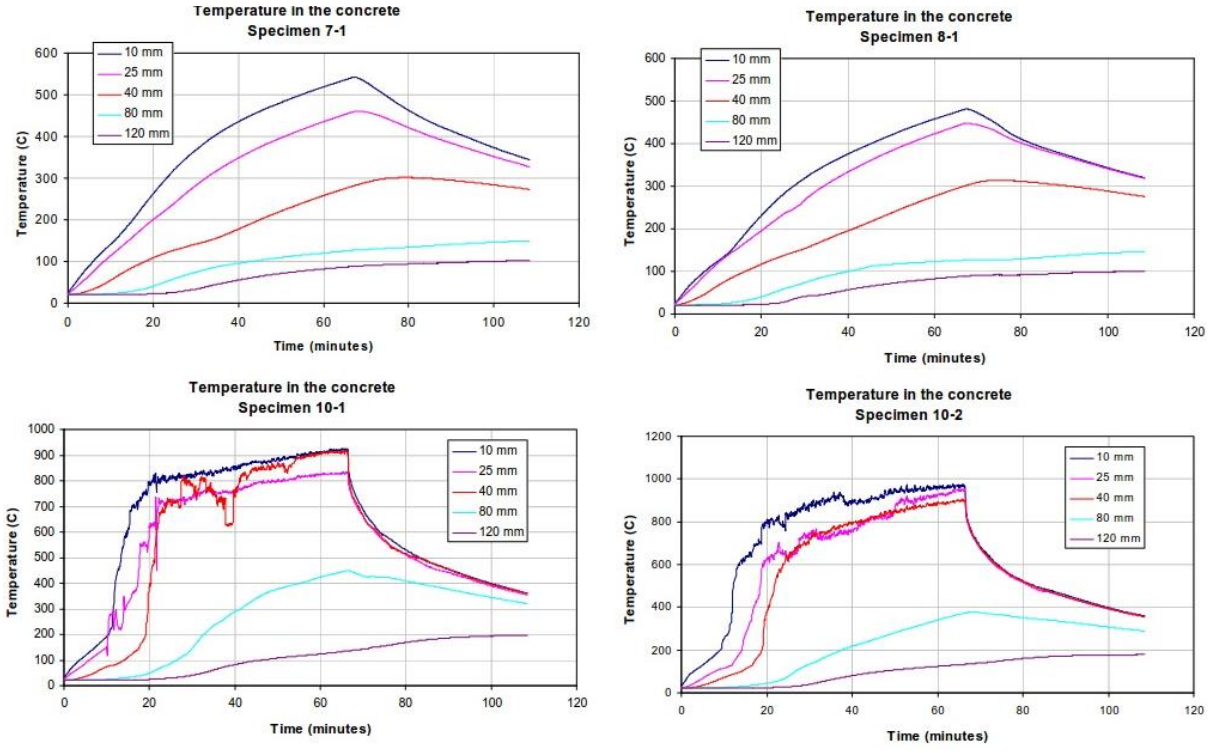
2.4.1 Värmeledning i betong

Då betong inte ingår i försöket på Guttasjön används istället värden från försök utförda av SP för att kunna dra slutsatser kring materialet. I försöken från SP testades betongelement i brandugn och utsattes för värme bland annat motsvarande ISO 834-kurvan, se figur 8. Temperaturen i elementen mättes på fem olika djup i ett antal betongelement med varierande innehåll. För mer läsning om hur testet gick till hänvisas till SP:s rapport *Self Compacting-Concrete Exposed to Fire* (Boström & Jansson, 2008).



Figur 8. De brandkurvor som användes under SP:s försök (Boström & Jansson, 2008) tagen med tillstånd från Lars Boström, SP.

I figur 9 redovisas resultaten från fyra av SP:s tester. Dessa fyra tester var samtliga utsatta för värmepåverkan motsvarande ISO 834-kurvan.



Figur 9. Temperaturer för olika djup i betongelementen som utsatts för värmepåverkan enligt ISO 834-kruvan (Boström & Jansson, 2008). Taget med tillstånd från Lars Boström, SP.

3. Konstruktioner

Till försöket valdes sju olika väggkonstruktioner och fyra takkonstruktioner ut. Dessa valdes ut i syfte att få med de byggnadskonstruktioner som är vanliga i Sverige idag samt även få med ett par med avvikande strålningsegenskaper som är intressanta att jämföra med övriga väggar och IR-kamerans bild. När konstruktionerna valdes ut användes främst boken *Så byggdes husen 1880-2000* (Björk, Kallstenius, & Reppen, 2008) för att studera hur de olika lagren i väggar och tak är uppbyggda. För exakta ritningar över de olika konstruktionernas uppbyggnad se bilaga A. Nedan redovisas vilka olika lager som bygger upp de väggar och tak som ingår i försöket.

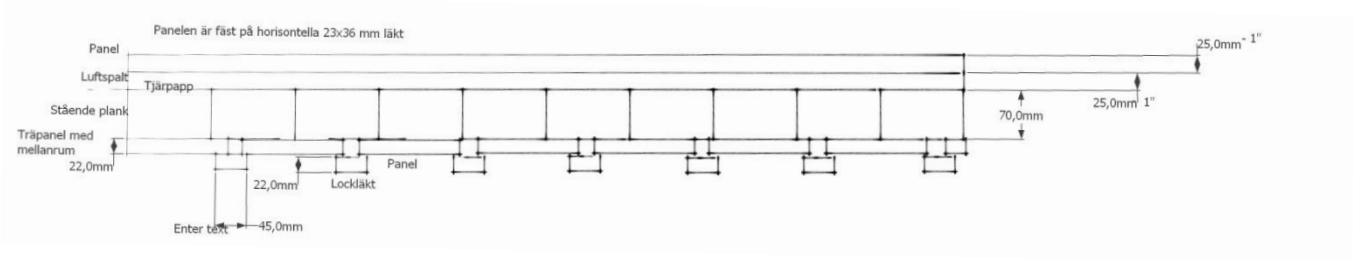
I försöket finns inte något bjälklag. Betongbjälklag behandlas utifrån försök gjorda av SP i kapitel 2.4.1.

3.1 Väggar

Nedan presenteras de väggkonstruktioner som valdes och motiveras.

3.1.1 Lockläkt på trävägg - Landshövdingehus yngre (1920-1930)

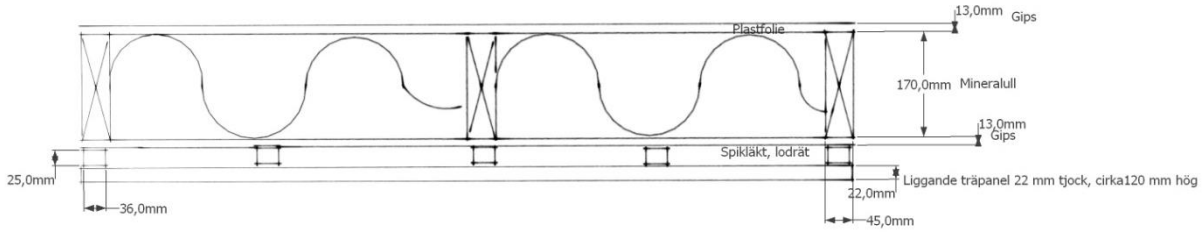
Denna vägg är uppbyggd av stående massivt plank med lockläkt utanpå och en panel invändigt. Det är en intressant och enkel konstruktion som fortfarande är vanlig eftersom många hus är bevarade, framför allt i Göteborg. Landshövdingehus har vanligtvis en bottenvåning anlagd i sten medan våningarna ovanför är uppförda med denna typ av vägg. De olika lager som bygger upp väggen åskådliggörs i figur 10 nedan.



Figur 10. Olika lager för vägg nummer 1. Lockläkt på trävägg.

3.1.2 Träpanel på regelvägg - Lamellhus (1995-nutid)

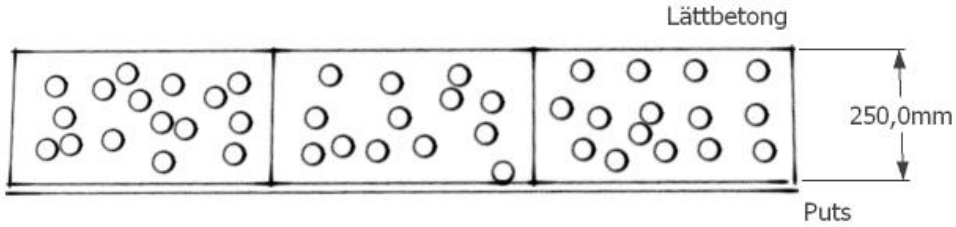
Den bärande delen består av en regelkonstruktion som är beklädd med träpanel utvändigt och gips invändigt. Eftersom den har trä som fasadmaterial likt föregående vägg men i övrigt är uppbyggd på ett annorlunda sätt med ett tjockt lager isolering är dessa båda väggar intressanta att jämföra. Denna vägg är typisk för nybyggda hus där den nedersta och översta våningen ofta är klädda med liggande träpanel. I figur 11 åskådliggörs de lager som ingår i väggen.



Figur 11. Olika lager för vägg nummer 2. Träpanel på regelvägg.

3.1.3 Puts på lättbetong - Punkthus (1945-1950)

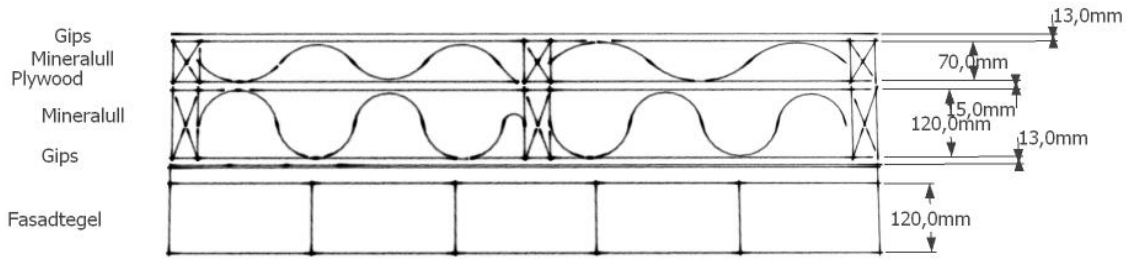
Denna vägg består av fogade lättbetongblock som försetts med puts utvändigt. Under bostadsbristen på 40- och 50-talet byggdes många hus med lättbetong som material. Eftersom lättbetongen är porös ansågs den ha tillräckligt bra isolerande egenskaper varför det inte tillfördes ytterligare isolering (Johansson, 2008). Figur 12 visar lättbetongväggen med ytputs.



Figur 12. Olika lager för vägg nummer 3. Puts på lättbetong.

3.1.4 Fasadtegel på regelvägg

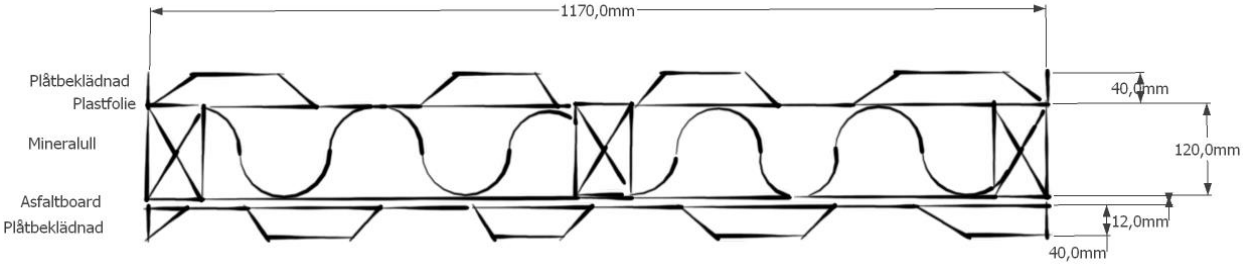
Detta är en konstruktion med två olika regelverk som utvändigt är beklädd med fasadtegel och gips invändigt. Väggen skulle egentligen bestå av tre olika lager isolering där det yttre lagret skulle bestå av puts på hård isolering. Vid byggnationen förväxlades väggen med vägg nummer 6 varför fasadteglet hamnade på denna vägg. Figur 13 visar hur väggen ser ut. Tegel är det vanligaste fasadmaterialet tillsammans med puts på flerbostadshus (Boverket, 2009) och är även vanligt på radhus vilket gör denna vägg intressant att ha med i experimentet. Tegelväggen försågs med en ventilationsöppning och sex stycken ”vända stenar” för att skapa värmeläckage och djup i muren eftersom dessa detaljer är intressanta att studera med hjälp av IR-kamera, se bilaga A.



Figur 13. Olika lager för vägg nummer 4. Fasadtegel på regelvägg.

3.1.5 Plåt på industrivägg

Denna vägg byggs upp av en regelstomme av trä av praktiska skäl trots att reglarna normalt är av plåt. Många industrier har likartade enkla typer av väggar med plåt som ytmaterial på båda sidor och en isoleringsskiva i mitten, se figur 14. Eftersom metall generellt har hög reflektionsförmåga och därmed lägre emissionsfaktor valdes denna vägg ut för test.



Figur 14. Olika lager för vägg nummer 5. Plåt på industrivägg.

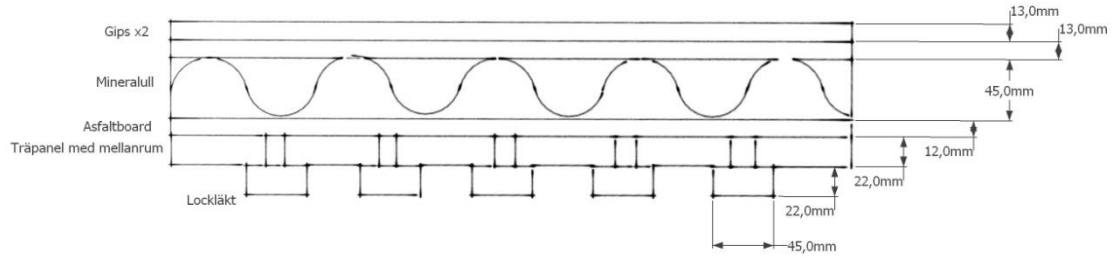
3.1.6 Asfaltboard på regelvägg

Denna vägg har en bärande regelstomme med asfaltboard utvändigt och gips invändigt, se figur 15. Väggen var tänkt att förses med fasadtegel men vid byggnationen hamnade denna istället framför vägg nummer 4.

Figur 15. Olika lager för vägg nummer 6. Regelvägg med asfaltboard.

3.1.7 Lockläkt på takstol – Radhus

Denna vägg bärs upp av en takstol med lockläkt utvändigt och gips invändigt. Den väljs för att efterlikna en vanlig och enkel gavelvägg på ett radhus, se figur 16.



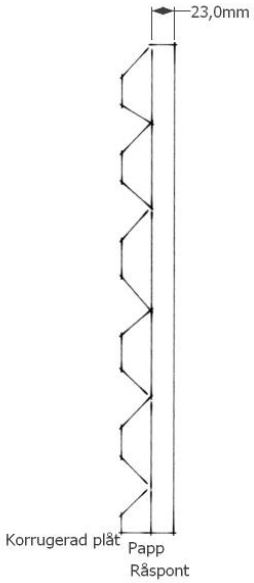
Figur 16. Olika lager för gavelvägg från utbyggnaden.

3.2 Tak

Nedan presenteras de olika takkonstruktioner som ingick i testet. Ytbeklädnaderna plåt och betongpannor valdes i isolerat och oisolerat utförande eftersom de täcker in en stor del av byggnadsbeståndet i Sverige (Boverket, 2009).

3.2.1 Oisolerat tak med plåt

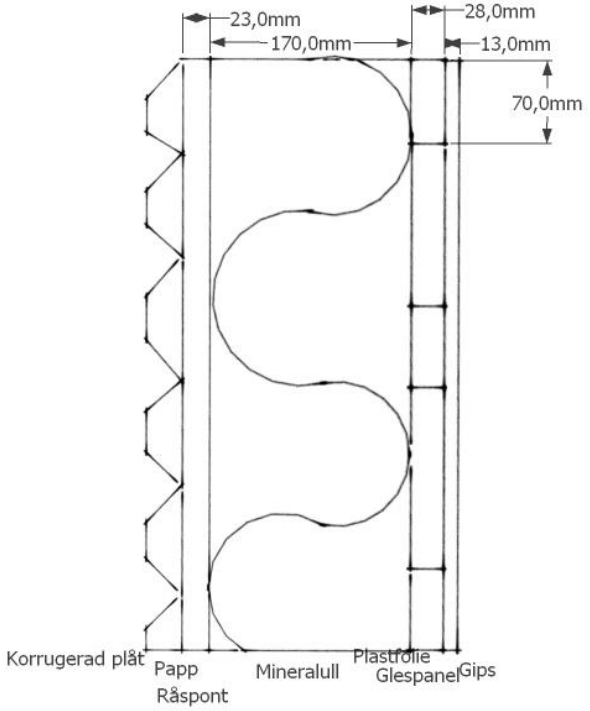
I figur 17 visas plåttaket utan isolering.



Figur 17. Olika lager för tak nummer 1. Oisolerat tak med plåt.

3.2.2 Isolerat tak med plåt

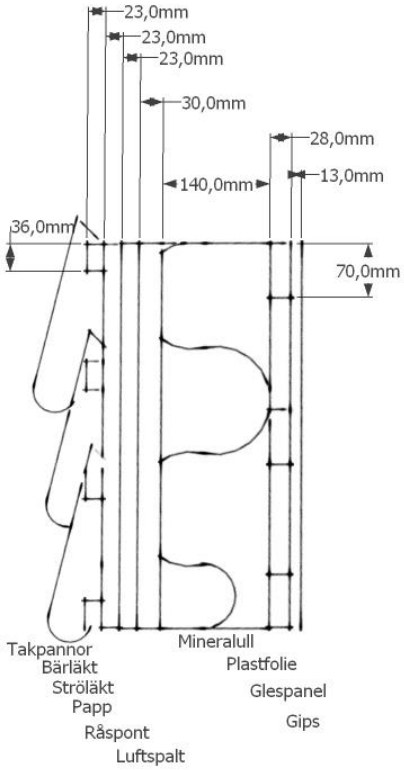
Den isolerade delen med plåtbeläggning visas i figur 18.



Figur 18. Olika lager för tak nummer 2. Isolerat tak med plåt.

3.2.3 Isolerat tak med betongpannor

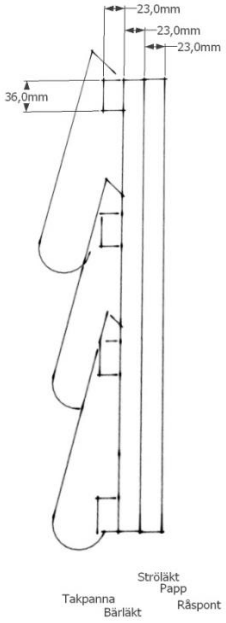
Betongpannor är den vanligaste takbeläggningen på flerbostadshus i Sverige (Boverket, 2009). Figur 19 visar hur takets lager är uppbyggt.



Figur 19. Olika lager för tak nummer 3. Isolerat tak med betongpannor.

3.2.4 Oisolerat tak med betongpannor

I figur 20 visas vilka lager som ingår i taket när isoleringen saknas.



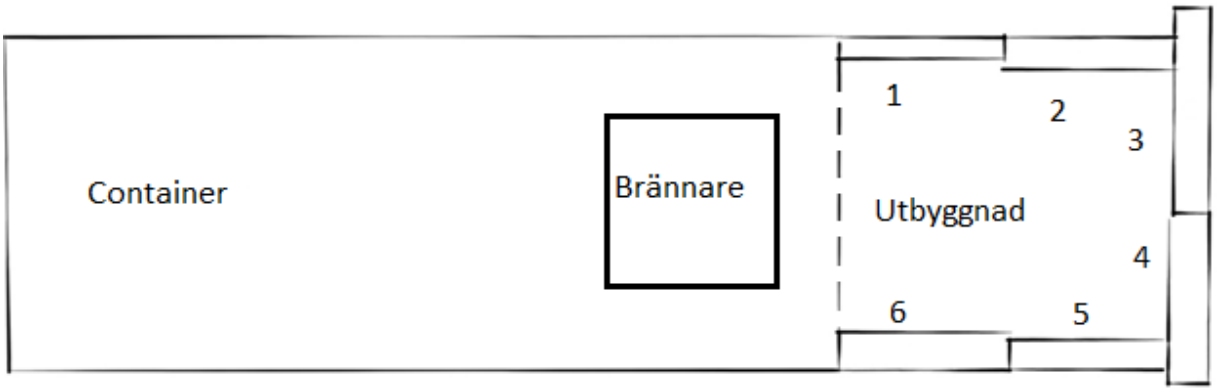
Figur 20. Olika lager för tak nummer 4. Oisolerat tak med betongpannor.

4. Försök

Detta avsnitt beskriver hur de olika byggnadsdelarna beslutades sammanfogas, vilken utrustning och material som använts samt mätpunkter och kamerors placering och omfattning. Ett antal simuleringar genomfördes också inför försöken för att bland annat besluta om öppningsstorlek, se bilaga C.

4.1 Framtagande av försöksuppställning

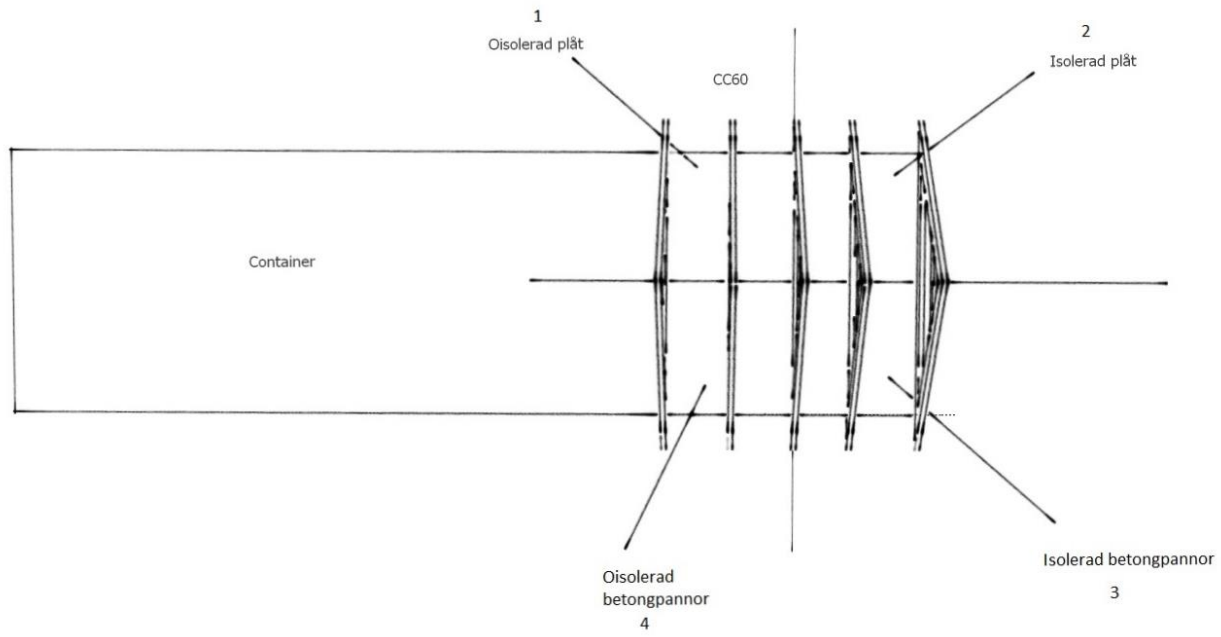
I samråd med handledarna bestämdes att konstruktionerna skulle uppföras i form av en utbyggnad ifrån den öppna änden av en container. Valet föll på en 20 fots-container i stål eftersom de fanns att tillgå på övningsanläggningen Guttasjön och var av lämplig storlek, 6.0 x 2.4 x 2.4 meter. Väggarna i utbyggnaden delades upp så att varje vägg bestod av två olika konstruktioner, figur 21 nedan. Då det befarades att konstruktionen skulle kunna brinna ner innan värmen gått genom väggarna bestämdes att brännaren skulle flyttas från utbyggnaden till containern till skillnad från de förberedande simuleringarna.



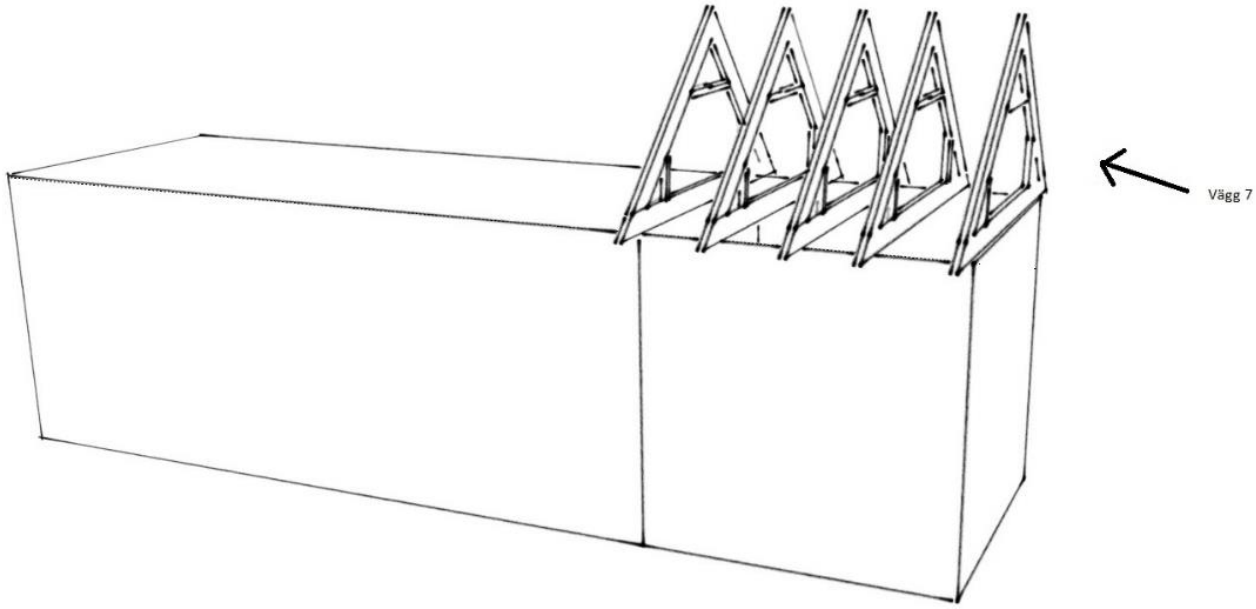
Figur 21. Väggarnas placering i förhållande till varandra, sett ovanifrån.

Ovanpå dessa sex väggar beslutades att placera ett sadeltak uppdelat i fyra olika delar, se figur 22. Sadeltak är den vanligaste takkonstruktionen på flerbostadshus i Sverige idag (Boverket, 2009). I den oisolerade delen av taket placerades en takfotsventilation bestående av en luftspalt på ungefär två centimeter. Denna luftspalt var placerad precis vid takfotens början. På det oisolerade taket fanns också ventilationshål nära taknocken. På den isolerade delen placerades ingen luftspalt i takfoten och inte heller ventilation vid taknocken.

På gaveln i motsatt ände från containern placerades vägg 7 utanpå takstolen, se figur 23. På gaveln mot containern placerades en liknande vägg som dock inte ingick i testet och inte beskrivs närmre.



Figur 22. Takindelning sett ovanifrån.



Figur 23. Principskiss på container med utbyggnad.

För att få ett scenario med kraftig värmepåverkan på de olika konstruktionsdelarna utan att få en alltför underventilerad förbränning eftersöktes en temperatur omkring 600 ˚C i brandgaslagret i slutet på testet eftersom övertändning sker kring denna temperatur. (Bengtsson, 2001). För syretillförsel beslutades en öppning uppföras i containerns motstående ände. Gasol användes som bränsle under försöket för att kunna kontrollera brandförloppet på ett lätthanterligt sätt och en särskild brännare byggdes. Ett ungefärligt massflöde gas ur brännaren behövde bestämmas och även storlek på tilluftsöppning för att inte riskera att gasen förblev oförbränd och orsakade någon form av backdraft/explosion. Gasolbrännarens utflöde låg ungefär på höjden 0,4 m och det var därför nödvändigt att kontrollera att brandgaslagret inte sjönk till denna höjd. Detta gjordes med simuleringarna i bilaga C.

4.2 Utrustning & material

Till försöken användes följande utrustning och material:

- IR-kameror
- Videokameror
- Termoelement
- Platt-termoelement
- Gasolbrännare 1.2 x 1.2 meter
- Termoelement-datalogger

Inför testet gjordes ett försök för att se om brännaren kunde leverera det tänkta gasflödet med hjälp av rotametrar som lånades av SP i Borås. För kalibrering och förberedelse se bilaga G.

4.2.1 Kameror

Under försöket användes tre stycken högupplösta IR-kameror vanligtvis avsedda för termografi som inte har med brand att göra (FLIR T-640), två IR-kameror avsedda för användning inom räddningstjänst (Dräger UCF 7000/9000) samt ett antal vanliga kameror som filmade förloppet (GoPro Hero). Förutom dessa fasta kameror användes en handhållen IR-kamera av modell FLIR E6 för att ta intressanta bilder från olika positioner kring byggnaden.

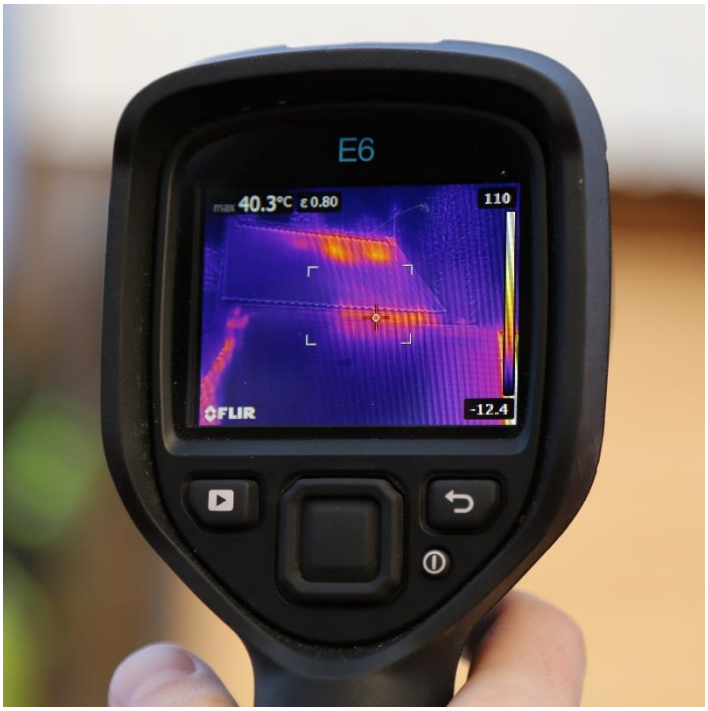
- FLIR T-640

FLIR T-640 är en högupplöst kamera med en upplösning på 640 x 480 pixlar. Kamerans spektrala område sträcker sig från 7,8 till 14 µm. I vanliga fall används dessa kameror för termografi där små temperaturskillnader behöver upptäckas som exempelvis friktionsvärme i elektronik med mera. Med hjälp av programvaran FLIR Tools går det att i efterhand ändra vissa inställningar såsom emissivitet, färgpalett samt undersöka utvalda punkter på fotograferad yta (KIMO, 2014). Under försöket var kamerorna inställda på att ta en bild var femtonde sekund. De FLIR T-640 som användes under försöket visas i figur 24.

Figur 24. Tre FLIR T-640 uppställda på stativ (foto SÄRF, används med tillstånd).

- FLIR E6

FLIR E6 är en kamera avsedd för att användas inom industrin med en upplösning på 160 x 120 pixlar. Kameran har en funktion som ger högsta och lägsta temperaturen inom ett område på displayen, se figur 25. Även bilderna från denna kamera kan redigeras i efterhand med hjälp av FLIR Tools (FLIR, 2014).



Figur 25. Den FLIR E6 som användes för att ta bilder från olika positioner. På bilden syns även den ruta där högsta och lägsta temperatur anges (foto SÄRF, används med tillstånd).

- Dräger UCF 7000/9000

Drägerkameran är utvecklad för att användas inom räddningstjänsten till att söka efter heta ytor och folk som befinner sig i brandutsatta utrymmen. Upplösningen på kameran är 160 x 120 respektive 384 x 288 pixlar och dess spektrala område 7-14 µm (Dräger, 2014). Under försöket var kamerorna inställda på att filma hela förloppet. En Dräger UCF 7000 på stativ visas i figur 26.

Figur 26. En Dräger UCF 7000 på stativ (foto SÄRF, används med tillstånd).

4.2.2 Termoelement

På utsidan av konstruktionen användes konventionella termoelement som tillverkats på LTH. Platt-termoelement användes på insidan av konstruktionen eftersom de även tar hänsyn till den strålningsvärme väggarna och taken utsattes för under testet. De består av en tunn platta av rostfritt stål som placerades någon centimeter framför mätytan för att värmas upp av strålning likt ytan de placerades längs. Baksidan av platt-termoelementen är isolerade för att inte strålningen från väggen bakom skall påverka. Platt-termoelementen som tillverkades på LTH beskrivs närmare i bilaga B. Figur 27 visar ett platt-termoelement som är uppsatt på en vägg samt konventionella termoelement uppsatta på tegelfasad. Termoelementen var uppdelade på tre temperaturloggers som har plats för 20 termoelement vardera.

Figur 27. Platt-termoelement uppsatt på en vägg samt konventionella termoelement på tegelfasad (foto SÄRF, används med tillstånd).

4.2.3 Brännare

Figur 28 visar den brännare som användes i försöket. I bilaga B beskrivs det närmre hur denna konstruerats.

Figur 28. Gasolbrännaren som användes under försöket (foto SÄRF, används med tillstånd).

4.3 Försöksuppställning

En översiktsbild på uppställningen visas i figur 29. I figur 30 visas uppställningen från andra hållet. Längst bak på containern skymtas luckan som ska garantera syretillförseln till branden. Dörren i figur 30 användes inte under försöket och var stängd.

Figur 29. Utbyggnaden sammanfogad med containern, vägg 1-4 samt tak 1-2 (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 30. Utbyggnaden sammanfogad med containern, vägg 5-6 samt tak 3-4 (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 31 visar vägg nummer 1. Lockläkt på trävägg - Landshövdingehus yngre (1920-1930) och vägg nummer 2. Träpanel på regelvägg - Lamellhus (1995-nutid). I figuren visas även tak nummer 1. Oisolerat tak med plåt samt tak nummer 2. Isolerat tak med plåt.

Figur 31. Vägg och tak 1 till höger samt vägg och tak 2 till vänster (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 32 visar vägg nummer 3. Puts på lättbetong - Punkthus (1945-1950), vägg nummer 4. Fasadtegel på regelvägg samt vägg nummer 7. Lockläkt på takstol – radhus.

Figur 32. Vägg 3 till höger och vägg 4 till vänster. Gavelvägg 7 ovanför (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 33 visar vägg nummer 5. Plåt på industrivägg och vägg nummer 6. Asfaltboard på regelvägg. I figuren visas även tak nummer 3. Isolerat tak med betongpannor samt tak nummer 4. Oisolerat tak med betongpannor.

Figur 33. Vägg 5 och tak 3 till höger samt vägg 6 och tak 4 till vänster (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 34 visar insidan av utbyggnaden där samtliga väggar och tak visas. I taket syns tydligt övergången från den oisolerade till den isolerade delen.

Figur 34. Utbyggnaden sedd inifrån (foto SÄRF, används med tillstånd).

Termoelementen på insidan drogs ut till datorloggen genom takfotsventilationen, se figur 35, på takets oisolerade del. Termoelementen på utsidan monterades genom att vira tråden runt en skruv för att hålla trådarna på plats och mätpunkten på tråden fästes mot väggarna med silvertejp för att garantera kontakt med mätytan. En datalogger placerades framför varje sida i utbyggnaden och de tre sammankopplades för att sedan kopplas ihop med en dator i ett närliggande hus där data samlades in och kunde övervakas, se figur 36.

Figur 35. Termoelementen drogs ut genom takfoten till datorloggen (foto SÄRF, används med tillstånd).

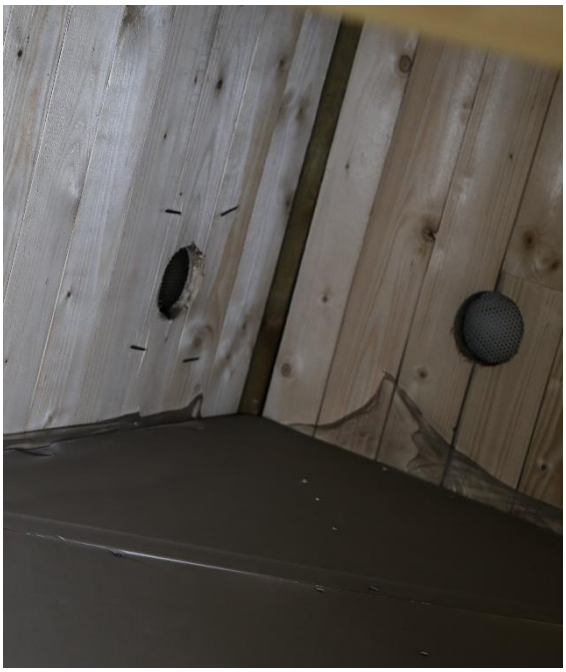
Figur 36. Dataloggers placerade i sopsäckar dit termoelementen drogs (foto SÄRF, används med tillstånd).

4.3.1 Detaljer i konstruktionen

Mellan samtliga väggar och anslutningar användes brandtålig isolering för att minimera icke önskvärda läckage, se figur 37.

Figur 37. Brandtätning mellan gavel och container (foto SÄRF, används med tillstånd).

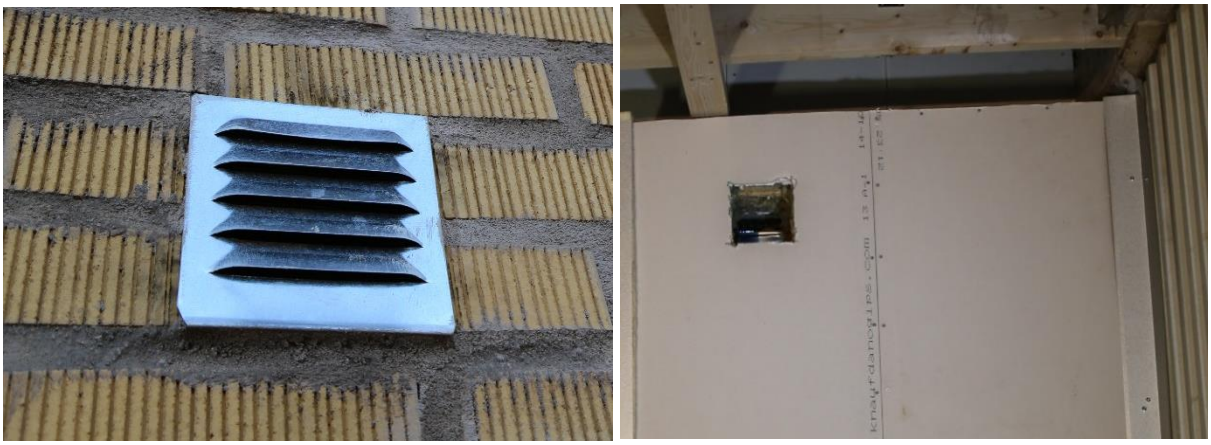
I takkonstruktionen som var oisolerad var en luftspalt placerad längs takfoten samt en ventilation högt upp på taket, se figur 38 och 39. Den isolerade delen av taket hade ventilation i konstruktionen, men denna var inte i kontakt med insidan.



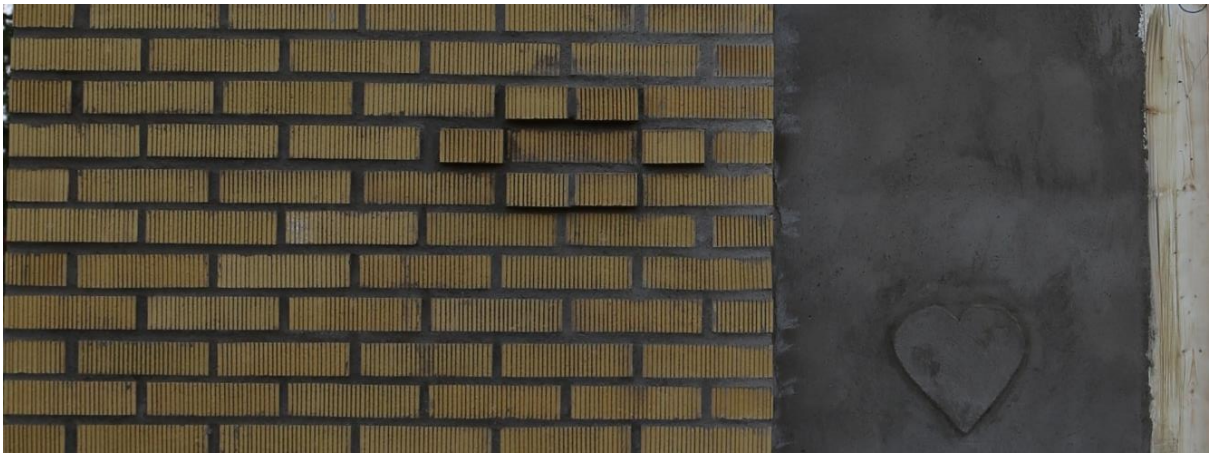
Figur 38. Ventilation i taket på den oisolerade delen av taket (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 39. Ventilationen (rödmarkerad) i takfoten på den oisolerade delen av taket (foto SÄRF, används med tillstånd).

I tegelfasaden installerades en ventilation högt upp på väggen samt ett antal vända tegelstenar, se figur 40 och 41.



Figur 40. Ventilationen i tegelväggen på utsidan och insidan (foto SÄRF, används med tillstånd).



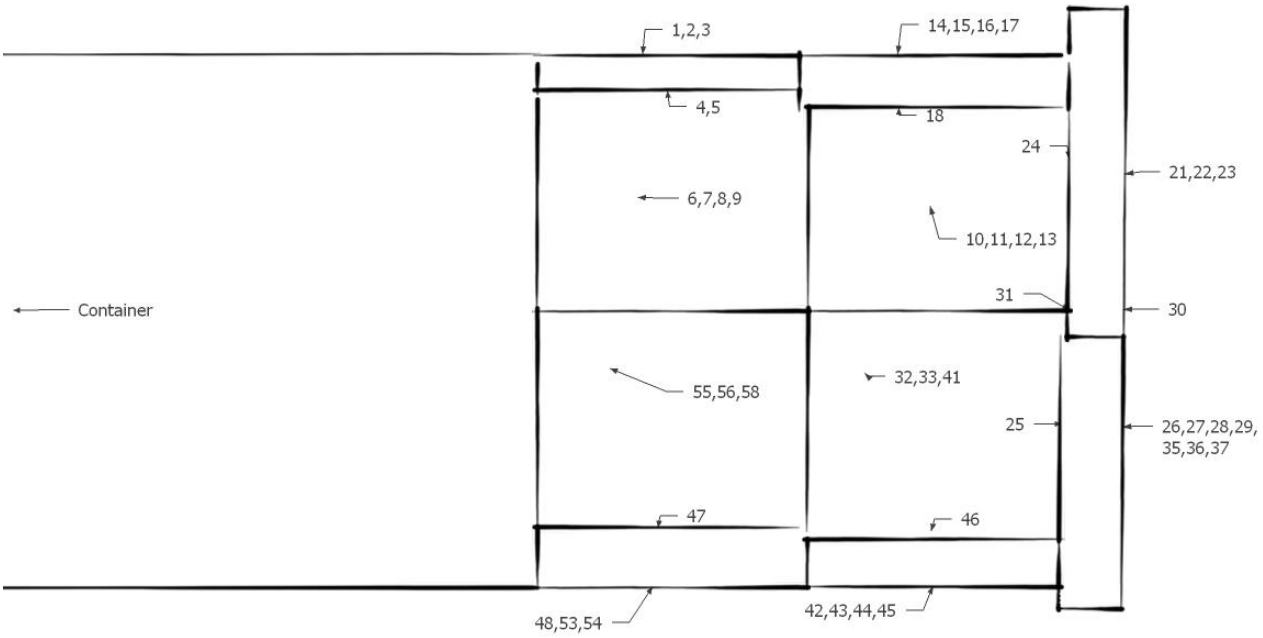
Figur 41. Vända tegelstenar i tegelfasaden (foto SÄRF, används med tillstånd).

Brännaren placerades i containern för att konstruktionen inte skulle riskera att brinna ner innan värmen gått igenom väggarna och registrerats på IR-kamerorna, se figur 42. På bilden syns även rören från brännargaffeln och pilotbrännaren. Lastpallarna som syns flyttades ut ur containern till försöket.

Figur 42. Brännarens placering i containern (foto SÄRF, används med tillstånd).

4.3.2 Mätpunkter

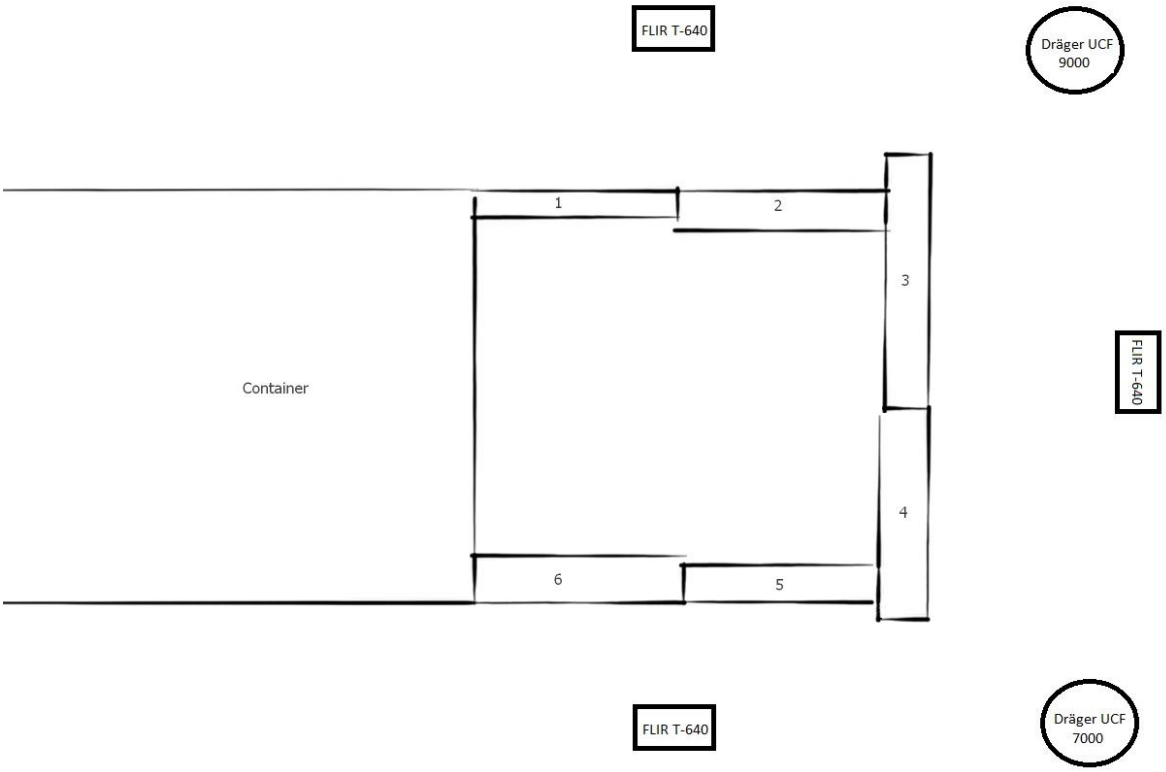
Totalt användes 47 termoelement i försöket varav 12 stycken var platt-termoelement. På utsidan var varje konstruktionsdel utrustad med tre termoelement på olika höjd som grunduppsättning. I vissa konstruktioner var dessa tre utökade där intressanta punkter fanns, exempelvis vid ventilationsöppningar och strukturförändringar i materialet. I figur 43 visas översiktligt termoelementens placering. För mer detaljerade figurer se bilaga D.



Figur 43. Placering av termoelement för försök, sett ovanifrån.

4.3.3 Kameraplacering

I figur 44 visas en principskiss över IR-kamerornas placering.



Figur 44. IR-kamerornas placering under försöket.

4.4 Genomförande

Försöket utfördes tisdagen den 9 december klockan 13.00 på Guttasjön. Väderförhållandena under försöket var moln men ingen nederbörd och försöket kunde startas enligt tidsplan. Utomhustemperaturen var omkring 4 grader och svag vind rådde. Utbyggnaden hade rumstemperatur vid start av försöket på grund av att en pilotlåga varit igång en stund inför försöket. Ett område runt testbyggnaden spärrades av för att undvika att folk rörde sig framför kamerorna och även av säkerhetsskäl. Två rökdykarklädda brandmän fanns på plats för att kunna utföra uppgifter nära branden. Plywood-skivor sattes upp på containers vägg närmast utbyggnaden för att inte plåten skulle påverka IR-kamerornas automatiska inställningar. En liten aluminiumfolie sattes upp på varje sida av utbyggnaden för att kunna bestämma skenbar reflekterad temperatur för att kunna efterredigera bilderna från IR-kameran. Temperaturloggning och samtliga kameror startades samtidigt som en klocka för att ha en referenstid samt se till att all mätutrustning fungerade som den skulle, se figur 45.

Figur 45. Klockan som användes som referens med temperaturgivning (foto SÄRF, används med tillstånd).

Efter sex minuter startades brännaren med pilotlågan och temperaturloggningen pågick i 39 minuter till. Under denna tid steg temperaturen relativt konstant under ungefär 1100-1200 sekunder upp till cirka 400 ˚C för platt-termoelementen fastsatta i taket, se figurer i bilaga D. Efter denna tid övergick branden till en fullt utvecklad brand, se figur 46, med temperaturer på över 800 ˚C varefter gasolen stängdes av. På bilden syns också de uppsatta plywood-skivorna.

Figur 46. Fullt utvecklad brand i utbyggnaden (foto SÄRF, används med tillstånd).

Efter att konstruktionen fortsatt att brinna några minuter påbörjades släckning med vatten, se figur 47.

Figur 47. Släckning påbörjas (foto SÄRF, används med tillstånd).

Under försöket kontrollerades temperaturerna i brandgaslagret konstant för att övertändning inte skulle ske för tidigt innan värmevågen gått igenom väggar eller tak. Även brandgaslagrets höjd kontrollerades kontinuerligt för att undvika att den nådde ner till brännaren. Figur 48 visar hur värmevågen tydligt har gått igenom konstruktionen.

Figur 48. Taket är vid detta skede väldigt varmt (foto SÄRF, används med tillstånd).

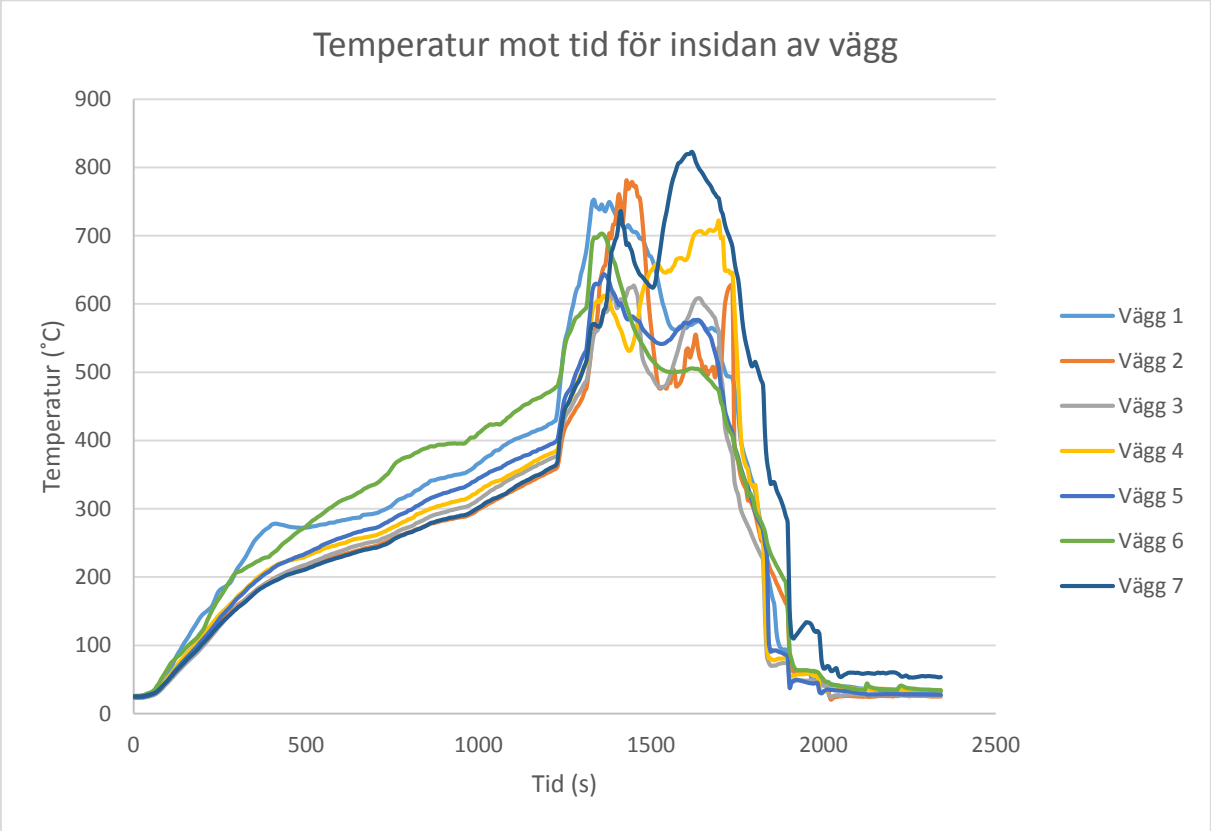
För fler bilder från försöket, se bilaga F.

5. Resultat

Nedan presenteras resultaten från försöken. Samtliga diagram utgår från när brännaren startades om inte annat anges. Mätdata från samtliga mätpunkter redovisas i bilaga E.

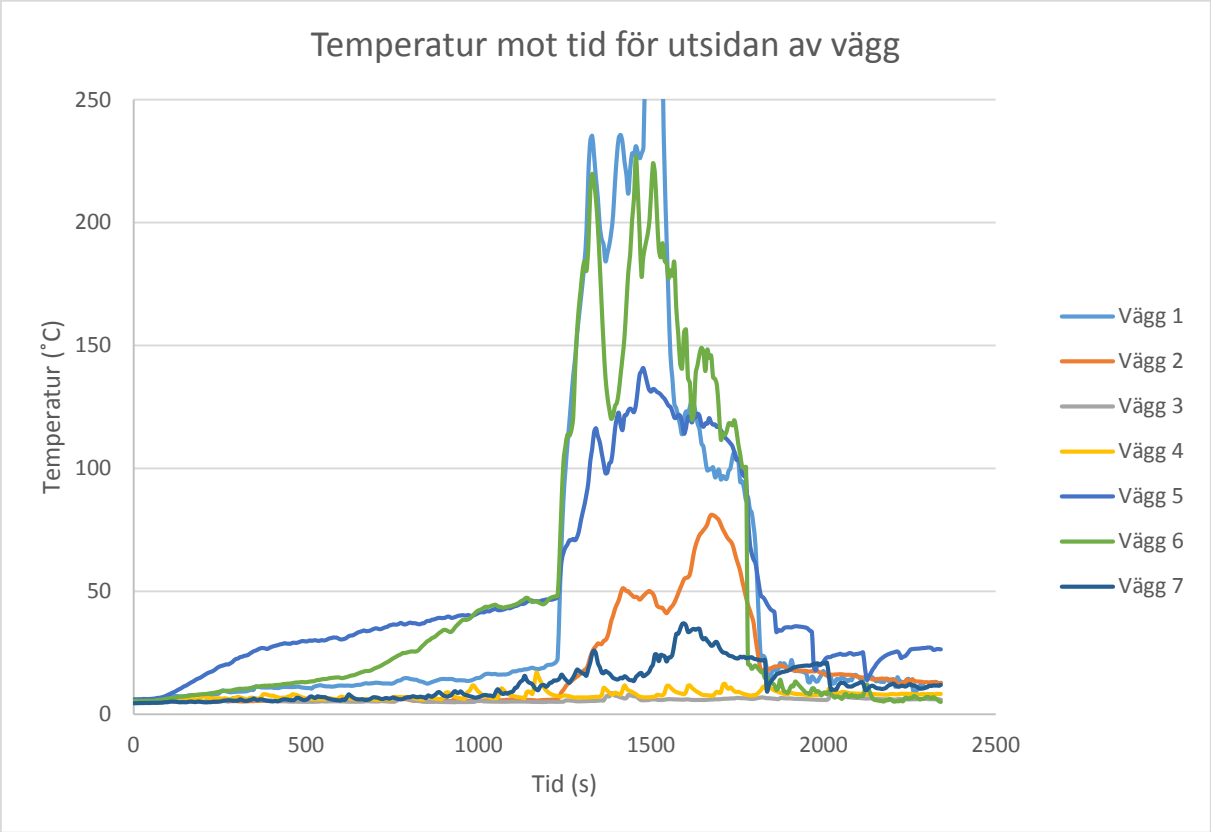
5.1 Temperaturkurvor enligt traditionell mätteknik

Figur 49 visar temperaturen på insidan av väggarna som en funktion av tiden på 2.2 meters höjd.



Figur 49. Temperaturkurvor som funktion av tiden för insidan av väggar på 2,2 meters höjd.

Figur 50 visar temperaturen på utsidan av väggarna som en funktion av tiden på 2.2 meters höjd.



Figur 50. Temperaturkurvor som funktion av tiden för utsidan av väggar på 2,2 meters höjd.

Tabell 4-6 visar den tid det tar för en viss temperaturhöjning att uppstå för varje vägg på 3 olika höjder. Vägg 7 är en gavelvägg med endast en höjd, 3,2 meter, och finns med i tabell 4.

Tabell 4. Tiden till en viss temperaturhöjning för de 7 väggarna på 2,2 meters höjd (Vägg 7 på 3,2 meters höjd).

Temperaturhöjning	**Vägg 1**	**Vägg 2**	**Vägg 3**	**Vägg 4**	**Vägg 5**	**Vägg 6**	**Vägg 7**
2 (˚C)	160 s	1235 s	1375 s	1965 s	105 s	155 s	785 s
5 (˚C)	370 s	1245 s	-	-	145 s	325 s	1115 s
10 (˚C)	1015 s	1285 s	-	-	205 s	630 s	1455 s

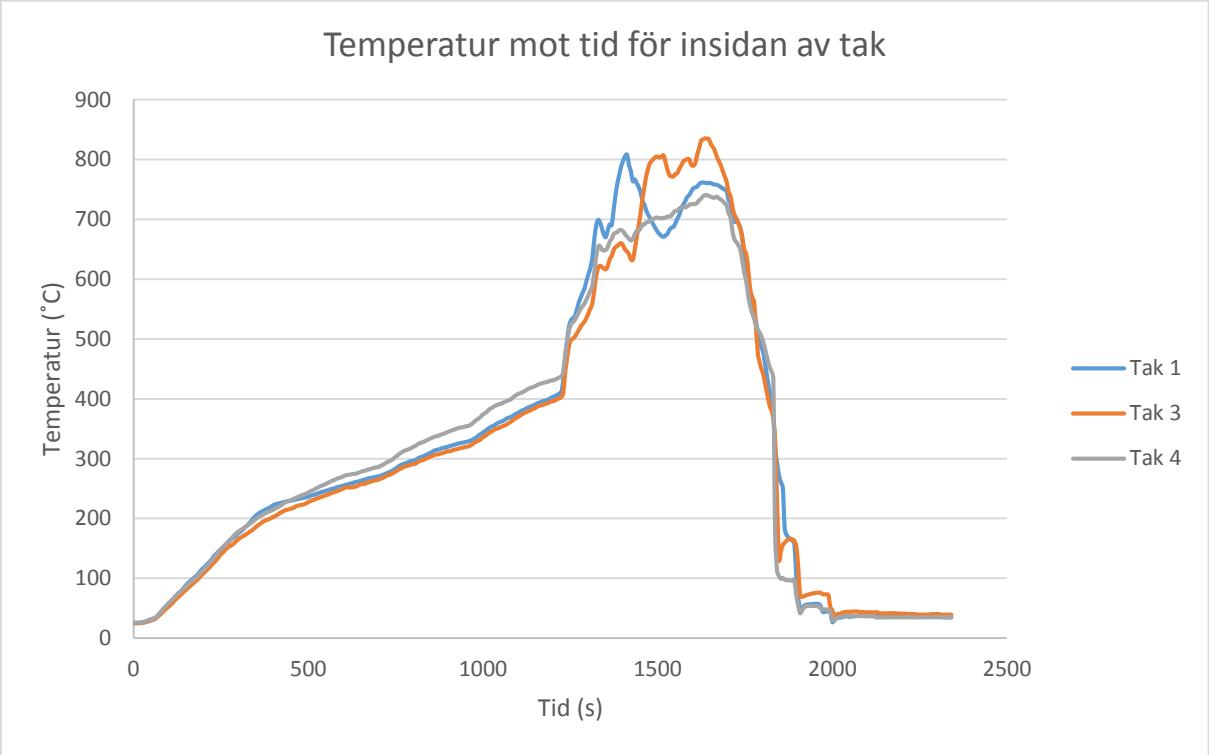
Tabell 5. Tiden till en viss temperaturhöjning för de 6 väggarna på 1,2 meters höjd.

Temperaturhöjning	**Vägg 1**	**Vägg 2**	**Vägg 3**	**Vägg 4**	**Vägg 5**	**Vägg 6**
2 (˚C)	1235 s	1270 s	-	2020 s	175 s	880 s
5 (˚C)	1240 s	1320 s	-	-	310 s	1080 s
10 (˚C)	1255 s	1495 s	-	-	540 s	1215 s

Tabell 6. Tiden till en viss temperaturhöjning för de 6 väggarna på 0,2 meters höjd.

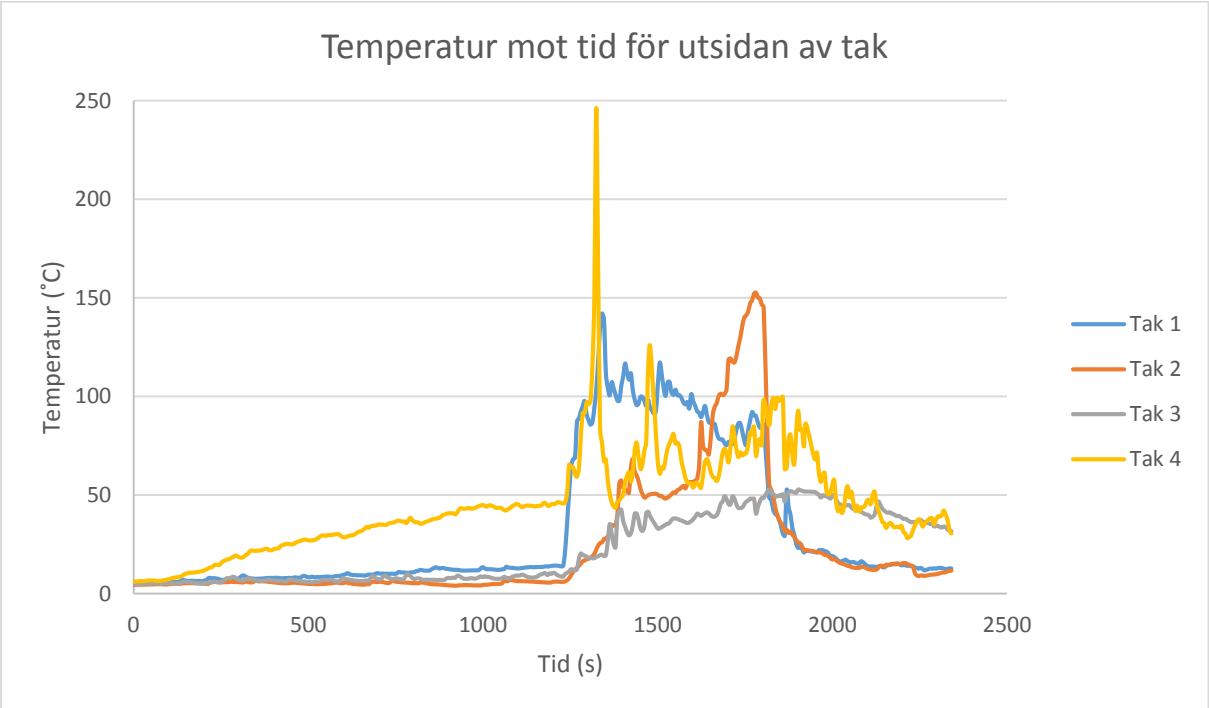
Temperaturhöjning	**Vägg 1**	**Vägg 2**	**Vägg 3**	**Vägg 4**	**Vägg 5**	**Vägg 6**
2 (˚C)	1255 s	1285 s	-	-	325 s	1230 s
5 (˚C)	1300 s	1380 s	-	-	1235 s	1240 s
10 (˚C)	1470 s	-	-	-	1325 s	1275 s

Figur 51 visar temperaturen som en funktion av tiden på mitten av takets insida. Temperaturen från tak 2 saknas då detta platt-termoelement fallerade under testet.



Figur 51. Temperaturkurvor som funktion av tiden för mitten av takets insida.

Figur 52 visar temperaturen som en funktion av tiden på utsidan av taket. För tak 1 och 2 befinner sig mätpunkterna på mitten av taket. På tak 3 och 4 befinner sig mätpunkterna 30 centimeter högre upp på taket än mätpunkterna på tak 1 och 2 .



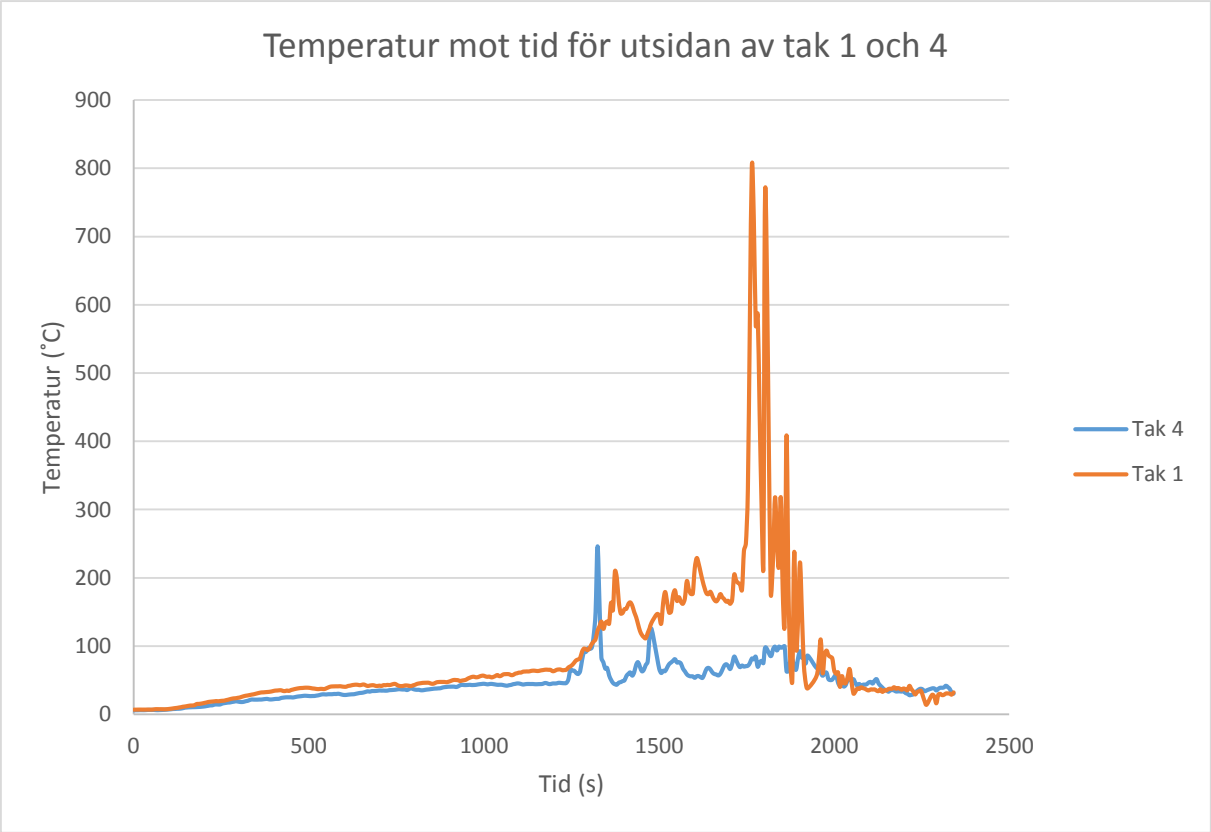
Figur 52. Temperaturkurvor som en funktion av tiden för utsidan av taket.

Tabell 7 visar den tid det tar för en viss temperaturhöjning att uppstå för varje tak. För tak 1 och 2 befinner sig punkterna mitt på taket. För tak 3 och 4 befinner sig punkterna 30 centimeter högre upp.

Tabell 7. Tiden till en viss temperaturhöjning för tak 1-4.

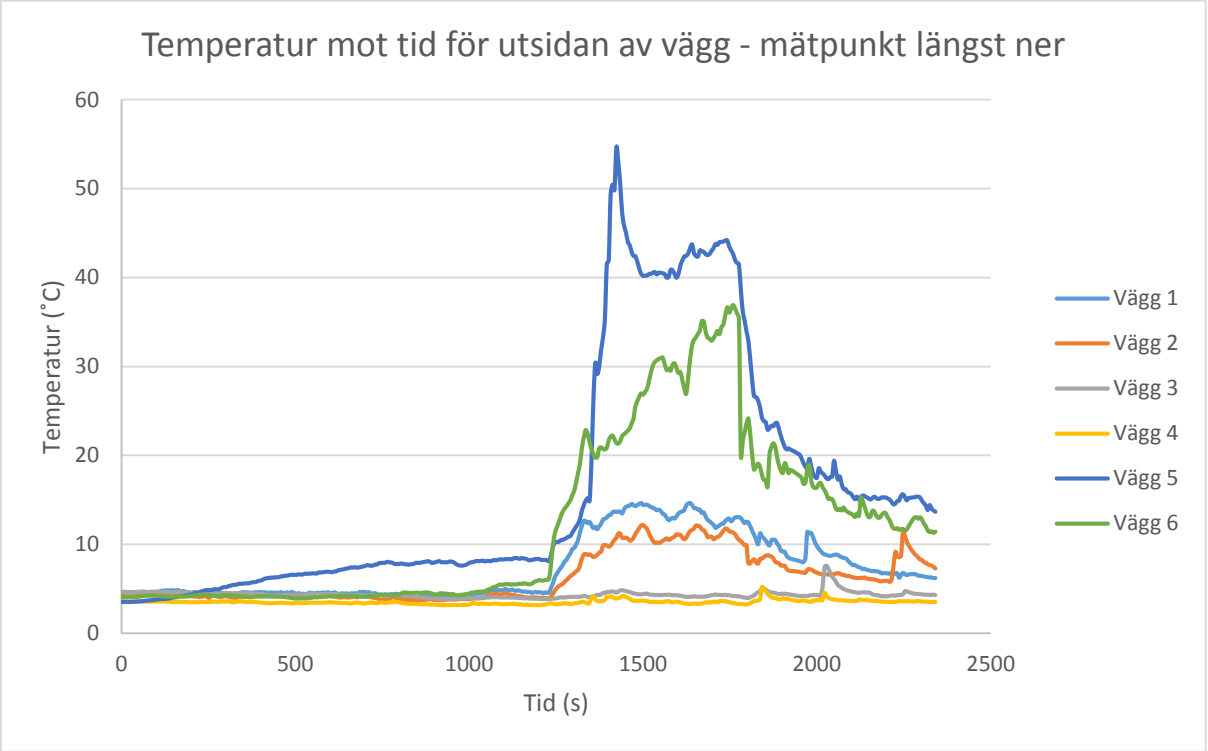
Temperaturhöjning	**Tak 1**	**Tak 2**	**Tak 3**	**Tak 4**
2 (˚C)	215 s	1240 s	680 s	125 s
5 (˚C)	695 s	1260 s	1170 s	190 s
10 (˚C)	1235 s	1280 s	1275 s	260 s

Figur 53 visar temperaturen som en funktion av tiden för utsidan av tak 1 och 4. I motsats till figur 52 så är den högsta mätpunkten vald för tak 1. Denna är belägen 70 centimeter högre än mätpunkten på tak 4.



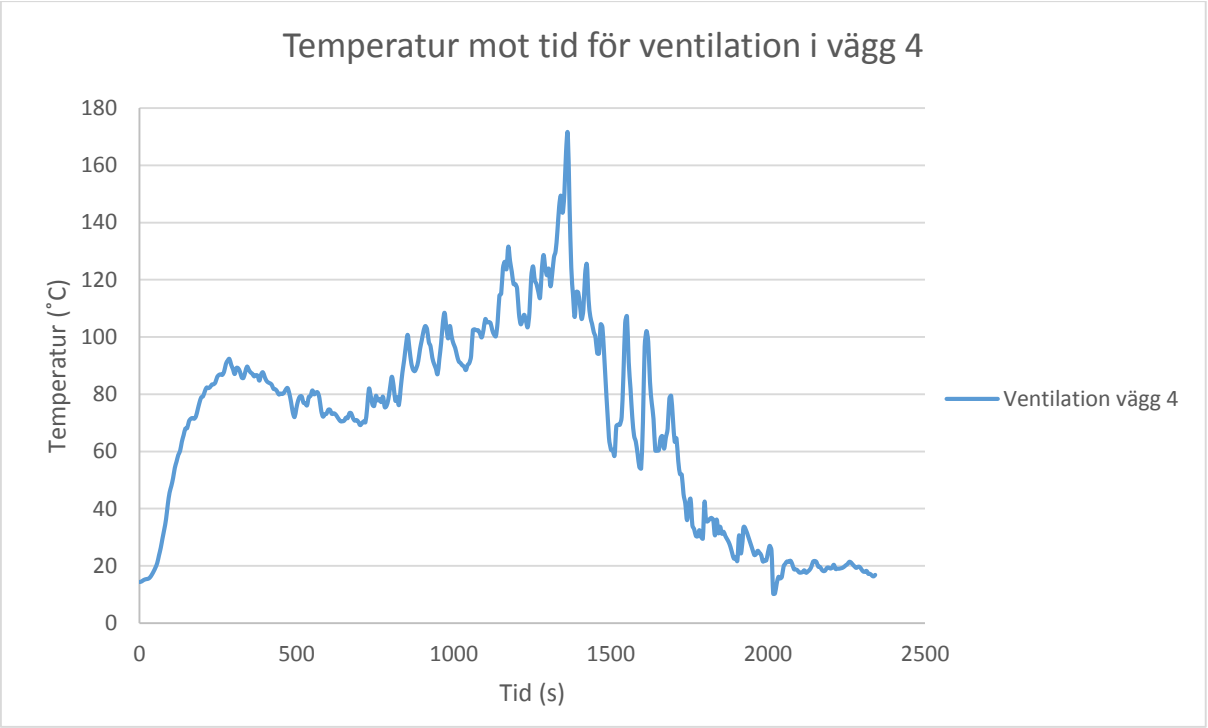
Figur 53. Temperaturen som en funktion av tiden för utsidan av tak 1 och 4.

Figur 54 visar temperaturen som en funktion av tiden för utsidan av väggarna på 0,2 meters höjd.



Figur 54. Temperaturkurvor som en funktion av tiden för utsidan av väggarna på 0,2 meters höjd.

Figur 55 visar temperaturen som en funktion av tiden för mätpunkten placerad i ventilationen på vägg 4.

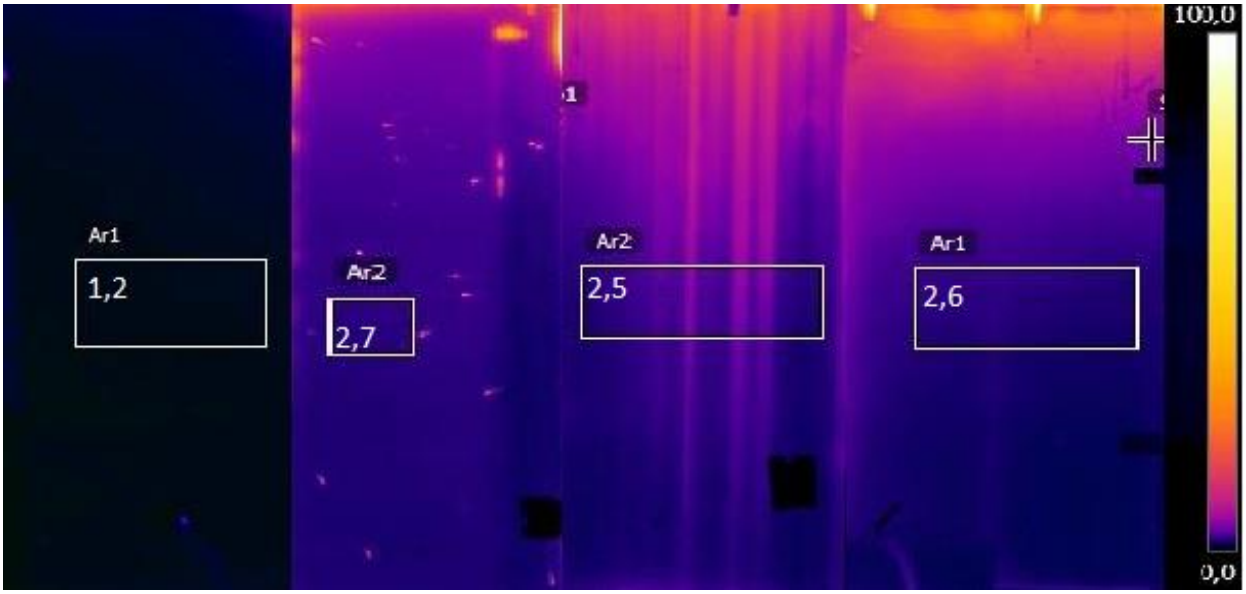


Figur 55. Temperaturkurva som en funktion av tiden för ventilationen i vägg 4.

5.2 IR-bilder

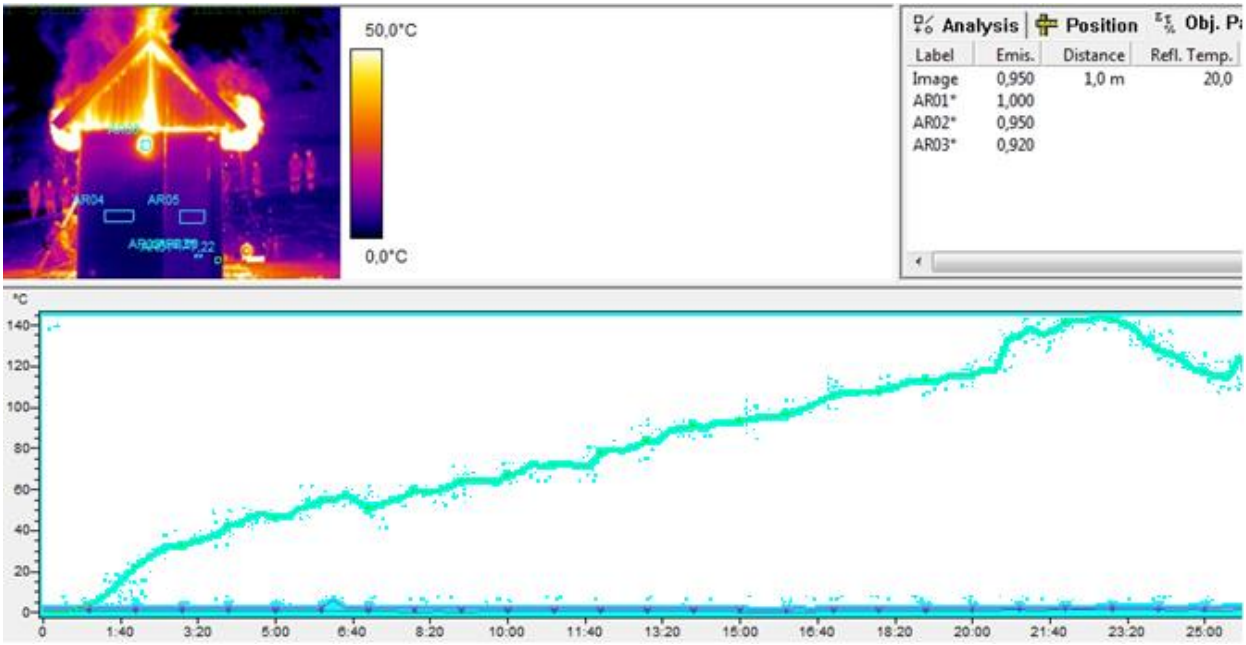
Resultaten som redovisas är inte efterredigerade. I fabriksinställningen på FLIR T640-kamerorna är emissiviteten förinställd på 0,95 och skenbar reflekterad temperatur 20˚C.

I figur 56 visas vägg 2, 3, 5 och 6 vid olika tidpunkter när termoelementet mitt på väggen, beläget inom rutan i figuren, visar att temperaturen är 5 ˚C. Värdet för medeltemperaturen (˚C) inom rutan i varje vägg, uppmätt av kameran, ses i figuren. Trots att väggarna har samma temperatur ser de olika ut i kameran.



Figur 56. Vägg 2, 3, 5 och 6 med medeltemperatur för rutan enligt FLIR T-640 (foto KIMO taget med tillstånd).

I figur 57 visas temperaturen för ventilationen i vägg 4 som en funktion av tiden under brandförloppet.



Figur 57. IR- bild och temperaturkurva från FLIR T-640 för ventilationen i vägg 4 (foto KIMO taget med tillstånd).

Figur 58 visar väggarna och taken genom den vanliga kameran samt genom Dräger-kamerorna tio sekunder efter det att brännaren har tänts. Värmedifferenser syns på IR-bilderna men inte på de vanliga. Dräger 9000 var inställd på Hazmat och Dräger 7000 på Thermal scan.

Figur 58. Bild från GoPro-kameran och Dräger 9000-kameran 10 sekunder in i brandförloppet ovan. GoPro-kameran och Dräger 7000-kameran 10 sekunder in brandförloppet nedan (foto SÄRF, används med tillstånd).

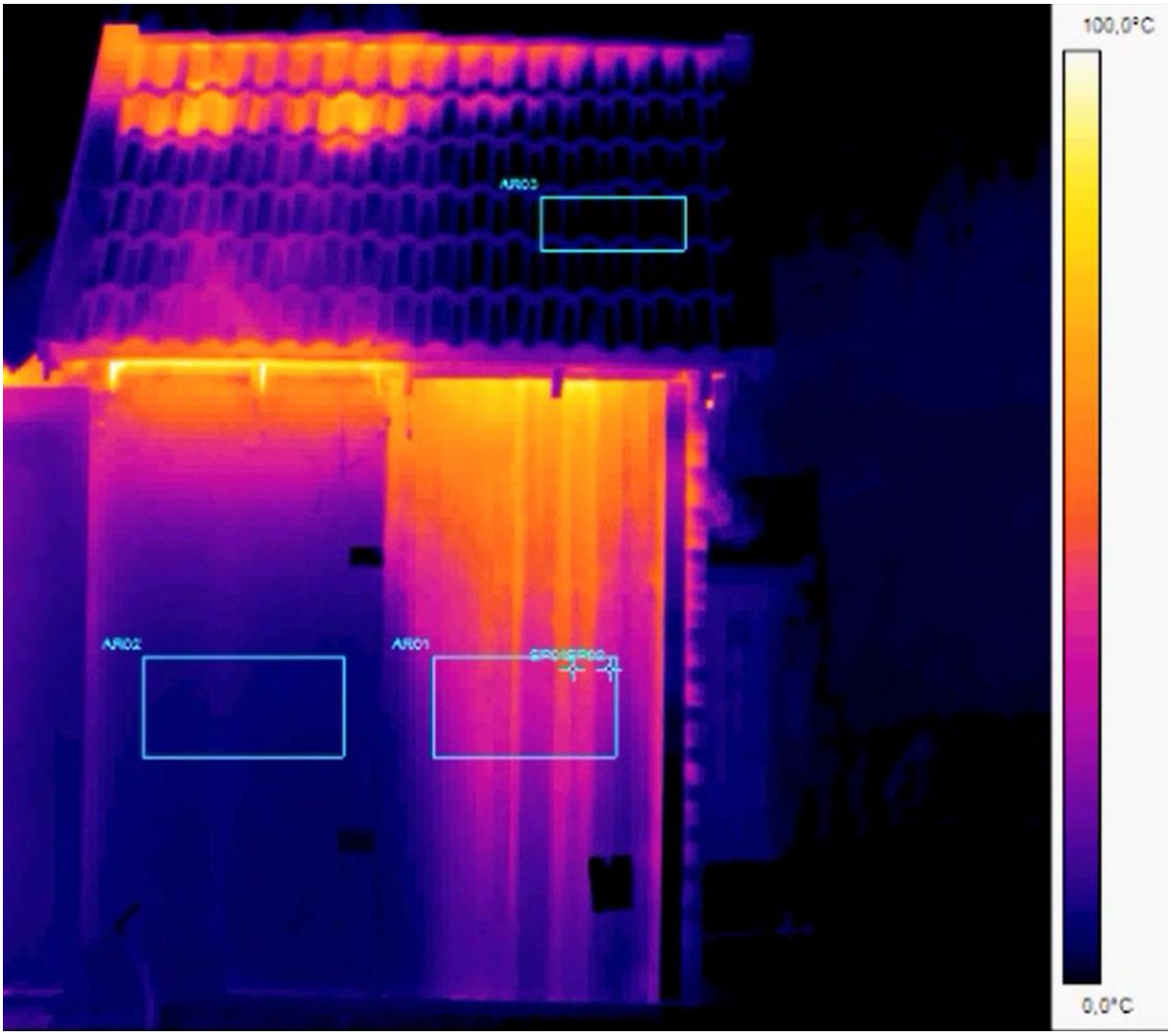
Figur 59 visar väggarna och taken genom den vanliga kameran samt genom Dräger-kamerorna fyra minuter efter det att brännaren har tänts. Temperaturdifferenserna syns än mer på IR-bilderna men fortfarande syns inget på de vanliga.

Figur 59. Bild från GoPro-kameran och Dräger 9000-kameran 4 minuter in i brandförloppet ovan. GoPro-kameran och Dräger 7000-kameran 4 minuter in brandförloppet nedan (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 60 visar väggarna och taken genom den vanliga kameran samt genom Dräger-kamerorna 21 minuter efter det att brännaren har tänts. Huset döljs inte lika mycket av röken på IR-bilderna.

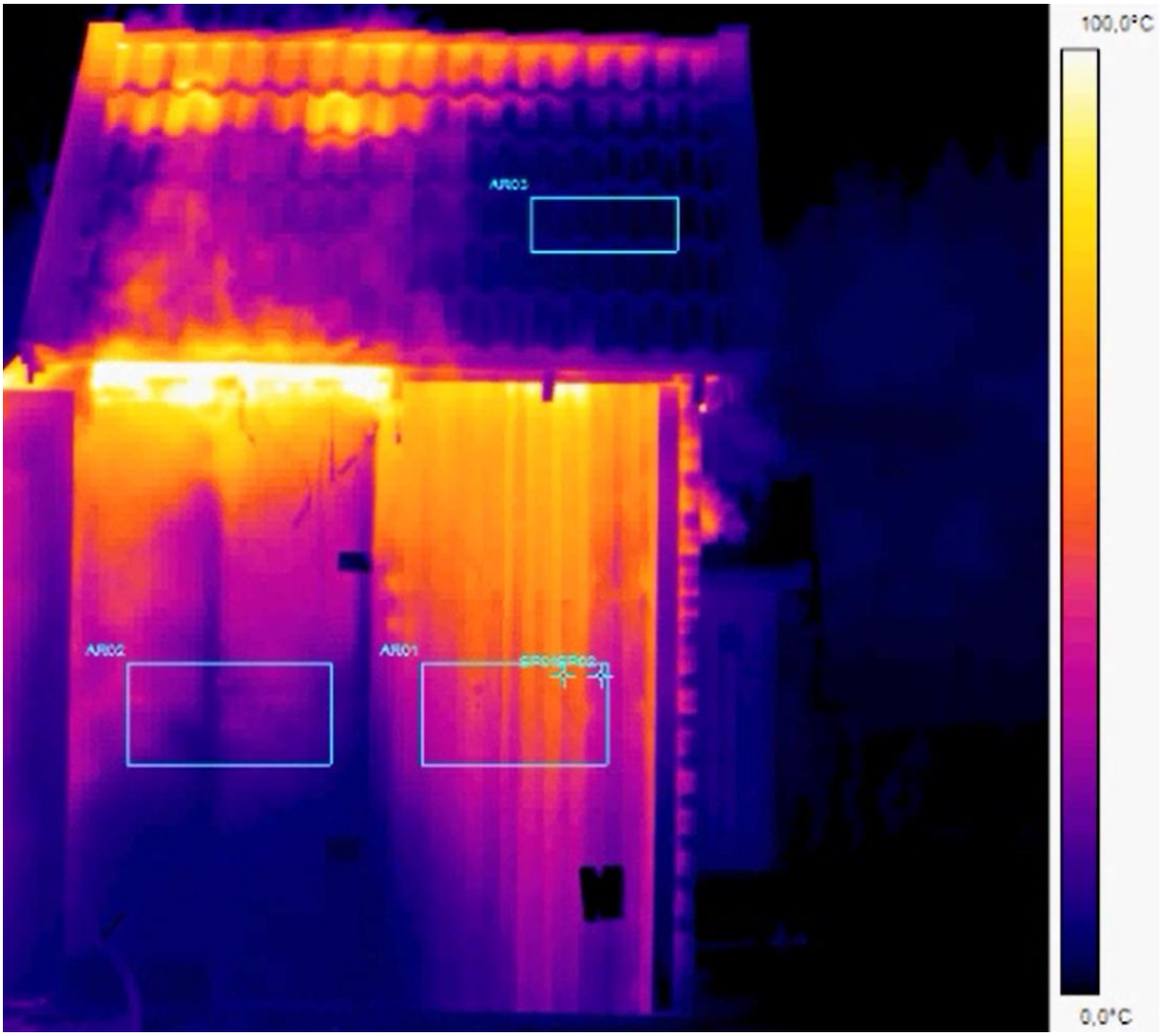
Figur 60. Bild från GoPro-kameran och Dräger 9000-kameran 21 minuter in i brandförloppet ovan. GoPro-kameran och Dräger 7000-kameran 21 minuter in brandförloppet nedan (foto SÄRF, används med tillstånd).

I figur 61 visas var värme gått igenom vägg 5 och 6 samt tak 3 och 4. I taket syns tydligt takfotsventilationen och ventilationen uppe i taket. Plåtväggen visar en tydlig skiktning i temperatur i höjdled.



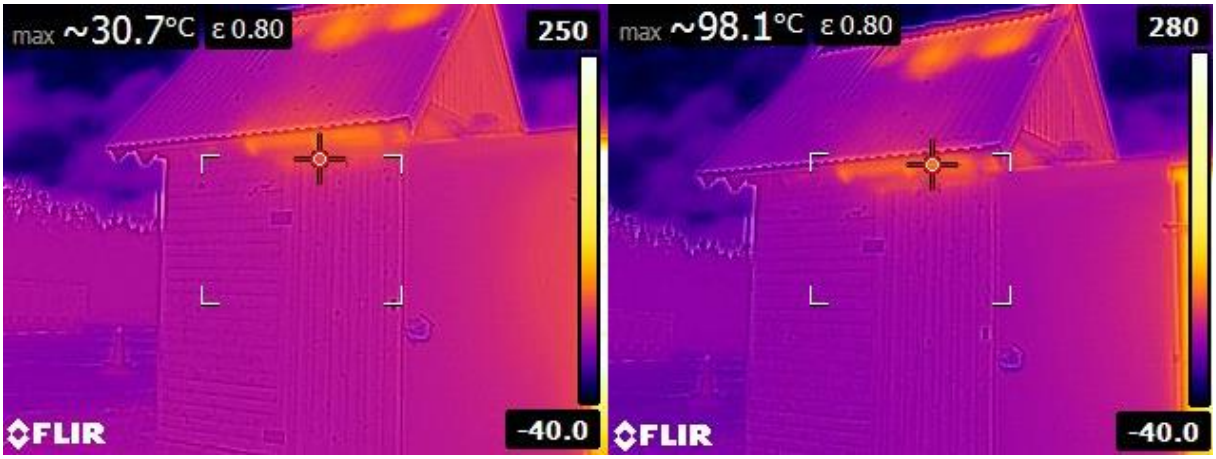
Figur 61. IR-bild från FLIR T-640 som visar var värmevågen gått genom konstruktionen för vägg 5 och 6, samt tak 3 och 4 (foto KIMO taget med tillstånd).

Figur 62 visar en regel som syns i vägg 6 ett par minuter innan överändning.



Figur 62. IR-bild från FLIR T-640 som visar hur en regel syns genom vägg 6 (foto KIMO taget med tillstånd).

I figur 63 visas två bilder tagna med kort mellanrum av den handhållna FLIR E6-kameran som visar vikten av att fokusera kameran rätt vid avläsning för temperatur. Kamerans emissivitetsinställning var satt till 0,8.



Figur 63. Jämförelsebild som visar hur temperaturen kan visas olika för samma bild i FLIR E6 beroende på fokusering (foto SÄRF, används med tillstånd).

6. Diskussion

Nedan diskuteras konstruktionen, försöket och resultatet med respektive felkällor.

6.1 Konstruktion

Konstruktionen som byggdes upp saknade vindsbjälklag, fönster, dörrar och andra detaljer vilket gör att det inte går att utvärdera testresultatet som resultat för en komplett byggnad. Istället får resultat tolkas separat för varje byggnadsdel. Syftet med väggplaceringarna var att få likartade ytmaterial bredvid varandra för att kunna se skillnad i IR-kameran som beror på temperaturskillnader och inte på grund av skillnad i emissivitet. Dock hamnade tegelfasaden på fel ställe vilket innebar att vägg nummer 4 blev en annan typ av vägg än den som var tänkt. Detta gäller också vägg nummer 6 som fick det ovanliga ytmaterialet asfaltboard. Eftersom tegelfasaden hade mer isolering bakom sig än planerat blev det svårt att dra några slutsatser angående de detaljer, såsom vända tegelstenar, och mätpunkter som valdes ut då värmevågen inte gick igenom väggen. Plåtväggen som byggdes hade målad plåt som fasadmaterial vilket ger den andra egenskaper strålningsmässigt än vad en omålad har. Detta bör ha gett ytan en högre emissionsförmåga.

När de olika väggarna sammanfogades med varandra användes brandskum och isolering för att det inte skulle uppstå oönskade läckage och värmespridning mellan konstruktionsdelarna. Där utbyggnaden sammanfogades med containerns tak uppstod dock ett läckage där brandrök trycktes ut. Detta tros dock endast ha påverkat mätutrustning och IR-bilder marginellt.

Takfotsventilationen, taknocksventilationen och den vanliga ventilationen som installerades ingick i försöket då det är intressanta svagheter i en konstruktion vid brand eftersom dessa påvisar värme snabbast och används vid operativ analys. Den takfotsventilation som sattes in på den oisolerade delen av taket medförde att varm gas strömmade ut vilket kan ha påverkat mätutrustningen i närliggande punkter.

6.2 Försök

Inför försöket ändrades brännarens placering från utbyggnaden till containern för att undvika att konstruktionen började brinna för tidigt. Om konstruktionen börjat brinna direkt och en tidig övertändning uppstått hade värmevågen eventuellt inte hunnit igenom innan övertändningen. Om värmevågen inte hunnit igenom hade inte IR-kamerorna observerat förändringar annat än i svagheter i konstruktionen. Värt att notera är att temperaturen på väggarna skiljde sig något i höjdled redan från början vilket berodde på att utbyggnaden varit uppvärmd till rumstemperatur under natten till försöket.

Tanken var från början att ha en effekt på brännaren som gav temperaturer på ungefär 500-600 ˚C redan efter några minuter. Vid försöket uppstod ett brandgaslager på drygt en meters höjd tidigt och därför ökades effekten inte ytterligare för att nå dessa höga temperaturer av säkerhetsskäl. Temperaturmätningarna från övre brandgaslagret visar på ungefär 400-500 ˚C när övertändning sker efter drygt 20 minuter. Vid denna tid stängdes gasolen av då den ansågs överflödig eftersom de brännbara delarna av konstruktionen stod i brand. Branden fick fortgå ytterligare 5-7 minuter och därefter påbörjades släckning med vatten. Figur 49 och 51 visar tydligt dessa skeenden och att temperaturen stiger igen efter att ha sjunkit en stund. Dessa fluktuationer i temperatur antas bero på att syretillförseln till branden förändrades då nya öppningar tillkom på grund av branden.

Sammantaget ses försöket som lyckat. Väderförhållandena var goda utan varken sol eller regn samt endast svag vind som inte gav kraftig konvektiv nedkylning. Av samtliga mätpunkter var det endast ett platt-termoelement i tak 2 som inte fungerade, men då övriga element i taket fungerade anses inte detta spela någon roll för resultatet. Försöket innehöll fyra olika sorters IR-kameror som dokumenterade och tillsammans med temperaturmätningarna samt de vanliga videokamerorna har de samlat in en stor mängd data. Denna data kommer förhoppningsvis komma fler personer till användning även efter denna rapport.

6.3 Resultat

Nedan diskuteras resultaten från försöket.

6.3.1 Temperaturkurvor enligt traditionell mätteknik

Figur 49 och 51 som visar temperaturen på insidan av utbyggnaden visar relativt lika värden för platt-termoelementen. Vägg 1 och 6 visar något högre temperaturer som förmodligen beror på att dessa väggar är placerade närmast branden. Platt-termoelementet på insidan av tak nummer 2 fallerade varför resultat för taket saknas. Dock är resultaten för de andra taken likartade och detta tak kan antas ha en liknande temperaturkurva.

Det är vägg nummer 5, plåtväggen, som visar störst förändring i temperatur i början av brandförloppet. Redan efter 105 sekunder har temperaturen stigit 2 ˚C. Isoleringen i denna vägg är sparsam och denna vägg bör jämföras med en äldre industrivägg medan en modernare industrivägg som är bättre isolerad troligtvis inte hade gett utslag på utsidan lika tidigt. Eventuellt kan det ha funnits ett läckage ovanför väggen som medfört att brandgaser kan ha strömmat ut och påverkat resultatet. Detta gör att det blir svårt att dra slutsatser kring värmeledning genom väggen. Det framgår också att vägg nummer 1, landshövdingehusväggen, har en långsam men relativt linjär temperaturökning som kan observeras tidigt i brandförloppet. Vägg nummer 4, med tjock isolering samt vägg nummer 3, lättbetongväggen, visar knappt någon temperaturförändring alls, inte ens efter att övertändning skett. Små fluktuationer visas för vägg 4, men dessa tros bero på brandgaser som strömmar ut ur ventilationen i väggen. Den enda väggen som uppvisar en temperaturökning långt ner innan övertändningen sker är plåtväggen som har en temperaturdifferens på ungefär 3 ˚C. För vägg 1-4 tog det mer än 20 minuter innan en temperaturökning på 2 grader kunde observeras, förutom för översta mätpunkten på vägg 1 där det endast tog 3 minuter. På vägg 1 strömmade varma brandgaser dock ner genom takfoten som bör ha orsakat denna tidigare uppvärmning. Vägg 6 värmdes också upp snabbare längst upp vilket bör kunna förklaras med takfotsventilationen, men punkten mitt på väggen tog nästan 15 minuter att värmas upp 2 grader. Denna vägg är dock inte lika intressant för försöket eftersom den inte blev byggd som planerat och därmed inte är en verklighetstrogen konstruktion.

Det är tydligt att den oisolerade delen av taket släpper igenom värme snabbare än den isolerade delen. Det tar över tio minuter för den isolerade delen av taket att få en temperaturökning på 2 ˚C, för den oisolerade delen tog det endast 2 minuter. Tak nummer 4 släpper igenom värme snabbast men detta kan bero på mätpunktens placering som är något närmre taknocken än på det oisolerade plåttaket.

Tiden det tar för värmevågen att gå genom väggarna verkar stämma bra överens med teorin angående kρc för olika material, där den välisolerade tegelväggen samt lättbetongväggen har längre tid tills vågen går igenom än exempelvis plåtväggen. Plåtväggen hade förvisso också isolering, men inte lika tjockt lager som vägg 2 och 4 eller lättbetongväggen som i sig är väl isolerande. För taken gick värmen igenom tak 4 snabbast vilket kan tyckas konstigt då tak 1 hade samma dimensioner, men med plåt istället för betong som ytmaterial vilket borde ge ett annat resultat. Dock kan detta bero på, som redan nämnts, att mätpunkten är placerad närmre taknocken eller att ventilationshålen som finns högt upp på insidan av taket påverkar resultatet. Detta stöds då det framgår i figur 53 att temperaturen är högre för tak 1 då mätpunkten är något högre placerad än mätpunkten för tak 4.

Försöken, från SP, utförda med betong, visar att det tar ungefär 20 minuter innan det går att utröna en temperaturökning på 120 millimeters djup vid ett snabbt brandförlopp. 120 millimeter anses vara ungefär den tjocklek som exempelvis ett betongbjälklag har. Eftersom belastningen är annorlunda går det inte att jämföra med vårt försök. Samtliga utvalda försök är testade med ISO 834-kurvan som har en betydligt högre värmebelastning än försöket på Guttasjön. I SP:s rapport gjordes ett flertal tester, men samtliga resultat visade en likartad tid som de utvalda till denna rapport.

Mätpunkten som sitter i ventilationen på vägg 4 visar tydliga temperaturförändringar redan inom en minut. Efter 4-5 minuter sjunker temperaturen för mätpunkten för att sedan öka igen. Detta tros bero på att termoelementet tappade kontakt med ytan och värmdes upp av brandgaserna istället.

6.3.2 IR-bilder

Jämförelsebilden med fyra av de sex väggarna, där den uppmätta temperaturen är 5 ˚C, visar hur kameran ger något felaktiga temperaturer på samtliga väggar och en helt annan färg i kamerans bild. För att kunna mäta en korrekt temperatur med en IR-kamera måste framförallt inställningar gällande emissivitet och skenbar reflekterad temperatur vara korrekt inställda. Bilderna från försöket är tagna med fabriksinställningarna och inte redigerade i efterhand. Att bilderna inte är redigerade är ett medvetet val då korrekta inställningar inte förväntas användas i utryckningssammanhang av räddningstjänsten.

Redan efter knappt två minuter påvisar IR-kameran en hög temperatur i ventilationen i vägg 4 som indikerar branden på insidan. Ventilationens temperaturkurva från IR-kameran är lägre än för de uppmätta resultatet. Detta beror förmodligen på att den blanka metallytan i ventilationsgallret har en lägre emission än de förinställda 0,95. Enligt teoriavsnittet ter sig dessa ytor oftare kallare i en IR-kamera vilket stämmer överens med resultatet. Den aluminiumfolie som sattes upp som referens visar samma beteende som ventilationsgallret med en lägre temperatur än övriga väggytor. Det folien i realiteten mäter är bakgrundstemperaturen eftersom den näst intill saknar egen emission. Jämförelsen med termoelementet görs för de första fem minuterna av brandförloppet eftersom termoelementet förmodligen tappade kontakt med ytan efter denna tid.

Vid jämförelse mellan den vanliga kameran och de två Dräger-kamerorna syns det tydligt vilket försprång IR-kamerorna har för att upptäcka en brand. När de vanliga bilderna inte visar något tecken går det att se förhöjd temperatur i svagheter i konstruktionen som ventilationen. Att det syns förhöjd temperatur redan efter 10 sekunder i ventilationen beror förmodligen inte enbart på att brännaren precis startat. Det beror nog även på att utbyggnaden hade rumstemperatur vid

start av brännaren på grund av pilotlågan. När branden går att se med blotta ögat med flammor som slår ut ur takfot samt kraftig rökutveckling syns byggnaden tydligt genom röken i Dräger-kamerorna. Detta hör samman med att kamerorna avläser strålning i ett intervall där kolmonoxid, koldioxid och vattenånga har hög transmittans.

IR-bilden visar tydligt hur plåtväggen har skiftande temperatur i höjdled. Huruvida det går att dra någon slutsats om det beror på brandgaslagrets höjd på insidan eller inte är svårt att säga. Förmodligen fanns ett läckage uppe i anslutningen med taket som påverkat plåtväggen och lett värme ner i plåtfasaden från läckaget oberoende av brandgaslagrets nivå. Läckage i anslutningar förekommer i riktiga byggnader och en liknande bild tros kunna uppstå i exempelvis industribyggnader. Skiktningen på vägg 6 tros bero på de utströmmande brandgaserna från takfotsventilationen. Eftersom en regel som urskiljs i väggkonstruktionen enligt IR-kameran har en lägre temperatur än asfaltboarden styrks påståendet att väggen är varm på grund av brandgaserna och inte ledning genom väggen då isoleringen har ett lågt kρc.

Med FLIR E6-kameran togs två bilder direkt efter varandra dock med något olika fokus. Den automatiska sökningen efter högsta temperatur inom rutan visar att det är av vikt att rikta kameran rätt för att få det avläsningsområde som önskas.

Det skulle gå att diskutera och presentera mer resultat kring IR-bilder från försöket, men tillgång till allt material saknades under arbetet.

6.4 Användning

Resultaten tyder på att det tar lång tid för en värmevåg att gå genom en konstruktion med undantag för dess svagheter. Fokus vid scanning av en byggnad utifrån bör därför ligga på att analysera dess svagheter under det tidiga skedet av en brand. Om det går att se värmeförändringar för hela väggen/taket kan det antas att branden pågått en längre tid. I ett sådant skede finns normalt många andra indikatorer som kraftig rökutveckling eller flammor. Ett långt brandförlopp under syrekontrollerade förhållanden i ett tillslutet utrymme eller en konstruktionsbrand skulle dock kunna medföra en värmevåg genom en konstruktion utan tydligt synliga tecken i form av flammor eller tjock rök.

I andra situationer kan det vara ett motsatt förhållande där en vägg som är kall inte innebär att man kan utesluta att exempelvis en glödbrand finns på andra sidan. Eftersom brand kan sprida sig från ett brandrum via imkanaler, annan ventilation, rör, håligheter med mera finns det risk för att brandspridning skett från brandrummet utan att det syns en förhöjd temperatur på väggen/golvet/taket som vetter mot det utrymmet.

Ett av de snabbaste sätten att hitta indikationer på en brand är att scanna ventilationsöppningar i väggar och tak. Det är då viktigt att tänka på att ventilationsöppningen nödvändigtvis inte är i direkt anslutning till rummet på andra sidan. Ibland har den varma luften letts till öppningen genom kanaler eller dolda utrymmen. Detta innebär att det inte går att förutsätta att branden är direkt på andra sidan av en sådan vägg eller tak vid en kraftigt förhöjd temperatur runt öppningen.

Exakt temperaturavläsning är omöjligt att veta utan emissivitet och skenbar reflektionstemperatur. Skenbar reflektionstemperatur beror bland annat på hur mycket bar himmel som finns eftersom den knappt avger någon strålning. Är solen närvarande så bidrar den med mycket strålning vilket gör att den skenbara reflektionstemperaturen kan förändras snabbt med ett väderomslag. Dessa parametrar är tidsödande att ta reda på och är därför inte

aktuellt för räddningstjänst att ställa in vid scanning. Detta innebär att temperaturen som avläses vid insats aldrig kan ses som en exakt temperatur, istället är de temperaturvariationer inom en konstruktion som uppmärksammas av större intresse.

Blanka material som till exempel metaller ser generellt kallare ut än vad de är. Detta gäller i synnerhet vid förhöjda temperaturer som råder vid brand.

Det skulle vara av intresse med en funktion som gör att endast temperaturdifferensen mot starttemperatur visas. Detta skulle underlätta bedömningen av temperaturens förändring, brandförloppet och effekten av genomförda släckinsatser. Exempelvis skulle en kraftigt avvikande färg kunna markera snabba temperaturförändringar i bilden. För att detta ska fungera krävs dock att kameran är fixerad för att starttemperaturen skall kunna subtraheras från den aktuella temperaturen. Detta gör det svårt att applicera på operativt arbete men möjligheterna borde utforskas.

7. Slutsats

Det tar lång tid för en värmevåg att gå igenom en konstruktion, med undantag för dess svagheter och ventilerande öppningar, vid brand. Sådana ventilerande öppningar återfinns ofta, förutom i den vanliga ventilationen, längs takfötter och taknock.

Det tar minst 20 minuter för en värmevåg att ta sig genom vanliga väggar utan svagheter vid brand förutsatt att ingen övertändning har skett.

Ett oisolerat tak kan släppa igenom värme genom dess konstruktion, så att en förhöjd temperatur på två grader uppstår, inom två minuter. Ett vanligt isolerat tak släpper inte igenom värme de första tio minuterna.

Betong som utsätt för väldigt hög brandbelastning uppvisar ej temperaturstegring på 12 centimeters djup de första 20 minuterna.

Detta innebär att scanning bör fokuseras på de svaga delarna av en konstruktion i det tidiga skedet av ett brandförlopp. Syns en tydlig värmepåverkan på en vägg eller ett tak har branden förmodligen pågått under en längre tid.

Vid användande av fabriksinställning, utan exakt angivning av emissivitet och bakgrundsstrålning, finns en betydande skillnad mellan temperaturangivelse och verklig temperatur även i en sofistikerad IR-kamera. För att få en noggrann temperaturangivelse krävs kunskap om dessa parametrar i synnerhet. Därför är temperaturen i kameran inte ett korrekt värde på ett objekts temperatur vid normal användning inom räddningstjänsten. Dock är det generellt inte nödvändigt att få en exakt temperatur i brandsammanhang då temperaturskillnader är av större intresse.

IR-kameran är ett bra hjälpmedel för räddningstjänsten för att upptäcka varma ytor innan de kan ses med blotta ögat. Med en bra tolkning av informationen som kameran ger kan räddningstjänstens resurser utnyttjas på ett bra sätt.

8. Förslag till framtida forskning

Det går att urskilja mycket små temperaturdifferenser i konstruktioner med högupplösta IR-kameror som idag används till termografering i andra sammanhang än brand. Dessa kostar mer än de kameror räddningstjänsten använder sig av idag.

Om dessa kameror skall kunna utnyttjas till fullo så kräver det mycket kunskap av användaren och eventuellt mer tid till att analysera bilden. Det återstår att avgöra om det är praktiskt möjligt för räddningstjänsten att utveckla mer förfinade arbetsmetoder med hjälp av dessa IR-kameror. Det handlar om en avvägning mellan kostnad, förmågan hos användaren samt tidsåtgång. Här finns det mycket utvärdering och arbete med metodutveckling kvar att göra.

En annan användning som hade varit intressant att studera mer är IR-kamera fäst på drönare för scanning av objekt från högre höjd. Detta ställer krav på att drönaren kan hålla sig uppe i luften med en kamera en längre tid samtidigt som den är stabil. Kameran måste också ha en tillräckligt bra upplösning för att ge användbar information. Det finns fler användningsområden än för räddningstjänst för denna typ av scanning, exempelvis vid sökande efter försvunna personer.

Referenser

Amon, F., Bryner, N., Hamins, A., & Lock, A. (2008). *Performance Metrics for Fire Fighting Thermal Imaging Cameras - Small and Full-Scale Experiments.* Gaithersburg: NIST - National Institute of Standards and Technology.

Bengtsson, L.-G. (2001). *Inomhusbrand.* Karlstad: Räddningsverket.

Björk, C., Kallstenius, P., & Reppen, L. (2008). *Så byggdes husen 1880-2000 : Arkitektur, konstruktion och material i våra flerbostadshus under 120 år* (6 uppl.). Stockholm: Stockholms stadsbyggnadskontor och Statens råd för byggnadsforskning.

Boström, L., & Jansson, R. (2008). *Self-Compacting Concrete Exposed to Fire.* Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Boverket. (2009). *Så mår våra hus - redovisning av regeringsuppdrag beträffande byggnaders tekniska utformning m.m.* Karlskrona: Boverket.

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics* (3rd uppl.). Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

Dräger. (den 10 12 2014). *Dräger UCF 7000*. Hämtat från Dräger: http://www.draeger.com/sites/assets/PublishingImages/Products/cre_ucf_7000/Attachments/ucf_7000_pi_9046852_en.pdf

FLIR. (2008). *http://www.termogram.cz/.* Hämtat från IR Thermography Primer: http://www.termogram.cz/pdf/thermography_primer.pdf

FLIR. (den 19 12 2014). *FLIR*. Hämtat från FLIR: http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/IND_001/IND_001_EN.pdf

FLIR. (den 27 10 2014). *FLIR Systems Inc*. Hämtat från FLIR: http://www.flir.se/instruments/display/?id=54865

Huda, N. A., & Taib, S. B. (2012). *Analysis and Prediction of Temperature of Electrical Equipment for Infrared Diagnosis Considering Emissivity and Object to Camera Distance Setting Effect.* Nibong Tebal: School of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Sains Malaysia.

Hyll, C. (2012). *Infrared Emittance of Paper - Method Development, Measurements and Application.* Stockholm: The Royal Institute of Technology. ISSN 1650-1888.

ISO. (1995). *ISO/WD 13390, Subsystem 1: Initiation and development of fire and fire effluents.* Berlin: International Organization for Standardization.

Johansson, L. (2008). *Energieffektivisering av flerbostadshus från 1940-talet - en fallstudie av Ribevägen 1 i Malmö.* Lund: Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds universitet.

Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics.* Boca Raton: CRC Press LLC. ISBN: 0-8493-1300-7

KIMO. (den 08 12 2014). *Mätinstrument för Industri & VVS*. Hämtat från KIMO: http://www.kimo.se/produktinfo.asp?meny=handinstrument&artikelnr=71733

Klason, L.-G., & Johansson, N. (2011). *Fyrverkeripjäser som antändning vid bränder.* Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. SP Rapport 2011:05

Lide, R. D. (2005). CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005. Boca Raton, FL, USA: CRC Press. Hämtat från http://www.fptl.ru/biblioteka/spravo4niki/handbook-of-Chemistry-and-Physics.pdf

Lindström, J., Appel, G., Palmkvist, K., & Bialas, K. (2013). *Förmåga och begränsningar av förekommande släcksystem vid brand i byggnad - fokus på miljöarbete.* MSB.

McGrattan, K., Floyd, J., Hostikka, S., & McDermott, R. (2010). *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide.* Gaithersburg: National Institut of Standards and Technology. NIST Special Publication 1019-5.

Nordling, C. (den 12 09 2014). *Nationalencyklopedin.* Hämtat från NE.se: http://www.ne.se/lang/infraröd-strålning den 12 09 2014

Nystedt, F., & Frantzich, H. (2011). *Kvalitetsmanual för brandtekniska analyser vid svenska kärntekniska anläggningar*. Lunds tekniska högskola, Brandteknik och riskhantering. Lund: Lunds universitet. ISSN: 1402-3504

Palmkvist, K. (den 08 09 2014). Utvecklingsledare, SÄRF. (A. Gudmundsson, & P. Studahl, Intervjuare)

Raytek Corporation. (den 28 11 2014). *IR Education*. Hämtat från Raytek a Fluke Company: http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/IREducation/

Schlessinger, M. (1995). *Infrared Technology Fundementals* (2nd rev. and expanded uppl.). Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-9259-9

Simone Kotthaus, T. E. (2014). Derivation of an urban materials spectral library through emittance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 210.

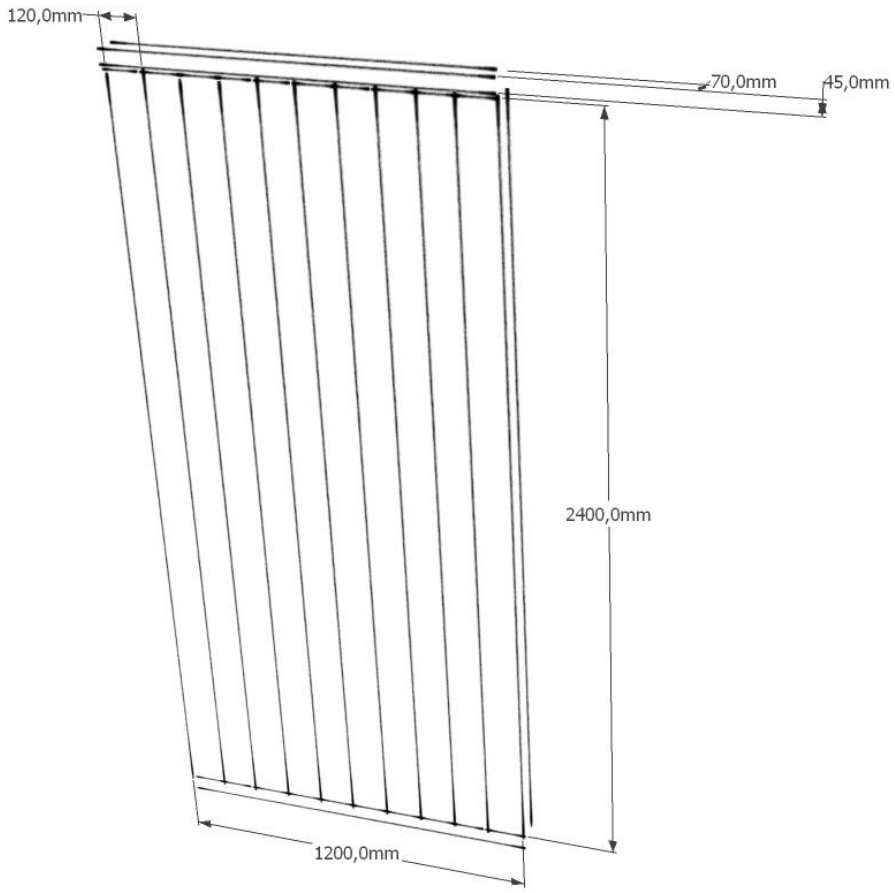
Södra Älvsborgs Räddningstjänstförbund - SÄRF. (2010). *Skärsläckarkonceptets operativa användade.* MSB.

Wickström, U. (2012). *Heat transfer in fire technology.* Luleå: Lulelå tekniska universitet.

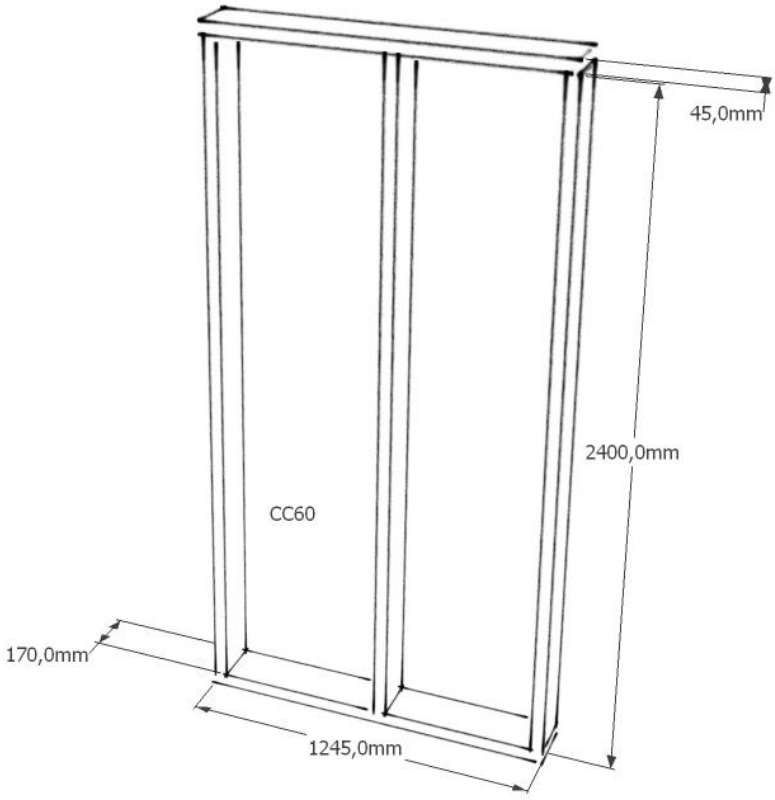
Öhman, C. (den 30 10 2014). *Nationalencyklopedin.* Hämtat från ne.se: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/värmekamera

Bilaga A. Konstruktionsritningar

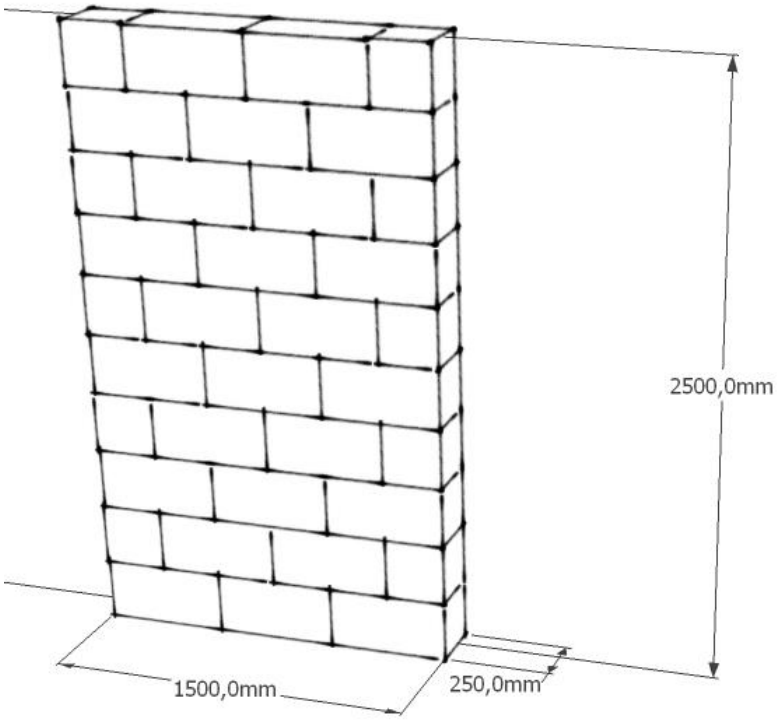
I figur A.1-A.11 visas konstruktionsritningar för de olika delarna i byggnationen. Vissa ritningar har modifierats under tiden väggarna byggts efter behov. Bland annat fick vägg nummer 5 ett antal kortlingar för att lättare kunna fästa plåtfasaden. Samtliga ritningar är gjorda av författarna.



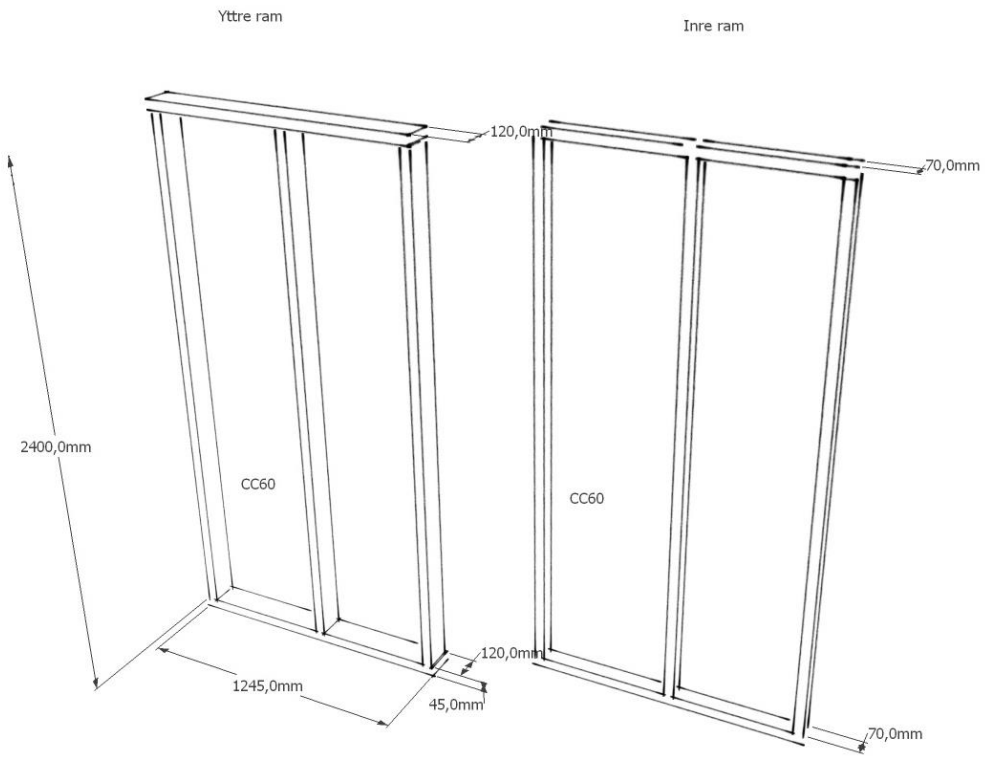
Figur A.1. Konstruktionsritning för vägg nummer 1.



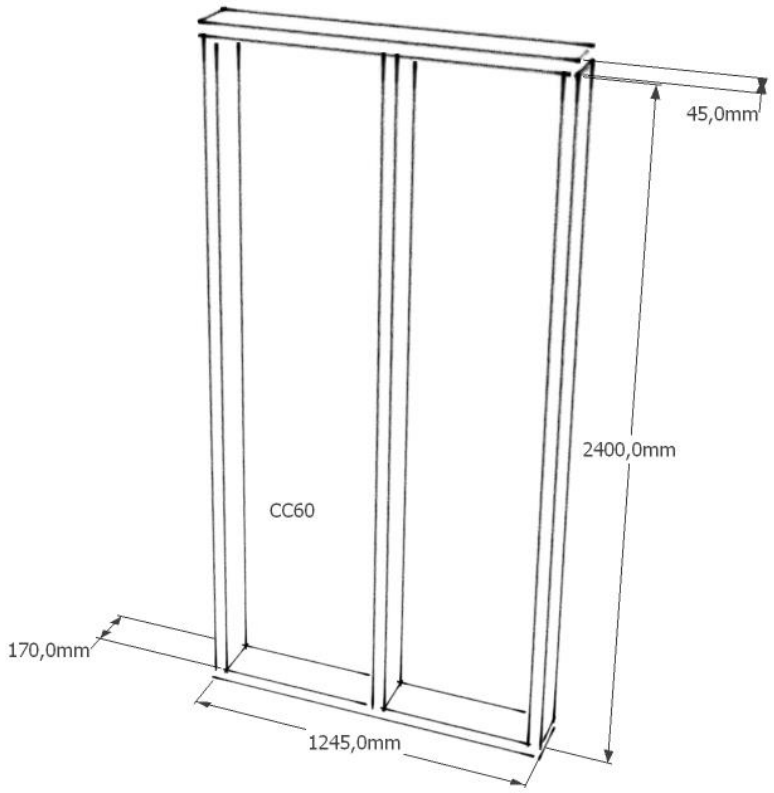
Figur A.2. Konstruktionsritning för vägg nummer 2.



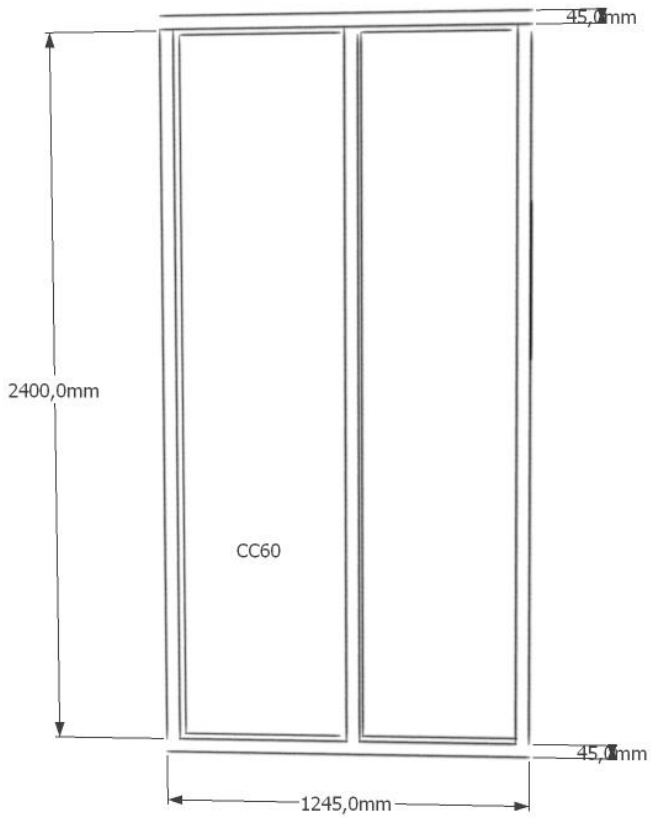
Figur A.3. Konstruktionsritning för vägg nummer 3.



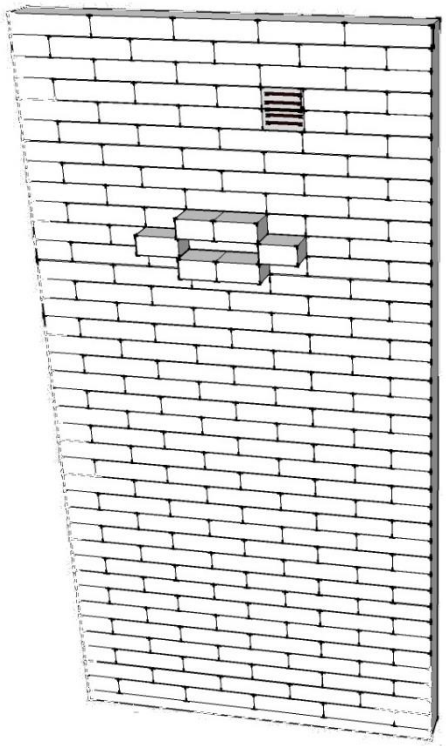
Figur A.4. Konstruktionsritning för vägg nummer 4.



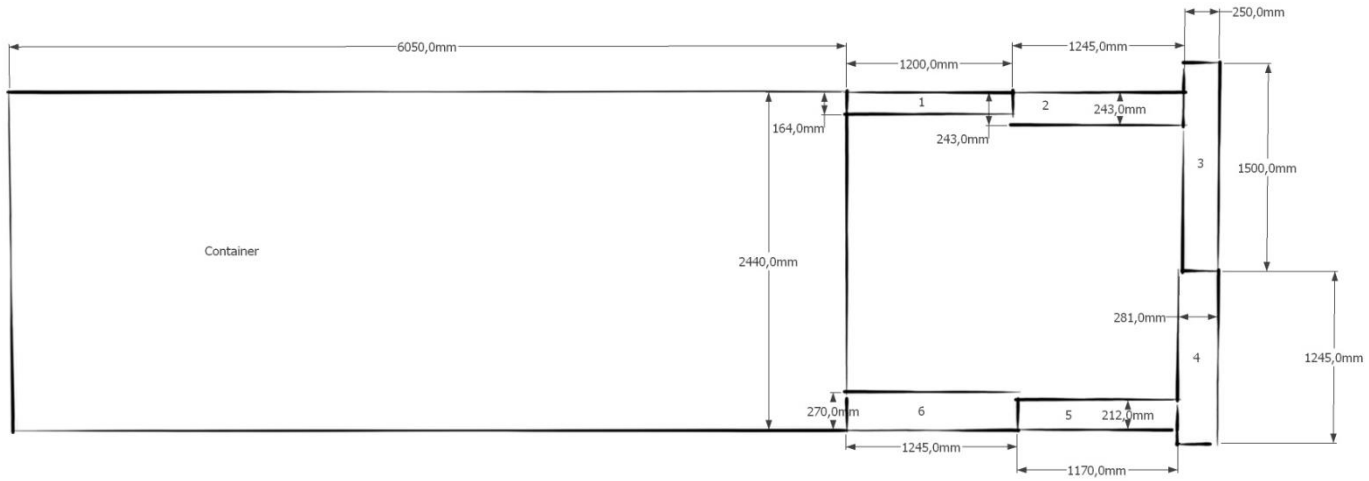
Figur 64. Konstruktionsritning för vägg nummer 5.



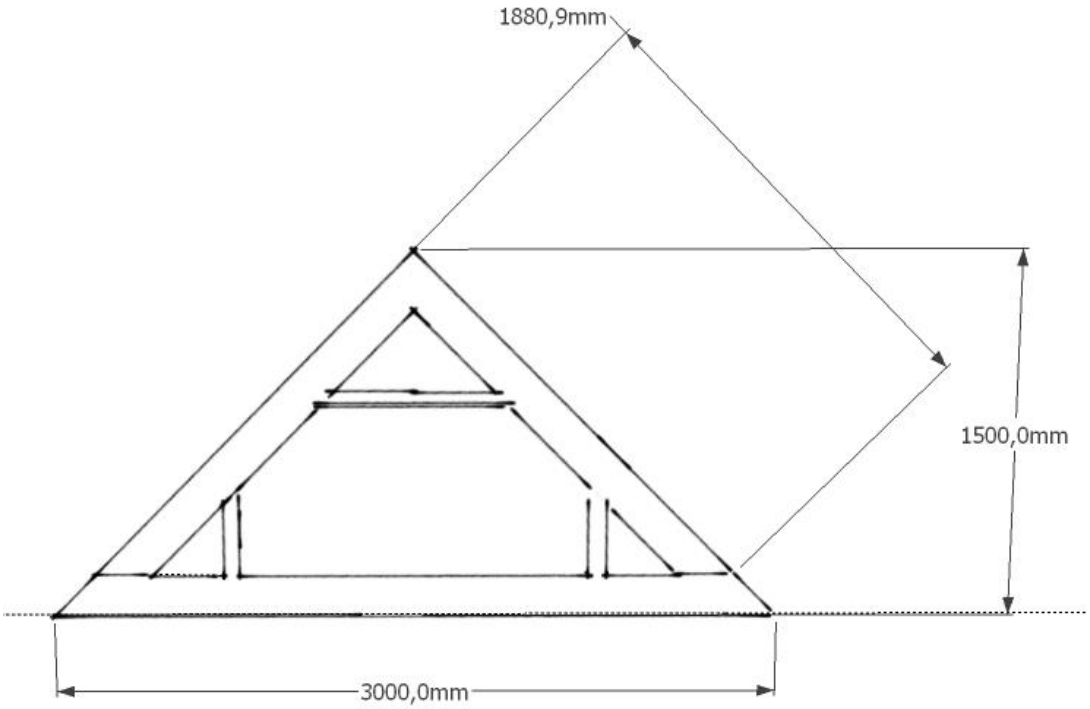
Figur A.665. Konstruktionsritning för vägg numer 6.



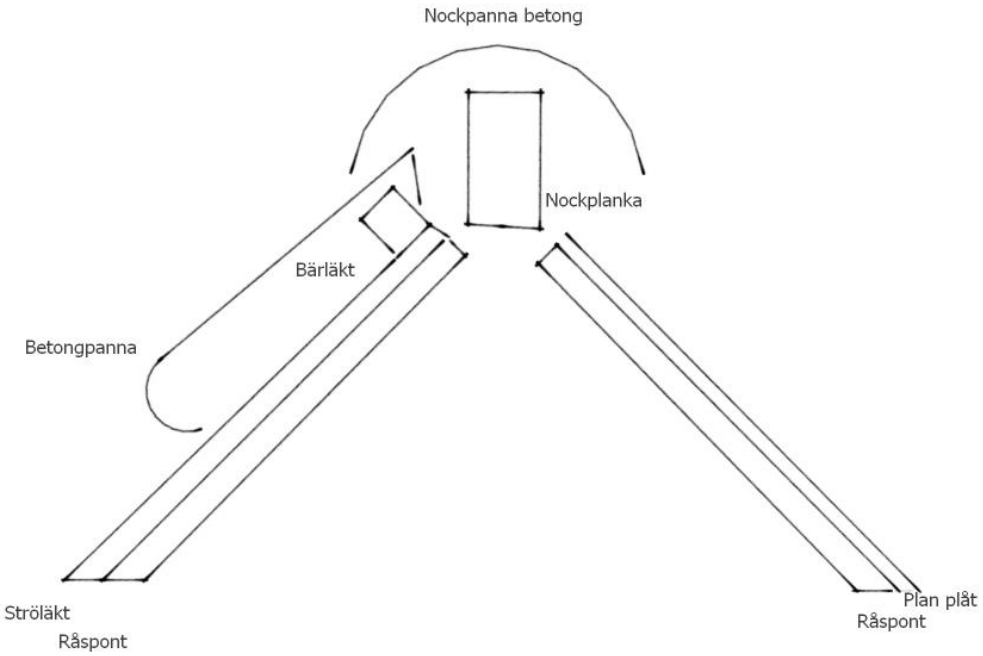
Figur A.7. Fasadtegel för vägg nummer 6 med inlagda detaljer.



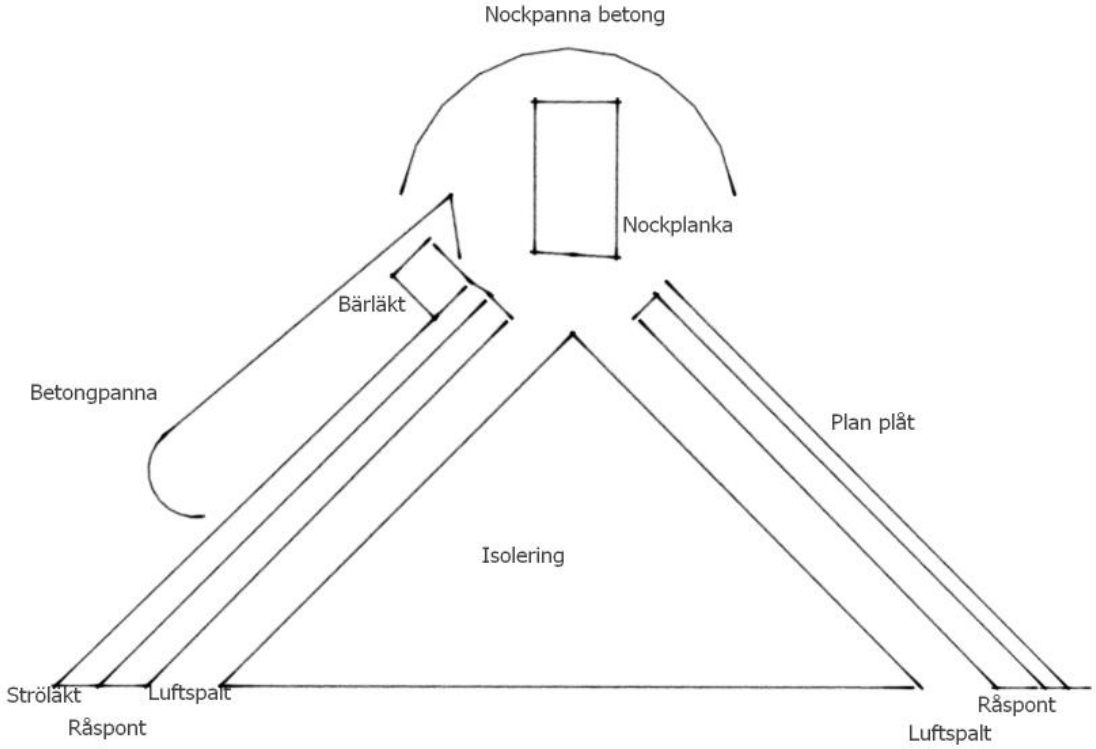
Figur A.8. Ritning över de sex väggarna monterade på containern.



Figur A.9. Konstruktionsritning för en takstol.



Figur A.10. Genomskärning av oisolerad del av taket.



Figur A.11. Genomskärning av isolerad del av taket.

Bilaga B. Tillverkning av material

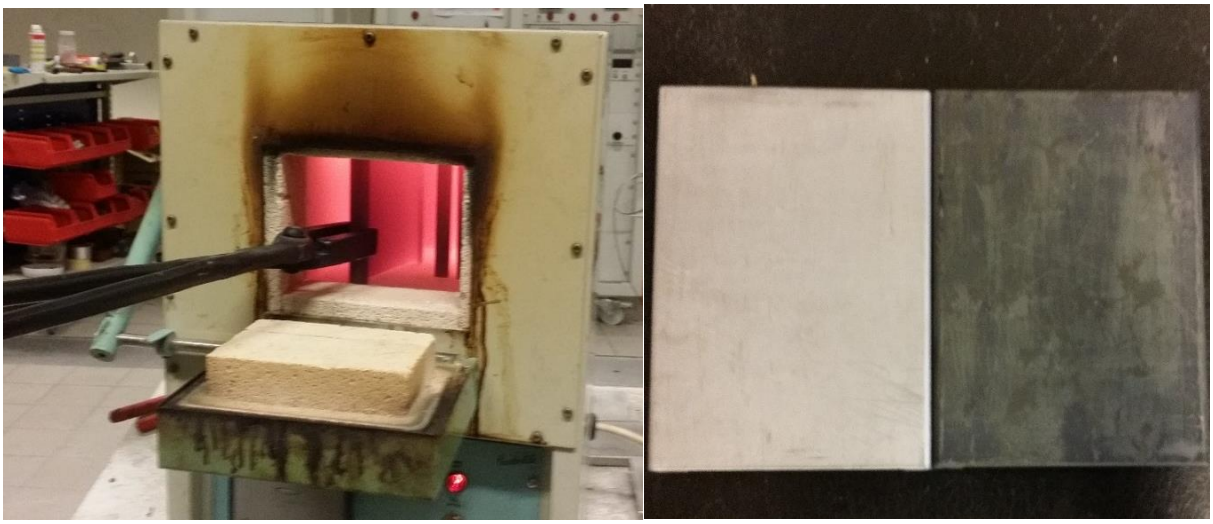
I bilagan redovisas den utrustning och de material som tillverkats.

B.1 Platt-termoelement

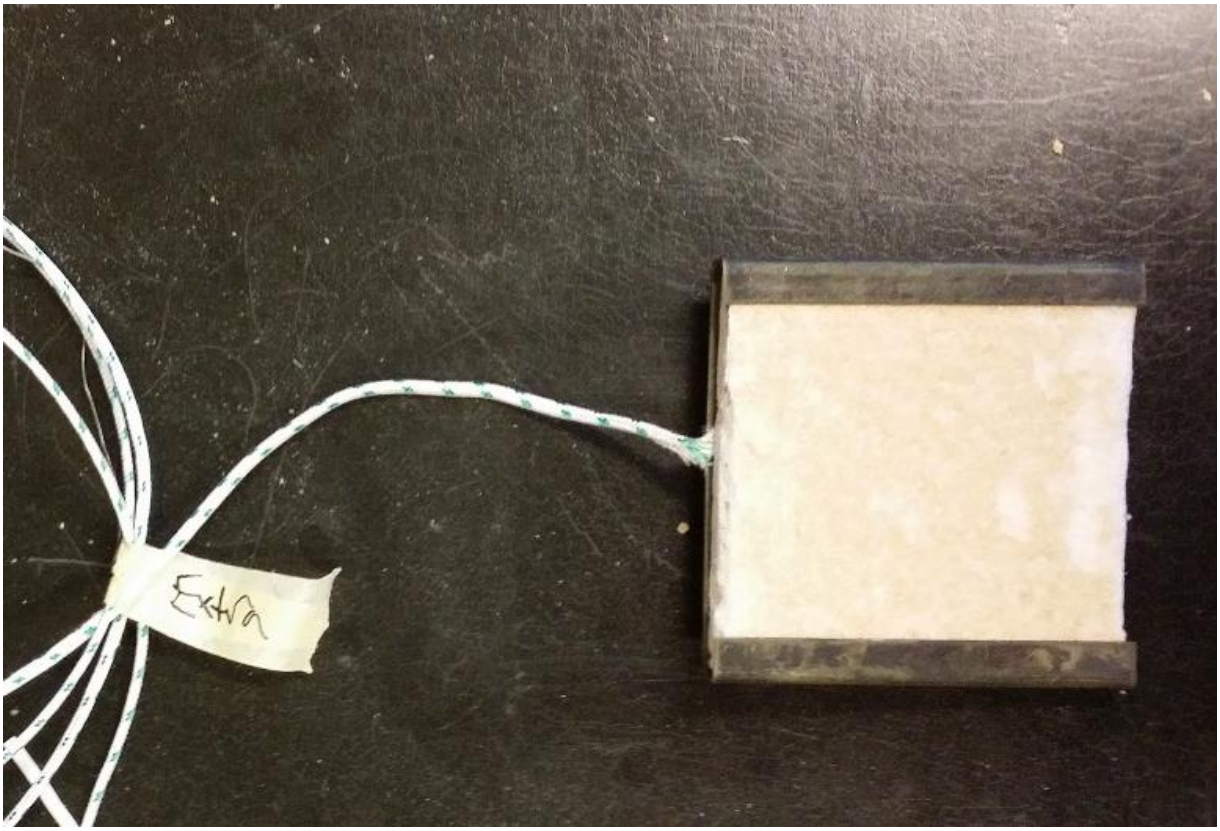
Platt-termoelement som till skillnad från konventionella termoelement tar hänsyn till strålning tillverkades för att likna de element som används i brandprovningsugnar. Platt-termoelementen består av en tunn plåt som bockas, se figur B.1.

Figur B.1. Bockad plåt till platt-termoelement.

För att uppfylla standardkrav från SIS utsätts plåten för 1000 ˚ C under en timmas tid i en muffelugn. Detta görs för att höja emissiviteten på plåten. Termoelement svetsas fast på baksidan av plåten och isoleras med hård isolering, se figur B.2 och B.3.



Figur B.2. Plåtarna i muffelugn till vänster och jämförelsebild före/efter till höger.



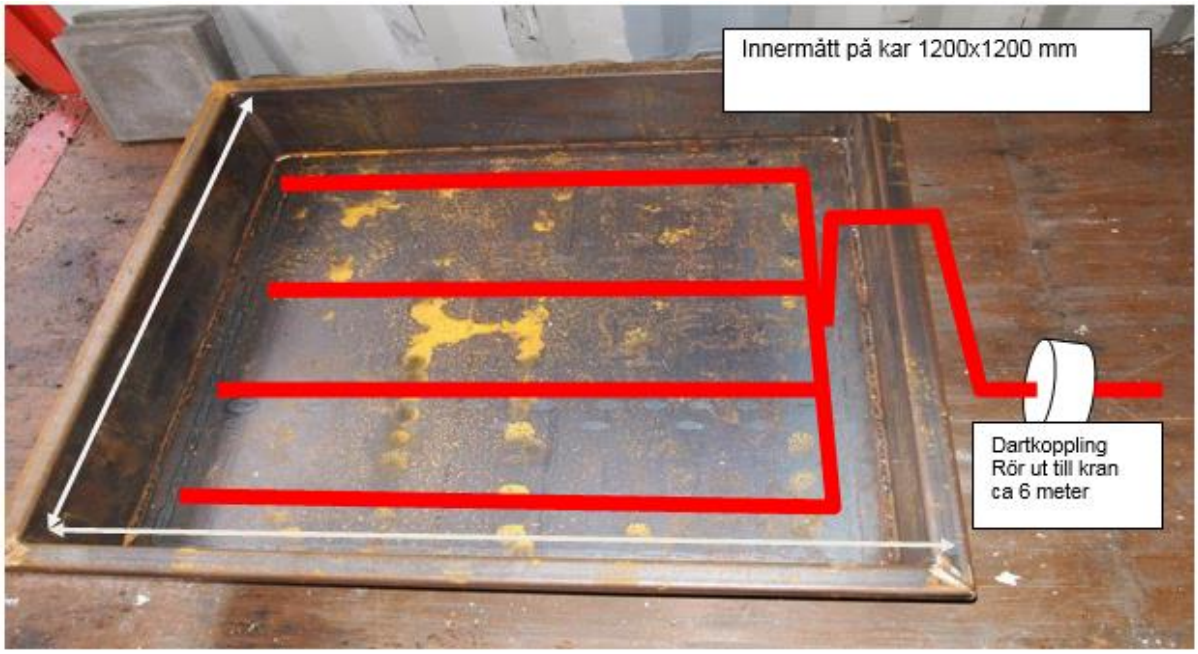
Figur B.3. Färdigt isolerat platt-termoelement.

För att tåla de höga temperaturerna som kan uppstå i brandrummet användes en bättre isolerad termoelementstråd som tål temperaturer upp till cirka 1200 ˚ C på insidan för att sedan skarvas ihop med tunnare tråd på utsidan.

B.2 Brännare

En brännare tillverkades på övningsfältet Guttasjön. En gaffel som gasol kan flöda igenom med hål i sänks ner i ett kar med lecakulor. Med en pilotlåga tänds brännaren och effekten kan sedan styras genom att reglera gasflödet in i gaffeln.

Måttet mellan karets botten och rören på gaffeln är ca 120 mm. Därefter fördelas måttet mellan innerrören så att en jämn fördelning av gasolen uppnås. Hål borras sedan på undersida av gasolgaffeln. För illustration se figur B.4.



Figur B.4. Skiss över brännargaffel i kar (illustration SÄRF, används med tillstånd).

Nivåskillnaden mellan karets botten och ner till golvet är ca 80 mm. Karet fylls med lecakulor för att gasen ska fördelas i karet och ge en jämn flamma. Se figur B.5 nedan.

Figur B.5. Bild på karet brännargaffeln ska ligga i (illustration SÄRF, används med tillstånd).

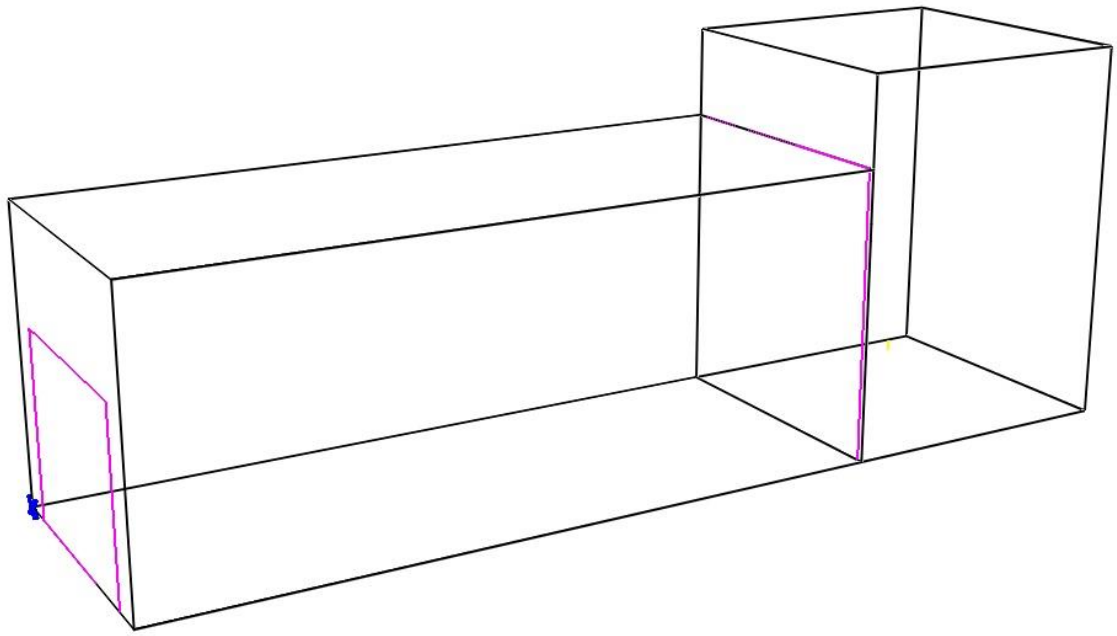
En bild på den färdiga brännaren återfinns i kapitel 4.2.3.

Bilaga C. Simuleringar

Nedan beskrivs de simuleringar som gjorts inför försöket i CFAST och FDS.

C.1 CFAST

För att få en första uppfattning om det massflöde och den öppningsstorlek som krävs genomfördes fem simuleringar i CFAST. För teori kring CFAST se bilaga H. Eftersom det endast är möjligt att rita upp rektangulära geometrier i CFAST ritades taket på utbyggnaden om till ett platt tak på höjden 3,15 m som ger motsvarande volym, se figur C.1. Brännaren placerades i mitten av utbyggnaden 0,4 m från marken. Öppningen på containerns kortsida gavs höjden 1,5 m och bredden 1,8 m och containerns material angavs vara 1/8 tum tjockt stål. För detaljerad indata till CFAST se kapitel C.1.1.

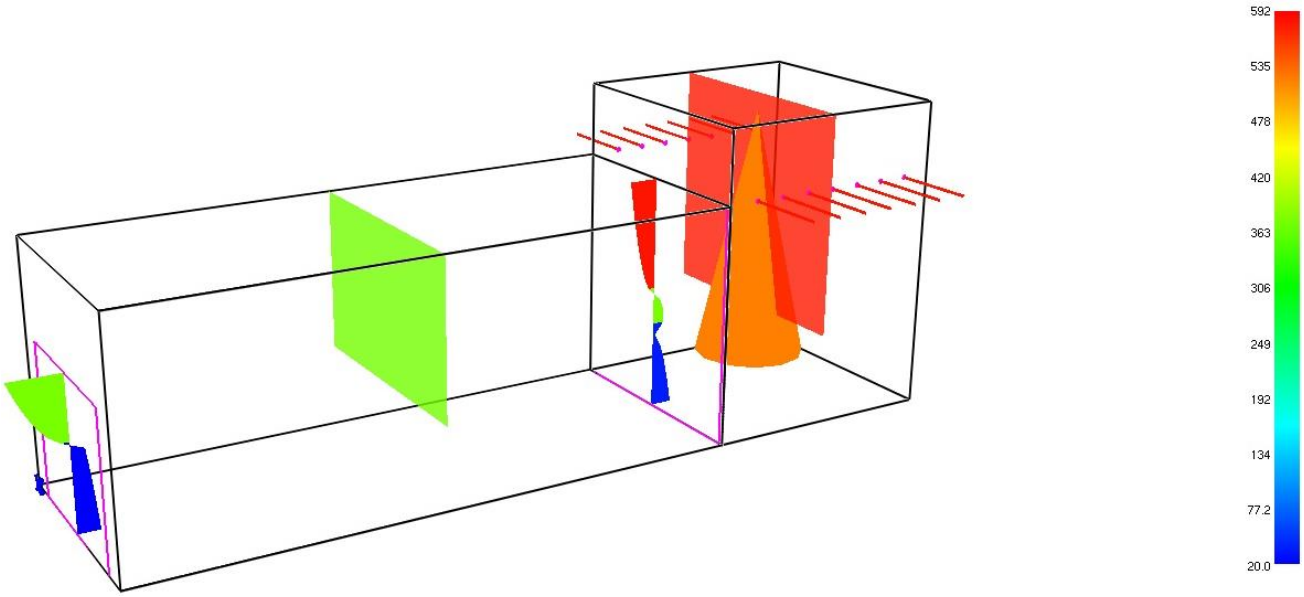


Figur C.1. Geometri i CFAST.

I det första försöket (grunduppställningen) användes en eld med effekten 1,5 MW, tak och väggar i utbyggnaden utformades som gips och ventilationen i takfoten togs ej med. Därpå följde tre försök där dessa tre parametrar byttes ut en i taget för att avgöra vilka som hade avgörande effekt på brandgaslagrets höjd och dess temperatur. I tabell C.1 nedan framgår att takfotsventilationen knappt gjorde någon skillnad, att isoleringen hade viss påverkan och att eldens effekt var den mest avgörande faktorn. Slutligen genomfördes en simulering med 1 MW effekt, isolering i väggar och tak samt ventilation i takfoten som ansågs vara mest likt den verkliga situationen. Det sista försöket gav en önskvärd temperatur och en temperaturslice visas i figur C.2 nedan.

Tabell C.1. Temperatur och brandgaslagrets höjd för de olika simuleringarna.

Försök	Temperatur i ”Upper Layer” i utbyggnaden[˚C]	”Layer Height” i utbyggnaden[m]
1. Grunduppställning	701	0,77
2. -med takfotsvent.	697	0,78
3. -med isolering	746	0,78
4. -med 1 MW	555	0,90
5. Med 1 MW, isolering,takfotsvent.	591	0,91



Figur C.2. Temperaturslice för simulering fem.

C.1.1 Indata till försök 5 i CFAST

Nedan redovisas indatan som användes för försök 5 I CFAST.

OVERVIEW

Compartments Doors, ... Ceil. Vents, ... MV Connects

2 16 0 0

Simulation Output History Smokeview Spreadsheet

Time Interval Interval Interval Interval

(s) (s) (s) (s) (s)

3600 50 0 0 10

Ceiling jet is on for all

AMBIENT CONDITIONS

Interior Interior Exterior Exterior Station Wind Wind Wind

Temperature Pressure Temperature Pressure Elevation Speed Ref. Height Power

(C) (Pa) (C) (Pa) (m) (m/s) (m)

20. 101300. 20. 101300. 0.00 0.0 10.0 0.16

COMPARTMENTS

Compartment Name Width Depth Height Area Volume Ceiling Floor

(m) (m) (m) (m^2) (m^3) (m) (m)

---

1 Compartment 1 2.40 6.00 2.40 14.40 34.56 2.40 0.00

2 Compartment 2 2.40 2.40 3.15 5.76 18.14 3.15 0.00

VENT CONNECTIONS

Horizontal Natural Flow Connections (Doors, Windows, ...)

From To Vent Width Sill Soffit Abs. Abs. Area

Compartment Compartment Number Height Height Sill Soffit

(m) (m) (m) (m) (m) (m^2)

Compartment 1 Compartment 2 1 2.35 0.00 2.40 0.00 2.40 5.64

Compartment 1 Outside 1 1.80 0.00 1.50 0.00 1.50 2.70

Compartment 2 Outside 1 0.03 2.40 2.43 2.40 2.43 0.00

Compartment 2 Outside 2 0.03 2.40 2.43 2.40 2.43 0.00

Compartment 2 Outside 3 0.03 2.40 2.43 2.40 2.43 0.00

Compartment 2 Outside 4 0.03 2.40 2.43 2.40 2.43 0.00

There are no vertical natural flow connections

There are no mechanical flow connections

THERMAL PROPERTIES

Compartment Ceiling Wall Floor

Compartment 1 STEEL1/8 STEEL1/8 OFF

Compartment 2 GLASFIBR GLASFIBR OFF

FIRES

Name: 1 MW Referenced as object # 1

Compartment Fire Type Position (x,y,z) Relative Lower O2 Pyrolysis

Humidity Limit Temperature

Compartment 2 Constrained 1.20 1.20 0.40 50.0 10.00 293.

Time Fmass Hcomb Fqdot Fhigh C/CO2 CO/CO2 H/C O/C HCN HCL CT TS

(s)	(kg/s)	(J/kg)	(W)	(m)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)
0.	0.0	5.00E+07	0.0	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3.	2.00E-04	5.00E+07	1.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
6.	8.00E-04	5.00E+07	4.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
9.	1.80E-03	5.00E+07	9.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
12.	3.20E-03	5.00E+07	1.60E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
15.	5.00E-03	5.00E+07	2.50E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
18.	7.20E-03	5.00E+07	3.60E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
20.	9.80E-03	5.00E+07	4.90E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
23.	1.28E-02	5.00E+07	6.40E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
26.	1.62E-02	5.00E+07	8.10E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
29.	2.00E-02	5.00E+07	1.00E+06	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3529.	2.00E-02	5.00E+07	1.00E+06	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3532.	1.62E-02	5.00E+07	8.10E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3535.	1.28E-02	5.00E+07	6.40E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3538.	9.80E-03	5.00E+07	4.90E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3541.	7.20E-03	5.00E+07	3.60E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3544.	5.00E-03	5.00E+07	2.50E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3547.	3.20E-03	5.00E+07	1.60E+05	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3550.	1.80E-03	5.00E+07	9.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3553.	8.00E-04	5.00E+07	4.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3556.	2.00E-04	5.00E+07	1.00E+04	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3559.	3.57E-14	5.00E+07	1.78E-06	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
3569.	0.0	5.00E+07	0.0	0.0	1.00E-02	1.00E-02	0.33	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0

C.2 FDS

Efter en första koll med CFAST-simuleringar användes FDS 5.5.3 för en noggrannare analys. För teori kring FDS se bilaga H. Från simuleringarna i CFAST bedömdes en effektutveckling på 1 MW vara lämplig för försöket. För att beräkna hur stort massflöde av gasol som krävs för att uppnå effekten användes ekvation C.1 (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \chi \cdot \Delta H_C \qquad \text{Ekvation C.1}$$

Där $\dot{Q}$ [kJ/s] är effektutvecklingen, $\dot{m}$ [kg/s] är massavbrinningen, χ [-] är förbränningseffektivitet och ΔH_C [kJ/kg] är ett ämnes förbränningsvärme (Karlsson & Quintiere, 2000). Med ΔH_C = 46450 kJ/kg för propan (Drysdale, 2011) och antagandet χ = 0,7 (Karlsson & Quintiere, 2000) beräknas massflödet till $\dot{m}$ = 0,031 kg/s. Med en brännarstorlek på 1,2 x 1,2 meter blir massflödet per kvadratmeter 0,021 kg/m^{2}s. För en känslighetsanalys testades också effekten 1,5 MW vilket innebär ett massflöde per kvadratmeter på 0,032 kg/m^{2}s. Dessutom användes tre olika storlekar på dörröppningar vilket innebär totalt 4 olika simuleringar, se tabell C.2. Simuleringstiden sattes till 250 sekunder eftersom det ansågs tillräckligt för simuleringens ändamål. Vid denna tid anses temperaturen och brandgaslagrets höjd vara tillräckligt stabil för att kunna bedöma öppningens storlek och brännarens effekt.

Tabell C.2. Effekt och storlek på dörröppning för de olika simulerngarna.

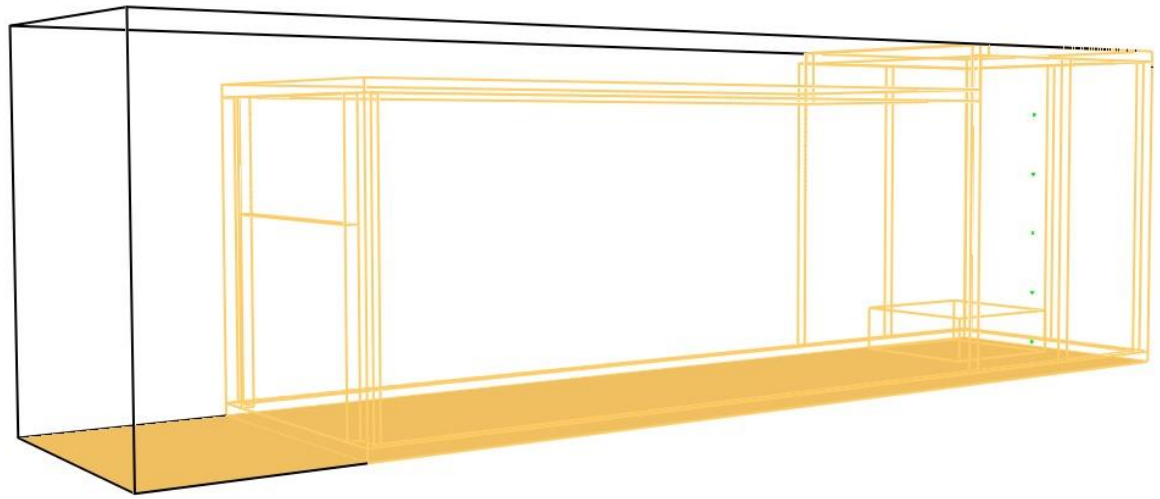
Simulering	Effekt	Dörröppning
1	1 MW	1,8 x 1,5
2	1MW	1,8 x 1,3
3	1MW	1,8 x 1,1
4	1,5MW	1,8 x 1,5

Temperaturen mättes på 5 olika höjder i brandrummet, se tabell C.3

Tabell C.3. Termoelementens höjdplacering.

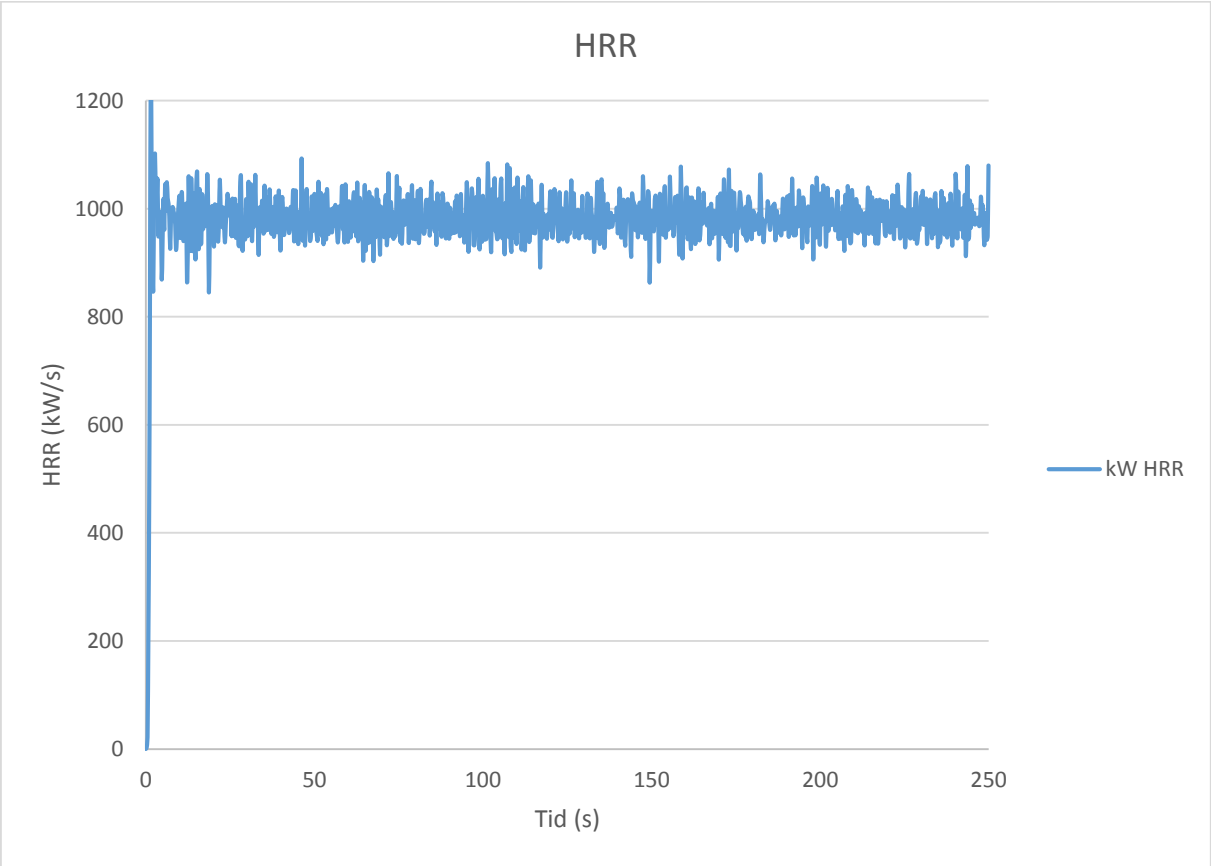
Termoelement	Höjd (m)
T1	0.1
T2	0,6
T3	1,2
T4	1,8
T5	2,4

Förutom termoelementen sattes en temperaturslice in för att underlätta en visuell bedömning av brandgaslagrets höjd. Modellen i FDS med mätpunkter, öppningen i containern och brännarens placering visas i figur C.3. Till containermaterial valdes stål och för de olika väggkonstruktionerna användes mineralull med en tjocklek motsvarande vad de har i verkligheten. Undantaget är vägg nummer 1 och 3 som inte har någon isolering utan istället består av trä respektive lättbetong. Takets isolering sattes till samma som för gavelväggen. Ventilationen i takfoten gav så små förändringar i temperatur i simuleringarna i CFAST att den bortses från. För fullständiga indatafiler se kapitel C.2.2.

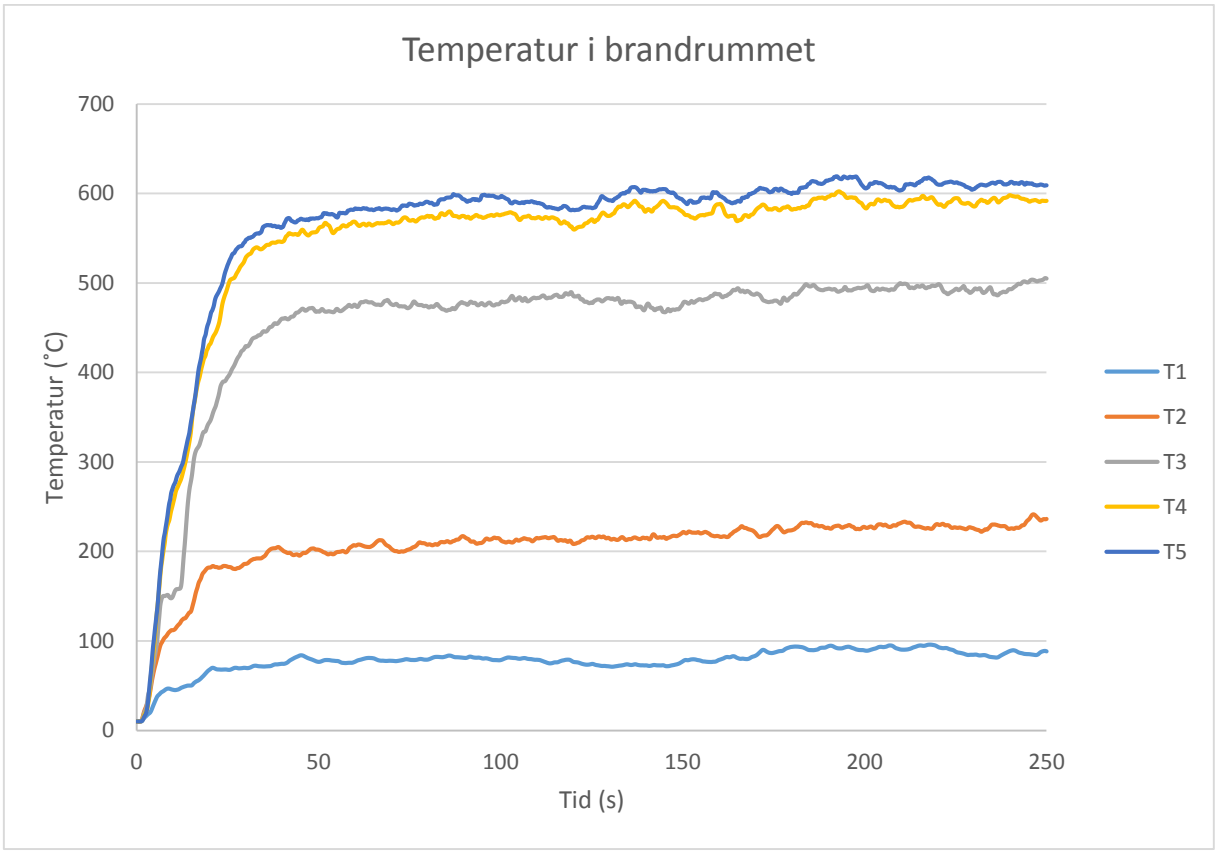


Figur C.3. Geometrin som användes för simuleringar i FDS.

Den simulering som ansågs ge en tillfredsställande temperatur i brandrummet var simulering 2 där effekten var 1MW och dörröppningen 1,8 x 1,3 meter. Effektutvecklingen och temperaturen i de fem mätpunkterna visas i figur C.4 respektive figur C.5.

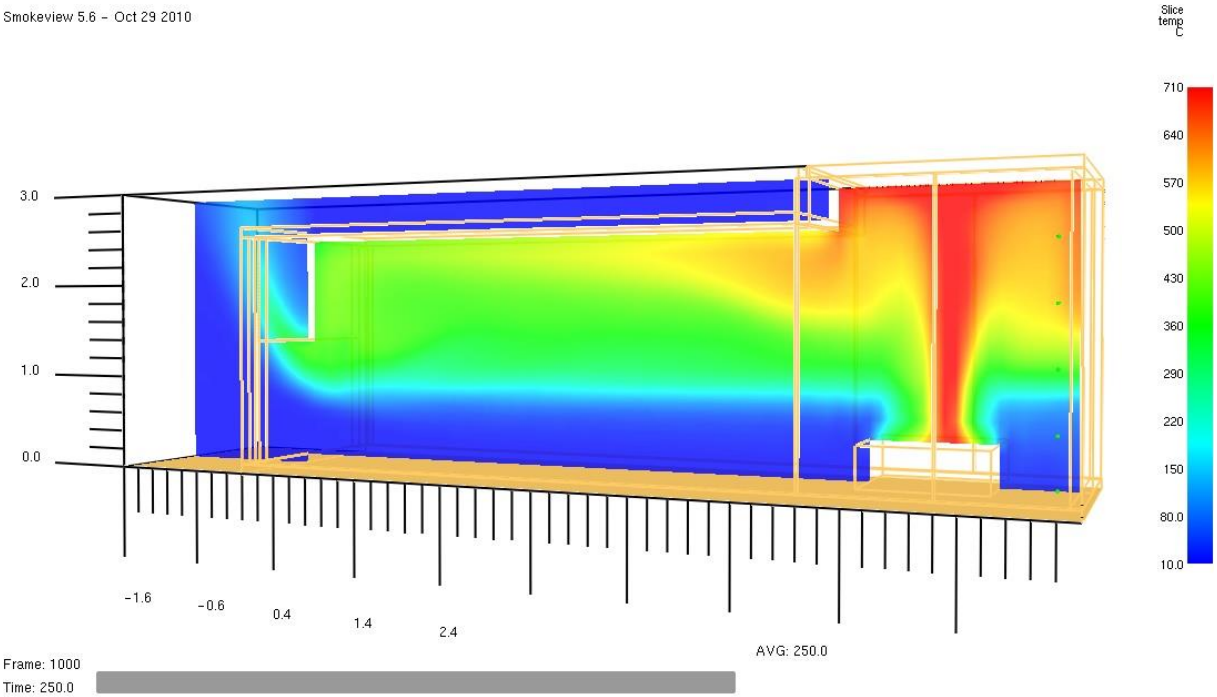


Figur C.4. Effektutvecklingen som en funktion av tiden för simulering 2.



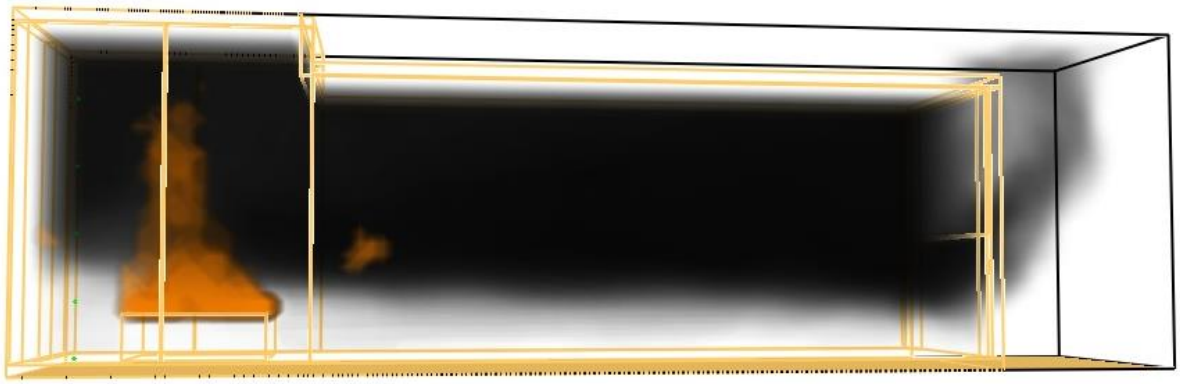
Figur C.5. Temperaturen som en funktion av tiden för simulering 2.

I figur C.6 visas en temperaturslice som visar på vilken nivå brandgaslagret hamnar.



Figur C.6. Temperatureslice för simulering 2.

Vid de olika simuleringarna visade det sig att simuleringen då effekten sattes till 1,5 MW (simulering 4) och simuleringen med 1,8 x 1,1 meter dörröppning (simulering 3) gav en ventilationskontrollerad förbränning. I båda simuleringarna var flamman osammanhängande och flammor slog ut ur dörröppningen, se figur C.7 och figur C.8.

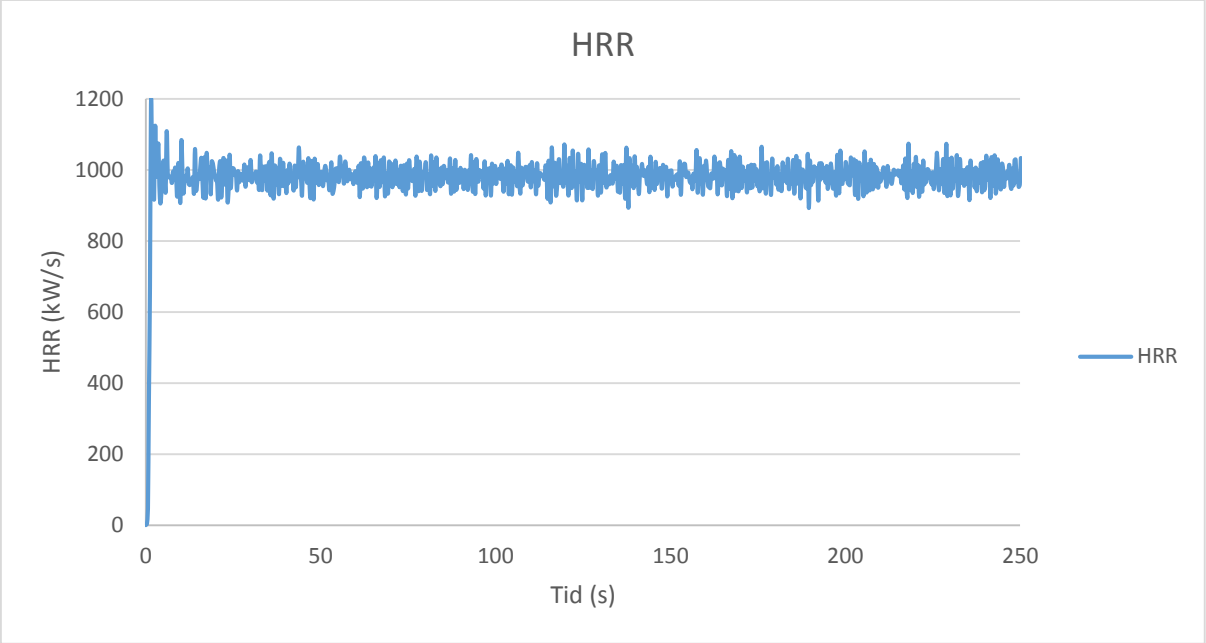


Figur C.7. Osammanhängande flamma från simulering 3.

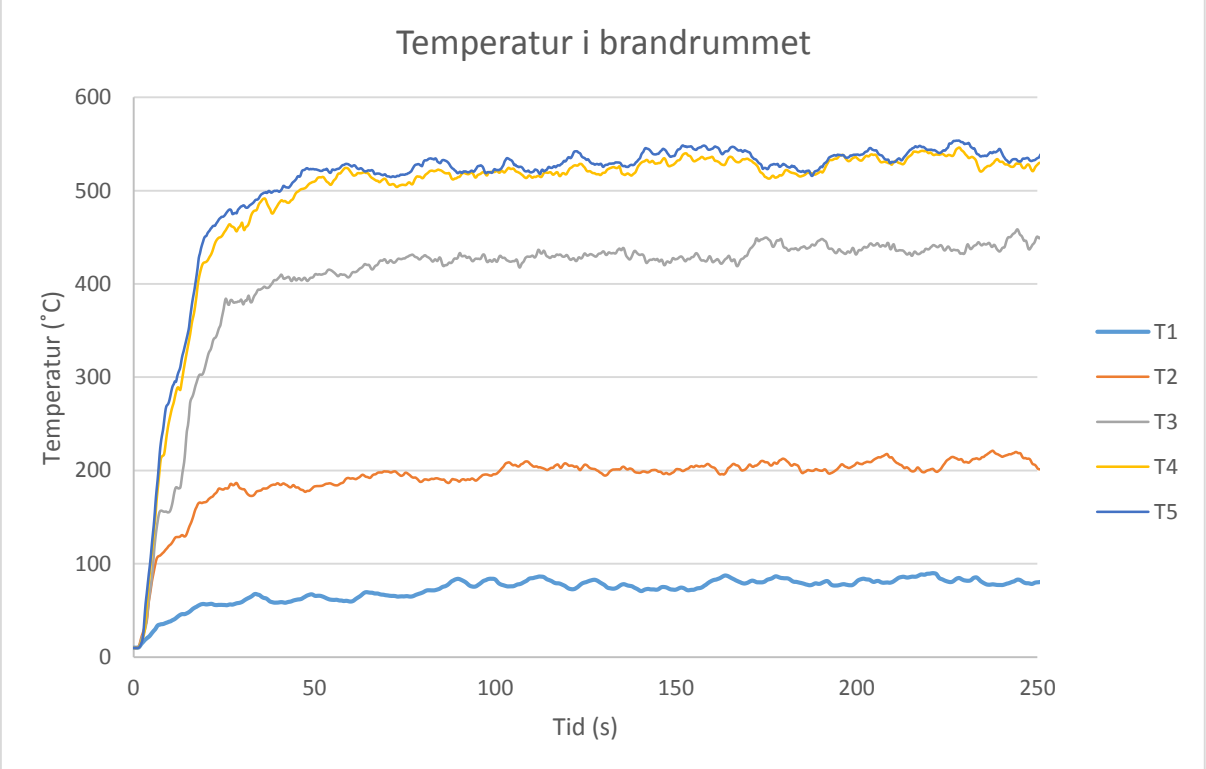
Figur C.8. Osammanhängande flamma från simulering 4.

C.2.1 Resultat för samtliga simuleringar i FDS

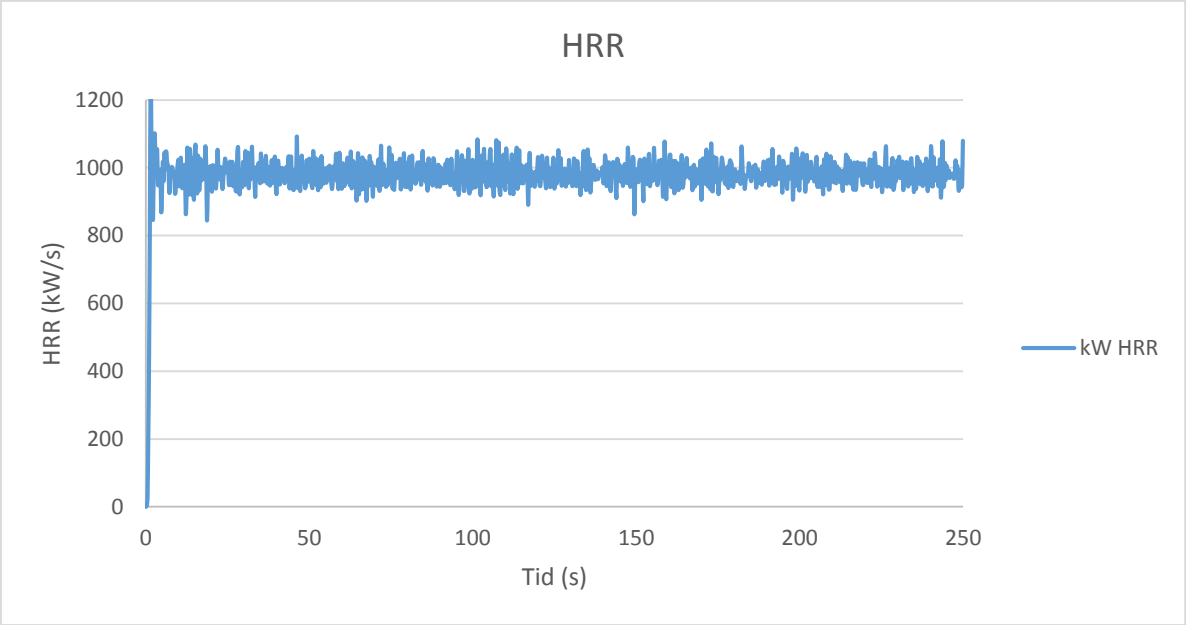
Effektutvecklingen och temperaturen i brandrummet för de olika simuleringarna visas i figur C.9-C.16.



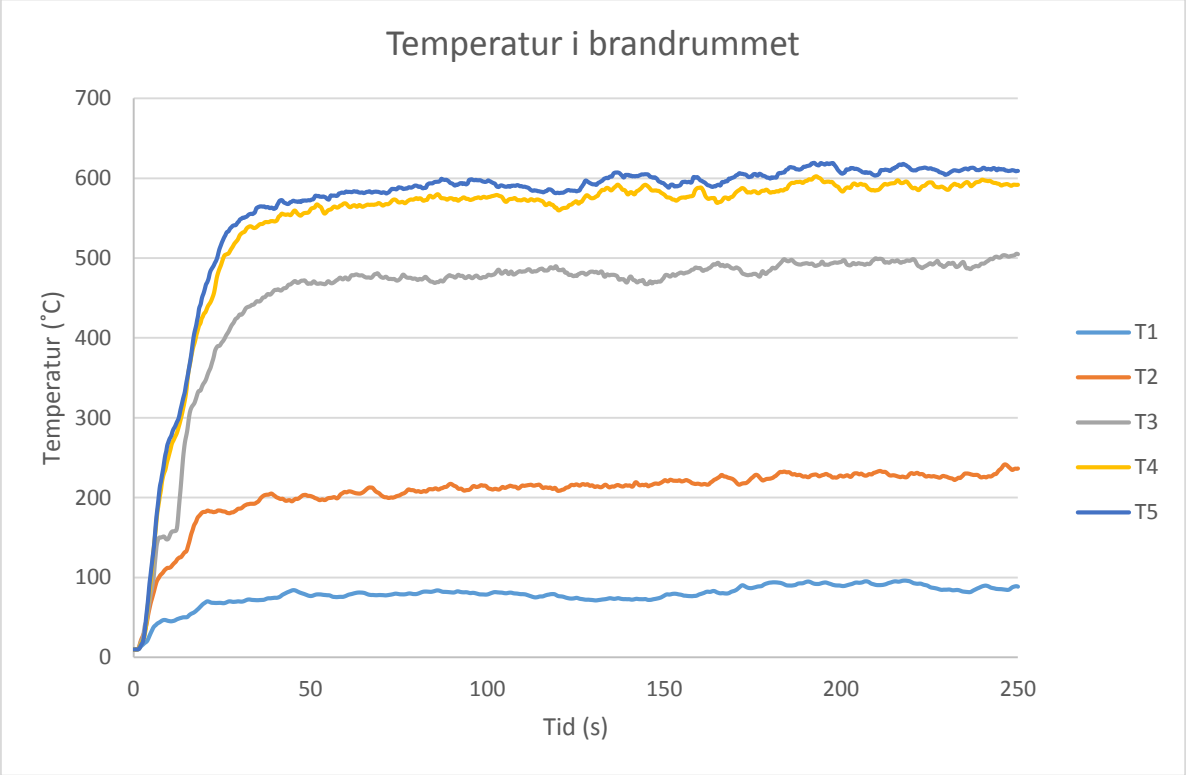
Figur C.9. Effektuveckling som funktion av tiden för simulering 1.



Figur C.10. Temperaturen som funktion av tiden för simulering 1.

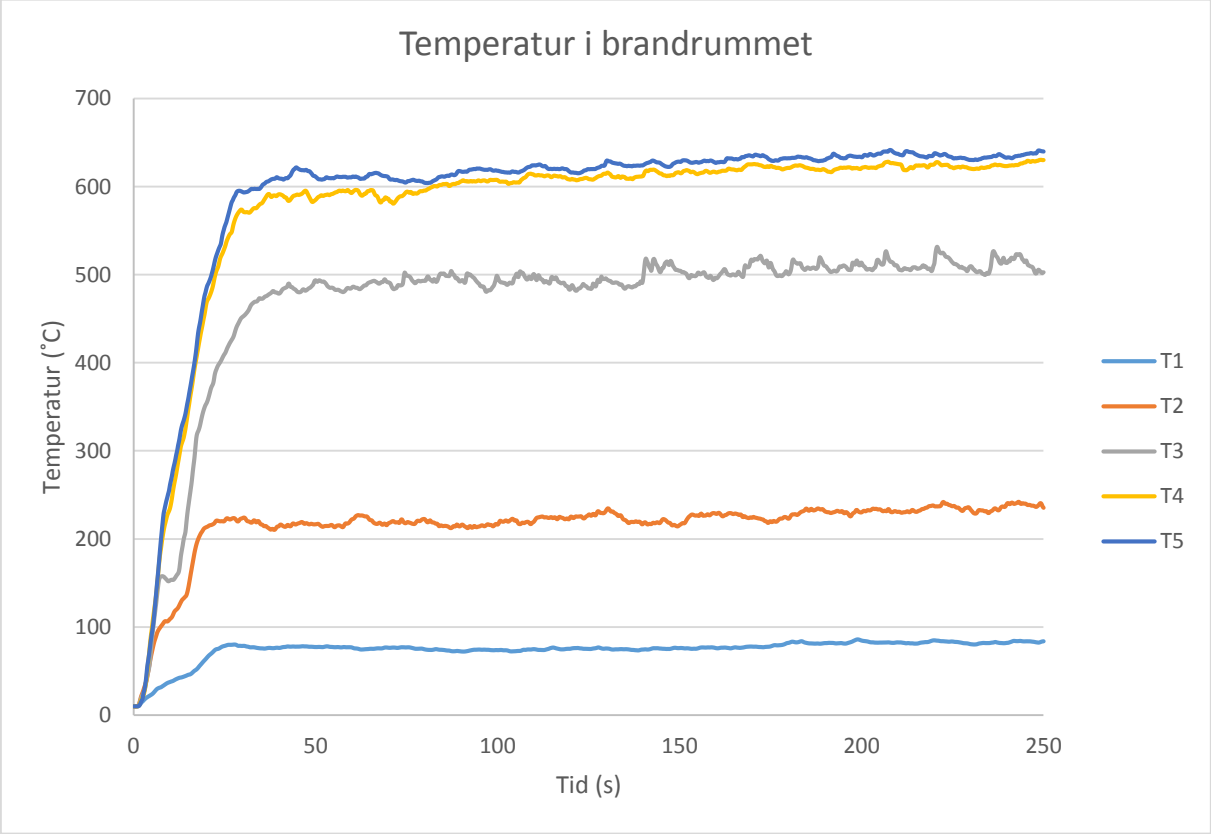


Figur C.11. Effektuveckling som funktion av tiden för simulering 2.

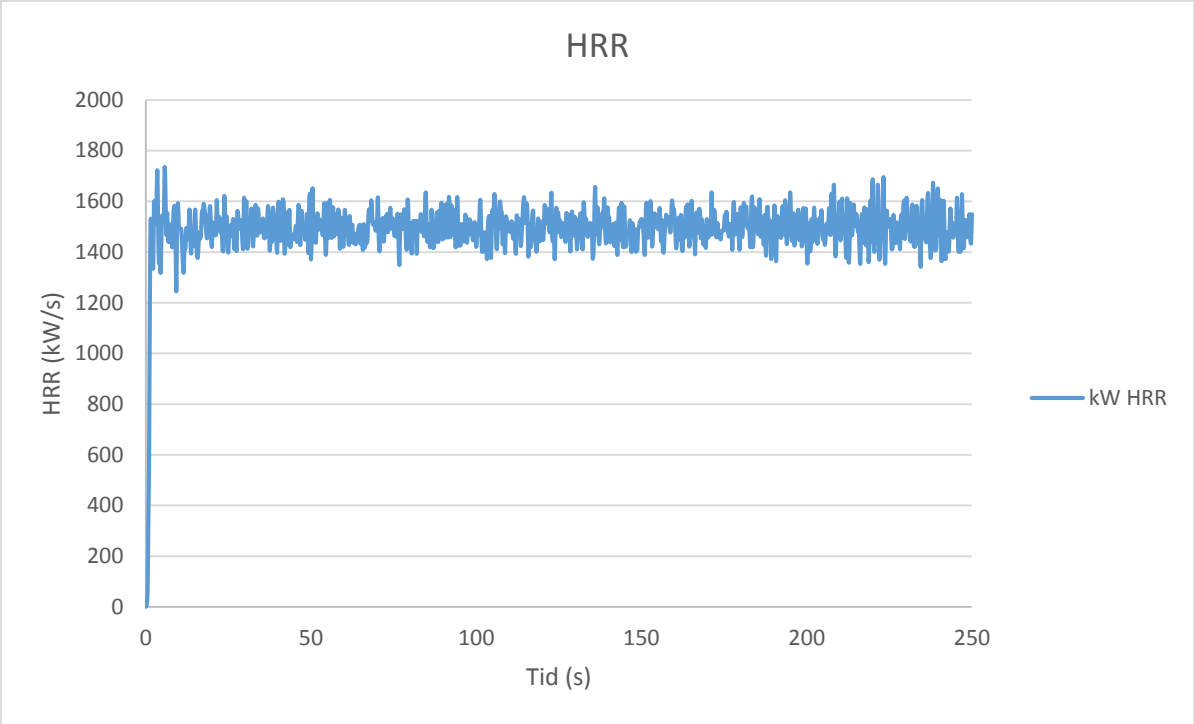


Figur C.12. Temperaturen som funktion av tiden för simulering 2.

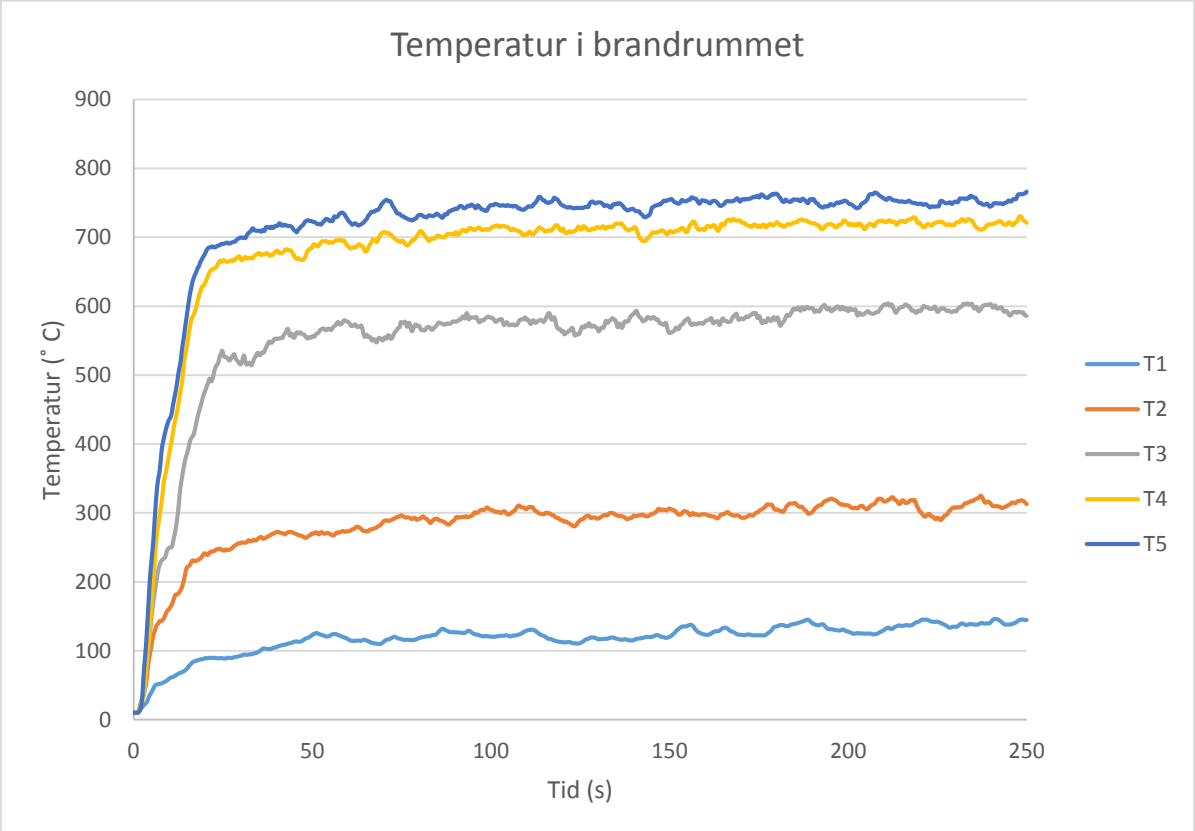
Figur C.13. Effektuveckling som funktion av tiden för simulering 3.



Figur C.14. Temperaturen som funktion av tiden för simulering 3.



Figur C.15. Effektuveckling som funktion av tiden för simulering 4.



Figur C.16. Temperaturen som funktion av tiden för simulering 4.

C.2.2 Indatafil FDS

Nedan redovisas inputfilerna till FDS-simuleringarna. Ändringar mellan de olika simuleringarna är färgade så att simulering 2 är grön, simulering 3 är röd och simulering 4 är lila.

&HEAD CHID= 'Container1MWstoröppning', TITLE='Container1MWstoröppning' /

&HEAD CHID= 'Container1MWmellan', TITLE='Container1MWmellan' /

&HEAD CHID= 'Container1MWliten', TITLE='Container1MWliten' /

&HEAD CHID= 'Container1,5MWstor', TITLE='Container1,5MWstor' /

&MESH IJK= 100, 24, 30, XB= -1.6, 8.4, 0.0, 2.4, 0.0, 3.0 /Cellstrlk 10cm 100*24*30=72000 celler

&TIME T_END=250.0 /

&MISC TMPA=10.0, / Ambient temp 10

&OBST XB=0.0, 0.1, 0.0, 2.4, 0.1, 2.5, SURF_ID='Container' / vägg vänster container

&OBST XB=0.0, 8.4, 0.0, 2.4, 0.0, 0.1, / golv hela ytan

&OBST XB=0.1, 6.0, 0.0, 0.1, 0.1, 2.5, SURF_ID='Container' / vägg nere container

&OBST XB=0.1, 6.0, 2.3, 2.4, 0.1, 2.5, SURF_ID='Container' / vägg uppe container

&OBST XB=0.0, 6.0, 0.0, 2.4, 2.5, 2.6, SURF_ID='Container' / tak container

&OBST XB=6.0, 6.1, 0.1, 2.3, 2.5, 3.0, SURF_ID='Isoleringgavel' / vägg mellan container och utbyggnad

&OBST XB=6.1, 8.4, 0.0, 2.4, 2.9, 3.0, SURF_ID='Isoleringgavel' / tak utbyggnad

&OBST XB=6.0, 7.2, 0.0, 0.1, 0.1, 2.9, SURF_ID='Isolering6' / Vägg 6 tegel

&OBST XB=7.2, 8.4, 0.0, 0.1, 0.1, 2.9, SURF_ID='Isolering5' / Vägg 5 industri

&OBST XB=6.0, 7.2, 2.3, 2.4, 0.1, 2.9, SURF_ID='Trävägg' / Vägg 1 landshövdinge

&OBST XB=7.2, 8.4, 2.3, 2.4, 0.1, 2.9, SURF_ID='Isolering2' / Vägg 2 modern

&OBST XB=8.3, 8.4, 1.2, 2.3, 0.1, 2.9, SURF_ID='lättbetongvägg' / Vägg 3 lättbetong

&OBST XB=8.3, 8.4, 0.1, 1.2, 0.1, 2.9, SURF_ID='Isolering4' / Vägg 4 puts modern

&HOLE XB=-0.1,0.2, 0.3, 2.1, 0.1, 1.4 / Öppning i ände 1,8m*1,5m (bredd*höjd)

&HOLE XB=-0.1,0.2, 0.3, 2.1, 0.1, 1.4 / Öppning i ände 1,8m*1,3m (bredd*höjd)

&HOLE XB=-0.1,0.2, 0.3, 2.1, 0.1, 1.4 / Öppning i ände 1,8m*1,1m (bredd*höjd)

&HOLE XB=-0.1,0.2, 0.3, 2.1, 0.1, 1.4 / Öppning i ände 1,8m*1,5m (bredd*höjd)

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' / Öppet ut till det fria

&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /

&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&REAC ID='propane',

C=3.,

H=8.,

HEAT_OF_COMBUSTION=32515,

IDEAL=.FALSE.

SOOT_YIELD=0.01 / Soot Yield default baserat på propan, heat of combustion Fire Dynamics 46450 med xsi 0,7 ger 32515

&SURF ID='ELDEN', MLRPUA=0.021 ,/Q=mxsiHc Area 1.44 m2 => m= 0,031kg/s => 0,031/1,44= 0,021

&SURF ID='ELDEN', MLRPUA=0.032 ,/Q=mxsiHc Area 1.44 m2 => m=0,06 kg/s => 0,046/1,44= 0,032

&OBST XB=6.4, 7.6, 0.6, 1.8, 0.1, 0.5, SURF_IDS='ELDEN', 'INERT', 'INERT' / brännaren

&SURF ID='Container',

MATL_ID='Stål',

THICKNESS=0.01 /

&MATL ID='Stål',

SPECIFIC_HEAT=0.46,

CONDUCTIVITY=45.8,

EMISSIVITY=0.2,

DENSITY=7850.0 /

&SURF ID='Isolering2',

MATL_ID='Mineralull',

THICKNESS=0.170 /

&SURF ID='Isolering4',

MATL_ID='Mineralull',

THICKNESS=0.190 /

&SURF ID='Isolering5',

MATL_ID='Mineralull',

THICKNESS=0.120 /

&SURF ID='Isolering6',

MATL_ID='Mineralull',

THICKNESS=0.095 /

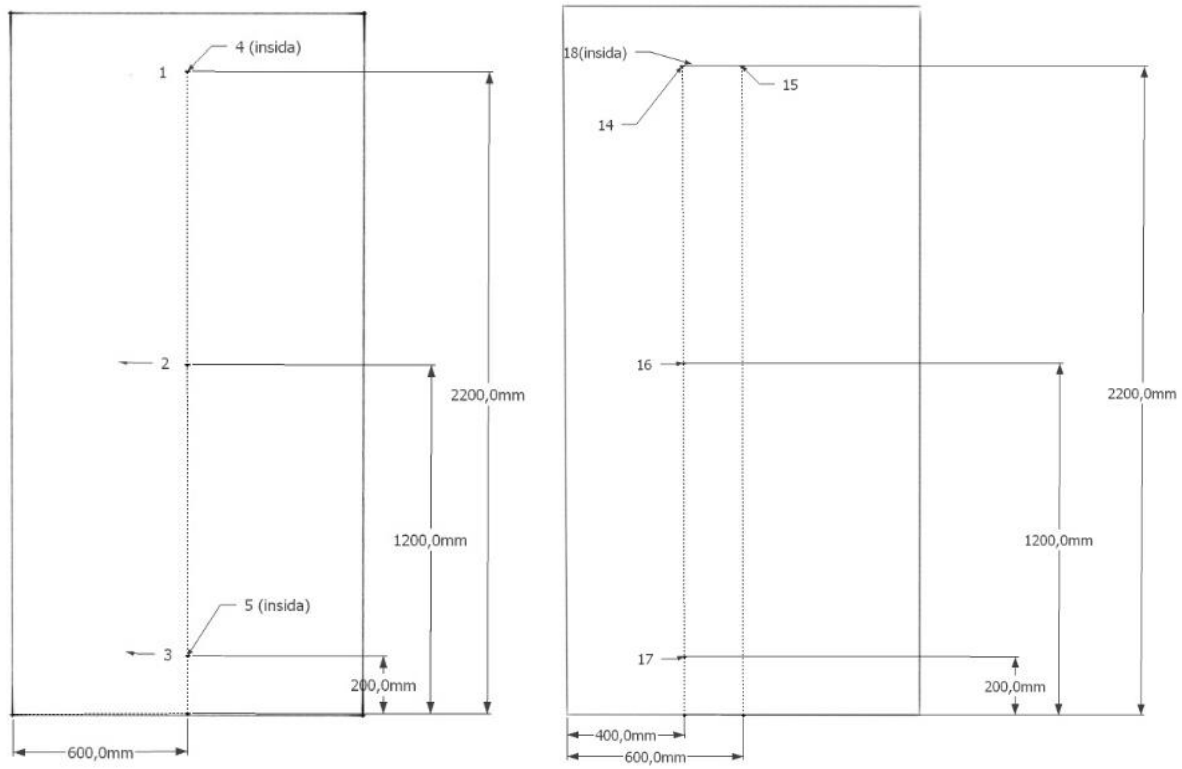
&SURF ID='Isoleringgavel',

MATL_ID='Mineralull',

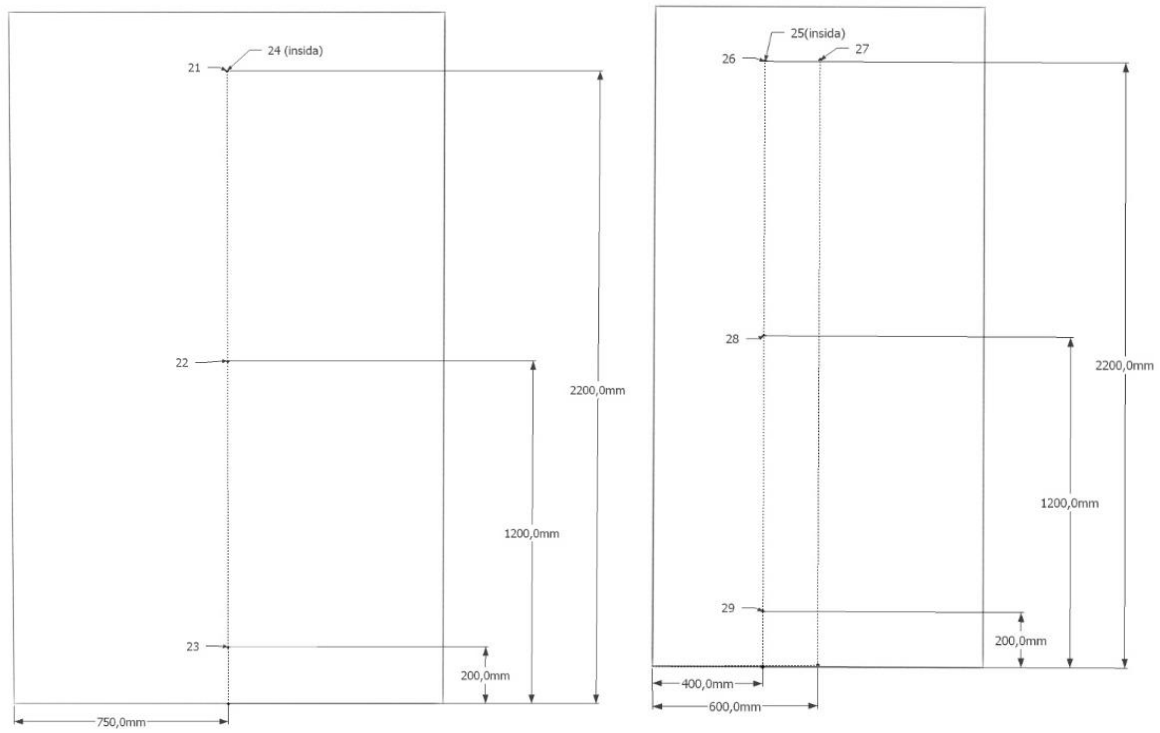
```
    THICKNESS=0.045 /
&MATL ID='Mineralull',
    SPECIFIC_HEAT=0.00084,
    CONDUCTIVITY=0.04,
    EMISSIVITY=0.9,
    DENSITY=45.0 / (http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)(http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)

&SURF ID='lättbetongvägg',
    MATL_ID='Lättbetong',
    THICKNESS=0.250 /
&MATL ID='Lättbetong',
    SPECIFIC_HEAT=1.0,
    CONDUCTIVITY=0.12,
    EMISSIVITY=0.9,
    DENSITY=500.0 /  (http://www.materials.dk/links/D6x4%20L%C3%A4ttbetonghandboken.pdf)

&SURF ID='Trävägg',
    MATL_ID='Trä',
    THICKNESS=0.090 / stående plank plus panel
&MATL ID='Trä',
    SPECIFIC_HEAT=2.85,
    CONDUCTIVITY=0.14,
    EMISSIVITY=0.9,
    DENSITY=640.0 /

&DEVC XYZ=8.1,1.2,0.1, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='TD1' / TEMP I BRANDRUM, 1 NERE
&DEVC XYZ=8.1,1.2,0.6, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='TD2' /
&DEVC XYZ=8.1,1.2,1.2, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='TD3' /
&DEVC XYZ=8.1,1.2,1.8, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='TD4' /
&DEVC XYZ=8.1,1.2,2.4, QUANTITY='THERMOCOUPLE', ID='TD5' /
&SLCF PBY=1.2, QUANTITY='TEMPERATURE' / TEMPERATURSLICE
&TAIL /
```

Bilaga D. Mätpunkters placering

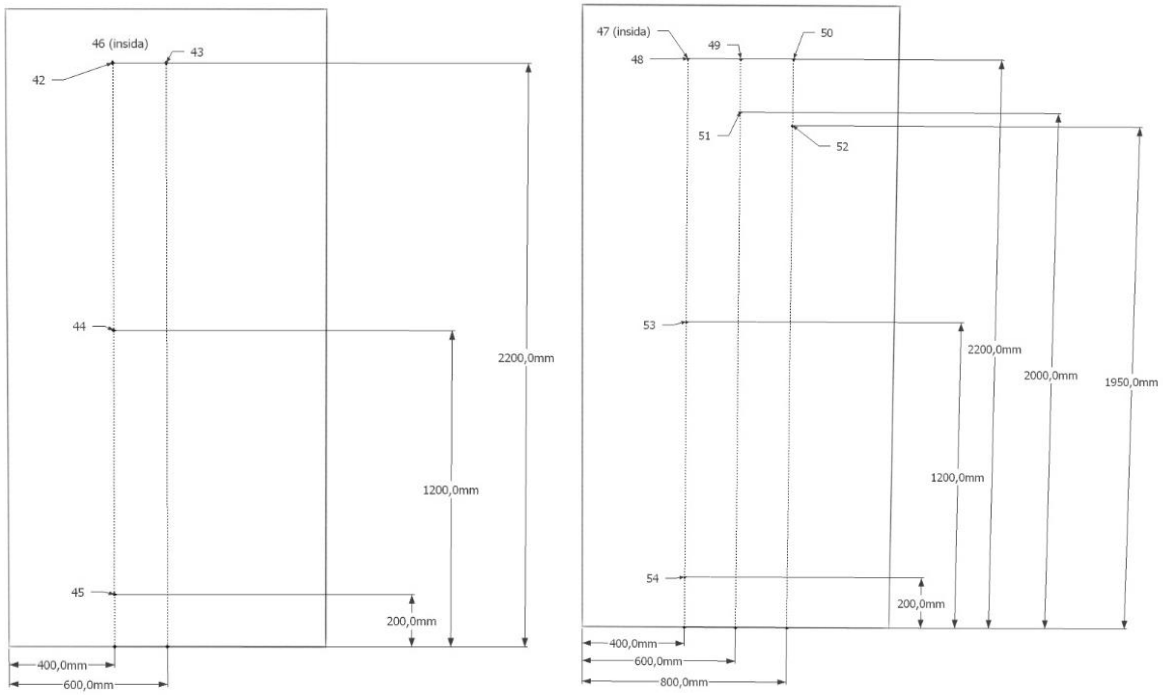
I figur D.1-D.6 visas var termoelementen är uppsatta på respektive vägg och tak.



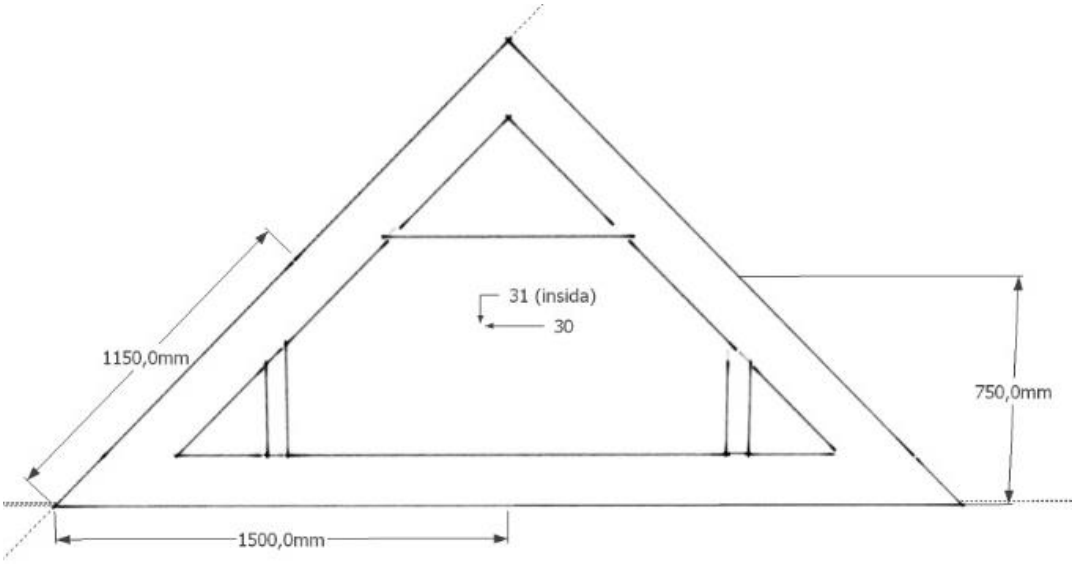
Figur D.1. Termoelementens placering på vägg 1 och 2.



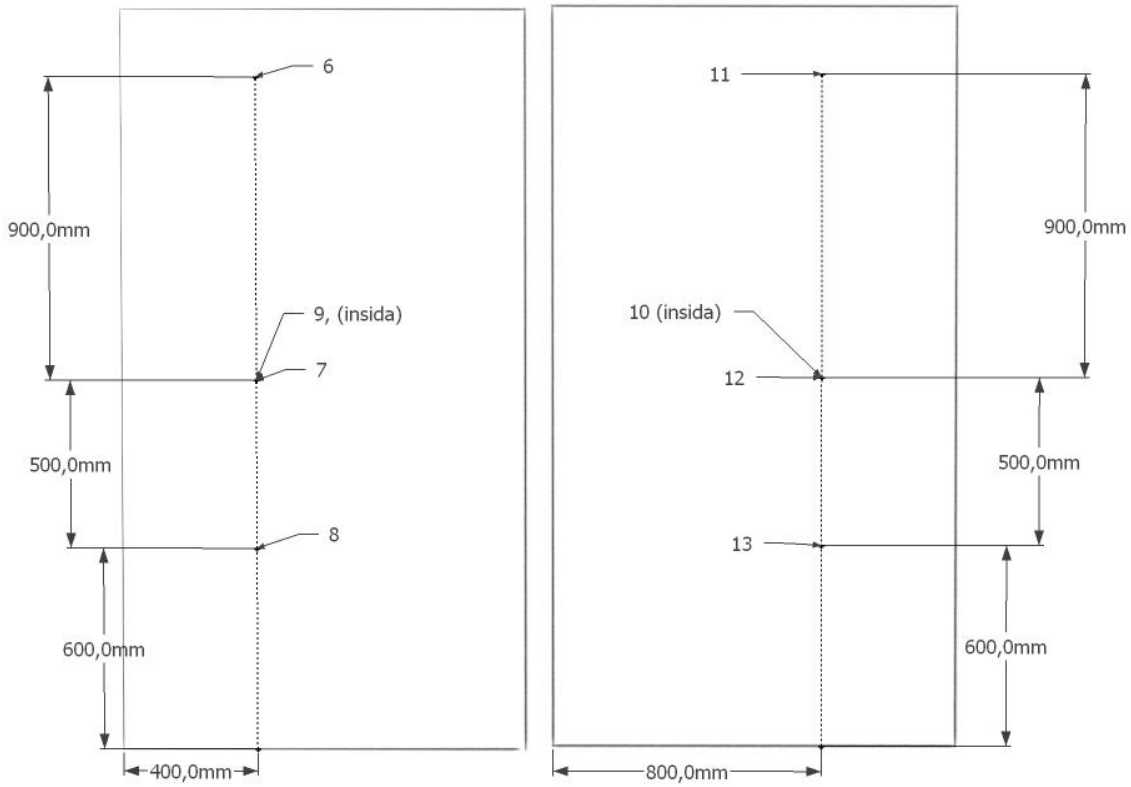
Figur D.2. Termoelementens placering på vägg 3 och 4.



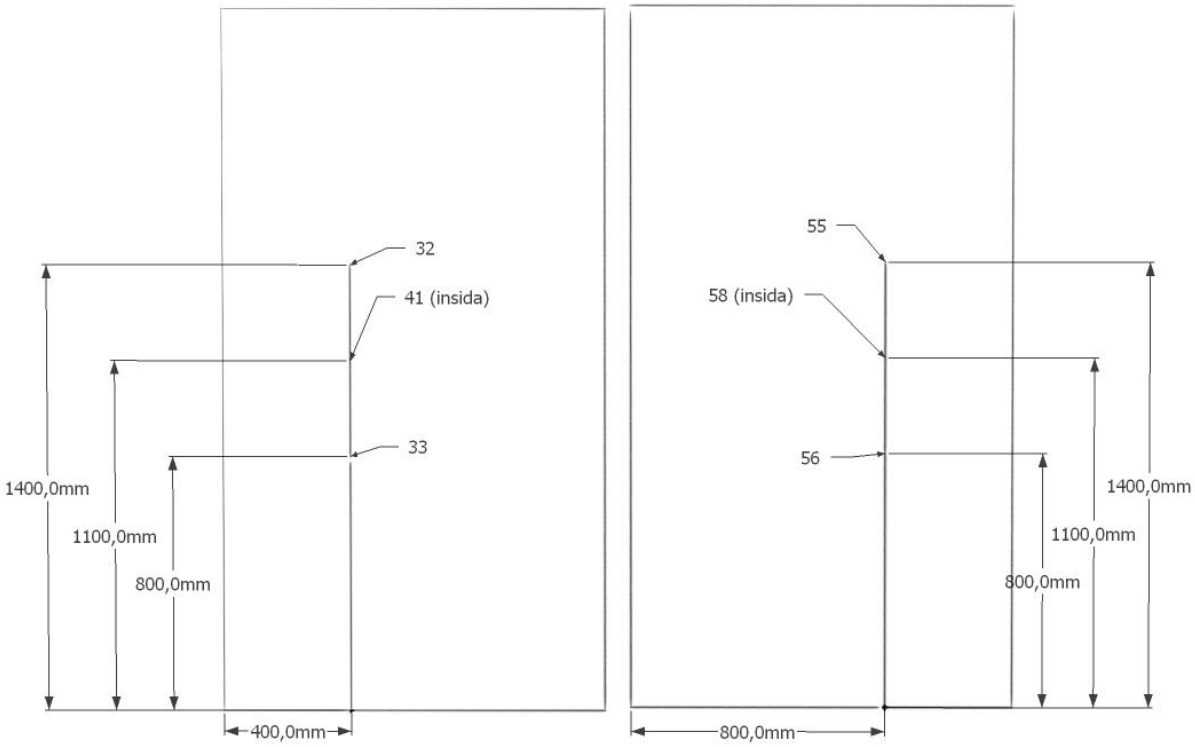
Figur D.3. Termoelementens placering på vägg 5 och 6.



Figur D.4. Termoelementens placering på gavelvägg ut från containern.



Figur D.5. Termoelementens placering på tak 1 och 2.

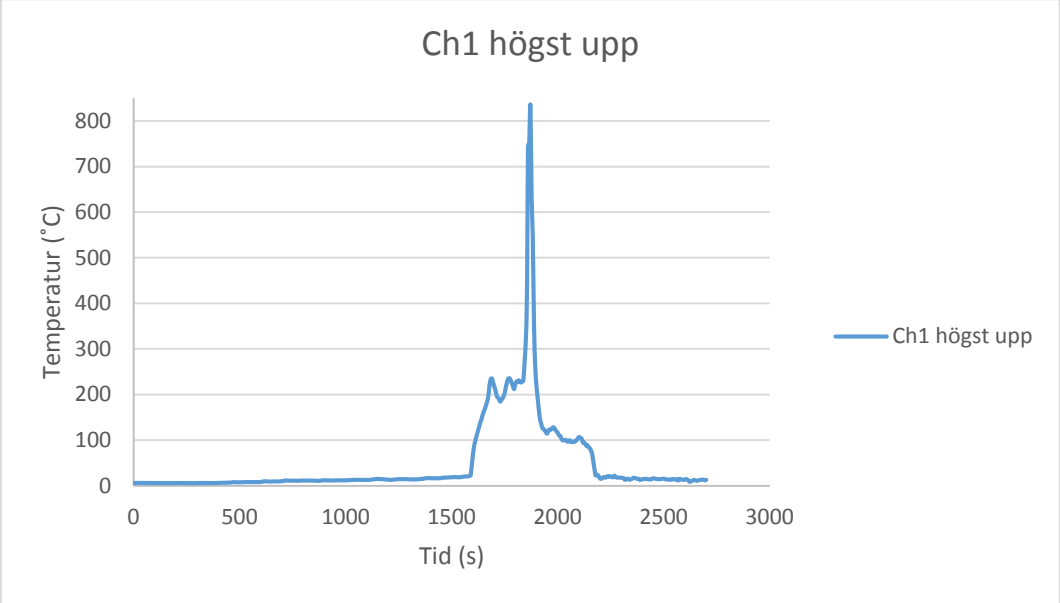


Figur D.6. Termoelementens placering på tak 3 och 4.

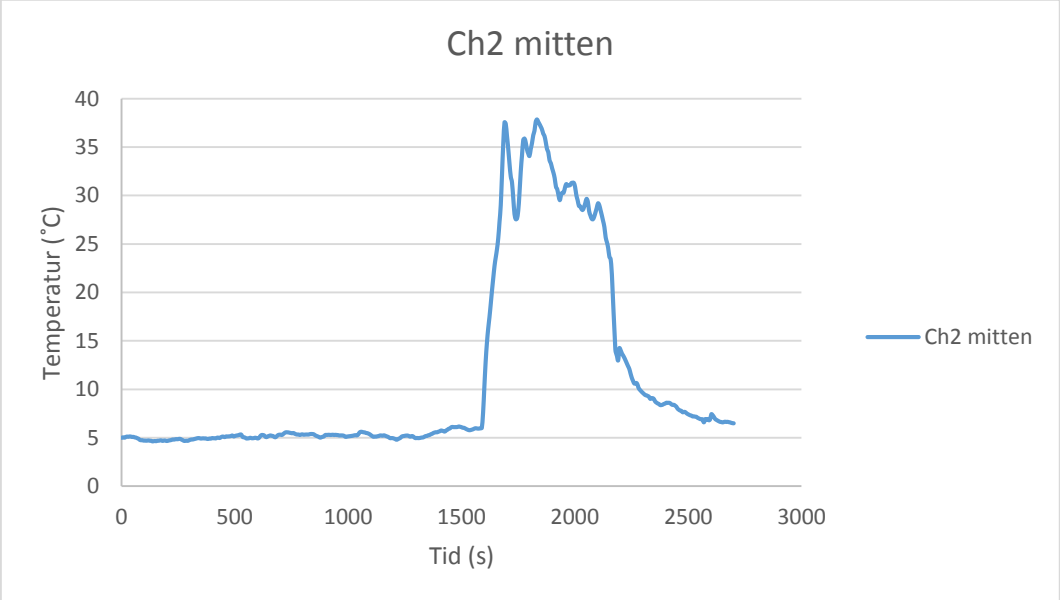
Bilaga E. Mätdata från försöket

Nedan redovisas mätdata från samtliga mätpunkter i försöket förutom från platt-termoelement 10 som fallerade under försöket. För exakt placering av termoelementen, se bilaga D där varje nummer motsvarar samma nummer i denna bilaga med prefixet Ch. Viktigt att notera är att brännaren startades 360 sekunder efter att temperaturloggningen startades och följande diagram innehåller denna uppstartstid.

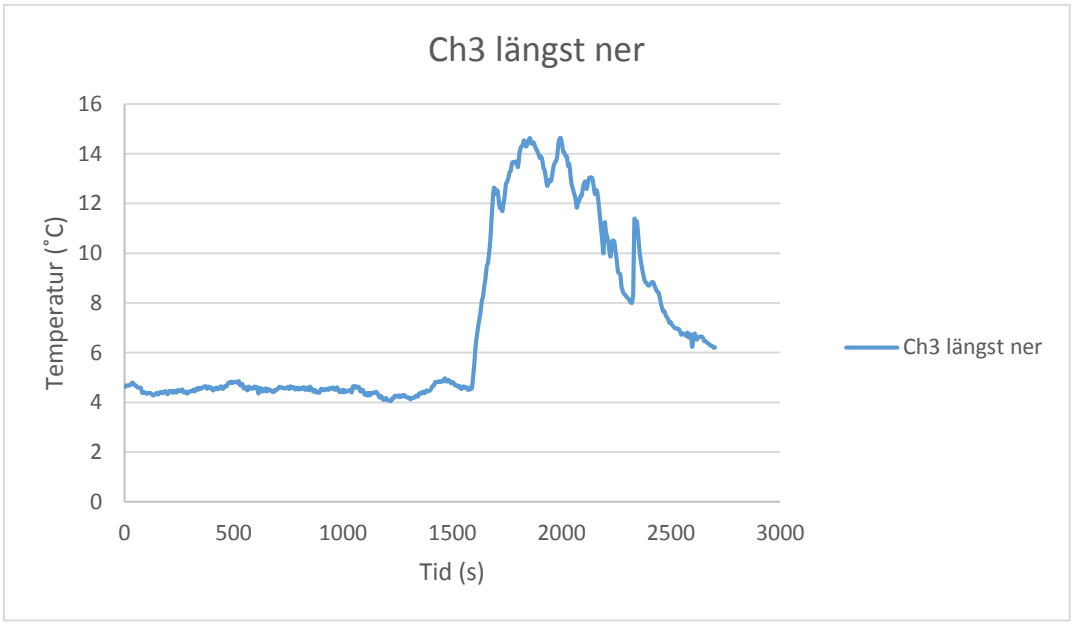
Vägg 1



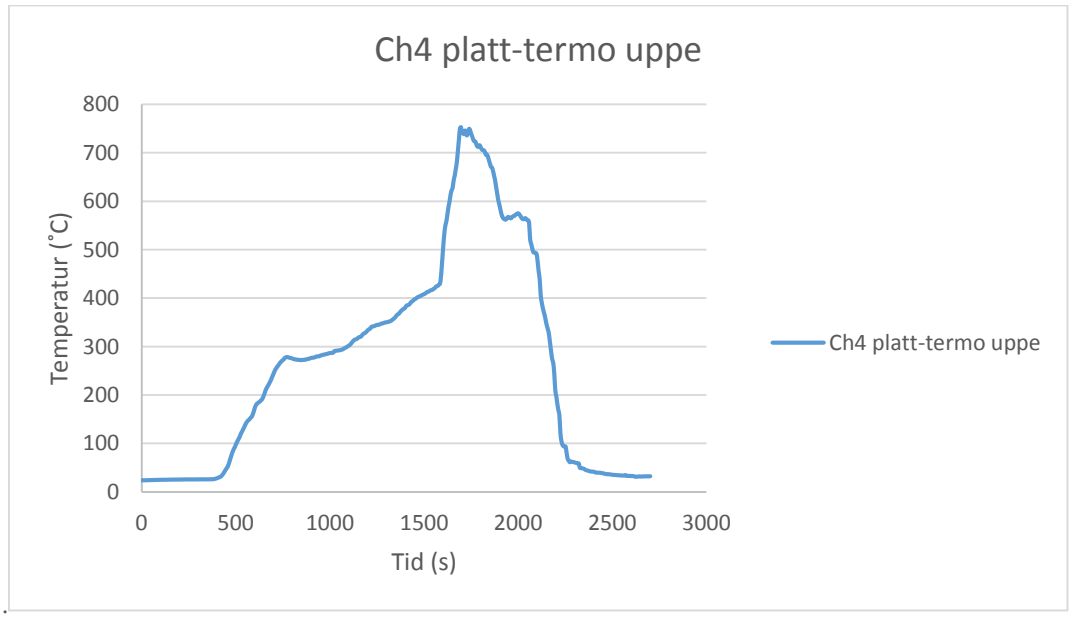
Figur E.1. Temperatur som en funktion av tiden för Ch1.



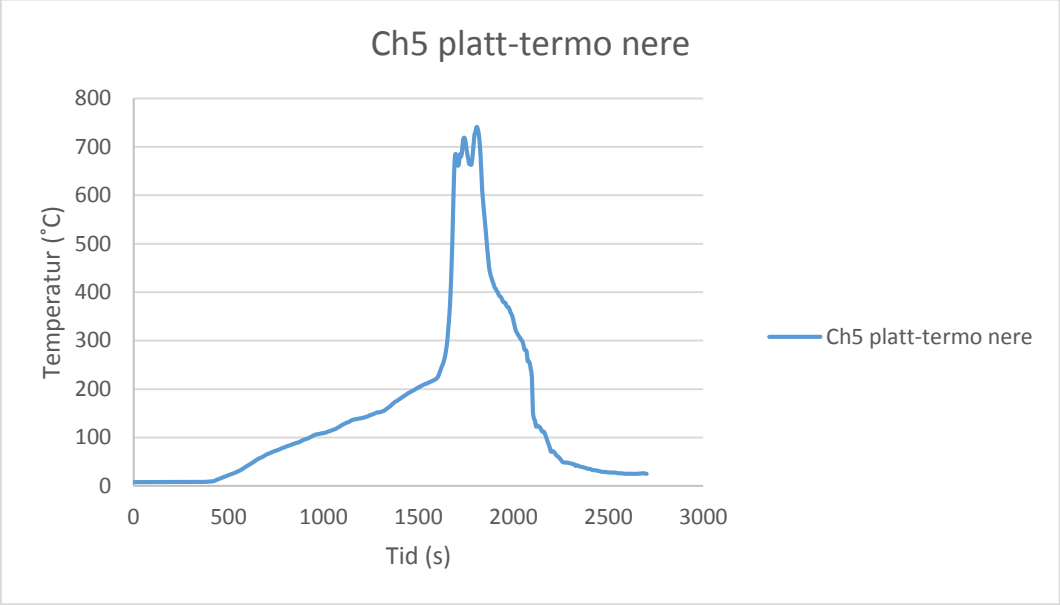
Figur E.2. Temperatur som en funktion av tiden för Ch2.



Figur E.3. Temperatur som en funktion av tiden för Ch3

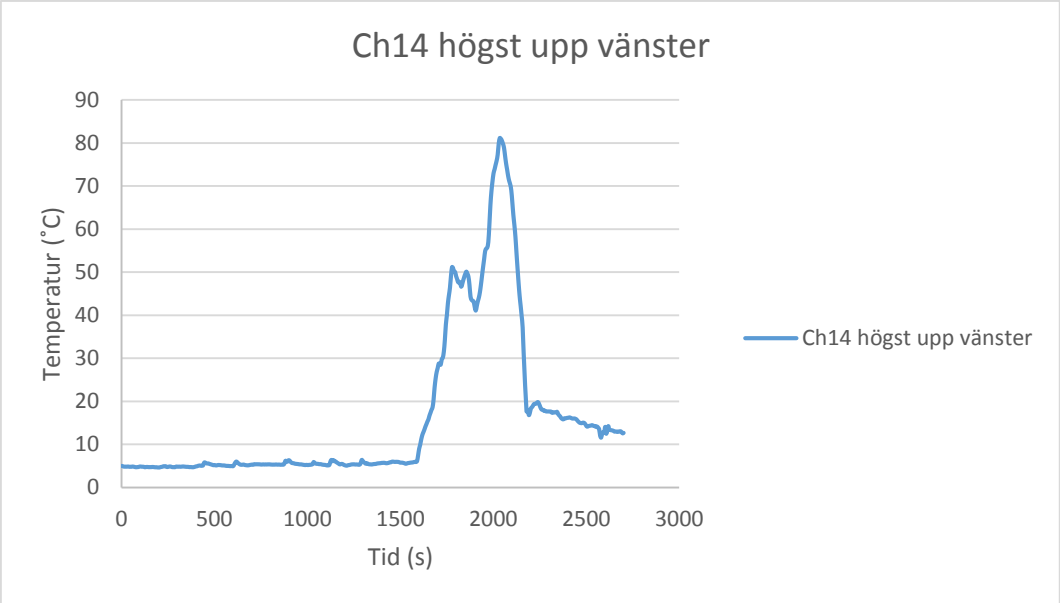


Figur E.4. Temperatur som en funktion av tiden för Ch4.

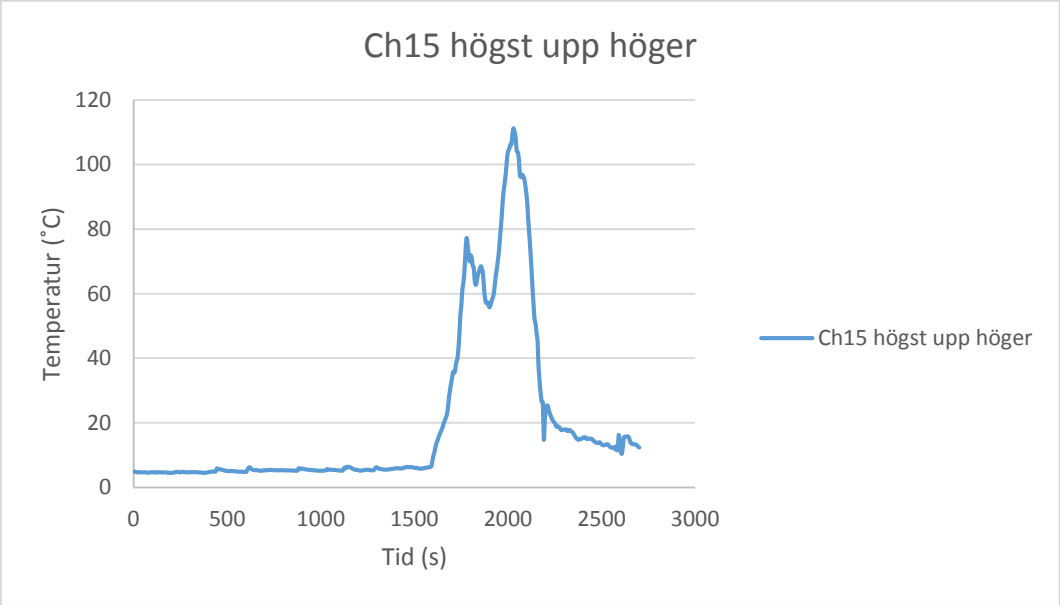


Figur E.5. Temperatur som en funktion av tiden för Ch5.

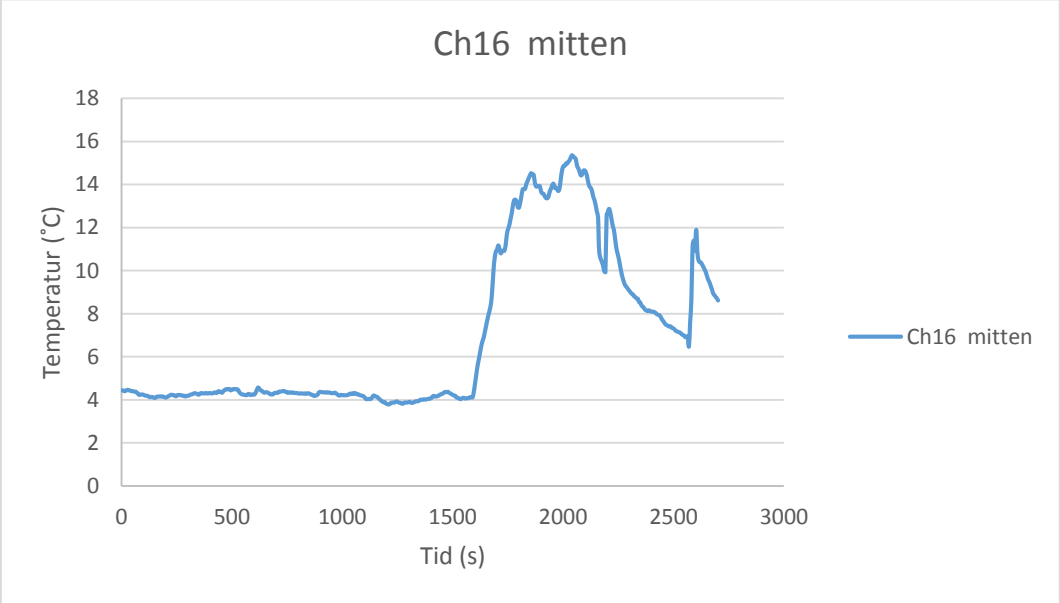
Vägg 2



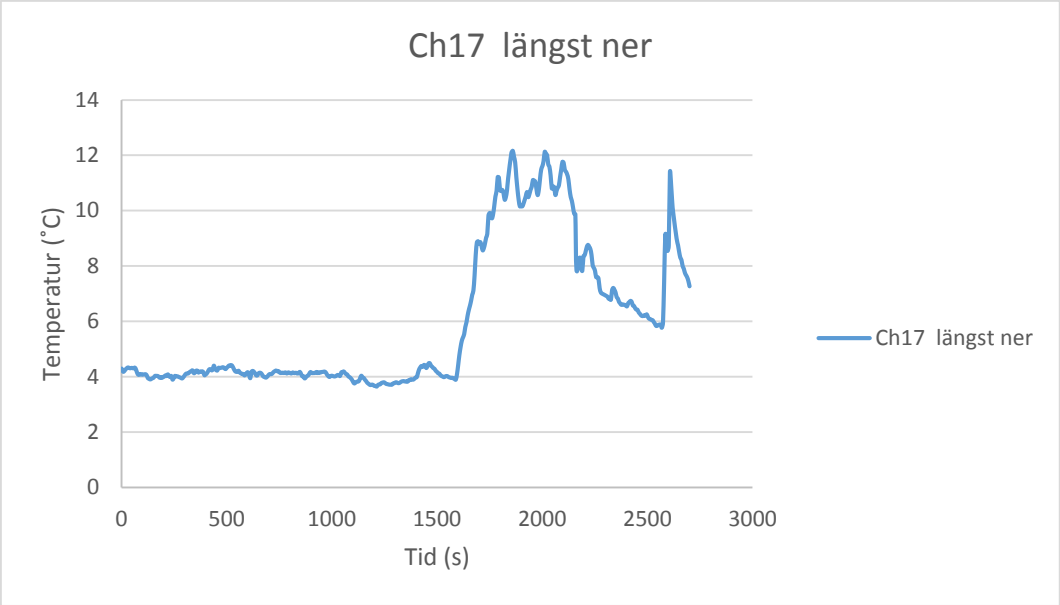
Figur E.6. Temperatur som en funktion av tiden för Ch14.



Figur E.7. Temperatur som en funktion av tiden för Ch15.

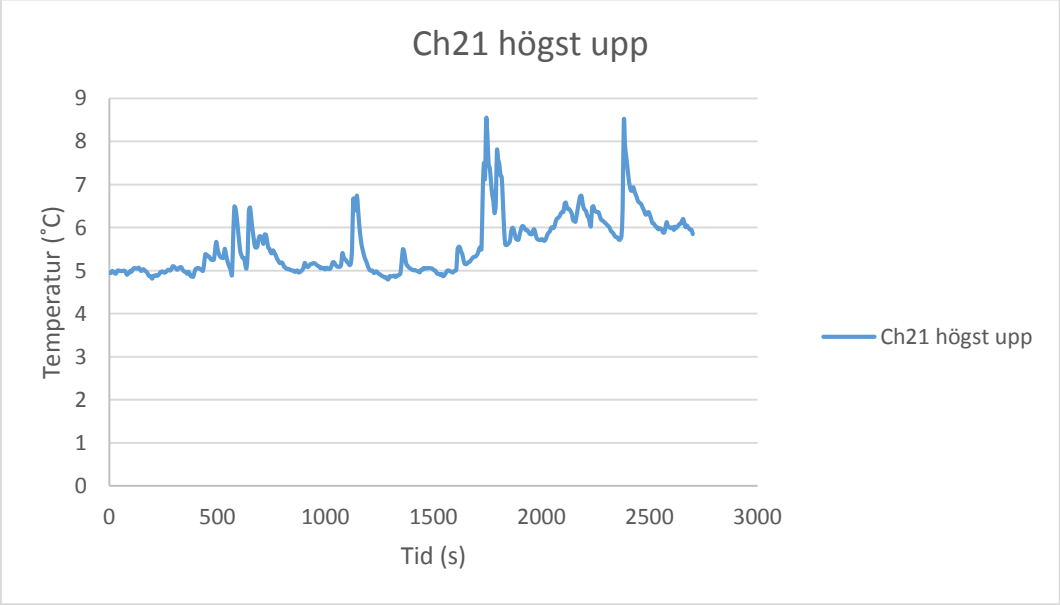


Figur E.8. Temperatur som en funktion av tiden för Ch16.

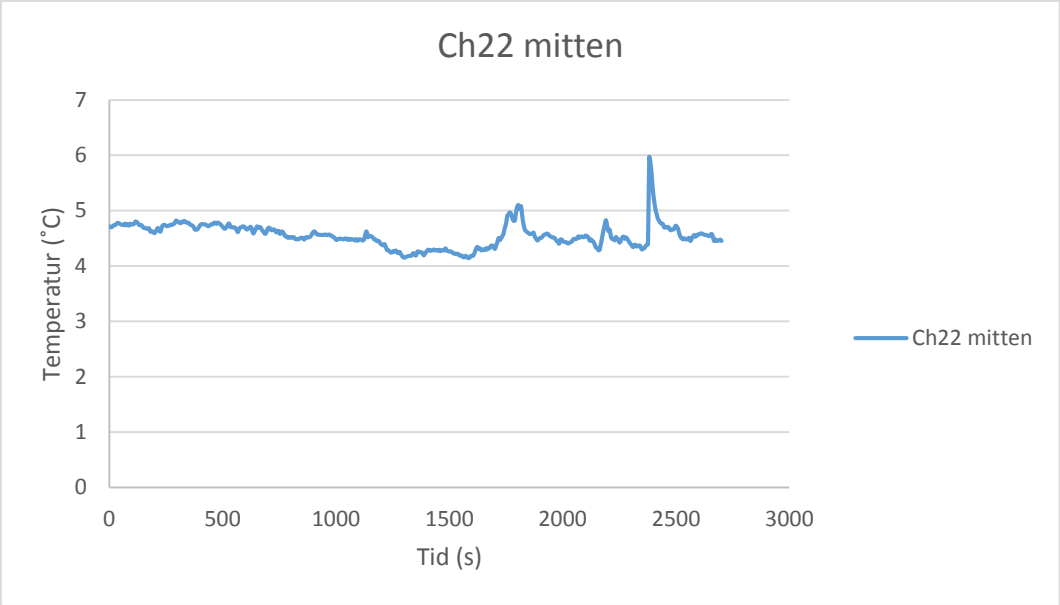


Figur E.9. Temperatur som en funktion av tiden för Ch17.

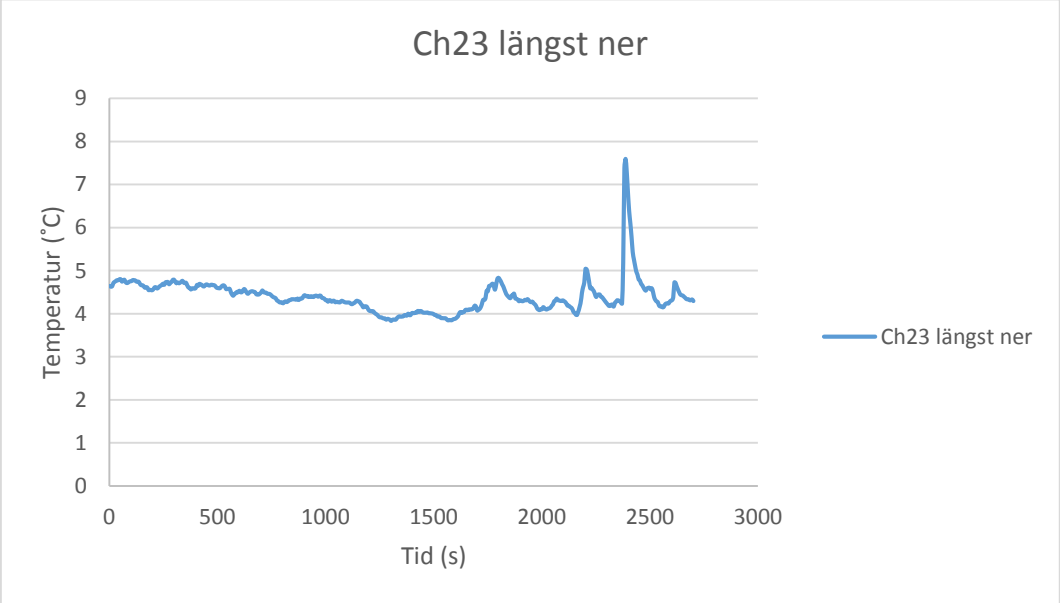
Vägg 3



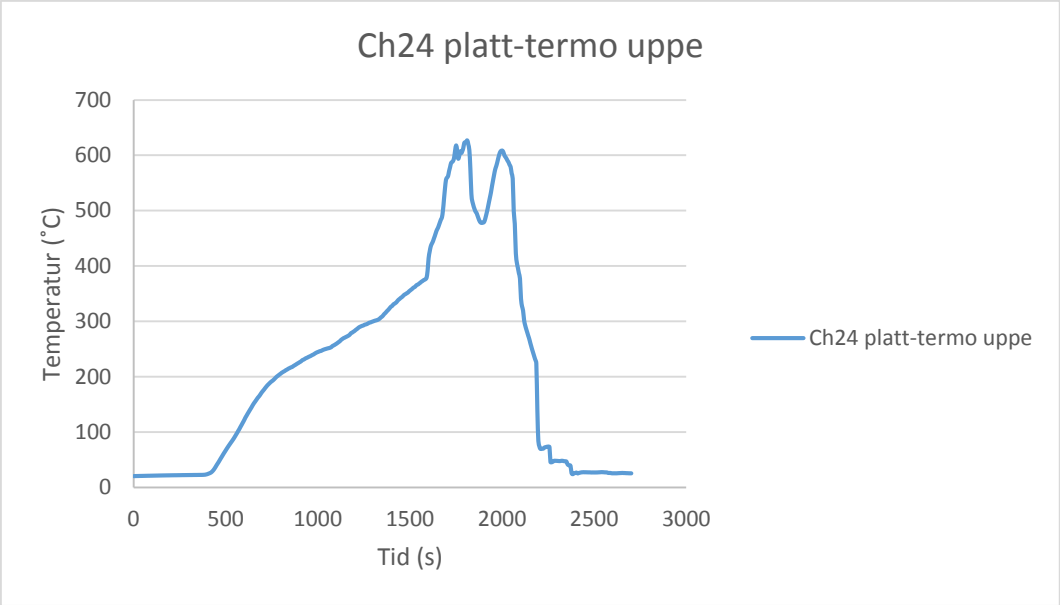
Figur E.10. Temperatur som en funktion av tiden för Ch21.



Figur E.11. Temperatur som en funktion av tiden för Ch22.

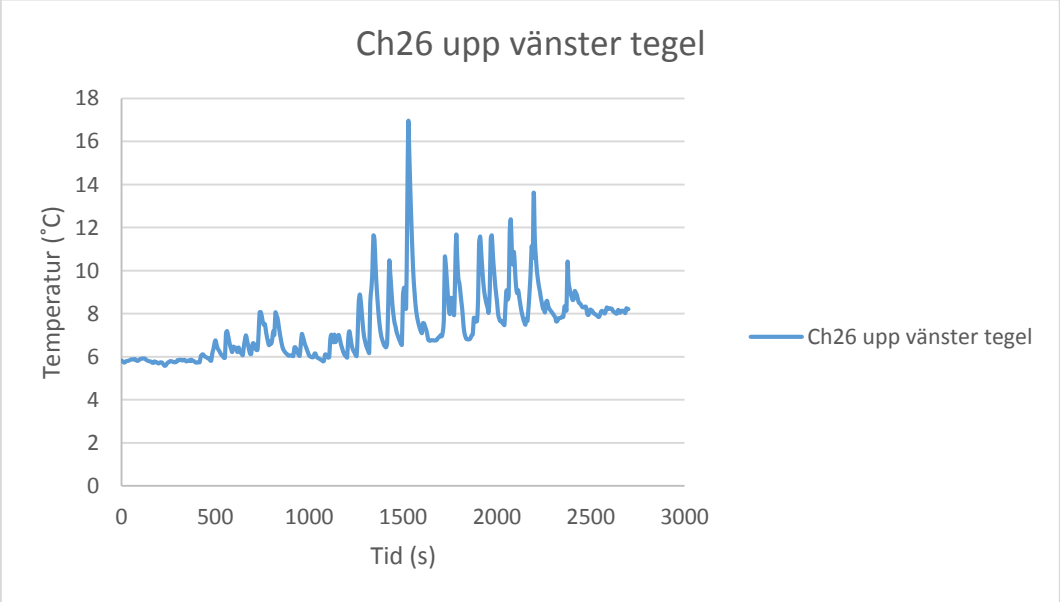


Figur E.12. Temperatur som en funktion av tiden för Ch23.

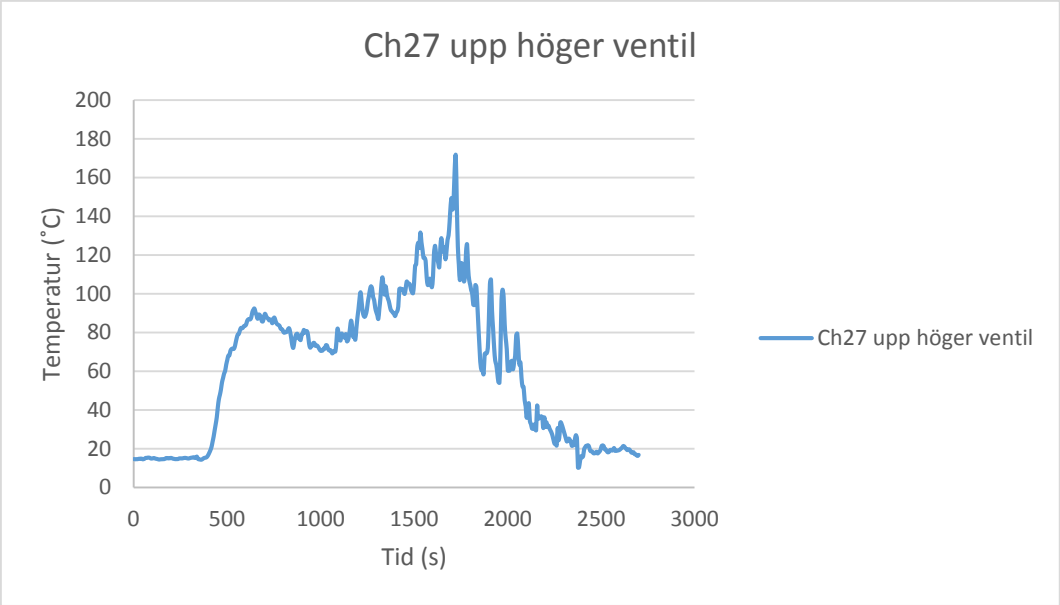


Figur E.13. Temperatur som en funktion av tiden för Ch24.

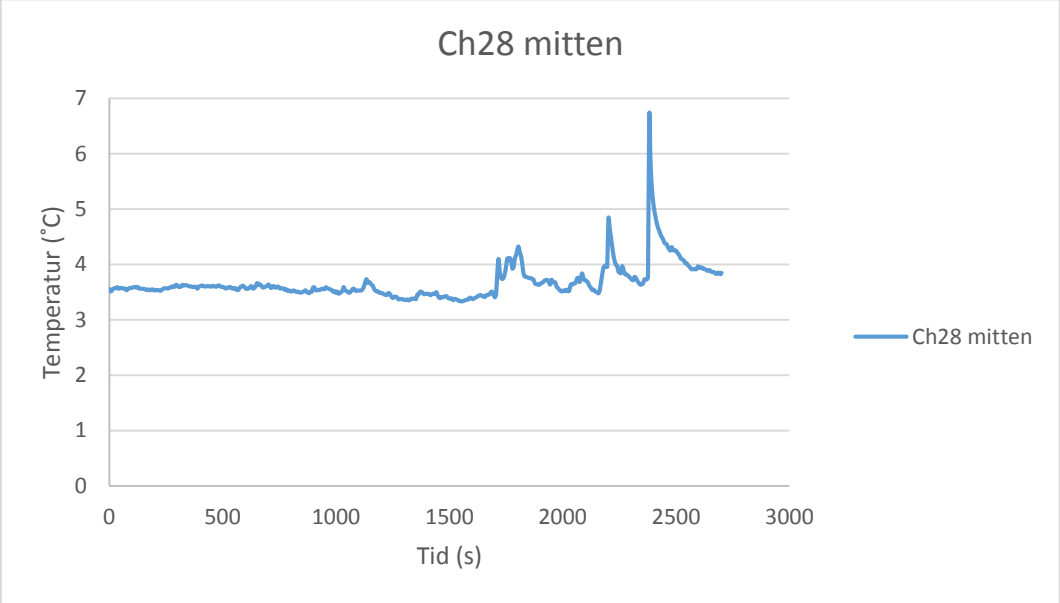
Vägg 4



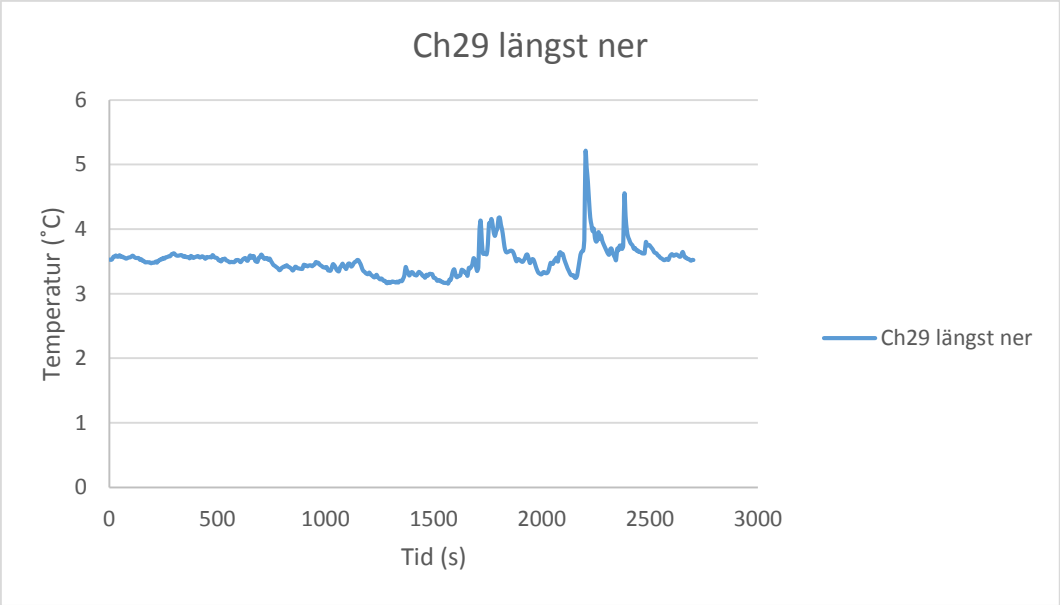
Figur E.14. Temperatur som en funktion av tiden för Ch26.



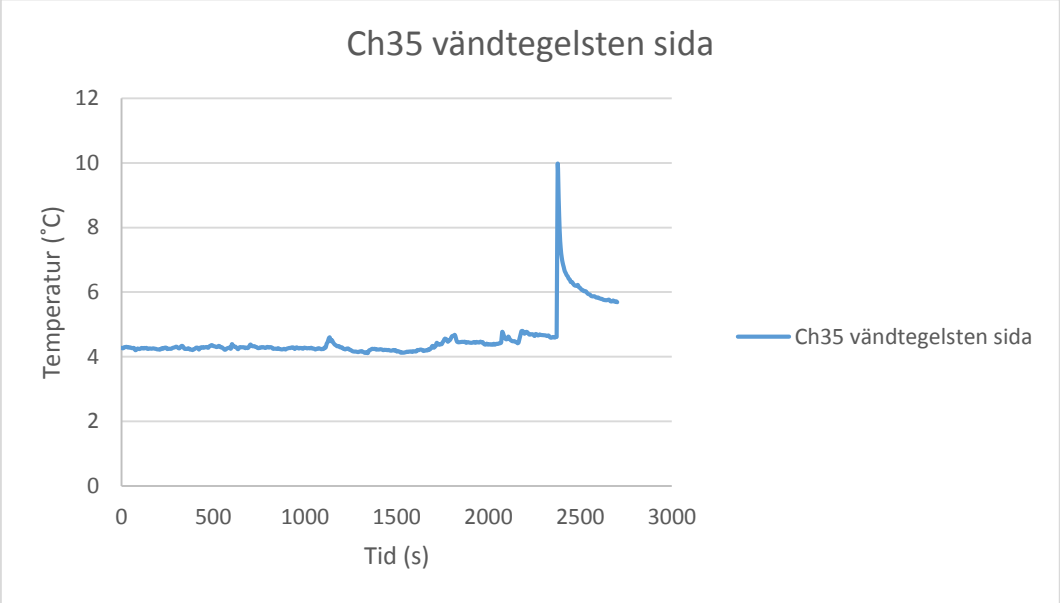
Figur E.15. Temperatur som en funktion av tiden för Ch27.



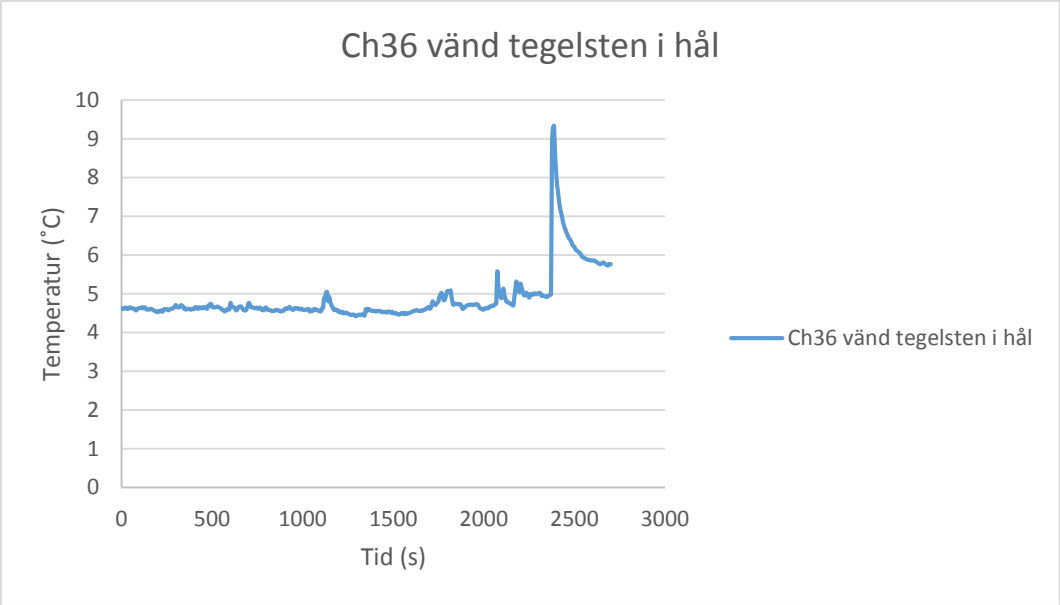
Figur E.16. Temperatur som en funktion av tiden för Ch28.



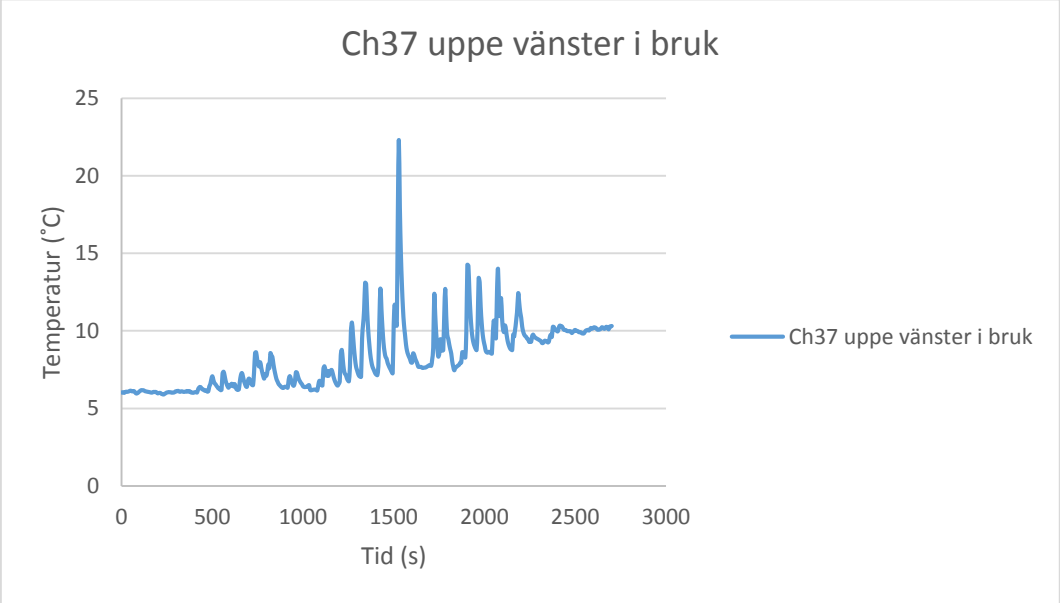
Figur E.17. Temperatur som en funktion av tiden för Ch29.



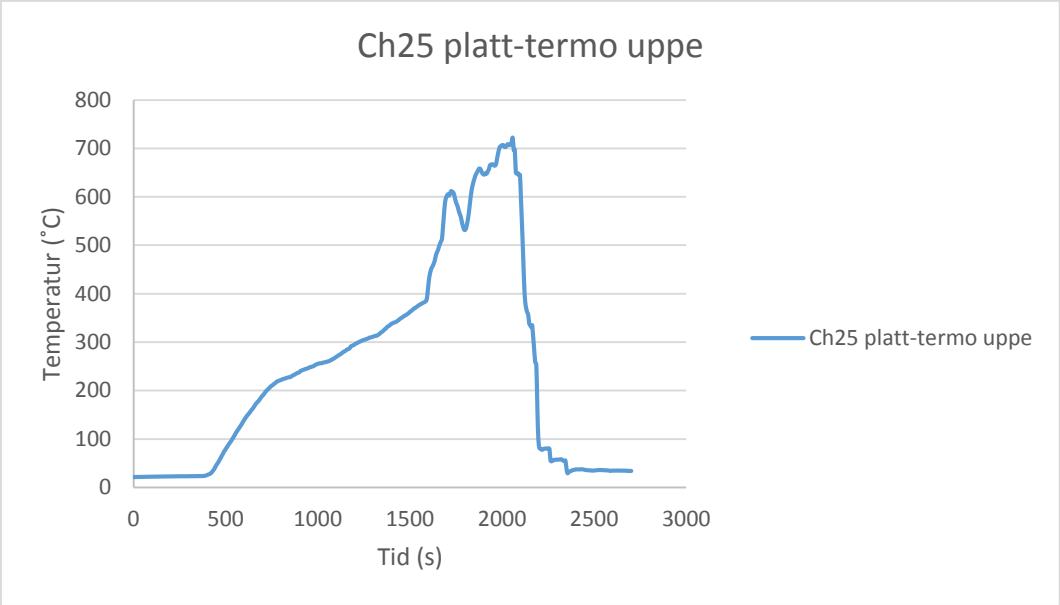
Figur E.18. Temperatur som en funktion av tiden för Ch35.



Figur E.19. Temperatur som en funktion av tiden för Ch36.

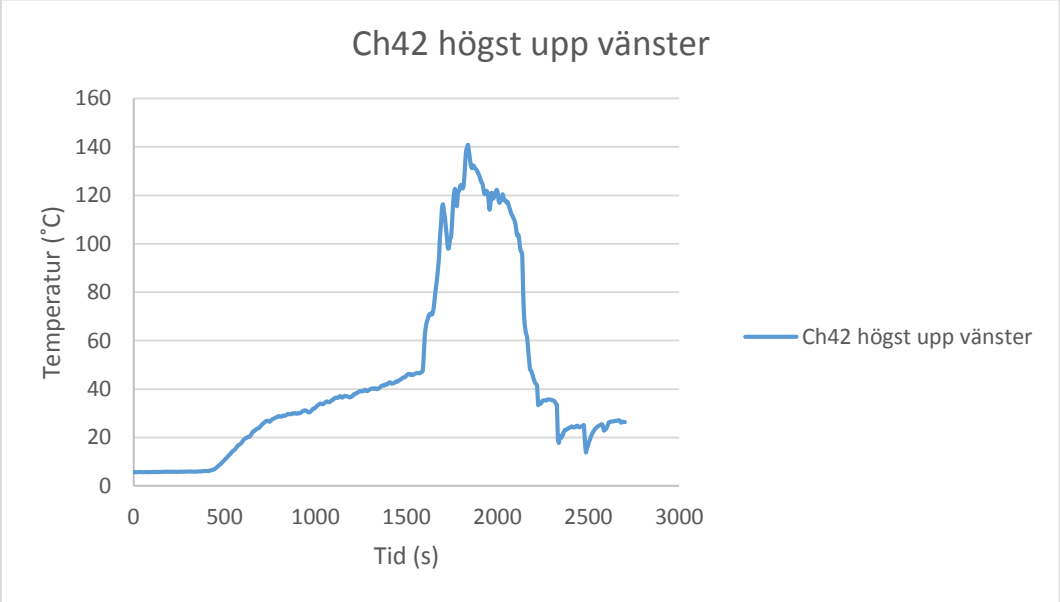


Figur E.20. Temperatur som en funktion av tiden för Ch37.

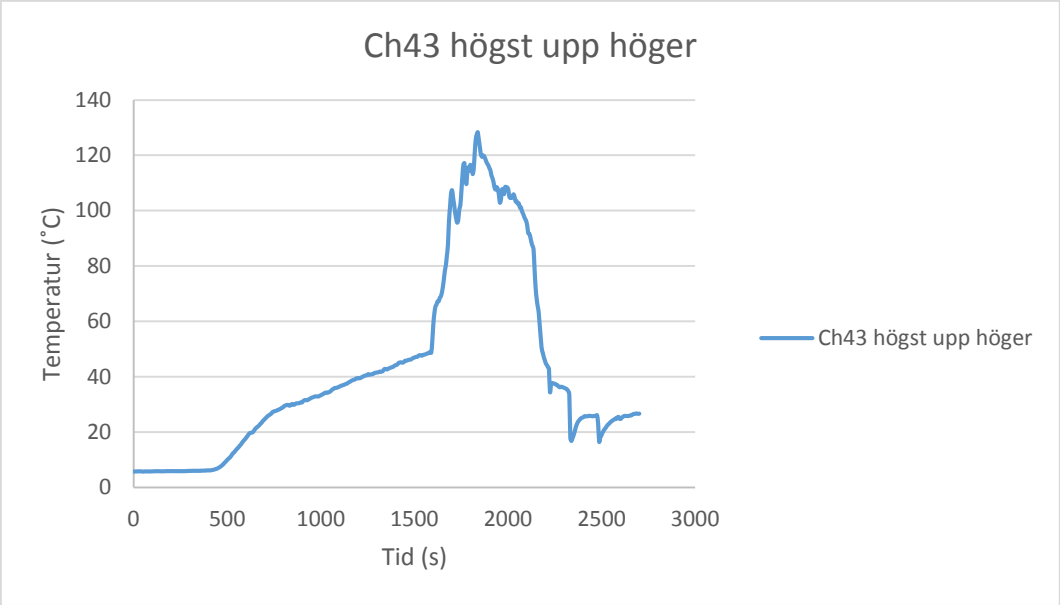


Figur E.21. Temperatur som en funktion av tiden för Ch25.

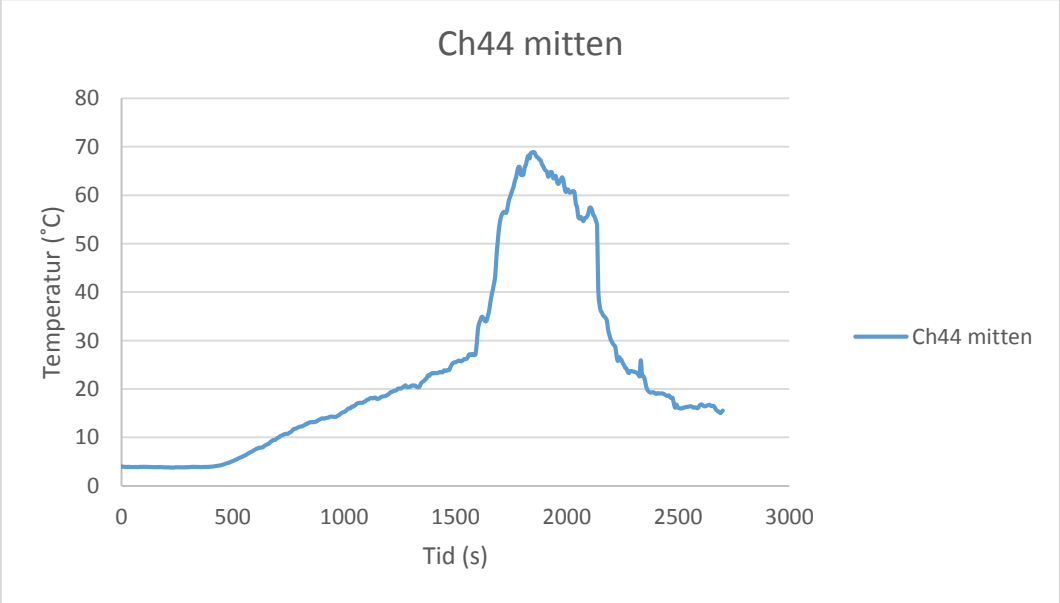
Vägg 5



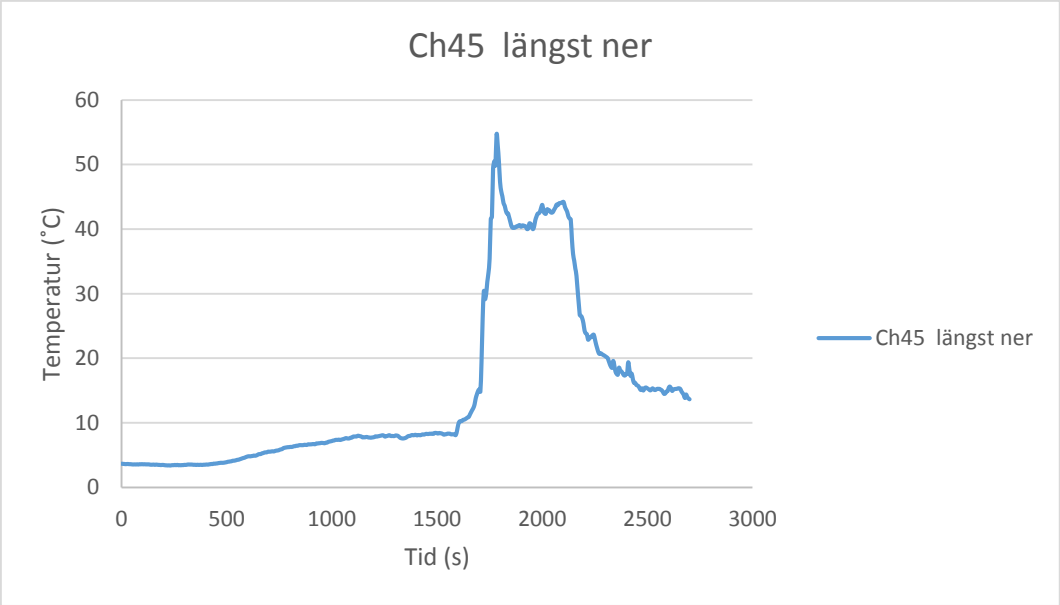
Figur E.22. Temperatur som en funktion av tiden för Ch42.



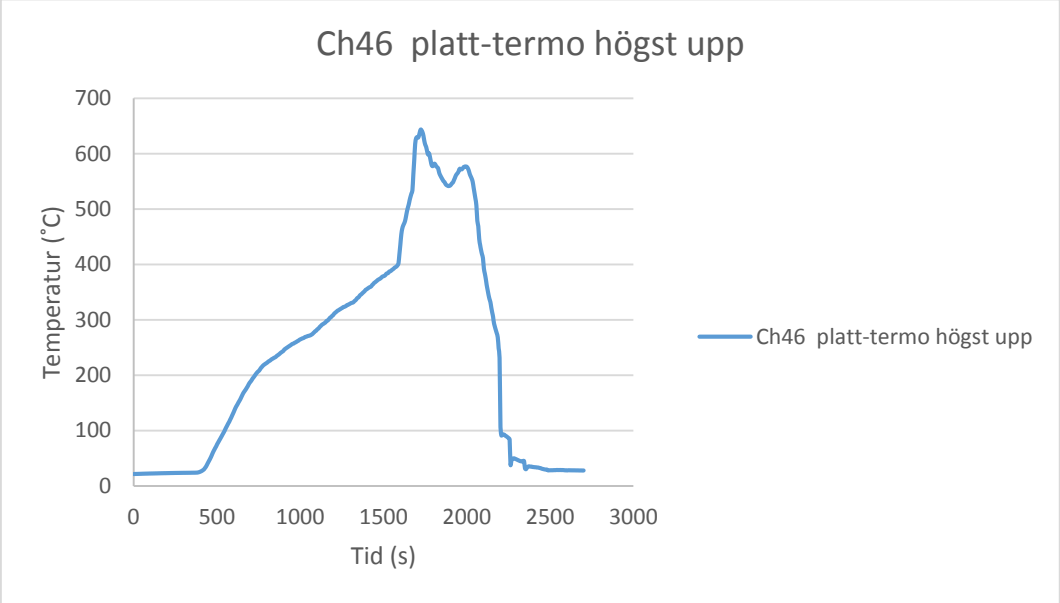
Figur E.23. Temperatur som en funktion av tiden för Ch43.



Figur E.24. Temperatur som en funktion av tiden för Ch44.

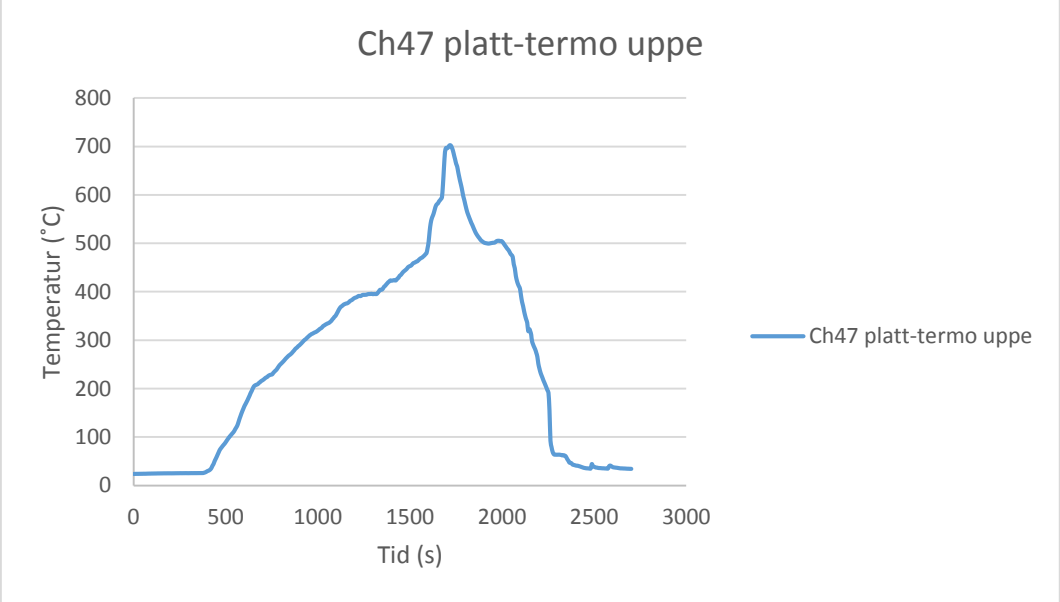


Figur E.25. Temperatur som en funktion av tiden för Ch45.

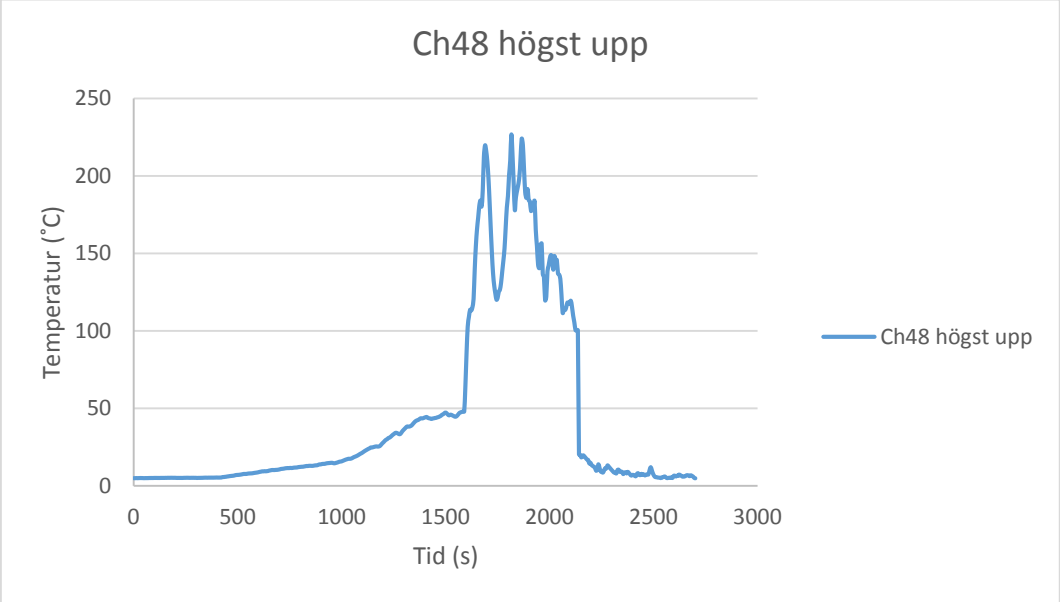


Figur E.26. Temperatur som en funktion av tiden för Ch46.

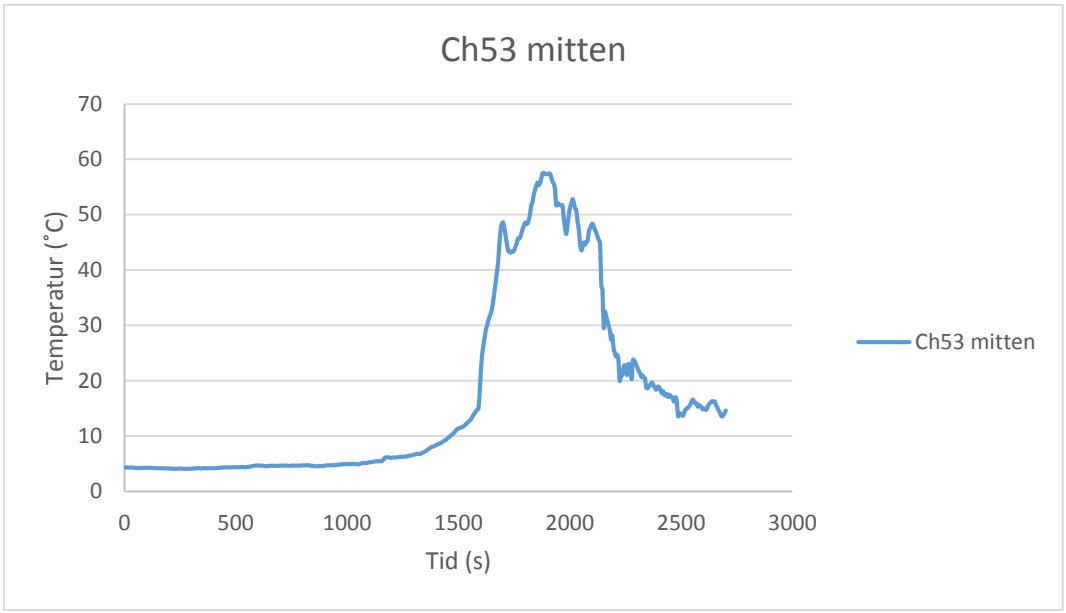
Vägg 6



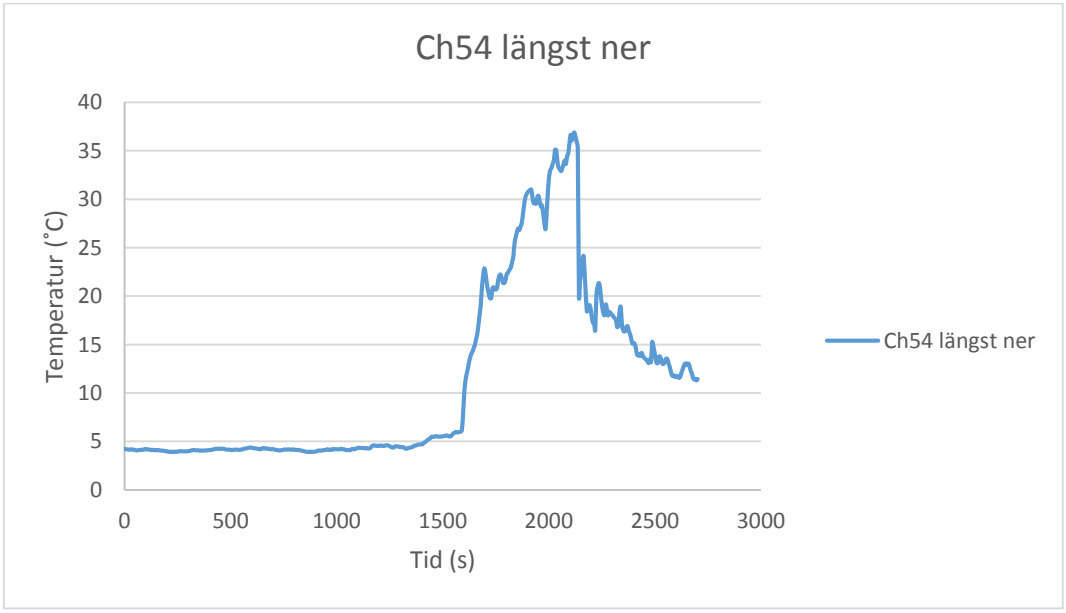
Figur E.27. Temperatur som en funktion av tiden för Ch47.



Figur E.2866. Temperatur som en funktion av tiden för Ch48.

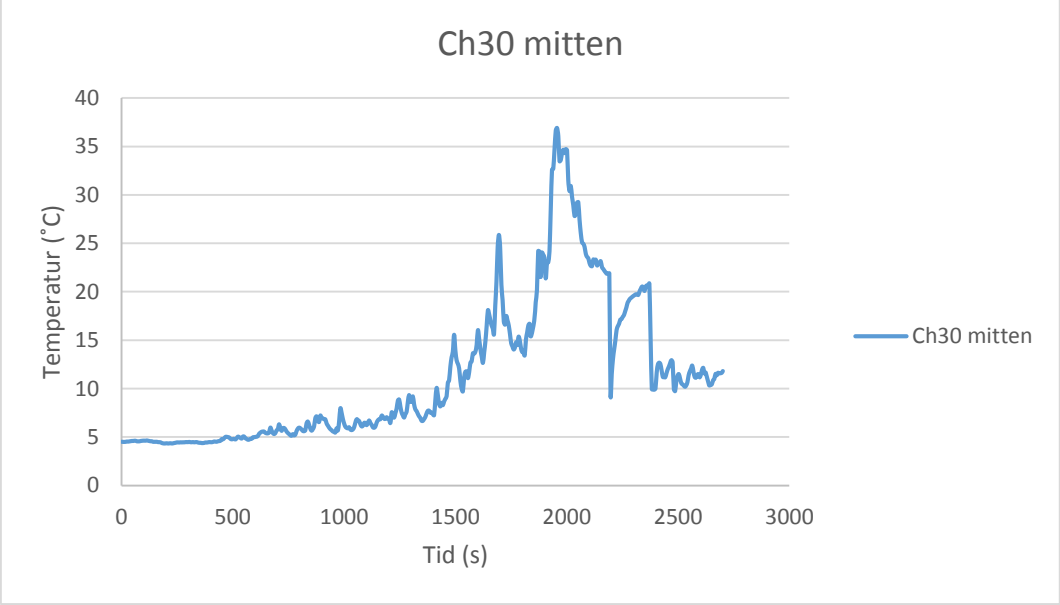


Figur E.29. Temperatur som en funktion av tiden för Ch53.

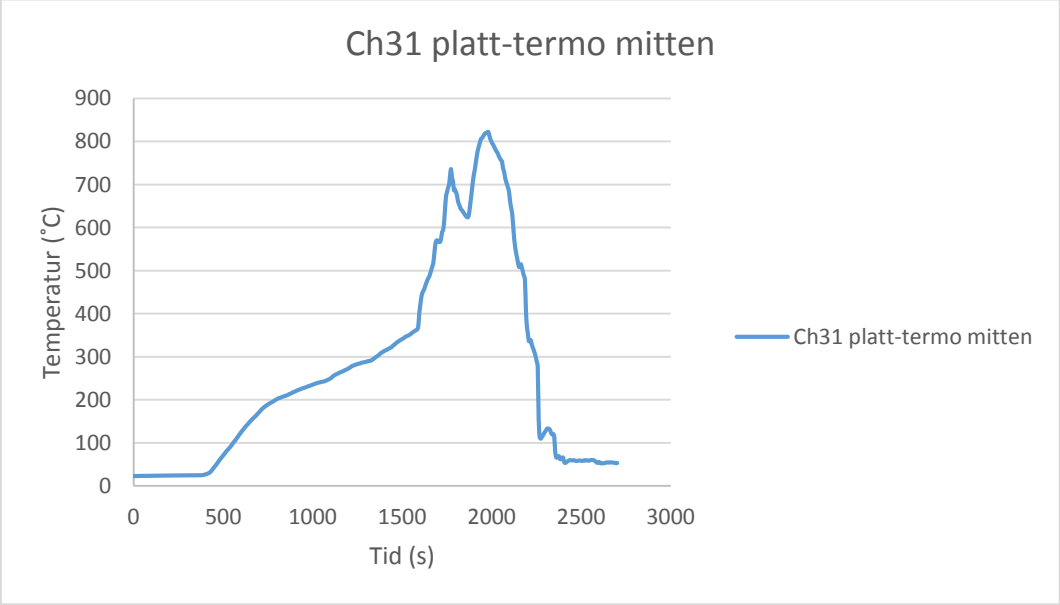


Figur E.30. Temperatur som en funktion av tiden för Ch54.

Vägg 7

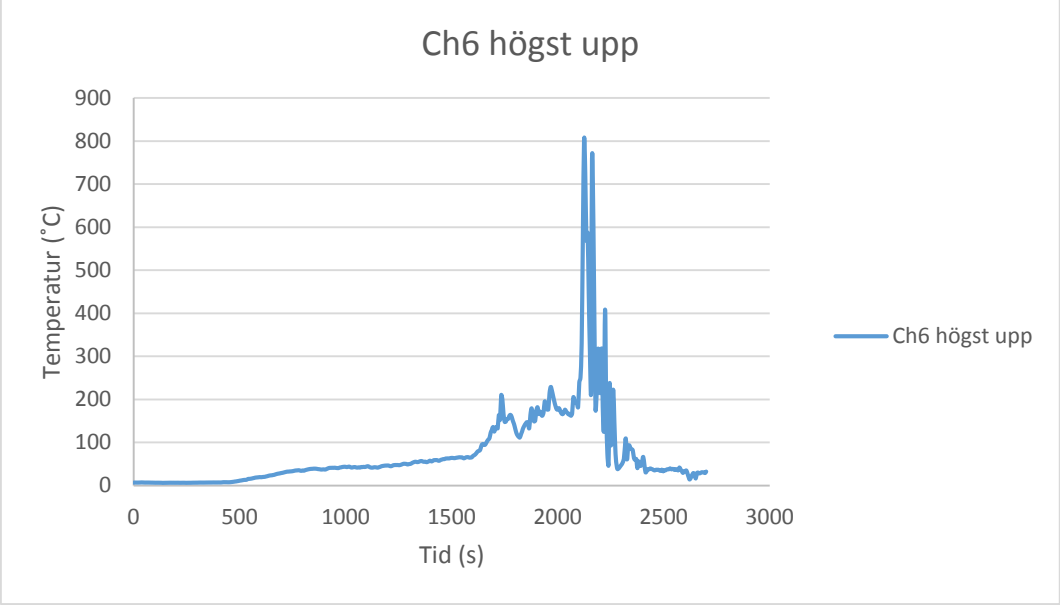


Figur E.31. Temperatur som en funktion av tiden för Ch30.

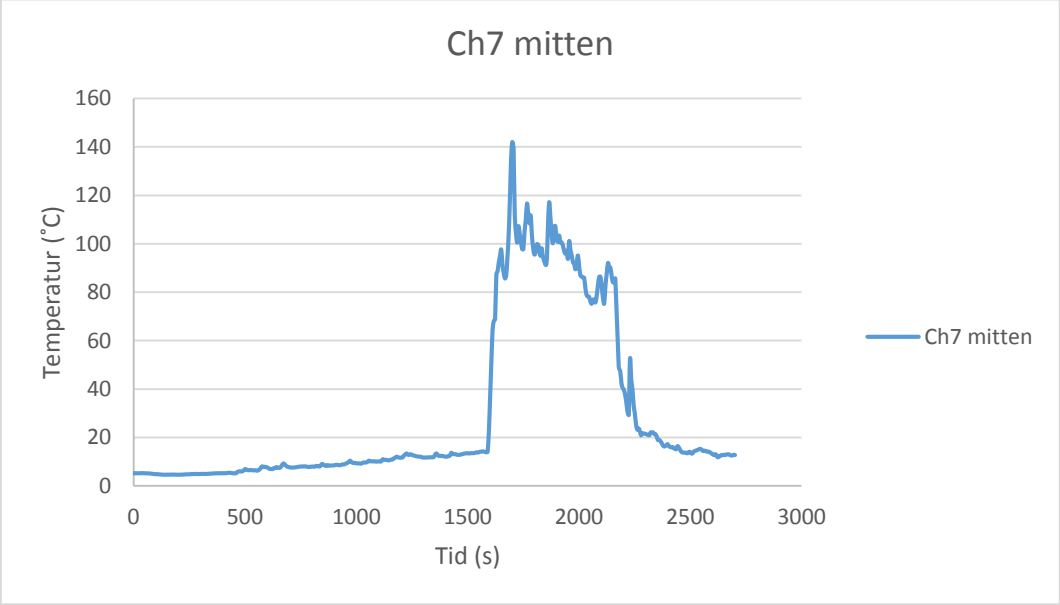


Figur E.32. Temperatur som en funktion av tiden för Ch31.

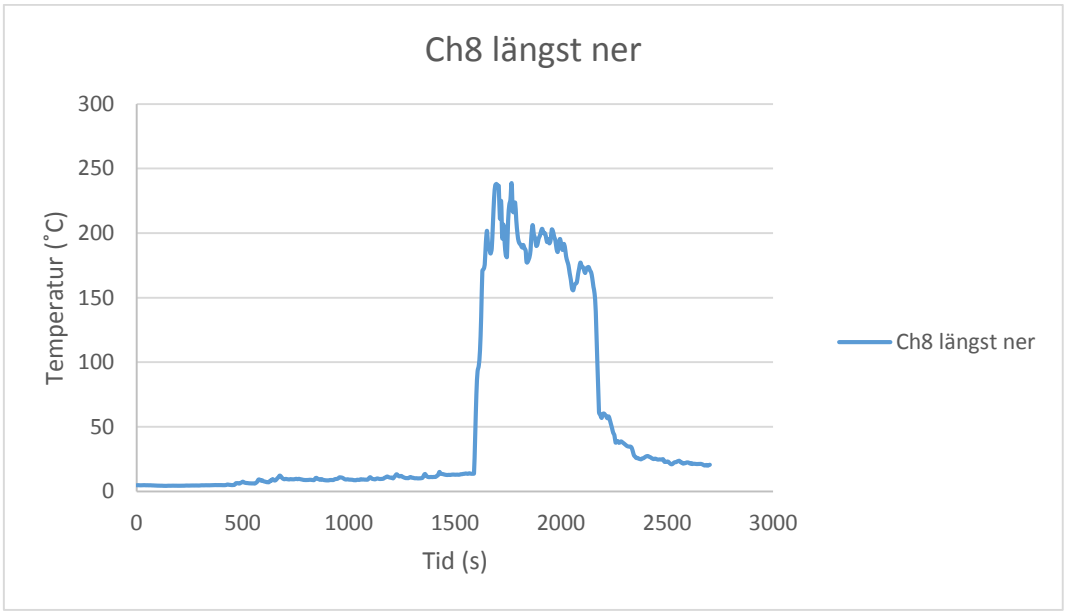
Tak 1



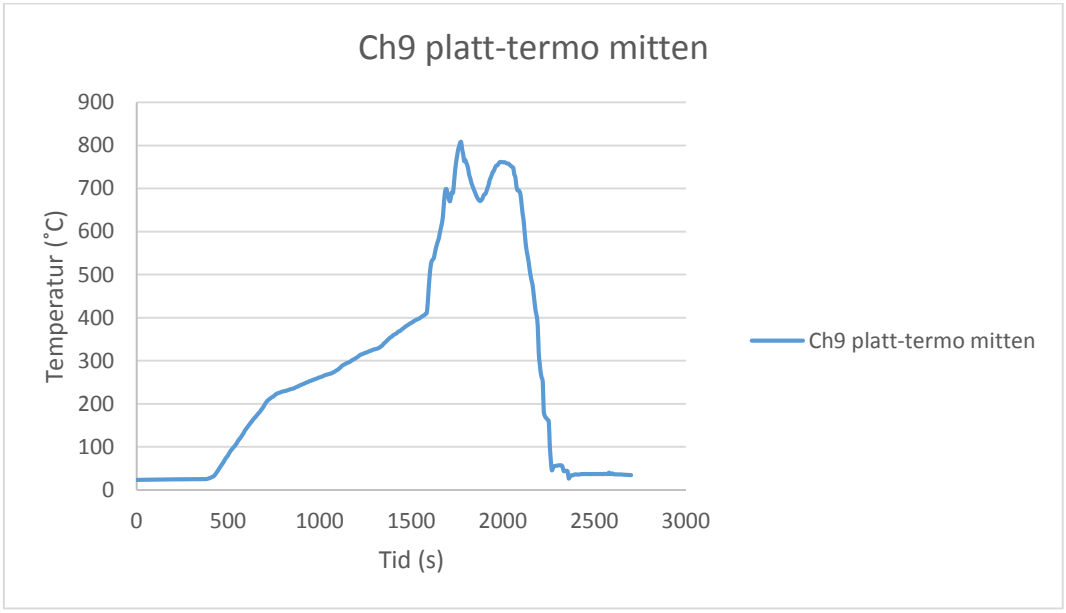
Figur E.33. Temperatur som en funktion av tiden för Ch6.



Figur E.34. Temperatur som en funktion av tiden för Ch7.

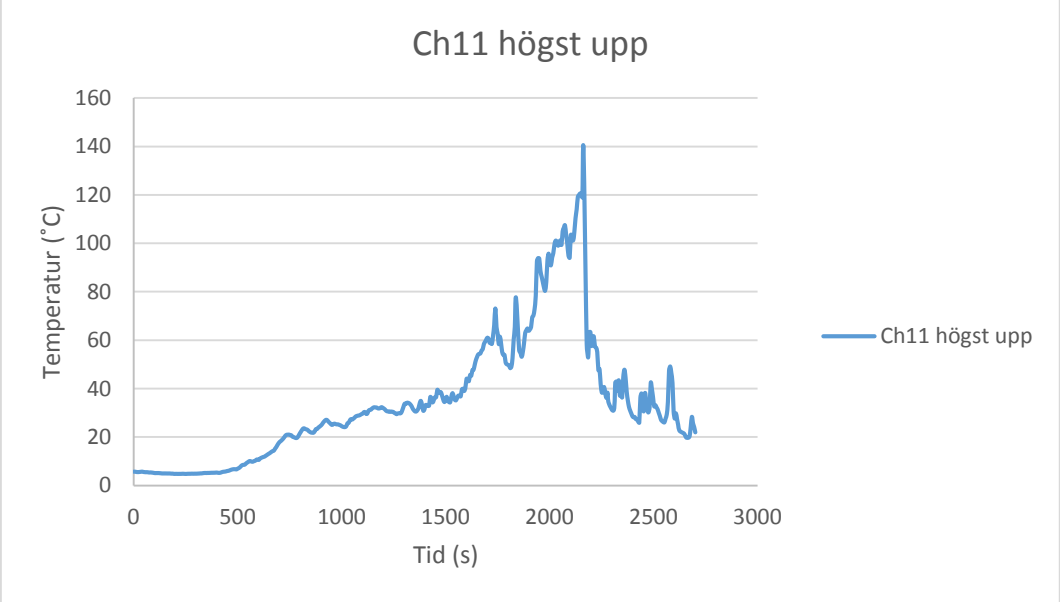


Figur E.35. Temperatur som en funktion av tiden för Ch8.

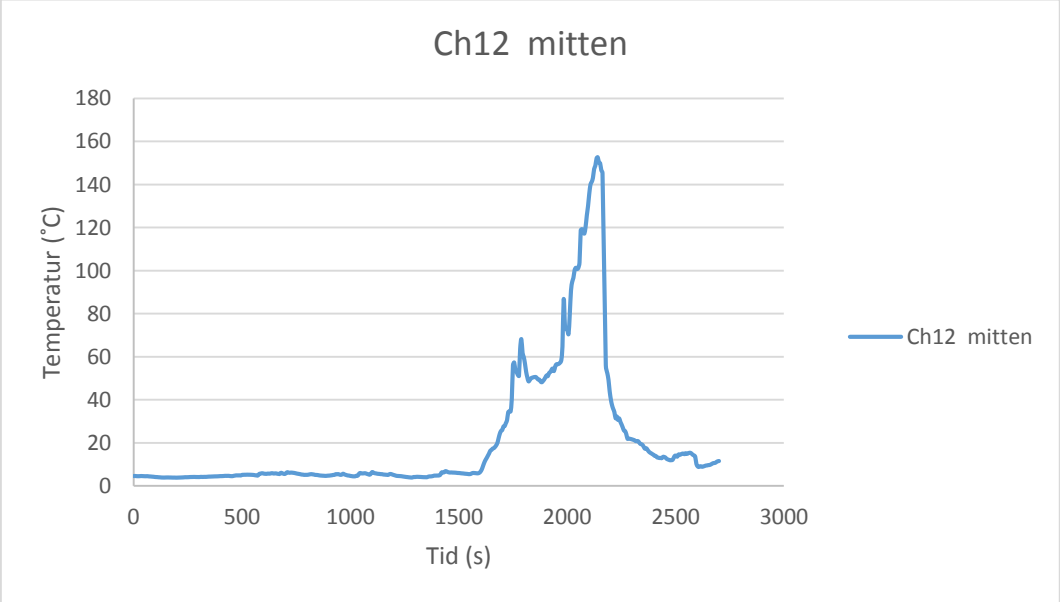


Figur E.36. Temperatur som en funktion av tiden för Ch9.

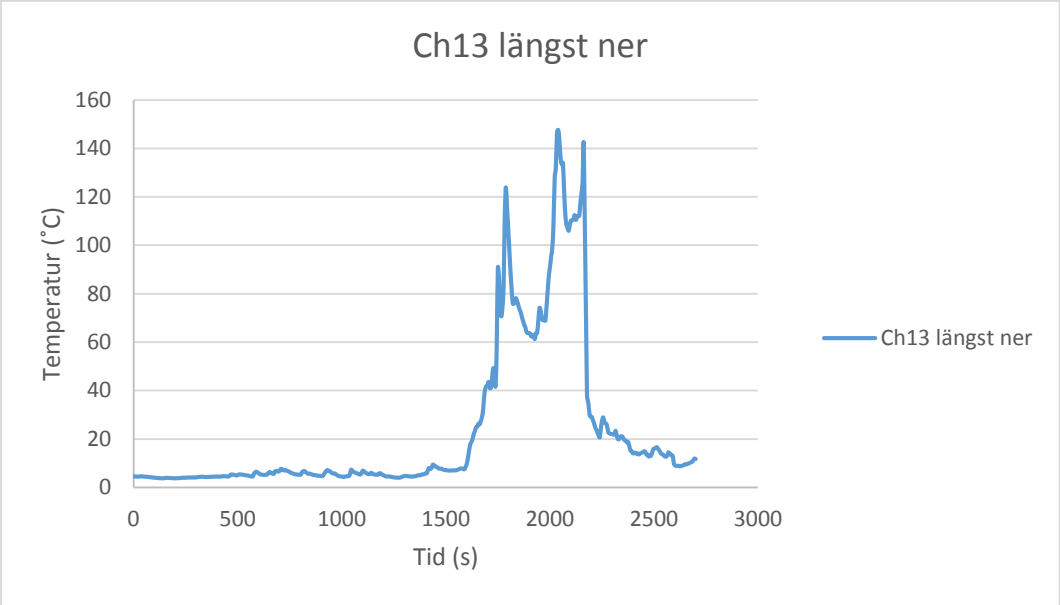
Tak 2



Figur 67. Temperatur som en funktion av tiden för Ch11.

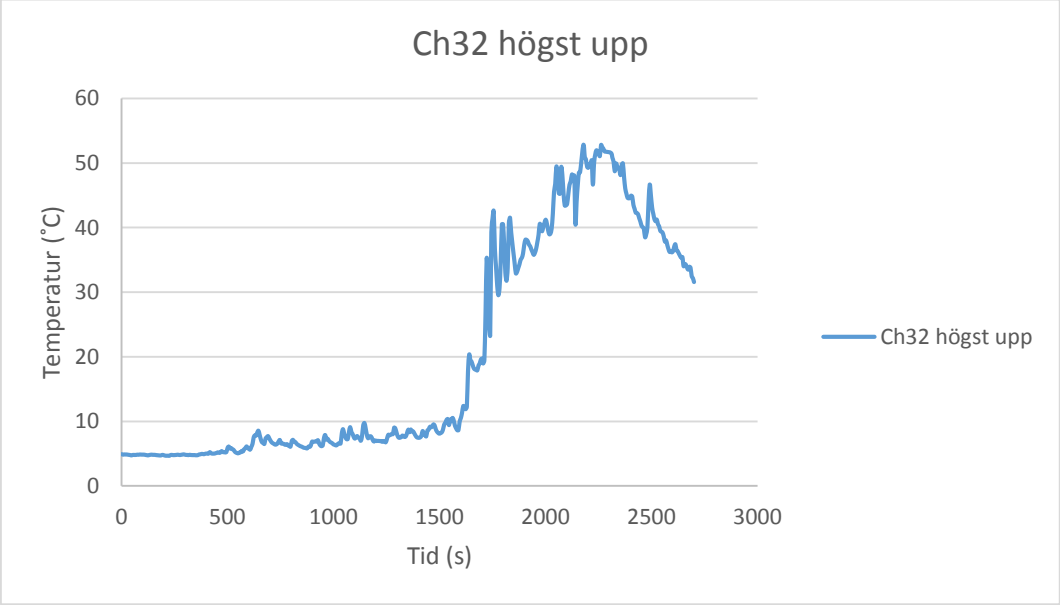


Figur E.38. Temperatur som en funktion av tiden för Ch12.

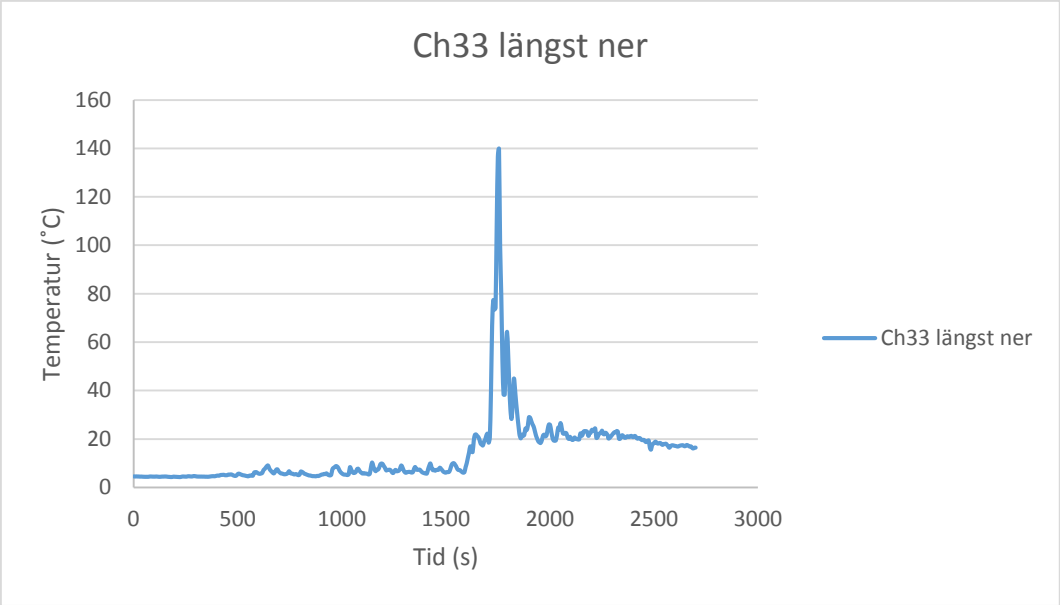


Figur E.39. Temperatur som en funktion av tiden för Ch13.

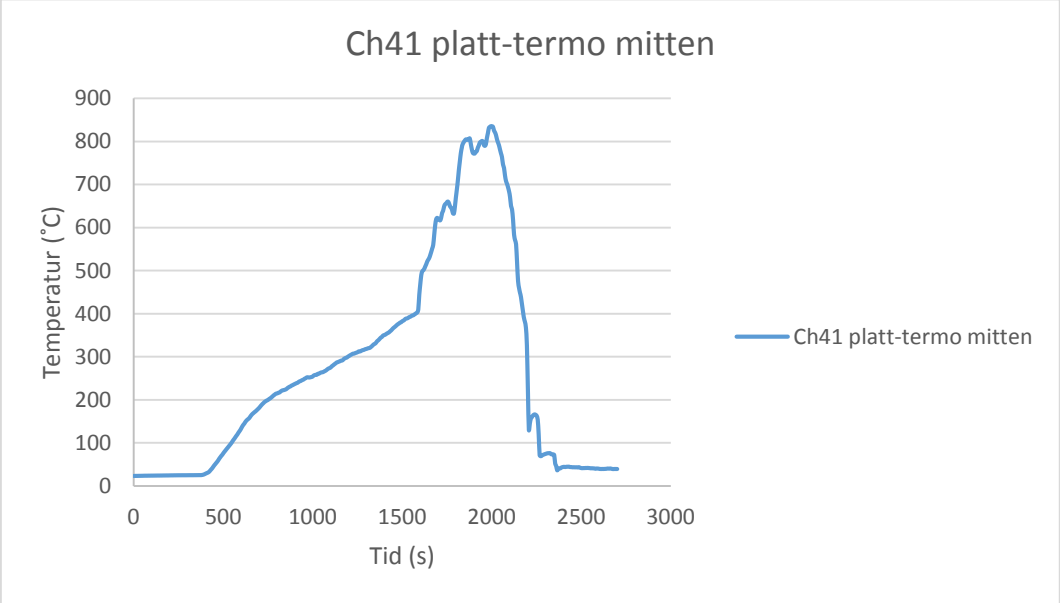
Tak 3



Figur E.4068. Temperatur som en funktion av tiden för Ch32.

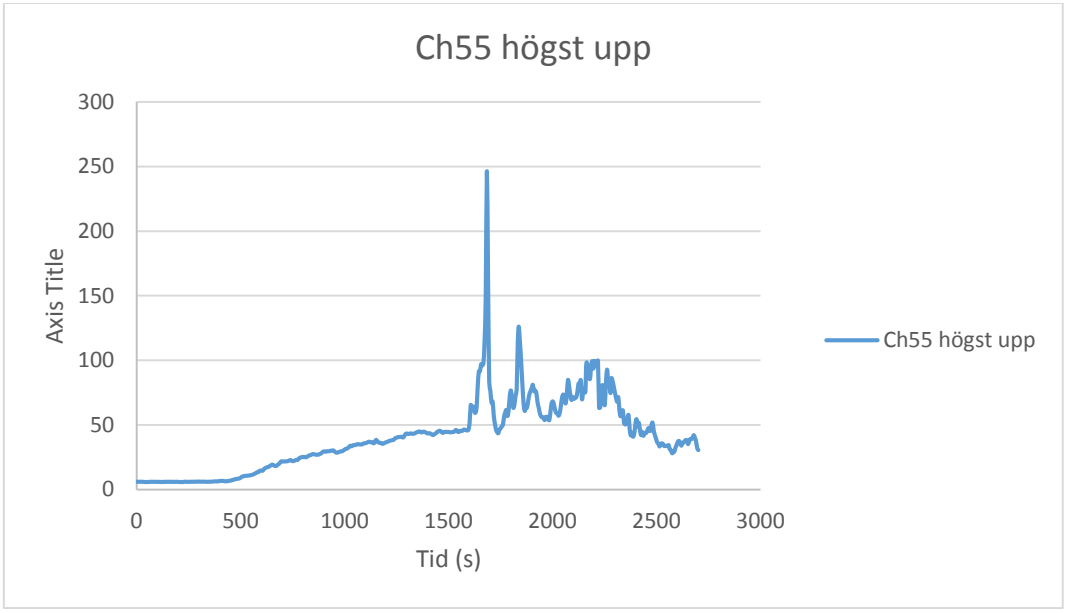


Figur E.41. Temperatur som en funktion av tiden för Ch33.

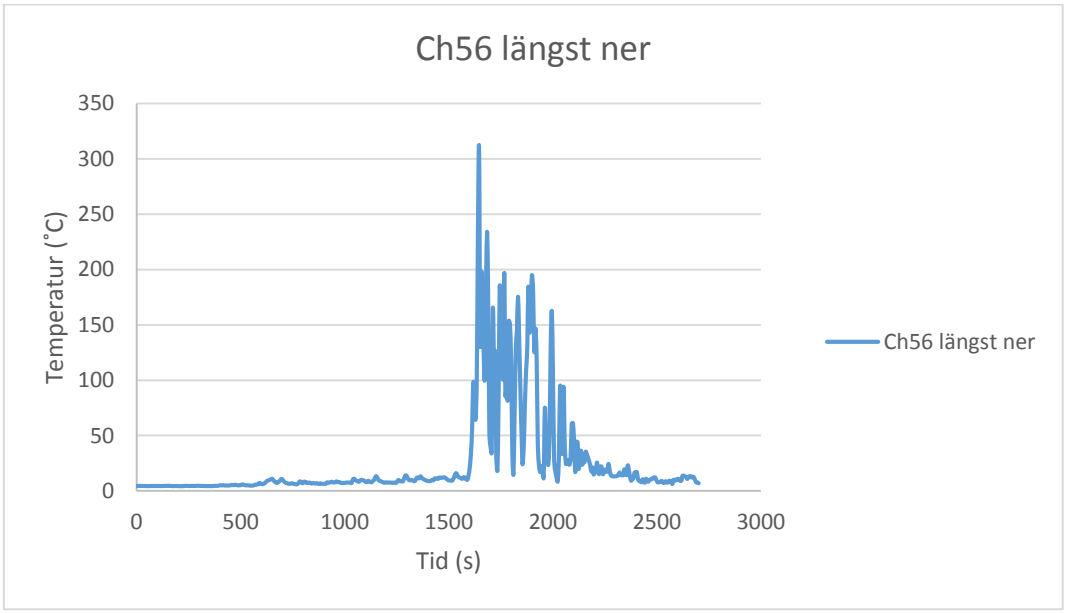


Figur E.42. Temperatur som en funktion av tiden för Ch41.

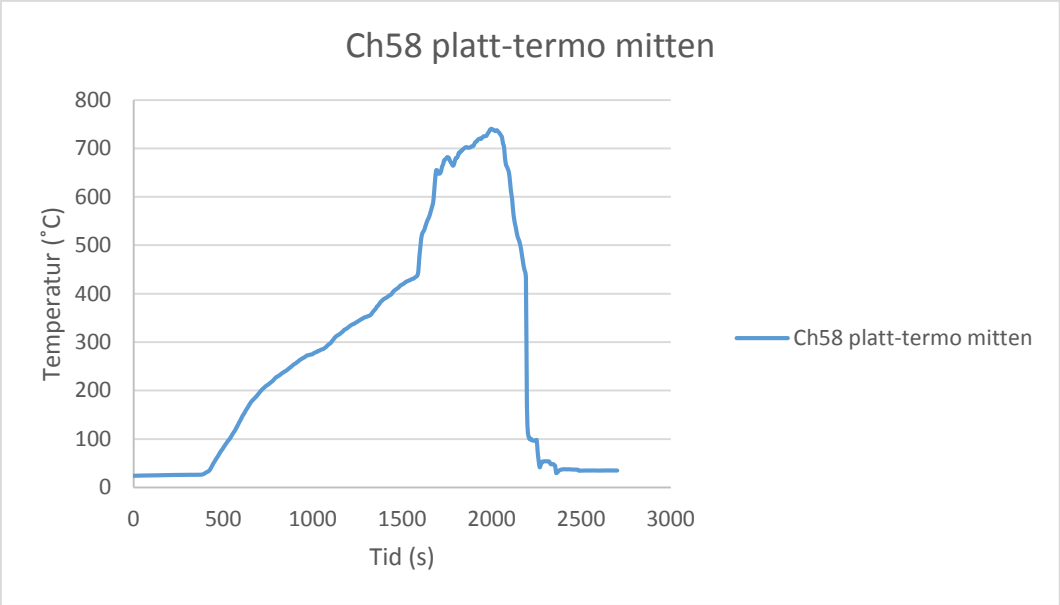
Tak 4



Figur E.43. Temperatur som en funktion av tiden för Ch55.



Figur E.44. Temperatur som en funktion av tiden för Ch56.



Figur E.45. Temperatur som en funktion av tiden för Ch58.

Bilaga F. Bilder från försöket

Figur F.1 till F.11 nedan visar bilder i kronologisk ordning från försöket.

Figur F.1. Förförsök av brännare (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.2. Kontroll av mätutrustning innan brännare tänds (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 69. IR-kameran visar tydligt att värme sprids via takfot på den oisolerade delen av taket men inte på den isolerade i samma utsträckning (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.4. En av de högupplösta FLIR-kamerorna (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur 70. Ett tydligt brandgaslager har uppstått (foto SÄRF, används med tillstånd).

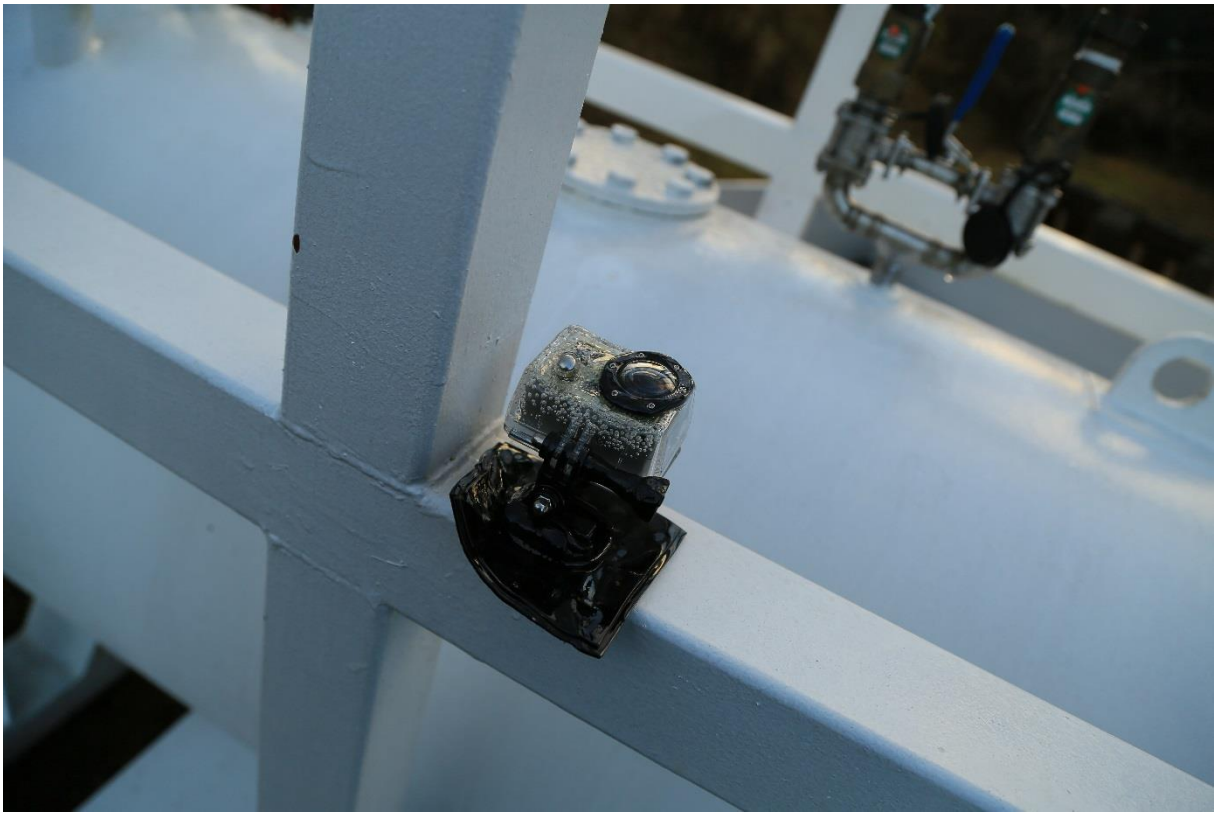
Figur F.6. Rökspridning från takfot och taknock kan observeras med blotta ögat (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.7. Temperaturen i taket börjar närma sig 400 grader (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.8. Fullt utvecklad brand (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.9. Dags att avsluta försöket (foto SÄRF, används med tillstånd).

Figur F.10. Branden består i taket (foto SÄRF, används med tillstånd).



Figur F.11. Kamera i brandrummet kan vara en dyr idé (foto SÄRF, används med tillstånd).

Bilaga G. Kalibrering

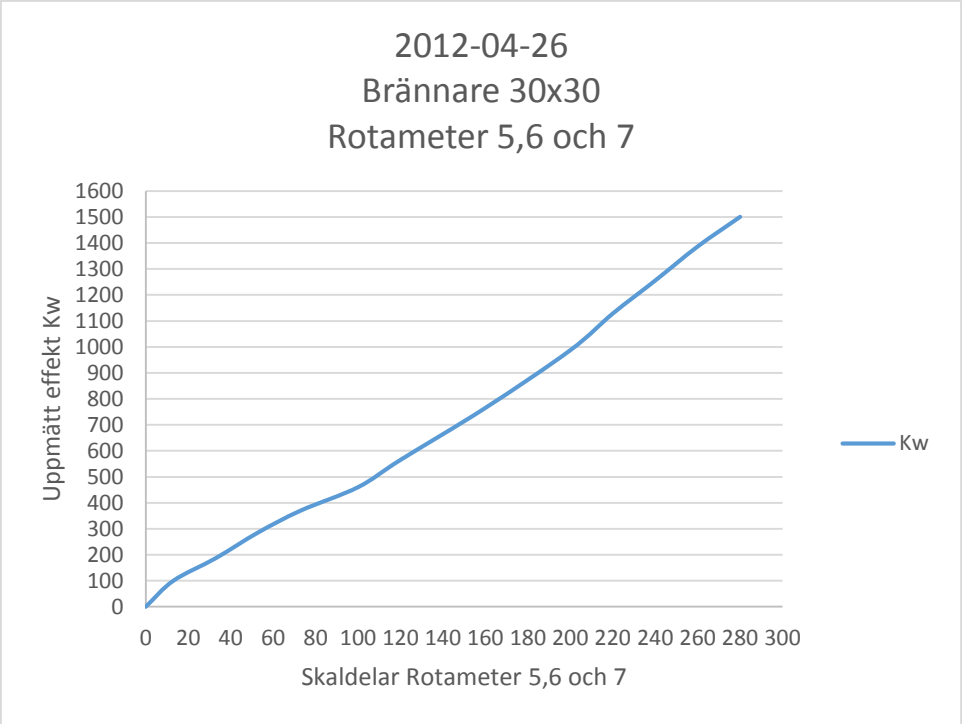
För att kontrollera att önskvärd effekt kunde uppnås behövde en flödesmätare kopplas in. Eftersom varken LTH eller Guttajöns övningsanläggning hade tillgång till en mätare för så stora flöden som försöket skulle innehålla beslutades att låna en mätare från SP i Borås. Denna mätare bestod av fyra stycken parallellkopplade rotametrar, se figur G.1, och hade stått oanvänd en längre period.

Figur G.1. Parallellkopplade rotametrar.

De fyra mätarna är graderade mellan 0-100 %. Flödesmätaren bör därför ses som en enhetslös mätare innehållande en skala mellan 0-400. För att veta ungefär vilken effekt som tillförs behövs kännedom om vilken effekt en viss procentsats motsvarar, vilket beror på vilken gas som används. SP tillhandahöll ett dokument innehållande data över detta från en mätning 2012-04-26 med gasol, se tabell G.1 och figur G.2 nedan. Det framgår att förhållandet mellan skaldelar och uppmätt effekt är nästintill linjär.

Tabell G.1. Uppmätt effekt för olika flöden i de parallellkopplade rotametrarna.

Rotameter	Skaldelar	Kw
Rot5	0	0
Rot5	13	100
Rot5	33	187
Rot5	53	286
Rot5	73	370
Rot5	100	460
Rot6	120	565
Rot6	160	765
Rot6	200	987
Rot7	220	1128
Rot7	240	1255
Rot7	260	1386
Rot7	280	1500



Figur G.2. SP:s uppmätta effekt för olika flöden i de parallellkopplade rotametrarna.

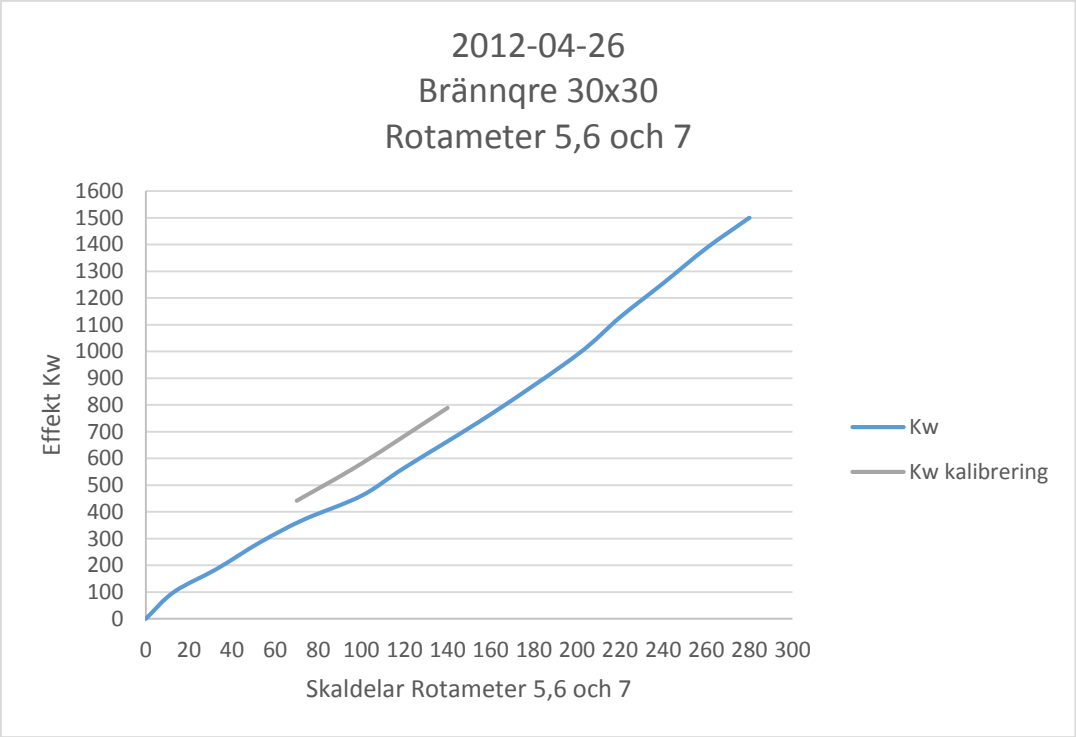
För att säkerställa att denna information stämde och inte utrustningen förändrats eller gav andra resultat med andra slangkopplingar gjordes en egen grov kalibrering. Detta genomfördes genom att koppla en mindre gasoltub till rotametrarna och efter dessa koppla in en brännare lik den som användes under försöket, se figur G.3.

Figur G.3. Kalibreringsuppställning.

Brännaren startades med max utflöde från gasoltuben som placerades på en våg med en noggrannhet på 1 gram. På så vis kunde massavbrinningen, som motsvarar en viss effekt, jämföras med rotametrarnas värde. Tre stycken mätningar gjordes under 10 sekunder, se tabell G.2 och figur G.4 nedan. För den beräknade effekten användes ekvation C.1 med $\Delta H_{Ceff} =$ 46450 kJ/g (Drysdale, 2011).

Tabell G.2. Skaldelar med respektive effekt.

Massavbrinning [g/s]	**Skaldelar**	**Beräknad effekt [kW/s]**
9,5	70	441
12,5	100	581
17,0	140	790



Figur G.4. SP:s uppmätta effekt för olika flöden i de parallellkopplade rotametrarna samt värden erhållna från kalibrering.

Kalibreringskurvan ligger ovanför SP:s kurva, men har en snarlik lutning. Uppskattningen vid kalibreringen är väldigt grov då den är gjord med manuell tidtagning under en kort tid. Den önskvärda effekten 1MW ges enligt SP:s mätningar vid flödet 200 skaldelar, medan den andra kalibreringskurvan antyder att denna effekt kan nås vid ett lägre flöde. Syftet med kalibreringen var att uppskatta ett ungefärligt flöde på rotametrarna för att vara i rätt härad när försöket påbörjas.

Bilaga H. Programvara

I bilaga H beskrivs den programvara som använts för rapporten.

H.1 CFAST

CFAST är en så kallad tvåzonsmodell som betyder att de rum som undersöks i en simulering delas in i två olika kontrollvolymer. Den översta volymen representerar brandgaslagret och den nedre representerar omgivande luft. Båda volymerna antas vara väl omblandade och därför homogena vilket betyder att samma temperatur med mera råder inom hela kontrollvolymen.

Modellen utför transienta beräkningar där kontinuitetsekvationer löses för massa, energi och partiklar för varje tidssteg. Fördelar med programmet är att det är enkelt att använda, simuleringar går snabbt att genomföra och de ger mycket information snabbt.

Branden utgörs av en punktkälla vars egenskaper definieras av användaren och modellen tar ej hänsyn till värmeåterföring från tak och väggar mot branden. När det råder brist på syre i ett rum kan användaren själv välja om branden skall påverkas av syretillgången eller inte (Nystedt & Frantzich, 2011).

För att programmet skall anses giltigt bör kriterierna i tabell H.1 nedan vara uppfyllda (ISO, 1995). Exempelvis innebär det att korridorer inte bör simuleras eftersom *längden* maximalt får vara tre gånger så lång som *bredden* på rummet.

Tabell H.1. Intervall inom vilka CFAST validerats (ISO, 1995).

Förhållande	Acceptabelt	Speciell hänsyn
Max (L/B)	L/B < 3	3 < L/B < 5
Max(L/H)	L/H < 3	3 < L/H < 6
Min (B/H)	B/H > 0,4	0,2 < B/H < 0,4
$\dot{Q}$ **[kW]**	$\dot{Q} \geq 5 \cdot A\sqrt{H}$	-

H.2 FDS

Fire Dynamics Simulator (FDS) är en Computational Fluid Dynamics-modell (CFD) som är utvecklad av National Institute of Standars and Technology (NIST). FDS beräknar Navier-Stokes kontinuitetsekvationer numeriskt efter att stora volymer delats upp i mindre celler. Ekvationerna löses så att uniforma förhållanden uppstår för varje cell. Denna förenkling medför att resultatet blir mer tillförlitligt när cellstorleken är liten. Dock ökar behovet av datorkapacitet med mindre celler vilket medför att tiden är en begränsande faktor för hur bra resultat som erhålls. Programmet har ett antal undermodeller som behandlar bland annat förbränning, strålning och turbulens. Den turbulensmodell som används är en så kallad Large Eddy Simulation-modell (LES) som simulerar virvlar större än cellstorleken och beräknar medelvärdet för de som är mindre. Programmet som använts i det här arbetet är FDS 5.5.3 (McGrattan, Floyd, Hostikka, & McDermott, 2010).

H.3 FLIR Tools

FLIR Tools är en programvara utvecklad av FLIR Systems Inc. där det går att importera, redigera och analysera bilder från en IR-kamera. Med hjälp av programmet går det att redigera temperaturnivåer, färgpaletter och justera parametrar (FLIR, 2014).