

# Utvärdering av tunnelbrandsmodeller

Samstämmigheten mellan simulering,  
handberäkning och experiment

---

Alva Larsson & Johanna Gondinger

BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET



**EXAMENSARBETE**  
**Brandteknik**

**Utvärdering av tunnelbrandsmodeller**

**Alva Larsson**  
**Johanna Gondinger**

**Lund 2024**

Utvärdering av tunnelbrandsmodeller  
Evaluation of tunnel fire models

Författare/Author: Alva Larsson & Johanna Gondinger

**Report 5709**

**ISRN: LUTVDG/TVBB--5709--SE**

Antal sidor/Number of pages: 81

Illustrationer/Illustrations: 54

Sökord/Keywords

Tunnelbränder, FDS, handberäkning, branddynamik, brandexperiment

Tunnel fires, CFD, hand calculations, fire dynamics, fire experiment

## Abstract

The purpose of this study was to investigate the predictive capabilities of hand-calculation methods and simulations using FDS in understanding the behavior of a tunnel fire in terms of temperature and incident radiation. Additionally, the study aimed to examine the repeatability of a large-scale fire experiment. The research commenced with the execution of three similar experiments, further called test 1, 2 and 3, in a tunnel facility constructed for fire experiments. A heptane pool was used as fire source and ensuring uniform conditions for each experiment. Subsequently, the same fire scenarios were simulated using FDS, and hand-calculations. The results indicated that repeatability was generally favorable for experimental tests 2 and 3, while test 1 exhibited distinctive different characteristics. One plausible explanation for this discrepancy could be that the first test desiccated the materials in the tunnel, given its prior unused state. Furthermore, only output data from tests 2 and 3 were utilized.

Hand-calculations, as a method, has proven to be time-efficient and suitable for quickly estimating tunnel temperatures. However, for more precise results where numerous parameters can be tailored to each individual experiment, hand-calculations may fall short. In summary, FDS emerges as a robust method for predicting temperatures in tunnel fires, and the results accurately reflect the input conditions. The efficacy of the FDS method is dependent on the knowledge possessed by the engineer conducting the simulation regarding fire development, influential parameters, and the complexities of the program. The more comprehensive the understanding of these elements, the more accurate the results obtained.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023.

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telefon: 046 - 222 73 60

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

[www.brand.lth.se](http://www.brand.lth.se)  
Telephone: +46 46 222 73 60

## Förord

Examensarbetet utfördes under höstterminen 2023 på avdelningen för Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola, för att avsluta studier på brandingenjörsprogrammet. Arbetet motsvarar 22,5 högskolepoäng och skrevs av Alva Larsson och Johanna Gondinger.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Nils Johansson, universitetslektor vid Avdelningen för Brandteknik på LTH, för hans tålamod, engagemang, och för att han alltid finns tillgänglig för frågor och funderingar.

Vi vill även tacka vår biträdande handledare Dan Madsen, universitetsadjunkt vid Avdelningen för Brandteknik på LTH, för att han har hjälpt oss planera och genomföra experimenten.

Ytterligare personer som har bidragit underarbetets gång är Bjarne Husted för hjälp med simuleringsresultat. Vi vill även rikta ett stort tack till doktorand Patrick Sudhoff, forskningsingenjör Martin Gunder och forskare Konrad Wilkens för all hjälp med experimenten.

Lund 2024,

Alva Larsson & Johanna Gondinger

## Sammanfattning

Tunnlar fyller en viktig funktion i dagens infrastruktur och vägnät. Det ökade behovet av att kunna transportera fordon och människor genom eller under landmassor medför komplexa utformningar av tunnlar. För att få bygga en tunnel, tillkommer krav på brandsäkerhet från Trafikverket som gäller för ny- och ombyggnation. Trafikverket ställer krav på att om avsaknad av tillräckliga utrymningsvägar finns så skall kritiska förhållanden fastställas och analyseras när och om de inträffar. För att göra detta krävs kunskap om tunnlar och hur geometrin påverkar en eventuell brand. Med kunskapen som grund, finns det olika metoder för att förutsäga en brands beteende. Två av metoderna som arbetet behandlar är datorsimuleringar och handberäkningar. Syftet med detta arbete är att fastställa hur väl två metoder, handberäkningar och simuleringar i programmet FDS, kan förutsäga brandens beteende, temperatur och värmestrålning vid en tunnelbrand. Arbetet syftar även till att undersöka repeterbarheten av ett storskaligt brandförsök och samtidigt bidra till forskningen genom att utvärdera de två studerade beräkningsmetoderna. Problemformuleringarna som arbetet besvarar är följande:

- Hur ser repeterbarheten avseende massavbrinning, temperatur och värmestrålning ut i ett storskaligt brandförsök i tunnelmiljö?
- Hur stor är avvikelsen vid handberäkning av temperatur i jämförelse med uppmätta värden vid ett brandtekniskt tunnelexperiment?
- Hur stor är avvikelsen mellan simuleringar av temperatur i programmet FDS i jämförelse med uppmätta värden vid ett brandtekniskt tunnelexperiment?
- Vilka för- och nackdelar kan konstateras för respektive metod?

Tillvägagångssättet som har använts i arbetet var inledningsvis att utföra en litteraturstudie för att skapa en kunskapsgrund kring ämnet tunnelbränder och hur de skiljer sig från rumsbränder. Experiment utfördes sedan i LTH:s forskningstunnel i Revinge, där bränslekällan representerades av ett Heptanbål. Samma test utfördes tre gånger, för att undersöka repeterbarheten. Handberäkningar och simuleringar i FDS utfördes sedan, där uppbyggnaden av FDS-modellen grundade sig i att efterlikna de utförda experimenten för att ge korrekta och representativa resultat.

Resultaten påvisar att de två metoderna har flera skillnader i tillvägagångssättet. Handberäkningar är en tidseffektiv metod som fungerar för överslagsberäkningar men där det är begränsade möjligheter att anpassa modellen efter olika förutsättningar. Metoden är transparent med vilka parametrar som är av betydelse för resultatet i jämförelse mot simuleringar där en förståelse för brandförlopp, beräkningsgång, modeller och programmet krävs. Simuleringsprogrammet FDS kan användas som ett verktyg till att förutspå ett brandförlopp i en tunnel och resultatet skildrar verkligheten i samma utsträckning som funktioner och information har skrivits i indatafilen. Nackdelar med metoden är att det krävs en kunskap om brandförlopp och simuleringsprogrammet för att kunna utnyttja dess funktioner som gör att metoden är flexibel.

Gällande repeterbarheten av ett storskaligt försök så var den generellt god. Avseende massavbrinning så var repeterbarheten god, liknande resultat erhöles från de tre försöken där enbart små skillnader kunde ses. Vad gäller temperatur så var resultaten generellt goda för test 2 och 3, men där test 1 hade större avvikelser. Temperaturerna i test 1 var lägre än under de två andra testen, vilket kan bero på att innan tunneln använts första gången, kan det ha funnits fukt kvar i innerbeklädnaden där effektutveckling kan förbrukats till förångning av fukten.

I ett verkligt fall kan det vara fukt i väggarna eftersom det inte har brunnit i tunneln sedan tidigare. I det avseendet kan test 1 vara det försök som har bäst extern validitet. Resultatet på simuleringen har enbart jämförts med test 2-3 eftersom resultaten för dessa test korrelerar bättre med varandra.

Sammanfattningsvis så är resultaten från simuleringarna inte mer tillförlitliga eller noggranna än vad indatafilen är. Simuleringar som metod konstateras fungera bäst, om ansvarig har kunskapen som krävs.

## Summary

Tunnels play a crucial role in contemporary infrastructure and road networks. The heightened demand for transporting vehicles and people through or beneath land masses necessitates the intricate design of tunnels. To be granted permission to construct a tunnel, compliance with fire safety regulations from the Swedish Transport Administration (Trafikverket) is obligatory for both new construction and renovations. Trafikverket imposes requirements that, in the absence of adequate evacuation routes, critical conditions must be identified and analyzed if and when they occur. Achieving this involves an understanding of tunnels and how geometry influences potential fire scenarios. Based on this knowledge, various methods exist for predicting fire behavior. This study focuses on two methods: CFD simulations and hand-calculations. The objective is to ascertain how well these two methods, hand-calculations, and CFD simulations using the Fire Dynamics Simulator (FDS) program, can predict fire behavior, temperature, and heat radiation in a tunnel fire. Furthermore, the study also aims to investigate the repeatability of a large-scale fire experiment and contribute to research by evaluating the two mentioned calculation methods. The research questions addressed in the study are as follows:

- What is the repeatability regarding mass loss rate, temperature and heat radiation in a large-scale fire experiment in a tunnel environment?
- What is the deviation in hand-calculation of temperature compared to measured values in a tunnel fire experiment?
- What is the deviation between simulations of temperature in the FDS compared to measured values in a tunnel fire experiment?
- What are the advantages and disadvantages of each method?

The approach employed in this study began with a literature review to establish a knowledge base on the subject of tunnel fires and how they differ from room fires. Experiments were then conducted in LTH's research tunnel in Revinge, where the fuel source was represented by a heptane fire. The same test was conducted three times to examine repeatability. Manual calculations and simulations in FDS were then performed, with the FDS model structure mimicking the conducted experiments to provide accurate and representative results.

The results indicate several differences in the approaches of the two methods. Hand-calculations are a time-efficient method suitable for rough estimates, but with limited flexibility to adapt the model to different conditions. The method is transparent regarding the parameters that influence the results compared to simulations, where an understanding of fire progression, calculation process, models, and the program is required. FDS can be used as a tool to predict smoke spread and temperature development in a tunnel, and the results reflect reality to the extent that functions and information are accurately inputted. Disadvantages of the method include the need for knowledge about fire development and the simulation program to leverage its flexible features.

Regarding the repeatability of the conducted large-scale experiment, it was generally good. For the mass burning rate, repeatability was good, with similar results obtained from the three experiments showing only minor differences. Concerning temperature, the results were generally good for tests 2 and 3, while test 1 had larger deviations. The temperatures in test 1 were lower than in the other two tests, possibly because, before the tunnel was used for the first time, residual moisture in the inner lining could have been present, consuming energy for moisture evaporation.

In a real-world scenario, there may be moisture in the walls as the tunnel has not experienced a fire before. In this regard, test 1 may be the experiment with the best external validity. However, in comparing the results with the simulation, tests 2-3 are considered more relevant since the results correlates well.

In conclusion, the results from simulations are not more reliable or accurate than the input provided. Simulations are deemed effective as a method if the responsible party possesses the required knowledge.

## Förkortningar

CFD – Computational Fluid Dynamics

FDS – Fire Dynamics Simulator

HRR – Heat Release Rate

HRRPUA – Heat Release Rate Per Unit Area

MSB – Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap

NIST – National Institute of Standards and Technology



## Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund .....	1
1.2	Syfte .....	1
1.3	Mål .....	2
1.4	Problemformulering .....	2
1.5	Avgränsningar .....	2
2	Metod.....	3
2.1	Litteraturstudie .....	3
2.2	Experiment .....	4
2.3	Handberäkningar .....	4
2.4	CFD Simuleringar .....	4
3	Teori .....	5
3.1	Tunnelbränder .....	5
3.1.1	Exempel på inträffade tunnelbränder .....	5
3.1.2	Branddynamik .....	5
3.2	Modeller för handberäkningar .....	6
3.2.1	Gastemperatur .....	7
3.2.2	Strålning .....	8
3.2.3	Effektutveckling för bränder .....	9
3.2.4	Effektutveckling efter experimentdata .....	10
3.3	Programvaror.....	10
3.3.1	Fire Dynamics Simulator (FDS).....	10
3.3.2	Smokeyview .....	11
3.3.3	Pyrosim.....	12
4	Experiment .....	13
4.1	Beskrivning av tunneln.....	13
4.2	Planering av experiment.....	14
4.3	Beskrivning av experimentell uppställning .....	15
4.4	Tillvägagångssätt vid experimentella försök.....	16
5	Handberäkning .....	19
6	Simulering .....	20
6.1	Tillvägagångssätt vid simulering.....	20
6.1.1	Mesh .....	21
6.1.2	Branden .....	21
7	Resultat.....	22
7.1	Experiment .....	22

7.1.1	Massavbrinning .....	22
7.1.2	Effektutveckling .....	22
7.1.3	Experimentell repeterbarhet .....	23
7.2	Handberäkningar .....	25
7.3	CFD simuleringar .....	26
7.3.1	Jämförelse mellan simulering, experiment och handberäkningar .....	27
8	Diskussion .....	29
8.1	Metod.....	29
8.1.1	Litteraturstudie .....	29
8.1.2	Experiment .....	29
8.1.3	Handberäkningar .....	30
8.1.4	CFD simuleringar .....	31
8.2	Resultat.....	31
8.2.1	Massavbrinning och effektutveckling .....	31
8.2.2	Temperatur .....	32
8.2.3	Strålning .....	34
9	Fortsatt forskning .....	35
10	Slutsats.....	36
11	Referenser.....	38
	Appendix A - Handberäkningar .....	40
	A.1 Planering av experiment, effektutveckling.....	40
	A.2 Gastemperatur.....	41
	A.3 Beräkning av experimentdata .....	41
	A.4 Strålning till plattermoelement .....	42
	Appendix B – Simulering.....	43
	B.1 Meshstorlek.....	43
	B.2 Branden.....	43
	B.3 Utdata från CFD simulering .....	44
	Appendix C – Utdata från experimenten.....	46
	Appendix D – FDS kod.....	56

# 1 Inledning

*Det inledande kapitlet syftar till att ge en generell inblick i arbetet och få en övergripande bild av ämnet tunnelbränder. Examensarbetets syfte och mål tillsammans med samtliga frågeställningar presenteras även i kapitlet nedan.*

## 1.1 Bakgrund

Antalet tunnlar har på de senaste åren ökat drastiskt i världens infrastruktur och bidrar till att fordon kan ta sig under eller genom bergmassor, vatten och liknande hinder. Tunnlar finns i flera olika former, exempelvis som vägtunnlar eller tunnelbanor och det ökade behovet medför mer komplexa utformningar av dessa (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Bränder som uppstår i enklare byggnader och konstruktioner är väl studerade, där kunskapen om branddynamik och brandförlopp är god. Skillnader mellan tunnlar och byggnader är många, där geometri och ventilation är två stora faktorer. I takt med att tunnlar byggs mer komplicerat kommer dess geometri att även påverka fysiken och beteendet hos en eventuell brand enligt Ingason et al. (2015). Branddynamik och brandförlopp för tunnlar är ett nyare fenomen där kunskapsgrunden behöver utvecklas.

Bränder i tunnlar skiljer sig utifrån många olika aspekter från en brand utomhus eller i byggnad. Ingason et al. (2015) anger att de två största skillnaderna som utmärker tunnelbränder, är värmeströmning som återförs från tunnelmiljön tillbaka till branden, samt påverkan av naturlig ventilation. Då tunnlar har en långsmal form med låg takhöjd, medför det att branden stängs inne. Värmen som alstras från flaman blir instängd och återförs till branden vilket gör att temperaturen i utrymmet blir hög. Den naturliga ventilationen påverkar branden genom att det ofta finns en begränsad mängd syre i en tunnel, vilket ger upphov till en ventilationskontrollerad brand. I de fall där tunneln har god syretillförsel kan branden i stället bli bränslekontrollerad. De två olika bränderna har olika karaktärsdrag som i sin tur påverkas av omgivningen. Faktorer som vind och väderförhållanden utomhus, geometrin av tunneln och flödes hastigheten av luftströmmar, påverkar branddynamiken (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

Trafikverket ställer krav på brandsäkerheten i tunnelbyggnader genom följande, ”Om avståndet mellan två utrymningsvägar är större än 200 m i tunnlar längre än 300 meter ska gränsvärden för vad som är kritiska förhållanden fastställas och får inte överskridas under den tid som krävs för utrymningen” (Trafikverket, Tunnelbyggande, 2021). Kravet ger utrymme för projektörer att fastställa kritiska förhållanden, samt kontrollera när och om de uppfylls. Analys av när och om kritiska förhållanden uppnås kan utföras med hjälp av de två metoder som redovisas i arbetet. Trafikverket har i tidigare kravrapport angett att ”Vid värdering av kritiska förhållanden ska siktbarhet, värmestrålning, lufttemperatur, toxiska gaser samt kombinationen av temperatur och toxiska gaser beaktas” (Trafikverket, Krav Tunnelbyggande, 2016).

För att kunna dimensionera tunnlar ur brand- och säkerhetsperspektiv och möta kraven från Trafikverket, måste projektörer kunna förutsäga brandens beteende. Metoder som används idag för att kunna göra en analytisk dimensionering och förutsäga brandens beteende, inom parametrar såsom temperatur och värmestrålning, är handberäkningar och simuleringsprogram som till exempel Fire Dynamics Simulator (FDS). Detta examensarbete kommer att undersöka vilken av de två nämnda metoderna som lämpligast förutsäger en brands beteende. De tre parametrarna som kommer mätas är temperatur, strålning och massavbrinning.

## 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att fastställa hur väl olika beräkningsmetoder kan förutsäga förhållanden vid brand i en tunnel. Syftet är även att undersöka repeterbarheten av ett storskaligt brandförsök, samt att bidra till kunskap inom brandbranschen genom att utvärdera de olika metoderna. Förhoppningen är att kunna hjälpa framtida projektörer att välja den metod som är lämpligast att använda för att bedöma

konsekvenserna av tunnelbränder. Genom arbetet ska även för- och nackdelar med de olika metoderna fastställas.

### 1.3 Mål

Målet med arbetet är att genomföra handberäkningar och CFD simuleringar för att skapa en uppfattning av ett brandförlopp i en tunnel. En jämförelse mellan de olika resultaten och ett storskaligt brandförsök kommer sedan att utföras med målet att avgöra hur väl metoderna stämmer överens med ett faktiskt brandtekniskt förlopp. Resultaten för experimenten ska också jämföras med varandra för att få en uppfattning om hur repeterbarheten för ett storskaligt brandförsök ser ut.

### 1.4 Problemformulering

För att skapa en djupare kunskap gällande branddynamik vid tunnelbränder har fem problemformuleringar framtagits. Genom att besvara problemformuleringarna bedöms det att arbetets syfte och mål kan uppnås.

Hur ser repeterbarheten avseende massavbrinning, temperatur och värmestrålning ut i ett storskaligt brandförsök i tunnelmiljö?

Hur stor är avvikelserna vid handberäkning av temperatur i jämförelse med uppmätta värden vid ett brandtekniskt tunnelexperiment?

Hur stor är avvikelserna mellan simuleringar av temperatur i programmet FDS i jämförelse med uppmätta värden vid ett brandtekniskt tunnelexperiment?

Vilka för- och nackdelar kan konstateras för respektive metod?

### 1.5 Avgränsningar

Utgångspunkten för arbetet är endast bränder i tunnlar. Bränder i andra typer av utrymmen kommer inte analyseras i rapporten. Vidare inom ämnet tunnelbränder studeras specifikt parametrarna strålning, temperatur och massavbrinning varpå andra parametrar som påverkar tunnelbrand inte tas i beaktande. Under experimenten användes enkelt bränsle och studien omfattar inte brandspridning med realistiska bränslen.

Vid analysen av tunnelbränder i rapporten riktas fokus mot säkerheten i tunnlar med avseende att analysera hur utvalda parametrar förändras under ett brandförlopp. Enbart två utvalda modeller studeras i arbetet, vilka är FDS för simuleringsförsök och Ingasons handberäkningsmodeller för temperatur, strålning och effektutveckling. Övriga modeller kommer ej utvärderas. Personers säkerhet, påverkan på konstruktionen och räddningstjänstens insats utvärderas inte i rapporten.

## 2 Metod

Följande kapitel beskriver den metod som legat till grund för att färdigställa examensarbetet. Metoden består av 4 olika tillvägagångssätt; litteraturstudier, handberäkningar, simuleringar och experiment. Nedan presenteras varje tillvägagångssätt mer ingående.

### 2.1 Litteraturstudie

För att bygga en grundläggande kunskapsgrund om tunnelbränder bestod den första delen av arbetet av en litteraturstudie. Litteraturstudien stod till grund för en fördjupad bild av ämnet bränder i tunnlar, samt för att ta del av den senaste forskningen inom ämnet. Litteraturen användes även som underlag för valet av handberäkningsmodeller som har använts i rapporten, samt gav upphov till en ökad kunskap för simuleringsprogrammet FDS. Den främsta litteraturen som användes för att få en djupare förståelse för tunnelbränder samt för urvalet av relevanta handberäkningsmetoder, var boken ”Tunnel Fire Dynamics” av Ingason, Zehn Li & Lönnermark (2015). Sökningar har även gjorts i Lunds universitets sökmotor, LUBsearch, där publikationer som känts relevanta för arbetet har studerats. De källor som sedan använts i rapporten presenteras i källförteckningen. För att finna relevanta och användbara källor har sökord använts, vilka kan ses nedan i Tabell 1.

Tabell 1 - Sökord vid litteraturstudier under examensarbetet.

Svenska ord	Engelska ord
Tunnel	Tunnel
Brand	Fire
Temperatur	Radiation
Strålning	Heat flux
	Temperature
	Fire Dynamics Simulator (FDS)
	Plate temperature

Upplägget av litteratursökningen utgick till stor del från *Att genomföra examensarbete* av Höst, Regnell & Runeson (2006). Litteraturstudierna genomfördes iterativt genom hela arbetsprocessen där litteraturhänvisningar i relevanta källor ofta resulterade i en fördjupning av andra källor som var av intresse, även kallat snöbollseffekt enligt (Höst, Regnell, & Runeson, 2006). Tanken är att på så sätt kunna täcka in de viktiga referenserna inom ett område. Relevansen samt trovärdigheten för samtliga källor har varit i fokus under litteraturstudierna där majoriteten av källorna har varit vetenskapligt granskade. För de fall där källan inte varit vetenskapligt granskad, har den verifierats genom jämförelse med andra källor. Då källans resultat har stämt överens med övrig litteratur, har den ansetts vara pålitlig. Tillvägagångssättet övergick från att söka brett med översiktlig läsning av källorna till att gå mer på djupet och fokusera på de källor som kändes mer relevanta för ämnet. Litteraturstudien utfördes mellan september och oktober 2023.

I enlighet med Höst et al. (2006) har litteratursökningen haft följande struktur:

1. Sök brett
2. Välj ut
3. Sök djupt

Inledningsvis har ett stort antal sökord använts vilket resulterade i ett stort utbud av olika källor. En stor andel källor påträffades och granskades sedan för att selektera ut de källorna av högst relevans till ämnet. En mer djupgående bearbetning av källorna påbörjades och sammanställdes i en litteratursammanställning där alla källor dokumenterades. Litteratursammanställningen pågick parallellt med övriga delar i arbetet under processen.

## 2.2 Experiment

Experiment av en tunnelbrand utfördes på Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskaps (MSB) övningsfält i Revinge, i en tunnel uppförd av avdelningen för brandteknik, vid Lunds tekniska högskola. Experimenten utfördes med ett Heptanbål som bränslekälla, där olika mätningar utfördes. För detaljerad beskrivning om den experimentella uppställningen och tillvägagångssätt, se kapitel 4.

## 2.3 Handberäkningar

För att förutsäga hur ett brandförlopp utspelar sig i en tunnel, har ett antal handberäkningar utförts. Urvalet av modeller genomfördes delvis i samråd med handledare, delvis utifrån litteraturstudien. Inledningsvis har målet med handberäkningarna varit att designa två olika scenarier med skilda brandförlopp i ett tidigt skede. För att bestämma utvecklingen av brandförlopp, har fokus legat på tre olika parametrar: temperatur, effektutveckling och strålning. Utvalda ekvationer beräknades i Excel för parametrarna, där resultatet sedan låg till grund för urvalet av det representativa scenariot till experimentet. Ekvationerna som använts vid beräkningarna presenteras i avsnitt 3.2 och är framtagna med hjälp av tidigare litteraturstudier, se avsnitt 2.1.

Då experimenten hade utförts gjordes nya handberäkningar som skulle jämföras mot experimentella resultaten. Fullständiga beräkningar är bifogade i Appendix A.

## 2.4 CFD Simuleringar

Analysen av brandförloppet i experimentet genomfördes i datorprogrammet Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS version 6.7.9, är ett simuleringsprogram som används vid modellering av bränder för att studera brandens rök- och värmetransport men också för att erhålla mätdata för olika parametrar vid en brand (McGrattan, o.a., 2023). Första delen av FDS-simuleringarna bestod av att rita upp tunnelns geometri i programmet Pyrosim (Thunderhead Engineering, 2022). Pyrosim är ett grafiskt användargränssnitt som är kopplat till FDS. Byggnader och komplexa modeller byggs upp i Pyrosim som skapar en indatafil av modellen till FDS. Från Pyrosim skapas en utdatafil, vilken läses in i FDS, vilket är programmet där själva simuleringarna utförs (Thunderhead Engineering, 2022). För en mer ingående beskrivning av avvägande vid upprättande av indata fil se avsnitt 6.1 och för en ingående beskrivning av simuleringsprogrammen, se avsnitt 3.3.

Efter att tunnelns geometri ritades upp i Pyrosim, placerades olika typer av mätpunkter in i tunneln för att få ut mätdata om temperatur och strålning. Mätpunkterna placerades på samma positioner som i den experimentella uppställningen. Därefter integrerades modellen från Pyrosim med FDS varpå olika simuleringar genomfördes. All insamlade mätdata dokumenterades i Excel varpå ett resultat för respektive parameter beräknades. Resultatet presenteras i avsnitt 7.3.

## 3 Teori

*I avsnittet presenteras resultatet av litteraturstudien, vilken är beskriven i avsnitt 2.1. Det som redovisas är den bakomliggande teorin för tunnelbränder, handberäkningar och simuleringsprogram som krävs för att ha möjlighet att utvärdera tunnelbränder och de olika metoderna.*

### 3.1 Tunnelbränder

*I följande avsnitt sammanställs en kunskapsgrund inom ämnet tunnelbränder, olika metoder för att förutsäga brandförhållanden, men även viss statistik för brandincidenter i tunnlar, som krävs för att kunna analysera tunnelbränder.*

#### 3.1.1 Exempel på inträffade tunnelbränder

I samband med att tunnlar tar en större roll i samhället och fyller viktiga funktioner i infrastrukturen, ökar risken för olyckor i tunnlar. Flertalet allvarliga olyckor med många avlidna har inträffat i tunnelbränder under de senaste åren. Ett exempel är tunnelbranden i Korea Daegu, Sydkorea 2003, där 189 människor avled (Yang, Luo, Li, Guo, & Zhang, 2021). Ytterligare en inträffad incident på senare tid är tunnelbranden i Futuyu 2017, Kina, där 12 människor avled och åtta stycken tunga fordon (fordon med totalvikt över 3 500 kg) förstördes enligt Yang et al. (2021). En tunnelbrand som blev en ögonöppnare för de europeiska experterna inom ämnet var branden i Mont Blanc tunneln, 1999. Konsekvenserna av denna var 39 avlidna personer och 34 fordon som totalförstördes, varav 23 lastbilar (Michel Faure & Karray, 2007)

Enligt Ingason et al. (2015) så är de vanligaste anledningarna till att brand uppkommer i vägtunnlar olika typer av kollisioner, vilket kan utgöras av två olika fordon, ett fordon med tunnelns väggar eller motorfel som leder till brand. Vidare så dras slutsatsen att konsekvenserna blir störst, både gällande avlidna och förstörelse av tunnelns struktur, då tunga fordon är involverade.

Ovanstående incidenter är enbart ett urval av olyckor, vilket konstant påminner ingenjörer och myndigheter att säkerheten för tunnlar är ett viktigt område med utrymme för vidare studier. En stor del av tidigare forskning inom brand har ägt rum i byggnader med stor volym, såsom brandlaboratorium, där det kan antas att omgivningen inte påverkar brandplymen. Tunnelbränder har inte studerats i samma utsträckning som övriga byggnader. Ingason et al. (2015) understryker hur betydelsefullt det är att analysera inträffade olyckor för att förstå vad som bidrog till dess omfattning.

#### 3.1.2 Branddynamik

Två specifika karaktärsdrag för tunnelbränder som gör de speciella jämfört med fria bränder som inte påverkas av dess omgivning, är återföring av värme, *heat feedback*, från omgivningen, samt hur branden påverkas av naturlig ventilation (Ingason, Zehn Li, & Lönnermark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Storleken av värmeåterföringen för en öppen brand styrs av flammans volym, vilket även påverkar en brand i en tunnel, däremot är det fler parametrar som påverkar storleken av värmeåterföringen. Utöver volymen, så är tvärsnittsarea, ventilation och materialet i tunneln viktiga för mängden värmeåterföring (Ingason, Zehn Li, & Lönnermark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

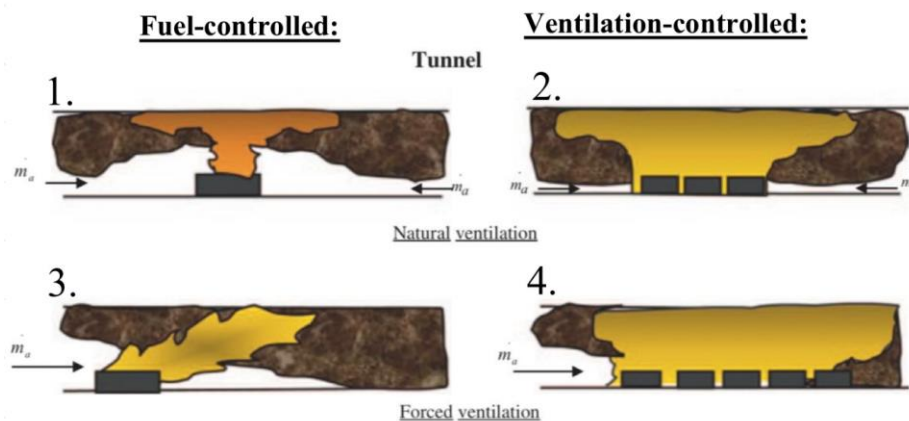
Ventilationsförhållanden är även en viktig parameter för hur en brand utspelar sig i tunneln. Beroende på brandens syretillgång, så kommer antingen en välventilerad brand att uppstå vilket medför att den är bränslekontrollerad. Det är mängden bränsle som kommer påverka brandens egenskaper och hur länge reaktionen kommer pågå. Det andra fallet som kan uppstå är en underventilerad brand, vilket innebär att det inte finns tillräckligt med syre för en fullständig förbränning. Den ofullständiga förbränningen producerar stora mängder giftig rök och restpartiklar, vilket är farligt för räddningspersonal och utrymmande personer. (Ingason, Zehn Li, & Lönnermark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

Ingason et al. (2015) anger att den främst förekommande tunnelbranden är bränslekontrollerad, men understryker att även en ventilationskontrollerad brand kan uppstå. Det senare alternativet kan exempelvis ses i större tunnelbränder med flertalet stora fordon involverade, såsom katastrofen i St.



Gotthard-tunneln 2001 då elva personer avled. Branden involverade 13 tunga fordon och tio bilar, vilket ger upphov till en stor bränslemängd, vilket i sin tur kräver stora mängder syre för att uppnå fullständig förbränning (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

I Figur 1 nedan illustreras bränder och brandgaslager tunnlar med olika typer av ventilation. De vänstra bränderna är bränslekontrollerade medan de högra är ventilationskontrollerade. De översta figurerna, 1 och 2, visar en tunnelbrand med naturlig ventilation medan de nedersta figurerna, 3 och 4, redovisar tunnelbränder med externt ventilationssystem. Flamman i figuren som redovisar en bränslekontrollerad brand med naturlig ventilation i en tunnel har en mörkare/rödare flamma, vilket är en indikation på ökad temperatur. Det beror på att branden har en fullständig förbränning då tillräcklig syremängd finns att tillgå och fortsätter utvecklas tills bränslet är slut (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Den naturliga ventilationen skapar inget luftflöde genom tunneln, då ventilationsflödet är för lågt. Det enda flödet som infinner sig i tunneln är det flöde som branden genererar. Branden kan därför brinna fritt och kyls inte ner av luftströmmar, vilket ger upphov till höga temperaturer. Vid jämförelse med flammen som är bränslekontrollerad och har externt luftflöde så skapas en luftström som påverkar flammen. Dels kyls flammen kontinuerligt av det longitudinella flödet med ny luft, dels lägger sig flammen längs med taket och brandgaserna pressas medströms.



Figur 1 - Jämför en bränslekontrollerad brand, till vänster, mot en ventilationskontrollerad brand, till höger, med olika ventilationsförhållanden. Kommentar. Från Tunnel Fire Dynamics, fig. 2.2, (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Använd med tillåtelse.

Ett fenomen som är väl bekant hos tunnelbränder och som vill undvikas är *back-layering*, vilket kan uppstå när röken forceras i en riktning men flödes hastigheten är för låg. Enligt Ingason et al. (2015) ger kombinationen av luftströmmar, termisk stigningskraft och eventuell lutning på tunneln upphov till turbulens av luft i närheten av branden. Om den longitudinella ventilationen understiger ett kritiskt värde, vanligen 3–3,5 m/s för de flesta tunnarna, kan ett omvänt flöde av brandgaser skapas under taket. Brandgaserna rör sig då mot den öppning som förväntas vara rökfri vilket innebär risker vid framför allt utrymning. Därmed kan naturlig ventilation vara ett problem för tunnlar då hastigheten av luftströmmarna blir för låga och ger utrymme för *back-layering*.

Ytterligare ett problem med naturlig ventilation är att det ges utrymme för yttre faktorer, såsom vind och atmosfäriska förhållanden, att ha stor inverkan av brandförloppet (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Ventilationen och luftströmmar påverkar hur branden kommer utspela sig och det är betydelsefullt att ha kunskap om branddynamiken och de olika scenarierna beskrivna ovan vid dimensionering av brandsäkerhet i tunnlar.

### 3.2 Modeller för handberäkningar

I avsnitt nedan presenteras de ekvationer och den teori som står till grund för de handberäkningar som gjorts på valda parametrar i en tunnelbrand.



### 3.2.1 Gastemperatur

Temperaturen som skapas i brandgaslagret i en tunnel vid brand är en viktig parameter att förutse för dimensionering ut brand- och säkerhetsperspektiv av tunnlar (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Brandgasernas temperatur påverkar utrymmande personer, men även tunnelns konstruktion och hållfasthet. Termisk stigning bidrar till att brandgaser från plymen stiger mot taket, vilket gör att de varma brandgaserna ansamlas och sedan sprider sig längs med taket. Under tiden som brandgaserna transporteras längs med tunnelns tak kommer de att svalna, vilket är beroende av avståndet mellan brandgaserna och brandkällan, samt tid enligt Ingason et al. (2015). Tunnelns hållfasthet är beroende av materialval och det är visat att exempelvis flera typer av betong minskar dess hållfasthet vid 300 °C. Siffran kan skilja sig beroende av vilken typ av cement som använts för sammansättningen (Yao, 2019).

Handberäkning av gastemperatur i tunnlar kan utföras genom att använda en endimensionell modell, med förutsättning att en longitudinell ventilation existerar (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Den endimensionella modellen går enbart att applicera på tunnelbranden om hastigheten av brandgaserna överstiger en meter per sekund, vilket säkerställer att flödet av brandgaser enbart sker i en riktning. En fördel med en endimensionell modell är att beräkningsgången kan förenklas genom att utgå från tunnelns tvärsektion sett från sidan, då det antagits att rörelse av brandgaser sker i en riktning. Den longitudinella ventilationen kan skapas med exempelvis en extern fläkt. Ingason et al. (2015) beskriver även att då massflödet är konstant, kan ekvation 1-5 användas för att beräkna medeltemperaturen för brandgaserna i tvärsnittet vid tiden  $t$ , på  $x$  meter medströms från brandkällan. Antagande som krävs är att tunneln har en konstant tvärsnittsarea och att hela flödet i tvärsnittet har samma hastighet. Modellen antar även att två tredjedelar av total effektutveckling utgörs av den konvektiva andelen, se ekvation 2. Ekvation 1 beräknas med hjälp av ekvation 2-5 nedan.

$$\Delta T_{avg}(x, t) = \Delta T_{avg}(0, \tau) e^{-\frac{h_t w_p x}{\dot{m}_o c_p}} \quad \text{Ekvation 1}$$

$$\Delta T_{avg}(0, \tau) = \frac{2\dot{Q}(\tau)}{3\dot{m}_o c_p} \quad \text{Ekvation 2}$$

$$\dot{m} = \dot{m}_o = \rho_o u_o A_T \quad \text{Ekvation 3}$$

$$\tau = t - \int_0^L \frac{dx}{u_{avg}(x)} \quad \text{Ekvation 4}$$

$$u_{avg}(x) = \frac{u_o}{T_o} T_{avg}(x) \quad \text{Ekvation 5}$$

Där:

$T_{avg}$  är medeltemperaturen för tvärsnittet (K),

$x$  är avståndet medströms ventilationen från brandkällan (m),

$t$  är den tiden (s),

$\tau$  är den verkliga tiden för vad som motsvaras av brandkällan där transporttiden av brandgaserna är inräknad (s),

$\dot{Q}$  är den totala effektutvecklingen (kW),

$\rho_o$  är luftens densitet ( $\text{kg/m}^3$ ),

$u_o$  är den longitudinella hastigheten (m/s),

$L$  är avståndet mellan mätpunkten och brandkällan (m),

$u_{avg}$  är medelhastigheten för tvärsnittet (m/s),

$h_t$  är den totala värmetransportkoefficienten ( $\text{kW/m}^2\text{K}$ ),

$w_p$  är omkretsen av tunnelns tvärsnitt (m),

$c_p$  är specifik värmekapacitet för luft vid konstant tryck ( $\text{J}/(\text{kg K})$ ),

$T_0$  är den omgivande luftens temperatur (K),

$\dot{m}$  är massflödet vilket är konstant ( $\text{kg/s}$ ),

$A_T$  är tunnelns tvärsnitt ( $\text{m}^2$ ).

### 3.2.2 Strålning

Värmeflödet under ett brandförlopp i en tunnel är en viktig parameter att ta hänsyn till vid analyser av bränder i tunnlar. Värmeflödet styrs av tre olika komponenter: den konvektiva värmeöverföringen som uppstår till följd av en temperaturskillnad mellan ett fast material och en gas. Värmeöverföringen som sker via strålning och som alstras av flammen och brandgaslagrets höga temperatur och sänds sedan ut i form av elektromagnetiska vågor. Den sista delen som styr värmeflödet är den konduktiva delen, vilken uppstår på grund av temperaturskillnader i fasta material (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

I en tunnelbrand är den genererade strålningen från brandgaslagret och branden en viktig del av värmeöverföringen. Den andel av strålningen som träffar en yta i tunneln kan estimeras med hjälp av ett plattermoelement (PT) (Ingason, Zehn Li, & Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, 2015).

Ett plattermoelement består av en tunn metallplatta med ett fastsatt termoelement och en baksida bestående av ett isolerande material. Den infallande strålningen från branden och brandgaslagret resulterar i en ökad temperatur på plattermoelementets yta (Wickström, Duthinh, & McGrattan, 2007). Wickström et al. (2007) presenterar i sin artikel en beräkningsmetod som kan användas för att konvertera temperaturökningen på metallplattans yta till värden för den infallande strålningen, se ekvation 6 nedan.

$$\dot{q}_{inc}'' = \frac{(\rho c \delta)_{PT} \frac{\Delta T_{PT}}{\Delta t} + \varepsilon_{pt} \sigma T_{PT}^4 + (h_c + K_{cond})(T_{PT} - T_{\infty})}{\varepsilon_{PT}} \quad \text{Ekvation 6}$$

Där:

$\rho$  är densiteten av metallplattan ( $\text{kg/m}^3$ ),

$c$  är den specifika värmekapaciteten för metallplattan ( $\text{kJ/kgK}$ ),

$\delta$  är tjockleken på metallplattan (m),

$\Delta T_{PT}$  är temperaturen på metallplattan (K),

$\Delta t$  är tiden (s),

$\varepsilon_{pt}$  är emissiviteten på plattermoelement (-),

$\sigma$  är Stefan-Boltzmanns konstant ( $\text{W/m}^2\text{K}^4$ ),

$h_{c,PT}$  är konvektiva värmeövergångstalet ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),

$T_\infty$  är omgivningstemperaturen (K),

$K_{cond}$  är en koefficient som korrigerar konduktionen ( $\text{W/m}^2$ ).

Vid beräkning av den infallande strålningen har värmeförlusten mellan metallplattan och det isolerande materialet på plattermoelementet försumrats. I uppvärmningsfasen av plattermoelementet är temperaturskillnaden mellan det isolerande materialet och metallplattan som störst. Det kan därför resultera i något lägre värden vid mätning av den infallande strålningen i ett tidigt skede av brandförloppet (Liu, Park, Shen, & Jayathunga-Mudiyanselage, 2021).

### 3.2.3 Effektutveckling för bränder

Effektutveckling anger hur mycket energi som frigörs under ett brandförlopp över en viss tid och anges oftast i megawatt (MW) (Ingason, Zehn Li, & Lönnermark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Under dimensioneringen av säkerheten vid brand för tunnlar, exempelvis vid utformning av ventilation eller andra brandtekniska installationer, så är effektutvecklingen är en av de viktigaste parametrarna för att förutsäga konsekvensen vid brand. Effektutvecklingen är i sin tur beroende av flera parametrar, men framför allt bränslets egenskaper. Ingason et al. (2015) anger ytterligare faktorer som påverkar, vilka är tändkälla, geometri av tunneln och ventilationsförhållanden. Runehamar tunneln i Norge är en tunnel där Ingason, Lönnermark och Zehn Li utfört flera försök i fullskala. Den maximala effektutvecklingen som uppnåddes i deras experiment var 200 MW, vilket erhöles då lastbilar fyllda med gods eldades (Ingason, Lönnermark, & Zehn Li, Runehamar Tunnel Fire Tests, 2011). Ingason et al. (2015) redovisar resultat från tidigare utförda experiment där olika typer av passagerarbilar har eldats i tunnlar, där ibland en Opel Kadett från 1990, med en longitudinell ventilation på 1,5 m/s, vilket resulterade i en maximal effektutveckling på 4,9 MW. Även ett experiment med två passagerarbilar har utförts i en konkalorimeter, där en BMW och en Renault 5 eldades där den maximala effektutvecklingen uppmättes till 10 MW.

I experimentet som utförs inom ramen för arbetet består brandkälla av en pölbrand där Heptan i flytande form tändes på, se mer i avsnitt 4. Pölbränders effektutveckling kan beräknas genom ekvation 7 nedan (Ingason, Zehn Li, & Lönnermark, Tunnel Fire Dynamics, 2015). Formen på kärlet antas vara cirkulärt (Karlsson & G. Quintiere, 2000).

$$\dot{Q}'' = \dot{m}_\infty'' (1 - e^{-k\beta D}) \chi \Delta H_c A_f \quad \text{Ekvation 7}$$

Där

$\dot{m}_\infty''$  är det högsta värdet för massavbrinning ( $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ),

D är diametern av det cirkulära kärlet som förvarar bränslet (m),

$\Delta H_c$  är den effektiva förbränningsentalpin (MJ/kg),

$\chi$  är förbränningseffektiviteten (-),

$A_f$  är arean av kärlet ( $m^2$ ),

$k\beta$  är Tabellvärde för bränslet ( $m^{-1}$ ).

För att definiera tillväxtfasen användes ekvation 8 nedan. Vid applicering av ekvationen antas det att effektutvecklingen tillväxer med tiden i kvadrat (Karlsson & G. Quintiere, 2000).

$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad \text{Ekvation 8}$$

Där:

$\dot{Q}$  är effektutveckling per tidssteg (kW/s),

$\alpha$  är en tillväxtfaktor ( $kW/s^2$ ),

$t$  är tiden från antändning (s).

### 3.2.4 Effektutveckling efter experimentdata

Effektutveckling kan även beräknas med hjälp av massförlust från ett utfört experiment. Massförlusten innebär den mängd bränsle som brinner bort i vikt per tidssteg. Dessa värden kan omvandlas med hjälp av differensen av tidssteg och massa, till en massavbrinning angiven i kilo per sekund (Karlsson & G. Quintiere, 2000). Quintiere et al (2000) anger att den effektiva förbränningsentalpin för Heptan är 44,6 MJ/kg. Effektutveckling kan sedan beräknas med ekvation 9 nedan.

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_{eff} \quad \text{Ekvation 9}$$

Där:

$\dot{Q}$  är effektutveckling per tidssteg (kW/s),

$\dot{m}$  är massavbrinning (kg/s),

$\Delta H_{eff}$  är den effektiva förbränningsentalpin (kJ/kg).

## 3.3 Programvaror

De programvaror som presenteras nedan är *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, *Smokeview* och *Pyrosim*.

### 3.3.1 Fire Dynamics Simulator (FDS)

FDS version 6.7.9, är ett simuleringsprogram framtaget av NIST som använder sig av Computational Fluid Dynamics (CFD). CFD är en modell som producerar utdata i form av numeriska värden som förutsäger olika flöden och rörelser av vätskor. Modellen utgår från lagar om bevarande av massa, momentum och energi (McGrattan, o.a., 2023). I programmet delas utrymmen in ett tredimensionellt utrymme bestående av flera små celler, där egenskaperna förutsätts vara lika.

FDS som program anpassar CFD-modellen till att förutsäga flöden som har brand och värme som drivkraft. Ekvationerna som FDS bygger på, Navier-Stokes ekvationer, är lämpliga för flöden som är termiskt drivna med en låg hastighet. De är därmed användbara för rök- och värmetransport som skapas vid brand (McGrattan, o.a., 2023). Programmet används frekvent vid brandtekniska beräkningar med syfte att förutsäga hur en brand utvecklas i en byggnad. Resultatet kan sedan användas för att studera säkerheten innan uppbyggnad, validera säkerheten i redan befintliga byggnader eller rekonstruera byggnader för att kunna utreda brandorsak vid händelse av brand. Parametrar som kan förutsägas genom

tredimensionella simuleringar är sikt, temperatur, toxicitet, strålning och koncentration av ämnen vid givna koordinater i  $x$ -,  $y$ - och  $z$ -led. (McGrattan, o.a., 2023).

Programmet FDS utgår från att utrymmet som ska simuleras består av ett stort antal kontrollvolymmer vilka utförs som rätblock, även kallat för celler, vilka kallas *meshes*. Rätblockens storlek är en viktig del att fastställa vid simulering då storleken påverkar både resultatets noggrannhet och belastning på datorns kapacitet. Noggrannheten och tillförlitligheten av resultaten påverkas av rätblockens storlek, då en mindre storlek bidrar till en finare upplösning av flödesdynamiken då egenskaperna inom rätblocket förutsätts vara lika. I brandplymen och i dess närmsta omgivning sker energiomvandlingar, turbulens uppstår och kemiska reaktioner bildas som påverkar hur brandförloppet utspelar sig. Turbulensen avbildas i simuleringarna genom *Large Eddy Simulations* (LES), vilket är en numerisk simuleringsteknik som används för turbulenta flöden. LES delar upp turbulensen i stora och små virvlar genom olika avancerade modeller (McGrattan, o.a., 2023). Genom att använda mindre rätblock så simuleras ett mer precist och trovärdigt resultat, vilket krävs för att presentera en rimlig bild av turbulens och luftinblandning i brandplymen (BIV, 2013). Många små celler ger ett noggrant resultat men använder desto mer datorkapacitet vilket tar lång tid. Stora celler ger ett snabbt utfall men resulterar samtidigt i ett resultat där ett större rätblock antas ha samma förutsättningar, vilket gör att resultatet blir mindre precist. Det är därför viktigt att tidigt fastställa vilken storlek på cellerna som är lämplig för respektive modellering.

Ingason et al. (2015) skriver att cellstorleken bör vara  $0,075D^*$  i och omkring brandplymen vid simulering av bränder i tunnlar.  $D^*$  beräknas med ekvation 10 nedan. Tunnlar är en lång konstruktion som är relativt trång, vilket gör att enbart en *mesh* bör användas (McGrattan, o.a., 2023). En uppbyggnad av flera *mesher* kan ge upphov till en problematik där missvisande tryckförändringar skapas i tunneln, vilket bidrar till en numerisk instabilitet under simuleringen. Numerisk instabilitet är ett vanligt felmeddelande under simuleringar i FDS och medför att simuleringen ej går att genomföra. McGrattan et al. (2023) rekommenderar att en relativt stor cellstorlek används inledningsvis, för att sedan finjustera rätblockens storlek till inga märkbara skillnader ses i resultaten. Genom att utföra flera simuleringar med olika storlekar på cellerna, utförs en känslighetsstudie som visar att resultatet är framtaget oberoende av den valda cellstorleken.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Ekvation 10

Där:

$\dot{Q}$  är effektutveckling (kW),

$D^*$  är brandens karaktäristiska diameter (m),

$\rho_0$  är densiteten på omgivningen ( $\text{kg/m}^3$ ),

$c_p$  är specifik värmekapacitet för luft vid konstant tryck ( $\text{J}/(\text{kg K})$ ),

$T_0$  är temperaturen på omgivningen (K),

$g$  är jordens tyngdacceleration ( $\text{m/s}^2$ ).

### 3.3.2 Smokeview

Smokeview är ett visualiseringsprogram som används för att visa de numeriska resultat som genererats av olika modelleringsprogram, till exempel CFAST eller CFD, men används främst i kombination med

brandmodelleringsprogrammet FDS. Data från FDS matas in i Smokeview som visualiserar ett brandförlopp i form av en brand och rökspridning. Smokeview används främst för att visualisera brandfenomen man kan även användas till för att visa andra typer av fenomen, däribland evakueringsflöden eller föroreningsflöden i en byggnad (Forney, 2023).

Smokeview används främst efter färdigställda beräkningar i FDS. Den data som Smokeview redovisar består av ett flöde av animerade partiklar eller flödesvektorer som visar riktning och storlek. I programmet finns *Slice files* vilka används för att illustrera information om brandens olika parametrar, till exempel temperatur eller sikt (Forney, 2023).

De illustrationer som visas i Smokeview är momentana. När information ska utbytas mellan gränserna för olika *mesh* finns det en risk att den är något felaktig. Detaljer som fås vid simulering i ett finare *mesh* riskerar att inte uppfattas av ett *mesh* som har större cellstorlek. Vid kraftiga förändringar på kort tid kan visualiseringsprogrammet därför utelämnat viss information. På grund av detta är det viktigt att använda programmet ansvarsfullt och analysera resultaten med viss försiktighet (Thunderhead Engineering , 2022).

### 3.3.3 Pyrosim

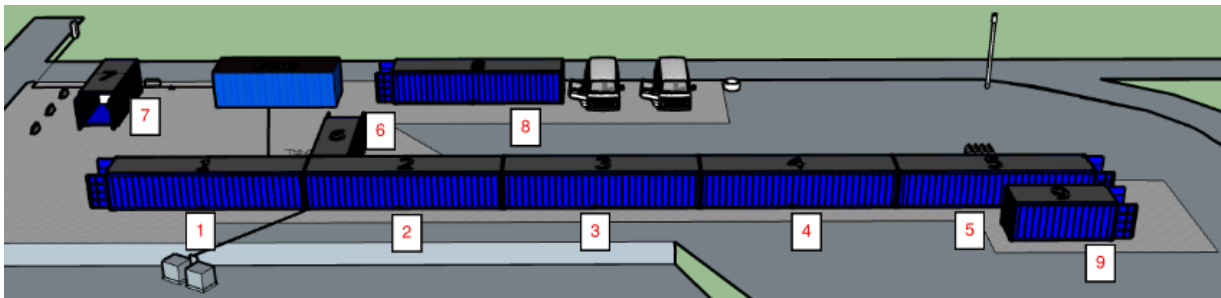
Pyrosim är ett grafiskt användargränssnitt som används för att effektivare skapa modeller som sedan simuleras i FDS. I Pyrosim används ritverktyg för att bygga upp en modell och flera mätverktyg kan placeras i modellen för att avläsa och redovisa data från olika parametrar. Inställningar för olika variabler kan göras för att till exempel bygga upp och simulera en brand. Detta underlättar uppbyggnaden av ett brandförlopp och simplificerar uppbyggnaden av konstruktionen. Pyrosim konstruerar sedan en indata fil som används för simulering i FDS (Thunderhead Engineering , 2022).

## 4 Experiment

I följande avsnitt presenteras forskningstunneln och dess geometri samt tillvägagångssättet för experimenten som utförts i tunneln.

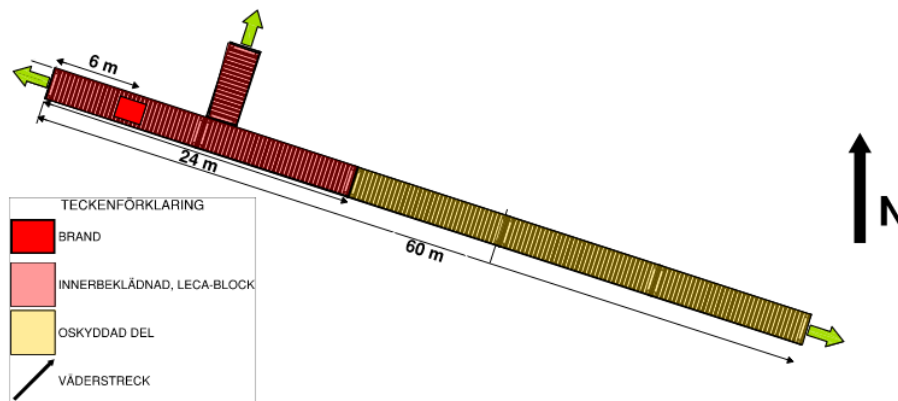
### 4.1 Beskrivning av tunneln

Avdelningen för brandteknik på Lunds Tekniska Högskola bedriver olika former av forskning och utbildning inom flera ämnen, såsom branddynamik, riskbedömning, mänskligt beteende med mera. För att kunna bedriva forskning så tillhandahåller avdelningen ett brandlaboratorium, samt en forskningstunnel (Avdelningen för brandteknik, LTH, u.d.). Tunneln som används i arbetet är belägen på MSB:s verksamhetsställe i Revinge och är byggd ovan mark. Tunneln består av sex fraktcontainrar gjorda av stål som är sammansvetsade till en avlång tunnel på cirka 60 meter med tillhörande utbyggnad, se Figur 2 nedan.



Figur 2 - Översiktlig bild över tunnelanläggningen på Revinge.

Fraktcontainrarna är av modellen *High cube*, vilket är en hög container med en takhöjd på 2,7 meter (Containertjänst, u.d.). Container 1-5 i Figur 2 utgörs av en 40 fots modell, medan container 6 och 9 utgörs av en 20 fots modell. Experimenten kommer enbart utföras i tunneldelen och tillbyggnaden avskiljs med dörrar. De 24 första metrarna är helt isolerade för att skydda containrarna vid utförande av experiment medan resterande del enbart består av stål, se .

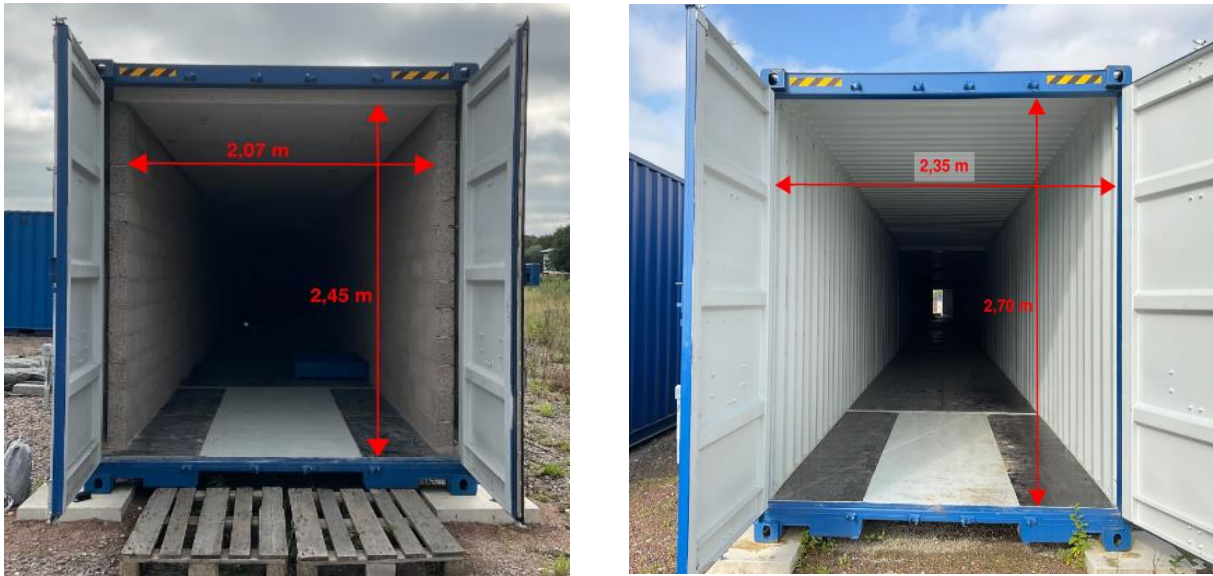


Figur 3 – Tunnelns position och dess uppbyggnad.

Innerbeklädningen som skyddar väggarna i tunnelns första del består av Leca murblock (lättklinker) och taket skyddas av betongblock som vilar på Lecablocken. Båda har en tjocklek på 12 cm. Golvet utgörs av trä, vilket kommer behöva skyddas mot strålning under experimentets gång. Bredd och höjd uppmättes till 2,07 meter respektive 2,45 meter. Resterande delar av tunneln, containrarna 3-5 i Figur 2 är oskyddade och utgörs av containern i dess originalskick. Längden av dessa uppgår till 36 meter. Bredd



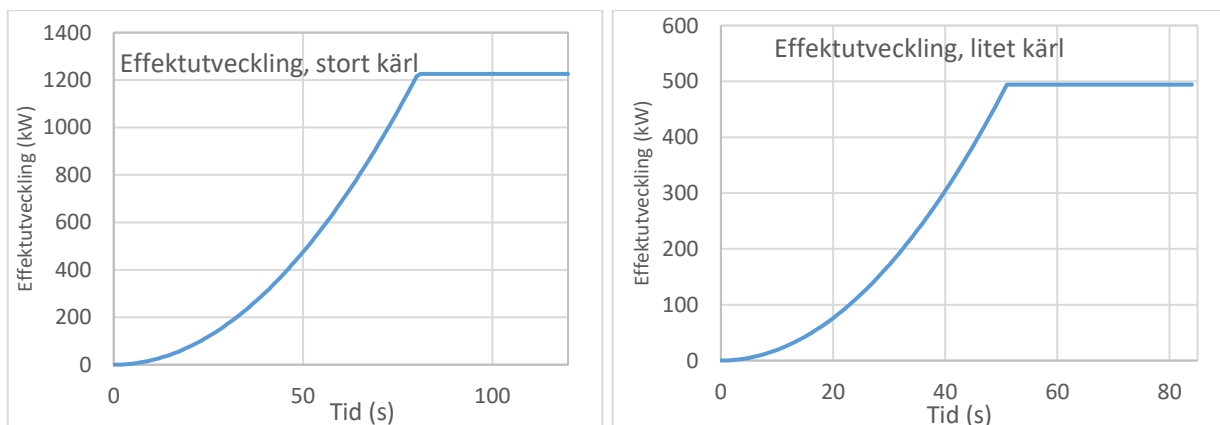
och höjd av dessa delar uppmättes till 2,35 meter respektive 2,7 meter. För bild av tunnelns öppningar och dess innermått, se Figur 4 nedan.



Figur 4 - Väg- och takuppbbyggnaden för delen med innerbeklädnad respektive utan innerbeklädnad

## 4.2 Planering av experiment

Arbetets första del ägnades åt att planera brandförsöken. Inledningsvis togs två brandscenarier fram, där brandkällan för de båda skulle utgöras av pölbränder med Heptan som bränsle. Två olika diametrar på kärlet undersöktes, 0,8 meter samt 0,57 meter. I övrigt var scenarierna identiska. I samråd med den experimentella handledaren bestämdes gränsvärden för temperaturen av brandgaserna för den oisolerade delen av tunneln. Det fastställdes ett gränsvärde på maximalt 100 °C, 24 meter bort i tunneln som inte fick överstigas. En effektutvecklingskurva beräknades fram för de två scenarierna, se Figur 5, fullständig beräkningsgång kan ses i Appendix A. Effektutvecklingskurvorna lades in i FDS och simuleringar utfördes för att utifrån resultatet kunna avläsa en ungefärlig temperatur vid 24 meter. Simuleringarna visade på att det större kärlet bidrog till en temperatur som översteg 100 °C på avståndet 24 meter i tunneln. För det mindre kärlet kom temperaturen aldrig upp i 100 °C vid beklädnadens slut och experimentet planerades därför utifrån kärlet med en diameter på 0,57 meter.



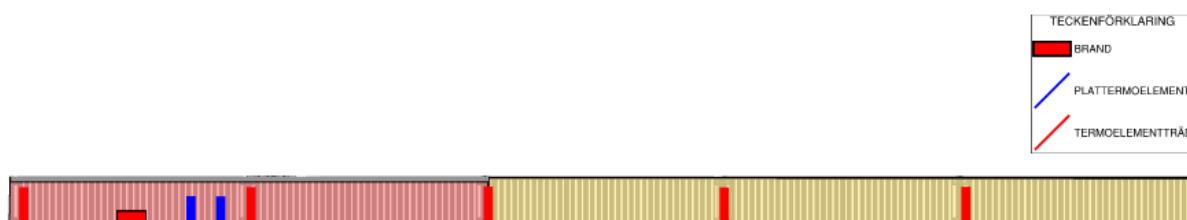
Figur 5 - Den beräknade effektutvecklingen för ett stort ( $d=0.8$  m)- respektive ett litet kärl ( $d=0.57$  m).



Förberedelser till experimenten bestod sedan av att göra platsbesök för att dokumentera tunnelns utseende, dimensioner, material och eventuella brister med målet att få en överblick av förutsättningarna. Då en tydlig bild av tunneln fanns att tillgå, påbörjades planering av experimenten och en riskanalys för experimentet genomfördes. Efter att scenariot för brandförloppet fastställdes och planeringen var klar, kunde experimenten påbörjas.

### 4.3 Beskrivning av experimentell uppställning

Samtliga avstånd och placering av mätinstrument som nämns utgår från tunnelns start, vilket räknas från den öppning som är närmast branden. För att mäta temperaturen under experimentet användes termoelement. Sju termoelementen placerades på en stolpe och benämns tills vidare som termoelementträd. Termoelementträden placerades i tunnelns mitt på avstånden 0 m, 12 m, 24 m, 36 m och 48 m, räknat från tunnelns västra öppning, se Figur 6. Samtliga träd var centralt placerade i tunnelns mitt och termoelementens höjd, vilka är räknade från golvet, anges nedan i Tabell 2.



Figur 6 - En skiss över uppställningen av termoelementträd och plattermoelement i tunneln.

Termoelementträd ett och två var placerade i den skyddade delen av tunneln med en takhöjd på 2,45 meter, medan de tre sista var placerade i delen med en takhöjd på 2,7 meter. Därav valdes olika höjder för de olika termoträden.

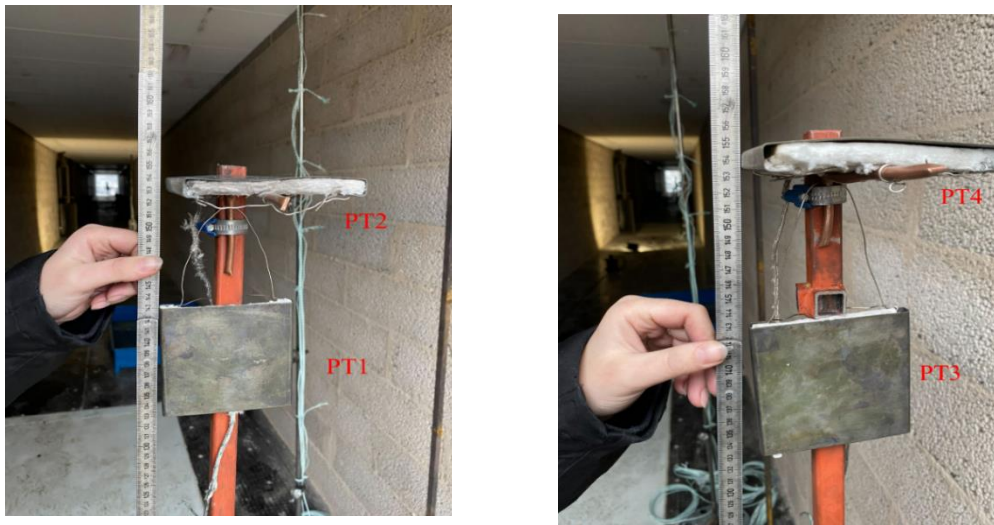
Tabell 2 - Redovisar positioner av termoelementen.

TERMOELEMENT:	TERMOELEMENTTRÄD (AVSTÅND):				
	T1 (1 m)	T2 (12 m)	T3 (24 m)	T4 (36 m)	T5 (48 m)
1	2,40 m	2,40 m	2,65 m	2,65 m	2,65 m
2	2,25 m	2,25 m	2,45 m	2,45 m	2,45 m
3	2,00 m	2,00 m	2,25 m	2,25 m	2,25 m
4	1,75 m	1,75 m	2,00 m	2,00 m	2,00 m
5	1,55 m	1,55 m	1,65 m	1,65 m	1,65 m
6	1,35 m	1,35 m	1,00 m	1,00 m	1,00 m
7	0,75 m	0,75 m	0,30 m	0,30 m	0,30 m

Fyra plattermoelement placerades på två olika stolpar. Två plattermoelement vinklades uppåt för att mäta strålningen från brandgaslagret och två plattermoelement placerades i riktning mot branden, se Figur 7. Plattermoelementens positionering presenteras i Tabell 3.

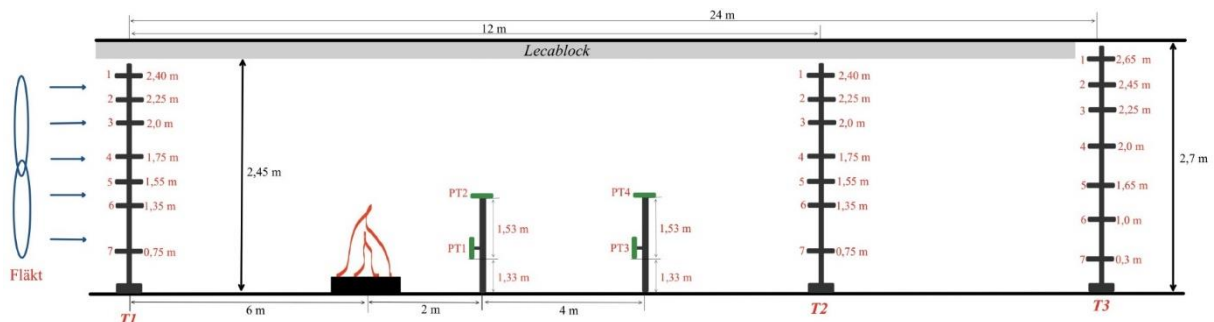
Tabell 3 -Redovisar positioner av plattermoelementen.

PLATTERMOMETER	HÖJD	POSITION
PT1 (8 M)	1,33 m	Mot brand
PT2 (8 M)	1,53 m	Mot tak
PT3 (12 M)	1,33 m	Mot brand
PT4 (12 M)	1,53 m	Mot tak



Figur 7 - Visar plattermometrarnas positioner.

Ett cirkulärt kärl med en diameter på 0,57 m placerades med kärlets mitt sex meter in i tunneln från den västra öppningen. Kärlet placerades på en bit stenull med isolerande förmåga och tillsammans med en lastcell för att kunna mäta massaförlust under experimentets gång. Under bålet och vågen placerades kalciumsilikat skivor för att skydda golvet omkring branden, då golvet består av trä. Detta gjordes cirka 4 meter på båda håll om kärlet. En bild över den experimentella uppställningen för de 24 första metrarna presenteras i Figur 8.



Figur 8 - Överblick över den experimentella uppställningen. Bilden är inte skalendig.

#### 4.4 Tillvägagångssätt vid experimentella försök

Experimenten genomfördes på räddningsskolan i Revinge i en tunnel som uppförts av avdelningen för brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola med användningsområde inom forskning. Experimenten utfördes den 20 november 2023, mellan klockan 11.00-15:00. Väderdata för dagen hämtades från centrum för Geografiska Informationssystem, för väderstationen i Lund. Medeltemperaturen under experimenten var 5,6 °C och vindhastigheten var 1,88 m/s i nordöstlig riktning. Vindriktningen innebär att en del av luftflödet kommer genomflöda tunneln motsatt riktning gentemot luftflödet från fläkten.

Experimenten inleddes med förberedelse av försöksuppställningen genom att termoträd och plattermoelement monterades upp i tunneln, se avsnitt 4.3 för exakt position för respektive mätinstrument. En fläkt placerades i tunnelns start på en upphöjning för att uppnå ett jämnt luftflöde över hela tvärsnittet, se bild till vänster i Figur 9. Fläktens kapacitet gav upphov till 2 m/s. En kontroll av flödet genom tunneln utfördes innan experimentets start. Nio punkter valdes ut i tvärsnittet. I alla nio punkter, mättes flödeshastigheten med en anemometer då fläkten var i gång, vilka antecknades och ett

medelvärde för flödeshastigheterna beräknades. Det resulterade i cirka 2 m/s vilket var i enighet med planeringen av scenariot. I slutet av tunneln var hastigheten dock något lägre och uppmättes till ungefär 1 m/s. Flödeshastigheten är där med en osäkerhet.

Samtliga mätinstrument, såsom plattermometrar, termoelement och lastcellen anslöts till en datalogger, som läser av instrumenten under experimentets gång. Resultatet från dataloggern överförs sedan till en Excelfil. Håligheter och otäta skarvar i väggar tätades med stenull och ventilationshål täcktes för med aluminiumtejp för att skapa en intakt konstruktion. En filmkamera placerades i början av tunneln för att kunna få inspelat material från experimenten.



Figur 9 - Försöksuppställning för fläkten (vänster), plattermoelementen och ett termoträd (höger).

När försöksuppställningen var färdigställd så fotograferades den och det genomfördes en kontroll av funktionen för samtliga mätinstrument. Fläkten startades och luftflödet kontrollerades ytterligare för att säkerställa kapacitet.

Bålet fylldes på med vatten för att få en jämn vätskeyta. Vågen kalibrerades sedan med hjälp av tyngder (5 och 10 kg) för att i ett senare skede kunna omvandla den givna utdatan till enheten kilo. Innan påfyllnaden av Heptan startades dataloggern för att samla in data både innan och under experimentet. En extra tanke ägnades åt säkerheten innan antändning, genom att fläkten startades, skyddsutrustning togs på och skyddsavstånd vidtogs. Heptanbålet antändes med hjälp av en tändlunta. Experimentet observerades och brandförloppet dokumenterades, se Figur 10. Efter att branden hade självslocknat så vädrades tunneln ur. Samma experiment genomfördes ytterligare två gånger samma dag, men efter att tunneln och mätinstrumenten fått svalna, vilket tog cirka två timmar. Målet var att försöka uppnå samma grundförutsättningar för samtliga försök, för att kunna jämföra resultaten med varandra. Samtliga resultat kan ses i kapitel 7.



*Figur 10 - Visar den experimentella underställningen under testets gång.*

## 5 Handberäkning

Vid handberäkning av temperaturen användes ekvationer 1–5, där samtliga ingångsparametrar valdes ut för att få ett scenario som efterliknade experimenten. En förenkling gjordes och medelvärdet av den maximala uppmätta effektutvecklingen under test 2 och 3 användes vid beräkningarna. Detta beror på att dessa effektutvecklingar var nästan likvärdiga under experimenten, se kapitel 7.1.2. Temperaturen beräknades för termoträdens olika positioner, 12 m, 24 m, 36 m och 48 m. Antaganden som krävs för att modellen skulle kunna appliceras var att en hastighet av flöden i tunneln på minst en meter per sekund, för att säkerställa att luftflöde enbart rör sig i en riktning. Ytterligare antaganden som gjordes för att kunna använda modellen var en kontakt tvärsnittsarea, samt att hela flödet i tvärsnittet skall ha en och samma hastighet. Ekvationerna antar även att två tredjedelar av total effektutveckling utgörs av den konvektiva andelen. För att se antaganden av värden på de ingående parametrar, se Appendix A.

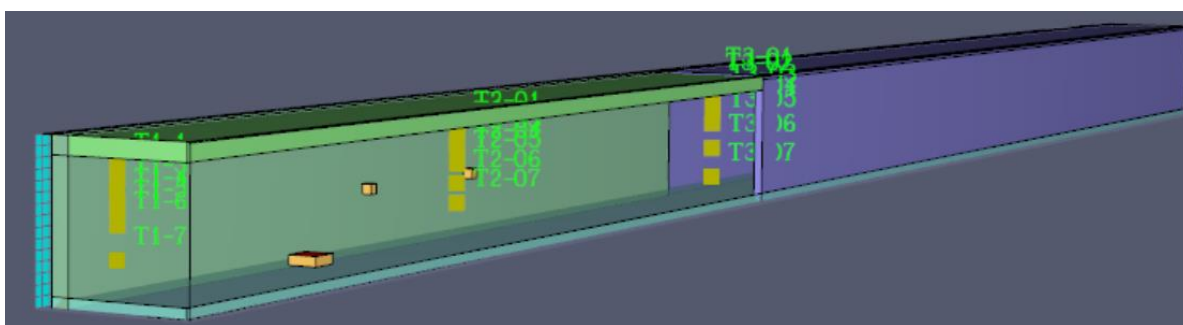


## 6 Simulering

Avsnitten nedan presenterar hur simuleringarna har gått till väga, med dels uppbyggnad av geometri, dels brandens egenskaper för att likna genomfört experiment.

### 6.1 Tillvägagångssätt vid simulering

Inledningsvis skapades indata filen till FDS i programvaran Pyrosim, version 2022.2.0803, vilken har samma dimensioner som tunneln i Revinge. Tunneln utgjorde en längd på 60 meter, med varierande bredd och höjd för de två olika delarna. De första 24 metrarna hade ett tvärsnitt på 2,1 meter och ansattes med Lecablock som representeras av den gröna färgen i Figur 11. Höjden ansattes till 2,45 meter. Resterande 36 meter ansattes med väggar av stål, där tvärsnittets bredd ansattes till 2,35 meter och höjden 2,7 meter. Kortsidorna ritades utan väggar då dessa fungerar som tunnelns öppningar. En ventilationsyta ansattes på tunnelns ena kortsida där branden är positionerad och används som fläkt. Flödeshastigheten ansattes på 2 m/s fördelat över hela tvärsnittet, vilket motsvarar det flöde som uppmättes vid experimentet (se avsnitt 4.4).



Figur 11 - Tunneln uppritad i Pyrosim.

De 24 första metrarna av tunnelns insida är klädd med Lecablock och för att kunna applicera materialet på väggarna i Pyrosim skapades en yta av lättklinker. De materialegenskaper som applicerades är tagna från "Lecablock – Projektanvisning" (Weber Saint-Gobain, 2020). Resterande väggar består av stål, och tak samt golv som består av betong. Egenskaperna för materialen är tagna från "An introduction to Fire Dynamics" (Drysdale, 2011) respektive "An Experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models" (D. Peacock, Davis, & T. Lee, 1988). De termiska egenskaperna som använts för respektive material presenteras i tabell 6.

Tabell 4 - Materialegenskaper för respektive material.

Material	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Specifik värmekapacitet (kJ/kgK)	Konduktivitet (W/mK)
Lättklinker	725	1,05	0,2
Stål	7850	0,46	45,8
Betong	2280	1,04	1,8

Vidare bestämdes *meshstorlek*, vilka mätverktyg som skulle appliceras, samt branden och dess egenskaper lades in. Termoelement placerades ut för att mäta temperatur, på samma positioner som vid experimentet, för fullständiga positioner se Tabell 2.

Simuleringstiden ansattes till 822 sekunder, då brandförloppet under experimenten pågick under samma tid och utdata i form av effektutveckling fanns för den aktuella tiden. Fler parametrar som var specifika för att uppnå samma förutsättningar som under experimenten var en omgivande temperatur på 6 °C. De olika delarna kan ses nedan i avsnitt 6.2–6.3.

### 6.1.1 Mesh

FDS är uppbyggt av flera olika rektangulära delar som kallas *mesher* där varje *mesh* består av flera olika celler. Innan en simulering kan utföras i FDS behöver storleken på varje cell i respektive *mesh* bestämmas (McGrattan, o.a., 2023). I närheten av branden rekommenderas en liten cellstorlek för att få ett tydligt resultat och en skarp optisk bild av brandförloppet. För att beräkna cellstorleken beräknas först den karakteristiska diametern med ekvation 10. Resultatet som erhöles utgjorde den minsta cellstorleken som användes och placerades över hela tunneln.

### 6.1.2 Branden

Branden i tunneln placerades sex meter in i tunneln precis som i experimentet se Figur 11. Fastställande av brandens storlek med avseende på brandarea gjordes genom att utgå från data på massa bränsle under experimenten. Data från två av experimenten användes för att uppskatta brandeffekten tillsammans med data på förbränningsvärme för Heptan (se Appendix A, avsnitt A.1). Vid beräkning av area för brandkällan, omvandlades cirkelarean till en kvadrat med sidorna 0,5 meter då FDS inte är kompatibelt med cirkulära utformningar.

Då ett Heptanbål användes i experimentet, så valdes även Heptan som bränsle i simuleringar. Heptans egenskaper finns inlagt från början i Pyrosims bibliotek över olika bränslen. Egenskaperna är hämtade från *Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise #3* (Hamins, o.a., 2003) och i Tabell 5 presenteras *yields*-värden som använts.

Tabell 5 - Visar valda *yields* för bränslet Heptan.

	CO yield	Sot yield
Heptan	$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,015

Tillväxten av branden definierades genom funktionen *ramp-up* i Pyrosim. Effektutvecklingskurvan omvandlas till fraktioner, vilket innebär att effektutvecklingen delas upp i andelar. Maximala fraktionen uppgår där med till 1, vilket motsvaras av den framtagna maximala effektutvecklingen baserad på uppmät massa under experimenten.

I kombination med *ramp-up* funktionen, ansattes HRRPUA, *Heat Release Rate Per Unit Area*. Den beräknades genom att dela maximal effektutveckling, med brandens area. I FDS kan brandtillväxt även modelleras med funktionen "spread rate" men en upprampning av HRRPUA användes eftersom det bedöms efterlikna en pölbrand bättre.

## 7 Resultat

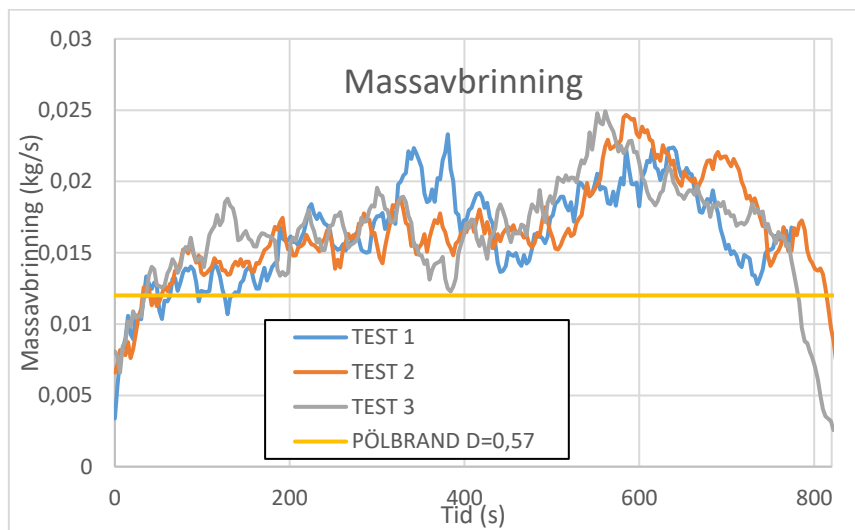
I följande avsnitt redovisas de resultat som framkommit av experiment, handberäkningar och simuleringar under arbetets gång. De resultat som inte presenteras i avsnittet presenteras i appendix B och appendix C.

### 7.1 Experiment

Från de tre testen i tunneln erhålls information om massavbrinning och temperatur som sedan beräknas till effektutveckling och strålning.

#### 7.1.1 Massavbrinning

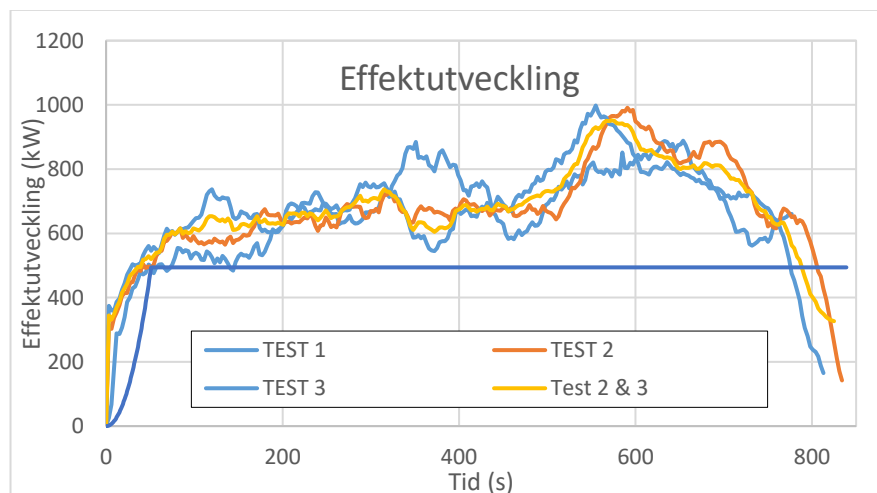
Massförlust mättes under experimentens gång och användes sedan för att beräkna massavbrinning för brandförloppet. Resultatet för samtliga test presenteras i Figur 12.



Figur 12 - Redovisar massavbrinning för samtliga test, samt beräknad effektutveckling.

#### 7.1.2 Effektutveckling

Effektutveckling beräknades med hjälp av den beräknade massavbrinningen från de olika testen, vilket kan ses nedan i Figur 13. Även ett medelvärde av test 2 och 3 togs fram, vilket vidare blir den dimensionerande effektutvecklingen som applicerades i FDS och handräkningar (se appendix A och B)



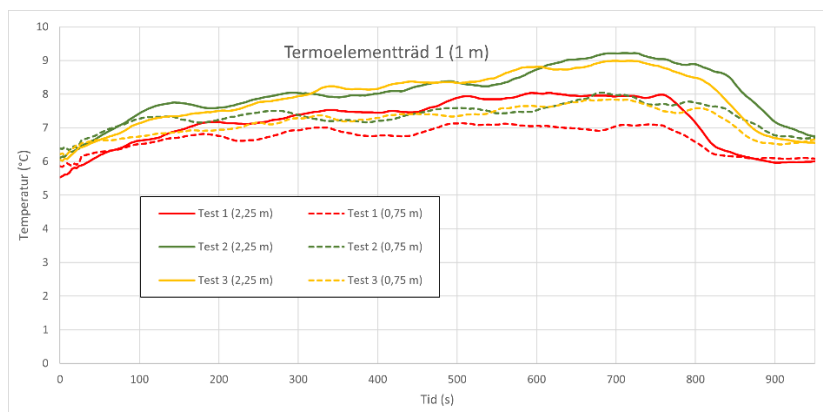
Figur 13 - Redovisar effektutvecklingen som beräknats fram utefter respektive test, samt ett medelvärde för effektutvecklingen av test 2 & 3 och den beräknade effektutvecklingen för pölbrand med diameter 0,57 m.



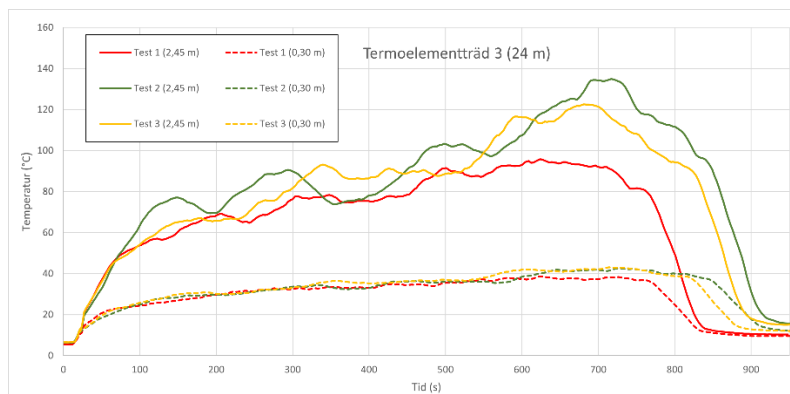
### 7.1.3 Experimentell repeterbarhet

För att studera den experimentella repeterbarheten valdes tre termoelementträd ut för att få en jämförelse om hur temperaturen varierar under olika experiment. För att få en så stor spridning som möjligt valdes termoelementträd 1, 3 och 5 samt termoelement 2 och 7 på respektive träd. Mätpunkterna jämfördes sedan mot varandra för att se hur temperaturen skiljer sig mellan respektive träd under olika experiment. I Figur 14, Figur 15 och Figur 16 redovisas resultatet för den mätdata som framtagits under olika experiment för termoelementträd 1, 3 och 5 respektive. Diagram för resterande termoelementträd återfinns i appendix C.

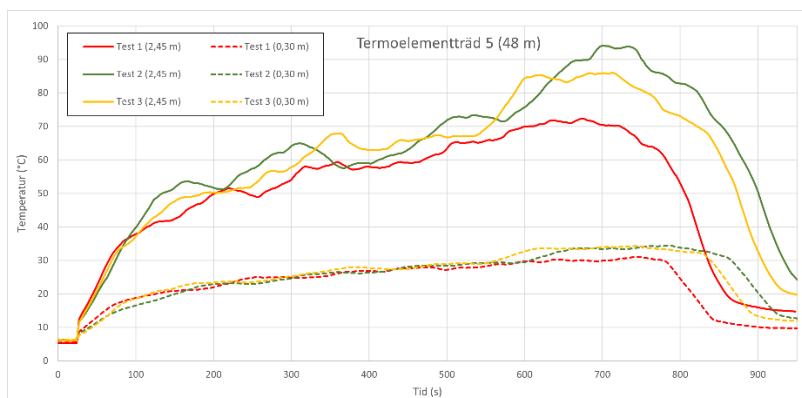
Färgerna i diagrammen representerar olika experiment. Röda linjer representerar test 1, gula linjer representerar test 2 och gröna linjer representerar test 3. De heldragna linjerna visar i sin tur temperaturen för termoelement 2 på respektive termoelementträd och de streckade linjerna representerar termoelement 7 på respektive termoelementträd.



Figur 14 - Resultat för termoelement 2 & 7 placerade på termoelementträd 1.

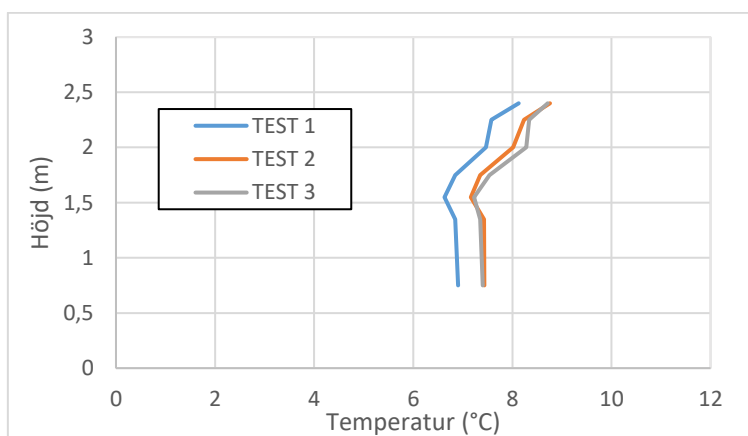


Figur 15 - Resultat för termoelement 2 & 7 placerade på termoelementträd 3

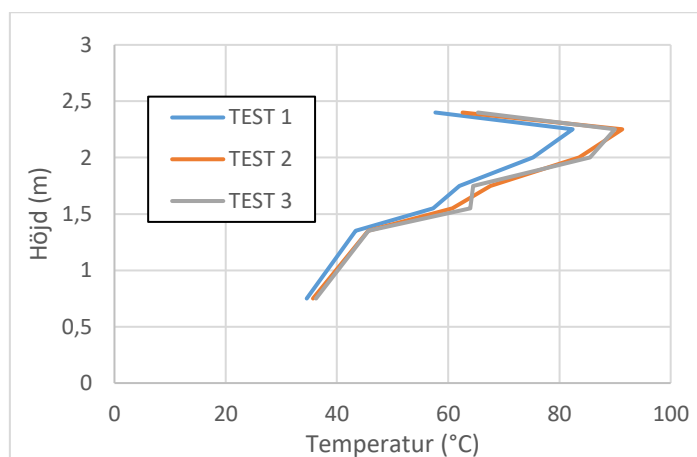


Figur 16 – Resultat för termoelement 2 & 7 placerade på termoelementträd 5.

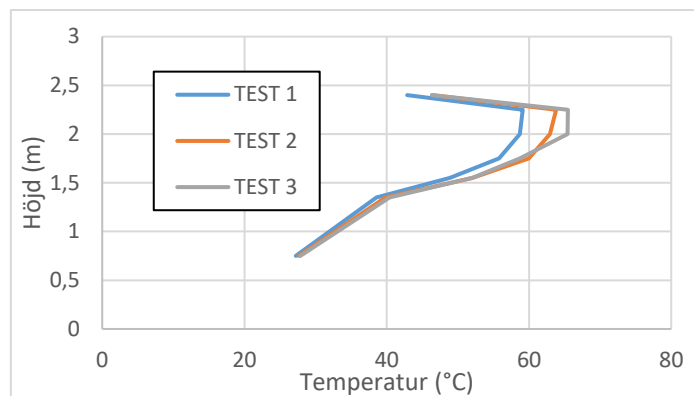
Figur 17, Figur 18 och Figur 19 representerar hur temperaturen förändras över höjden i tunneln för termoelementträd ett, tre samt för termoelementträd fem i respektive test. I samtliga figurer nedan har ett medelvärde av temperaturen mellan 400 sekunder och 500 sekunder använts, eftersom någorlunda stabila temperaturförhållanden bedöms ställt in sig i tunneln under denna period.



Figur 17 - Temperaturen över höjden för termoelementträd 1.

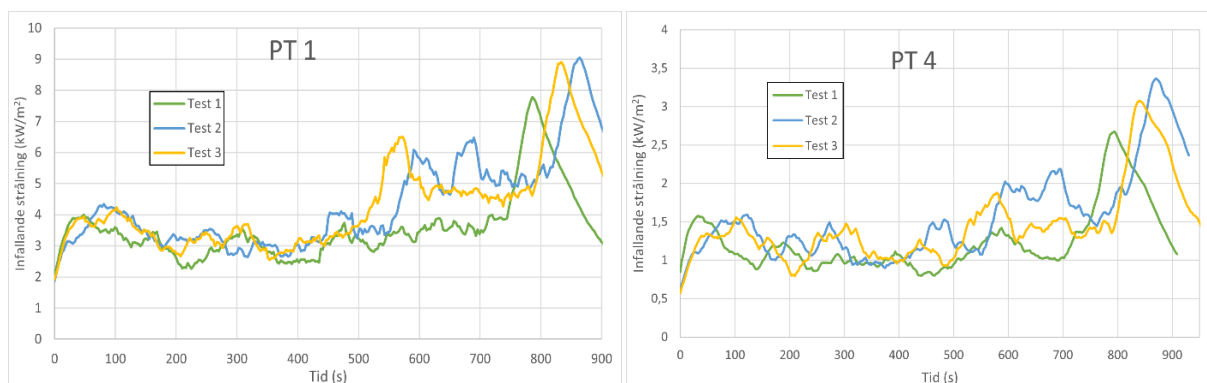


Figur 18 - Temperaturen över höjden för termoelementträd 3.



Figur 19 - Temperaturen över höjden för termoelementträd 5.

Strålning mättes under experimenten med hjälp av plattermoelement. Resultatet från plattermoelement (PT) 1 och 4 kan ses i form av infallande strålning nedan i Figur 20. Resultaten från resterande plattermoelement framgår av appendix C.

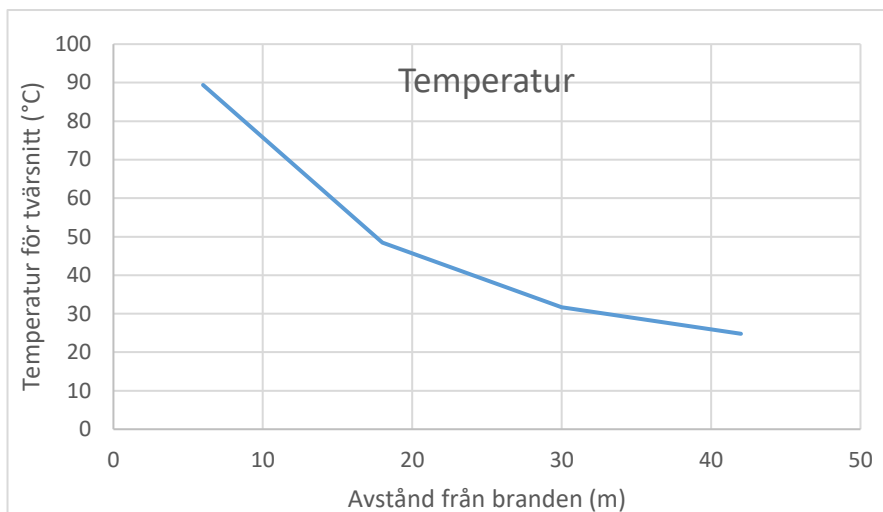


Figur 20 - Infallande strålning under experimenten för PT 1 respektive PT 4.

Studien av den experimentella repeterbarheten från de tre försöken visar på en god repeterbarhet när det gäller massförlusten (se Figur 12) men tydlig avvikelse mellan test 1 och test 2 samt 3 när det gäller temperatur på termoelement och plattermoelement. I den fortsatta jämförelsen mellan handberäkningar, simuleringar i FDS och experimentella data kommer enbart resultat från test 2 och test 3 användas.

## 7.2 Handberäkningar

Temperaturen som handberäknats med ekvation 1 resulterar i den temperatur som förväntas över tvärsnittet på tunneln. Fyra olika beräkningar har utförts på avstånden 12 m, 24 m, 36 m och 42 m. Avstånden representerar placeringen av respektive termoelementträd i experimentet. Figur 21 visar en graf över resultatet för de olika mätpunkterna. Beräkningsgången för temperaturberäkningarna presenteras i Appendix A - Handberäkningar.



Figur 21 -Redovisar resultaten från handberäknade temperaturer, en jämförelse mot övriga resultat kommer i avsnitt 7.3.1.

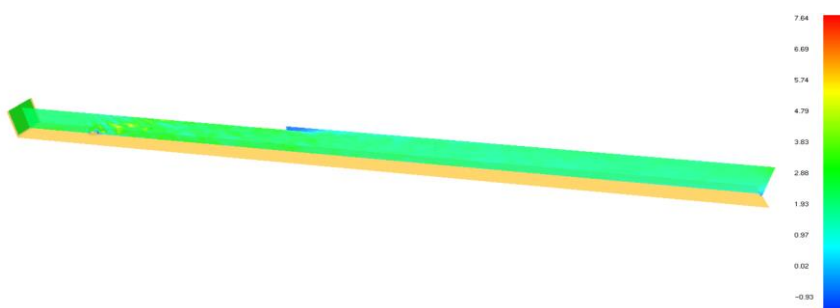
### 7.3 CFD simuleringar

Cellstorleken som användes i simuleringen beräknades med hjälp av ekvation 10 och som resulterade i värdet 0,078. Storleken avrundades sedan uppåt och simuleringarna har därför utförts med ett *mesh* som har storleken 0,1 m. Rökutvecklingen och brandförloppet från simuleringarna i FDS avläses i Smokeview. Figur 22 visar hur brandgaslagret och branden påverkas av luftflödet från fläkten under brandförloppet visualiserat i programmet.



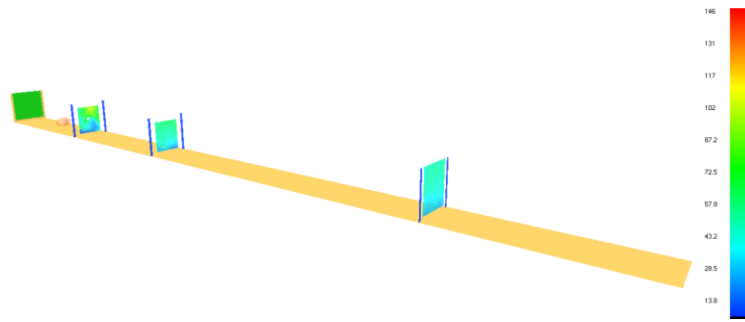
Figur 22 - Resultatet från FDS simuleringarna visualiserade i Smokeview.

Flödes hastigheten i form av en *slice file* genom tunneln i y-led presenteras i Figur 23. Färgerna till höger i bilden representerar olika flödes hastigheter i m/s och används för att avläsa vilken hastighet *slice filen* redovisar.



Figur 23 - Resultat av lufthastigheten från simulering i FDS.

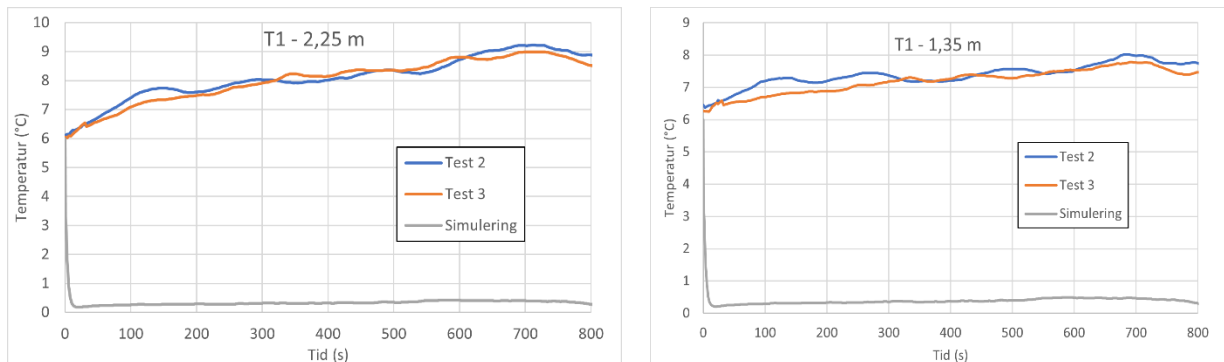
*Slice files* som har uppmätt temperaturen i tunneln på avstånden 12 m, 24 m, och 50 m från tunnelns öppning (representeras av grönt i figuren) presenteras i Figur 24. Spektrumet till höger redovisar temperaturerna som varje *slice file* presenterar.



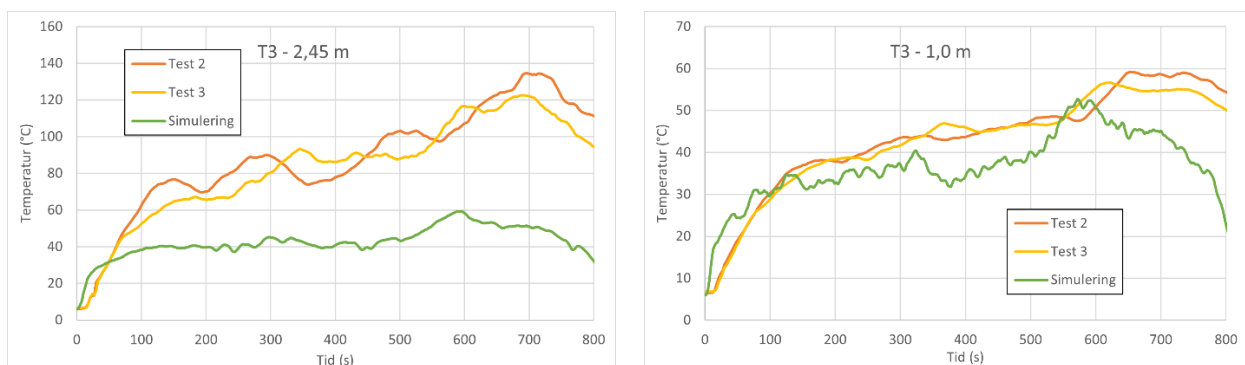
Figur 24 - Resultatet på temperaturen från FDS i form av slice files på 6 m, 18 m och 44 m från branden.

### 7.3.1 Jämförelse mellan simulering, experiment och handberäkningar

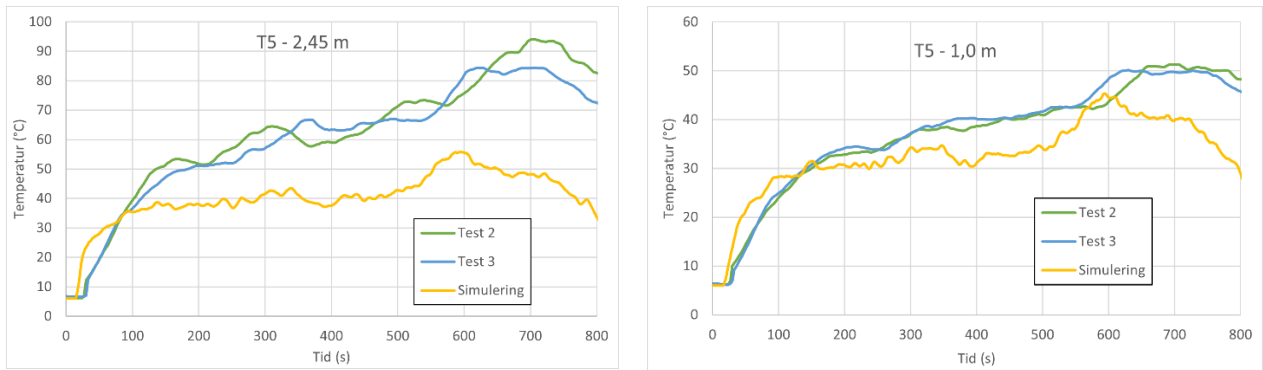
En jämförelse av temperaturen från test 2 och 3 samt simuleringen kan ses nedan för termoelementträd 1, 3 och 5. De utvalda termoelementen är på höjdposition 2 och 6, eftersom termoelement 2 ger temperaturen i brandgaserna och termoelement 6 är på en höjd som bedöms vara relevant att analysera då påverkan på människor studeras.



Figur 25 - Jämförelse mellan simuleringar och experimentella data i termoelement 2 (vänster) och 6 (höger) i termoträd 1, 1 meter uppströms från den västliga öppningen av tunneln.

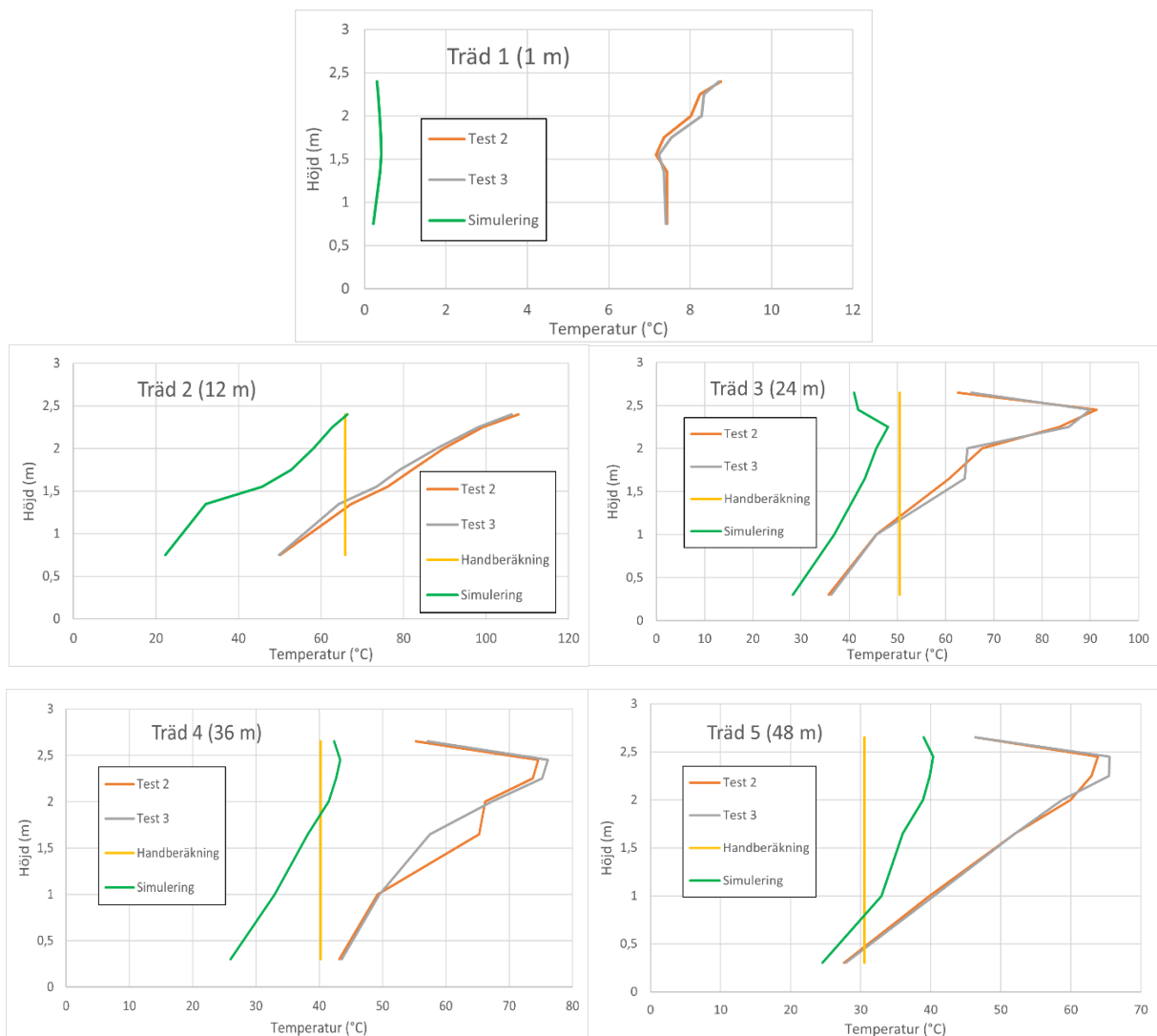


Figur 26 - Jämförelse mellan simuleringar och experimentella data i termoelement 2 (vänster) och 6 (höger) i termoträd 3, 24 meter uppströms från den västliga öppningen av tunneln.



Figur 27 - Jämförelse mellan simuleringar och experimentella data i termoelement 2 (vänster) och 6 (höger) i termoträd 5, 48 meter uppströms från den västliga öppningen av tunneln.

Diagrammen i Figur 28 nedan presenterar temperaturen över höjden mellan 400 – 500 sekunder för test 2, test 3, simulering och handberäkning. Precis som nämnts tidigare, i avsnitt 7.1.3, tas medelvärden mellan 400 och 500 sekunder, eftersom någorlunda stabila temperaturförhållanden bedöms förekomma i tunneln under denna period.



Figur 28 - Temperatur över höjden för samtliga termoträd tillsammans med handberäkning av temperaturen samt simulering.

## 8 Diskussion

*I följande avsnitt diskuteras, jämförs och kommenteras metod, resultat från experiment, simuleringar och handberäkningar.*

### 8.1 Metod

I följande avsnitt diskuteras och analyseras metoderna som använts i arbetet.

#### 8.1.1 Litteraturstudie

Tunnelbränder är ett relativt outforskat ämne vilket resulterar i att litteraturen som finns att tillgå är begränsad. Inom forskningen finns det ett antal ledande personer som står för majoriteten av de experiment och studier som utförs. Detta innebär att litteraturstudien till stor del bygger på olika källor som kommer från samma författare. Annan forskning inom ämnet som kan vara givande för att få en ny vinkel riskerar därför att förbises. Det är därför viktigt att poängtera att litteraturstudien i detta arbete har till stor del utgått från boken Tunnel Fire Dynamics av Ingason, Zehn Li & Lönnemark (2015). Resultatet har därför sin grund i de antaganden och principer som beskrivs i boken.

Litteraturstudierna har genomförts iterativt genom hela arbetsprocessen. Litteraturhänvisningar i relevanta källor resulterade ofta i en fördjupning av ytterligare källor som var av intresse, även kallat snöbollseffekt. Snöbollseffekt medför att många källor av vetenskaplig karaktär påträffas och kan på så sätt studeras för att ge en ökad förståelse för ämnet. Som tidigare nämnt är dock risken med tillvägagångssättet att samma författare hänvisar till varandra och viktig information från annan litteratur utelämnas. Syftet med litteraturstudien har varit att få en överblick av området och kartlägga de mest etablerade metoderna för beräkningar av tunnelbränder, den använda metoden för litteraturstudien bedöms därför ha varit tillräcklig för detta ändamål.

#### 8.1.2 Experiment

Experimenten utfördes flera gånger för att kunna undersöka repeterbarheten och dess reliabilitet. Avseende massavbrinningen för pölbränder så var repeterbarheten god, liknande resultat erhöles från de tre försöken där enbart små skillnader kunde ses. Det betyder att skillnader av temperatur kan bero på olika randvillkor eller k-värden för materialen. Vad gäller temperatur så var resultaten generellt goda för test 2 och 3, men där test 1 hade större avvikelser. Temperaturerna i test 1 var lägre än under de två andra testen, vilket kan bero på att innan tunneln använts första gången, kan det ha funnits fukt kvar i innerbeklädnaden. En del av effektutvecklingen kan därmed ha förbrukats till att förångas vatten, i stället för att värma upp luften i tunneln.

Andra anledningar till att skillnader kan ses i resultaten skulle kunna vara skillnader i väderförhållanden. Vid experimentet mättes vindhastigheten från fläkten för att se till så att fläkten hade samma kapacitet och gav samma vindhastighet under samtliga test. För att minimera risken att väderförhållandena skulle skilja sig för mycket och påverka resultatet, utfördes samtliga tester på samma dag. En viss skillnad finns det dock på den naturliga vindhastigheten under olika tidpunkter vilket kan påverka resultatet för de olika testerna. För att undvika detta mättes vindhastigheten mellan varje test och fläktens hastighet ändrades så att det sammanlagda luftflödet från fläkten och den naturliga vinden gav ungefär 2 m/s i början av tunneln. I slutet av tunneln är vindhastigheten ungefär 1 m/s vilket är något mindre än den planerade hastigheten. Anledningen till detta kan vara att den naturliga vinden hade under experimenten nordöstlig riktning och en del av vinden tryckte mot tunneln från motsatt håll. Den sammanlagda vindhastigheten blir då lägre vilket antagligen är vad som skett i den senare delen av tunneln. Alternativt kan det finnas eventuella läckage i tunneln där luften tagit sig ut. Flödeshastigheten är där med en osäkerhet.

Mätningarna av vindhastigheten utfördes med en liten anemometer, vilket är ett mätinstrument som inte ger så noggranna resultat och kan ge upphov till en viss felmarginal. För att få mer exakta utfall på luftflödet i tunneln kan ett bättre mätinstrument användas, men även flera försök under olika dagar borde utföras för att undersöka hur mycket olika väderförhållanden påverkar.

Vid utförandet av experimentet antändes ett kärl med Heptan som var placerat i början av tunneln. Skulle en brand uppstå i en verklig tunnel är det troligt att antändningskällan består av kolliderade fordon och att fler fordon eller bränslepaket befinner sig i närheten. Det finns då en spridningsrisk av branden mellan olika bränslepaket som inte tas i beaktande under experimentet. Till följd av en spridning i tunneln hade effektutveckling med största sannolikhet ökat. Brandförloppet hade utvecklats snabbare och branden hade blivit större. Effektutvecklingen och massavbrinningen påverkas också av brandens placering. En brand som är placerad nära en vägg eller i ett hörn orsakar mer värme och ger högre temperaturer vilket kan resultera i ett annat brandförlopp. I detta fall placerades branden sex meter in i mitten av tunneln. Om en annan placering hade valts hade det kunnat resultera i andra resultat. Detta är något som kan studeras vidare i framtida forskning.

De begränsningarna som finns för experimenten fastställdes i samband med laborationshandledare vilket främst är storleken av effektutvecklingen för branden, med avseende på tunnelns kapacitet. Tunneln är ny och har enbart en skyddande beklädnad de första 24 metrarna, vilket gör att brandgaser ej bör nå en temperatur på överstigande 100 grader vid delen som enbart består av en oskyddad container. Containrarernas storlek är dessutom liten i förhållande till riktiga tunnlar och kan ungefär liknas med en tunnel i halv skala. Det bidrog till att maximal diameter på kärlet ansattes till 0,57 meter.

Vid experiment finns det alltid risk att mänskliga fel, mätfel eller fel vid kalibrering kan uppstå. Detta kan påverka pålitligheten i resultatet. För att undvika detta har anteckningar gjorts för samtliga antaganden och mätningar. Inför varje experiment har mätutrustningen testats på nytt för att vara säker på att allt fungerar som det ska.

Tunneln som använts skiljer sig en del i geometrin från riktiga tunnlar på många sätt, däremot är både geometrin och miljön lämplig och enkel för att validera FDS. Det fyrkantiga tvärsnittet, som är konstant för hela tunnelns längd, men även längden är inom rimliga gränser för att simulera hela tunneln. Geometrin gör det enkelt att mäta och kontrollera variabler. Vid riktiga tunnlar kan det vara svårt att simulera flera kilometer, då kapaciteten som krävs är väldigt stor. Tunnelns placering ovan mark underlättar även för instrumentering. Slutsatser är att modellvalidering har både många för och nackdelar.

### 8.1.3 Handberäkningar

Handberäkningar som metod är tidseffektiv och lättillgänglig. Metoden passar för de fall där en snabb överslagsberäkning för estimering av exempelvis temperatur behövs. Syftet med att använda handberäkningar som metod var att se hur väl de överensstämmer med ett verkligt experiment och om det är lämpligt att göra överslagsberäkningar med metoden. Metoden avgränsas genom att enbart studera temperatur. Vid beräkning av temperatur så användes en endimensionell modell som beräknar medeltemperaturen för hela tunnelns tvärsnitt. Modellen utgår från en förenkling där det antas att brandgaserna enbart transporteras i en riktning. Det uppnås genom att en hastighet av brandgaserna på minst 1 m/s upprätthålls. Tunneln skall även ha en konstant tvärsnittsarea och en jämn ventilationshastighet i hela tvärsnittet. Vidare antas det även att två tredjedelar av effektutvecklingen utspelar sig i konvektion, vilket stämmer bra överens med simuleringarna då standardvärdet i FDS som applicerades är en strålningsandel på 0,35.

Handberäkningar är också ett bra tillvägagångssätt vid behov av att få en snabb överblick för att se vilka parametrar som har en stor påverkan på resultatet. Studerar man då olika ekvationer kan man se vilka parametrar som är viktiga och få en bild över vilka aspekter som påverkar det tänkta scenariot.

Studien av handberäkningar skulle kunna utökas genom att testa flera olika ekvationer som har andra antaganden och begränsningar för att se hur väl dessa stämmer överens med varandra. Ett samstämmigt resultat där hade stärkt trovärdigheten för metoden.



#### 8.1.4 CFD simuleringar

Datorsimuleringar är ett välfungerande sätt när olika typer av brandförlopp ska förutses. Tillvägagångssättet har dock en del begränsningar och för att kunna utföra simuleringar har en del antaganden och förenklingar utförts under utformningen av programmet. Den indata och de valda värden som används i simuleringen är mestadels standardvärden. Parametrar som har ansatts till specifika värden är exempelvis omgivningstemperaturen och vissa materialkonstanter, vilka presenteras i avsnitt 6.1.

Under experimentet syns en stor turbulens, vilket även speglas vid analys av *Smokeview*. Vidare i Figur 22 går det att se hur brandgaslagret sprids ut i hela tunneln något som även sågs under experimentet.

FDS har vissa förenklingar i jämförelse med verkligheten och en av dessa är antagande om att lokala variationer inom ett rätblock försummas, vilket bidrar till hela cellen har konstanta egenskaper. Detta innebär att om *meshstorleken* är stor, kan cellerna bli för stora. En omfattande del av variationerna kommer då försummas och resultatet riskerar att bli felaktigt. Det är därför att föredra ett så litet *mesh* som möjligt. På grund av kapaciteten och tidsaspekten har ett mindre *mesh* än 0,1 m inte kunnat användas under simuleringen men en mindre cellstorlek hade möjligen kunnat ge ett något annorlunda resultat.

För att kunna utföra simuleringar i FDS behövs en viss kunskap sedan tidigare. Kunskap om materialen och dess egenskaper krävs för att skriva in rätt indata i filen, men även materialen i sig kan ha viss variation vilket kan påverka resultatet. För att få tillförlitliga resultat krävs en kompetens och förståelse för vilka värden som ska användas vid simuleringar och på vilket sätt. Det krävs en expertis i de inställningar som ska ställas in och i hur programmet används på rätt sätt. Resultaten som fås från simuleringar kan därför variera beroende på vem som utför simuleringen och vilken kunskapsnivå denne besitter. Det är även viktigt att rätt indata används i FDS vid simulering av olika scenarion. Vissa indata, till exempel materialegenskaper i väggar, är något osäkert och resultaten kan därför skilja sig mellan verklighet och simulering.

För att undersöka vilka parametrar som har störst påverkan på resultatet hade en känslighetsstudie varit intressant att utföra. Resultatet av känslighetsanalysen hade varit bra för att öka tillförlitligheten av rapportens resultat men gick tyvärr inte att genomföra på grund av tidsbrist.

## 8.2 Resultat

*I följande avsnitt diskuteras och analyseras resultaten som framkom i arbetet för de olika metoderna.*

### 8.2.1 Massavbrinning och effektutveckling

Från experimentet noterades massförlusten av Heptan under brandförloppet och användes sedan för att beräkna massavbrinningen. Vid studerande och jämförelse av massavbrinningen finns en marginell skillnad mellan de olika experimenten. Det första testet skiljer sig något i jämförelse med de andra två, men generellt sett är alla tre lika, vilket tyder på en god repeterbarhet av massförlusten vid experimenten.

Effektutvecklingen är direkt beroende av massavbrinningen och vid studerande av effektutvecklingen i de olika experimenten dras samma slutsats som ovan. För att beräkna effektutvecklingen används ekvation 9 vilket är en enkel ekvation med vissa antaganden. Den effektiva förbränningseffektiviteten,  $dH_{\text{eff}}$  antas till ett konstant värde för Heptan under hela brandförloppet. I verkligheten kommer förbränningseffektiviteten variera och effektutvecklingen kan därför skilja sig något mellan olika experiment. Vid testen nås en maximal effektutveckling på cirka 1 MW då förbränningen når sin pik, men medelvärde för testen är omkring 600–700 kW. Den handberäknade maximala effektutvecklingen som beräknas med ekvation 7 är omkring 500 kW, se Figur 5. Vid jämförelse av effektutvecklingen som är beräknad utifrån ekvation 7 och den uppmätta från experimenten, vilka kan ses i Figur 13, kan skillnader ses. Den uppmätta effektutvecklingen är högre än den handberäknade. Detta kan bero på att under försöken återstrålades en del värme från omgivningen vilket i sin tur resulterar i en högre

massförlust och på så sätt en högre massavbrinning samt effektutveckling. I ekvation 7 användes däremot tabellvärden, vilka i och för sig är baserade på experiment, men där återstrålningen från omgivningen antagligen har varit lägre.

Vid handberäkning av en pölbrand antas en turbulent diffusionsflamma i stilla miljö. Vid experimentet tillför fläkten ett luftflöde med syre vilket leder till en mer effektiv och fullständig förbränning av bränslet. Mängden oförbrända restprodukter kommer på så sätt minska vilket kan vara en anledning till att effektutvecklingen i experimenten blir högre än vad som är beräknat med handberäkningar.

## 8.2.2 Temperatur

### 8.2.2.1 Experiment

Temperaturen på termoelementtråden från experimenten har jämförts och analyserats. Generellt vid analys av temperaturen kan det fastslås att test 1 visar lägre temperaturer än de två övriga testen. Detta bero på att test 1 var det första experiment som utfördes i tunneln efter att den uppfördes. En del av värmen som genereras av branden används för att värma upp och förångna fukten i väggar och tak. Det blir alltså en lägre andel av den genererade värmen som används för att värma upp tunneln samtidigt som den bildade vattenångan kyler ner brandgaslagret och omgivande ytor, vilket gör att termoelementtråden visar på lägre temperaturer för det första testet.

I ett verkligt fall kan det vara mer fukt i väggarna eftersom det inte har brunnit i tunneln sedan tidigare. I det avseendet kan test 1 vara det försök som har bäst extern validitet. När det gäller att jämföra resultatet med simuleringen så anses dock test 2-3 vara mest relevanta eftersom FDS inte tar hänsyn till fukt som finns i materialet.

Termoelementtråd 1 från experimenten visar inga förhöjda temperaturer än utomhustemperaturen. Det betyder att inga tecken på back-layering har konstaterats, vilket även bekräftas under experimentets gång då inga brandgaser sågs strömma ut motströms.

Temperaturen över höjden, se Figur 17 visar på en linjär ökning av temperaturen i förhållande till höjden för termoelementtråd 1, medan för termoelementtråd 3 och 5 finns det en skillnad i temperaturökningen (Figur 18 och Figur 19). Det översta termoelementet är ungefär 25 °C lägre i jämförelse med termoelementet under. Termoelementtråd 1 är placerat i den isolerade delen av tunneln, där den genererade värmen inte försvinner genom tunnelns ytor. Termoelementtråd 3 och 5 är placerade i delen utan isolering där väggar och tak utgörs enbart av stål. Stålytan var är bara ett par millimeter tjockt och har en hög termisk ledningsförmåga, vilket gör att värmeförluster kommer uppstå. Detta kan vara en bidragande faktor till varför termoelementen påvisar en lägre temperatur för det översta termoelementet i termoelementtråd 3 och 5. I figurerna ovan, där temperaturen beräknas över höjden för termoelementtråd ett, tre och fem för respektive test, är temperaturen över höjden en medeltemperatur för respektive termoelement mellan tiden 400 – 500 sekunder. Vid tidssteget ansågs temperaturen vara någorlunda konstant, vilket är anledningen till att spannet 400 - 500 sekunder valdes.

### 8.2.2.2 Handberäkning

Vårt att beakta vid analys av resultatdiagrammen är som tidigare nämnt att handberäkningarna fås som medelvärde över tvärsnittet, medan experiment och simuleringar fås för en punkt i tunneln.

Handberäkning är ej gjort för termoelementtråd 1, vilket kan ses i Figur 28, då ekvationen enbart kan användas nedströms från branden och termoelementtråd 1 står mellan fläkten och branden. För termotråd 2 och 3 i tunneln resulterar handberäkningsmetoden i ett bra genomsnitt för hur temperaturen ser ut över höjden. För de sista två termotråden är den beräknade temperaturen över tvärsnittet något lägre än vad experimentet visar. Den handberäknade temperaturen är ungefär 20 °C lägre än vad tvärsnittstemperaturen för termotråd 4-5 är i experimentet. Handberäkningsmetoden räknar alltså på en större värmeförlust längre in i tunneln än vad som faktiskt utspelar sig. Ekvationerna verkar därför ge ett mer verklighetstroget resultat på ett kortare avstånd från branden för att sedan underskatta temperaturen i slutet av tunneln. Skillnaden mellan resultaten kan också bero på att vid

handberäkningarna antas en konstant flödes hastighet på 2 m/s genom hela tvärsnittet och tunneln. Vid experimentet minskar däremot flödes hastigheten längre in i tunneln vilket resulterar i att vid termoelementträd 2 och 3 är flödes hastigheten något högre än vid termoelementträd 4 och 5. Temperaturerna kyls därför inte ner lika mycket som den antas göra vid utförandet av handberäkningarna.

### 8.2.2.3 CFD simulering

FDS-simuleringens resultat av temperaturen stödjer slutsatsen att ingen back-layering skett. Vid analys av *Smokeview* ses inga brandgaser strömma mot fläkten, vilket är en indikation på att fläktens kapacitet var tillräcklig. Vid studerande av temperaturen på termoelement 1, visar det något lägre än omgivningens temperatur. Det stödjer även slutsatsen att inga brandgaser färdats i fel riktning. Simuleringens temperatur för termoelementträd 1 visar lägre resultat än vad som uppmättes under experimentet. Anledningar till att skillnader kan ses, kan vara skillnader mellan att den simulerade fläktens kapacitet och fläkten som användes under experimentet. Den simulerade fläkten verkar ha högre kapacitet och ger ett jämnt och konstant flöde under hela försöket, medan den verkliga fläkten kan variera i kapacitet. Flödet kan även påverkas av vindförhållanden, vilket gör att flödet inte är konstant. Avvikelse i flödet kunde ses vid mätning med anemometern, där olika värden för lufthastigheter uppmättes men medelvärdet uppmättes till 2 m/s.

För träd 3-5 i Figur 28 går det att avläsa att temperaturen under simuleringarna är någorlunda jämn över höjden. Detta tyder på att simuleringarna har stor turbulens i brandgaslagret och får en hyfsat jämn temperatur över tvärsnittet. I experimentet är det en större skillnad på temperaturen över höjden. Det kan vara så att turbulensen i brandgaslagret inte har varit lika stor under testen vilket återspeglar sig i att den övre delen av tunneln är varmare än den undre. Detta går även att se i Figur 26 och Figur 26 - Jämförelse mellan simuleringar och experimentella data i termoelement 2 (vänster) och 6 (höger) i termoträd 3, 24 meter uppströms från den västliga öppningen av tunneln.

. För de övre termoelementen är simuleringstemperaturen lägre än den experimentella. För termoträd 3 är simuleringstemperaturen ungefär 50 °C lägre vid termoelementet på 2,45 m höjd (termoelement 2) och för termoträd 5 ungefär 30 °C lägre vid samma termoelement. För de lägre termoelementen är temperaturerna för de olika metoderna mer likvärdiga. Temperaturskillnaden mellan simulering och experiment är runt 10 °C för både termoträd 3 och termoträd 5. Fläkten i simuleringen kan ha en högre kapacitet och leder därför till bättre omrörning i brandgaslagret än vad som sker i experimentet.

Vid studerande av termoelementträden så har det översta termoelementet (nummer 1) för de tre träden i den oisolerade delen, en lägre temperatur än termoelement 2. I Figur 28 följer resultatet för simuleringarna ungefär samma struktur som det experimentella resultatet. För träd 3-5 kan man avläsa en värmeförlust för de översta termoelementen. Värmeförlusten är dock inte lika stor som den var under experimentet. Differensen mellan de två översta termoelementen är under simuleringen 5-10 °C. En anledning till det kan vara att FDS tar hänsyn till materialegenskaperna för stålet och att viss värme leds bort, vilket visar att FDS ger ett så specifikt resultat som inställningarna appliceras. Vid uppbyggnaden av väggarna i Pyrosim användes ett standardvärde för stål som är applicerat i Pyrosim sedan tidigare. För att få ett exakt resultat hade egna värden för till exempel värmekoefficienten varit att föredra. Specifika värden för containrarna var inte kända och det var därför inte möjligt i detta fall men det är något som kan tas i beaktande vid framtida simuleringar. Med andra ord så är simuleringar ett bra verktyg för att förutsäga temperaturen i brandtekniska förlopp, där en god kunskapsbas om FDS krävs och rätt indata ska användas, men även vilka faktorer som har stor inverkan på brand och brandförlopp. Det kan också bero på att modelleringen i FDS inte är helt korrekt. I experimentet kan vinden utanför tunneln resulterat i kylning av stålväggarna och därför resulterat i en temperatursänkning av termoelementen längst upp på termoelementträd 3-5. Vid simuleringarna i FDS har detta inte tagits i beaktande vilket kan vara en ytterligare anledning till att det skiljer sig åt.

Resultaten från simuleringarna i form av temperatur är generellt lägre än vad som uppmättes under försöken. Detta är ett problem i säkerhetsbedömningen då resultaten i detta fall inte blir konservativa.

Även om resultatet från simuleringarna följer formen och strukturen för de uppmätta temperaturerna över höjden är samtliga temperaturer lägre vid samma tidpunkt (se Figur 27). Luftflödet i tunneln kan vara något högre under simuleringarna än vad det var i verkligheten vilket resulterar i lägre temperaturer för termoträden under simulering. Det går även att se i Figur 25 där temperaturen för termoträd 1 i simuleringen är mycket lägre än vad den är i experimentet. Detta kan bero på felaktigheter då det verkliga flödet uppmättes. Mätinstrumentet som användes var ett enkelt verktyg som inte ger så exakta resultat vilket betyder att luftflödet kan ha varit något lägre i tunneln än 2 m/s under experimentet. I FDS var luftflödet runt 2 m/s över hela tunnelns längd, se Figur 23. Det verkliga luftflödet varierar på grund av väderförhållande och kommer påverka resultatet för den experimentella temperaturen, vilket inte speglas i FDS.

### 8.2.3 Strålning

#### 8.2.3.1 Experiment

Den uppmätta temperaturen från plattermoelementen som sedan omvandlas till strålning med ekvation 6 (se Figur 20) skiljer sig precis som med temperaturen mellan test 1 och test 2 samt test 3 där test 1 ger en lägre infallande strålning. Anledningen kan som innan bero på att värmen från branden i första experimentet går till att förångas fukten i väggar och tak. Test 2 och 3 erhåller däremot likvärdiga resultat för samtliga plattermoelement vilket indikerar på att repeterbarheten för experimentet med avseende på strålningsmätningen är god.

Resultatet av strålningsmätningen visar på en förhållandevis låg strålningsandel per kvadratmeter. Det visar på att spridningsrisken för experimenten är låg och risken att något i närheten skulle antända är ytterst liten.

Resultaten från strålningen vid experimenten har inte jämförts mot varken FDS-simuleringar eller handberäkningar, vilket är en begränsning av arbetet. Strålningen har där med enbart använts i syfte att undersöka repeterbarheten.

## 9 Fortsatt forskning

Brandförloppet i en tunnel förväntas utvecklas snabbare och bli större än i vanliga bränder ovan mark. Vid uppförandet av tunnlar är det därför viktigt att vara medveten om brandförloppet och dimensionera därefter. Uppfattningen som bildats under arbetets gång är att en stor del av forskningen bygger på samma studier och experiment. För att få en nyanserad bild av ämnet behövs mer forskning som utökar kunskapen och påvisar problemet från fler synvinklar.

En tunnel som används för trafik har mycket större dimensioner, ofta ett varierande tvärsnitt, tak utformat i form av ett valv samt en lutning på underlaget. Fläktarna som används i verkliga tunnlar för transport är även av en annan karaktär, samt att geometrin i tunneln är för det mesta inte rak utan består av ett antal kurvor. Då olikheterna är många från tunneln i Revinge och en verklig tunnel, är det svårt att avgöra hur väl resultaten från Revinge kan översättas till verkliga förhållanden, alltså den externa validiteten. Fortsatt forskning hade därför kunnat utgå från att försöka validera hur väl resultaten från ett experiment i tunneln på Revinge stämmer överens med resultaten vid i en fullskalig tunnelbrand.

Fler försök i tunneln i Revinge bör också utföras för att jämföra repeterbarheten på fler än två test. Det första försöket skiljde sig från de två sista och slutsatserna har dragits att repeterbarheten i tunneln är god. För att öka tillförlitligheten och bekräfta resultaten för test ett och två bör ett tredje och fjärde test utföras.

## 10 Slutsats

I arbetet har FDS och handberäkningar använts för att återskapa experimentella brandförsök i en tunnelmiljö. Resultaten av de storskaliga experimenten visar att temperaturen, strålningen och effektutvecklingen i första testet var något lägre än för resterande test vilket troligen berodde på att tunneln inte hade använts tidigare. Test 2 och 3 visar däremot på stora likheter i resultatet och repeterbarheten för storskaliga brandförsök i forskningstunneln i Revinge anses därför vara god.

Två metoder för brandtekniska analyser har undersökts i arbetet; handberäkningar och datorsimuleringar i FDS. Handberäkningar är en effektiv och tillgänglig metod. En temperatur kan enkelt uppskattas och ger ett ungefärligt värde av temperaturen. Handberäkningar är både kostnadseffektiva och tidseffektiva och kan med fördel användas i början av en studie eller vid ett problem då en snabb och ungefärlig bedömning är nödvändig. Handberäkningarna för temperatur anger ett medelvärde för hela tvärsnittet och det går inte att säga något om temperatur över tunnelns höjd med metoden. Nackdelarna är att handberäkningar har begränsningar och är mindre noggranna än mer avancerade metoder. Det är svårare att anpassa beräkningsmodellen till ett specifikt fall, vilket resulterar i en lägre noggrannhet i resultatet. Handberäkningar är även känsliga för mänskliga fel i beräkningsgång, omvandling och tolkning, samtidigt som de är transparenta i jämförelse med FDS genom att det är tydligt vilka indata variabler som är av betydelse.

Simulering som metod är flexibel och ger resultat som liknar verkligheten. I resultatet som erhöles från arbetet kan det dock ses att temperaturerna från simuleringen understiger uppmätta värden från försöken. Temperaturerna i arbetets fall är där med ej konservativa, vilket är en negativ aspekt ur ett säkerhetsperspektiv.

Alla ingående parametrar kan anpassas till ett specifikt brandförlopp vilket ger resultat som speglar verkliga scenarion. Det är användarvänligt och kostnadseffektivt i jämförelse med fullskaliga experiment. Det går även att med enkelhet utföra ett test flertalet gånger att jämföra resultaten. Nackdelen med simulering i FDS är dock att simuleringarna är en förenkling av verkligheten och att vissa detaljer försummas eller utesluts vilket försämrar överförbarheten till verkliga förhållanden. Däremot i jämförelse mot handberäkningar som metod så är simuleringar mycket mer noggranna. Vissa simuleringar kräver även stor kapacitet och avancerad teknik vilket inte alltid finns att tillgå. Användaren bör ha en erfarenhet eller kunskap vad gäller brandförlopp, förståelse av modellen, hur beräkningar genomförs och FDS som program för att få tillförlitliga resultat. Om indata är felaktig kan resultaten från simuleringarna vara missvisande och leda till missvisande slutsatser. En sammanställning av för- och nackdelar kan ses nedan i Tabell 6.

Tabell 6 - Visar för- och nackdelar med handberäkningar och CFD simuleringar.

<b>Handberäkningar</b>	<b>CFD simuleringar</b>
+Kostnadseffektiv	+Flexibel, speglar verkliga och specifika scenarier
+Lämplig för överslagsberäkning	+Kostnadseffektiv i jämförelse mot brandexperiment
+Transparent i jämförelse med FDS	+Jämfört mot handberäkningar är noggrannheten hög
-Begränsningar, utrymme för mänskliga fel och tolkning	-Förenkling av verkligheten, detaljer försummas
-Anpassning av modell till olika fall	-Kräver stor datorkapacitet
	-Projektörens kunskap och erfarenhet styr tillförlitligheten

Alla metoder har sina fördelar och nackdelar och kan användas på olika sätt vid dimensionerandet av ett brandförlopp i tunnlar. Fullskaliga experiment är dock att föredra för att få tillförlitliga och rättvisa resultat. Simuleringar och handberäkningar ger en skaplig bild av hur brandförloppet kommer utspela

sig men efter flertalet antaganden och förenklingar vid utförandet ska resultaten användas med viss försiktighet. Det konstateras även att om kunskapen om FDS och brandförlopp är tillräcklig, så är denna metod att föredra.



## 11 Referenser

- Avdelningen för brandteknik, LTH. (u.d.). Hämtat från Avdelningen för brandteknik:  
<https://www.brand.lth.se/svenska/>
- BIV, F. f. (2013). *CFD-beräkningar med FDS*. Malmö.
- Bryant, R. A. (2009). A comparison of gas velocity measurements in a full-scale enclosure fire. *Fire Safety Journal*, 793-800. doi:10.1016
- Containertjänst. (u.d.). *Containertjänst.se*. Hämtat från <https://www.containertjanst.se/vara-containers/40-fot-high-cube/>
- D. Peacock, R., Davis, S., & T. Lee, B. (1988). *An Experimental Data Set for the Accuracy Assessment of Room Fire Models*.
- Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*.
- Forney, G. (2023). *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data*. Hämtat från nist.gov: <https://pages.nist.gov/fds/manuals.html>
- H. Hu, H. (2012). Computational Fluid Dynamics. i P. K. Kundu, I. M. Cohen, & D. R. Dowling, *Fluid Mechanics* (ss. 421-472). Elsevier. doi:10.1016/C2009-0-63410-3
- Hamins, A., Maranghides, A., Johnsson, R., Donnelly, M., Yang, J., Mulholland, G., & Anleitner, R. (2003). *Report of Experimental Results for the International Fire Model Benchmarking and Validation Exercise #3*. NIST.
- Hurley, M. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. New York: Springer. doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- Höst, M., Regnell, B., & Runeson, P. (2006). *Att genomföra examensarbete*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Ingason, H., Lönnemark, A., & Zehn Li, Y. (2011). *Runehamar Tunnel Fire Tests*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- Ingason, H., Zehn Li, Y., & Lönnemark, A. (2015). *Tunnel Fire Dynamics*. Borås: Springer. doi:10.1007/978-1-4939-2199-7
- Karlsson, B., & G. Quintiere, J. (2000). *Enclosure Fire*. CRC Press.
- Liu, F., Xing Yu, L., Cheng Weng, M., & Ling Lu, X. (2016, April). Study on longitudinal temperature distribution of fire-induced ceiling flow in tunnels with different sectional coefficients. *Tunneling and Underground Space Technology*, 54, pp. 49-60. doi:10.1016/j.tust.2016.01.031
- Liu, Q., Park, H., Shen, R., & Jayathunga-Mudiyanselage, L. (2021). A New Method to Calculate Incident Radiant Heat Flux by Using Plate Thermometer. *Fire Technology* (57), 341-359. doi:10.1007/s10694-020-01006-9
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., McDermott, R., Vanella, M., & Mueller, E. (2023). *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. Gaithersburg, Espoo, Columbia: National Institute of Standards and Technology.
- Michel Faure, R., & Karray, M. (2007, Februari 7). Investigation of the Concrete Lining after the Mont Blanc Tunnel Fire. *Structural Engineering International*, 17, pp. 123-132.



- Thunderhead Engineering . (2022). *Pyrosim User Manual*. Hämtat från thunderheadeng.com:  
<https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2023-2/user-manual/>
- Trafikverket. (den 03 10 2016). *Krav Tunnelbyggande*. Hämtat från Trvdokument.trafikverket.se
- Trafikverket. (den 11 01 2021). *Tunnelbyggande*. Borlänge: Trafikverkets Infrastrukturregelverk.
- Weber Saint-Gobain. (2020). *Leca Block - Projektanvisning*. Hämtat från [www.se.weber](http://www.se.weber)
- Wickström, U., Duthinh, D., & McGrattan, K. (2007). *Adiabatic Surface Temperature for Calculating Heat Transfer to Fire Exposed Structures*. London.
- Yang, X., Luo, Y., Li, Z., Guo, H., & Zhang, Y. (2021, Augusti). Experimental investigation on the smoke back-layering length in a branched tunnel fire considering different longitudinal ventilations and fire locations. *Case Studies in Thermal Engineering* 28. doi:10.1016/j.csite.2021.101497
- Yao, Y. (2019). *Fire Behaviors and smoke transportation law of tunnel fires under confined portal boundaries*. Borås: RISE Research Institutes of Sweden & University of Science and Technology of China.
- Zhang, Y., Zhang, K., Chen, L., & Mao, P. (2020). Experimental study on heat transfer of tunnel fire under the influence of longitudinal ventilation and water mist system. *Fire and Materials*, 772-778. doi:10.1002/fam.2854

## Appendix A - Handberäkningar

Nedan presenteras rapportens beräkningar med de värden som använts samt de antaganden som behövts göras. Alla beräkningar har utförts i Excel.

### A.1 Planering av experiment, effektutveckling

Inledningsvis beräknades effektutvecklingen för branden, vilket utgör grunden för simuleringar och handberäkningar. Ekvationen nedan beräknade effektutveckling för en pölbrand, där bränslet bestod av Heptan. Ett kriterium för brandens storlek fastställdes i samråd med laborationshandledare. Effektutvecklingen fick inte bidra till en gastemperatur överstigande 100 °Celsius på avståndet 24 meter in i tunneln (då tunneln på Revinge har skyddande innerbeklädnad de första 24 metrarna, vilket tillåter en högre temperatur).

$$\dot{Q}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-k\beta D})\chi\Delta H_c A_f$$

Effektutvecklingen beräknades med ekvation 7 där värden ur Tabell 7 sattes in. Samtliga värden är tagna ur *Tunnel Fire Dynamics* av Ingason et al. (2015).

Tabell 7 - Termiska egenskaper för Heptan som användes vid beräkningar av effektutvecklingen.

Material	$\Delta H_c$ (kJ/kg)	$\dot{m}_{\infty}''$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$k\beta$ (1/m)
Heptan	44 600	0,101	1,1

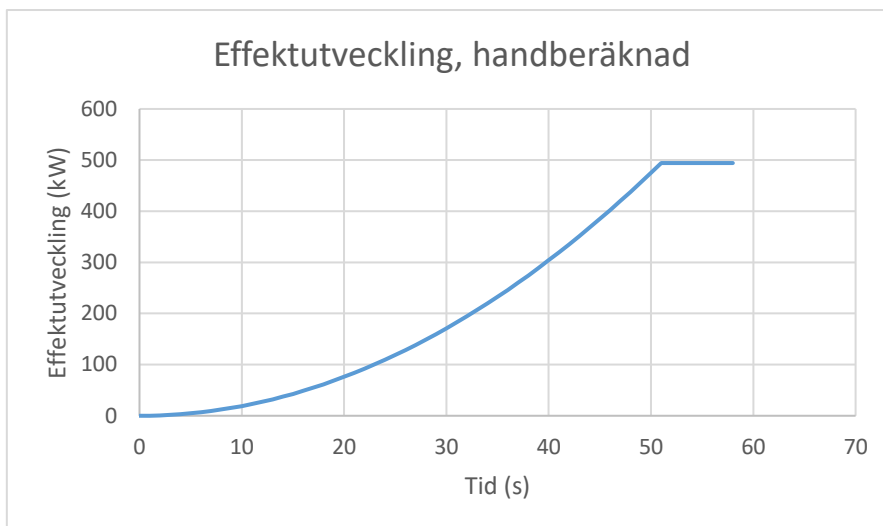
Effektutvecklingen för ett cirkulärt kärl med diametern D, 0,57 meter beräknades. Den cirkulära brandarean  $A_f$  resulterade i 0,25 m<sup>2</sup> och förbränningseffektiviteten från  $\chi$  är 0,93 enligt (Hurley, 2016).

Efter insättning av värdena i ekvationen ovan erhöles en effektutveckling på 495 kW. Efter en temperaturkoll på 24 meters avstånd så understeg temperaturen 100 °Celsius. Därefter undersöktes det om en brand med högre effektutveckling kunde appliceras. Då effektutvecklingen är direkt beroende av brandens diameter, så är det den faktorn som förändras. En diameter på 0,8 meter ansattes, vilket erhöles en effektutveckling på 1224 kW. Efter omvandling till temperatur i brandgaserna 24 meter från brandkällan, resulterade det i överstigande 100 °Celsius. Därmed fastställdes kärl med diametern 0,57 meter. Den beräknade maximala effektutvecklingen som vidare används resulterade där med i 495 kW.

För att sedan skapa en effektutvecklingskurva, användes ekvation 8, se nedan.

$$\dot{Q} = at^2$$

Alfa ansattes till *ultra-fast*, 0,19 kW/s<sup>2</sup>, då Heptan-pölbranden likställdes med en pöl av bensin med diametern 0,9 meter, som enligt Karlsson et al. (2000) har en tillväxthastighet motsvarande *ultra-fast*. Den maximala effektutvecklingen 495 kW, erhöles efter 51 sekunder, vilket kan ses nedan i Figur 29.



Figur 29 - Visar handberäknad effektutveckling för ett Heptanbål med diameter 0,57 m.

## A.2 Gastemperatur

För att kunna beräkna gastemperaturen på olika avstånd i tunneln krävs det att några andra parametrar beräknas. Massaavbrinning och medeltemperatur i tunnelns tvärsnitt vid brandkällan är två ingående parametrar i ekvationen.

Massflödet  $\dot{m}$  beräknades genom ekvation 3 nedan. Luftens densitet  $\rho_o$  ansattes till  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , det longitudinella flödets hastighet  $u_o$  ansattes till  $2 \text{ m/s}$  vilket representeras av fläktens kapacitet i experimenten.  $A_T$  representerar arean av tunnelns tvärsnitt, där bredden var  $2,07 \text{ m}$  och höjden  $2,45 \text{ m}$ , vilket resulterade i  $5,07 \text{ m}^2$ .

$$\dot{m} = \dot{m}_o = \rho_o u_o A_T$$

Massavbrinningen beräknades till  $12,17 \text{ kg/s}$ .

Den beräknade effektutvecklingen efter experimenten ansattes som  $\dot{Q}(\tau)$  och applicerades på ekvation 2 nedan.

$$\Delta T_{avg}(0, \tau) = \frac{2\dot{Q}(\tau)}{3\dot{m}_o c_p}$$

Slutligen beräknades medeltemperaturen för tvärsnittet i tunneln vid olika avstånd genom ekvation 1 nedan. Då termoelementen i experimenten placerades på avstånden  $0 \text{ m}$ ,  $5 \text{ m}$ ,  $10 \text{ m}$ ,  $15 \text{ m}$  och  $24 \text{ m}$ , så handberäknades även temperaturen på samma givna avstånd. Avstånden sattes in som  $x$  i ekvationen,  $h_t$  ansattes till  $0,025 \text{ kW/m}^2\text{K}$  enligt anvisningar i Tunnel Fire Dynamics och tunnelns inneromkrets  $w_p$  sattes till  $9,04 \text{ m}$ .

$$\Delta T_{avg}(x, t) = \Delta T_{avg}(0, \tau) e^{-\frac{h_t w_p}{\dot{m}_o c_p} x}$$

## A.3 Beräkning av experimentdata

Från experimentet erhöles massförlusten i kilo för respektive test. Massförlusten för varje tidssteg sattes in i ett diagram i Excel. Massförlusten (y-axeln) dividerades med tiden (x-axeln) vilket resulterade i massavbrinningen för de tre experimenten. Massavbrinningen för samtliga experiment presenterades i ett diagram, se Figur 12.

Ekvationen nedan användes sedan för att beräkna effektutvecklingen för respektive experiment där den effektiva förbränningsentalpin,  $\Delta H_{eff}$  ansattes till 41 000 kJ/kg enligt (Hurley, 2016) och massavbrinningen,  $\dot{m}$  är den beräknade massavbrinningen som beräknas enligt ovan.

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta H_{eff}$$

#### A.4 Strålning till plattermoelement

Resultatet från experimentet gav upphov till en uppmätt temperatur från respektive plattermoelement. Ekvation 6 nedan användes för att omvandla den uppmätta temperaturen till infallande strålning för respektive plattermometer.

$$\dot{q}_{inc}'' = \frac{(\rho c \delta)_{PT} \frac{\Delta T_{PT}}{\Delta t} + \varepsilon_{pt} \sigma T_{PT}^4 + (h_c + K_{cond})(T_{PT} - T_{\infty})}{\varepsilon_{PT}}$$

De uppmätta temperaturerna för respektive test samt för respektive plattermometer, antecknades tillsammans med tiden ner i ett exceldokument. Konstanterna som används i ekvationen är tagna ur *Tunnel Fire Dynamics* av Ingason, Zehn Li, & Lönnemark (2015), där emissiviteten  $\varepsilon_{PT}$  är 0,8, densiteten, den specifika värmekapaciteten och tjockleken på metallplattan,  $(\rho c \delta)_{PT}$  är tillsammans 4202 J/m<sup>2</sup>, koefficienten som korregerar konduktionen,  $K_{cond}$  är 8,43 W/m<sup>2</sup>, Stefan-Boltzmanns konstant,  $\sigma$  är 5,7 \* 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> och omgivningstemperaturen är 279 K. Alla värden fördes sedan in i ekvationen för att få ut en sammanhängande graf över strålningen under brandförloppet. Resultatet presenteras i kapitel 7.

## Appendix B – Simulering

### B.1 Meshstorlek

I närheten av branden rekommenderas en liten cellstorlek för att få ett tydligt resultat och en skarp optisk bild av brandförloppet. För att beräkna cellstorleken beräknas först den karakteristiska diametern med ekvation 10:

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

Den maximala effektutvecklingen på 951 kW sattes in i formeln tillsammans med resterande värden där luftens densitet  $\rho_0$  är 1,2 kg/m<sup>3</sup>, den specifika värmekapaciteten  $c_p$  är 1 J/kgK, omgivande luftens temperatur  $T_0$  är 293 K och jordens tyngdacceleration  $g$  är 9,82 m/s<sup>2</sup>. Resultatet av beräkningarna blir då 1,042.  $D^*$  multipliceras sedan med 0,075 enligt Ingason et al. (2015) och resulterar i en beräknad cellstorlek på 0,078 areaenheter. För att förenkla arbetet i FDS och Pyrosim avrundas cellstorleken uppåt till 0,1 i närområdet av branden, vilket även sattes i resten av *meshen*.

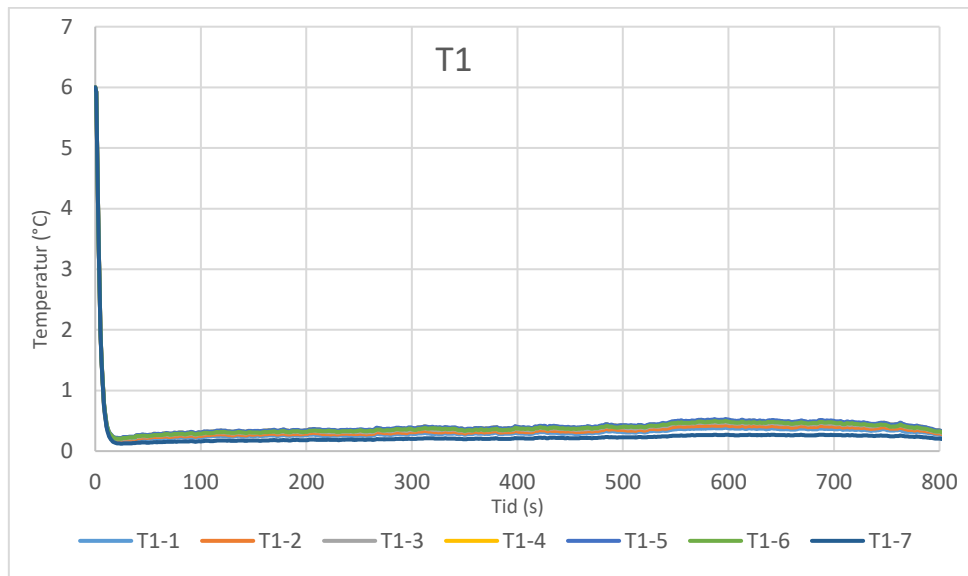
### B.2 Branden

Fastställande av brandens storlek (genom både brandarea och effektutveckling) gjordes genom att utgå från den maximala effektutvecklingen från experimentet, vilket erhöles till 951 kW. Vid beräkning av area för brandkällan, används en cirkulär form, vilket är i enighet med antaganden gjorda för pölbränder i boken Enclosure Fire, (Karlsson & G. Quintiere, 2000). Karlsson et al. (2000) skriver även att fyrkantiga brandkällor kan behandlas som pölar, förutsatt att den cirkulära arean är densamma. Kärlet som användes vid experimentet hade en diameter på 0,57 meter, vilket omvandlades till en kvadratisk form. En kvadrat med sidan 0,5 meter representerade där med pölbranden i Pyrosim.

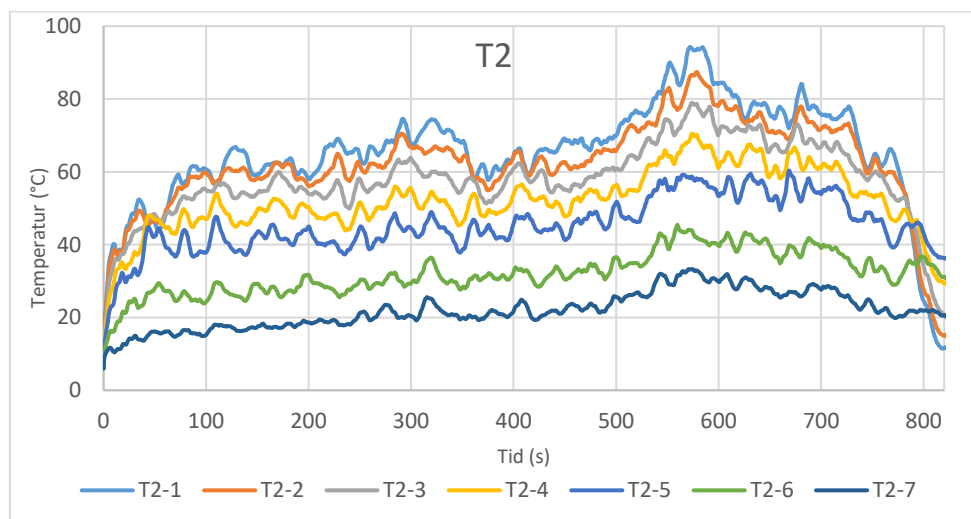
I kombination med *ramp-up* funktionen, ansattes HRRPUA, *Heat Release Rate Per Unit Area*. Den beräknades genom att dela maximal effektutveckling, 951 kW med brandarean. HRRPUA resulterade i 3727 kW/m<sup>2</sup>.

### B.3 Utdata från CFD simulering

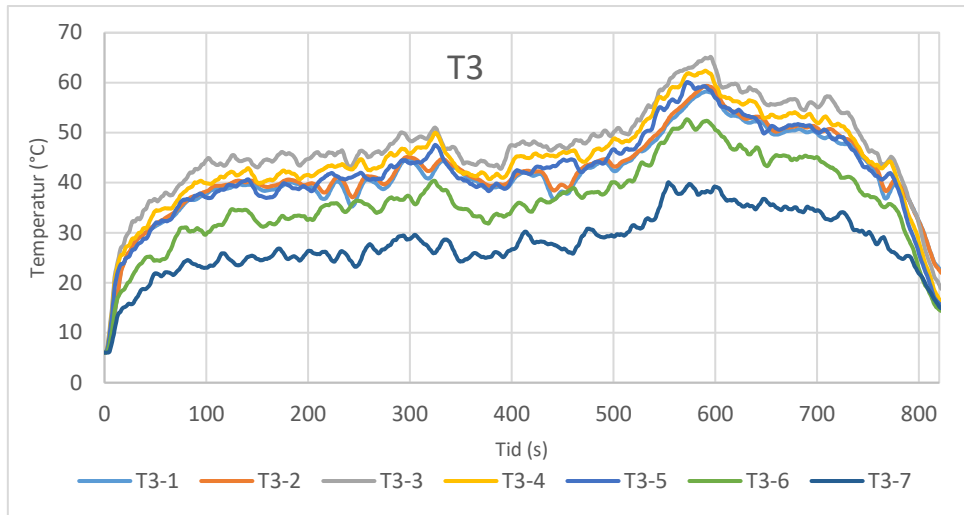
Nedan presenteras utdata från de termoelementträd som simulerats i FDS.



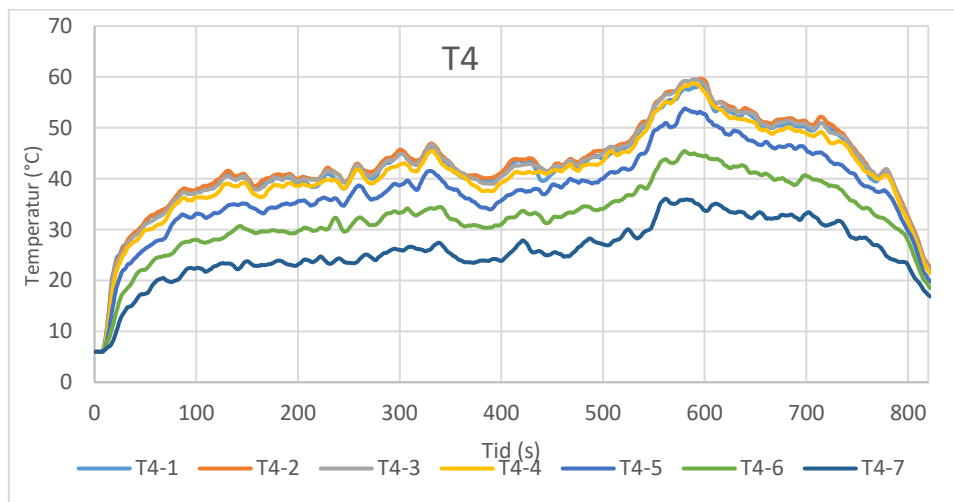
Figur 30 - Redovisar simulerad temperatur från termoelementträd 1.



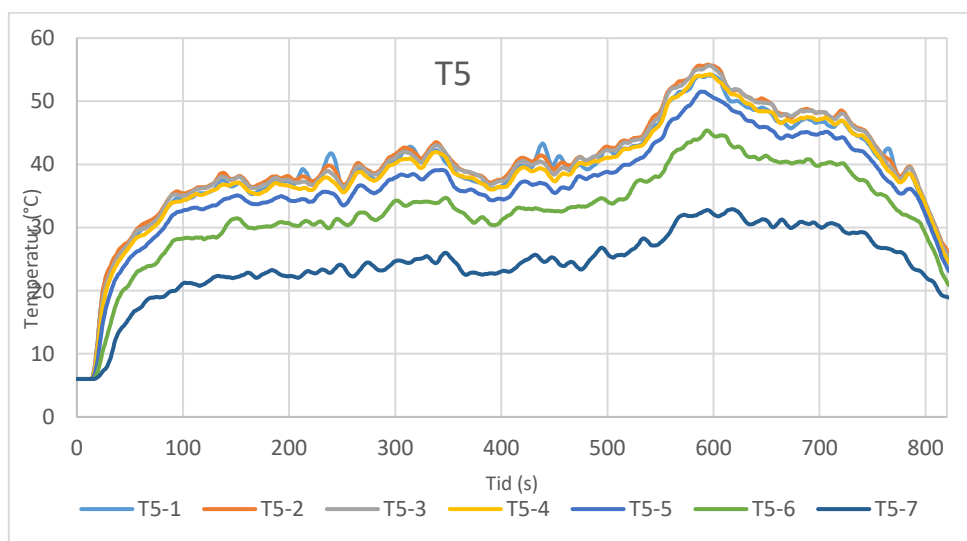
Figur 31 - Redovisar simulerad temperatur från termoelementträd 2.



Figur 32 - Redovisar simulerad temperatur från termoelementräd 3.



Figur 33 - Redovisar simulerad temperatur från termoelementräd 4.

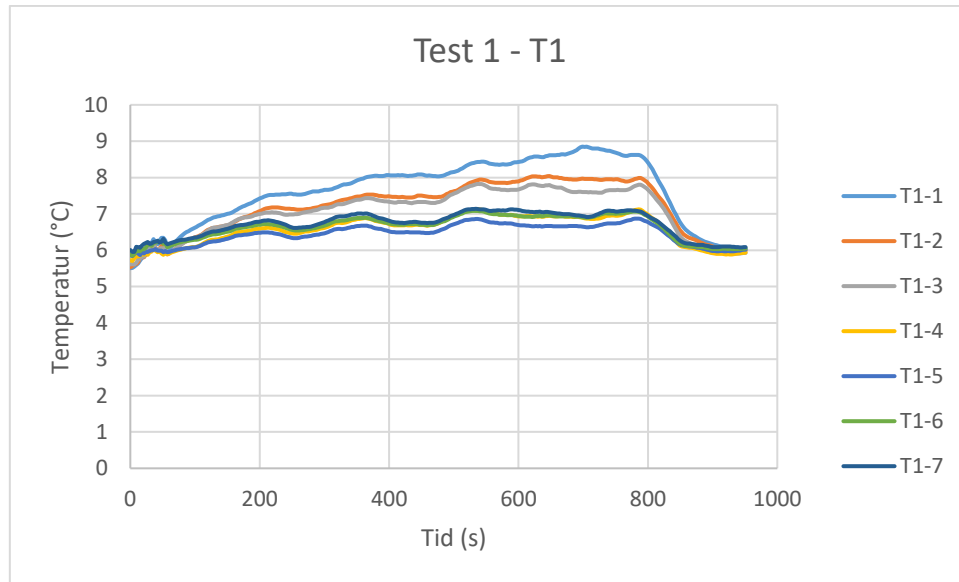


Figur 34 - Redovisar simulerad temperatur från termoelementräd 5.

## Appendix C – Utdata från experimenten

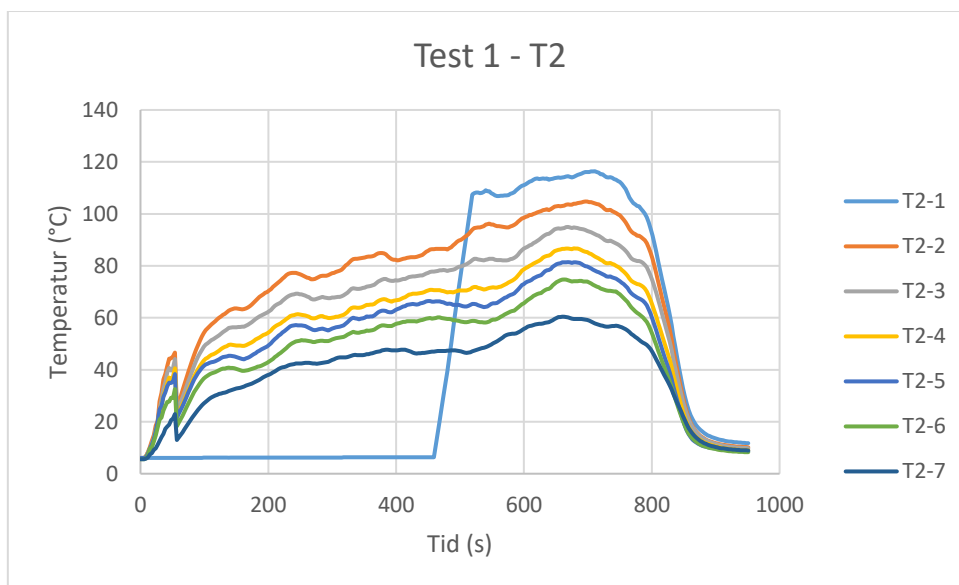
I appendix C presenteras utdata från samtliga termoelementträd under samtliga tre test.

Temperaturer från termoelementträden i test 1 redovisas nedan.



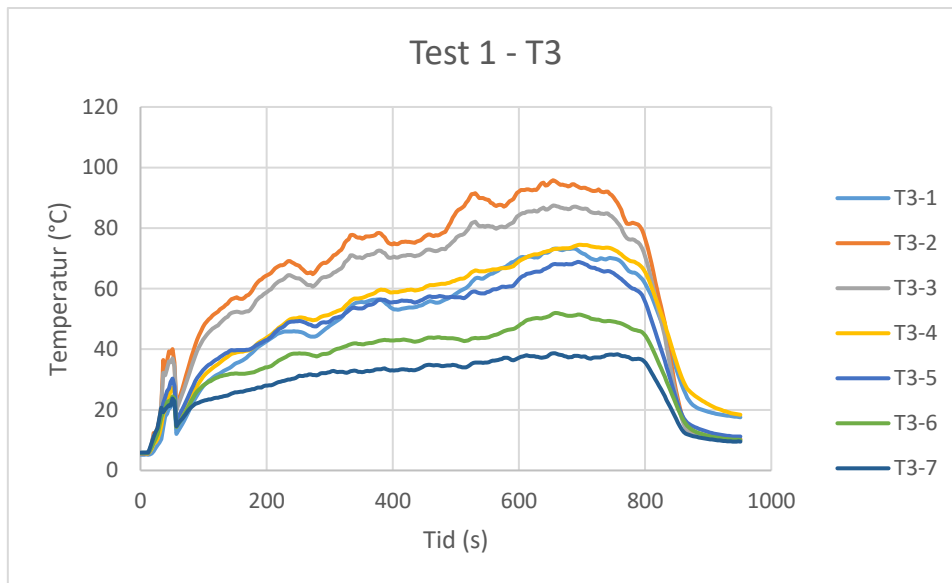
Figur 35 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 1.

I Figur 36 nedan ses ett termoelement, T2-1, som inte har liknande utseende som de andra graferna. Anledningar kan vara fel på utrustning under experimenten, antingen termoelementet själv, eller kablar som skulle kunna vara skadade.



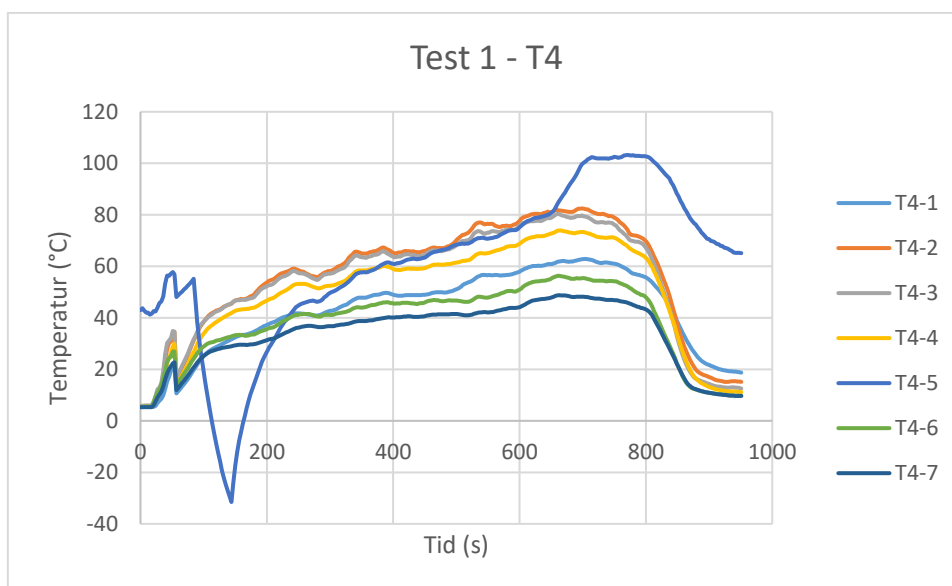
Figur 36 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 2.



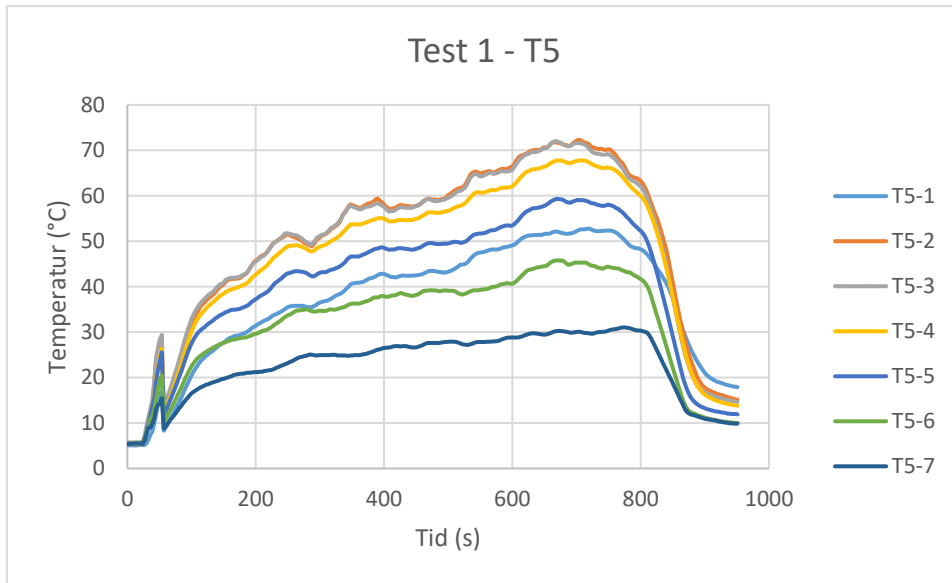


Figur 37 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 3.

I Figur 38 nedan ses ett termoelement, T4-5, som inte har liknande utseende som de andra graferna. Anledningar kan vara fel på utrustning under experimenten, antingen termoelementet själv, eller kablar som skulle kunna vara skadade.

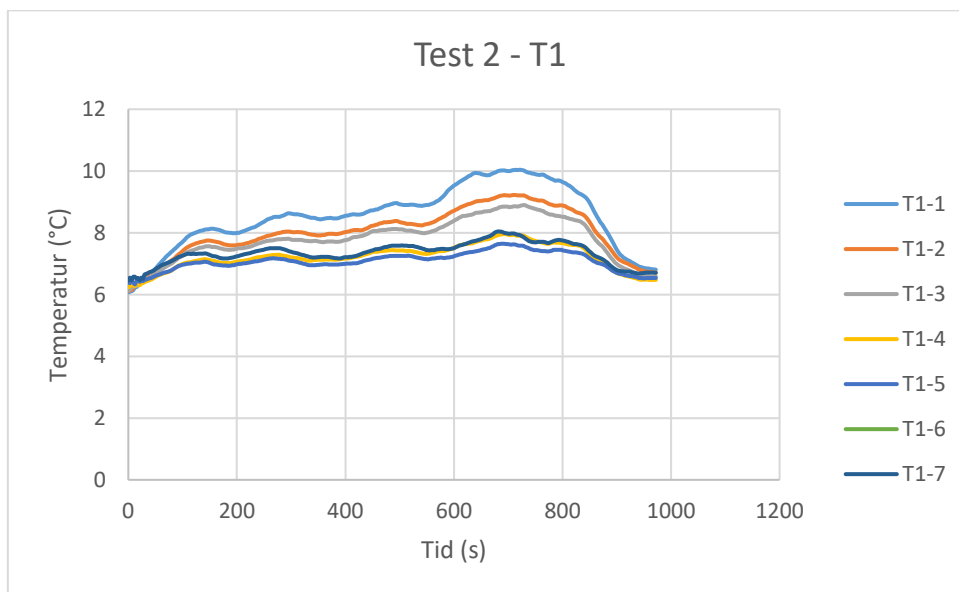


Figur 38 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 4.

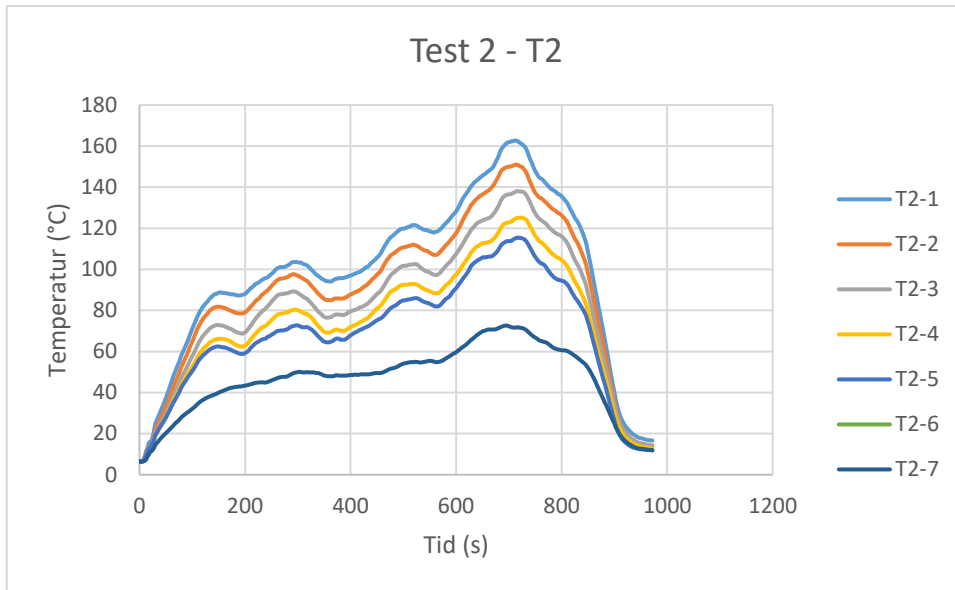


Figur 39 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 5.

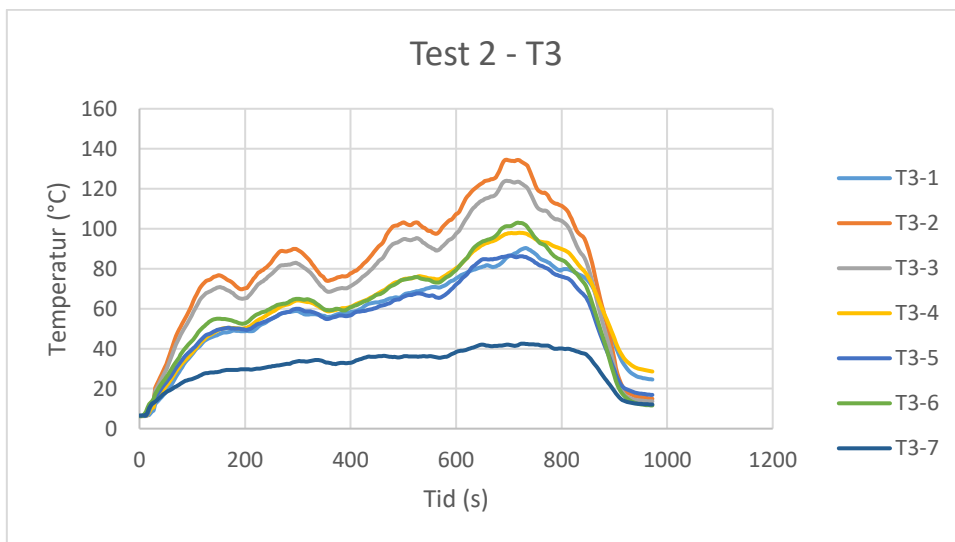
Temperaturer från termoelementträden i test 2 redovisas nedan.



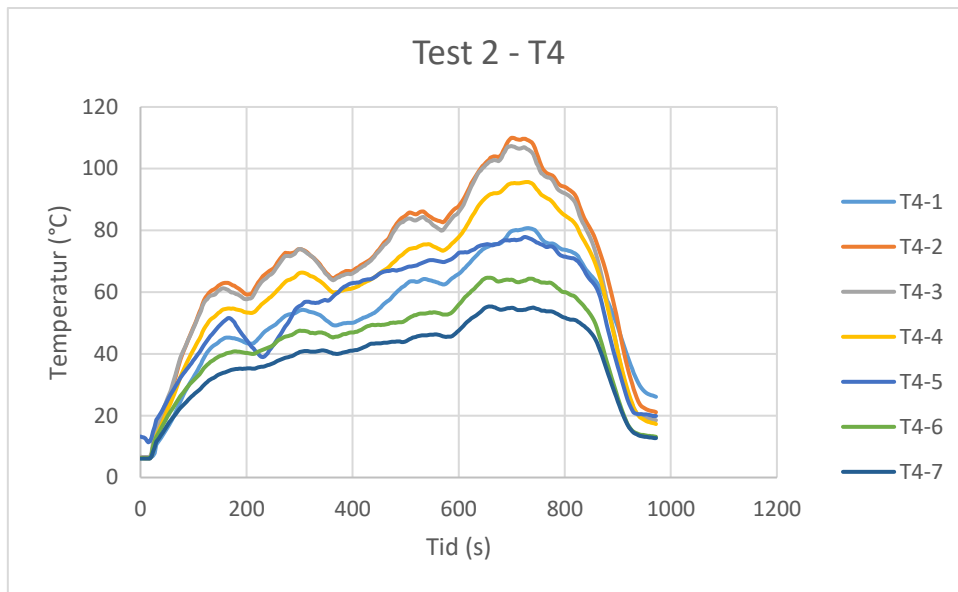
Figur 40 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 1.



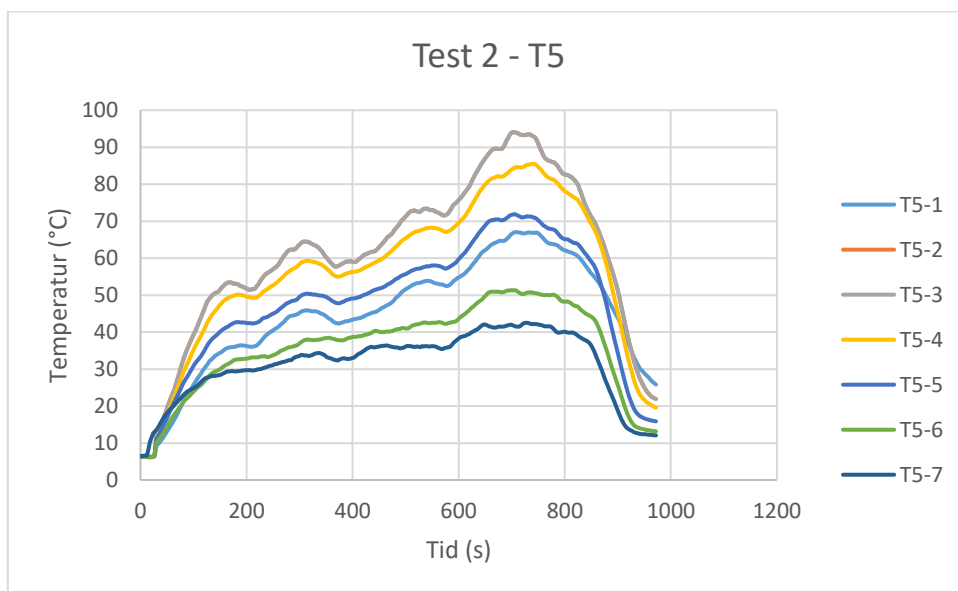
Figur 41 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 2.



Figur 42 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 3.

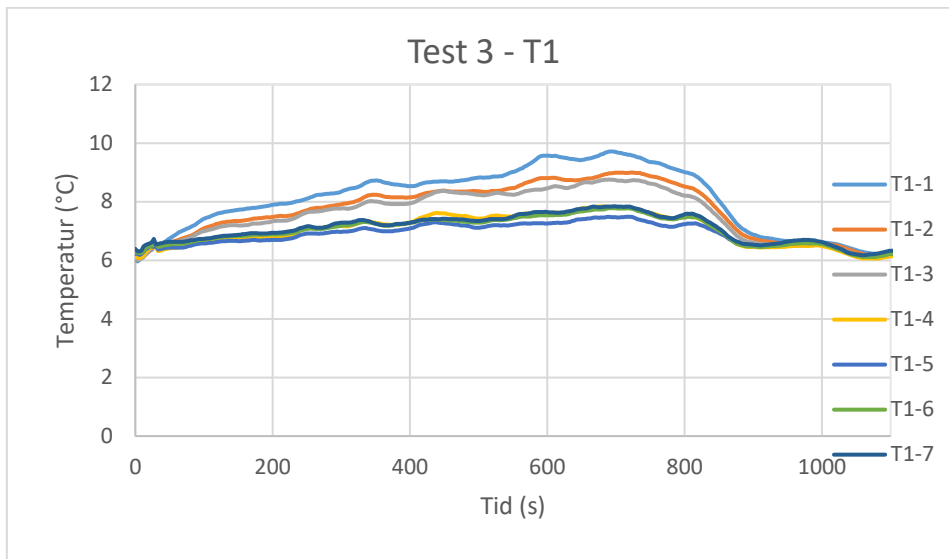


Figur 43 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 4.

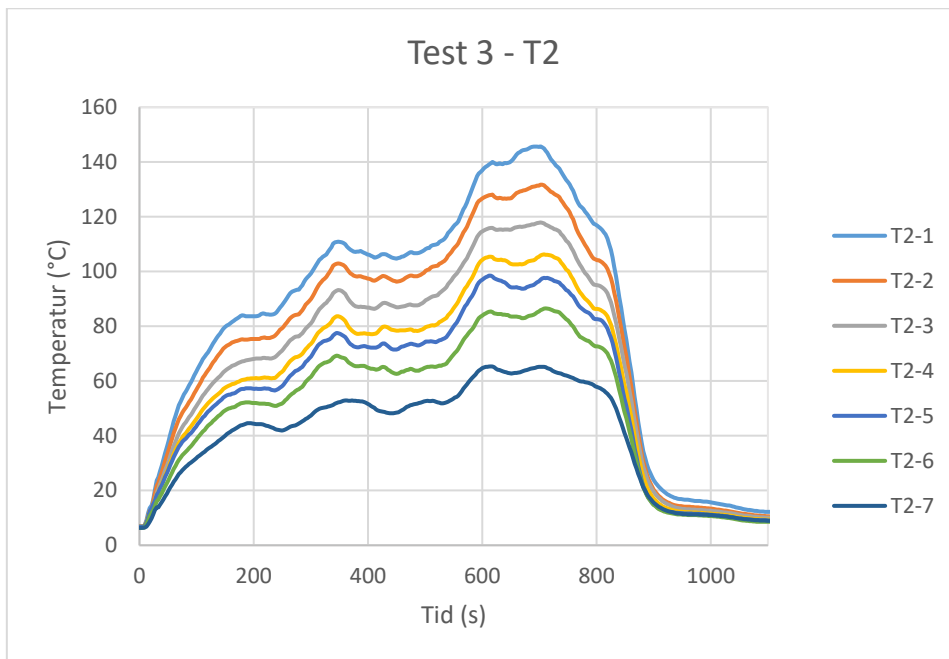


Figur 44 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 5.

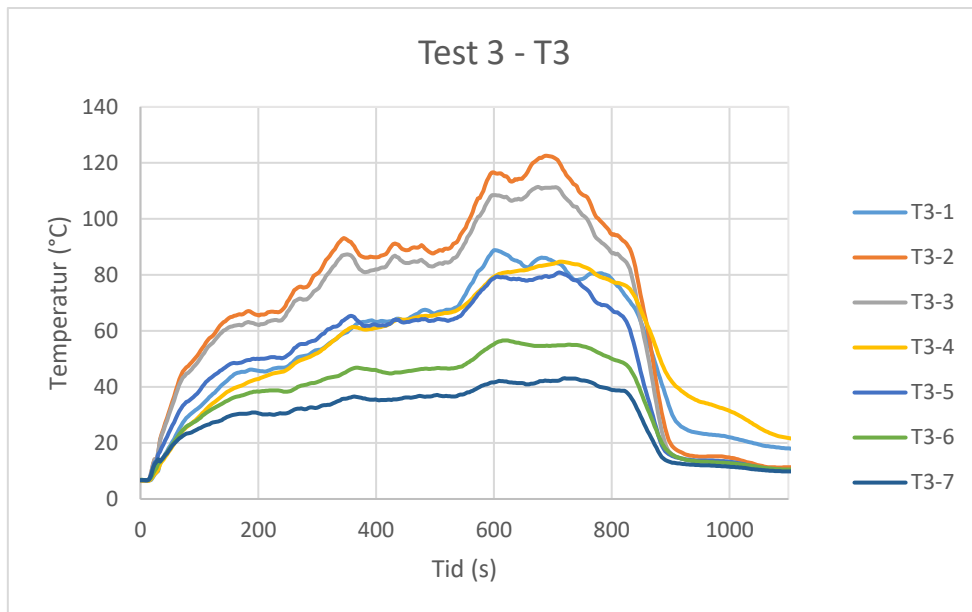
Temperaturer från termoelementträden i test 3 redovisas nedan.



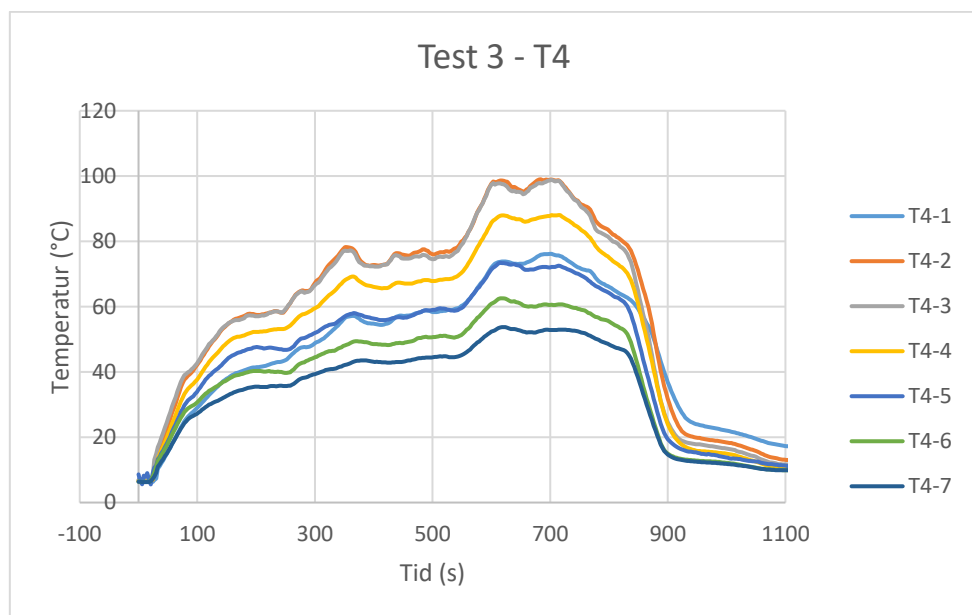
Figur 45 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 1.



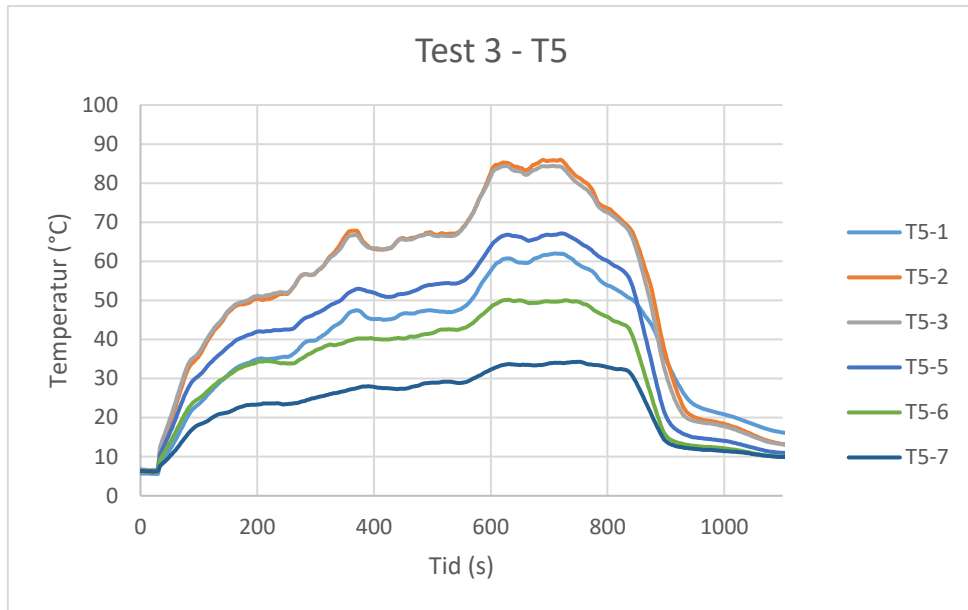
Figur 46 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementträd 2.



Figur 47 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 3.

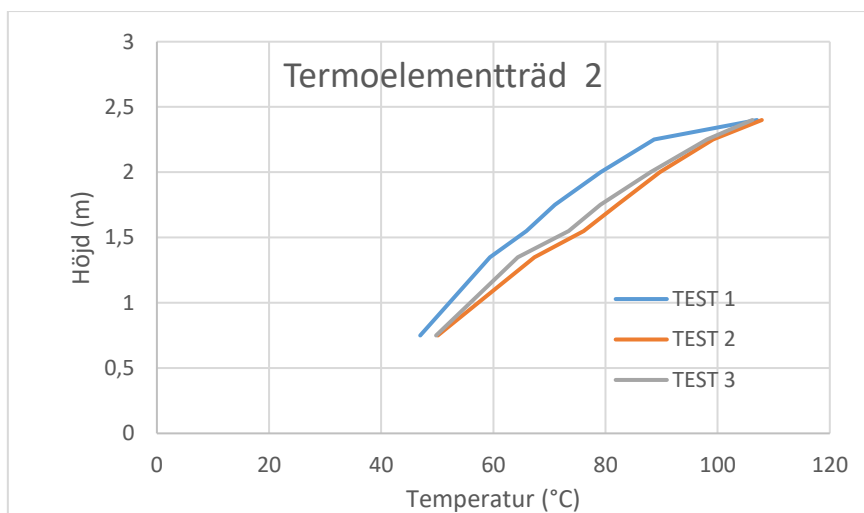


Figur 48 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 4.

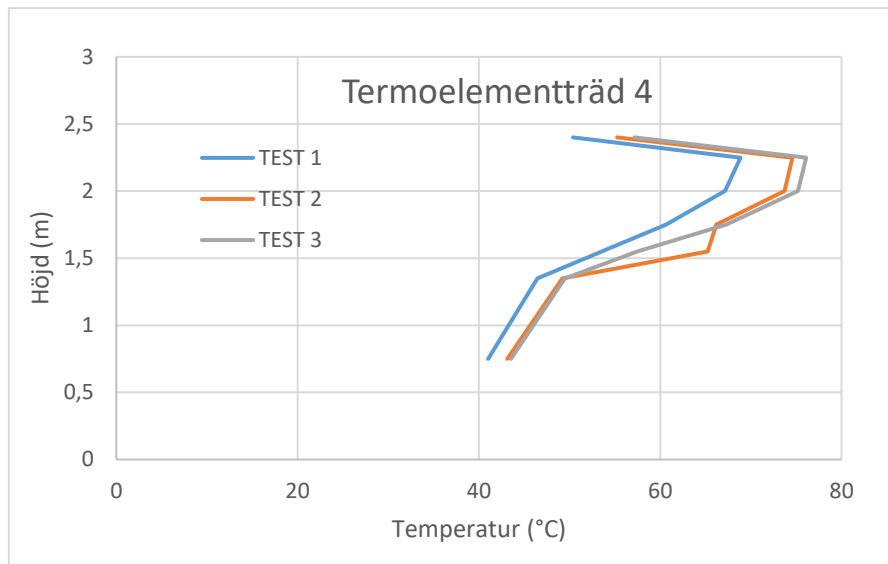


Figur 49 - Redovisar uppmätt temperatur under experiment från termoelementtråd 5.

Temperaturen över höjden för termotråd 2 och 4 presenteras nedan.

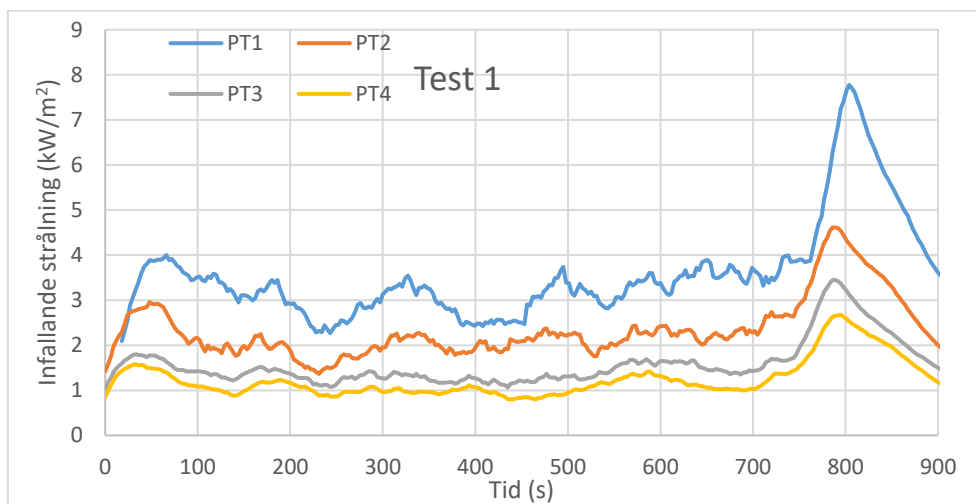


Figur 50 - Redovisar temperaturen över höjden för termoelementtråd 2.



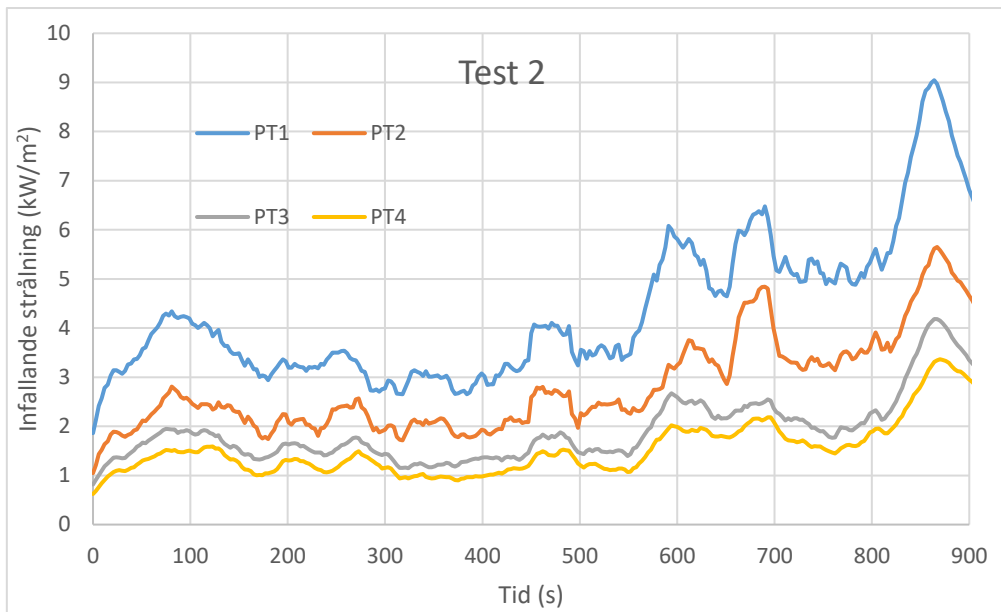
Figur 51 - Redovisar temperaturen över höjden för termoelementträd 4.

Resultatet av den infallande strålningen för samtliga plattermoelement i test 1, 2 och 3 presenteras i figurerna nedan.

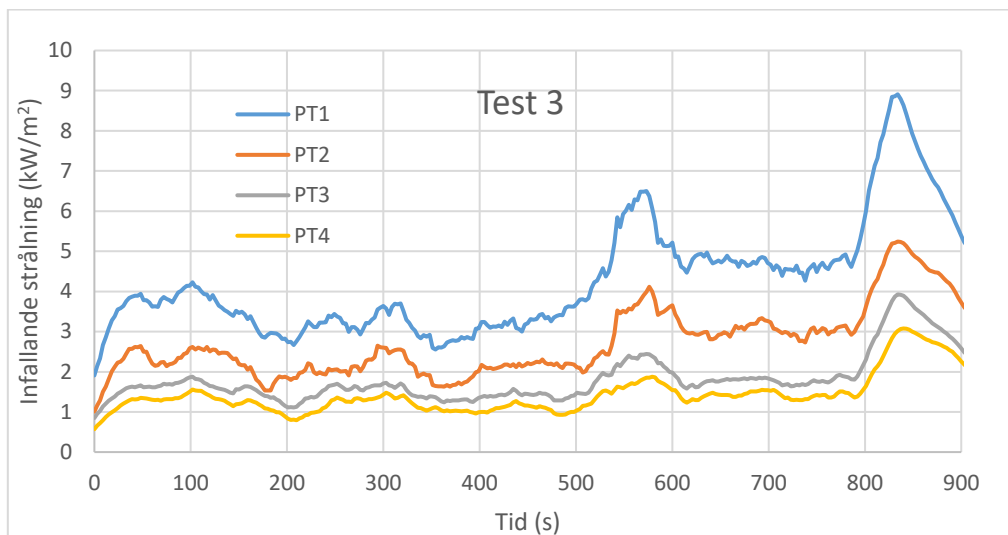


Figur 52 - Redovisar resultatet av infallande strålning för samtliga plattermoelement.





Figur 53 - Redovisar resultatet av infallande strålning för samtliga plattermoelement.



Figur 54 - Redovisar resultatet av infallande strålning för samtliga plattermoelement.

## Appendix D – FDS kod

slutgiltig\_simulering.fds

Generated by PyroSim - Version 2022.2.0803

2023-dec-16 17:50:52

&HEAD CHID='slutgiltig\_simulering'/

&TIME T\_END=822.0/

&DUMP DT\_SL3D=1.0, DT\_SL3D=0.25/

&MISC TMPA=6.0/

&MESH ID='MESH 1', IJK=302,16,15, XB=0.0,60.2,-0.2,3.0,-0.2,2.8/

&REAC ID='HEPTANE',

    FYI='NIST NRC FDS5 Validation',

    FUEL='REAC\_FUEL',

    FORMULA='C7H16',

    CO\_YIELD=6.0E-3,

    SOOT\_YIELD=0.015/

&DEVC ID='T1-1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,2.3/

&DEVC ID='T1-2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,2.1/

&DEVC ID='T1-3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.506109,1.920163/

&DEVC ID='T1-4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,1.7/

&DEVC ID='T1-5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,1.5/

&DEVC ID='T1-6', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,1.3/

&DEVC ID='T1-7', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.1,1.5,0.7/

&DEVC ID='T2-01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,2.3/

&DEVC ID='T2-02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,2.1/

&DEVC ID='T2-03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.506109,1.9/

&DEVC ID='T2-04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,1.7/

&DEVC ID='T2-05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,1.5/

&DEVC ID='T2-06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,1.1/

&DEVC ID='T2-07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=11.9,1.5,0.7/  
&DEVC ID='T3-01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.496794,2.6/  
&DEVC ID='T3-02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.500291,2.463147/  
&DEVC ID='T3-03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.4,2.2/  
&DEVC ID='T3-04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.4,1.90514/  
&DEVC ID='T3-05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.4,1.6/  
&DEVC ID='T3-06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.4,1.0/  
&DEVC ID='T3-07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=24.2,1.4,0.309377/  
&DEVC ID='T4-01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,2.65/  
&DEVC ID='T4-02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,2.45/  
&DEVC ID='T4-03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,2.25/  
&DEVC ID='T4-04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,2.0/  
&DEVC ID='T4-05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,1.65/  
&DEVC ID='T4-06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,1.0/  
&DEVC ID='T4-07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=36.0,1.4,0.3/  
&DEVC ID='T5-01', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,2.65/  
&DEVC ID='T5-02', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,2.45/  
&DEVC ID='T5-03', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,2.25/  
&DEVC ID='T5-04', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,2.0/  
&DEVC ID='T5-05', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,1.65/  
&DEVC ID='T5-06', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,1.0/  
&DEVC ID='T5-07', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=48.0,1.4,0.3/  
&DEVC ID='PT 1', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',  
XYZ=8.0,1.375,1.325, IOR=-1/  
&DEVC ID='PT 2', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',  
XYZ=8.050195,1.375,1.4, IOR=3/  
&DEVC ID='PT 3', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',  
XYZ=12.0,1.375,1.325, IOR=-1/  
&DEVC ID='PT 4', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE',  
XYZ=12.050295,1.375,1.4, IOR=3/  
&DEVC ID='GAS - PT 1', QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.0,1.425,1.375,  
ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/  
&DEVC ID='GAS - PT 2', QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX GAS', XYZ=8.275,1.4,1.53,  
ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/

&DEVC ID='GAS - PT 3', QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX GAS', XYZ=12.0,1.425,1.375,  
ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/

&DEVC ID='GAS - PT 4', QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX GAS', XYZ=12.0,1.425,1.525,  
ORIENTATION=0.0,0.0,1.0/

&MATL ID='Lecablock',

SPECIFIC\_HEAT=1.05,

CONDUCTIVITY=0.2,

DENSITY=725.0,

EMISSIVITY=1.0/

&MATL ID='STEEL',

FYI='Drysedale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC\_HEAT=0.46,

CONDUCTIVITY=45.8,

DENSITY=7850.0,

EMISSIVITY=0.95/

&MATL ID='CONCRETE',

FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',

SPECIFIC\_HEAT=1.04,

CONDUCTIVITY=1.8,

DENSITY=2280.0/

&SURF ID='Lecablock',

RGB=146,202,166,

BACKING='VOID',

MATL\_ID(1,1)='Lecablock',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.12/

&SURF ID='Brand',

COLOR='RED',

HRRPUA=2642.306,

RAMP\_Q='Brand\_RAMP\_Q',

TMP\_FRONT=300.0/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=0.0, F=0.361919/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=3.0, F=0.348378/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=6.0, F=0.365113/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=9.0, F=0.388578/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=12.0, F=0.406557/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=15.0, F=0.436121/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=18.0, F=0.450499/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=21.0, F=0.465103/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=24.0, F=0.491349/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=27.0, F=0.500461/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=30.0, F=0.509671/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=33.0, F=0.520736/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=36.0, F=0.52013/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=39.0, F=0.544355/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=42.0, F=0.546145/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=45.0, F=0.555838/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=48.0, F=0.545761/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=51.0, F=0.556799/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=54.0, F=0.566944/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=57.0, F=0.567647/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=60.0, F=0.583908/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=63.0, F=0.61366/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=66.0, F=0.62559/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=69.0, F=0.625924/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=72.0, F=0.636688/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=75.0, F=0.627067/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=78.0, F=0.635579/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=81.0, F=0.646285/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=84.0, F=0.629292/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=87.0, F=0.637608/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=90.0, F=0.631386/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=93.0, F=0.633251/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=96.0, F=0.646336/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=99.0, F=0.643781/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=102.0, F=0.639557/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=105.0, F=0.646803/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=108.0, F=0.657774/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=111.0, F=0.677983/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=114.0, F=0.686304/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=117.0, F=0.686771/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=120.0, F=0.683726/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=123.0, F=0.675202/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=126.0, F=0.670742/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=129.0, F=0.675954/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=132.0, F=0.669104/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=135.0, F=0.679346/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=138.0, F=0.668001/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=141.0, F=0.641269/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=144.0, F=0.642176/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=147.0, F=0.646552/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=150.0, F=0.65885/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=153.0, F=0.661494/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=156.0, F=0.657894/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=159.0, F=0.652765/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=162.0, F=0.660787/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=165.0, F=0.672299/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=168.0, F=0.686349/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=171.0, F=0.667037/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=174.0, F=0.668334/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=177.0, F=0.675848/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=180.0, F=0.662935/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=183.0, F=0.662091/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=186.0, F=0.662984/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=189.0, F=0.661251/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=192.0, F=0.665173/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=195.0, F=0.661714/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=198.0, F=0.658619/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=201.0, F=0.686551/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=204.0, F=0.696136/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=207.0, F=0.695011/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=210.0, F=0.695866/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=213.0, F=0.693496/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=216.0, F=0.685675/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=219.0, F=0.698271/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=222.0, F=0.698165/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=225.0, F=0.686489/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=228.0, F=0.69577/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=231.0, F=0.692803/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=234.0, F=0.682051/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=237.0, F=0.672434/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=240.0, F=0.680954/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=243.0, F=0.693057/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=246.0, F=0.705157/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=249.0, F=0.693366/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=252.0, F=0.680284/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=255.0, F=0.685049/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=258.0, F=0.6859/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=261.0, F=0.689812/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=264.0, F=0.704265/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=267.0, F=0.711516/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=270.0, F=0.715735/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=273.0, F=0.715442/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=276.0, F=0.723488/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=279.0, F=0.731224/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=282.0, F=0.743259/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=285.0, F=0.753862/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=288.0, F=0.735505/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=291.0, F=0.73827/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=294.0, F=0.733204/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=297.0, F=0.741885/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=300.0, F=0.746643/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=303.0, F=0.745334/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=306.0, F=0.740615/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=309.0, F=0.760844/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=312.0, F=0.774511/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=315.0, F=0.766929/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=318.0, F=0.765778/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=321.0, F=0.754668/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=324.0, F=0.750953/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=327.0, F=0.741231/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=330.0, F=0.725195/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=333.0, F=0.70937/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=336.0, F=0.699544/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=339.0, F=0.67918/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=342.0, F=0.653939/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=345.0, F=0.641453/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=348.0, F=0.654016/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=351.0, F=0.666655/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=354.0, F=0.666349/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=357.0, F=0.664414/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=360.0, F=0.653402/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=363.0, F=0.647211/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=366.0, F=0.642228/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=369.0, F=0.63502/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=372.0, F=0.641585/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=375.0, F=0.649914/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=378.0, F=0.649675/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=381.0, F=0.646854/



&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=384.0, F=0.650193/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=387.0, F=0.656178/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=390.0, F=0.674755/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=393.0, F=0.70359/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=396.0, F=0.706967/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=399.0, F=0.711433/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=402.0, F=0.721671/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=405.0, F=0.723128/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=408.0, F=0.714407/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=411.0, F=0.705156/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=414.0, F=0.707212/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=417.0, F=0.701141/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=420.0, F=0.707422/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=423.0, F=0.710731/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=426.0, F=0.710012/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=429.0, F=0.718145/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=432.0, F=0.706013/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=435.0, F=0.705457/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=438.0, F=0.716784/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=441.0, F=0.727455/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=444.0, F=0.722238/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=447.0, F=0.719634/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=450.0, F=0.716381/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=453.0, F=0.70267/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=456.0, F=0.708699/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=459.0, F=0.710276/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=462.0, F=0.717514/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=465.0, F=0.723461/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=468.0, F=0.723829/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=471.0, F=0.733017/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=474.0, F=0.737268/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=477.0, F=0.744324/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=480.0, F=0.748589/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=483.0, F=0.750974/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=486.0, F=0.754581/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=489.0, F=0.750936/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=492.0, F=0.762838/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=495.0, F=0.768548/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=498.0, F=0.769187/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=501.0, F=0.767523/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=504.0, F=0.76704/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=507.0, F=0.774619/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=510.0, F=0.778057/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=513.0, F=0.786017/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=516.0, F=0.80794/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=519.0, F=0.817142/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=522.0, F=0.823365/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=525.0, F=0.843151/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=528.0, F=0.855677/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=531.0, F=0.857161/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=534.0, F=0.883551/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=537.0, F=0.911117/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=540.0, F=0.925727/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=543.0, F=0.947944/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=546.0, F=0.956033/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=549.0, F=0.971185/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=552.0, F=0.977405/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=555.0, F=0.970899/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=558.0, F=0.979896/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=561.0, F=0.992073/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=564.0, F=0.998045/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=567.0, F=0.997806/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=570.0, F=1.0/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=573.0, F=0.998326/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=576.0, F=0.990088/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=579.0, F=0.989391/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=582.0, F=0.98959/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=585.0, F=0.984018/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=588.0, F=0.984456/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=591.0, F=0.975939/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=594.0, F=0.961914/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=597.0, F=0.938492/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=600.0, F=0.925173/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=603.0, F=0.904692/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=606.0, F=0.903775/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=609.0, F=0.899226/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=612.0, F=0.900663/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=615.0, F=0.902821/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=618.0, F=0.892353/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=621.0, F=0.887703/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=624.0, F=0.883382/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=627.0, F=0.881748/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=630.0, F=0.876926/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=633.0, F=0.879563/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=636.0, F=0.876556/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=639.0, F=0.871439/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=642.0, F=0.856824/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=645.0, F=0.844945/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=648.0, F=0.840073/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=651.0, F=0.84621/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=654.0, F=0.844249/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=657.0, F=0.844944/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=660.0, F=0.847665/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=663.0, F=0.853415/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=666.0, F=0.841187/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=669.0, F=0.841134/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=672.0, F=0.849284/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=675.0, F=0.860642/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=678.0, F=0.859601/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=681.0, F=0.854003/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=684.0, F=0.84783/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=687.0, F=0.853352/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=690.0, F=0.852973/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=693.0, F=0.851437/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=696.0, F=0.843627/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=699.0, F=0.833014/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=702.0, F=0.822297/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=705.0, F=0.809208/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=708.0, F=0.809542/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=711.0, F=0.80476/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=714.0, F=0.805031/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=717.0, F=0.793632/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=720.0, F=0.784024/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=723.0, F=0.767173/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=726.0, F=0.769478/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=729.0, F=0.760741/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=732.0, F=0.736504/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=735.0, F=0.718497/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=738.0, F=0.709385/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=741.0, F=0.703822/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=744.0, F=0.703475/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=747.0, F=0.68299/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=750.0, F=0.68284/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=753.0, F=0.665742/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=756.0, F=0.660356/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=759.0, F=0.658263/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=762.0, F=0.666194/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=765.0, F=0.66474/

&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=768.0, F=0.644425/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=771.0, F=0.617552/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=774.0, F=0.586639/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=777.0, F=0.572081/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=780.0, F=0.53738/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=783.0, F=0.521908/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=786.0, F=0.485592/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=789.0, F=0.450484/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=792.0, F=0.418713/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=795.0, F=0.385894/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=798.0, F=0.351326/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=801.0, F=0.326814/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=804.0, F=0.288026/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=807.0, F=0.256281/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=810.0, F=0.241521/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=813.0, F=0.22323/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=816.0, F=0.209507/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=819.0, F=0.193677/  
&RAMP ID='Brand\_RAMP\_Q', T=822.0, F=0.168167/  
&SURF ID='Flakt',  
    RGB=26,204,26,  
    TMP\_FRONT=0.0,  
    VEL=-2.0/  
&SURF ID='Stålvägg',  
    RGB=146,142,231,  
    BACKING='VOID',  
    MATL\_ID(1,1)='STEEL',  
    MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,  
    THICKNESS(1)=0.1/  
&SURF ID='Tak/golv',  
    RGB=146,238,142,  
    BACKING='VOID',

MATL\_ID(1,1)='CONCRETE',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,  
THICKNESS(1)=0.4/

&OBST ID='Golv', XB=0.0,60.0,9.714451E-17,2.8,-0.2,0.0, RGB=142,244,226,  
TRANSPARENCY=0.647059, SURF\_ID='Tak/golv'/

&OBST ID='Tak\_högdel', XB=24.0,60.0,9.714451E-17,2.8,2.7,2.8, SURF\_ID='Stålvägg',  
TEXTURE\_ORIGIN=0.0,0.0,2.65/

&OBST ID='Tak', XB=0.0,24.0,9.714451E-17,2.8,2.45,2.8, SURF\_ID='Tak/golv',  
TEXTURE\_ORIGIN=0.0,0.0,2.65/

&OBST ID='Brand', XB=6.0,6.6,1.2,1.8,0.0,0.2, SURF\_IDS='Brand','INERT','INERT'/

&OBST ID='Leca-wall', XB=0.0,24.0,2.45,2.8,-0.2,2.8, SURF\_ID='Lecablock'/

&OBST ID='Leca-wall', XB=0.0,24.0,0.0,0.4,-0.2,2.8, SURF\_ID='Lecablock'/

&OBST ID='Steel-wall', XB=24.0,60.0,0.0,0.2,-0.2,2.8, SURF\_ID='Stålvägg'/

&OBST ID='Steel-wall', XB=24.0,60.0,2.6,2.8,-0.2,2.8, SURF\_ID='Stålvägg'/

&OBST ID='pt1', XB=8.0,8.2,1.2,1.4,1.2,1.4/

&OBST ID='pt2', XB=8.0,8.2,1.2,1.4,1.2,1.4/

&OBST ID='pt3', XB=12.0,12.2,1.2,1.4,1.2,1.4/

&OBST ID='pt4', XB=12.0,12.2,1.2,1.4,1.2,1.4/

&VENT ID='Vent-kortsida', SURF\_ID='OPEN', XB=60.2,60.2,-0.2,3.0,-0.2,2.8, RGB=240,240,240,  
TRANSPARENCY=0.098039/

&VENT ID='Vent-tak', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,60.2,-0.2,3.0,2.8,2.8/

&VENT ID='Vent-langsida', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,60.2,3.0,3.0,-0.2,2.8/

&VENT ID='Vent-langsida2', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,60.2,-0.2,-0.2,-0.2,2.8/

&VENT ID='Flakt', SURF\_ID='Flakt', XB=0.0,0.0,0.0,2.8,0.0,2.8/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=23.9/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=1.4/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=4.5/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=8.3/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=12.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=36.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=48.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=0.2/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=6.6/  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=5.9/  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=1.0/  
&SLCF QUANTITY='U-VELOCITY', CELL\_CENTERED=.TRUE., PBY=1.4/

&TAIL /