LUND UNIVERSITY

# Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbetet med brandskydd i byggnader

Holmstedt, Göran; Bengtsson, Staffan; Blomqvist, Per; Dittmer, Torkel; Hägglund, Bengt; Tuovinen, Heimo; Van Hees, Patrick

2008

Link to publication

*Citation for published version (APA):*
Holmstedt, G., Bengtsson, S., Blomqvist, P., Dittmer, T., Hägglund, B., Tuovinen, H., & Van Hees, P. (2008). *Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbetet med brandskydd i byggnader*. (LUTVDG/TVBP--3144--SE; Vol. 3144). [Publisher information missing].

*Total number of authors:*
7

**General rights**
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: https://creativecommons.org/licenses/

**Take down policy**
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

# Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader

*Göran Holmstedt*

*Staffan Bengtsson*

*Per Blomqvist*

*Torkel Dittmer*

*Bengt Hägglund*

*Heimo Tuovinen*

*Patrick van Hees*

---

**Department of Fire Safety Engineering**
**Lund University, Sweden**

**Brandteknik**
**Lunds tekniska högskola**
**Lunds universitet**

**Report 3144 Lund 2008**

**Rapporten har finansierats av Statens Räddningsverk**

Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader

Quality scenarios for validation of CFD-codes CFX, FDS, SMAFS and SOFIE.?

Göran Holmstedt, Staffan Bengtsson,Per Blomqvist, Torkel Dittmer, Bengt Hägglund, Heimo Tuovinen
Patrick van Hees

Report 3144

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--3144--SE

Number of pages: 222

Keywords

CFD, simulation, smoke spread, fire, validation

Sökord

CFD, simulering, brandgasspridning, brand, validering

Abstract

An evaluation of the four CFD software; CFX, FDS, SMAFS and SOFIE, have been performed. This report describes the final validation study.

© Copyright: Brandteknik och riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2008.

Brandteknik och riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se

Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

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

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se/english

Telephone: +46 46 222 73 60
Telefax

# Förord

Rapporten utgör en delredovisning av forskningsprojektet 'Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader'. Projektet syftar som helhet till att beskriva hur väl olika datorprogram för bl.a. brandgasspridning och utrymning modellerar en motsvarande verklig situation. Den föreliggande rapporten omfattar jämförelsen av fyra olika program som beskriver brandgasspridning , koderna CFX, FDM, SMAFS och SOFIE. I en annan rapport av Frantzich m.fl. (2008) redovisas resultaten av en jämförelse mellan olika utrymningsmodeller. Forskningsprojektet, i rapporten kallat huvudprojektet, har finansierats av Statens Räddningsverk och har letts av Professor Göran Holmstedt från Brandteknik och Riskhantering vid Lunds Tekniska Högskola (LTH). Projektet har varit ett samarbetsprojekt mellan LTH, Brandskyddslaget och SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut vars deltagare utgjort arbetsgruppen. Arbetet startades under 2005.
Denna rapport ges en beskrivning av vad som gjorts och vilka resultat som framkommit. Dock är stora delar av underlaget inte inkluderat utan finns istället tillgängligt i elektroniskt format på http://www.brand.lth.se.
Lund december 2008
Projektet syftar som helhet till att beskriva hur väl olika datorprogram för bl.a. brandgasspridning och utrymning modellerar motsvarande en verklig situation.

Projektet avrapporteras i följande rapporter:

Report 3143 (2007). Utvärdering och validering av utrymningsprogram

Report 3144 (2008), Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader.

Report 3144 (2008), Appendix 1, Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE.

Report 3144 (2008), Appendix 2, Simuleringar av experimentella scenarier med CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE.

Report 3144 (2008), Appendix 3, Experimentella resultat för de ingående scenarierna.

Lund December 2008

# Sammanfattning

I rapporten jämförelse mellan experimentella resultat för åtta olika brandscenarier och simuleringar med fyra CFD-koder CFX, FDS, SMAFS och SOFIE. Scenarierna valdes ut för att representera scenarier som ofta förekommer vid funktionsbaserad dimensionering av brandskydd. De scenarier som ingår i valideringen är:

- Scenario 1 A. Stort rum, 16 m (L) x 10 m (B) x 5 m (H), med 1 $m^2$ konstant brand (c:a. 1.1 MW) på golvet och en 1 $m^2$ lucka i taket.
- Scenario 1B1och B2. Korridor, 15 m (L) x 7.5 m (B) x 6 m (H) med 1 $m^2$ växande brand (växande kvadratiskt med tiden från 0 till 3 MW på 3 minuter) på golvet. 1B1 har 2 $m^2$ lucka i taket rakt över branden och 1B2 en 2 $m^2$ lucka i taket i korridorens mitt 3 m från branden.
- Scenario 2. Tunnel 853 m lång, 8.77 m bred och med 7.9 m takhöjd (halvcirkulärt tak). Tunneln lutar 3.2 % från söder till norr. När branden som varierade kraftigt med tiden startade blåste den med 0.8 m/s från norr till söder.
- Scenario 3. Atrium, 30 m (L) x 24 m (B) × 26.3 m (H) med en konstant brand med en yra av 3.24$m^2$ (c:a 1.3 MW) på golvet och små öppningar längst ner vid golvet.
- Scenario 4.1 och 2 Affärslokal 18 m (L) x 7.5 m (B) x 2.4 m (H) med en 0.25$m^2$ växande brand på golvet 2 m från kortväggen, 2.5 m från långväggen i 4.1 och vid ena kortväggen, 2.5 m från långväggen i 4.2. I lokalen fanns 5 st. "hyllor", 0.2 m x 4 m x 1.8 m utplacerade i lokalen i 4.1 och 6 st. i 4.2. I lokalen fanns två små öppningar placerade lågt på kortsidorna. Lokalen representerar en affärslokal i skala 1:2.
- Scenario 5. Rum-korridor-rum, efterliknande förhållande i kontor och avdelningar på sjukhus och vårdhem. Spridning från 0.09 m2 $m^2$ konstant brand i ett rum till angränsande rum och korridor.

De största problemen med validering av CFD-koder är bristen på väldokumenterade experiment. Visserligen finns många genomförda experiment med brandgasspridning men dessa kan i många fall inte användas eftersom det saknas information om viktiga förutsättningar. Det är mycket sällsynt att det finns uppgift om repeter- och reproducerbarhet för storskaliga brandtekniska experiment. Mycket kraft har därför lagts i projektet för att studera och bedöma kvaliteten på internationellt publicerade experiment. Efter en omfattande diskussion valdes de fem scenarierna ovan ut. Scenario 1A, 1B1, 1B2 var mycket väldokumenterade försök tidigare utförda vid SP i Borås som beskriver brandgasventilation och takstrålar. För dessa försök finns även uppgift om repeterbarhet. Scenario 2, Ref 1, är ett av de scenarier som utförts vid tunnelförsök i Boston, USA. Scenario 3, Ref 2, är ett försök med brandgasspridning i ett atrium som utförts i Japan. Avsaknaden av väldokumenterade försök i varuhusliknande miljö medförde att en experimentell försöksserie i ½ skala, 4.1 och 4.2, utfördes i projektet vid SP i Borås. Scenario 5, Ref 3, är försök med brandgasspridning mellan rum och korridorer som utförts i Australien.

Beskrivningarna av scenarierna kommer tillsammans med annat material att göras tillgängligt via Internet.

Referenser

1. The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, US Federal Highway Administration
2. Fire Science and Technology, 5 (1985) 41-54
3. Fire Safety Journal, 23 (1994) 413-438

# Summary

A comparison between experimental results from eight fire scenarios and simulations with four CFD codes, CFX, FDS, SMAFS och SOFIE, is included in this report. The scenarios were chosen to represent scenarios frequently occurring at fire safety design based on performance. The following scenarios are included in the study:

- Scenario 1 A. large room, 16 m (L) x 10 m (W) x 5 m (H), with 1 $m^2$ steady fire (approx. 1.1 MW) on the floor and with a 1 $m^2$ vent in the ceiling.
- Scenario 1B1and B2. Corridor, 15 m (L) x 7.5 m (W) x 6 m (H) with 1 $m^2$ transient fire (growing with from 0 to 3 MW in 3 minutes) on the floor. 1B1 has a 2 $m^2$ vent in the ceiling above the fire and 1B2 a 2 $m^2$ in the ceiling in the centre of the corridor t 3 m away from the fire.
- Scenario 2. A tunnel 853 m long, 8.77 m in width and 7.9 m in height (cylindrical ceiling). The tunnel is leaning 3.2 % from south to north. When the transient fire was started a wind was blowing with a speed of 0.8 m/s from north to south.
- Scenario 3. Atria, 30 m (L) x 24 m (W) × 26.3 m (H) with a 3.24 $m^2$ steady fire (approx. 1.3 MW) on the floor and small openings close to the floor .
- Scenario 4.1and 4.2 Retail premises 18 m (L) x 7.5 m (W) x 2.4 m (H) with a 0.25 $m^2$ growing fire on the floor 2 m from the smaller wall, 2.5 m from the longer wall in 4.1 and at the smaller wall in 4.2. In the room five boxes (0.2 m × 4 m × 1.8 m) simulating shelves were mounted. Two small openings were placed low down on the smaller walls. The scenario represents ½ scale of a retail premises
- Scenario 5. Room-corridor-room, simulation conditions in an office and wards in hospitals and nursing houses. Smoke spread from a 0.09 $m^2$ steady fire in a room to adjacent corridor and room.

The greatest difficulty during validation of CFD-codes is to find well documented relevant experiments. It is true that many large scale experiments including smoke spread have been published but many of them are not described sufficiently and are therefore impossible to use for validation. It is very unusual that data on reproducibility and repeatability is available. After an extensive discussion between the participants in the project five scenarios were chosen. Scenarios 1A, 1B1, 1B2 were well documented experiments (repeatability) with ceiling vents and ceiling jets performed earlier at SP in Borås. Scenario 2, Ref 1, is a tunnel fire taken from an experimental study in Boston, US. Scenario 3, Ref 2, is an atria fire taken from an experimental study in Japan. Lack of well documented fires in retail premises lead us to perform a series of tests in ½ scale, 4.1 and 4.2 at SP in Borås. Scenario 5, Ref 3, is an experimental study from Australia including smoke spread from a fire room to an adjacent corridor and a room.

This appendix together with other publications from the project will be available on Internet.

## References

1. The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, US Federal Highway Administration
2. Fire Science and Technology, 5 (1985) 41-54
3. Fire Safety Journal, 23 (1994) 413-438

This aReport was performed as a part of a project sponsored by Swedish Rescue Services Agency. The project started in 2005 and finished in December.2008. Within the project different codes for smoke spread (CFD) and evacuation have been evaluated. The project is a co-operation between the Faculty ofEngineering at Lund University (LTH), Brandskyddslaget and SP Technical Research Institute of Sweden.

# Kvalitetssäkring av olycks- och skadeförebyggande arbete med brandskydd i byggnader

## *Bakgrund*

I samband med brandteknisk projektering och vid säkerhetsanalyser av existerande verksamheter används idag ofta olika former av datorbaserade program för att förutsäga spridning av brandgaser i olika typer av byggnader. Dessa program används för att beräkna hur lång tid det tar att fylla olika typer av byggnader eller annan anläggning, som tunnlar, fartyg eller liknande med brandgaser så att siktförhållandena försämras och utrymning försvåras.
I dimensioneringsprocessen jämförs sedan denna tid med den tid, som utrymningsprogram beräknar det tar för en eller flera personer att förflytta sig från en plats i byggnaden till en säker plats, vanligen utomhus.
Utvecklingen av brandgasspridningsmodeller påbörjades i början av 1980-talet då några av de första beräkningsprogrammen togs fram. Eftersom datorkapaciteten var låg (med dagens mått mätt) utformades dessa tidiga datorprogram med en mycket förenklad beskrivning av de fysikaliska fenomenen. Man delade i de s.k. zonmodellerna upp gaserna i två homogena lager, ett varmt övre lager och ett kallt undre lager. Utbytet mellan lagren beskrevs av en s.k. plymmodell.
Allteftersom datorers kapacitet förbättrades ökade också möjligheten att dela upp rummet i fler kontrollvolymer och använda mer avancerade fysikaliska modeller. Dessa nya typer av modeller, s.k. CFD-modeller (**C**omputational **F**luid **D**ynamics) utvecklads i början av 1990 talet och härrör från modeller som utvecklades för kontrollerad förbränning i motorer, gasturbiner etc. Det finns nu flera typer av modeller, kommersiella som ofta har ett brett användningsområde, t.ex. CFX, FLUENT, PHOENIX, och de som är speciellt utvecklade för att beskriva brand t.ex. SOFIE, SMAFS, FDS.
De flesta modellerna var eller är fortfarande tidsmedelvärdesbildande av typen RANS (**R**eynold **A**verage **N**avier-**S**tokes), som SOFIE och CFX. På senare år har en annan typ av modeller LES (**L**arge **E**ddy **S**imulation) utvecklats som simulerar de stora virvlarna och beräknar medelvärdet för de små. LES kräver stor datakraft om man vill simulera små virvlar. Exempel på denna typ av koder är FDS (**F**ire **D**ynamic **S**imulator) utvecklad vid NIST i USA och SMAFS (**S**moke **M**ovement **A**nd **F**lame **S**pread) utvecklad vid LTH. SMAFS finns även som i en RANS variant.

När ett CFD program ska användas för att uppskatta en realistisk tid då siktnedsättningen blir så stor att utrymning försvåras i olika delar av byggnaden, då detektorer aktiveras, då sprinkler aktiveras, då brandgasernas toxicitet når farliga gränser mm. genomförs beräkningar som bygger på en rad antaganden om:

- brandens storlek och brandgasernas sammansättning,
- lokalens geometri och väggar, golv och taks termiska egenskaper
- yttre förhållande som vind och temperatur
- fysikaliska modeller för turbulens och värmeöverföring
- numeriska modeller som löser kopplade partiella differentialekvationer

CFD koderna är olika uppbyggda och vanligen har man som operatör flera olika submodeller att välja mellan. Ett simuleringsresultat är därför inte enbart beroende av vilken kod man använder utan även operatörens erfarenhet kan ha stor betydelse. En simulerings validitet är därför betydelsefull då trovärdigheten i de beräknade resultaten ska bedömas. Med validitet avses i detta fall ett mått på hur väl CFD programmet förutspår det som det är avsett att modellera. En förutsättning för validitet är reliabilitet, d v s programmets precision. Med detta menas att CFD programmet ska generera likartade resultat vid upprepade identiska beräkningar. För dagens, i huvudsak, deterministiska CFD program är dock inte reliabiliteten ett problem, varför det enbart är relevant att diskutera validitet. Det finns inget slumpmässigt inslag i CFD programmen och variationerna förorsakas av operatörens val av indata och submodeller.
Det som kan uppfattas som bekymmersamt är att det inte genomförts några mer omfattande studier i syfte att validera CFD program. De flesta studier avser endast en kod som jämförs med befintliga experimentella data. Operatören har då oftast möjlighet att jämföra simuleringarna med befintliga data

och att justera simuleringen med nya indata som bättre beskriver experimentella mätningar. Vid en brandteknisk dimensionering av det skadeförebyggande brandskyddet med hjälp av CFD modeller har man inte tillgång till experimentella data för objektet. Hur vet en brandprojektör att det använda programmet ger en realistisk representation av det undersökta scenariot och hur bra är denna representation? Ett av de mer påtagliga problemen i samband med att validering av CFD program ska göras är som påpekats att det inte finns väldokumenterade försök att jämföra beräkningar med. De försök som finns publicerade i olika tidskrifter är vanligen inte tillräckligt väl beskrivna eller liknar inte det aktuella scenariet för att kunna tjäna som underlag för validering.
Det är alltså också väsentligt att finna metoder för att dokumentera försök som genomförs på ett välstrukturerat sätt så att möjligheten till jämförande beräkningar kan göras.

*Syfte*
Arbetet genomförs för att beskriva den skillnad som kan finnas mellan beräknade fyllnadsförlopp för brandgaser i olika typer av byggnader och konstruktioner och uppmätta fyllnadsförlopp från en motsvarande verklig situation. Förenklat kan sägas att syftet är att försöka ge en bild av hur bra CFD programmen är att beskriva en given situation genom att jämföra beräkning med experiment. Ett annat syfte är att öka kunskapen om olika modellers begränsningar och orsaker till dessa för att på sikt bidra till att förbättrade CFD program ska kunna utvecklas.

*Mål*
Målet med studien är att ta fram kunskap om hur väl de vanligaste CFD programmen kan modellera brandgasfyllnad i olika byggnader och konstruktioner, dvs. att validera programmen. Valideringen avgränsas således till att endast programmens förmåga att hantera brandgasspridning. Vidare är målet att den nya kunskapen ska kunna höja medvetenheten bland programanvändare genom att dessa förses med information bra experiment som är användbara för validering om typiska fel som kan förväntas vid utrymningsberäkningar.

*Metod*
Arbetet har inriktats mot att jämföra beräknad brandgasfyllnad som funktion av tid med motsvarande brandgasfyllnad från försök, för att på det viset få en uppfattning om programmens förmåga att beskriva försöksförhållandena.
I projektet genomfördes en litteraturgenomgång för att identifiera väldokumenterade experiment med brandgasfyllnad i olika typer av byggnader och konstruktioner som kunde användas som underlag för valideringen. Vid genomgången valdes följande fem scenarier ut, 1A, 1B, 2, 3 och 5. För dessa bedömdes kvaliteten i experimentella data vara tillräcklig för att ingå i studien. Ett scenarium som representerade en vanlig affär saknades och därför utfördes som en del av projektet ett experiment i skala 1:2 vid SP i Borås med en typisk affärs scenarium, scenarium 4. Följande scenarier ingick i studien:

**Scenarium 1 - A Stort rum.** Brandgasventilation installeras i många stora lokaler. Det är viktigt att känna till hur snabbt brandgaser sprider sig i lokaler och hur de påverkas av brandgasluckor. I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad i rummets ena ände och brandgasluckan i rummets andra ände.

**Scenarium 1B – Stor korridor.** Brandgasventilation installeras i många stora lokaler. Det är det viktigt att känna till hur snabbt brandgaser sprider sig i lokaler och hur de påverkas av brandgasluckor. I det valda scenariet är branden, som växer kvadratiskt med tiden, placerad i mitten av en korridor. Två olika placeringar av rökgasluckan studerades, dels mitt över branden och dels 3 m från branden. Brandgaserna har då tre alternativa utbredningsvägar, genom luckan eller genom korridorens båda öppningar mot en stor lokal.

**Scenarium 2 Tunnel.** Vid dimensionering av tunnlar eller långa korridorer, utrymmen som har mycket stor längd i förhållande till bredd och höjd, används CFD för att beräkna hur snabbt brandgaserna fyller rummet för att avgöra hur snabbt lokalen måste utrymmas i händelse av brand. Hur CFD-modeller beräknar luftinträngning i takstrålar, inverkan av fläktar och yttre vindtryck,

tunnelns lutning mm. är av avgörande betydelse för hur väl simuleringar representerar verkligheten. Det är sällsynt att man kan göra storskaliga försök för att verifiera brandgasfyllnad i befintliga eller planerade tunnlar.I det valda scenariet är branden, som har en effektutveckling som varierar med tiden, placerad c:a. 238 in i en 853 m långa tunneln.

**Scenarum 3 Atrium.** Vid dimensionering av utrymning av ett atrium eller lokaler med stor takhöjd används ofta CFD för att beräkna hur snabbt brandgaserna fyller rummet för att avgöra hur snabbt lokalen måste utrymmas i händelse av brand. Hur CFD-modeller beräknar luftinträngning i flammor och brandplym är av avgörande betydelse för hur väl simuleringar representerar verkligheten. Det är sällsynt att man kan göra storskaliga försök för att verifiera brandgasfyllnad i befintliga eller planerade lokaler. I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad mitt i lokalen och har stort avstånd till väggar och tak dvs. scenariet initialskede beskriver nästan en fri brandplym.

**Scenarium 4 – Affärslokal.** Affärer har ofta golven fyllda med olika typer av varor och hyllor med olika höjder. Entredörrarna är oftast stängda. Branden har vid en del inträffade bränder spridit sig snabbt och vanligtvis inte begränsats då sprinklersystem inte är så vanligt förekommande i denna typ av lokaler. Branden kan i vissa fall även bli underventilerad och börja producera stora mängder giftiga och siktnedsättande brandgaser. I det valda scenariet har branden tillåtits växa snabbt och ventilationen i lokalen har varit mycket begränsad. Det är känt att förbränningsmodellerna i de flesta CFD-koderna är utvecklade för att beskriva välventilerade bränder. Det råder därför stor osäkerhet om hur pass väl de simulerar underventilerade bränder.

**Scenarium 5 Korridor rum.** Vid dimensionering av utrymning av kontor och avdelningar på sjukhus och vårdhem där patienterna även kan vara sängliggande och bundna till viss apparatur är det viktigt att känna till hur snabbt brandgaserna sprider sig från rum till korridor och andra rum. Det valda scenariet representerar en typisk byggnadsdel i kontor, sjukhus, vårdhem eller fängelse som har en lång korridor med angränsande rum och normal takhöjd. I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad mitt i ett rum. Brandgaserna sprids från brandrummet till angränsande korridorer och rum.

För valideringsstudien valdes fyra CFD koder ut som används av svenska brandkonsulter och där det finns erfarna operatörer i Sverige att tillgå. Koderna som ingår i studien är:

- CFX version 4.4, en kommersiell kod som även har en internationell stor spridning.
- FDS version 4.07 som är fritt tillgänglig och som används av de flesta brandkonsulter som arbetar med CFD.
- SMAFS version 5.01 som utvecklats vid LTH
- SOFIE version 3.0 som utvecklats och ägs av ett europeiskt forskningskonglomerat från England (Cranfield som huvudutvecklare, FRS m.fl.), Sverige (LTH, SP), Frankrike och Finland (VTT).

Vid simuleringarna fick operatörerna tillgång till en gemensam objektbeskrivning, Appendix 1 till denna rapport, för att man i görligaste mån skulle undvika missuppfattningar om indata till modellerna. Operatörerna fick inte tillgång till de experimentella resultaten utan jämförelsen mellan experiment och simuleringar och publicering av experimentella resultat gjordes efter det att simuleringarna lämnats in till projektledaren. Avsikten var att efterlikna de förhållanden under vilka brandkonsulter arbetar. Resultaten från simuleringarna är därför beroende båda av den valda CFD koden och av operatörens val av indata och hantering av simuleringen.

***Avgränsningar***

Den mest uppenbara avgränsningen i arbetet är det avsåg att kvalitetsgranska de simuleringsprogram som används av svenska brandkonsulter och myndigheter och inte att utveckla koderna. Vidare avsågs endast studier av brandgasfyllnad i lokaler och konstruktioner, information som behövs för att man skall kunna bedöma hur möjligheten till utrymning påverkas av den siktnedsättning som brandgaserna

genererar. CFD koderna förmåga att simulera andra intressanta fenomen som branddetektion, aktivering av sprinkler, strålningsverkan på komponenter och konstruktioner, brandspridning mm. har inte ingått i studien.

***Resultat och rekommendationer***

Resultaten av jämförelsen mellan experiment och simuleringar för scenarierna 1-5 presenterade nedan visade på ofullkomligheter såväl avseende tillgången till väldefinierade experimentella scenarier och mätresultat som samstämmighet mellan experiment med simuleringar med olika koder. Detaljerade genomgångar av experiment och simuleringar för de olika scenarierna finns beskrivna på sidorna hänvisas 1-210 i denna rapport. När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor.

Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har stor betydelse är osäkerheten i avbrinningshastighet (effektutveckling) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

Simuleringarna är även behäftade flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m.) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. *Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafil dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.*

För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet och ytterligare fördubblats utanför brandrummet. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

Detaljerade utvärderingar av experimenten visade att det finns mycket liten tillgång till storskaliga experiment där onoggrannheten i experimentella data kvantifierats. Detta har förorsakade av:

- Information om repeterbarhet från experimenten saknas. Alla experimenten har endast utförts vid ett laboratorium. Jämförande provningar utförda vid olika laboratorier med likartad utrustning är vanlig för småskaliga brandprovningsmetoder. Jämförande provning ger information om närvaron av systematiska fel.
- Information om reproducerbarhet från scenario 2, 3 och 5 saknas. De flesta fullskaliga experiment utförs av kostnadsskäl enbart en gång. För scenario 1A, 1B och 4 utförda vid SP i Borås har försöken upprepas två till tre gånger. Upprepade försök ger information om hur pass väl man lyckas återupprepa det önskade scenariet.
- Temperaturmätningar med termoelement visar endast termoelementets temperatur som påverkas av den omgivande miljön. I många publikationer saknas information om termoelementens tjocklek och den korrektion som behövs för att beräkna gasens temperatur (strålningskorrektion). För scenario 1A, 1B och 4 finns viss information om strålningskorrektionen. Om man inte tar hänsyn till strålningskorrektionen underskattar termoelementtemperaturen vanligtvis gastemperaturen i varma gaslager och överskattar gastemperaturen i kalla gaslager. För vissa placeringar av termoelement nära flammor kan korrektionen vara avsevärd.
- Hastighetsmätningar utförs vanligen med s.k. "bi-directional" pitotrör. Denna typ av hastighetsmätare är utvecklad för att mäta strömning i rör där man har en helt dominerande strömningsriktning. Mätarna har ett kraftigt vinkelberoende som avsevärt avviker från den som ett normalt pitotrör har och som mäter hastighetskomposanten parallellt med pitotrörets längdriktning. Onoggrannheten i hastighetsmätningarna i scenario 1 och 3-5 har varit så stora att inte bedömts meningsfulla att jämföra experimentella data med simuleringar. Jämförelse med hastighetsmätning görs enbart i scenario 2 som är en lång tunnel med en dominerande strömningsriktning i tunnelns längdriktning.
- Mätningar av effektutveckling (tillförsel av bränsle) har stor inverkan på den uppmätta temperaturen. I många scenarier varierar temperaturökningen med effekten upphöjt till 2/3. En osäkerhet i effektutvecklingen på t.ex. 30 % motsvarar en osäkerhet i temperaturökningen med cirka 20%. Gasformigt bränsle som propan är lättare att kontrollera än vätskeformigt som metanol, heptan och röd diesel som även avvändes i de studerade scenarierna.
- I lokaler med små ventilationsöppningar och stora bränder är det mycket viktigt att gas inte läcker genom tak och väggar på andra ställen än genom ventilationsöppningarna.

Detaljerade utvärderingar av jämförelserna mellanexperimenten och simuleringarna visade:

- Simuleringarna måste vara repeterbara. De skall kunna utföras av en annan operatör på en annan dator och ge samma resultat. Detta kräver att underlag om kodens versionsnummer, gridnät, materialegenskaper, val av submodeller och initial- och randvillkor dokumenteras. För RANS-koder måste även information om hur operatören hanterat kodens konvergensvillkor dokumenteras.
- Avvikelsen mellan simuleringar och experiment beror både av typ av kod och av operatörens handhavande av koden (operatörsberoende). Man kan vanligtvis inte hänföra avvikelsen till typ av kod eller operatörshandhavande. Avvikelsen är en kombination av båda. Då CFD program är mycket komplicerade krävs goda kunskaper av operatören om kodens submodellers begränsningar och handhavande.
- Samtliga koder gav avvikelser inom cirka 20-30 % från experiment 1A, 3, 4, 5 som till största delen är att hänföra typ av kod. Val av indata av operatören gav i vissa fall större avvikelse.

- Två av koderna, CFX och SOFIE överskattade avsevärt brandgasventilationen genom en lucka placerad rakt över branden i Scenario 1.B.1. Simuleringen med CFX tyder på att luftinträngningen i brandplymen är för liten i förhållande till experimenten och att lutningen av flamman orsakad av brandinducerade flöden inte finns med i simuleringen. För simuleringen med SOFIE är avvikelsen något mindre. SOFIE simulerar lutning av flamman men ger dock för liten luftinträngning i brandplymen. Avvikelserna för koderna minskar då luckan placeras längre bort från branden, Scenario 1.B.2.
- Simuleringar av tunnelbranden, scenario 2, visade sig vara svår för samtliga koder. För koderna CFX och SOFIE var strömningsbilden som simulerades på större avstånd från branden helt felaktig. Takstrålen som lutar mot den lägre tunnelmynnigen (sydsidan) simulerades alltför kort. Även avståndet där gaser strömmar in mot branden nära tunnelns golv från tunnelns nordsida simulerades alltför kort. Det är känt att vissa RANS koder simulerar för lite luftinsugning i brandplymen och för mycket luftinsugning i takstrålen. SMAFS simulerade strömningsbilden bättre men gav en alltför snabb avkylning av brandgaserna norr om branden. Simuleringarna med koden FDS misslyckades av flera skäl. Flera försök att simulera initialvillkoret med en medelhastighet på 0.8 m med hjälp av en fläkt placerad på olika avstånd utanför tunnelmynningen misslyckades trots att de krävde mycket datakraft. Det gridnät som skulle behövas för att uppnå önskad upplösning för scenariet uppskattades till 5-8 miljoner noder. Det saknas möjlighet att ha ett tillräckligt stort RAM minne i en 32 bitars en-process dator för att man skall kunna simulera så stora gridnät. Det bör vara möjligt att simulera scenariet med version 5 av FDS som nu finns tillgänglig. Version 5 av FDS gjordes tillgänglig under 2007 dvs. långt efter det att tunnelscenariet skulle simuleras. I FDS 5 kan man ha olika initialtryck utanför tunnelns öppningar och koden finns i exekverbar version för 32 och 64 bitars datorer med flera processorer.
- Det är svårt för vissa koder att simulera strålningsförlusterna från branden på ett bra sätt om man inte använder mycker små gridnät och avancerade sotbildnings och strålningsmodeller. I simuleringarna med koderna CFX och FDS valdes metoden att ange en uppskattad strålningsförlust varierande med bränsle från 10-35 %. Motsvarande höga strålningsförluster får man t.ex. inte med koden SOFIE om man försöker simulera strålningsförlusterna mer vetenskapligt. Detta medför vanligtvis att strålningen med SOFIE underskattas och den konvektiva effekten överskattas vilket leder till för höga temperaturer i brandrummet.
- Vissa scenarier som tunnlar med komplicerad geometri, lutning och extern vindpåverkan kräver mycket större gridnät än de som kan simuleras med en 1 process dator med 32 bitars minne.

# CFD-validering med koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE


| Innehållsförteckning | Sida |
|---|---|
| 1A Scenario 1 A. Stort rum, 16m (L) x 10m (B) x 5m (H), med 1 m2 konstant brand (c:a. 1.1 MW) på golvet och en 1 m2 lucka i taket. | 1 |
| Scenario 1B1och B2. Korridor, 15m (L) x 7.5m (B) x 6m (H) med 1 m2 växande brand (växande kvadratiskt med tiden från 0 till 3 MW på 3 minuter) på golvet. 1B1 har en 2 m2 lucka i taket rakt över branden och 1B2 en 2 m2 lucka i taket i korridorens mitt 3 m från branden. | 21 |
| Scenario 2. Tunnel 853 m lång, 8.77 m bred och med 7.9 m takhöjd (halvcirkulärt tak). Tunneln lutar 3.2 % från söder till norr. När branden som varierade kraftigt med tiden startade blåste den med 0.8 m/s från norr till söder. | 67 |
| Scenario 3. Atrium, 30m (L) x 24m (B) x 26.3m (H) med 3.24m2 konstant brand (c:a 1.3 MW) på golvet och små öppningar längst ner vid golvet | 143 |
| Scenario 4.1-2 Affärslokal 18m (L) x 7.5m (B) x 2.4 (H) med en 0.25m2 växande brand på golvet 2 m från kortväggen, 2.5 m från långväggen i 4.1 och vid ena kortväggen, 2.5 m från långväggeni 4.2. I lokalen fanns 5 st. "hyllor", 0.2m x 4m x 1.8m utplacerade i lokalen i 4.1 och 6 st. i 4.2. I lokalen fanns två små öppningar placerade lågt på kortsidorna. Lokalen representerar en affärslokal i skala 1:2. | 159 |
| Scenario 5. Rum-korridor, efterliknande förhållande i kontor och avdelningar på sjukhus och vårdhem. Spridning från 0.09 $m^2$ konstant brand i ett rum till angränsande rum och korridor. | 197 |

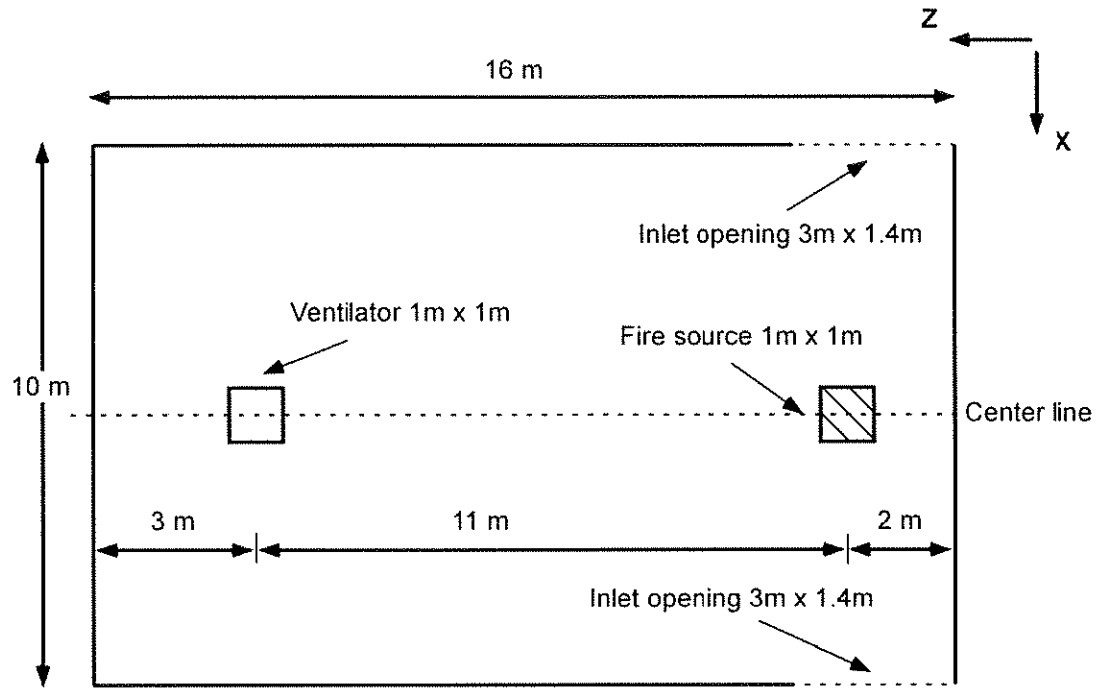
# Scenarium 1 - A Stort rum

## 1. Syfte

Brandgasventilation installeras i många stora lokaler. Det är viktigt att känna till hur snabbt brandgaser sprider sig i lokaler och hur de påverkas av brandgasluckor. I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad i rummets ena ände och brandgasluckan i rummets andra ände.

## 2. Scenarium

Scenariet är hämtat från ett SP-försök [1].

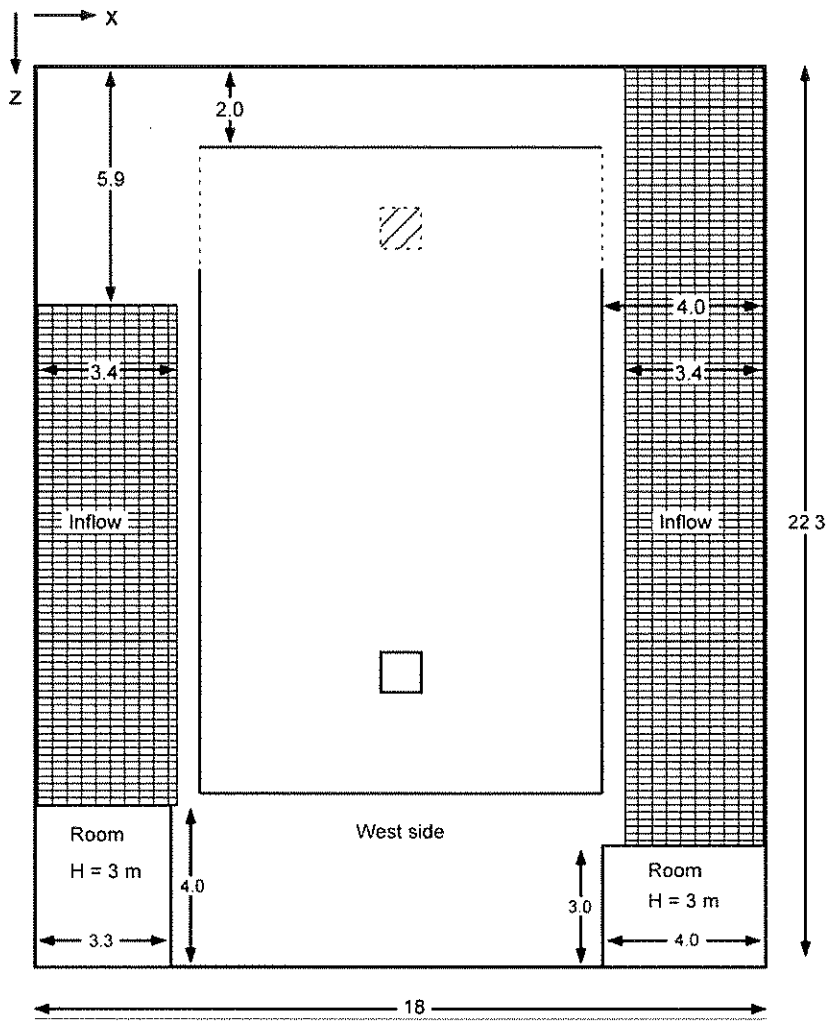



**Figur 1A.1 Försöksrum**

Storleken av försöksrummet visas i Fig.1A.1. Detaljer om rummets utformning ges i Ref.2. Rummet var placerat i SP´s stora brandhall enligt Fig.1A.2. Brandhallen hade två stora aktiva inflöden på golvet och utflöde på hög höjd, 20 meter över golvet. Utflödet var anpassat till inflödet. Inflödet genom golvet hade en hastighet på 0.26 m/s och inflödestemperaturen var 10°C Väggarna och taket i försöksrummet var gjorda av kalciumsilikat skivor. Dessutom fanns ett skikt av 17 mm mineralull monterat på väggen bakom brandkällan. Brandrummet var 5 m högt och hade två öppningar, 3 meter breda och 1.4 m höga, på båda långsidorna nära brandkällan. I taket fanns en 1 $m^2$ lucka som hade en halskrage uppåt från taket på 0.25 m.

**Brandkälla**

Brandkällan bestod av fyra fyrkantiga sandfylld propanbrännare med måtten 0.5x0.5 m som monterats ihop till en 1 $m^2$ brännare. Propanen släpptes ut på 0.45 m höjd. Effekten var konstant 1100 kW och den tilläts brinna i 10 minuter.




**Figur 1A.2 Försöksrummets placering i SP:s brandhall**

# 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

**Repeter- och reproducerbarhet**

Experimentet har utförts två gånger på SP's laboratorium. Det saknas information om experimentets reproducerbarhet.

**Randvillkor**

Detaljer om geometrin och materialdata finns redovisade i Ref.2.

**Initialvillkor**

Detaljerad information om initial temperatur i brandrummet och temperatur i inflödet till SP's brandhall finns att tillgå i Ref.1. I anvisningarna till simuleringarna [2] anges endast 13°C som begynnelsetemperatur i hela lokalen och 10°C som inflödestemperatur från hålen i det yttre golvet. I de experimentella mätningarna [1] varierar begynnelsetemperaturen i brandrummet från 13°C en meter från golvet till 30°C under taket vilket framgår av Fig.1A.3 och 1A.4 nedan. Det finns ingen mätning av initialtemperaturen för väggar och tak i brandrummet.

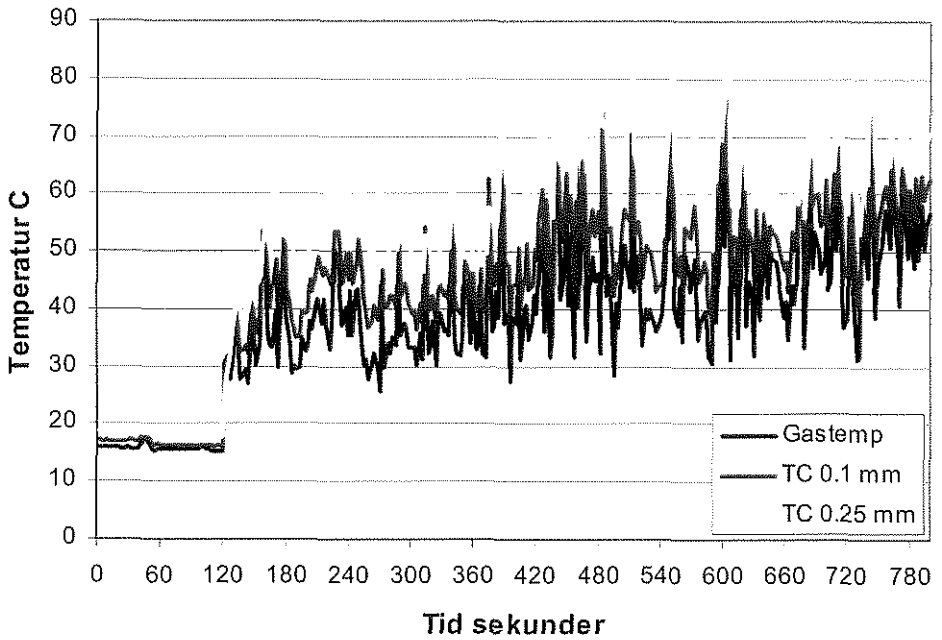
**Brandbeskrivning**

Bränslet var propan med en angiven effektutveckling på 1100 kW. Osäkerheten i effektangivelsen uppges av SP vara mindre än 10 %.

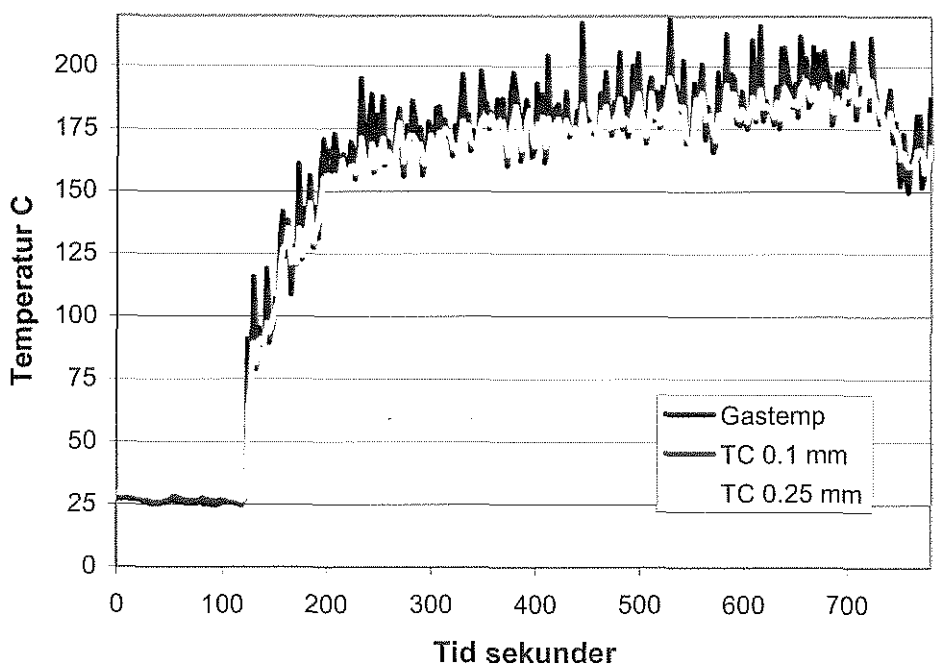
**Mätteknik**

Vid försöken mättes gastemperatur med termoelement placerade på vertikala termoelementträd, under taket och i takluckan. Termoelementen var i alla mätpunkter 0.25 mm tjocka. I två mätpunkter fanns dessutom 0.1 mm tjocka termoelement för att

man skulle kunna uppskatta strålningens inverkan på temperaturmätningarna. Strålningskorrektionen beräknades enligt metod beskriven i Ref.3 och redovisas i Fig.1A.3 och 1A.4. Strålningen medförde att termoelementen (0.25 mm), under de tio minuter branden varade, visade i medeltal 18°C för hög temperatur 2 m över golvet och i medeltal 5°C för låg temperatur i brandgaslagret 15 cm under taket.




Figur 1A.3 Beräknad strålningskorrigerad temperatur (gastemperatur) med utgångspunkt från temperaturmätningarna med TC51(0.1 mm) och TC52(0.25 mm) 2 m över golvet och 2.5 m från branden enligt metod i Ref. 3.




Figur 1A.4 Beräknad strålningskorrigerad temperatur (gastemperatur) med utgångspunkt från temperaturmätningarna med TC51(0.1 mm) och TC52(0.25 mm) 0.15 cm under taket och 2.5 m från branden enligt metod i Ref. 3.

I en del punkter i rummet och i takluckan mättes även gashastigheten med bi-directional pitotrör och termoelement. Bi-directional pitotrör har ett felaktigt vinkelberoende [4] och mäter inte normalkomponenten av hastigheten på rätt sätt när strömningsriktningen är skild från normalriktningen. Tryckskillnaden över pitotrören för gashastigheter under 0.5 m/s är dessutom mindre än 0.15 Pa vilket medför stor osäkerhet i tryckmätningen.

**Sammanfattning avseende mätfel och scenarioosäkerhet**

Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- Att onoggrannheten i mätningarna av effektutveckling med c:a 10% och osäkerheten i strålningskorrektionen motsvarar en osäkerhet i mätningarna av temperaturdifferenserna i övre brandgaslagret med totalt 10%. En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, med 10% motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [5] en osäkerhet i temperaturstegringen på 7 % ($\Delta T$ -- $Q^{2/3}$). Osäkerheten i strålningskorrektionen på 5°C vid temperaturer på 150 till 200°C motsvarar en osäkerhet på c:a 3%.
- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att strålningskorrektionen påverkar den uppmätta temperaturen för termoelementen. I medeltal visar mätningarna av temperaturer på höjden 2 m och 2.5 m från branden en för hög temperatur med 18°C under försöket. I medeltal visar mätningarna av temperaturer i brandgaslagret 0.15 m under taket och 2.5 m från branden en för låg temperatur med 5°C under försöket.
- Att initialtemperatur i rummet varierar mellan 13-30°C.
- Att initialtemperatur i väggar och tak inte är uppmätt. Den borde rimligtvis påverka temperaturförloppet i brandrummet speciellt i början av försöket.
- Att mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel då de inte korrigerats för sitt vinkelberoende.

## 4. Simuleringar

I tabell 1A.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien.

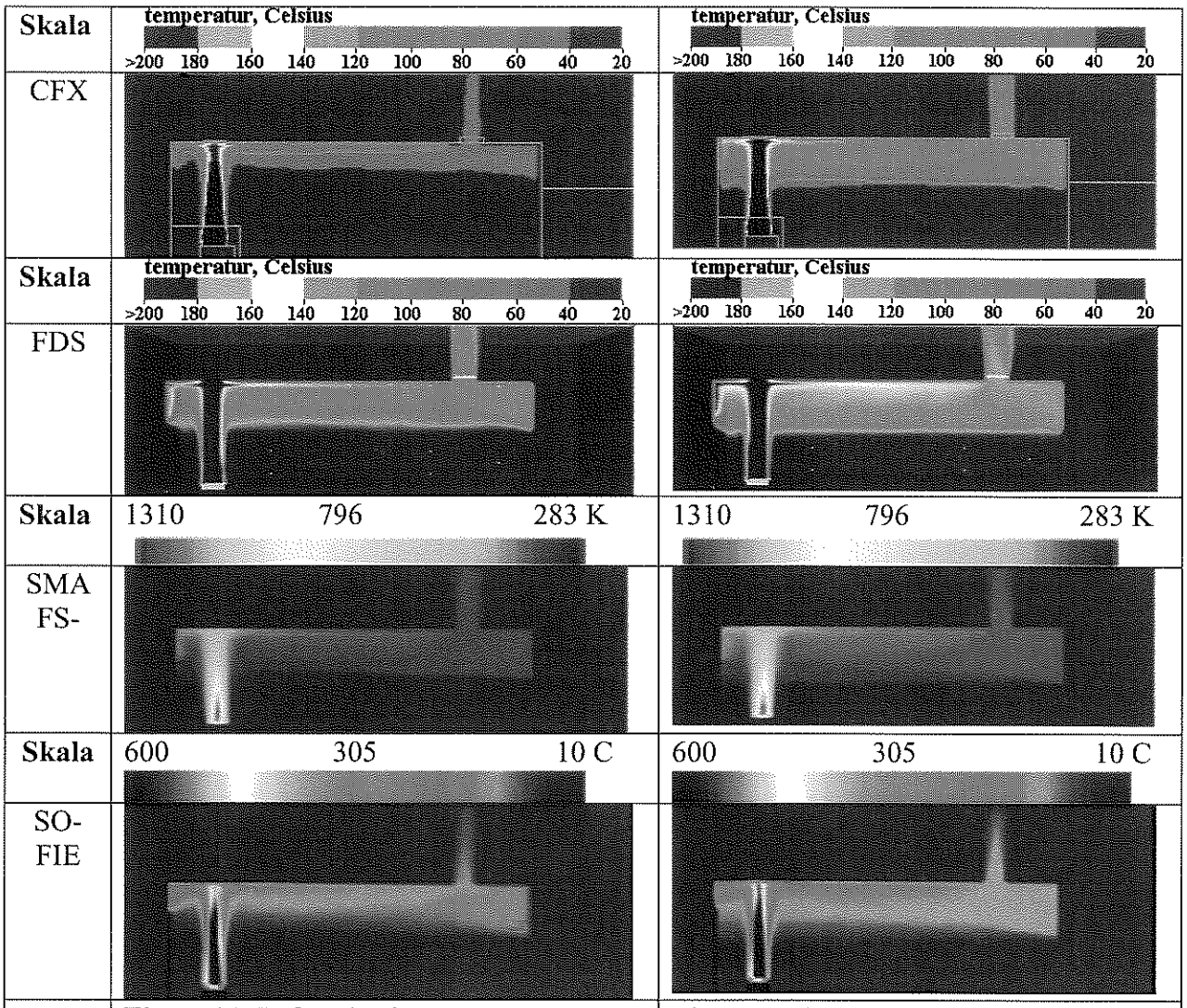
**Tabell 1A.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| **Mjukvara** | **CFX-4.4** | **FDS 4.07** | **SMAFS 5.01*** | **SOFIE 3.0** |
|---|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | | |
| Dator CPU | Intel Pentium4 | Intel Pentium 4 | ADM opteron | Intel Pentium 4 |
| Klockfrekvens GHz | 2? | 3.4 | 2.2 | 3.2 |
| RAM GB | 1 | 2 | | 2 |
| Antal processorer | 1 | 1 | 6 | 1 |
| **Simulering** | | | | |
| Operatör | Bengt. Hägglund | Göran Holmstedt | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| Gridstorlek | 1.013.760 | 1.555.200 | | 261.696* |
| Gridförtätning | Nej | Ja | | Ja |
| Symmetriplan | Nej | Nej | | Nej |
| Tidssteg sek | 1 och 2 | Default | | 1 |
| Beräkningstid timmar | 44. | 115 | 49.2 | 92 |
| Mass tolerans | $10^{-6}$ | Default | $10^{-6}$ | $10^{-3}$ |
| Modellval | | default | | |
| Typ av code | RANS | LES | RANS | RANS |
| | | | | |
| Turbulens | k-ε | Smalgorinsky | k-ε | k-ε |
| Strålning | Ingen | Default | | DTRAM 16 ray |
| Brand | Heat source | Default | | Eddy Break-up |
| Tid att uppnå full effekt, sek | | 1 | | |
| Reduc effekt % | 35 | 30% rad. fraction | ? | ? |
| Sotfraktion | 0.00 | 0.01 | | 0.02 |
| Konvektion | Default | Default | | Default |

* Vid simuleringarna med SOFIE användes ett symmetriplan dvs. den geometriska upplösningen motsvarar 2 x 261.296 =522.592 celler.

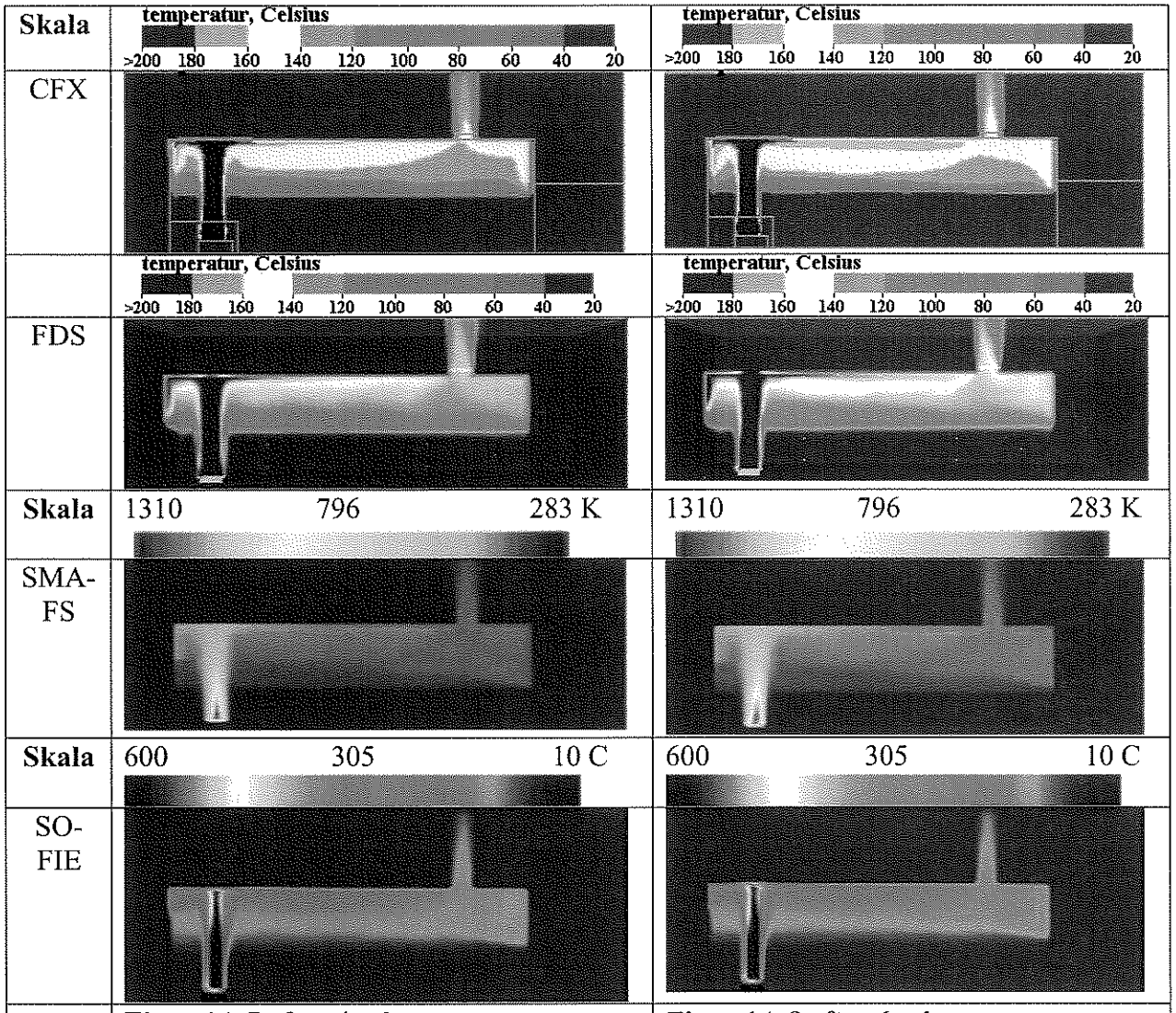
## 5. Översiktlig jämförelse mellan simuleringarna

I Fig.1A.5 – 1A.10 visas den simulerade temperaturfördelningen för samtliga koder i ett vertikalt snitt mitt i rummet 1, 2, 4, 6, 8 och 10 minuter efter det att branden startade. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.



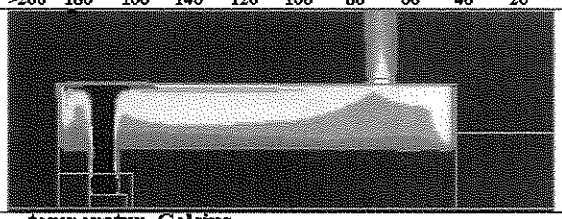
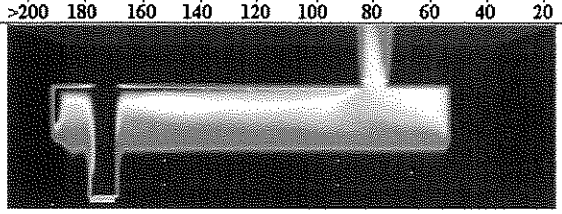
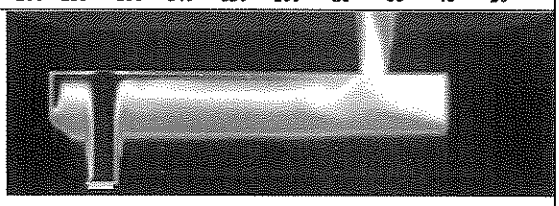
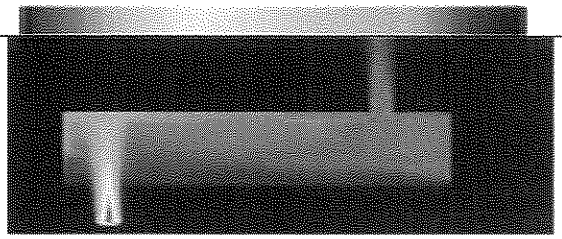
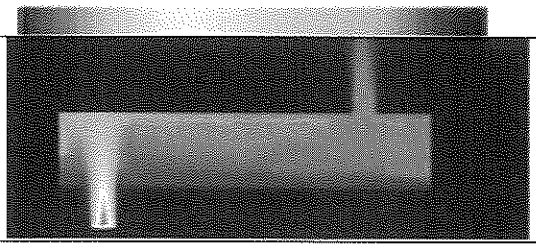
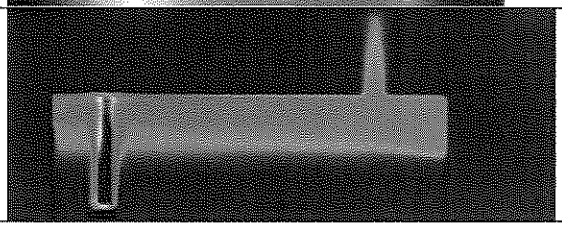
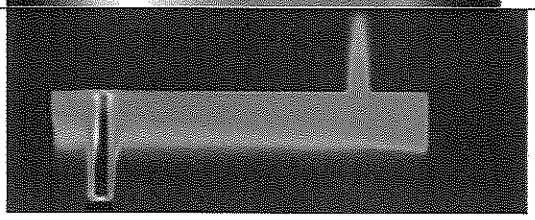

**Figur 1A.5 efter 1 minut**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SMAFS och SOFIE men ligger högre upp för simuleringarna med CFX.

**Figur 1A.6 efter 2 minuter**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SMAFS, SOFIE och CFX.

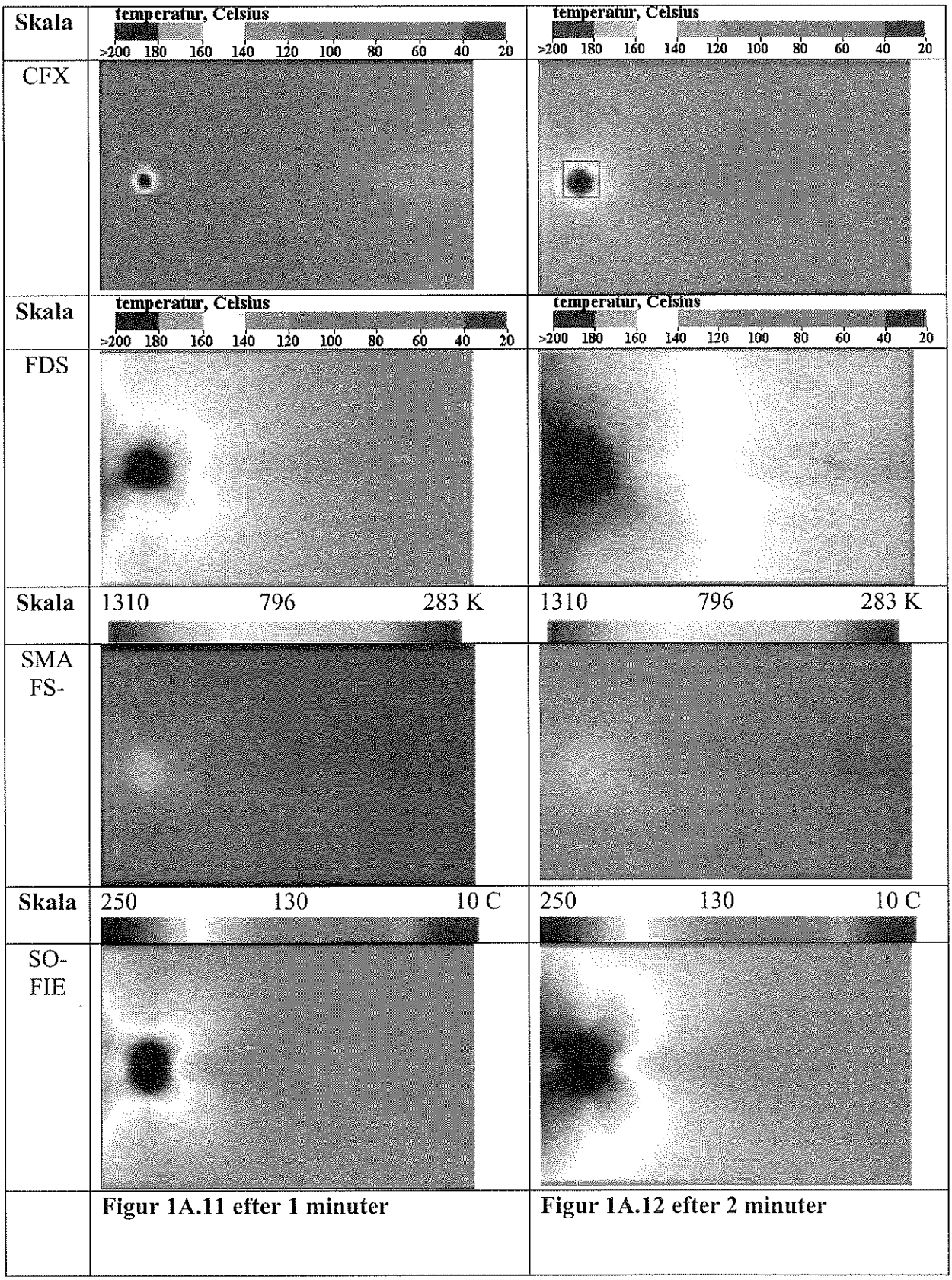



**Figur 1A.7 efter 4 minuter**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SMAFS, SOFIE och CFX.

**Figur 1A.8 efter 6 minuter**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SMAFS, SOFIE och CFX.

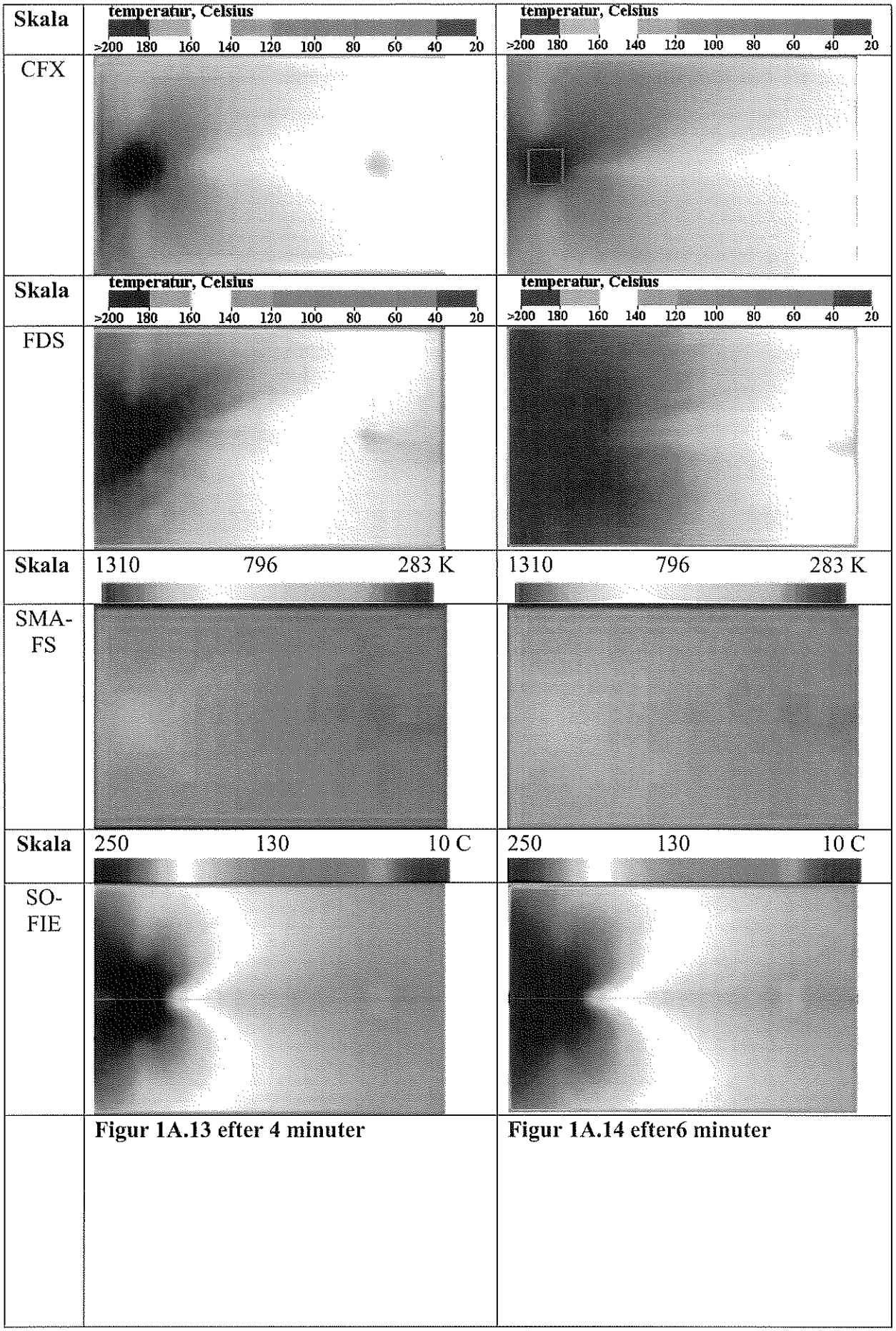
| | | |
|---|---|---|
| | temperatur, Celsius<br>>200 180 160 140 120 100 80 60 40 20 | temperatur, Celsius<br>>200 180 160 140 120 100 80 60 40 20 |
| CFX |  | Simuleringen avslutades efter 8.5 min |
| **Skala** | temperatur, Celsius<br>>200 180 160 140 120 100 80 60 40 20 | temperatur, Celsius<br>>200 180 160 140 120 100 80 60 40 20 |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 1310 796 283 K | 1310 796 283 K |
| SMA-FS |  |  |
| **Skala** | 600 305 10 C | 600 305 10 C |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1A.9 efter 8 minuter**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SOFIE, SMAFSoch CFX. | **Figur 1A.10 efter 10 minuter**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-200°C. Brandgaslagret har sjunkit till ungefär samma nivå för simuleringarna med FDS, SMAFS, SOFIE och CFX. |

I Fig.1A.11 – 1A.16 visas den simulerade temperaturfördelningen för samtliga koder. i ett horisontellt snitt i rummet, 15 cm under taket, 1, 2, 4, 6, 8 och 10 minuter efter det att branden startade. För FDS-koden visas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.



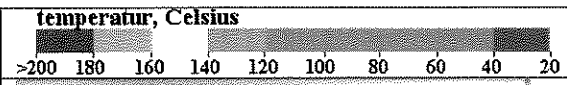
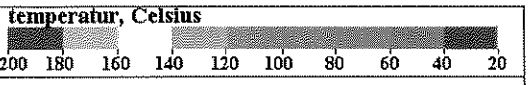
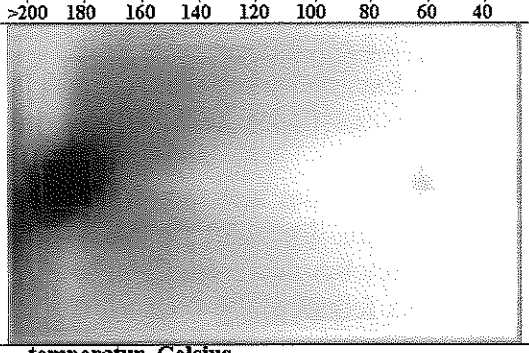
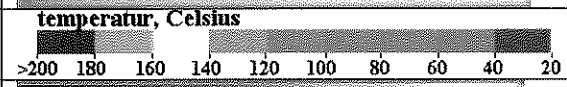
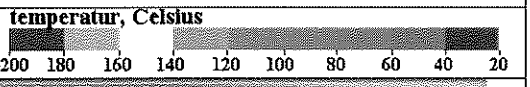
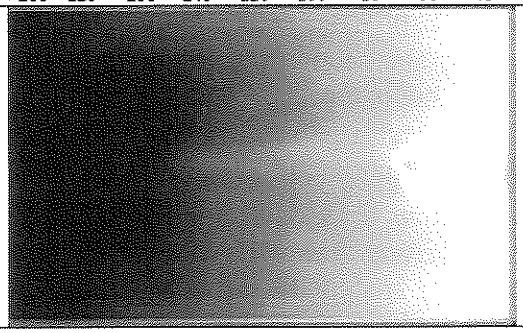
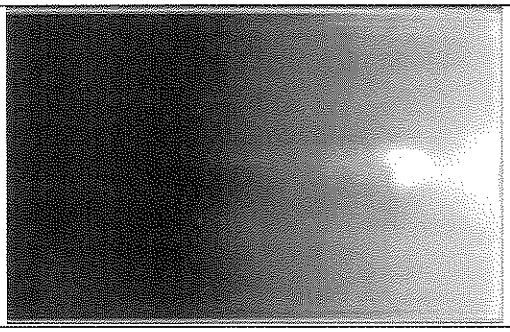
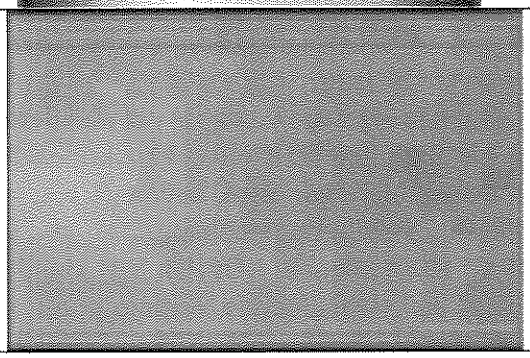
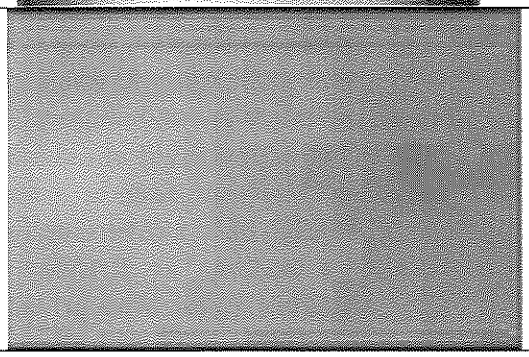
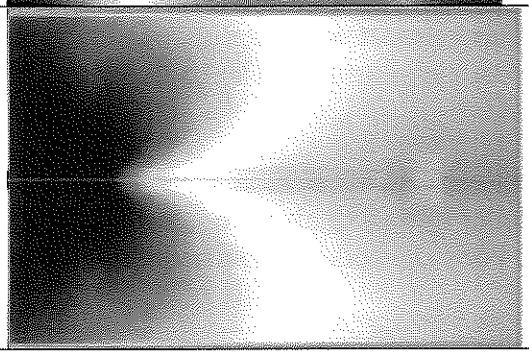
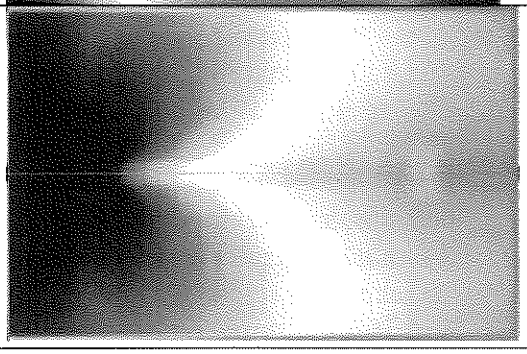

**Figur 1A.11 efter 1 minuter**

**Figur 1A.12 efter 2 minuter**




**Figur 1A.13 efter 4 minuter**

**Figur 1A.14 efter6 minuter**

| | | |
|---|---|---|
| **Skala** |  |  |
| CFX |  | Simuleringen avstannades efter 8.5 minuter |
| **Skala** |  |  |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 1310 796 283 K<br> | 1310 796 283 K<br> |
| SMA-FS |  |  |
| **Skala** | 250 130 10 C<br> | 250 130 10 C<br> |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1A.15efter 8 minuter** | **Figur 1A.16 efter 10 minuter** |

Efter 1 och 2 minuter visar koden CFX lägre temperaturer i taknivå än övriga koder. Skillnaden har utjämnats efter 4 minuter. Alla koder förutom FDS ger en helt eller nästan helt symmetrisk temperaturfördelning.

# 6. Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har störst betydelse är osäkerheten i propangasflödet (effektutvecklingen) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

Simuleringarna är även behäftade med flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska (gridberoende, explicit och implicit modell mm) modeller.
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafilen dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

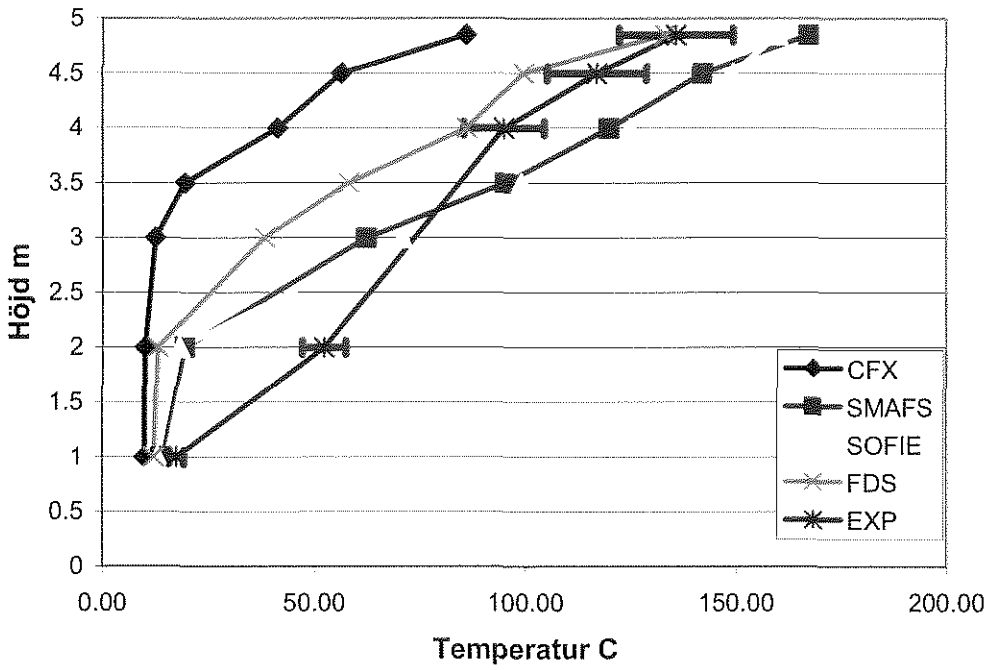
För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX, FDS och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd enligt rekommendationer i en vetenskaplig artikel [6]. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet och ytterligare fördubblats utanför brandrummet. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

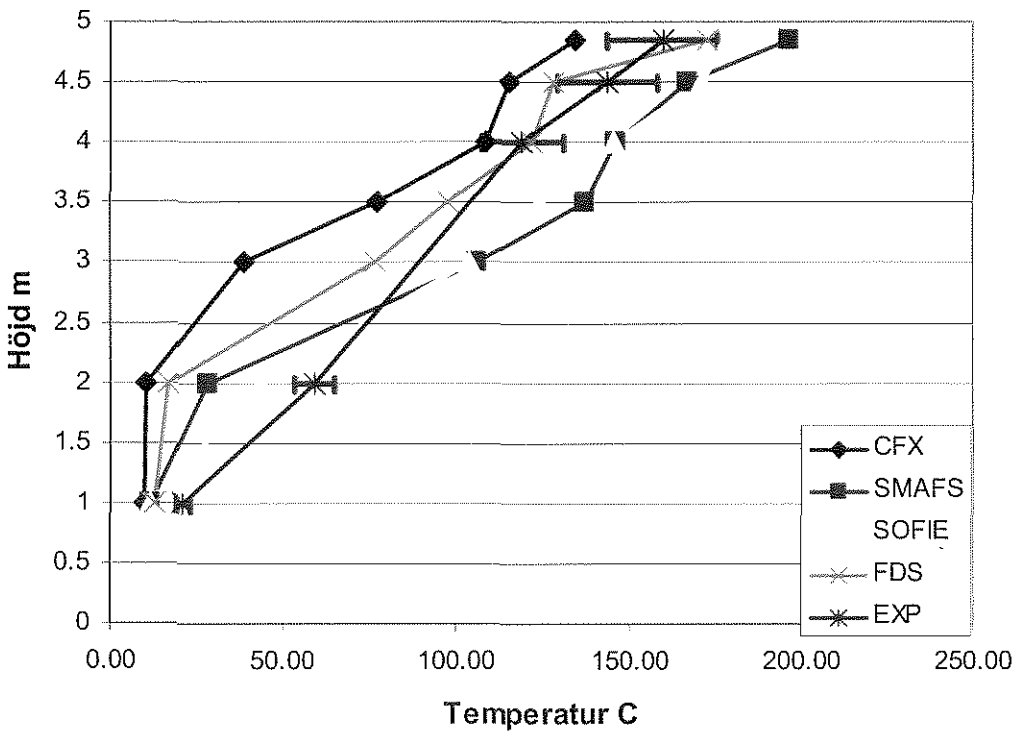
I Fig.1A.17 – 1A.28 visas experimentellt uppmätt temperatur utan strålningskorrektion och simulerad temperatur för samtliga koder i tre vertikala termoelementträd 1, 2, 4, och 8 minuter efter det att branden startade. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.

Vid jämförelserna i figurerna redovisa endast det experimentella mätfelet med 10%. Osäkerheten i simuleringarna på grund av modeller, scenarium och operatör kan inte separeras utan utgör avvikelse från det experimentella värdet.

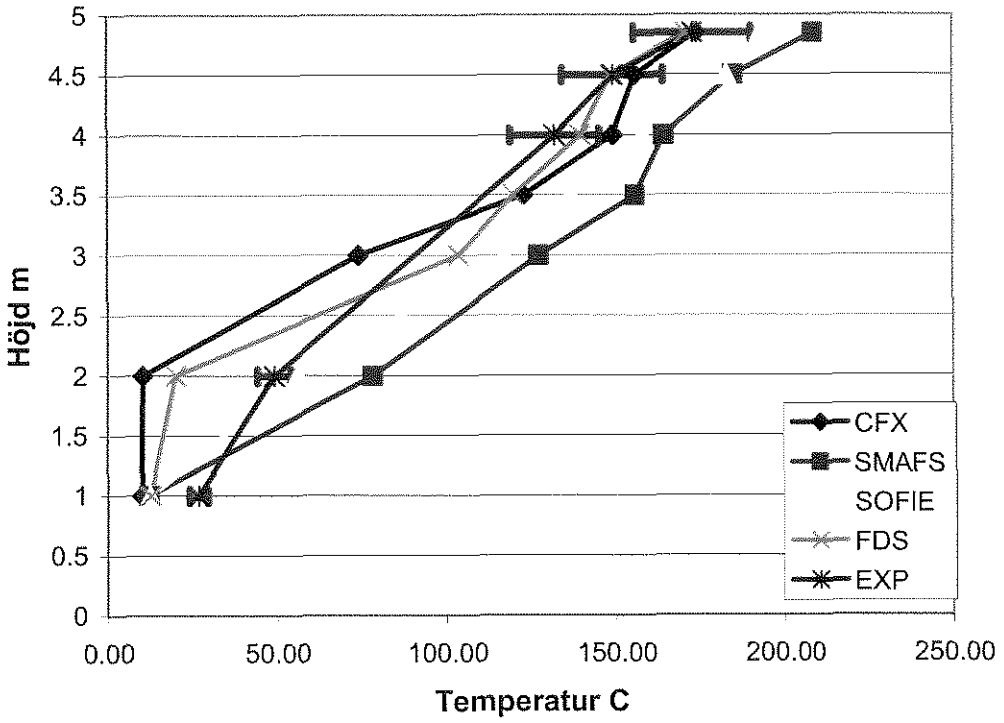
Mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel som är svåra att kvantifiera. Kvantitativa jämförelser mellan experimentellt uppmätta hastigheter och simuleringar görs därför inte i denna rapport.



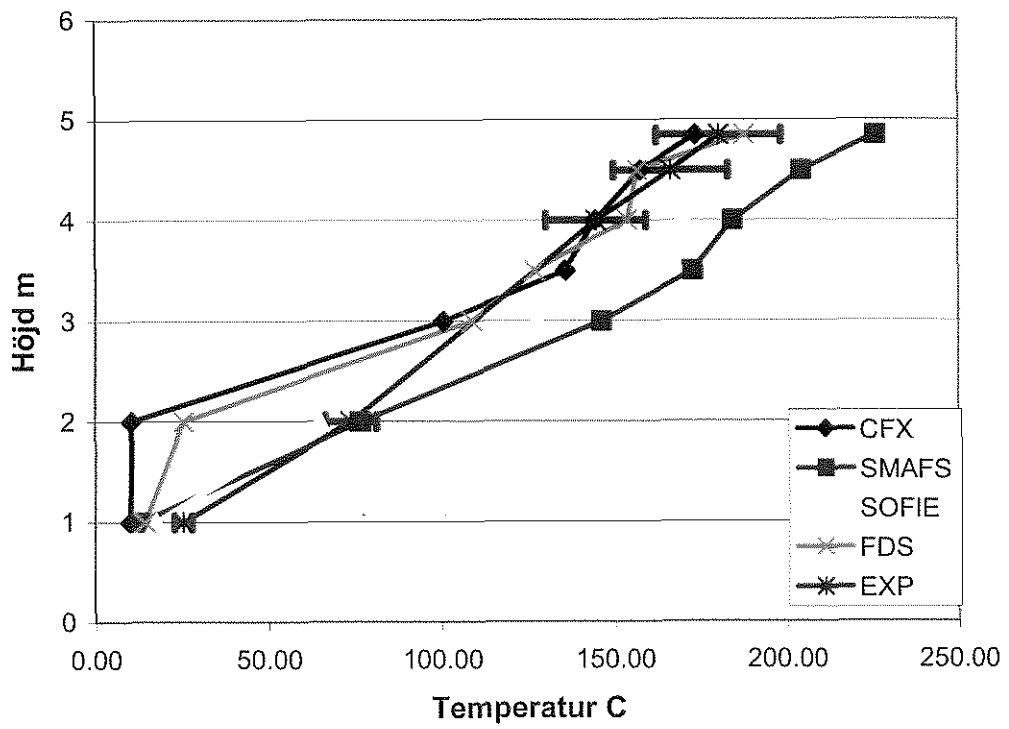

Figur 1A.17 Temperaturen efter 60 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 2.5 m från brandens centrum.



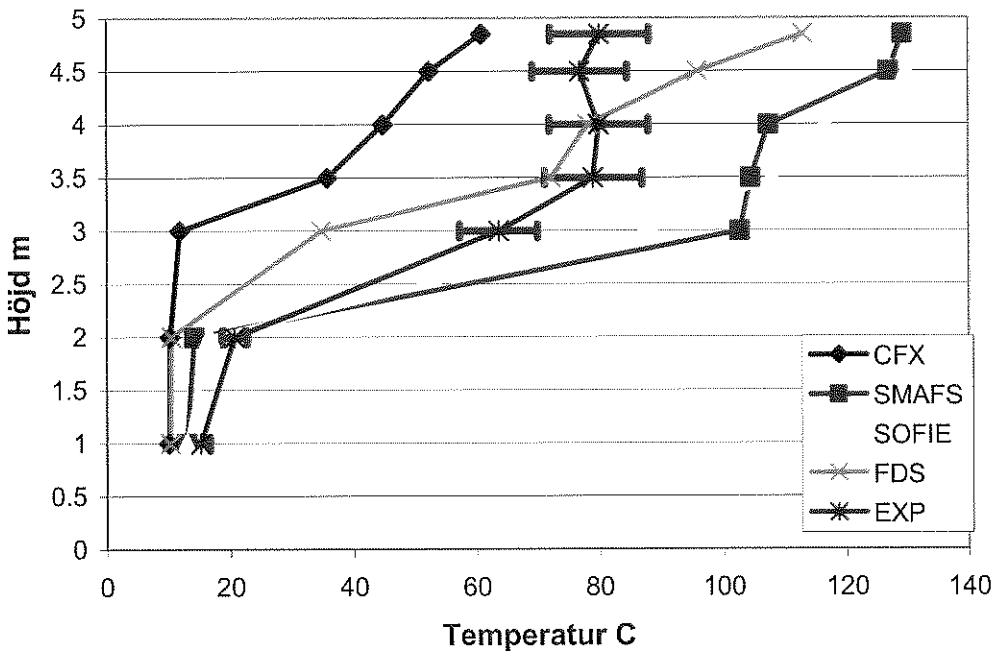

Figur 1A.18 Temperaturen efter 120 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 2.5 m från brandens centrum.



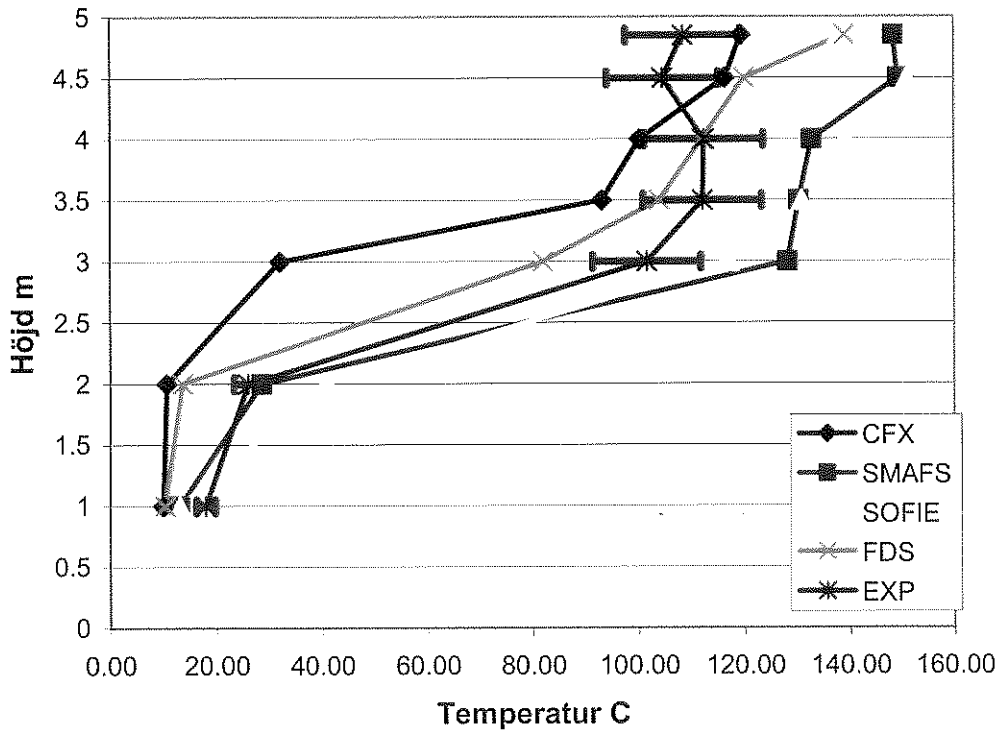

Figur 1A.19 Temperaturen efter 240 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 2.5 m från brandens centrum.



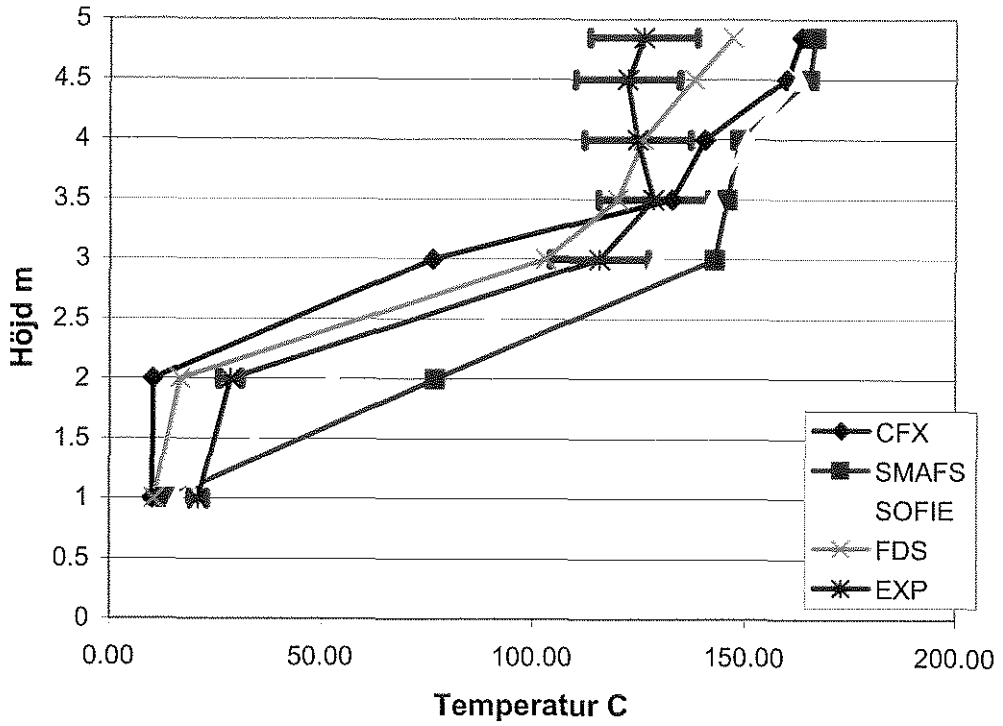

Figur 1A.20 Temperaturen efter 480 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 2.5 m från brandens centrum.



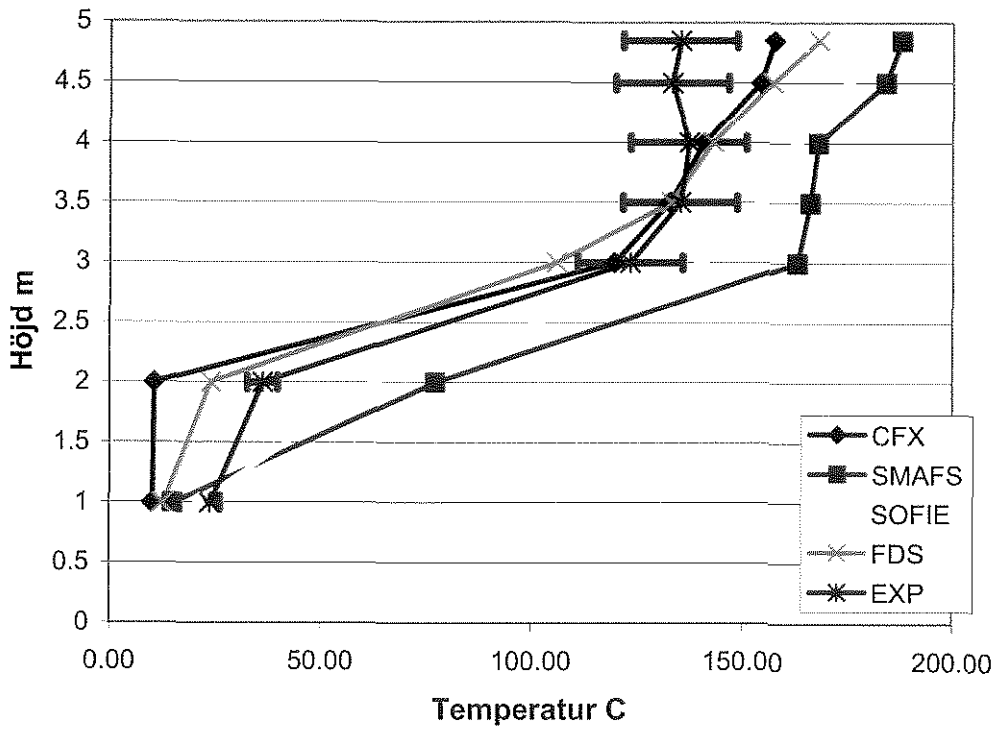

Figur 1A21 Temperaturen efter 60 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 9.5 m från brandens centrum.



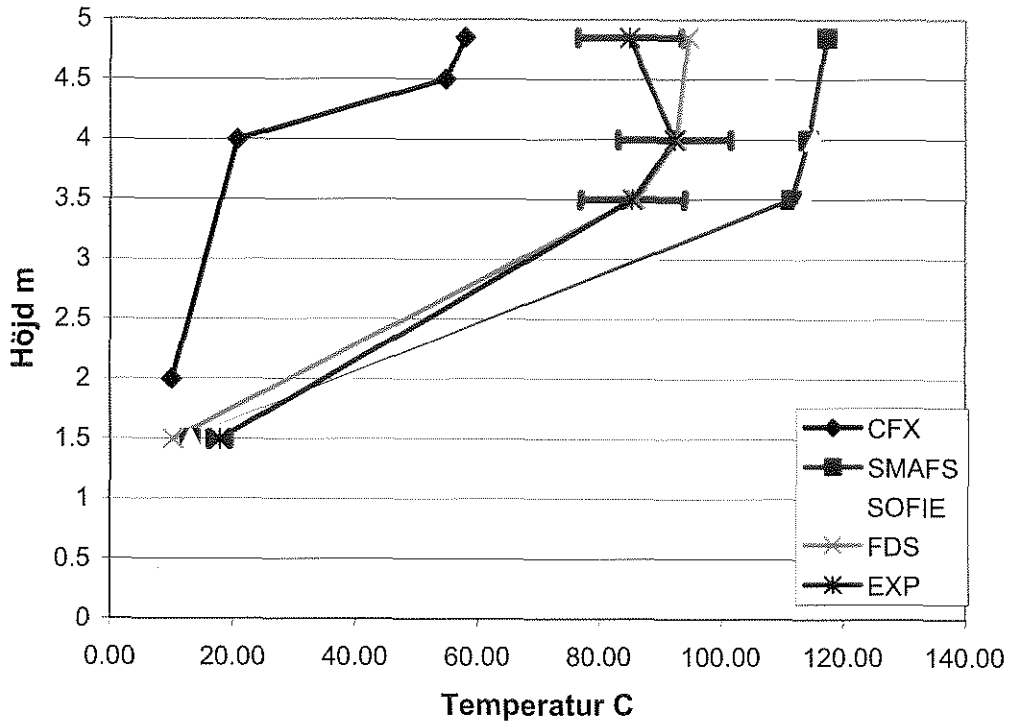

Figur 1A22 Temperaturen efter 120 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 9.5 m från brandens centrum.



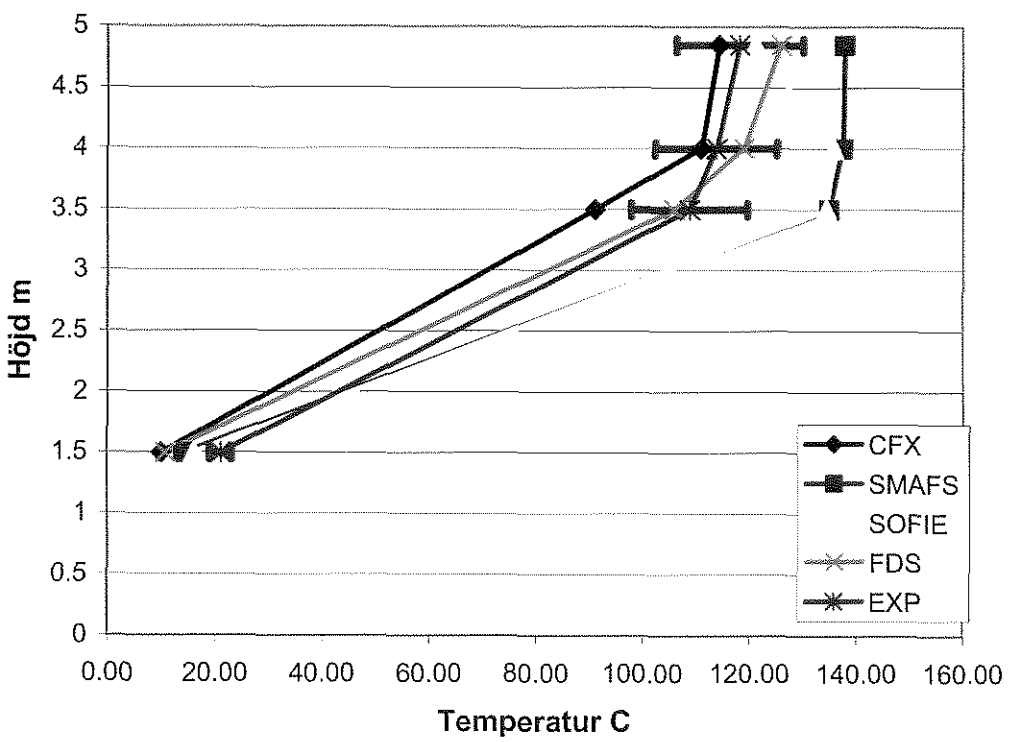

Figur 1A23 Temperaturen efter 240 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 9.5 m från brandens centrum.



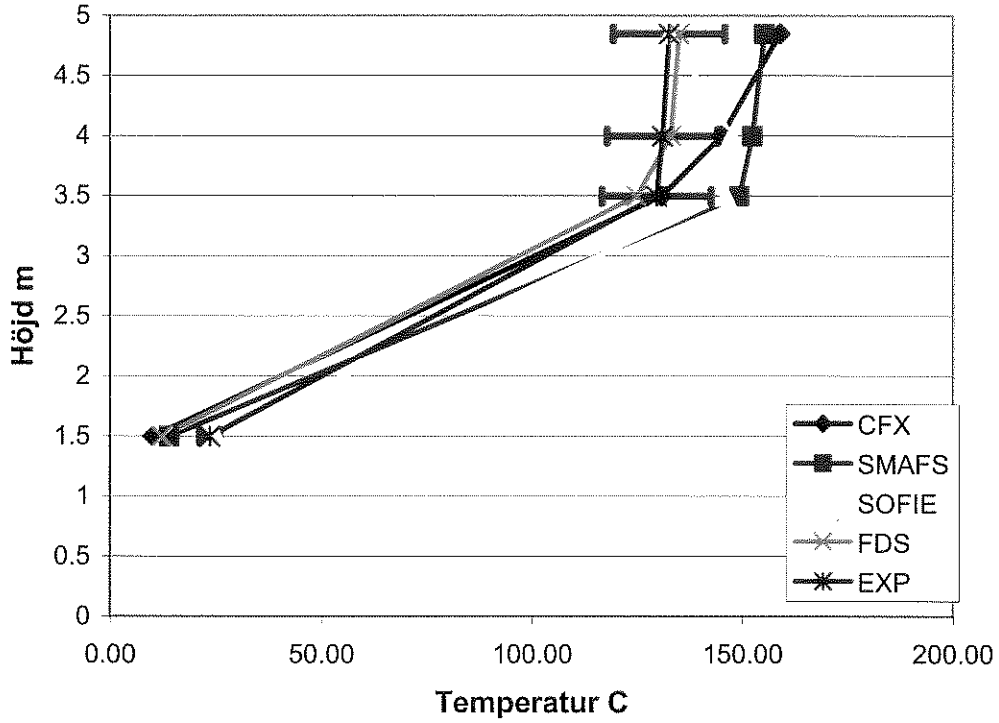

Figur 1A24 Temperaturen efter 480 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 9.5 m från brandens centrum.



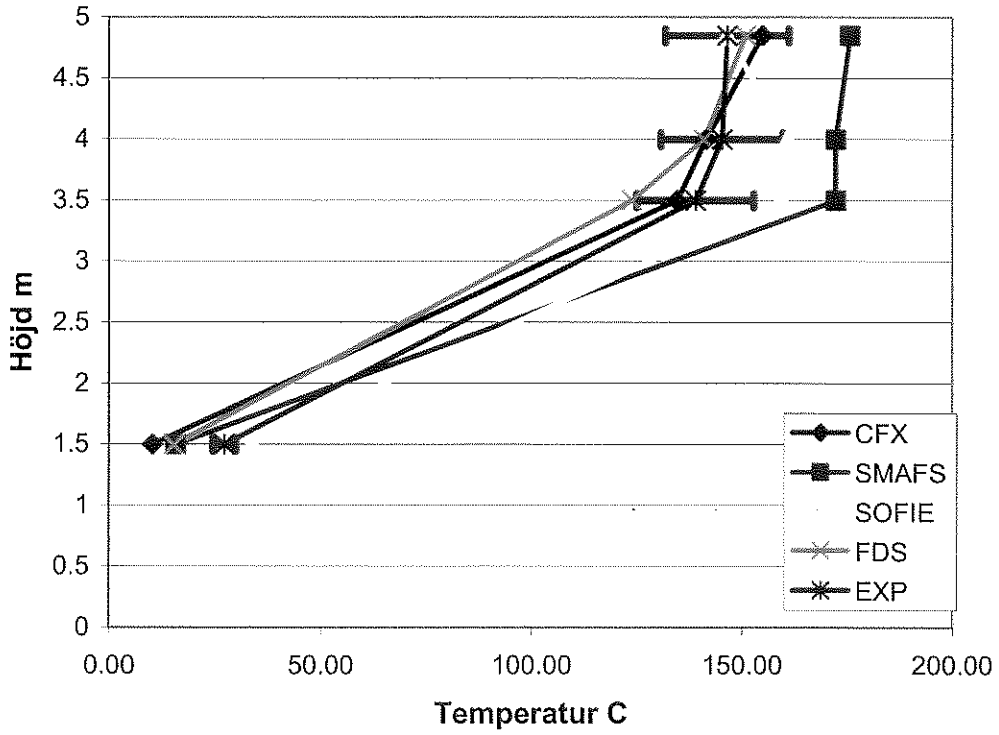

Figur 1A25 Temperaturen efter 60 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 12.5 m från brandens centrum.




Figur 1A26 Temperaturen efter 120 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 12.5 m från brandens centrum.




Figur 1A27 Temperaturen efter 240 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 12.5 m från brandens centrum.




Figur 1A28 Temperaturen efter 480 sekunder i vertikalt termoelementträd mitt i rummet, 12.5 m från brandens centrum.

## 7. Värdering av jämförelse mellan experiment och simuleringar

**Översiktlig jämförelse mellan koderna av brandgasfyllning i rummet**
Samtliga fyra simuleringar som redovisas i Fig.1A.5-10 och Fig.1A.17-28 ger en likartad bild av brandgaslagrets tjocklek jämfört med experimentet med undantag för simuleringen 1 minut efter antändning med CFX. Brandgaslagrets undre gräns stannar vid en höjd 2.5 +/- 0.5 m över golvet både i experiment och i simuleringar dvs. inga brandgaser flödar ut genom rummets två öppningar, 1.4 m höga, på ömse sidor om branden.

**Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment**
Experimentella värden finns för vertikala hastighetsprofiler mitt i brandrummet på 2.5, 9.9 och 12.5 m avstånd från branden och redovisade i Fig.1A.17-28. Temperaturerna i brandgaslagret övre del, från 3 - 5 m, simuleras med en avvikelse från de experimentella värdena på som mest 25% för tider efter 2 minuter för samtliga koder. Det kan påpekas att den experimentella osäkerheten är 10 %. Avvikelsen är större för kortare tider. De experimentellt uppmätta gastemperaturerna under brandgaslagret är behäftade med stora mätfel på grund av strålningskorrektionen. Som framgår av Fig.1A.17-28 minskar avvikelsen mellan de simulerade och uppmätta temperaturerna under brandgaslagret ju längre bort från branden man kommer dvs. när strålning avtar.

## 8. Sammanfattning

- Samtliga fyra koder simulerar en realistisk bild av brandgaslagrets tjocklek för tider över två minuter. Brandgaserna når ner till 2.5 +/- 0.5 m i experiment och simuleringar vilket motsvarar en osäkerhet på 20%.
- Samtliga fyra koder simulerar att alla brandgaser strömmar ut igenom brandgasluckan.
- Samtliga fyra koder simulerar temperaturerna i övre brandgaslaget på 3-5 m höjd med en avvikelse från experimentet på som mest 25% för tider efter 2 minuter.
- Avvikelsen mellan experiment och simuleringar innefattar fel pga. ofullständigheter i fysikaliska och numeriska modeller, systematiska fel vid beskrivning av scenariet och operatörsberoende.
- Det går ej att uppskatta hur stora bidrag till avvikelsen de olika felkällorna och operatörsberoendet medför.

## 9. Referenser


1. "Samverkan mellan sprinkler och brandventilation", Ingason H., SP Report 2001:18
2. "Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE", Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
3. "A two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires", Brohez S., Delvosalle C., Marlair G., Fire Safety Journal 39(2004) 399-411
4. "A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", McCaffrey B.J., Heskestad G., Combustion and flame 26 (1976)125-127
5. "Ceiling Jet Flows" Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.
6. "Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations", Ma,T.G., Quintiere J.G., Fire Safety Journal 38 (2003) 467-492

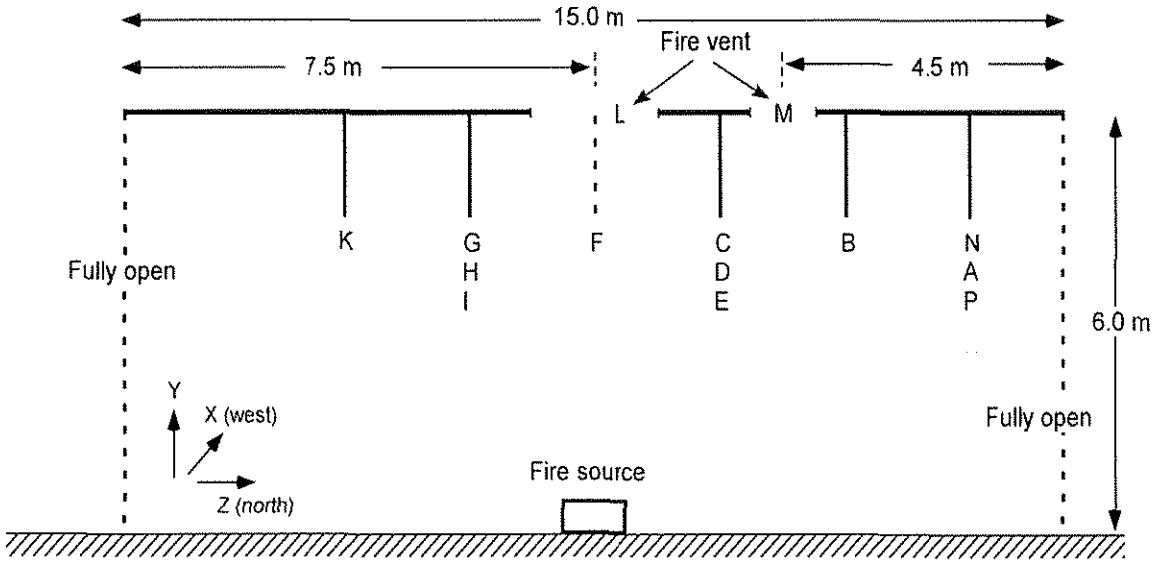
# Scenarium 1B – Stor korridor

## 1. Syfte

Brandgasventilation installeras i många stora lokaler. Det är det viktigt att känna till hur snabbt brandgaser sprider sig i lokaler och hur de påverkas av brandgasluckor. I det valda scenariet är branden, som växer kvadratiskt med tiden, placerad i mitten av en korridor. Två olika placeringar av rökgasluckan studerades, dels mitt över branden och dels 3 m från branden. Brandgaserna har då tre alternativa utbredningsvägar, genom luckan eller genom korridorens båda öppningar mot en stor lokal.

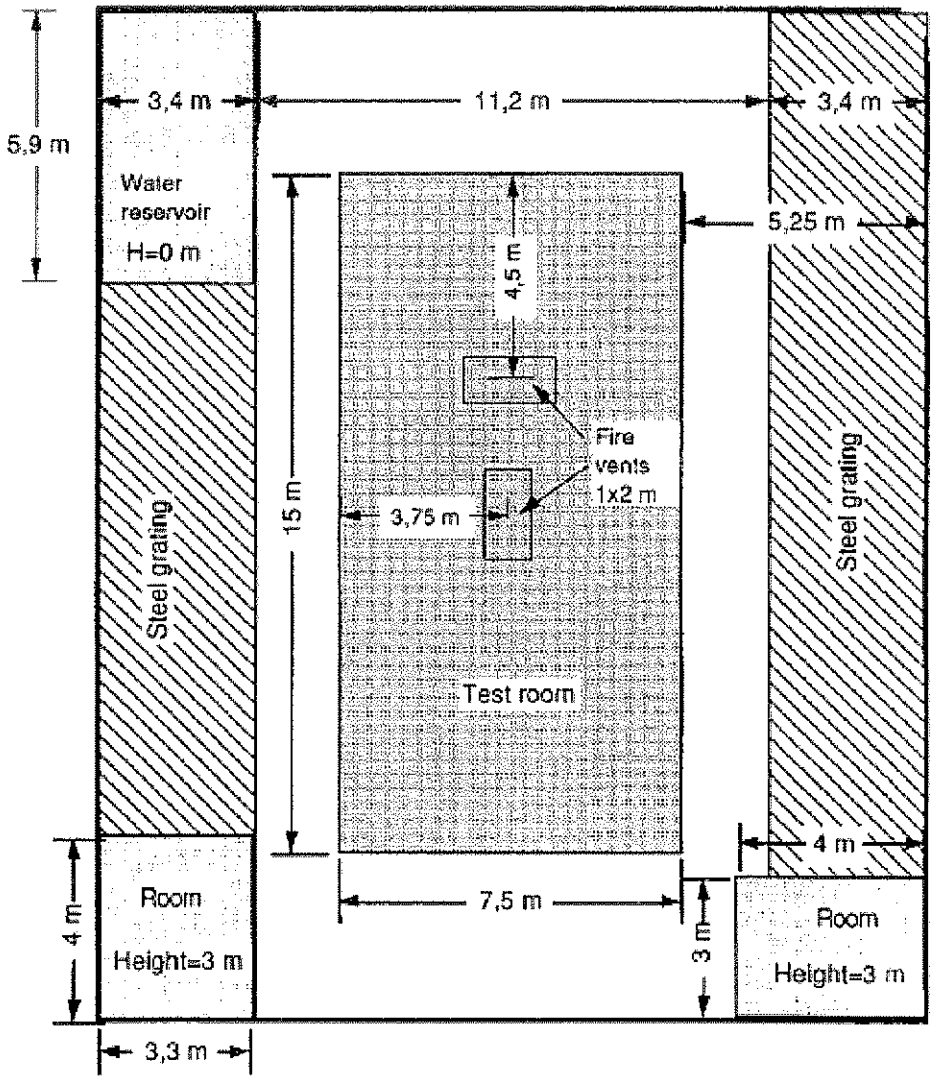
## 2. Scenarium

Scenariet är hämtat från ett SP-försök [1]. Korridoren, Fig.1B.1, var 15 m lång, 7.5 m bred och 6 m hög. Rökgasluckorna var 2 m långa och 1 m breda.




**Figur 1B.1 Försökskorridor**

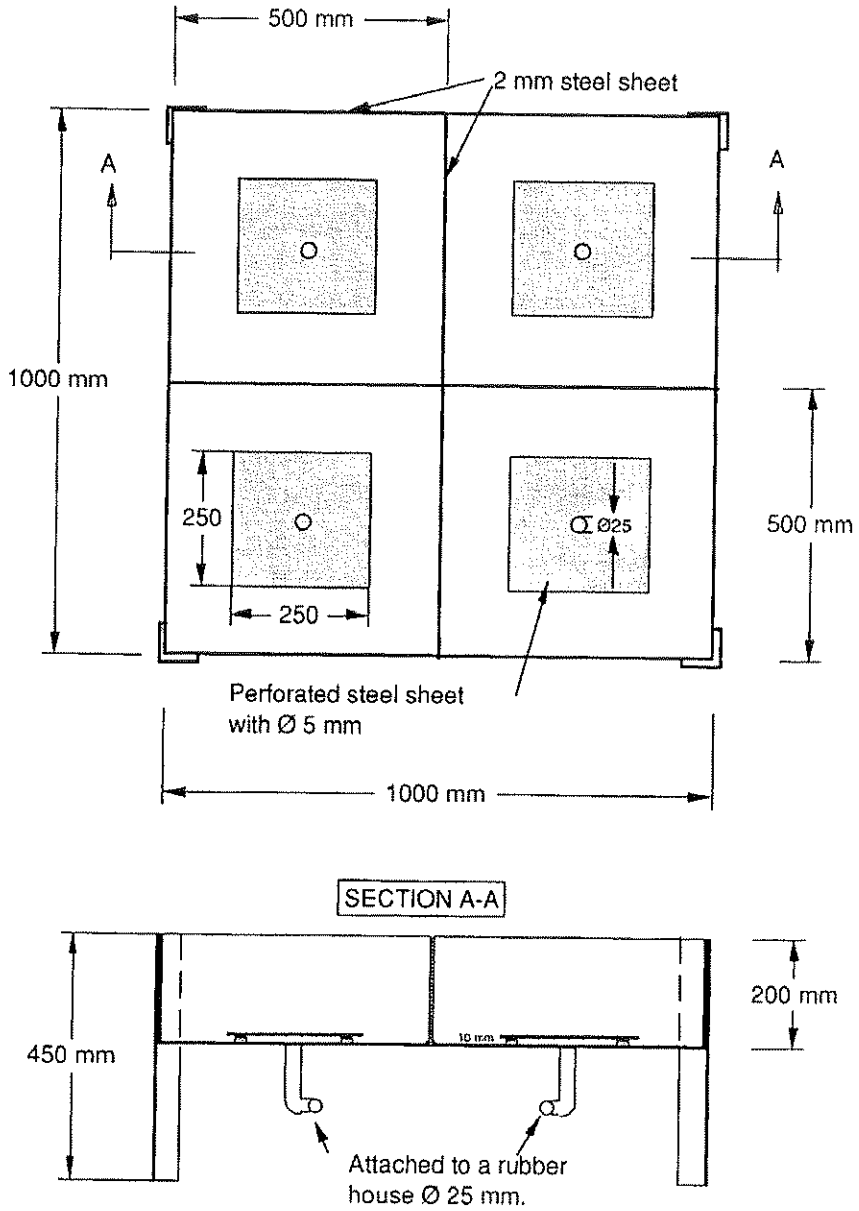
Korridoren, Fig.1B.1, var placerad i en stor brandhall som visas i Fig. 1B.2. Brandhallen hade två stora aktiva inflöden på golvet längs korridorens sidor och utflöde på hög höjd, 20 meter över golvet. Utflödet var anpassat till inflödet. Inflödet genom golvet hade en hastighet på 0.26 m/s och inflödestemperaturen var 18°C. Taket var gjort av 9.5 mm tjocka Navalite N skivor. De övre delarna av väggarna (2.4 m) var gjorda av Navalite N skivor och de lägre (3.6 m) bestod av 13 mm gipsskivor. Detaljer om rummets utformning ges i Ref.2.




**Figur 1B.2 Försökskorridor läge i brandhallen**

**Brandkälla**

Brandkällan som användes i experimenten var en rektangulär propangasbrännare med måtten 1m x 1m. Brännarens höjd var 200mm och dess botten var placerad 250 mm över golvet. Brännarens konstruktion visas i figur 1B.3. Gasflödet till brännaren reglerades manuellt med hjälp av en flödesmätare. Brandtillväxten reglerades från 0 till 1.5 MW på 3 minuter. Effektkurvan ökade kvadratiskt med tiden och följde den s.k. Fast-kurvan, $Q= \alpha*t^2$ där $\alpha= 0.0469$ kW/s$^2$.




**Figur 1B.3 Brännarkonstruktion**

## 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

**Repeter- och reproducerbarhet**

Experimentet har utförts tre gånger på ett SP´s laboratorium. Försöket visade mycket god repeterbarhet. Det saknas information om experimentets reproducerbarhet.

**Randvillkor**

Detaljer om geometrin och materialdata finns redovisade i Ref.2.

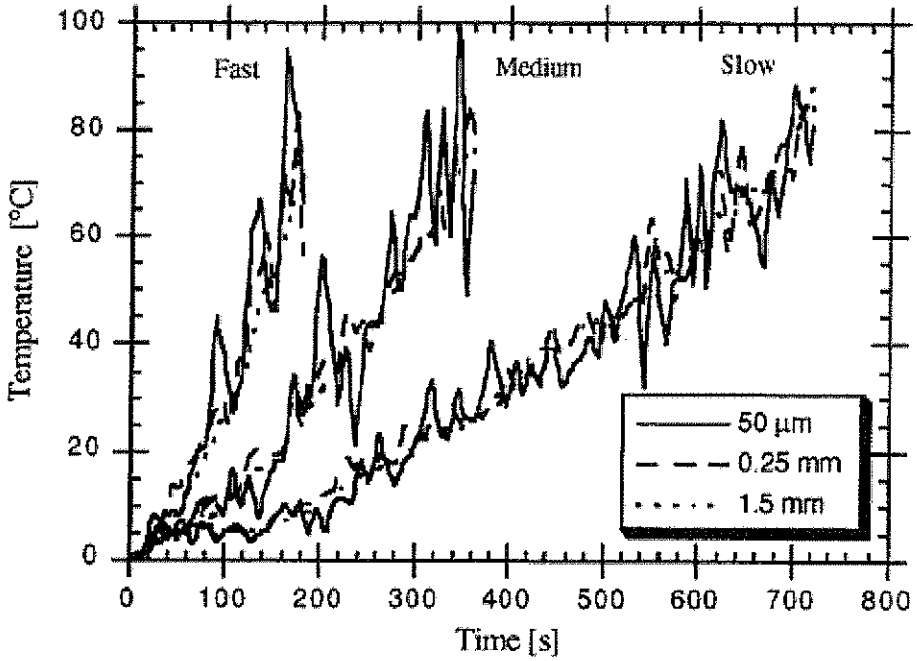
**Initialvillkor**

Detaljerad information om initial temperatur i brandrummet och temperatur i inflödet till SP´s brandhall finns att tillgå i Ref.1. I anvisningarna till simuleringarna [2] anges endast 18°C som begynnelsetemperatur i hela lokalen och 18°C som inflödestemperatur från hålen i det yttre golvet

**Brandbeskrivning**

Bränslet var propan med en angiven effektutvecklingskurva. Osäkerheten i effektangivelsen uppges av SP vara mindre än 10 %.

**Mätteknik**
Vid försöken mättes gastemperatur med termoelement placerade på vertikala termoelementträd, under taket och i takluckan. Termoelementen var i alla mätpunkter 0.25 mm tjocka. I två mätpunkter fanns dessutom 0.05 och 1.5 mm tjocka termoelement för att man skulle kunna uppskatta strålningens inverkan på temperaturmätningarna. Vid försöket uppmättes ingen större skillnad i termoelementens medeltemperatur, Fig.1B.4. Strålningskorrektionen för o.25 mm termoelementen, som var de som användes på samtliga mätställen, uppskattas till mindre än 5°C. Termoelementen har emellertid olika termisk tröghet och följer temperaturfluktuationerna olika snabbt.




**Figur 1B.4 Temperaturökningen för tre olika effektkurvor vid mätstation D, 2 m från branden 0.15 m under taket, mätt tre olika tjocka termoelement.**

I en del punkter i rummet och i takluckan mättes även gashastigheten med bi-directional pitotrör och termoelement. Bi-directional pitotrör har ett felaktigt vinkelberoende [3] och mäter inte normalkomponenten av hastigheten på rätt sätt när strömningsriktningen är skild från normalriktningen. Tryckskillnaden över pitotrören för gashastigheter under 0.5 m/s är dessutom mindre än 0.15 Pa vilket medför stor osäkerhet i tryckmätningen.

**Sammanfattning avseende mätfel och scenarioosäkerhet**
Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- Att onoggrannheten i mätningarna av effektutveckling med c:a 10% och osäkerheten i strålningskorrektionen motsvarar en osäkerhet i mätningarna av temperaturdifferenserna i övre brandgaslagret med totalt 10%. En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, med 10% motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [4] en osäkerhet i temperaturstegringen på 7 % ($\Delta T$ -- $Q^{2/3}$). Osäkerheten i strålningskorrektionen på 5°C vid temperaturer på 100°C motsvarar en osäkerhet på c:a 5%.
- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att strålningskorrektionen påverkar den uppmätta temperaturen mindre än 5°C
- Att initialtemperatur i väggar och tak inte är uppmätt.

- Att mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel då de inte korrigerats för sitt vinkelberoende.

## 4. Simuleringar

I tabell 1A.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien.

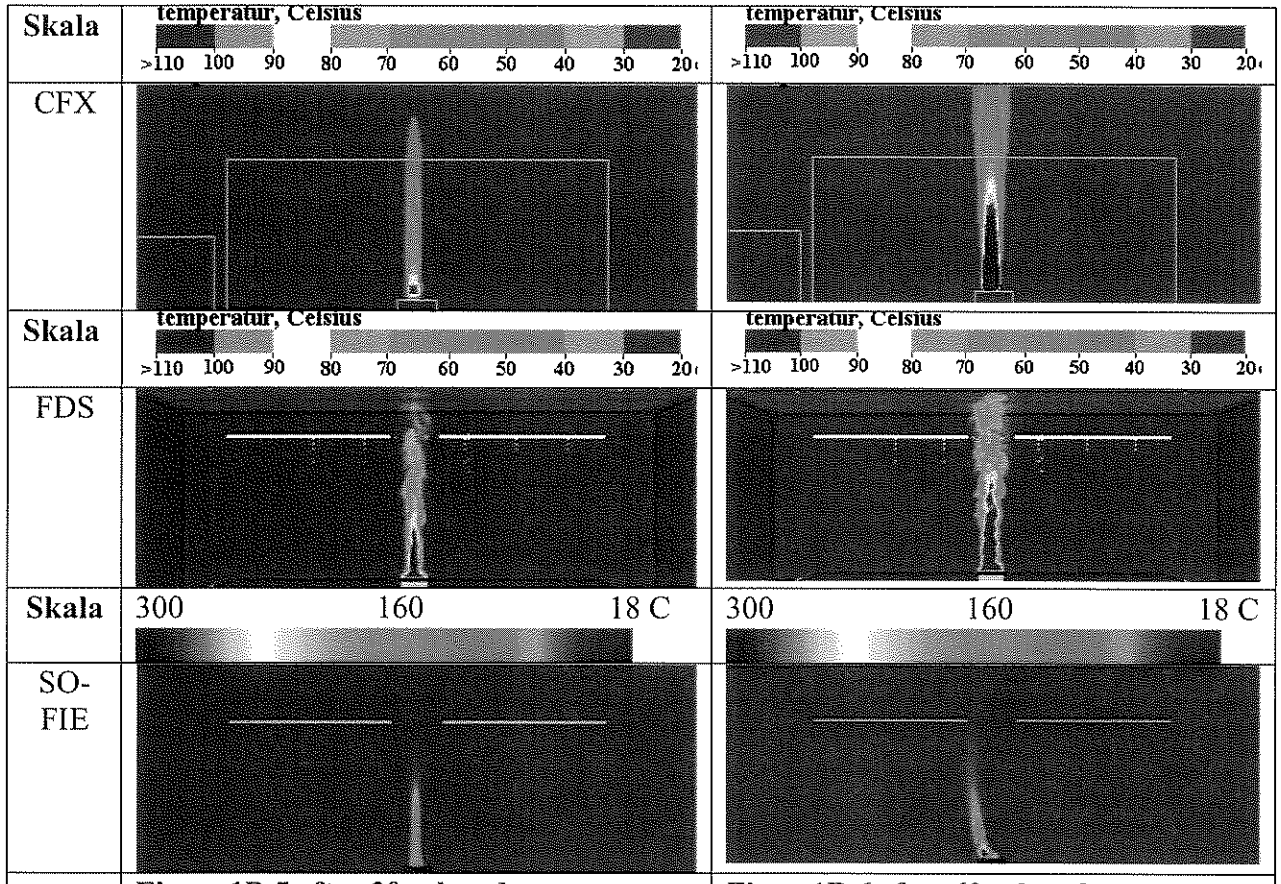
**Tabell 1A.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| **Mjukvara** | **CFX-4.4** | **FDS 4.07** | **SMAFS 5.01*** | **SOFIE 3.0** |
|---|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | | |
| Dator CPU | Intel Pentium4 | Intel Pentium 4 | ADM opteron | Intel Pentium 4 |
| Klockfrekvens GHz | 2? | 3.4 | 2.2 | 3.2 |
| RAM GB | 1 | 2 | | 2 |
| Antal processorer | 1 | 1 | 6 | 1 |
| **Simulering** | | | | |
| Operatör | Bengt. Hägglund | Göran Holmstedt | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| Gridstorlek 1B1 | 1.115.136 557 568 | 1.520.000 | | 420.906* 240.672* |
| Gridstorlek 1B2 | 1.115.136 557 568 | 1.520.000 | | 273.258* |
| Gridförtätning | Nej | Ja | | Ja |
| Symmetriplan | Nej | Nej | | Nej |
| Tidssteg sek | 1 | Default | | 1 |
| Beräkningstid Timmar 1B1 | 24/12 | 29 | 49.2 | 48/24 |
| Beräkningstid Timmar 1B2 | 24 /12. | 29 | 17 | 30 |
| Mass tolerans | $10^{-6}$ | Default | $10^{-6}$ | $10^{-3}$ |
| Modellval | | default | | |
| Typ av code | RANS | LES | RANS | RANS |
| | | | | |
| Turbulens | k-ε | Smalgorinsky | k-ε | k-ε |
| Strålning | Ingen | Default | | DTRAM 16 ray |
| Brand | Heat source | Default | | Eddy Break-up |
| Reduc effekt % | 35 | 35% rad. fraction | ? | ? |
| Sotfraktion | 0.025 | 0.024 | | 0.02 |
| Konvektion | Default | Default | | Default |

* Vid simuleringarna med SOFIE användes ett symmetriplan dvs. den geometriska upplösningen motsvarar 2 x 420.906 respektive 2 x 240572 och 2 x 273.258 celler.

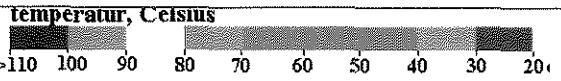
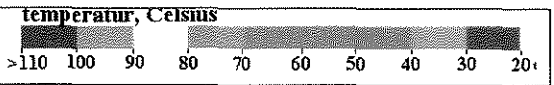
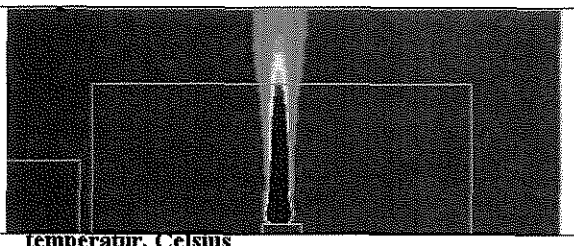
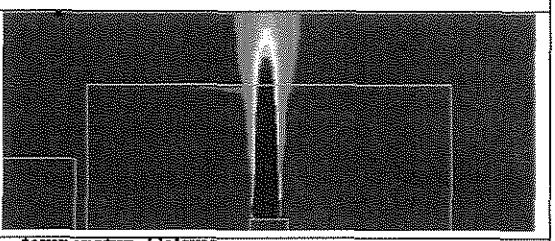
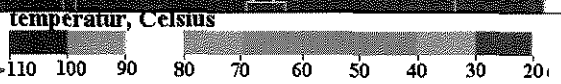
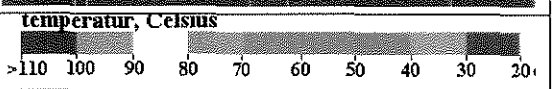
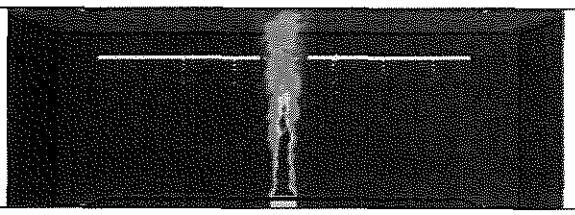
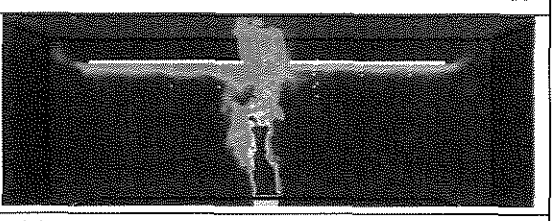
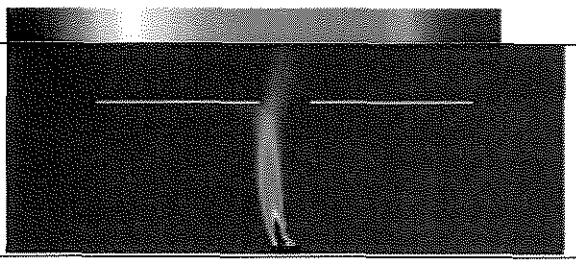
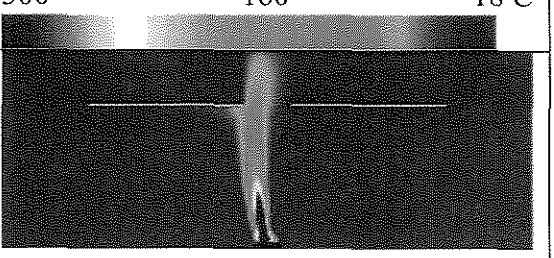
## 5. Översiktlig jämförelse mellan simuleringarna

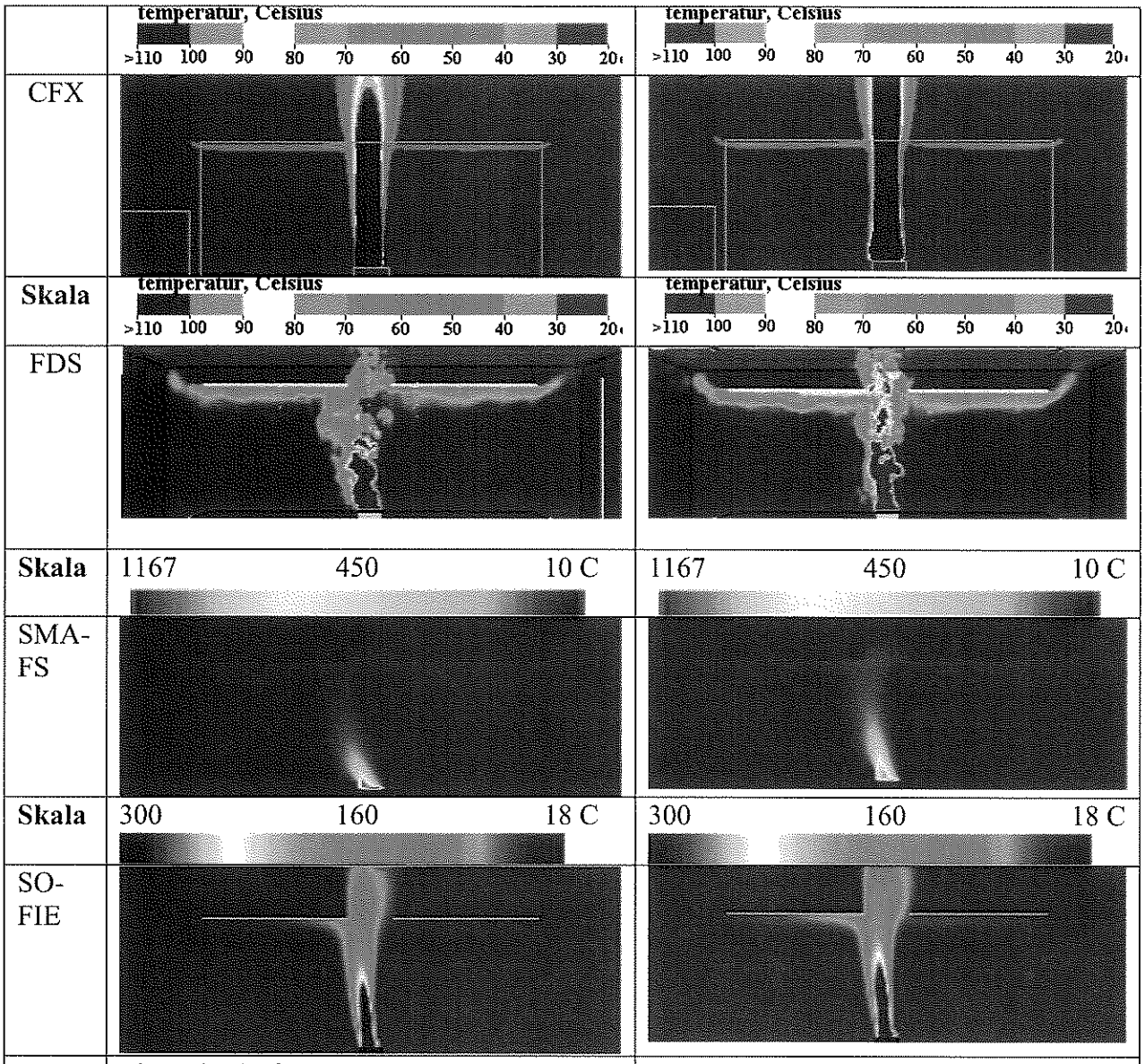
I Fig.1B.5 – 1A.10 visas, för luckan placerad rakt över branden, den simulerade temperaturfördelningen för samtliga koder i ett vertikalt snitt mitt i rummet 30, 60, 90, 120, 150 och 180 sekunder efter det att branden startade. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.




**Figur 1B.5 efter 30 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C

**Figur 1B.6 efter 60 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C .

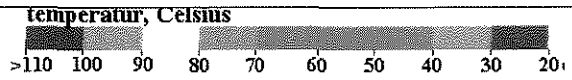
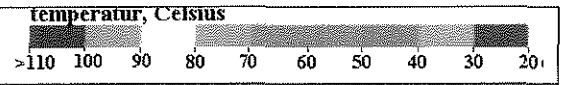
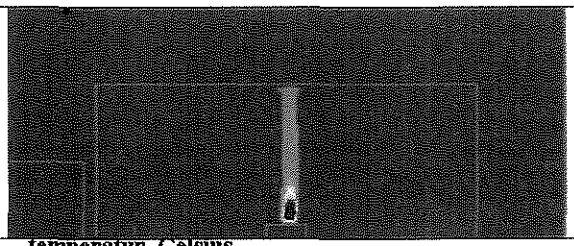
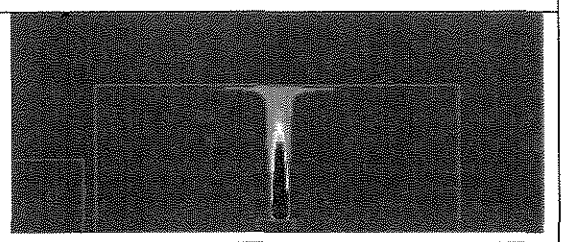
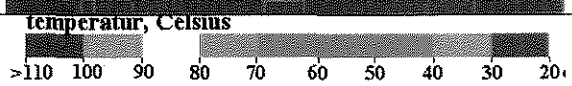
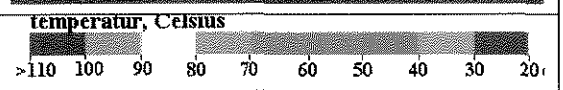
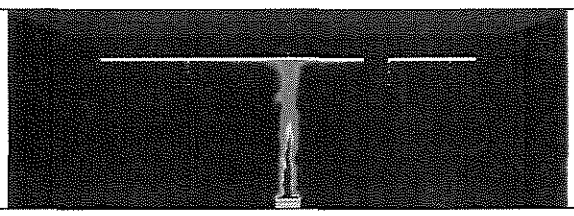
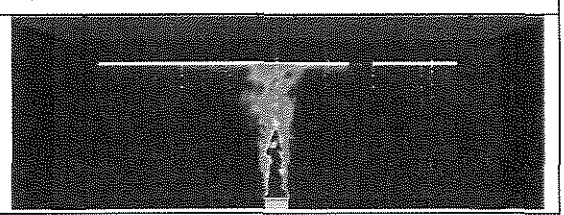
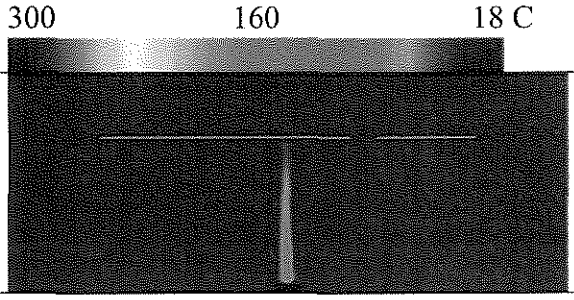
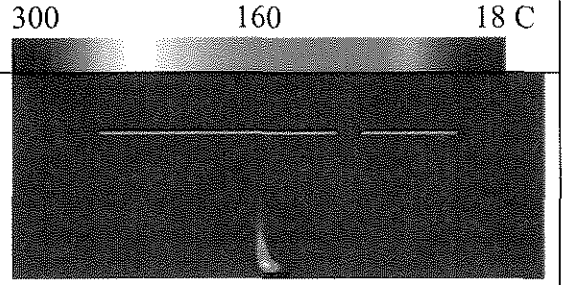
| | | |
|---|---|---|
| **Skala** |   |   |
| CFX |  |  |
| |   |   |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 300 160 18 C | 300 160 18 C |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1B.7 efter 90 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C . | **Figur 1B.8 efter 120 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C . |

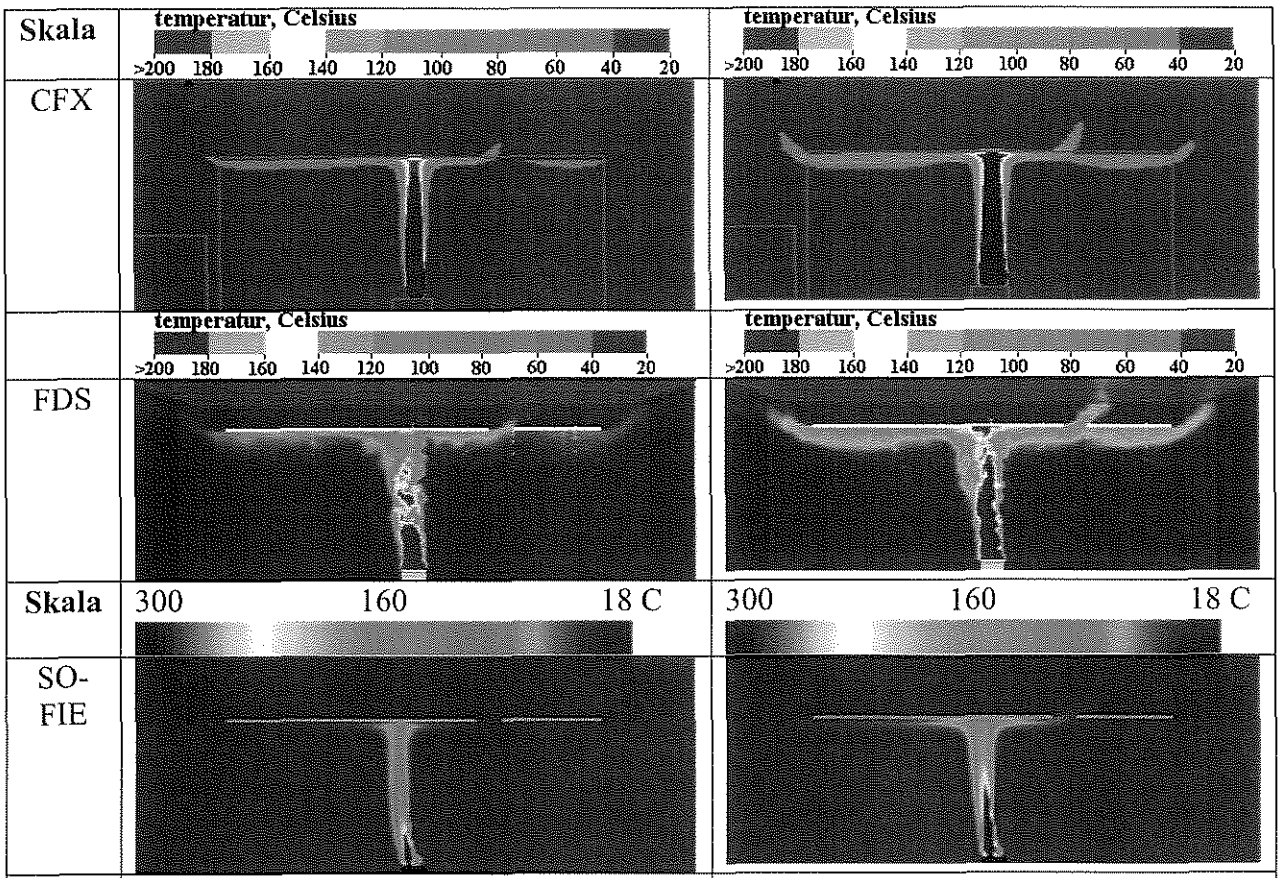



**Figur 1B.9 efter 150 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C och SMAFS 10-1167 °C.

**Figur 1B.10 efter 180 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C och SMAFS 10-1167 °C.

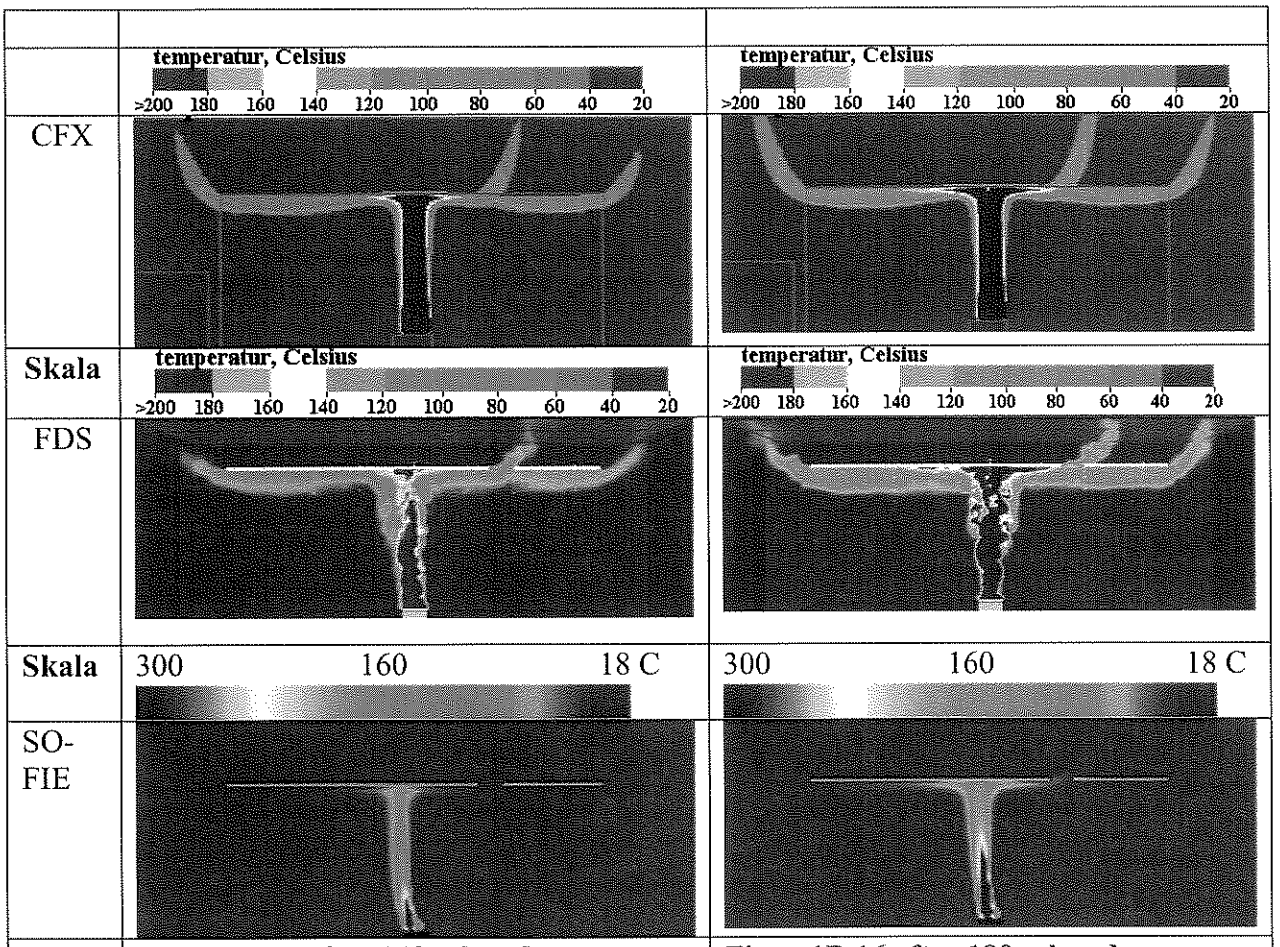
I Fig.1B.11 – 1B.16 visas, för luckan placerad 3 meter från branden, den simulerade temperaturfördelningen för CFX, FDS och SOFIE koderna i ett vertikalt snitt mitt i rummet 30, 60, 90, 120, 150 och 180 sekunder efter det att branden startade. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.

| | | |
|---|---|---|
| **Skala** |  |  |
| CFX |  |  |
| **Skala** |  |  |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 300 160 18 C | 300 160 18 C |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1B.11 efter 30 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C . | **Figur 1B.12 efter 60 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C . |




**Figur 1B.13 efter 90 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C .

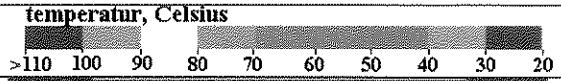
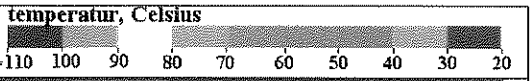
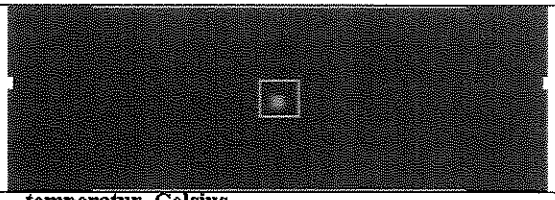
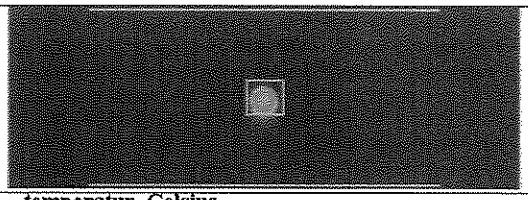
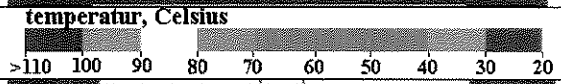
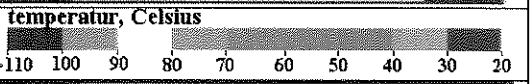
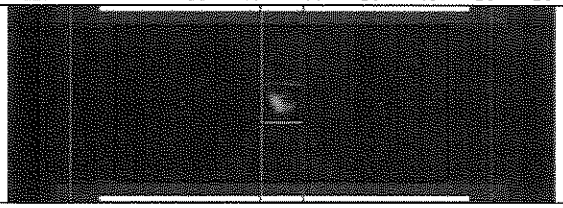
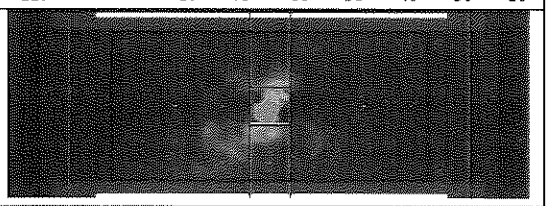
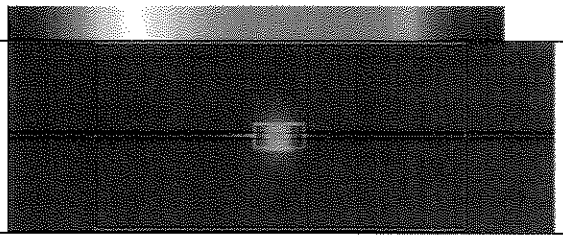
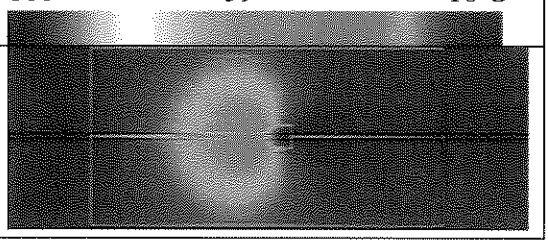
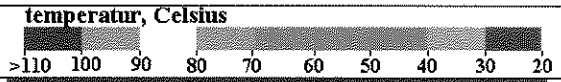
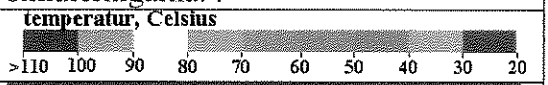
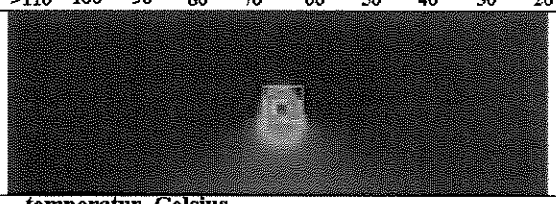
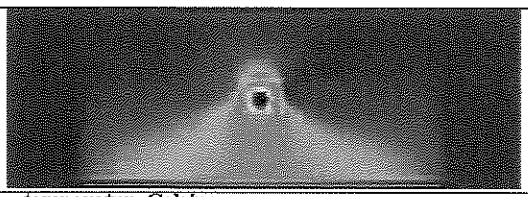
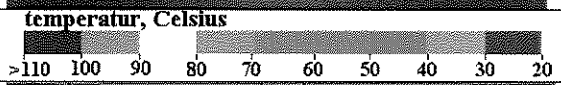
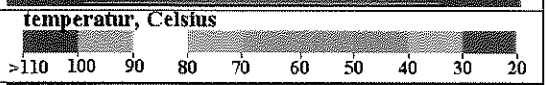
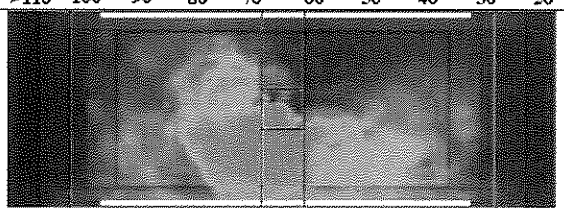
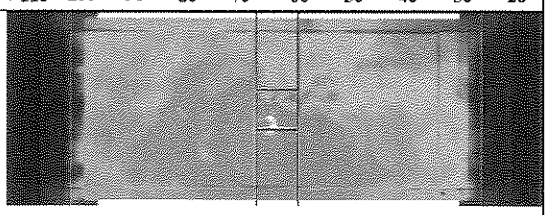
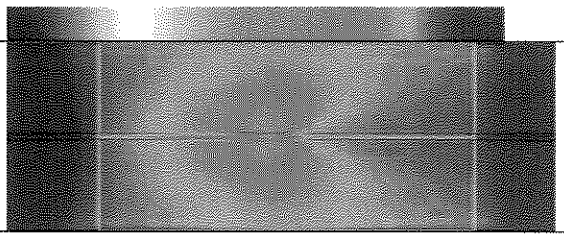
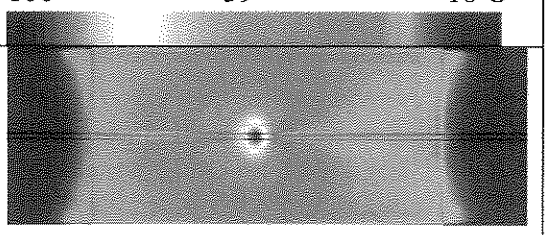
**Figur 1B.14 efter 120 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C .

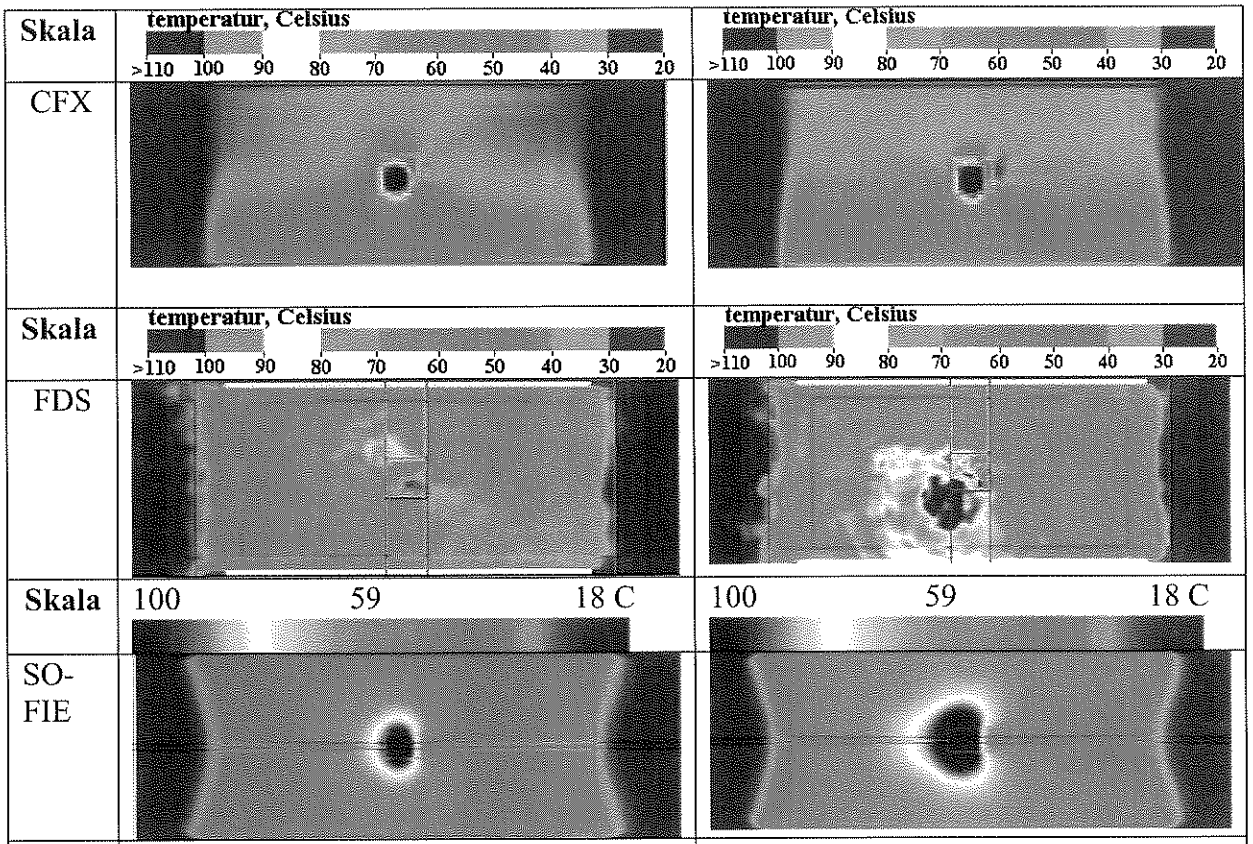



**Figur 1B.15 efter 150 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C .

**Figur 1B.16 efter 180 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är olika för de olika simuleringarna. CFX och FDS har samma skala, 20-110°C. Sofie har skala 18-300°C .

I Fig.1B.17 – 1A.22 visas, för luckan placerad rakt över branden, den simulerade temperaturfördelningen för koderna CFX, FDS och SOFIE i ett horisontellt snitt 15 cm under taket vid tiderna 30, 60, 90, 120, 150 och 180 sekunder efter det att branden startade. För FDS- koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder

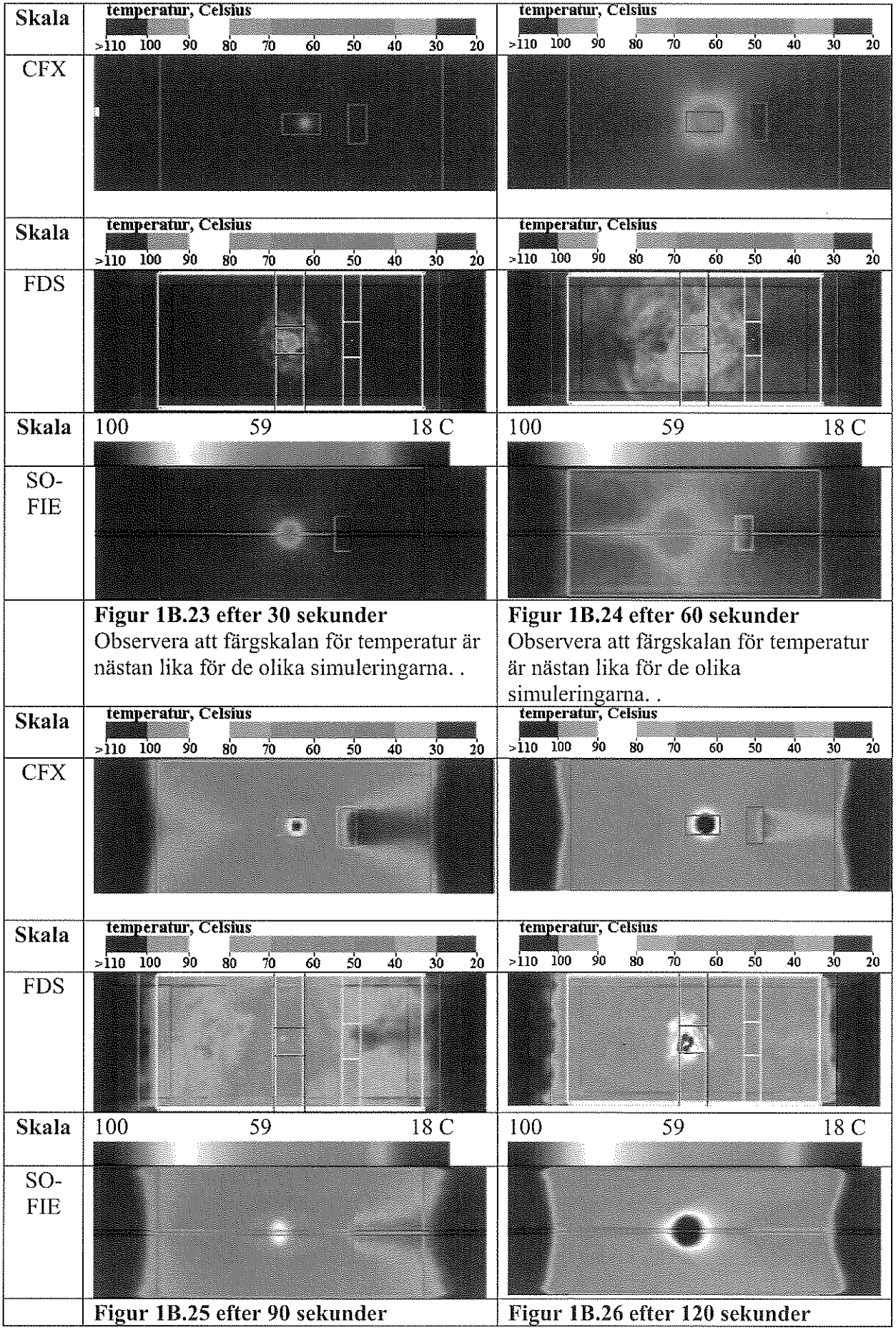
| | | |
|---|---|---|
| **Skala** |  |  |
| CFX |  |  |
| **Skala** |  |  |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 100 59 18 C | 100 59 18 C |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1B.17 efter 30 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. . | **Figur 1B.18 efter 60 sekunder**<br>Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. . |
| **Skala** |  |  |
| CFX |  |  |
| **Skala** |  |  |
| FDS |  |  |
| **Skala** | 100 59 18 C | 100 59 18 C |
| SO-FIE |  |  |
| | **Figur 1B.19 efter 90 sekunder** | **Figur 1B.20 efter 120 sekunder** |




**Figur 1B.21 efter 150 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. .

**Figur 1B.22 efter 180 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. .

I Fig.1B.23 – 1A.28 visas, för luckan placerad 3 m från branden, den simulerade temperaturfördelningen för koderna CFX, FDS och SOFIE i ett horisontellt snitt 15 cm under taket vid tiderna 30, 60, 90, 120, 150 och 180 sekunder efter det att branden startade. För FDS- koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder

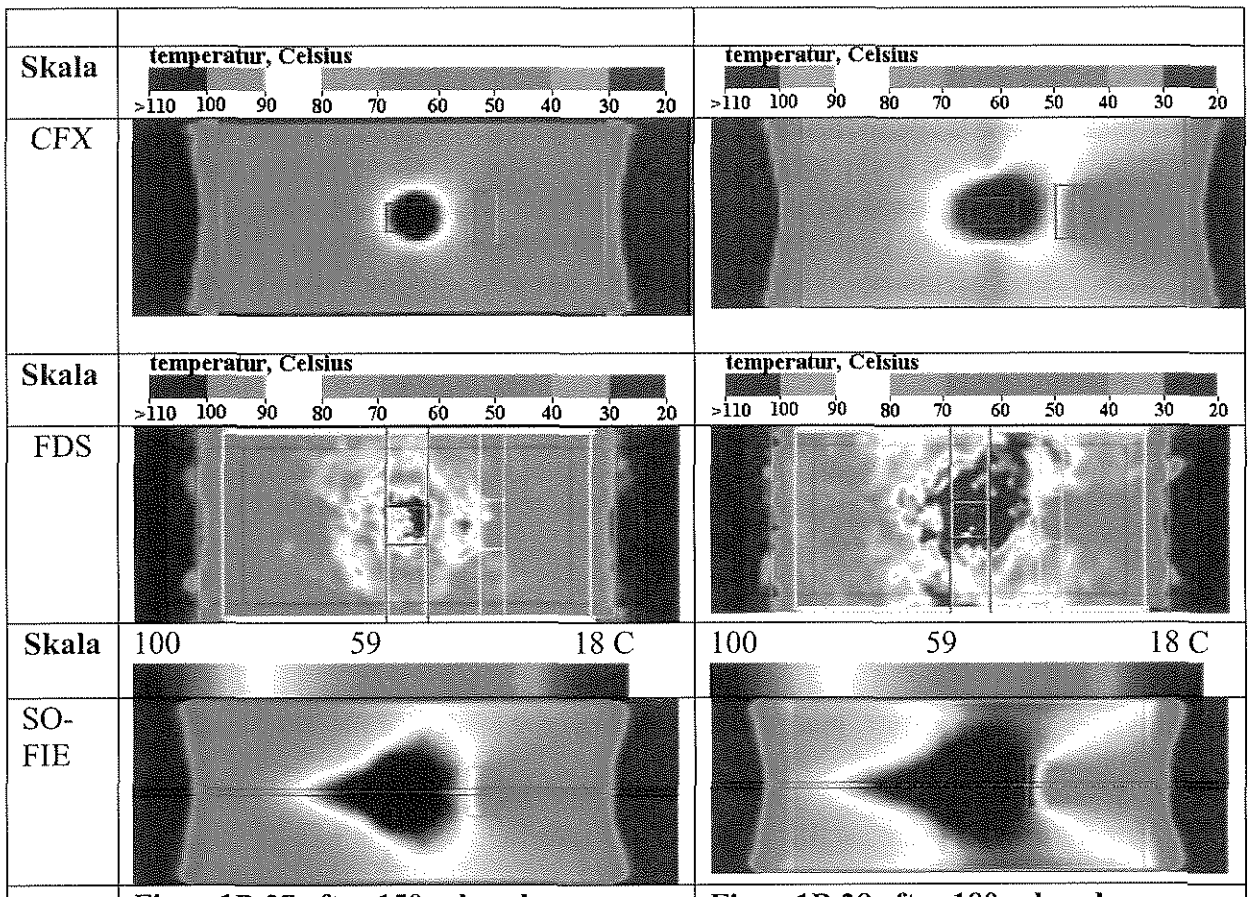



**Figur 1B.23 efter 30 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. .

**Figur 1B.24 efter 60 sekunder**
Observera att färgskalan för temperatur är nästan lika för de olika simuleringarna. .

**Figur 1B.25 efter 90 sekunder**

**Figur 1B.26 efter 120 sekunder**




**Figur 1B.27 efter 150 sekunder** | **Figur 1B.28 efter 180 sekunder**

## 6. Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har störst betydelse är osäkerheten i propangasflödet (effektutvecklingen) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

Simuleringarna är även behäftade flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då *en stegändring av effekten* medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa

koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafilen dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX, FDS och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I och i det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd enligt rekommendationer i en vetenskaplig artikel [5]. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet och ytterligare fördubblats utanför brandrummet. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

I Fig.1B.29 – 87 visas experimentellt uppmätt temperatur utan strålningskorrektion och simulerad temperatur för samtliga koder i 10 vertikala termoelementträd (A-K) och temperatur (L) och gashastighet (LV) i 5 positioner i luckan och för tider upp till 3 minuter för scenariet med lucka rakt över branden. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 0.5 sekunder.

Vid jämförelserna i figurerna redovisa inte det experimentella mätfelet som för temperaturen uppskattas till cirka 10%. Osäkerheten i simuleringarna på grund av modeller, scenarium och operatör kan inte separeras utan utgör avvikelse från det experimentella värdet.

**Fig 1B.29 Scenario lucka mitt under brand Station A Experimentella resultat**

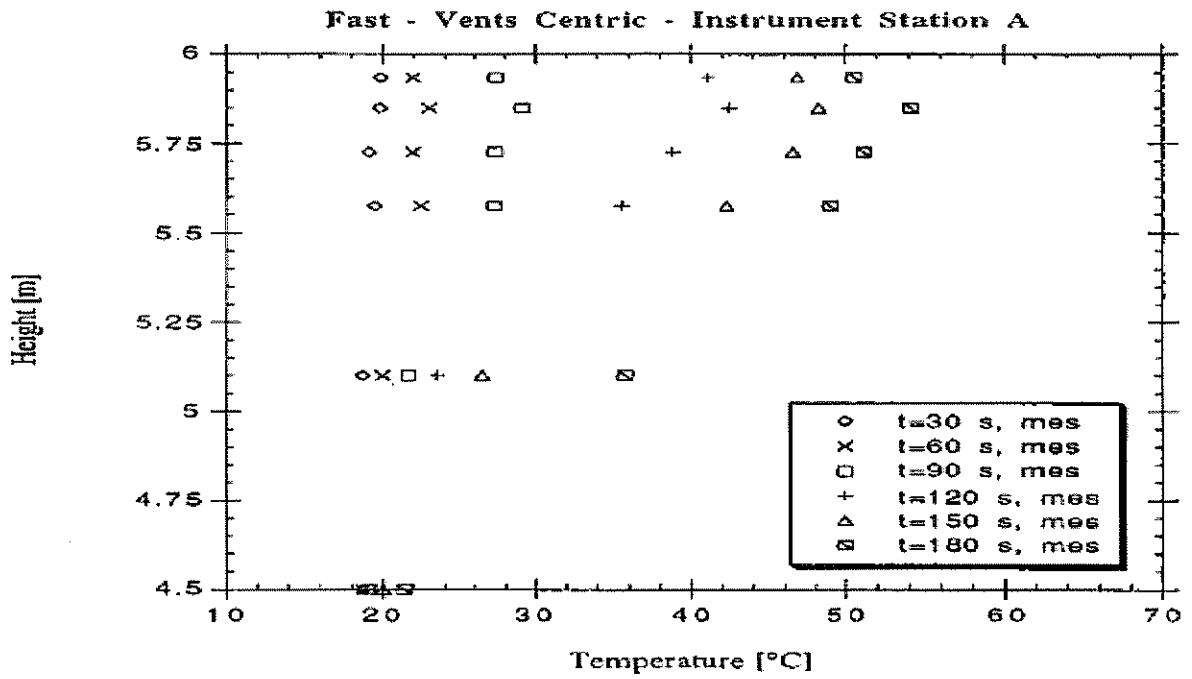



**Fig 1B.30 Scenario lucka mitt under brand Station A simuleringar med CFX**

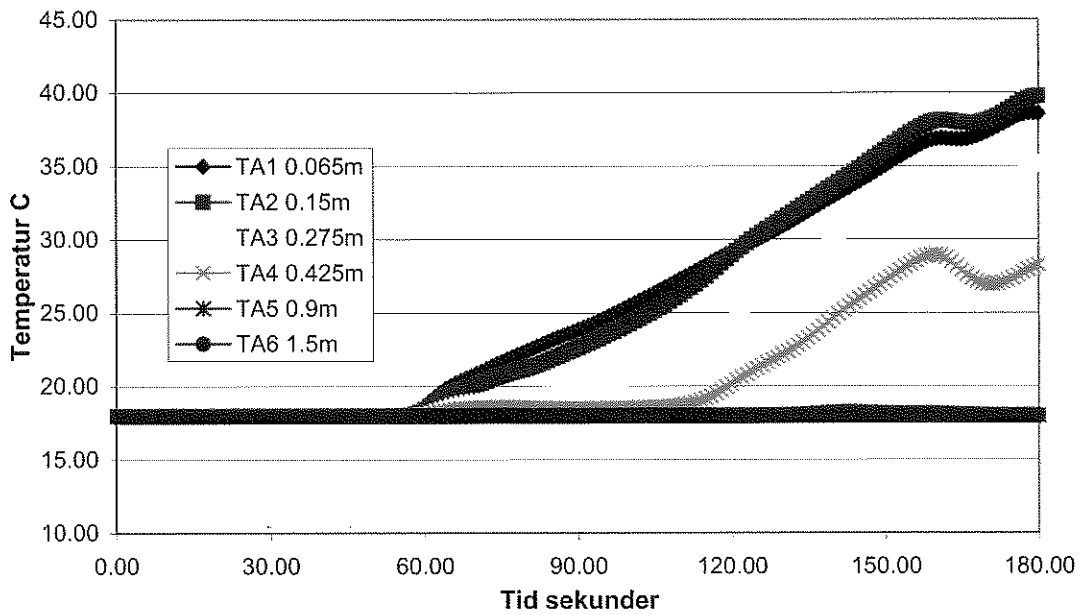


**Fig 1B.31 Scenario lucka mitt under brand Station A simuleringar med FDS**

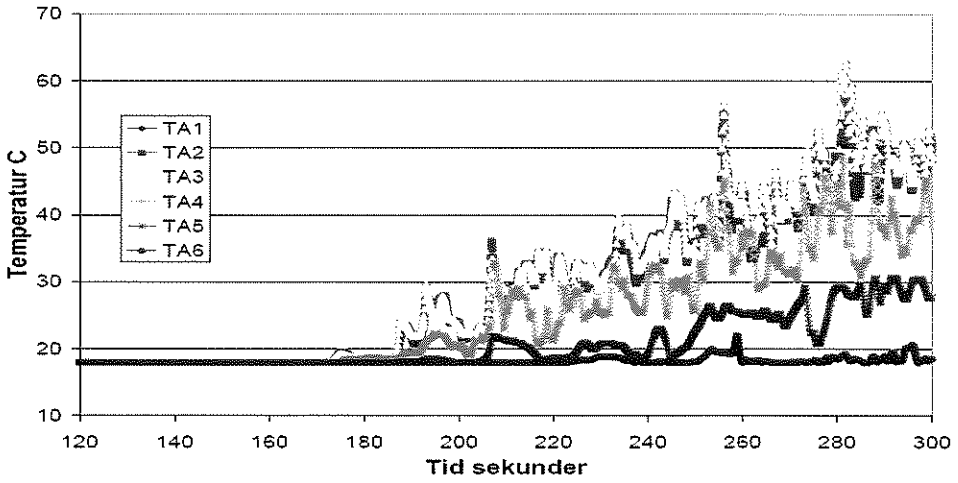



**Fig 1B.32 Scenario lucka mitt under brand Station A simuleringar med SMAFS**

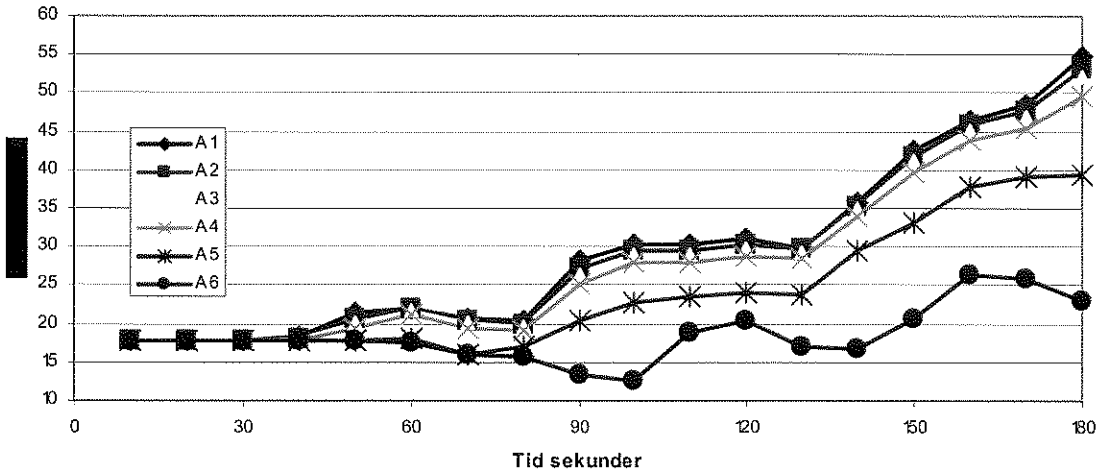



**Fig 1B.33 Scenario lucka mitt under brand Station A simuleringar med SOFIE**

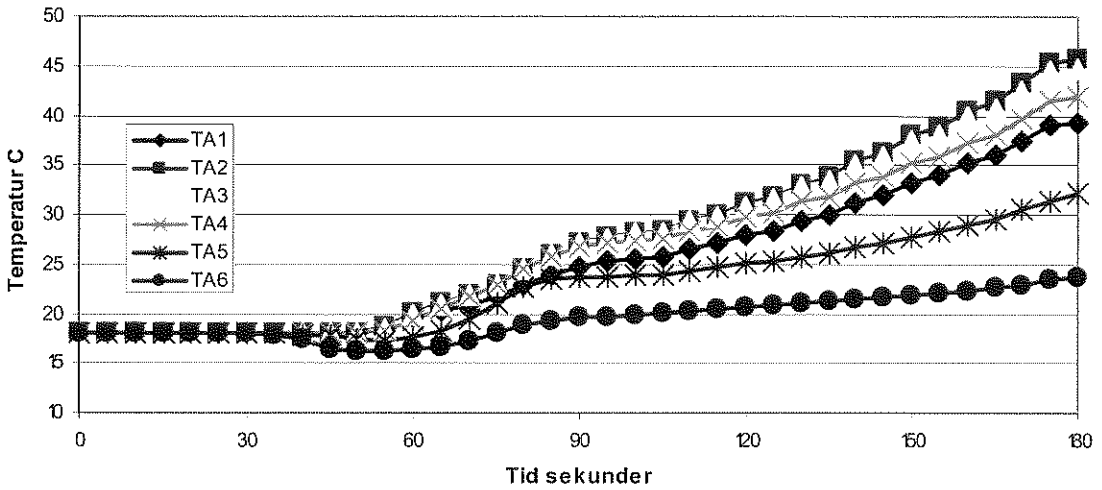


**Fig 1B.34 Scenario lucka mitt under brand Station B Experimentella resultat**

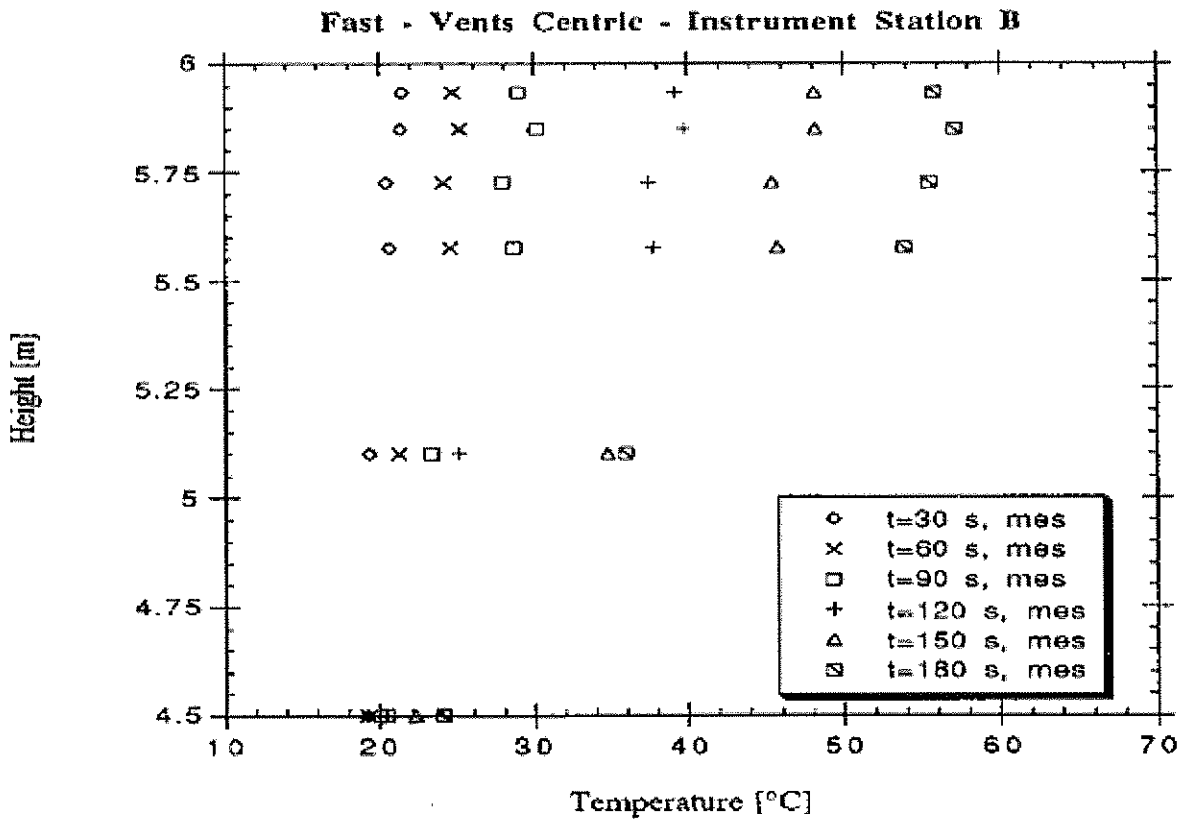



**Fig.1B35 Scenario lucka mitt under brand Station B simuleringar med CFX**

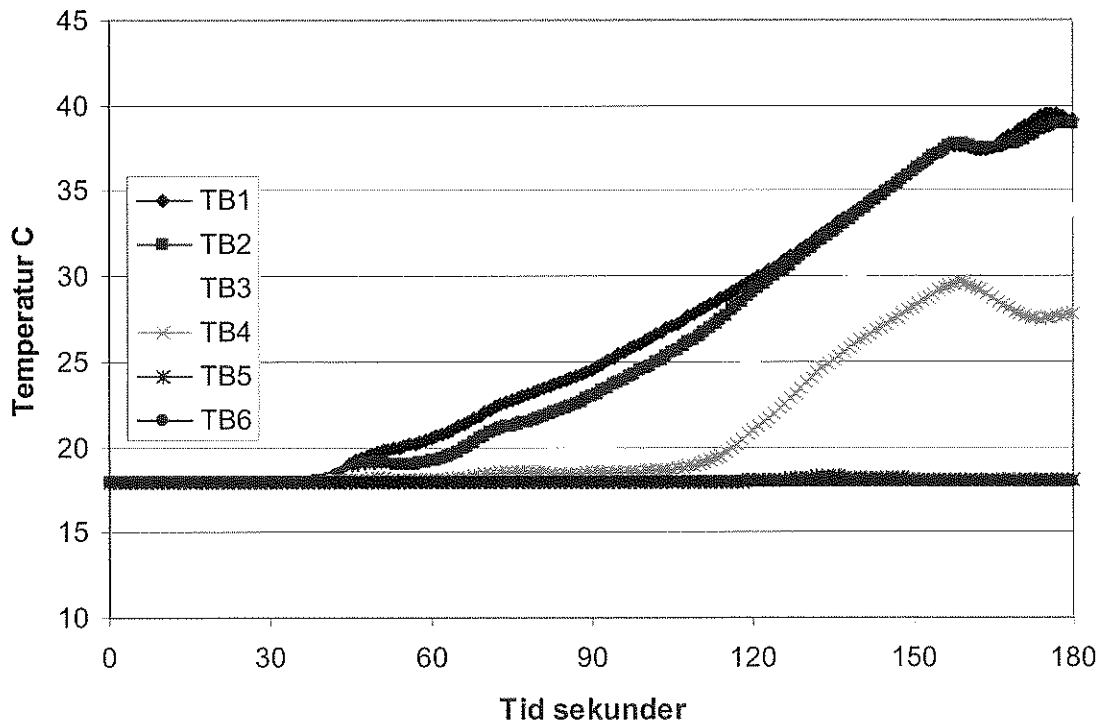


**Fig.1B36 Scenario lucka mitt under brand Station B simuleringar med FDS**

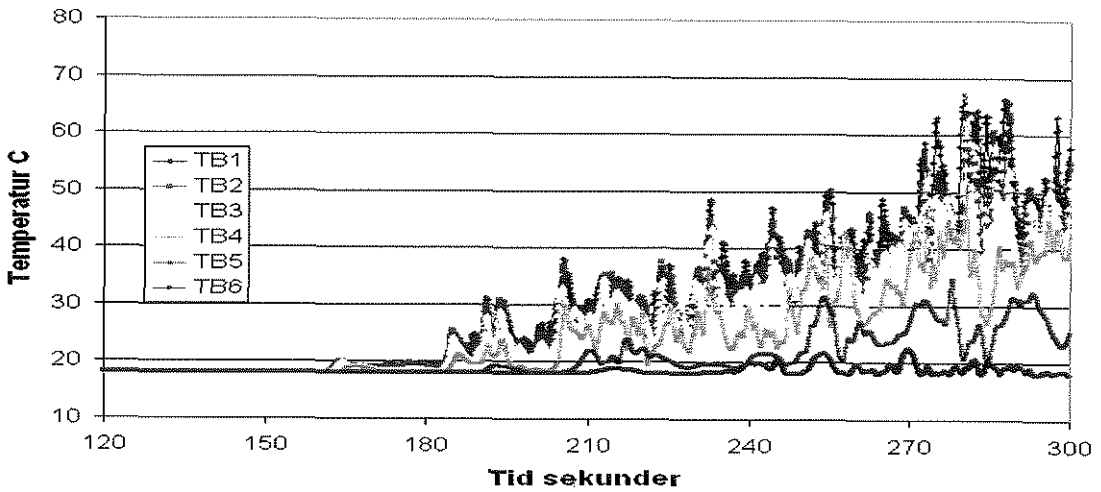



**Fig.1B37 Scenario lucka mitt under brand Station B simuleringar med SMAFS**

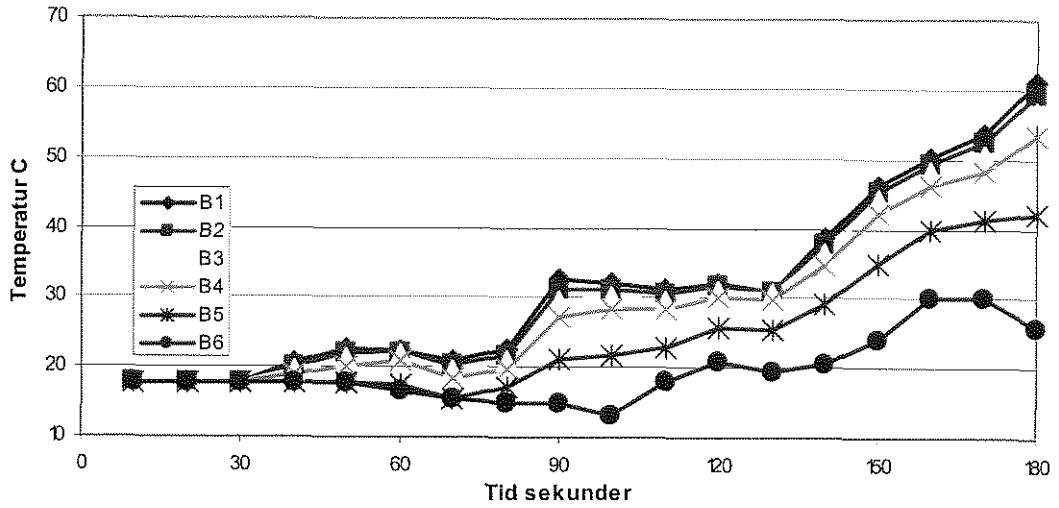



**Fig.1B38 Scenario lucka mitt under brand Station B simuleringar med SOFIE**

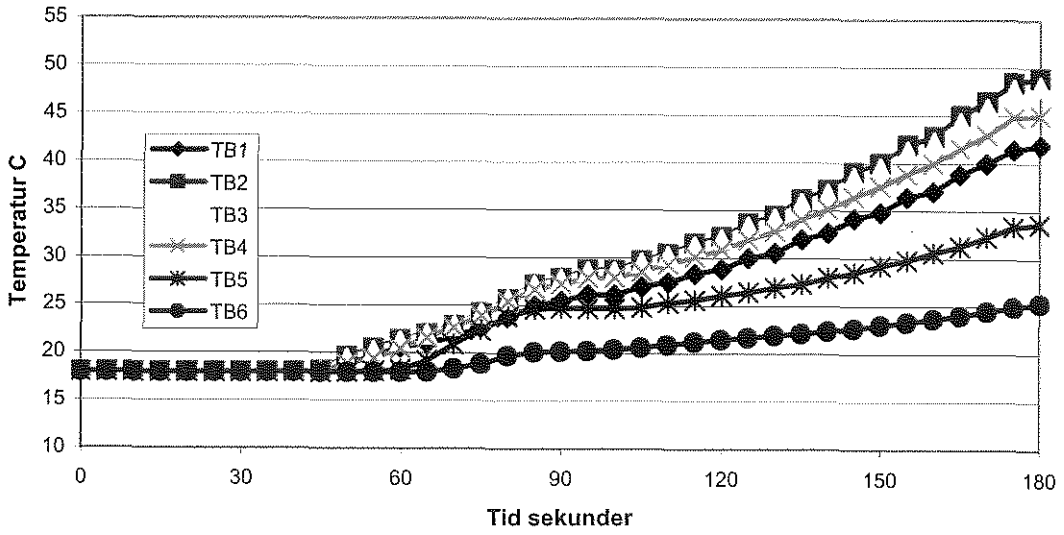


**Fig.1B39 Scenario lucka mitt under brand Station C Experimentella resultat**

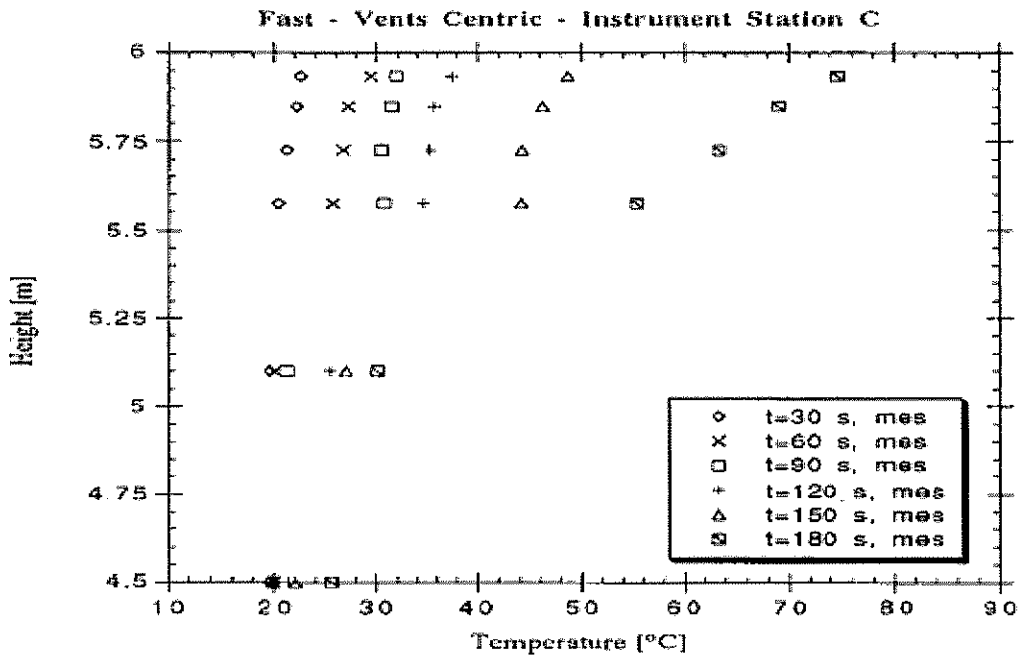



**Fig.1B40 Scenario lucka mitt under brand Station C simuleringar med CFX**

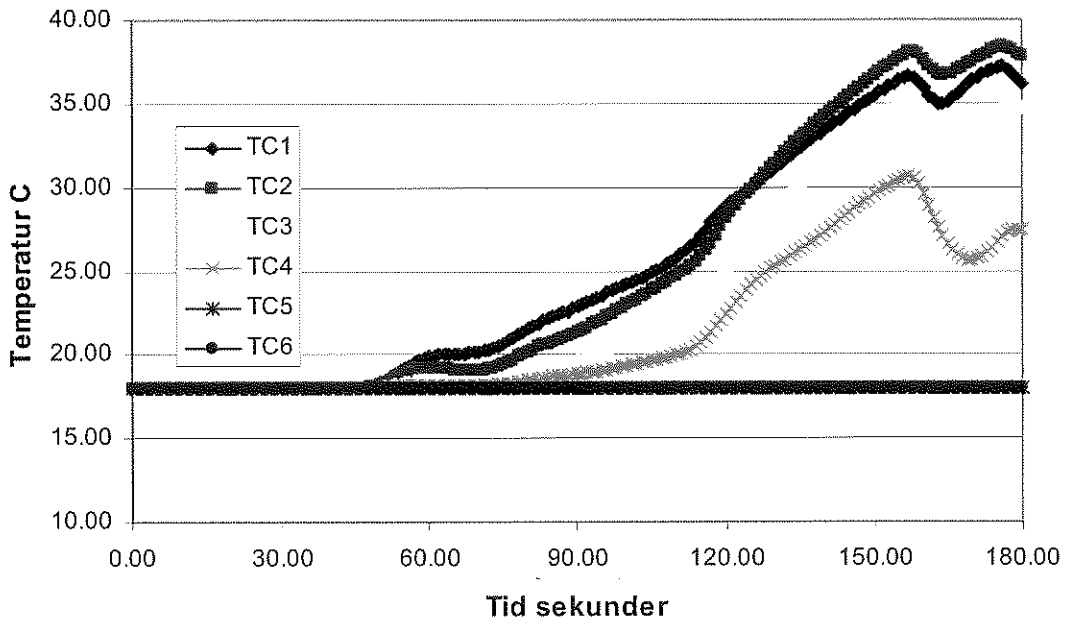


**Fig.1B41 Scenario lucka mitt under brand Station C simuleringar med FDS**

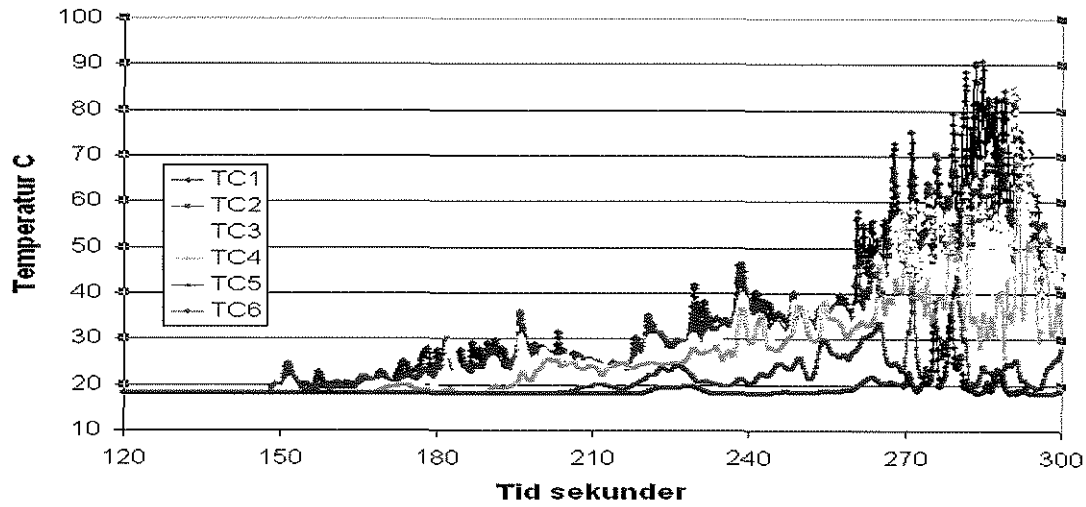



**Fig.1B42 Scenario lucka mitt under brand Station C simuleringar med SMAFS**

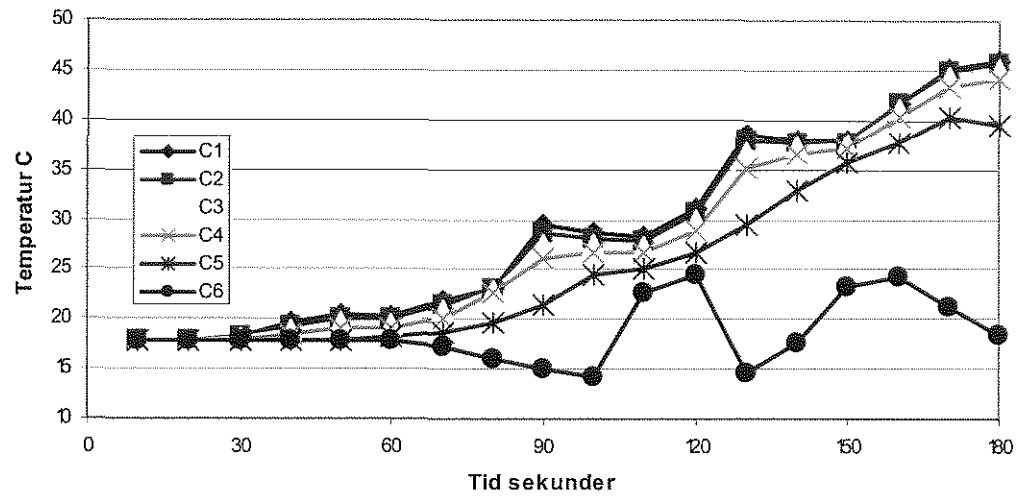



**Fig.1B43 Scenario lucka mitt under brand Station C simuleringar med SOFIE**

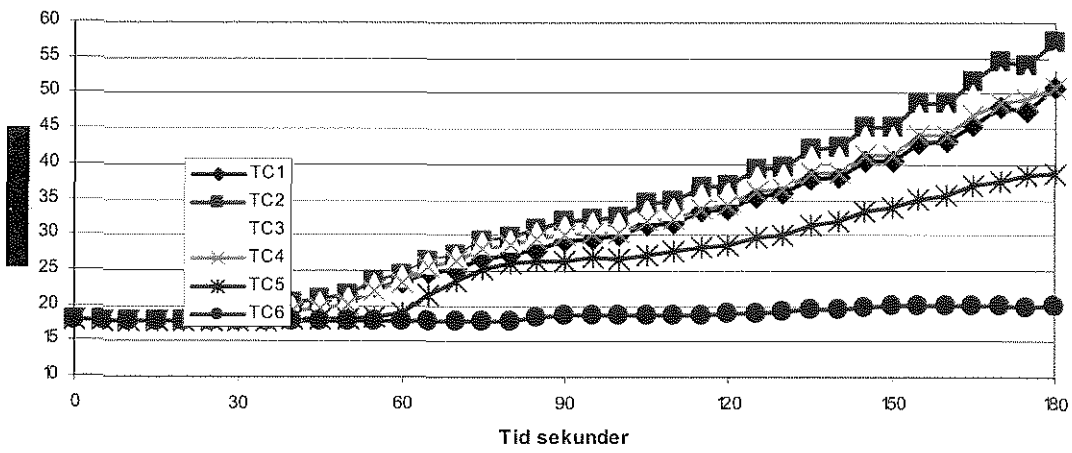


Fig.1B44 Scenario lucka mitt under brand Station D Experimentella resultat

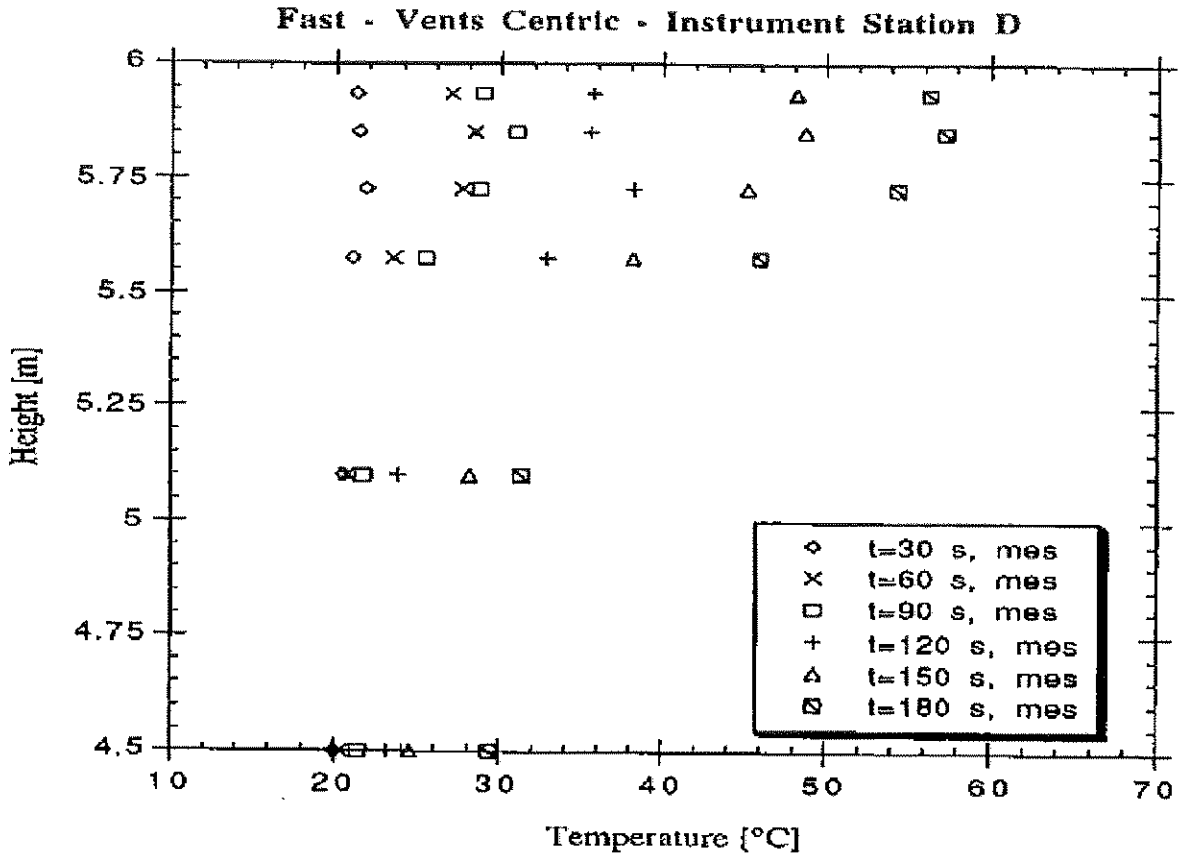



Fig.1B45 Scenario lucka mitt under brand Station D simuleringar med CFX

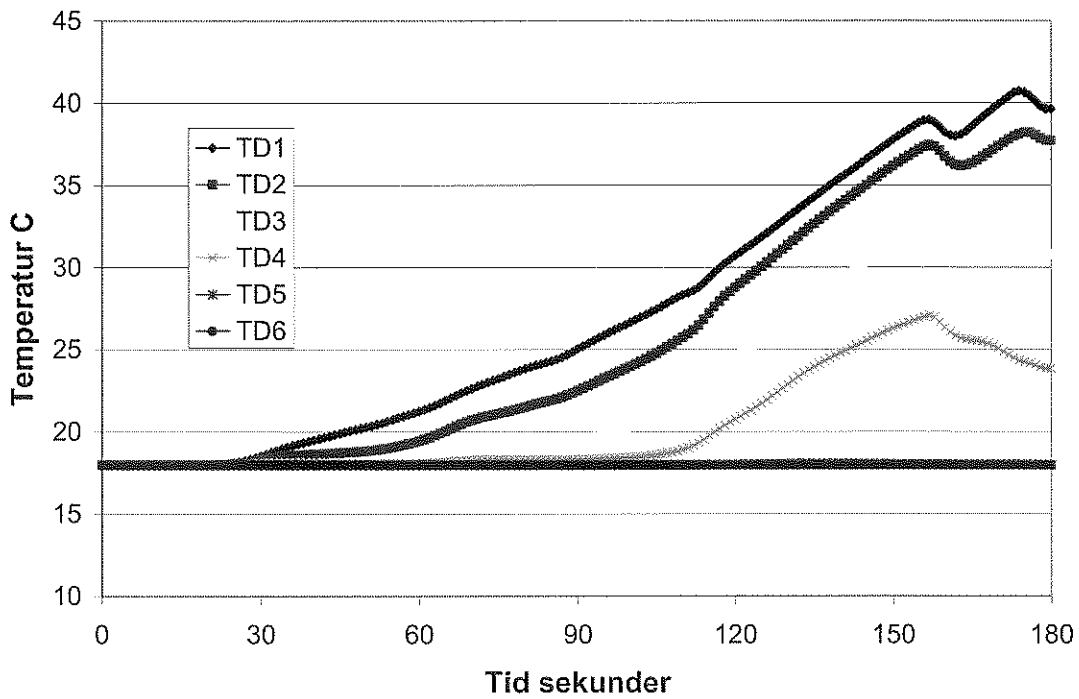


**Fig.1B46 Scenario lucka mitt under brand Station D simuleringar med FDS**

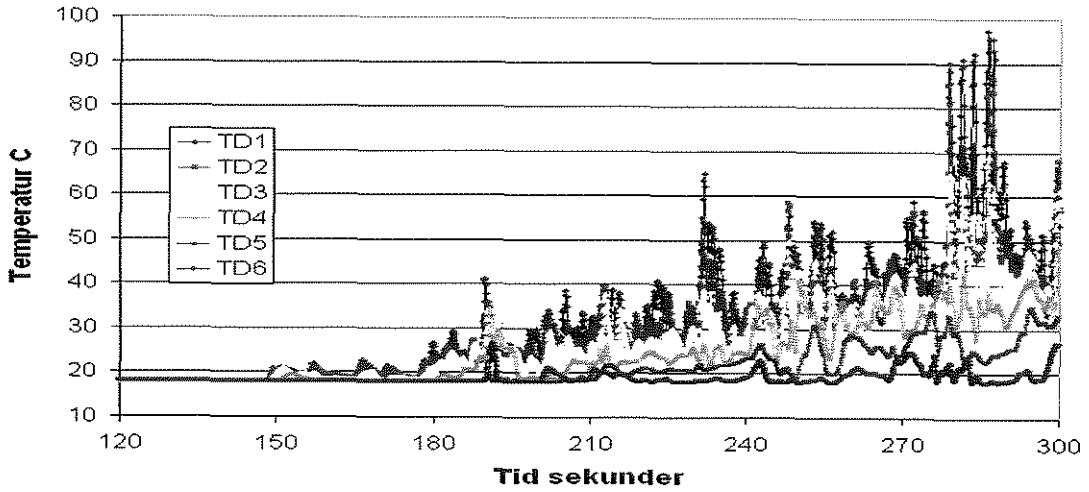



**Fig.1B47 Scenario lucka mitt under brand Station D simuleringar med SMAFS**

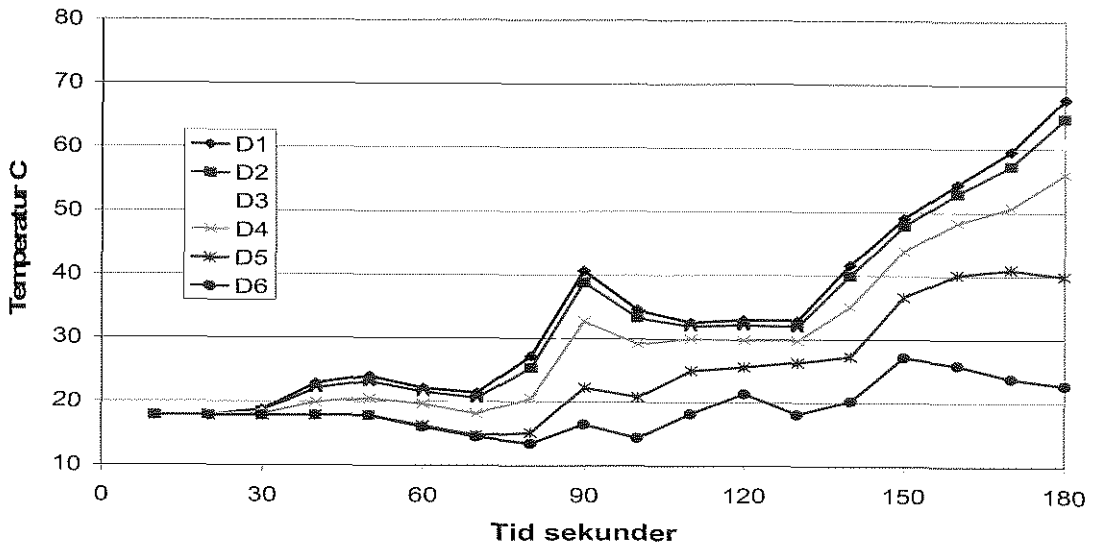



**Fig.1B48 Scenario lucka mitt under brand Station D simuleringar med SOFIE**

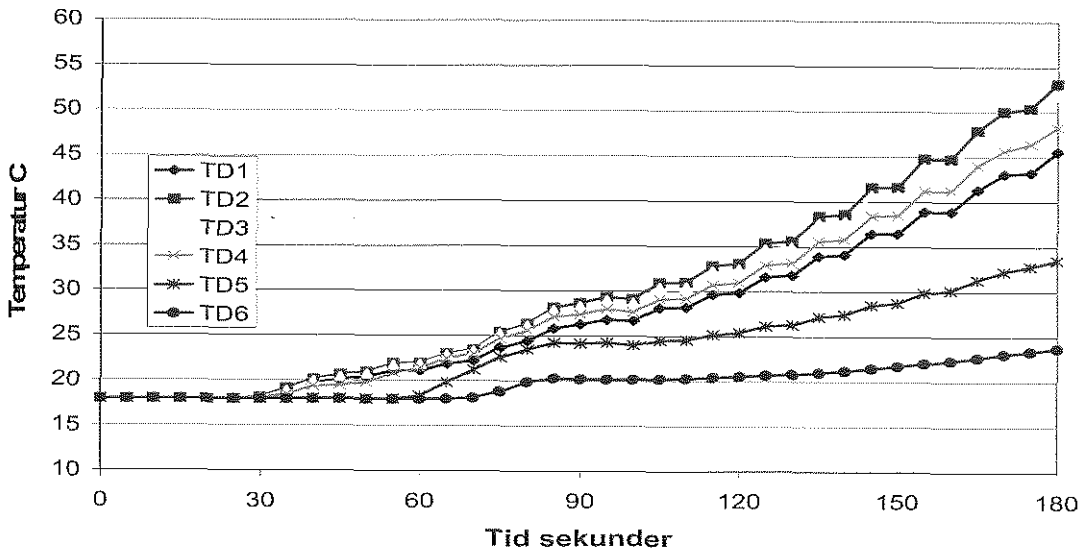


Fig.1B49 Scenario lucka mitt under brand Station E Experimentella resultat

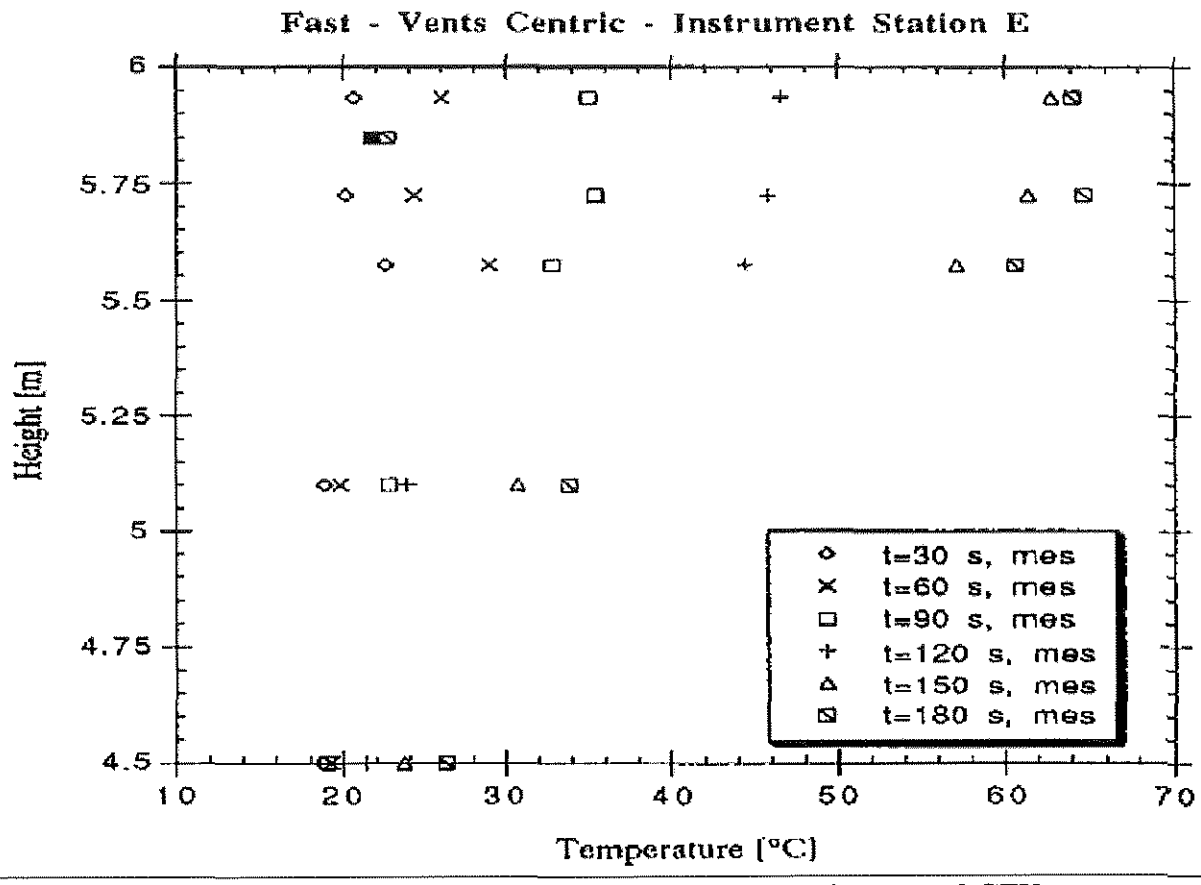



Fig.1B50 Scenario lucka mitt under brand Station E simuleringar med CFX

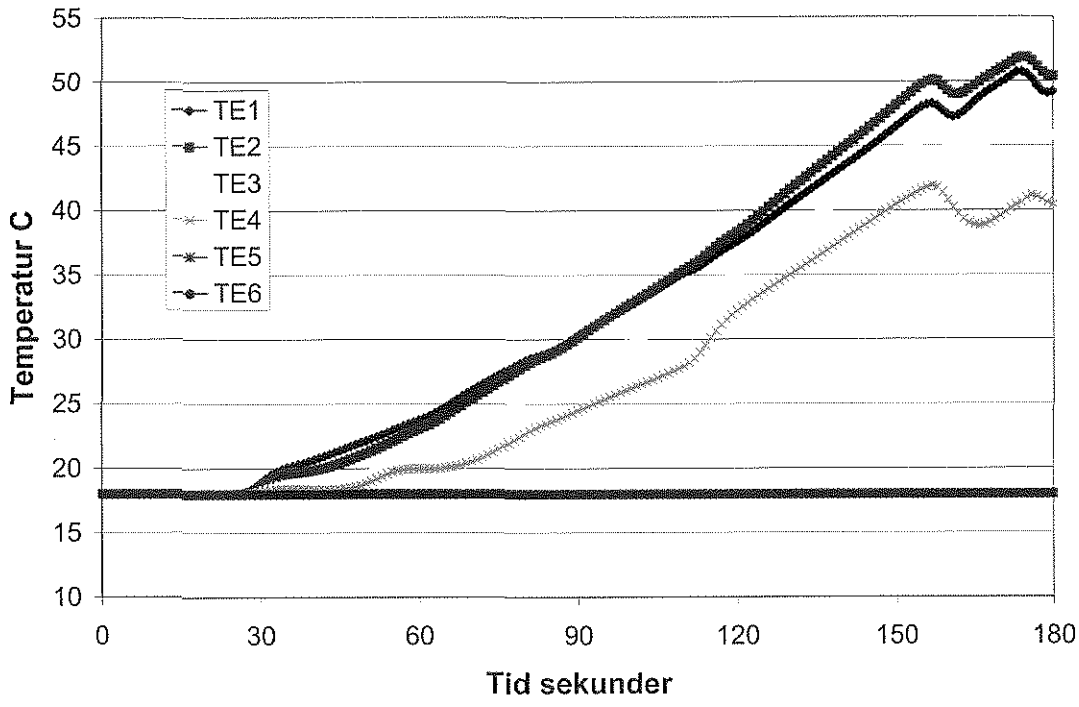


**Fig.1B51 Scenario lucka mitt under brand Station E simuleringar med FDS**

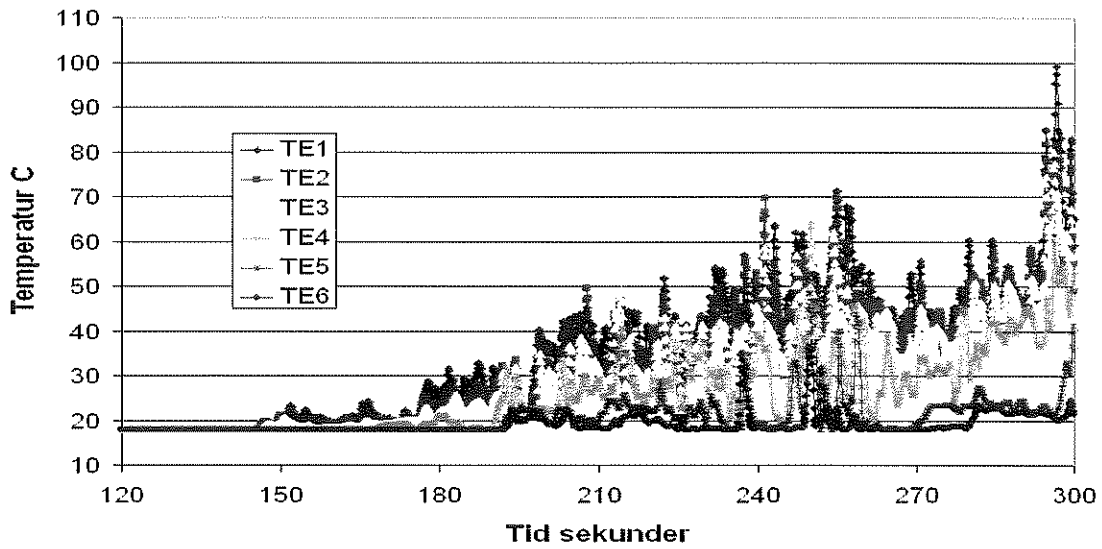



**Fig.1B52 Scenario lucka mitt under brand Station E simuleringar med SMAFS**

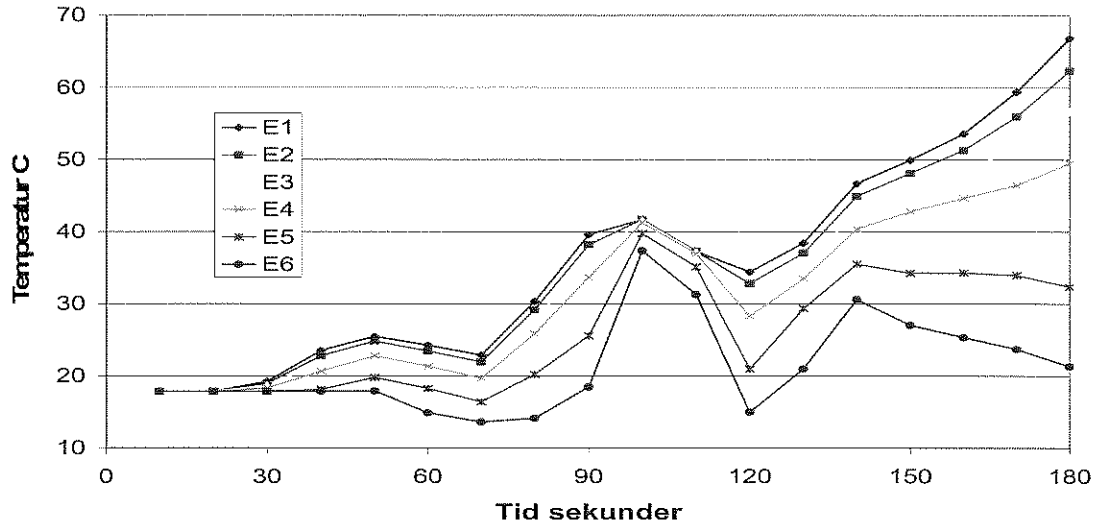



**Fig.1B53 Scenario lucka mitt under brand Station E simuleringar med SOFIE**

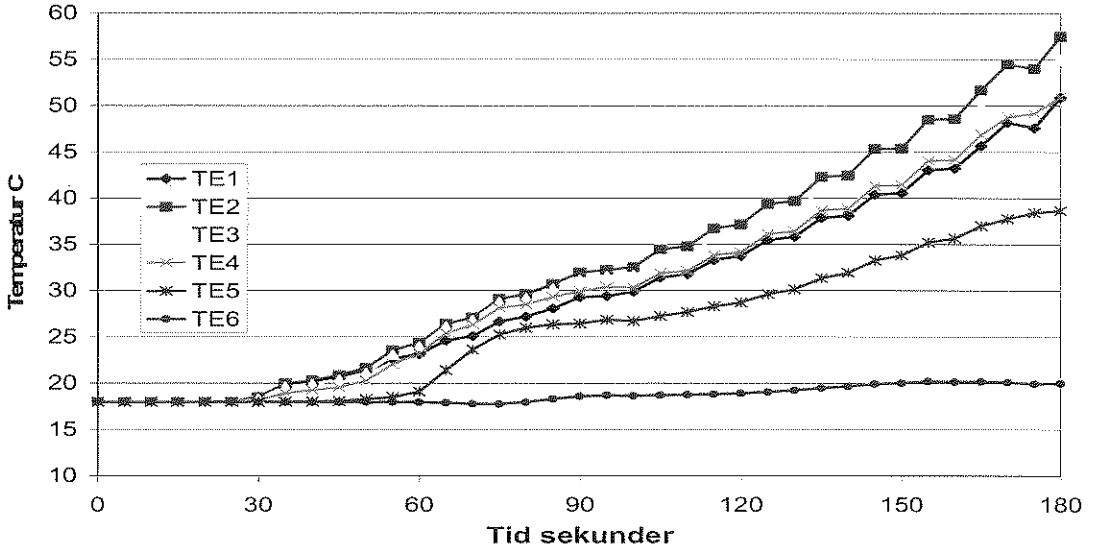


Fig.1B54 Scenario lucka mitt under brand Station F Experimentella resultat

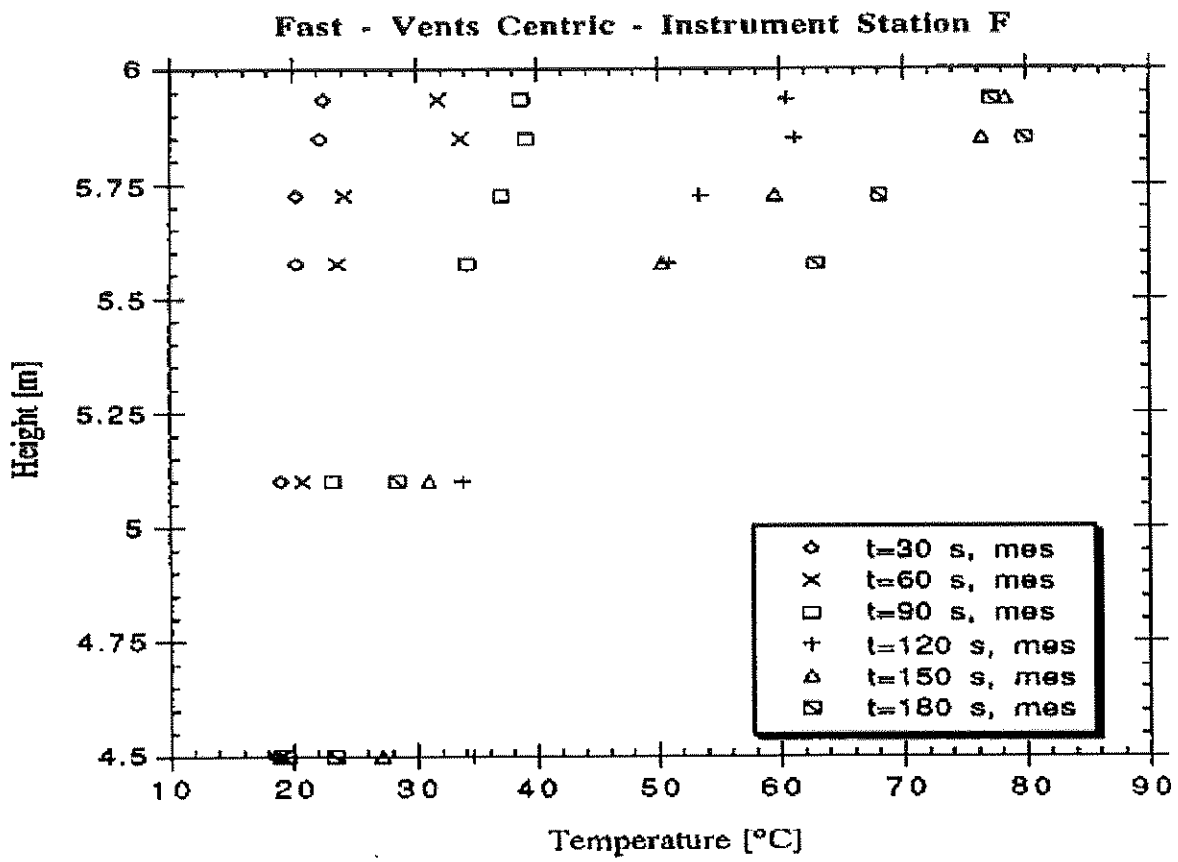



Fig.1B55 Scenario lucka mitt under brand Station F simuleringar med CFX

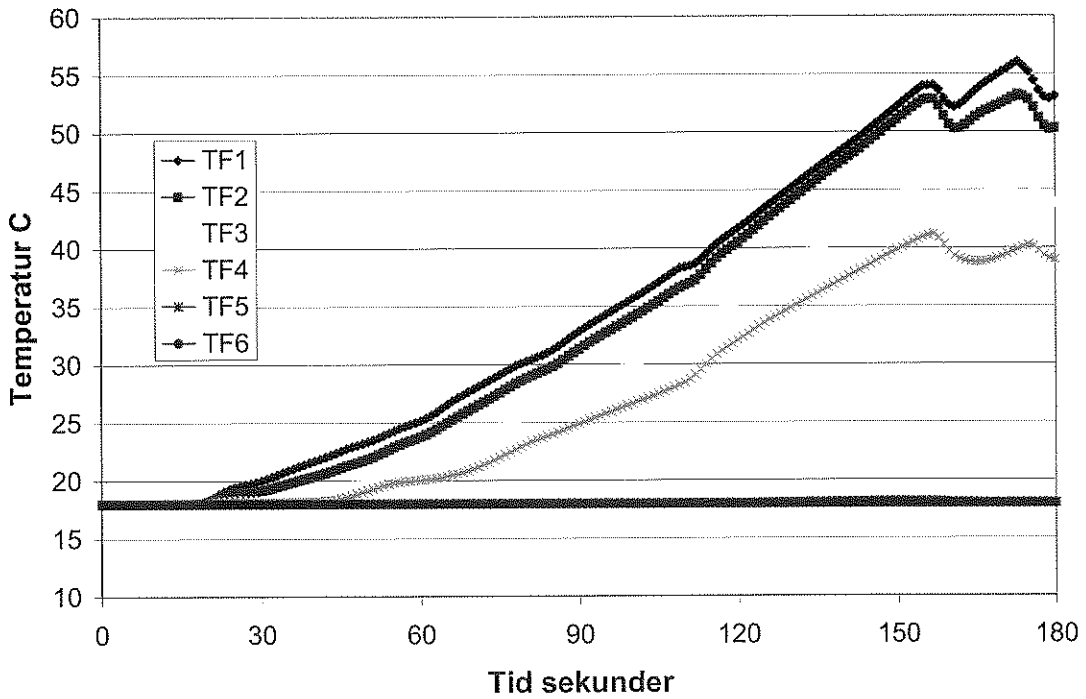


**Fig.1B56 Scenario lucka mitt under brand Station F simuleringar med FDS**

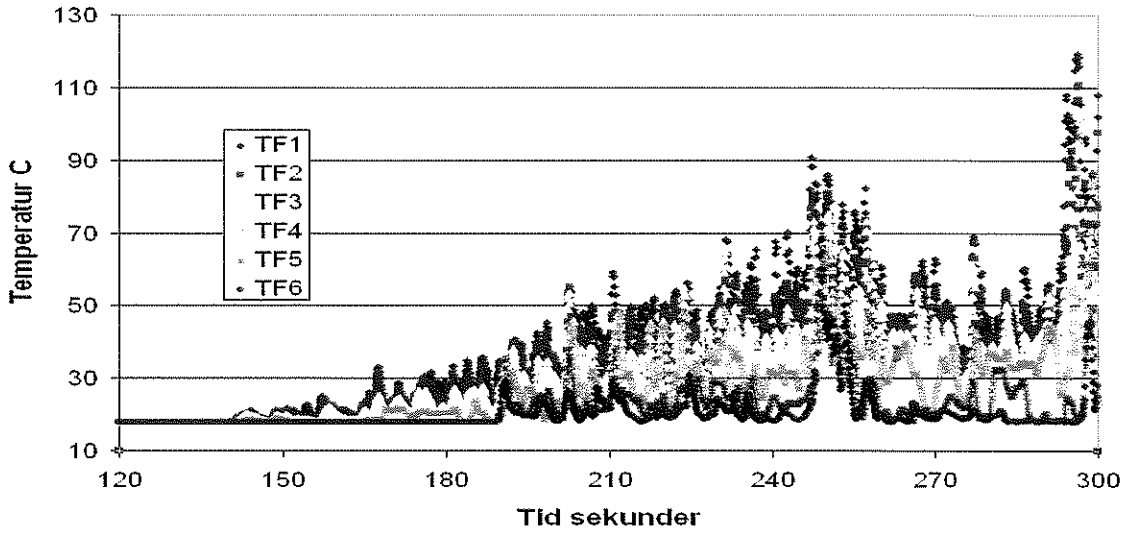



**Fig.1B57 Scenario lucka mitt under brand Station F simuleringar med SMAFS**

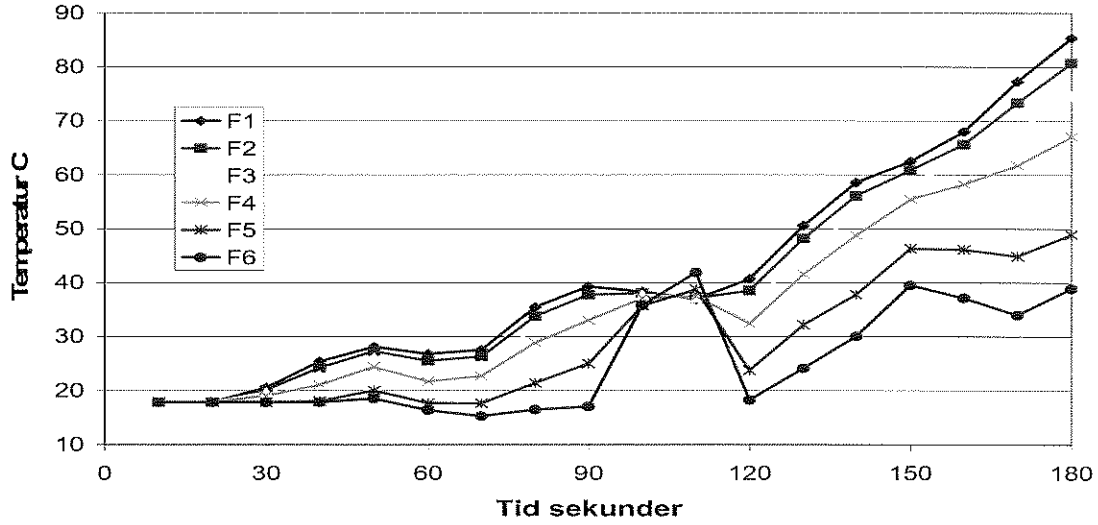



**Fig.1B58 Scenario lucka mitt under brand Station F simuleringar med SOFIE**

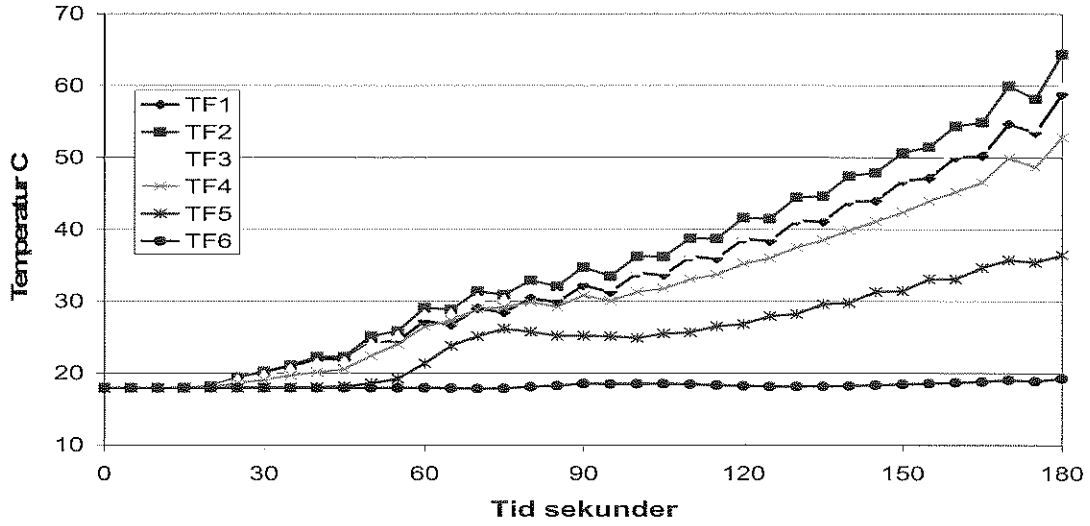


**Fig.1B59 Scenario lucka mitt under brand Station G Experimentella resultat**

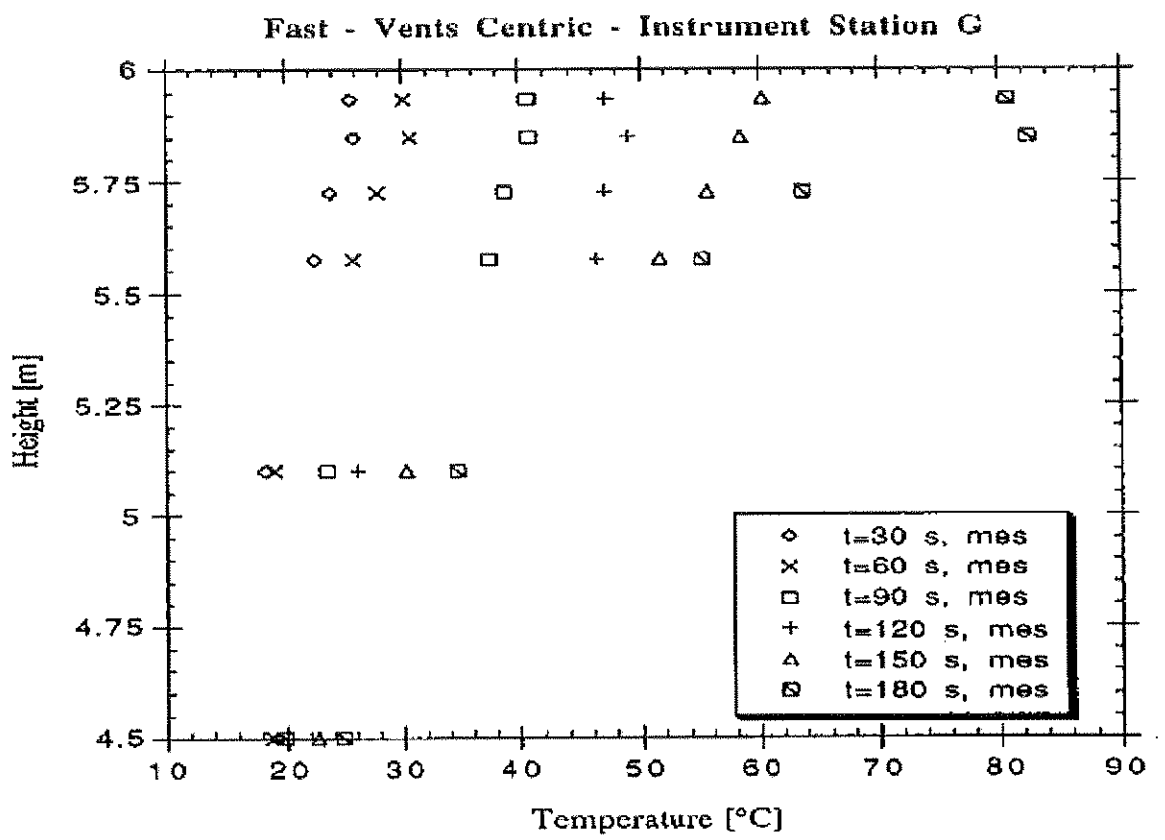



**Fig.1B60 Scenario lucka mitt under brand Station G simuleringar med CFX**

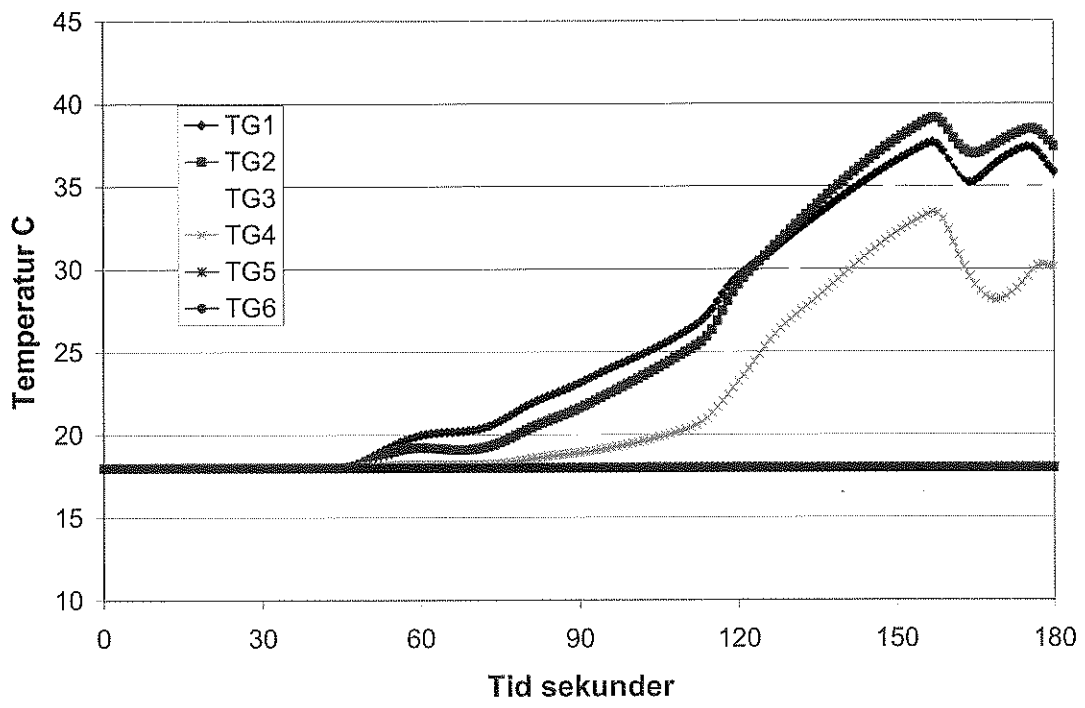


**Fig.1B61 Scenario lucka mitt under brand Station G simuleringar med FDS**

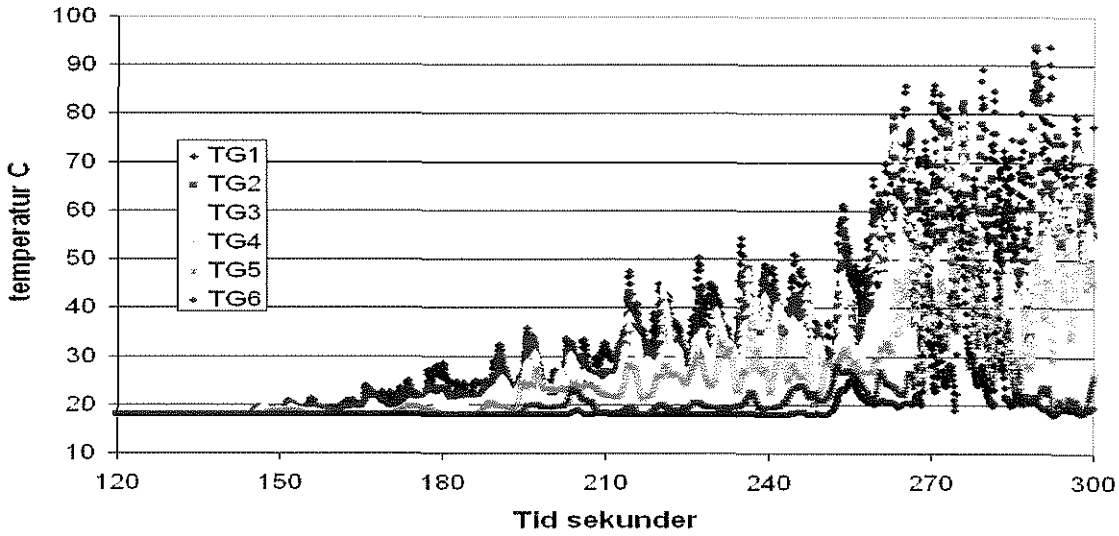



**Fig.1B62 Scenario lucka mitt under brand Station G simuleringar med SMAFS**

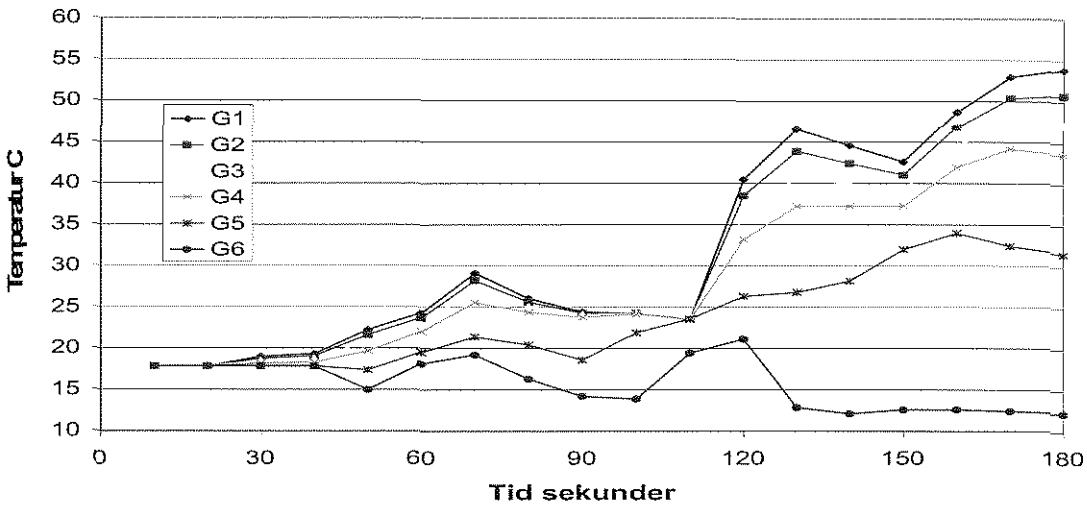



**Fig.1B63 Scenario lucka mitt under brand Station G simuleringar med SOFIE**

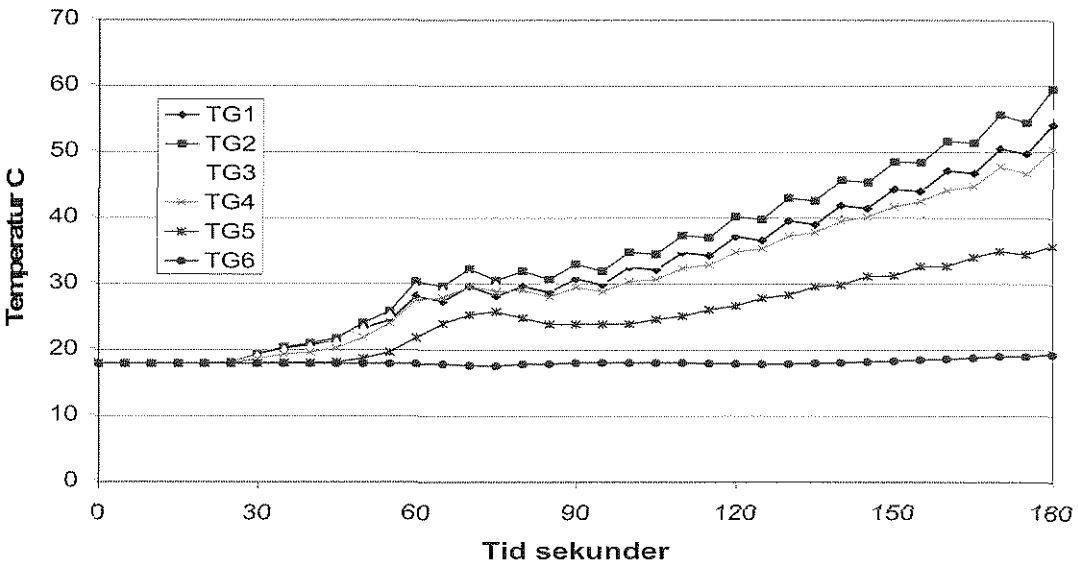


Fig.1B64 Scenario lucka mitt under brand Station H Experimentella resultat

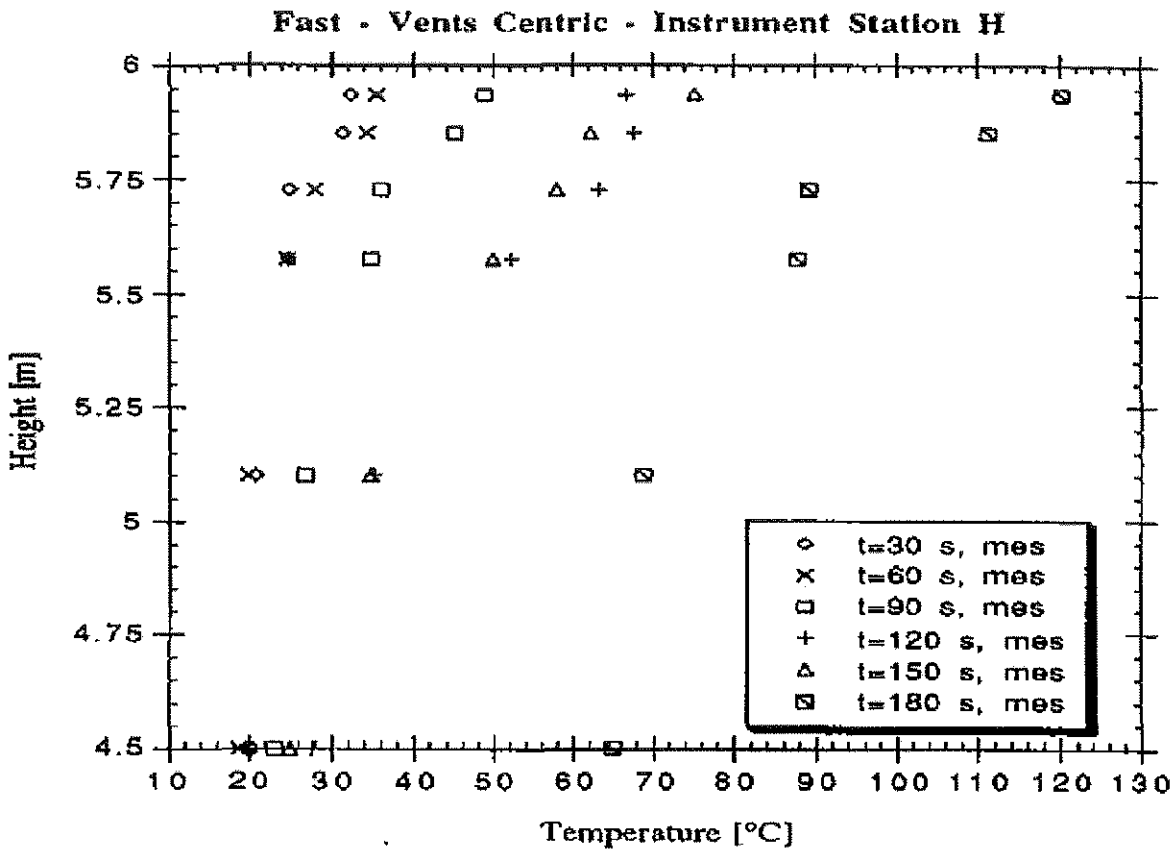



Fig.1B65 Scenario lucka mitt under brand Station H simuleringar med CFX

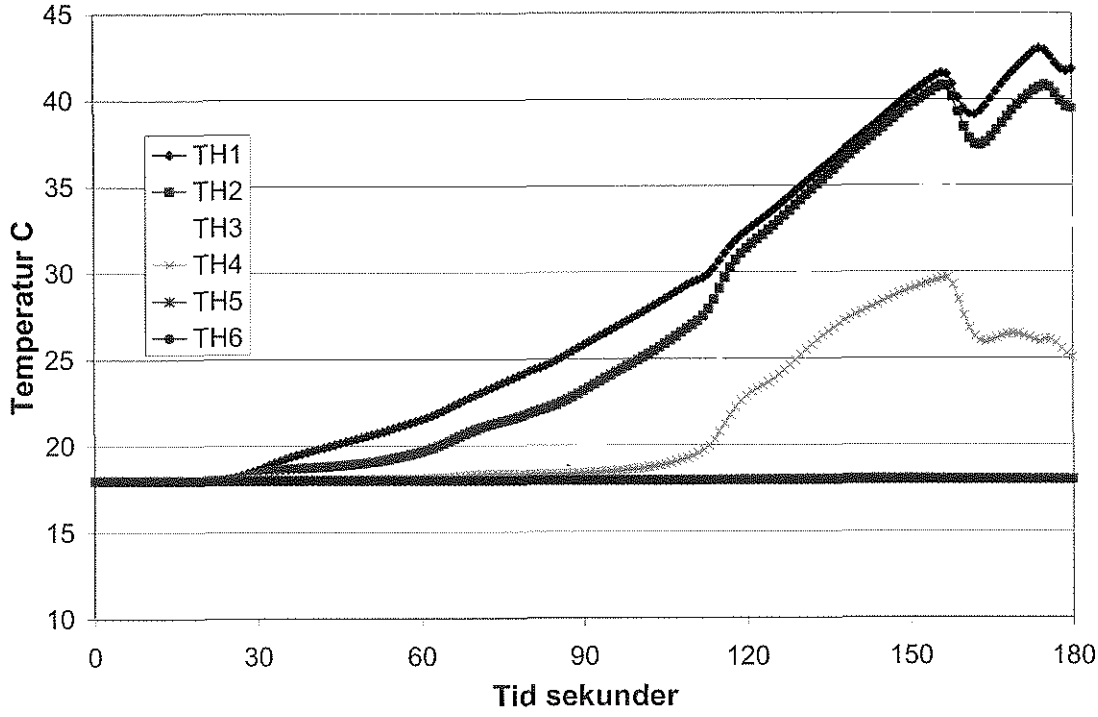


**Fig.1B66 Scenario lucka mitt under brand Station H simuleringar med FDS**

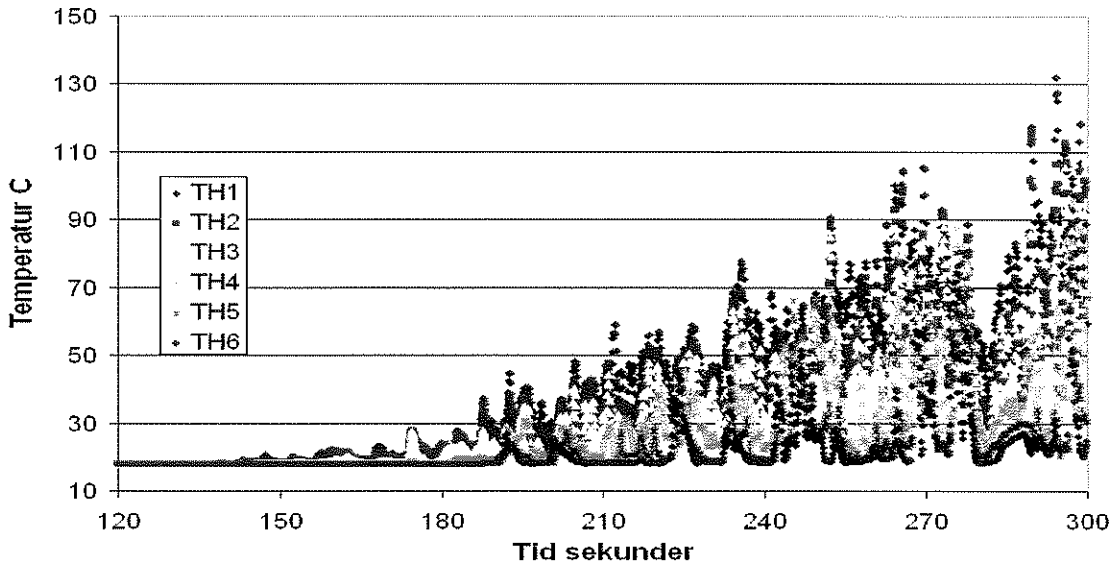



**Fig.1B67 Scenario lucka mitt under brand Station H simuleringar med SMAFS**

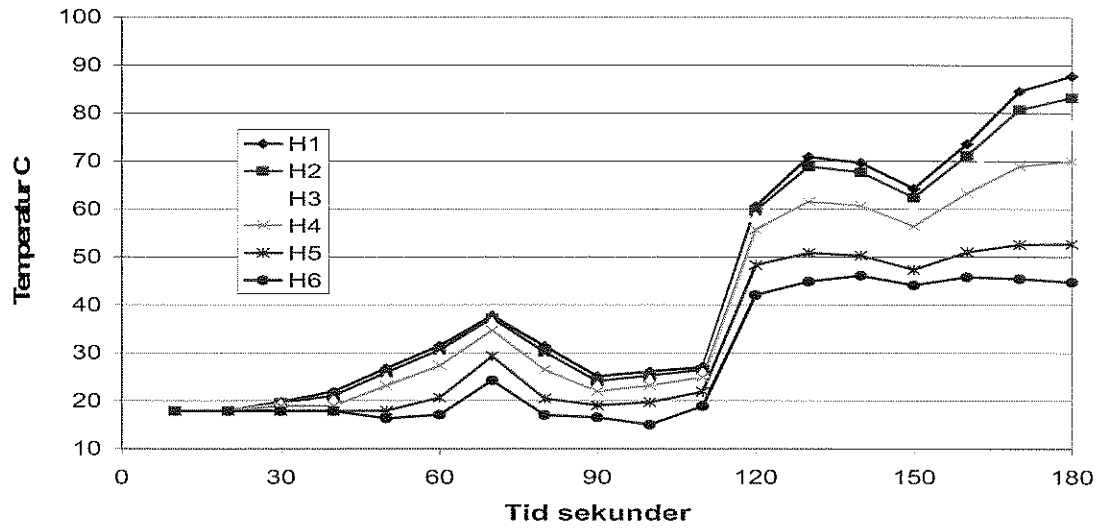



**Fig.1B68 Scenario lucka mitt under brand Station H simuleringar med SOFIE**

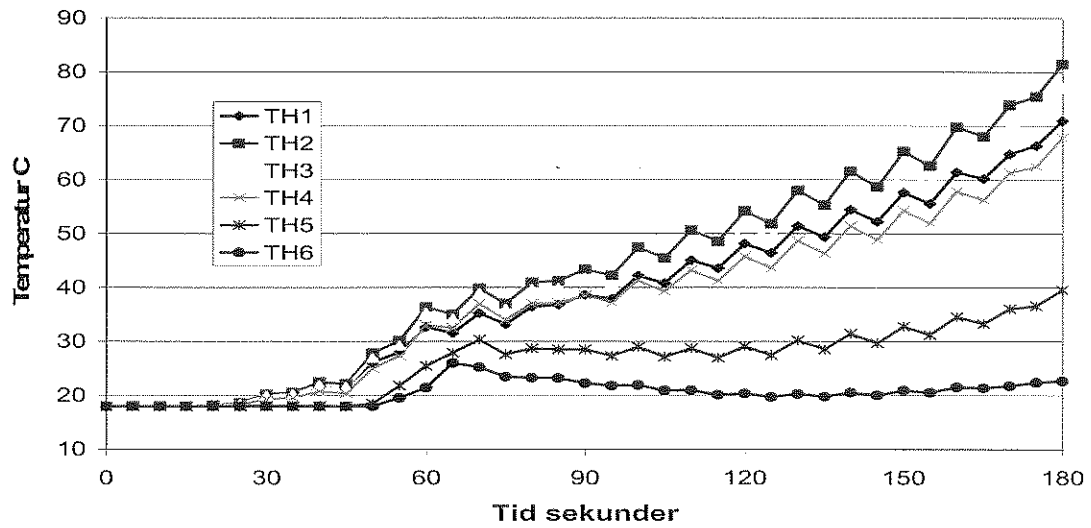


Fig.1B69 Scenario lucka mitt under brand Station I Experimentella resultat

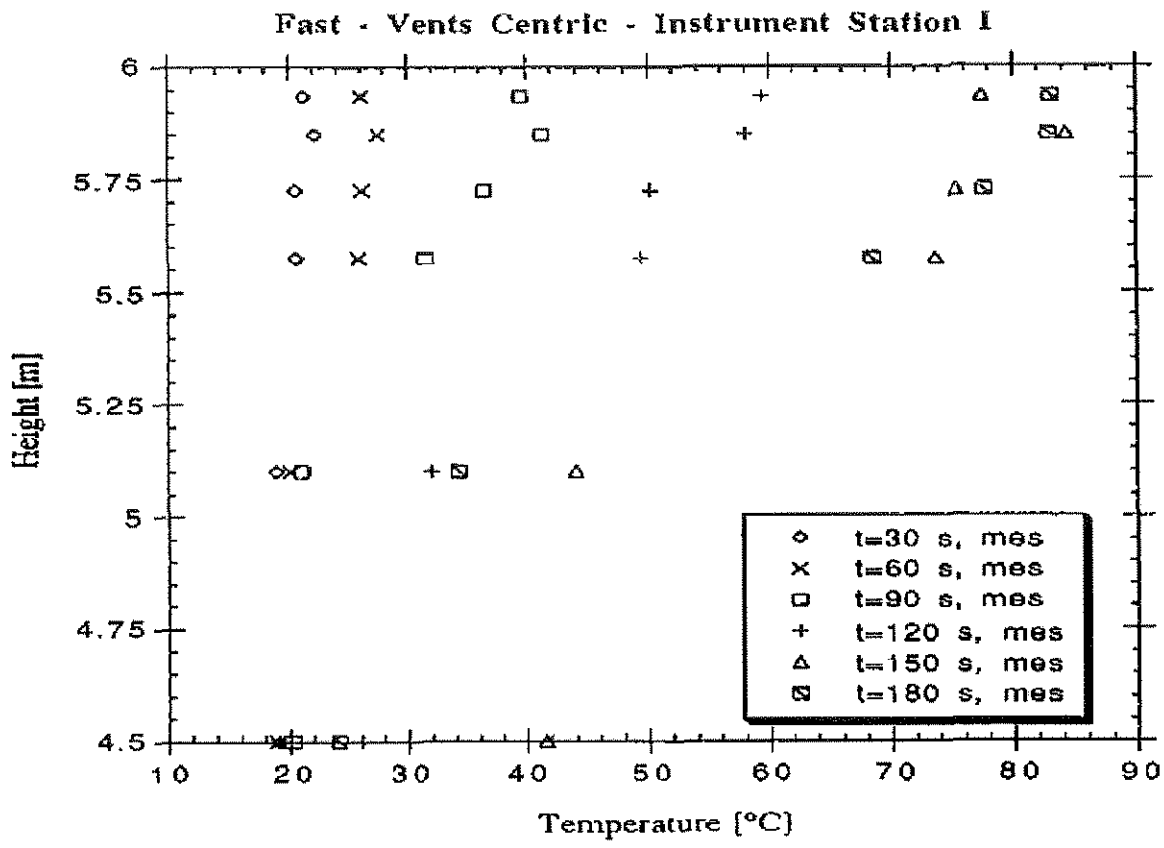



Fig.1B70 Scenario lucka mitt under brand Station I simuleringar med CFX

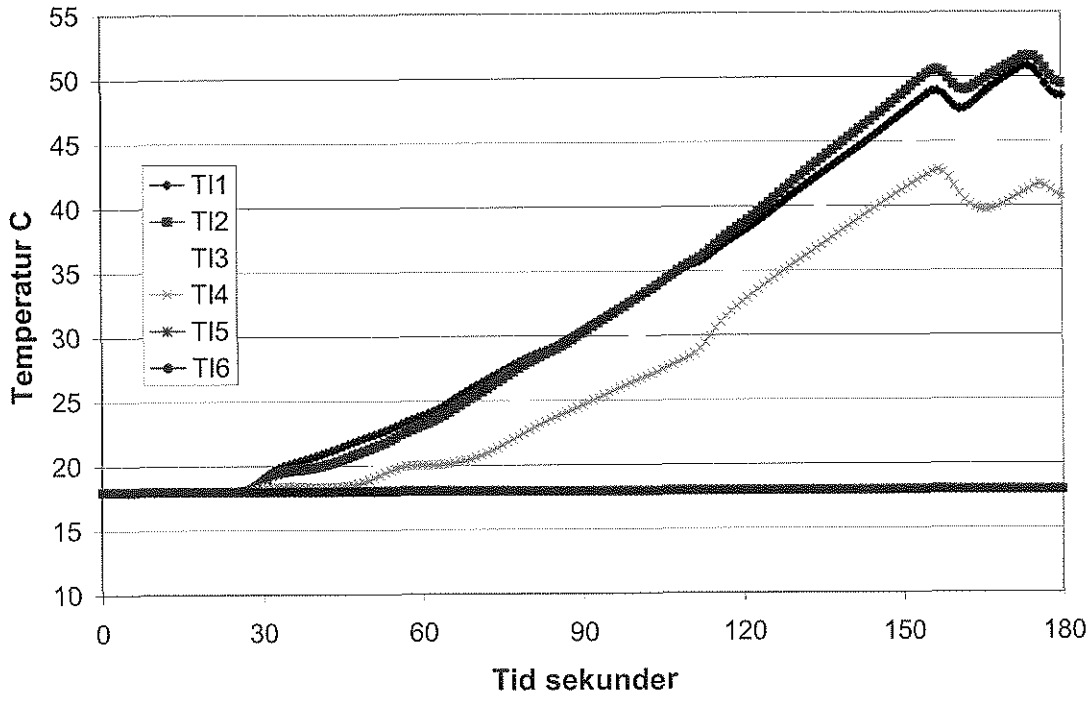


**Fig.1B71 Scenario lucka mitt under brand Station I simuleringar med FDS**

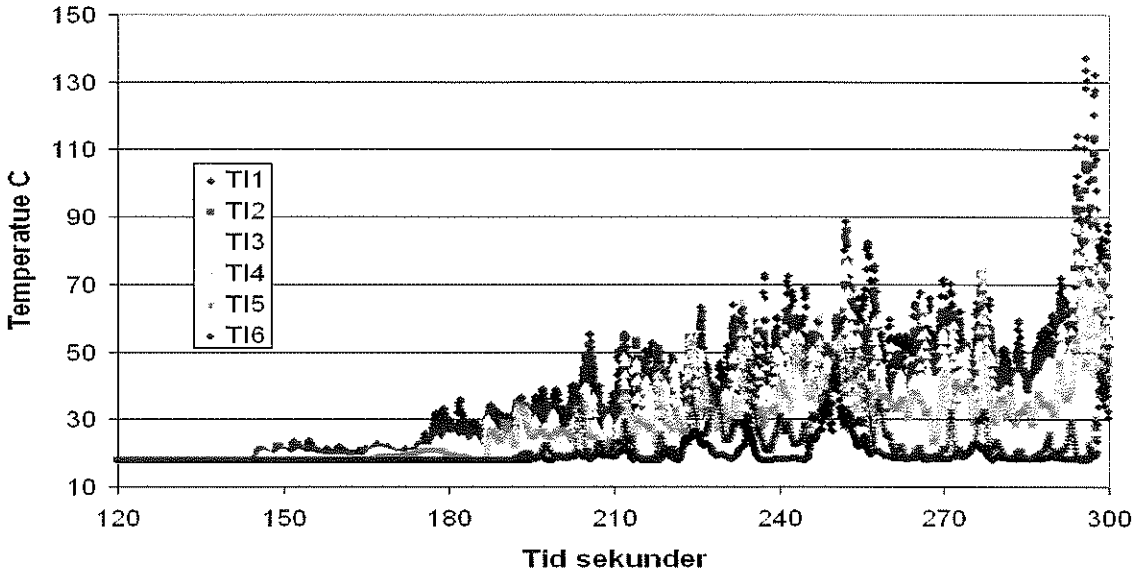



**Fig.1B72 Scenario lucka mitt under brand Station I simuleringar med SMAFS**

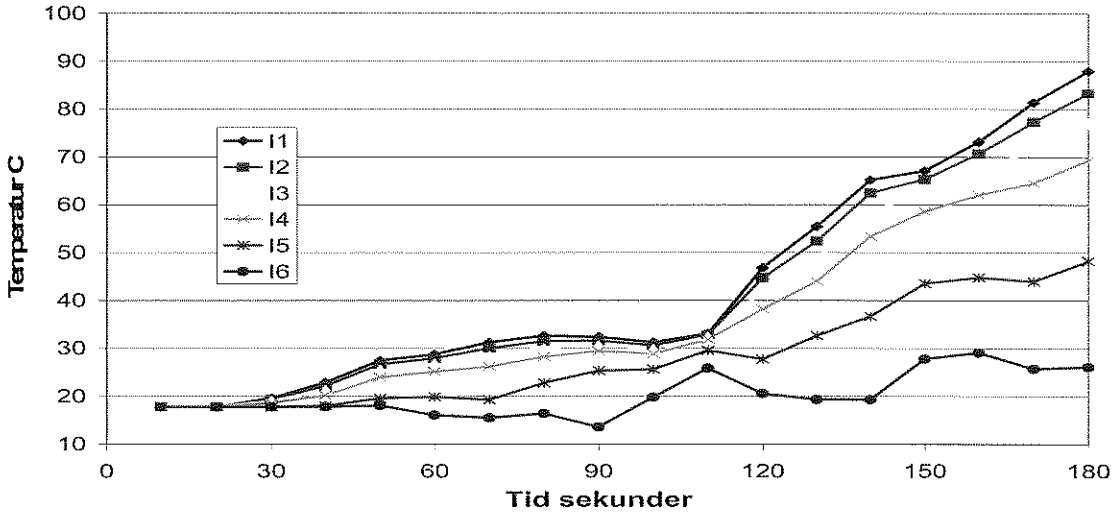



**Fig.1B73 Scenario lucka mitt under brand Station I simuleringar med SOFIE**

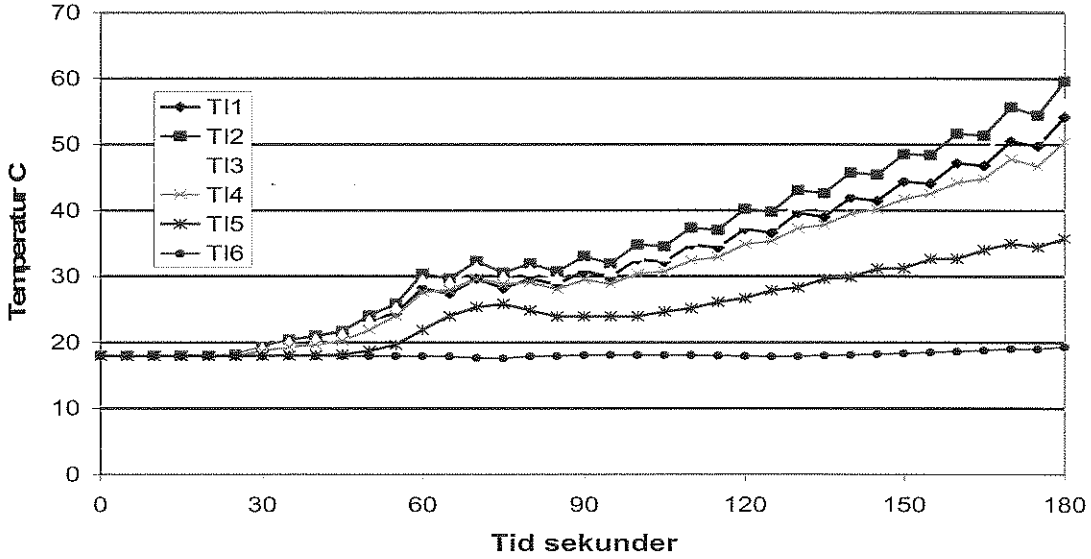


Fig.1B74 Scenario lucka mitt under brand Station K Experimentella resultat

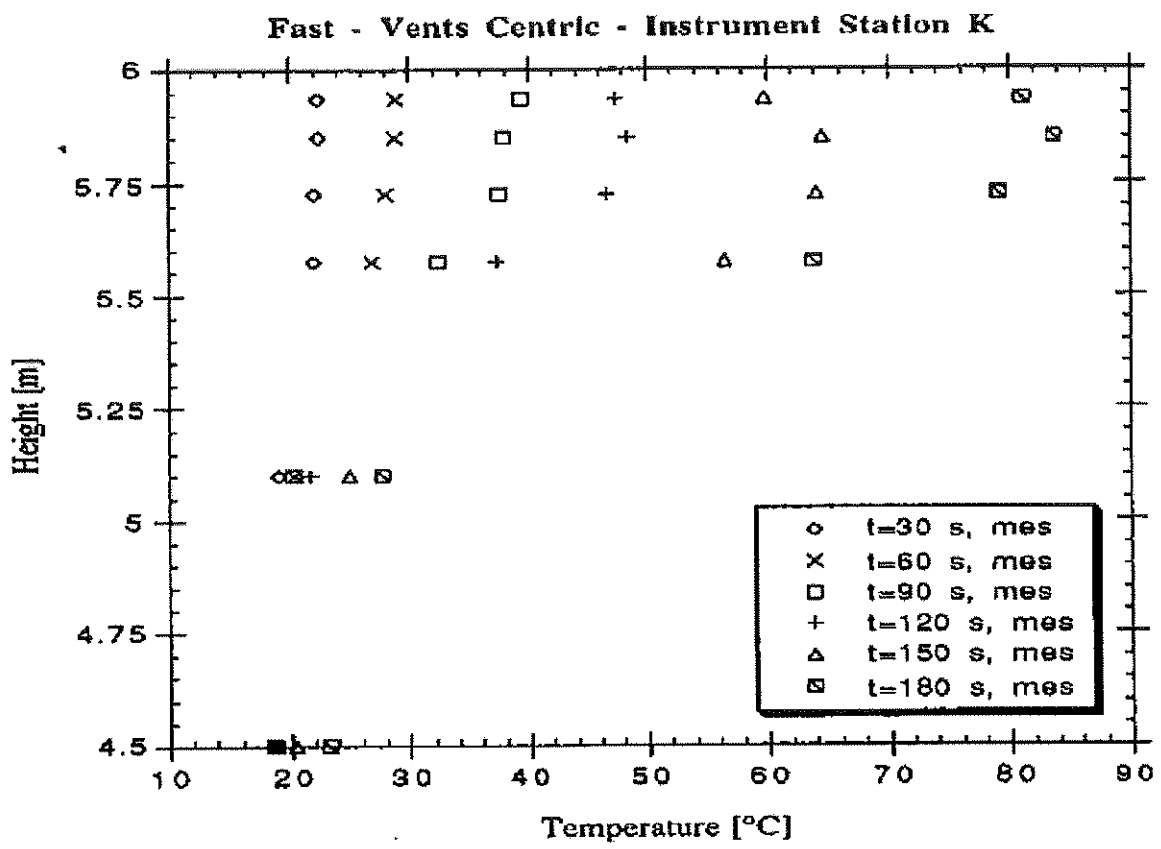



Fig.1B75 Scenario lucka mitt under brand Station K simuleringar med CFX

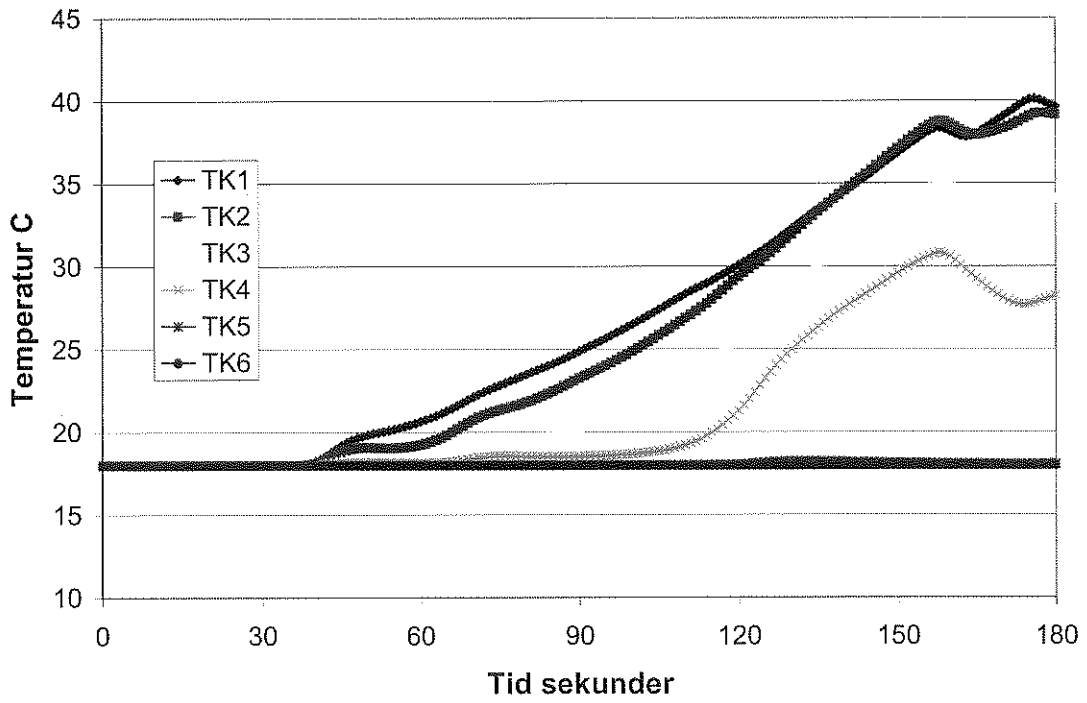


**Fig.1B76 Scenario lucka mitt under brand Station K simuleringar med FDS**

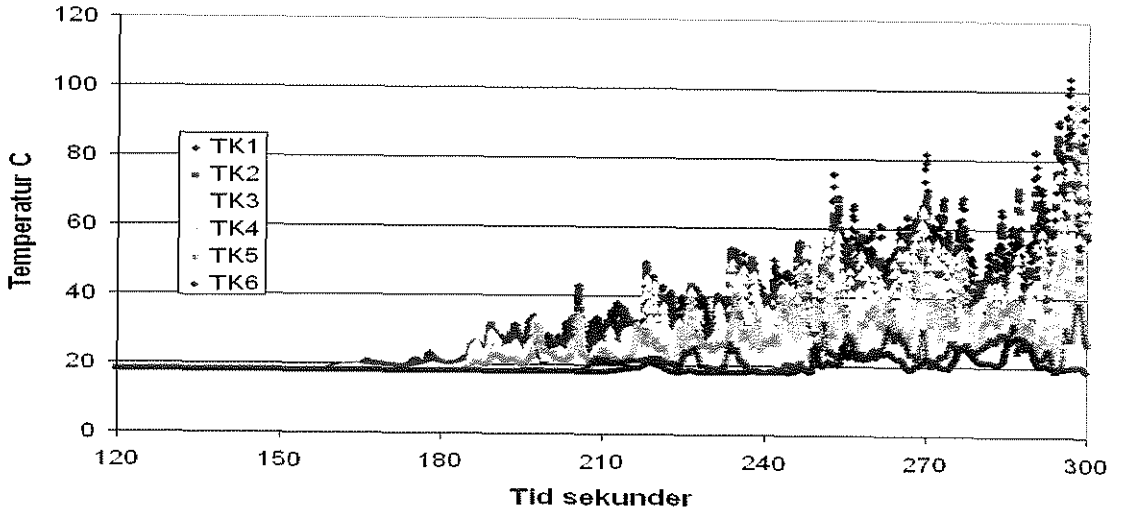



**Fig.1B77 Scenario lucka mitt under brand Station K simuleringar med SMAFS**

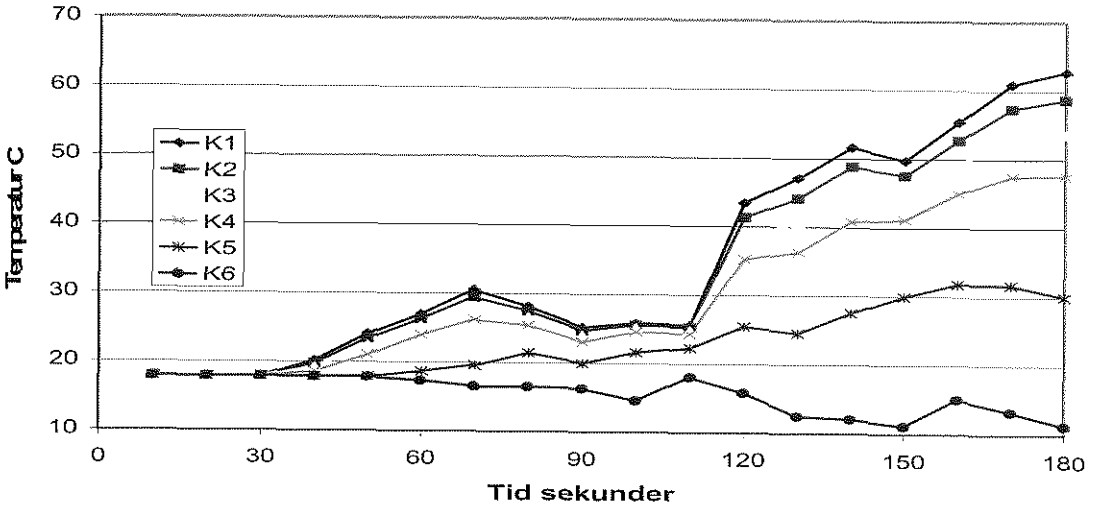



**Fig.1B78**

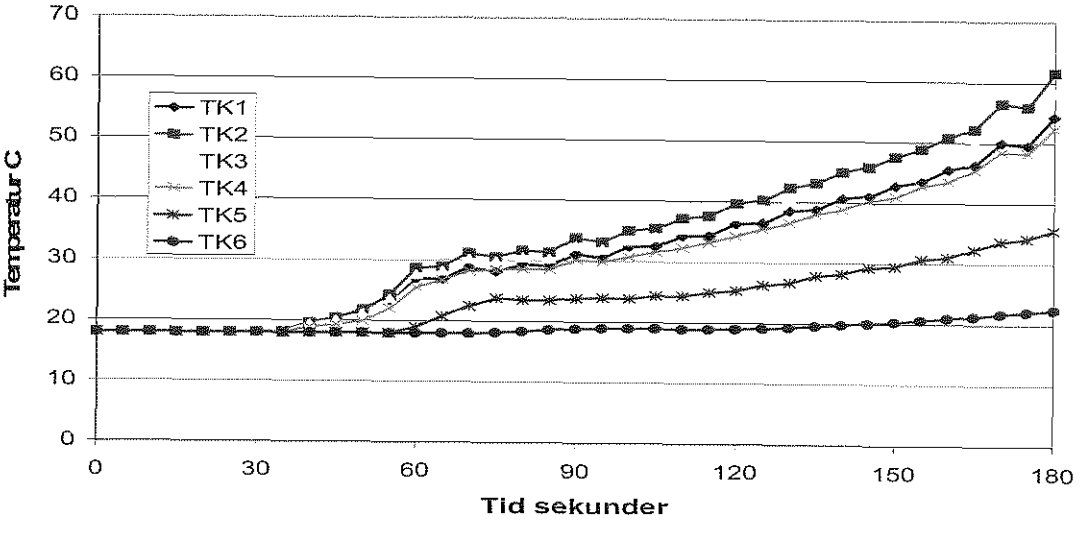


Fig.1B79 Scenario lucka mitt under brand Station L Experimentella resultat (i luckan)

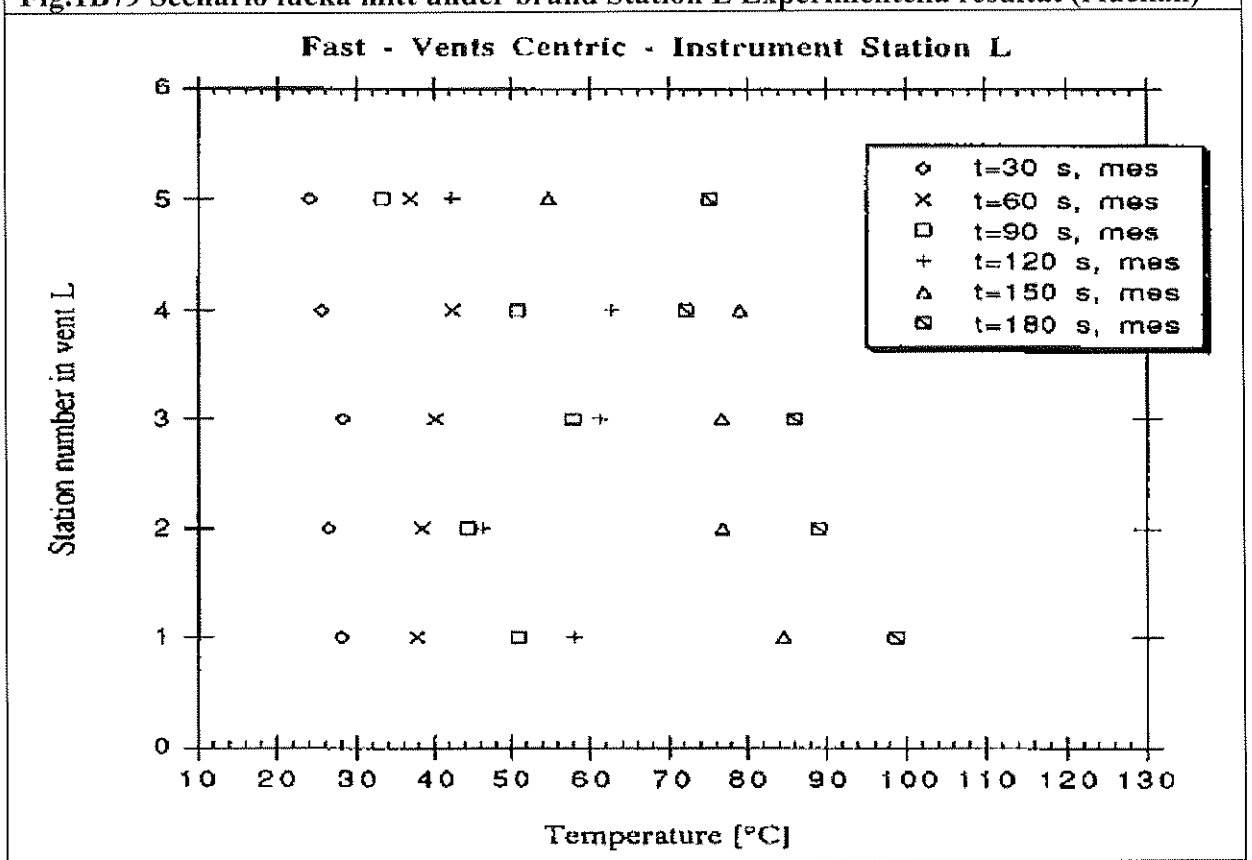



Fig.1B80 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med CFX (i luckan)

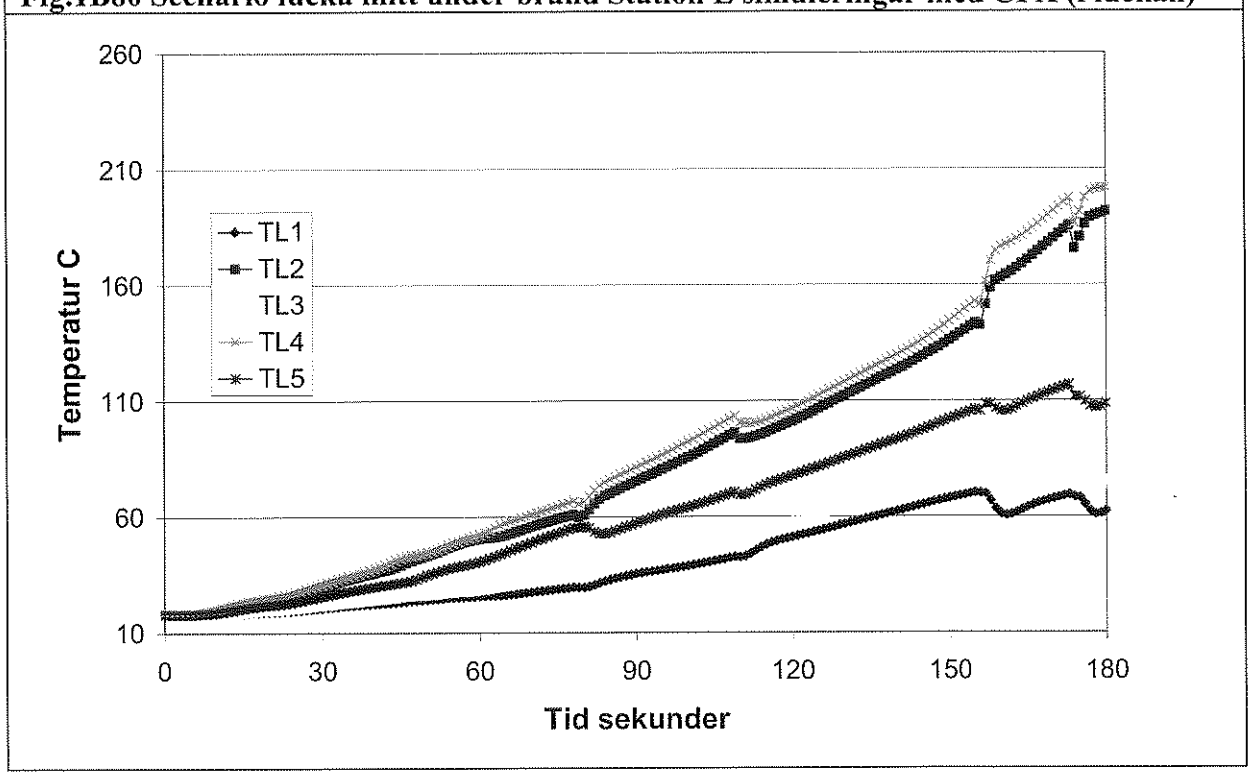


**Fig.1B81 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med FDS (i luckan)**

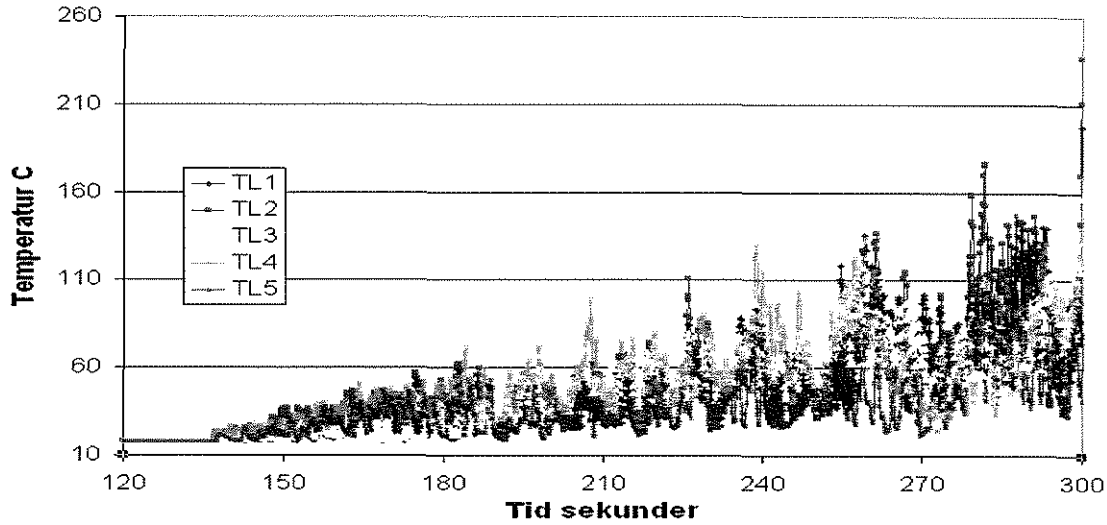



**Fig.1B82 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med SMAFS (i luckan)**

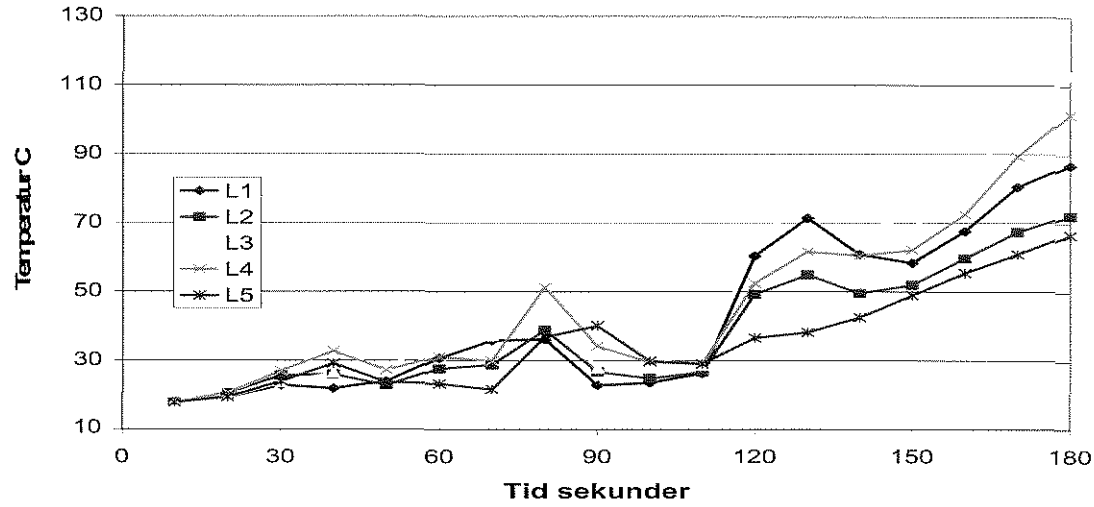



**Fig.1B83 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med SOFIE (i luckan) pga symmetriantagandet blir TL1=TL3 och TL2 =TL4**

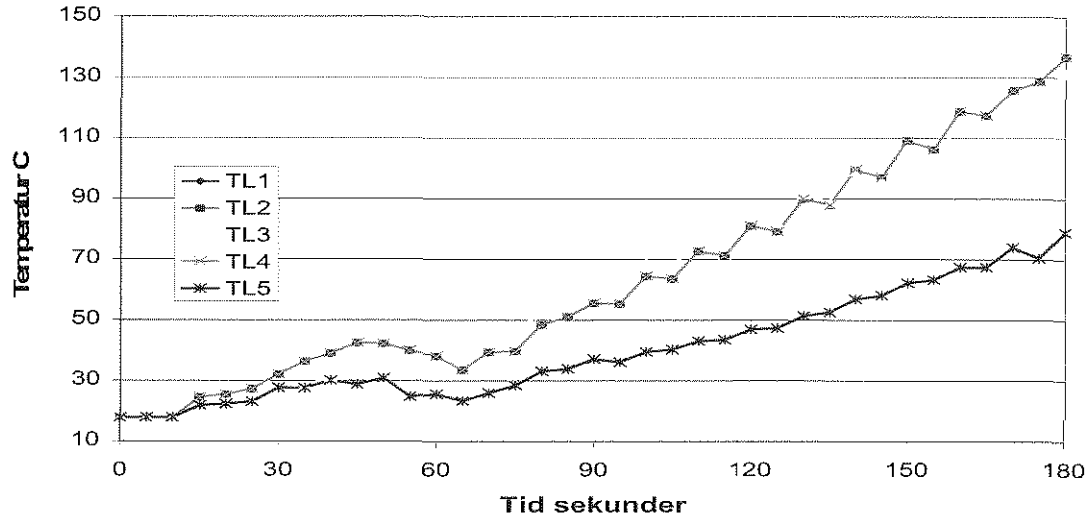
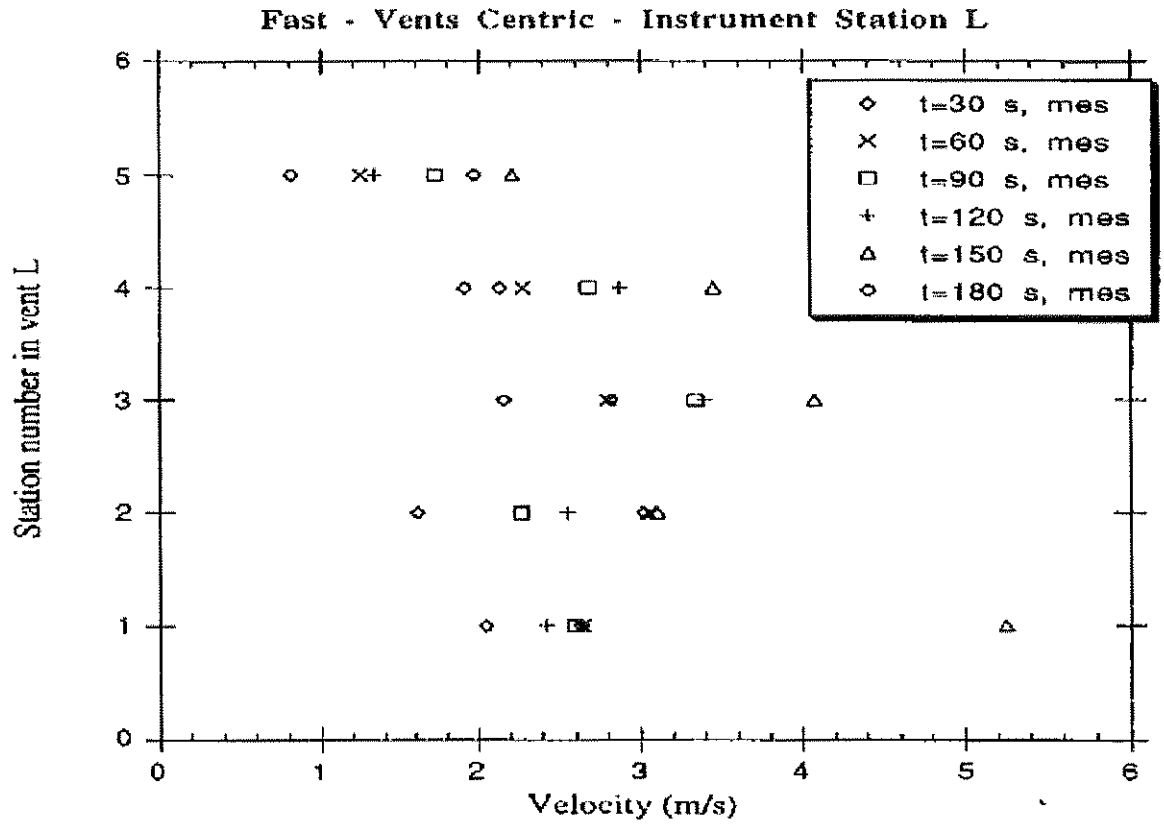


**Fig.1B84 Scenario lucka mitt under brand Station L Experimentella resultat (hastighet i luckan)**




**Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med CFX av hastigheten ej redovisade**

**Fig.1B85 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med FDS av hastigheten i luckan**

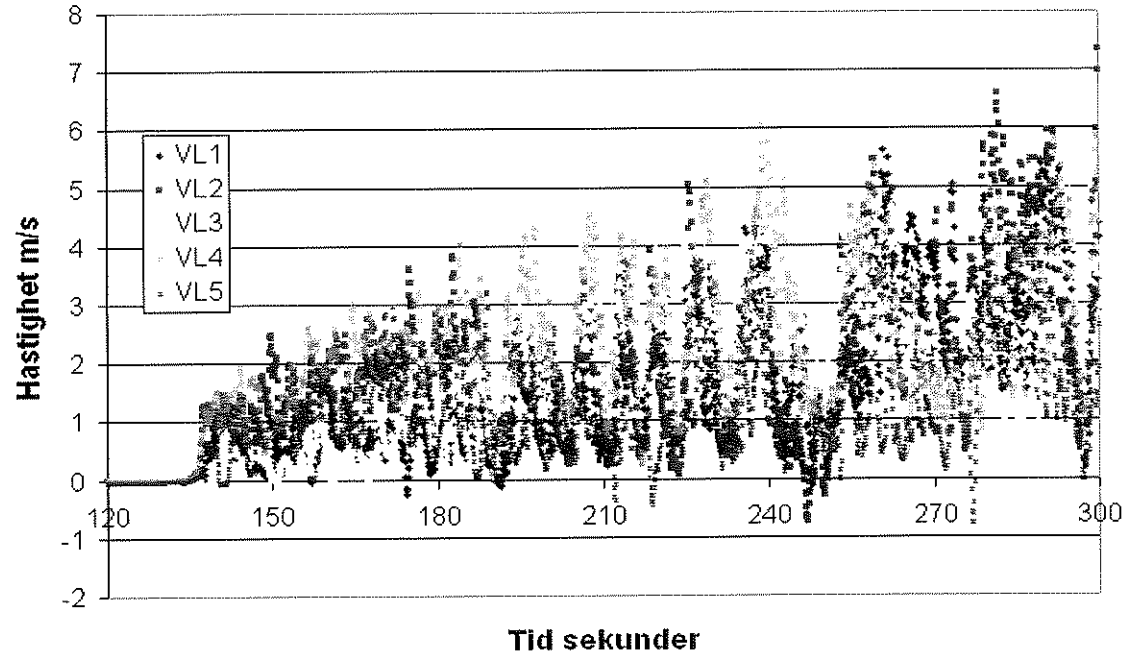


**Fig.1B86 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med SMAFS av hastigheten i luckan**

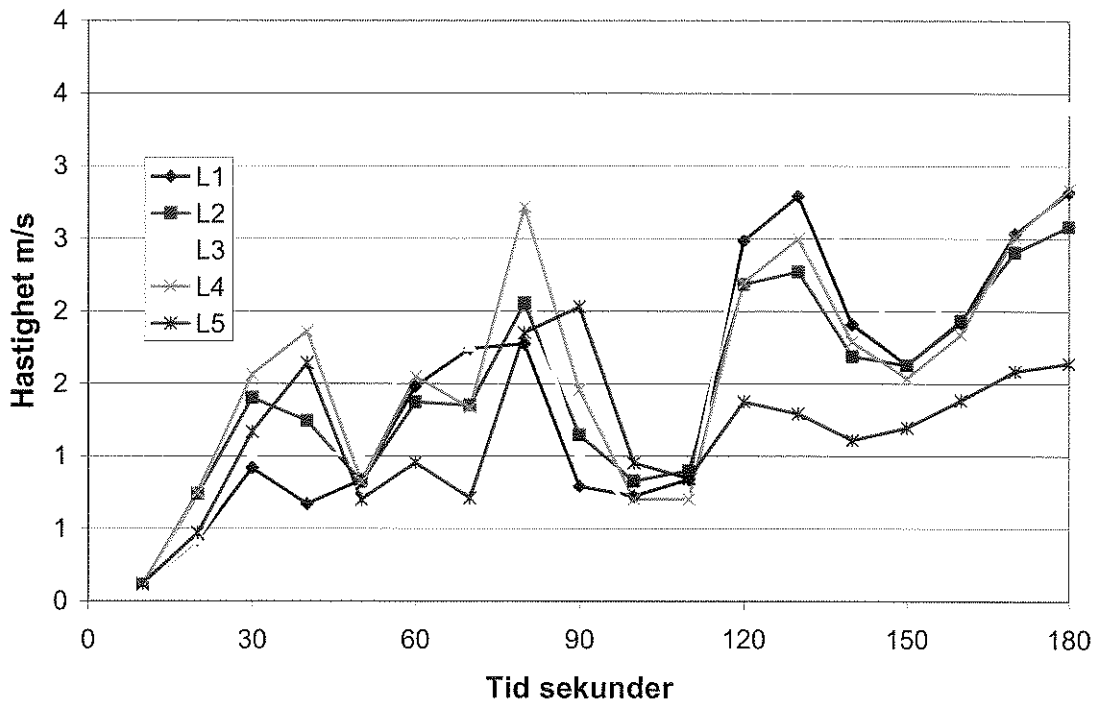
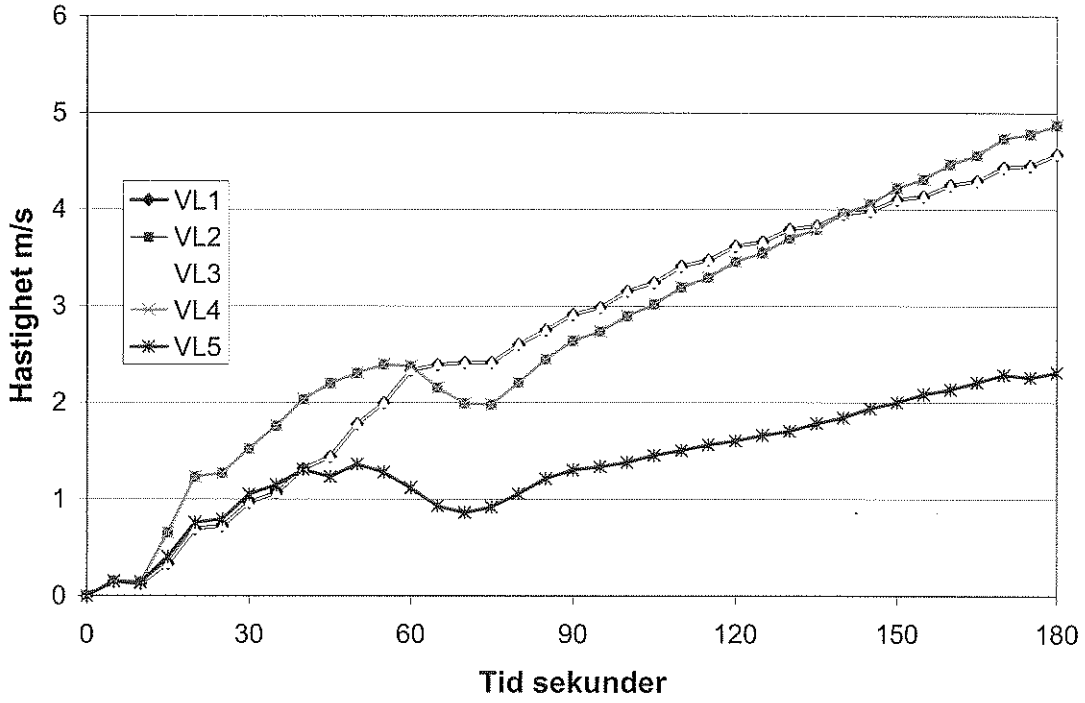



**Fig.1B87 Scenario lucka mitt under brand Station L simuleringar med SOFIE av hastigheten i luckan. På grund av symmetriantagandet blir VL1=VL3 och VL2 =VL4**



# 7. Värdering av jämförelse mellan experiment och simuleringar

**Översiktlig jämförelse mellan koderna av brandgasfyllning i rummet**

*Scenarium med luckan rakt över branden*

Simuleringarna (Fig.B5—10, Fig.1B17-22) med FDS, SMAFS och SOFIE visar att flamman lutar något till vänster och att det blir något varmare på den vänstra sidan om branden. Motsvarande lutning och temperaturskillnad mellan den vänstra och högra sidan som observerades vid experimenten saknades vid simuleringarna med CFX.

*Scenarium med luckan 3 meter från branden*

Simuleringarna (Fig.B11—116, Fig.1B23-28) med FDS och SOFIE visar att flamman lutar något till vänster. Motsvarande lutning observerades vid experimenten saknades vid simuleringarna med CFX. Simuleringarna visar även att det blir kallare på höger sida efter luckan.

**Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment för scenariet med luckan rakt över branden**

I Fig.1B88 visas den relativa temperaturökningen (Tsimulerad-18)/(Texperiment-18) för de två översta termoelementen i termoelementträden A-K efter 180 sekunder dvs. ett mått på takstrålens temperatur på båda sidor om branden mitt r rummet. FDS värdena är medelvärdesbildade över 3 sekunder.

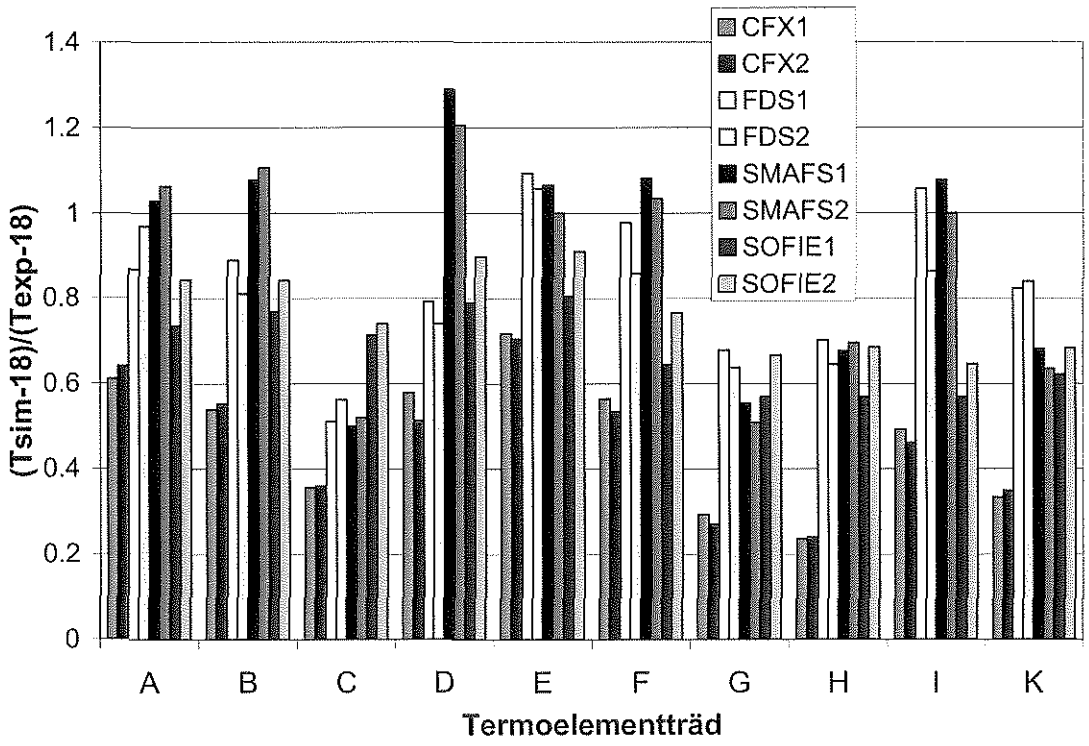



**Fig.1B88 Relativ temperaturökning normerad mot det experimentella värdet vid 0.065 och 0.15 m avstånd från taket efter 180 sekunder**

I Fig.1B89 visas motsvarandemotsvarande medelvärde och standardavvikelse

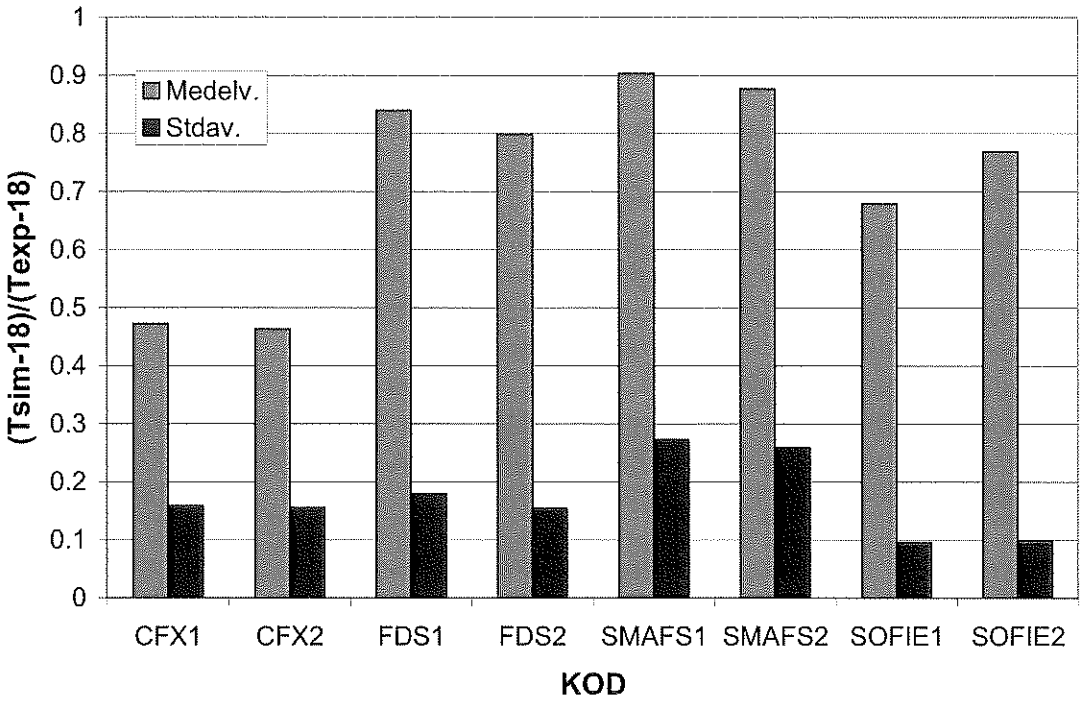



**Fig.1B89 Medelvärdet och standardavvikelsen för den relativ temperaturökning normerad mot det experimentella värdet vid 0.065 och 0.15 m avstånd från taket efter 180 sekunder**

Av fig.1B88-89 framgår att :koderna:

- CFX underskattar temperaturen under taket i alla mätpunkter, i medeltal med cirka 50-55%. Standardavvikelsen är cirka 15 %
- FDS underskattar temperaturen under taket i 80% av mätpunkterna, i medeltal med cirka 15-20%. Standardavvikelsen är cirka 15 %
- SMAFS underskattar temperaturen under taket i 40% av mätpunkterna, i medeltal med cirka 10-15%.%. Standardavvikelsen är cirka 25 %
- SOFIE underskattar temperaturen under taket i alla mätpunkterna, i medeltal med cirka 25-35%. Standardavvikelsen är cirka 10 %

I Fig.1B90 visas den relativa temperaturökningen (Tsimulerad-18)/(Texperiment-18) för de fem termoelementen i luckan, L, efter 180 sekunder dvs. gasernas utströmningstemperatur genom luckan. FDS värdena är medelvärdesbildade över 3 sekunder.

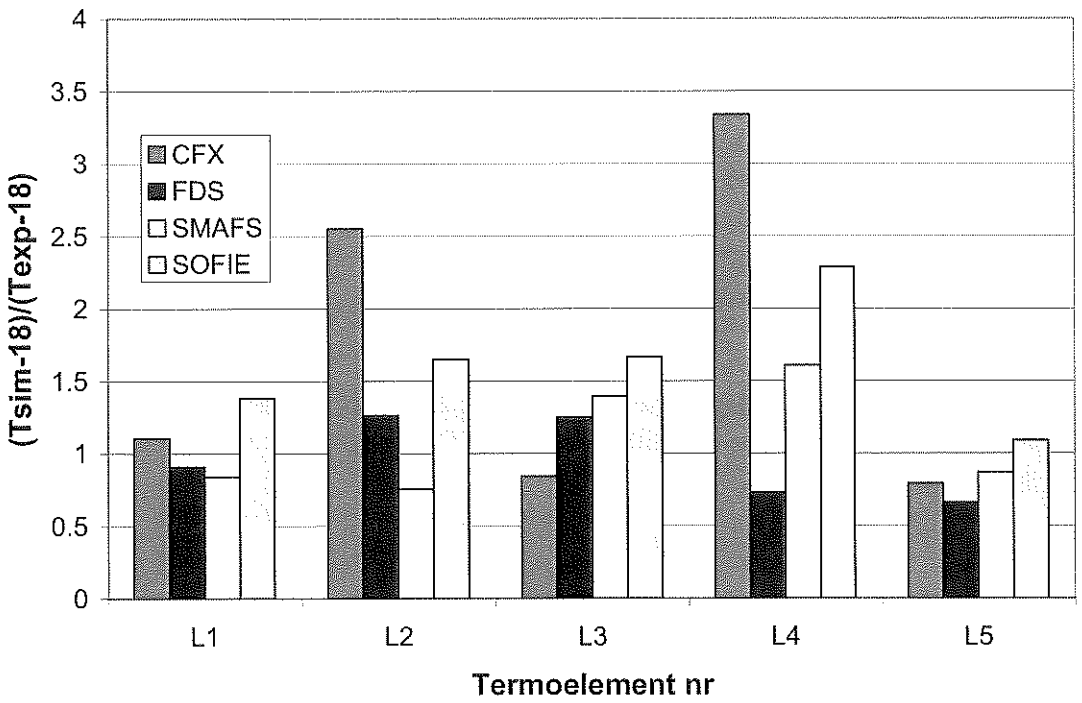



**Fig.1B90 Relativ temperaturökning normerad mot det experimentella värdet vid i luckan efter 180 sekunder**

I Fig.1B91 visas motsvarandemotsvarande medelvärde och standardavvikelse

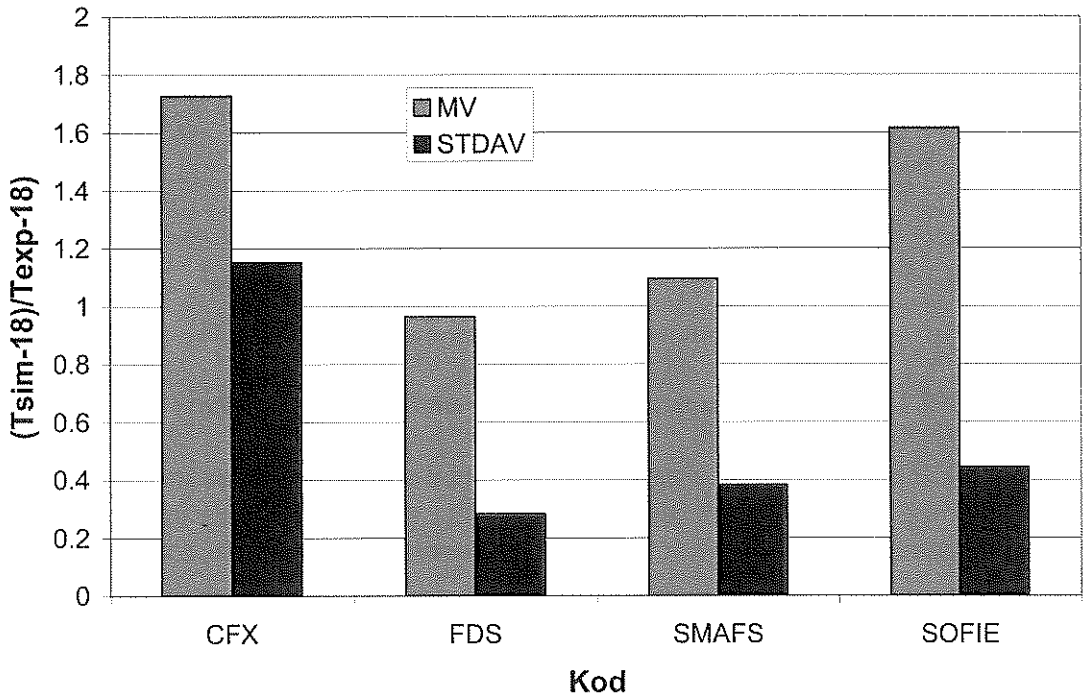



**Fig.1B91 Medelvärdet och standardavvikelsen för den relativ temperaturökning normerad mot det experimentella i luckan efter 180 sekunder**

Av fig.1B90 - 91 framgår att koderna:

- CFX överskattar temperaturen i luckan 60% mätpunkter, i medeltal överskattning med cirka 70%. Standardavvikelsen är cirka 110 %.
- FDS underskattar temperaturen i luckan 60% mätpunkter, i medeltal en underskattning med cirka 5%. Standardavvikelsen är cirka 25 %.
- SMAFS överskattar temperaturen i luckan i 40% av mätpunkterna, i medeltal en överskattning med cirka 10%. Standardavvikelsen är cirka 40 %.
- SOFIE överskattar temperaturen i luckan i alla mätpunkterna, i medeltal med cirka 60%. Standardavvikelsen är cirka 45 %.

I Fig.1B92 visas de experimentella och simulerade vertikala gashastigheterna (FDS, SMAFS och SOFIE) efter 180 sekunder. FDS värdena är medelvärdesbildade över 3 sekunder.

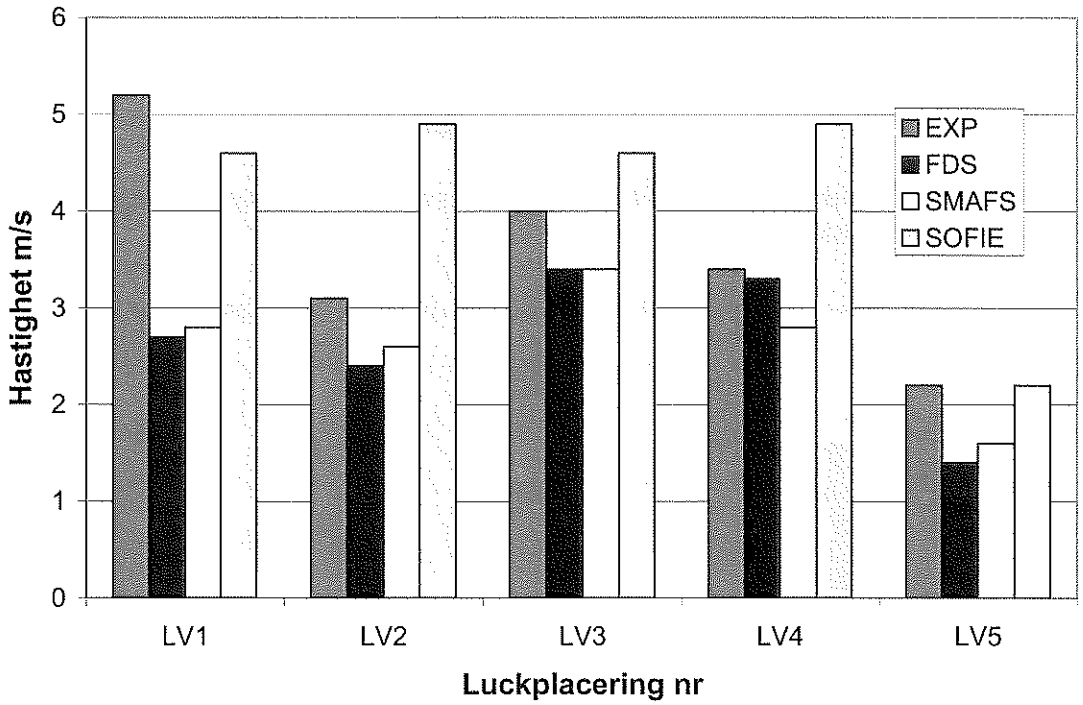



**Fig.1B92 Experimentella och simulerade vertikala hastigheter i luckan.**

Då mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel som är svåra att kvantifiera är en normering mot de experimentella värdena inte meningsfull. Om inte gasflödet är riktat vinkelrät mot pitotrören överskattas den experimentellt uppmätta hastigheten [3].

Av fig.1B92 framgår att koderna:

- Det är svårt att uppskatta osäkerheten för simuleringarna med FDS och SMAFS då alla simulerade hastigheter är lägre än de experimentellt uppmätta
- SOFIE överskattar gashastigheten i 80% av mätpunkterna i luckan, i medeltal med cirka 20%, trots att de uppmätta hastigheterna troligtvis är för höga.

# 8. Sammanfattning

CFX

- Simulerar inte den lutning av flammorna som observerats experimentellt, både med luckan rakt över branden och med luckan förskjuten 3 m från branden.
- Överskattar kraftigt strömmen av brandgaser genom luckan då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen i luckan överskattas i medeltal med 70%.
- Underskattar kraftigt temperaturen i gaslagret under taket då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen underskattas i medeltal med 50-55%.

FDS

- Simulerar den lutning av flammorna som observerats experimentellt, både med luckan rakt över branden och med luckan förskjuten 3 m från branden.
- Ger en realistisk bild av strömmen av brandgaser genom luckan då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen i luckan underskattas i medeltal med 5%.
- Underskattar temperaturen i gaslagret under taket då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen underskattas i medeltal med 15-20%.

FDS

- Simulerar den lutning av flammorna som observerats experimentellt, både med luckan rakt över branden.
- Ger en realistisk bild av strömmen av brandgaser genom luckan då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen i luckan överskattas i medeltal med 10%.
- Underskattar temperaturen i gaslagret under taket då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen underskattas i medeltal med 10-15%.

SOFIE

- Simulerar den lutning av flammorna som observerats experimentellt, både med luckan rakt över branden och med luckan förskjuten 3 m från branden.
- Överskattar strömmen av brandgaser genom luckan då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen i luckan överskattas i medeltal med 60% och gashastigheten är i medeltal 20% högre än de experimentellt uppmätta.
- Underskattar temperaturen i gaslagret under taket då luckan är placerad rakt över branden. Temperaturen underskattas i medeltal med 25-35%.

## 9. Referenser


1. "Interaction between Sprinklers and Fire Vents", H.Ingason, S. Olsson, SP Report 1992:11
2. "Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE", Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
3. "A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", McCaffrey B.J., Heskestad G., Combustion and flame 26 (1976)125-127
4. "Ceiling Jet Flows" Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.
5. "Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations", Ma,T.G., Quintiere J.G., Fire Safety Journal 38 (2003) 467-492

# Scenarium 2 Tunnel

## 1. Syfte

Vid dimensionering av tunnlar eller långa korridorer, utrymmen som har mycket stor längd i förhållande till bredd och höjd, används CFD för att beräkna hur snabbt brandgaserna fyller rummet för att avgöra hur snabbt lokalen måste utrymmas i händelse av brand.

Hur CFD-modeller beräknar luftinträngning i takstrålar, inverkan av fläktar och yttre vindtryck, tunnelns lutning mm. är av avgörande betydelse för hur väl simuleringar representerar verkligheten. Det är sällsynt att man kan göra storskaliga försök för att verifiera brandgasfyllnad i befintliga eller planerade tunnlar.

I det valda scenariet är branden, som har en effektutveckling som varierar med tiden, placerad c:a. 238 in i en 853 m långa tunneln.

## 2. Scenarium

Scenariet är hämtat från en försöksserie "Memorian Tunnel Ventilation Test Program" [1] som utfördes i Boston. Anvisningar till simuleringarna med en detaljerad beskrivning av det valda scenariet finns beskrivna i Ref 2.

Tunneln visas i Figur 2.1a-b.

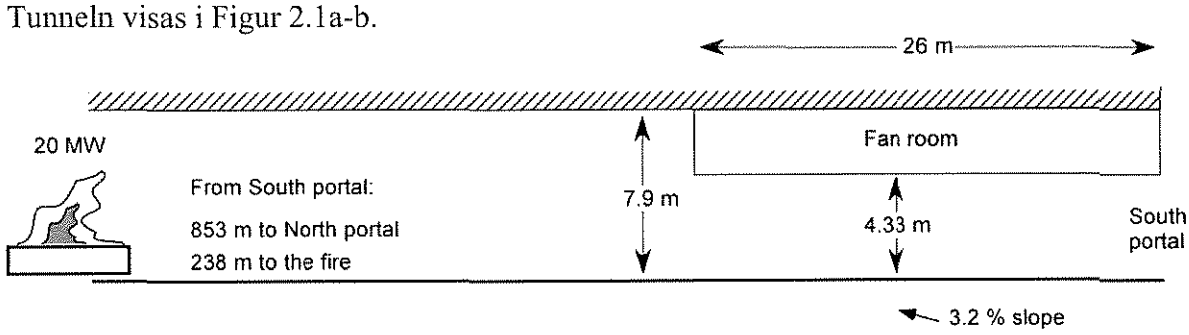



**Fig 2.1a Längdsnitt av tunneln [1].**

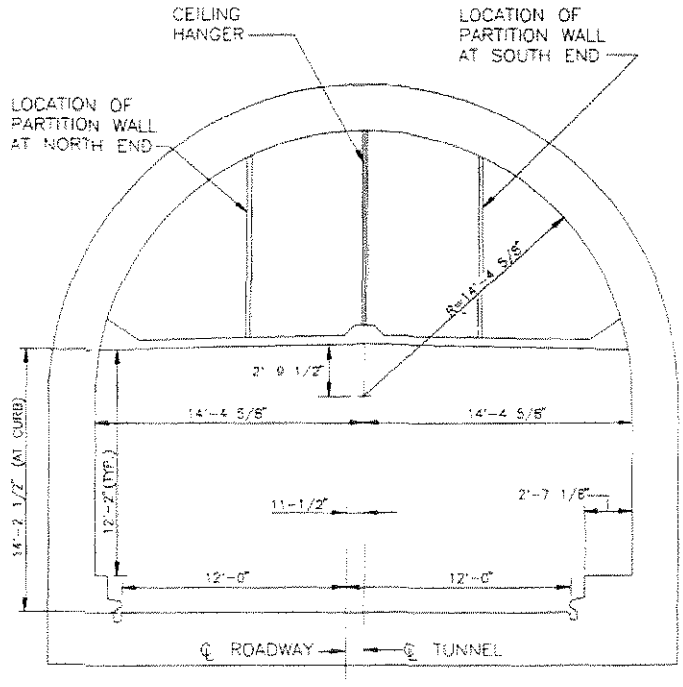
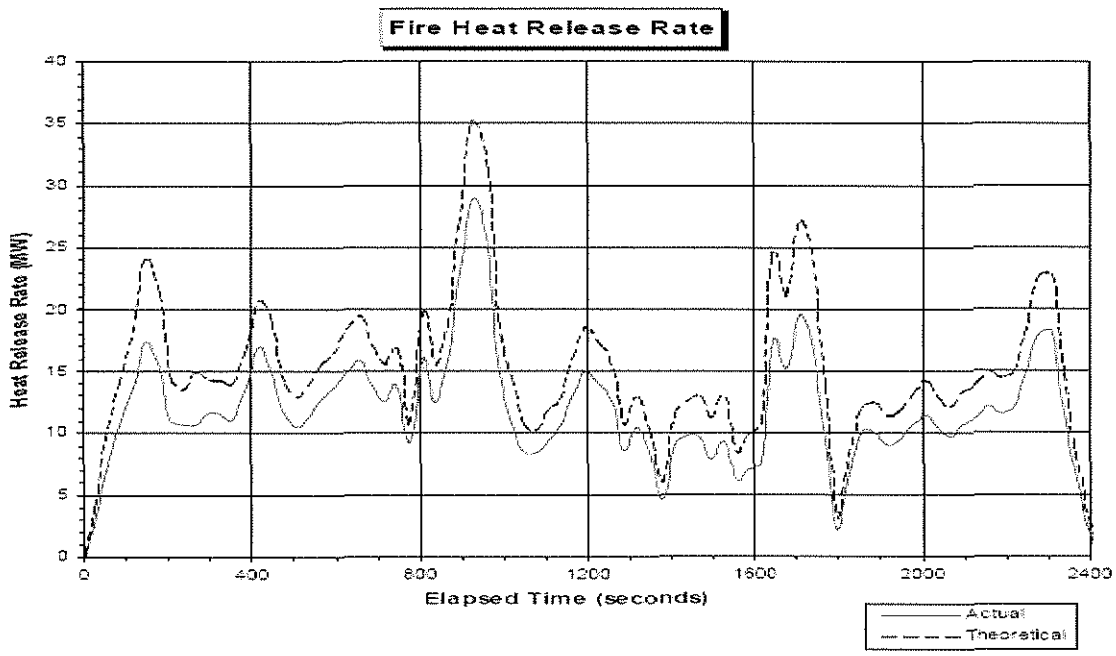



**Fig.2.1bTvärsnitt av tunneln [1].**

Tunneln är rak, 853 m lång och har ett halvcirkulärt tak med en högsta takhöjd på 7.9 m. Tunneln lutar 3.2% uppåt från söder till norr. Tunnelns bredd är som störst 8.77 m. Detaljer om tunnelgeometrin visas i Fig.2.1a-b.
I tunnels båda ändar finns fläktrum som blockerar den övre delen av tunneln, se Fig. 2.1a.

**Brandkälla**
Brandkällan bestod av ett stålkärl placerat på 0.75 m höjd över golv i centrumlinjen på tunnel, 238.35 meter från dem södra ingången. Den totala brandytan var omkring 9 $m^2$. Bränslet, "röd diesel" hade hällts på en bädd av vatten. "Red diesel" består av kolväten med 14-20 kolatomer. Förbränningsvärmet för detta bränsle är angivet till 45 MJ/kg. Bränslets densitet är 720 kg/$m^3$. Effekten beräknades utifrån uppmätt viktsminskning och teoretiskt förbränningsvärme. I fig.2.2 redovisas både den teoretiska effektutvecklingen som förutsätter fullständig förbränning och en uppskattad, "Actual", som förutsätter en lägre förbränningsverkningsgrad.




**Figur 2.2Uppmätt effektutveckling som funktion av tiden [1].**

## 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

**Repeter- och reproducerbarhet**
Experimentet har utförts en gång vid en tunnel och information saknas således om både repeter- och reproducerbarhet.

**Randvillkor**
Geometrin är komplex med halvcirkulärt tak som är svår att reproducera med kartesiska koordinatsystem. Geometrin utanför tunneln är enbart beskriven som sluttande berggrund. Materialdata för tunnelväggarna finns inte angivna förutom att de är av sandsten. Runt branden var väggar och tak täckta av ett 15 cm tjockt lager av en blandning av cement och vermiculite som sprayats på.

**Initialvillkor**

Medeltemperaturen i tunneln före testen var cirka 11°C. Temperaturen i luften som kom in från den norra portalen var 9°C. Medelhastigheten vid brandstart inne i tunneln var cirka 0.8 m/s förorsakad av ett okänt yttre vindförhållande och temperaturskillnader mellan tunnelns mynningar. Den initiala hastighetsfördelning i tunneln visar i Fig.2.3.

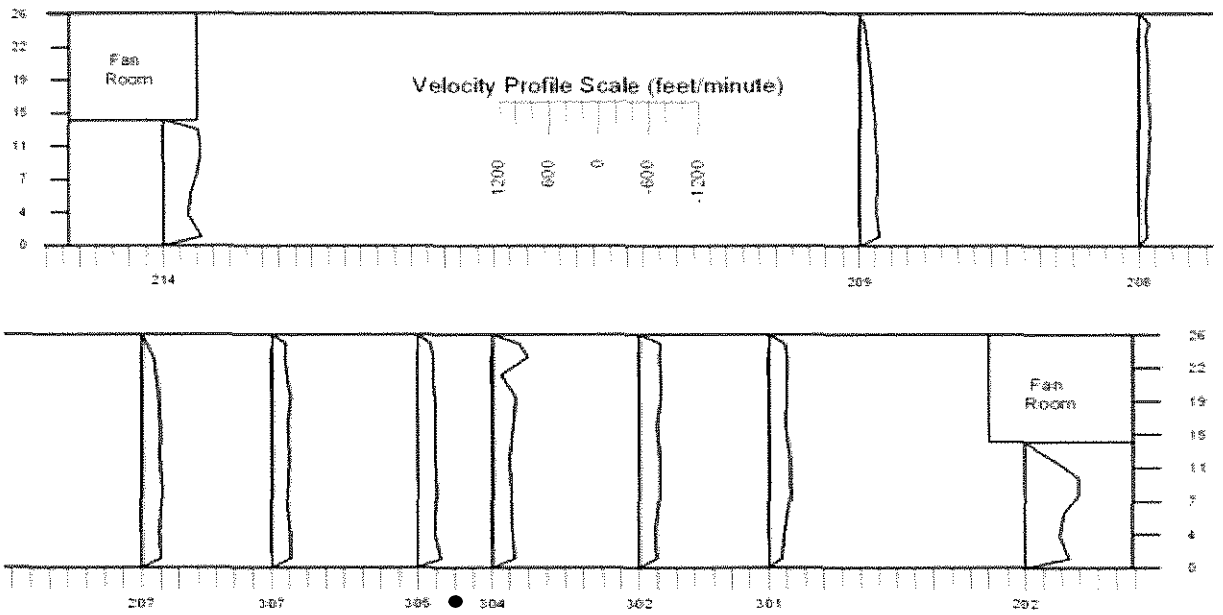



**Fig 2.3 Initial hastighetsfördelning i tunneln. Höjdskala fot, hastighetsskala fot/minut [1].**

**Brandbeskrivning**

Bränslet, röd diesel, kallas även diesel No2. Det finns inget underlag om hur väl den beräknade effektutvecklingen, "actual", som utgår från den teoretiska effektutvecklingen och en förbränningseffektivitet, stämmer överens med den verkliga effektutvecklingen. Förbränningsverkningsgraden varierar med typ av bränsle, brandens storlek, ventilation mm. Denna typ av diesel består av cirka 75 % mättade kolväten, i huvudsak n-, iso- och cykloparaffiner. Resterande c:a 25% är aromatiska kolväten inkluderande naftalener och alkylbenzener [3].

Enligt Ref.4 är det teoretiska energiinnehållet mindre än 45 kJ/gram, 43.5 – 44.50 kJ/gram för de mättade och 38-39 kJ/gram för de aromatiska kolvätena. Det riktiga värdet på energiinnehållet borde då vara cirka 42.5-43 kJ/gram. En rimlig förklaring till avvikelsen är att 45 kJ/g motsvarar energiinnehållet då vattnet kondenserat till vätska och inte är gasformig. Förångningsvärmet för vatten är 2.2 kJ/gram. Det teoretiska energiinnehållet, 45 kJ/gram överskattar energiinnehållet med cirka 5 %.

Vid beräkningen av det aktuella energiinnehållet har man i försöket uppskattat förbränningsverkningsgraden till cirka 85 %. Enligt Ref.4 varierar förbränningsverkningsgraden för mättade kolväten mellan 85-90 % och är för aromater cirka 70 %. För ett likartat bränsle, kerosen, uppges i Ref.4 en verkningsgrad av 65 %.

Till dessa systematiska fel kommer mätosäkerheten vid mätning av vikten som inte finns redovisad.

**Mätteknik**
Vid försöken mättes gastemperaturen med termoelement placerade på 14 vertikala termoelementträd. Det finns ingen uppgift om termoelementens tjocklek vilket gör det svårt att uppskatta strålningskorrektionen för termoelementen, speciellt för de som är placerade nära branden.
Vid försöken mättes gashastigheten med bi-directional pitotrör och termoelement placerade på 10 vertikala träd. Bi-directional pitotrör har ett felaktigt vinkelberoende och mäter inte normalkomponenten av hastigheten på rätt sätt när strömningsriktningen är skild från normalriktningen [5]. Tryckskillnaden över pitotrören för gashastigheter under 0.5 m/s är dessutom mindre än 0.15 Pa vilket medför stor osäkerhet i tryckmätningen.

**Sammanfattande osäkerhetsbedömning**
Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [6] en osäkerhet i temperaturstegringen på $\Delta T$ -- $Q^{2/3}$.
- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att strålningskorrektionen påverkar de uppmätta gastemperaturerna. Den kommer att variera mycket beroende på termoelementens placering och tjocklek.
- Initial och randvillkor är ofullständigt beskrivna.
- Att osäkerheten i hastighetsmätningarna beror av flera faktorer. Är inte strömningsriktningen parallell med pitotröret blir den uppmätta hastigheten beroende av strömningsriktningen. Enligt Ref.5 är mätfelet i normalkomponenten av hastigheten 0, 6, 15, 21, 31, 29 % för vinklarna 0, 10, 20, 30, 40, 50 grader mellan pitotrör och strömningsriktning. Till detta kommer mätosäkerheten i tryckmätningen som är större för små hastigheter än för stora på grund av de små tryckdifferenserna. Osäkerheten i temperaturmätningen vid pitotröret pga. osäkerheten i effektmätningen och strålningskorrektion bidrar även till mätfelet i gashastigheten [5].

# 4. Simuleringar

I tabell 2.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien. Simuleringarna med koden FDS misslyckades av flera skäl. Flera försök att simulera initialvillkoret med en medelhastighet på 0.8 m med hjälp av en fläkt placerad på olika avstånd utanför tunnelmynningen misslyckades trots att de krävde mycket datakraft. Det gridnät som skulle behövas för att uppnå önskad upplösning för scenariet uppskattades till 5-8 millioner noder. Det saknas möjlighet att ha så stort RAM minne i en 32 bitars en-process dator för att man skall kunna simulera å stora gridnät. Det bör vara möjligt att simulera scenariet med version 5 av FDS som nu finns tillgänglig. I FDS 5 kan man ha olika initialtryck utanför tunnelns öppningar och koden finns i exekverbar version för 32 och 64 bitars datorer med flera processorer.

**Tabell 2.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| **Mjukvara** | **CFX-4.4** | **SMAFS 5.01** | **SOFIE 3.0** |
|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | |
| Dator CPU | Intel Pentium4 | ADM Opteron | Intel Pentium 4 |
| Klockfrekvens GHz | 3.2 | 2.2 | 3.2 |
| RAM GB | 1 | 1GB/processor | 2 |
| Antal processorer | 1 | 12 på ett Linux Cluster | 1 |
| **Simulering** | | | |
| Operatör | Bengt. Hägglund | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| Gridstorlek | 510.000 / 850.000 | 904.428 | 454.212 |
| Gridförtätning | Ja | Ja | Ja |
| Symmetriplan | Nej | ? | 1 |
| Tidssteg sek | 1 i 2 min<br>2 efter 2 min | ? | ? |
| Beräkningstid timmar | 63 / 98 | 95 | 1220 |
| Mass tolerans | $10^{-6}$ | $10^{-5}$ | $10^{-3}$ |
| Modellval | | | |
| Typ av code | RANS | RANS | RANS |
| Turbulens | k-ε | k-ε | k-ε |
| Strålning | Ingen | ? | DTRAM 16 ray |
| Brand | Heat source | Eddy Break-up | Eddy Break-up |
| Reduc effekt % | 35 | 0 | 0 |
| Sotfraktion | 0.09 | | 0.03 |
| Konvektion | Default | Default | Default |

Det kan noteras att CFX simuleringarna inte använde en förbränningsmodell utan effektutvecklingen simulerades som en "heat source". Vid simuleringarna med SOFIE användes ett symmetriplan. Vid en jämförelse med de andra modellerna har SOFIE simuleringarna en upplösning som motsvarar 2 x 454.212 dvs. 908.424 grid.

## 5. Jämförelse mellan simulerade och uppmätta temperaturer

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har stor betydelse är osäkerheten i avbrinningshastighet (effektutveckling) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

Simuleringarna är även behäftade flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafil dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.

I kapitel 6 redovisas de uppmätta vertikala temperatur- och hastighetsprofilerna längs tunneln 2, 5, 10 och 20 minuter efter det att branden startade.

## 6. Jämförelse mellan simuleringar av hastighet och temperatur

Vid experimenten mättes hastigheten 10 träd med pitotrör. I Fig.2.4-5 visas in och utflöde ur tunnelmynningarna efter 0, 2, 5, 10 och 20 minuter.

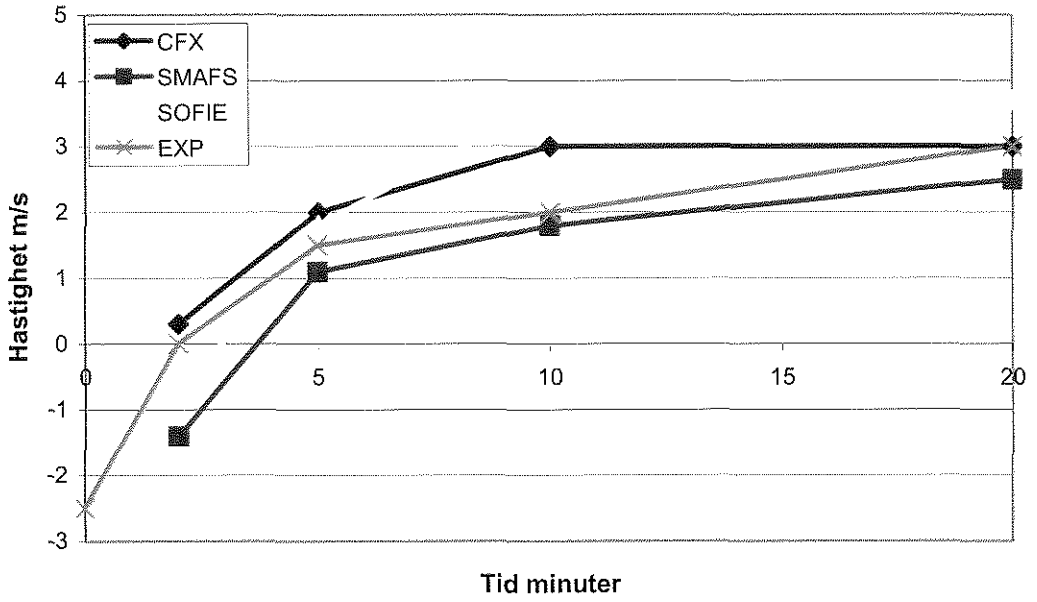



**Fig.2.4 Medelhastigheten i mitten av den norra tunnelmynningen vid olika tider. Negativa värden motsvarar inflöde i tunneln och positiva utflöde.**

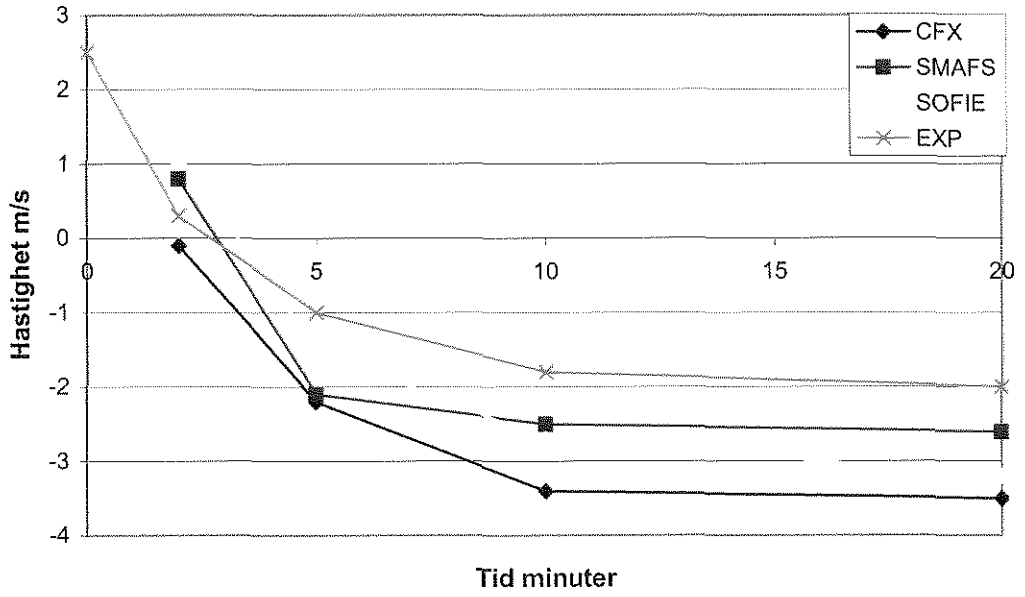



**Fig.2.5 Medelhastigheten i mitten av den södra tunnelmynningen vid olika tider. Negativa värden motsvarar inflöde i tunneln och positiva utflöde.**

I Fig.2.6-9 nedan redovisas de uppmätta och simulerade hastigheterna efter 2, 5, 10 och 20 minuter i litet format för att man skall kunna få en ögonblicksbild av fördelningen i tunneln. Branden är placerad mellan mätträd 304 och 305. Motsvarande bilder finns i full skala i Bilaga 2.A. Den experimentella osäkerheten har inte angetts i figurerna då den är svår att kvantifiera.

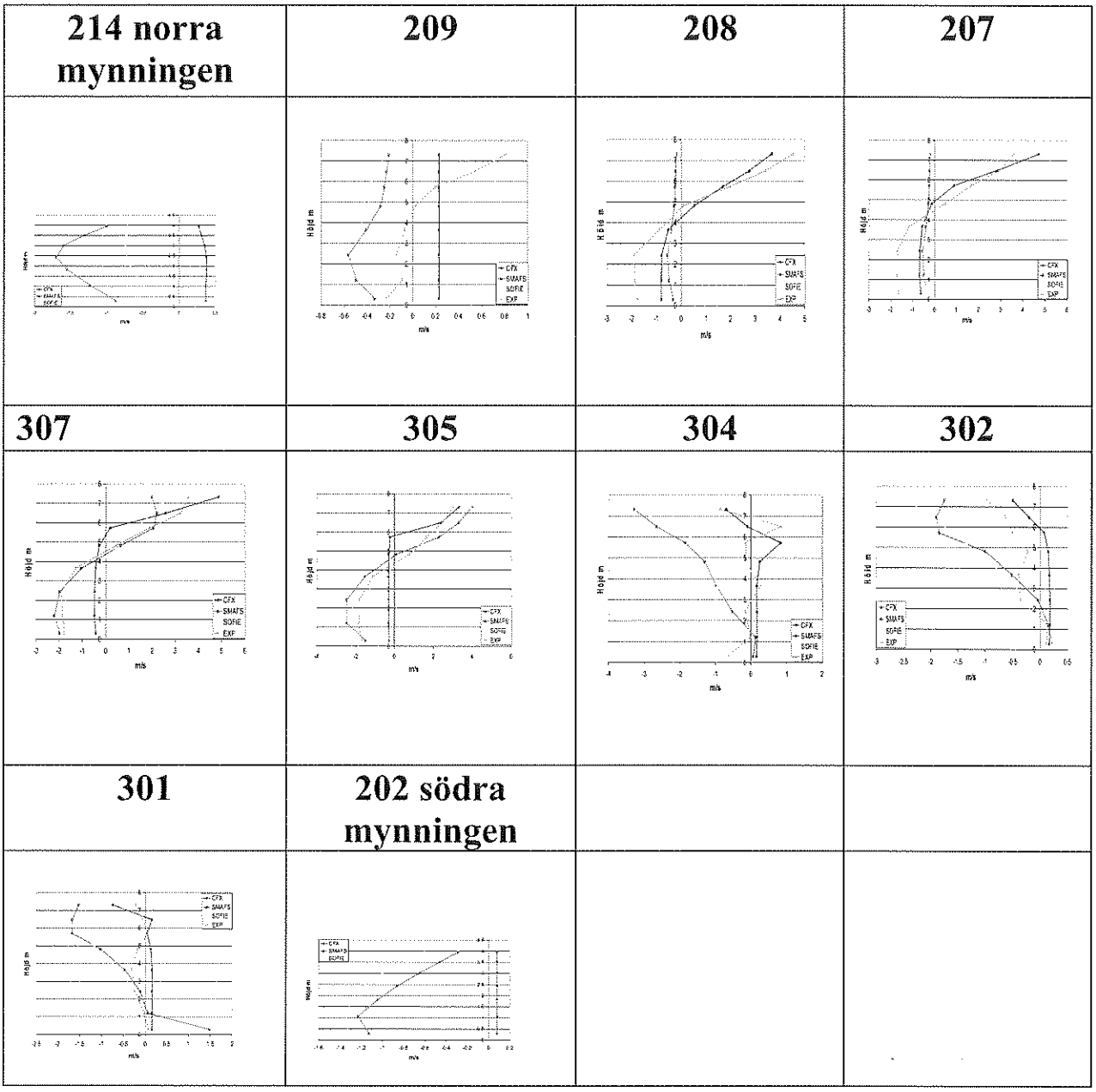



**Fig. 2.6 Hastigheter längs tunneln efter 2 minuter.**
**Svart kurva = CFX, Röd kurva = SMAFS, Gul kurva = SOFIE, Blå kurva = Experiment**

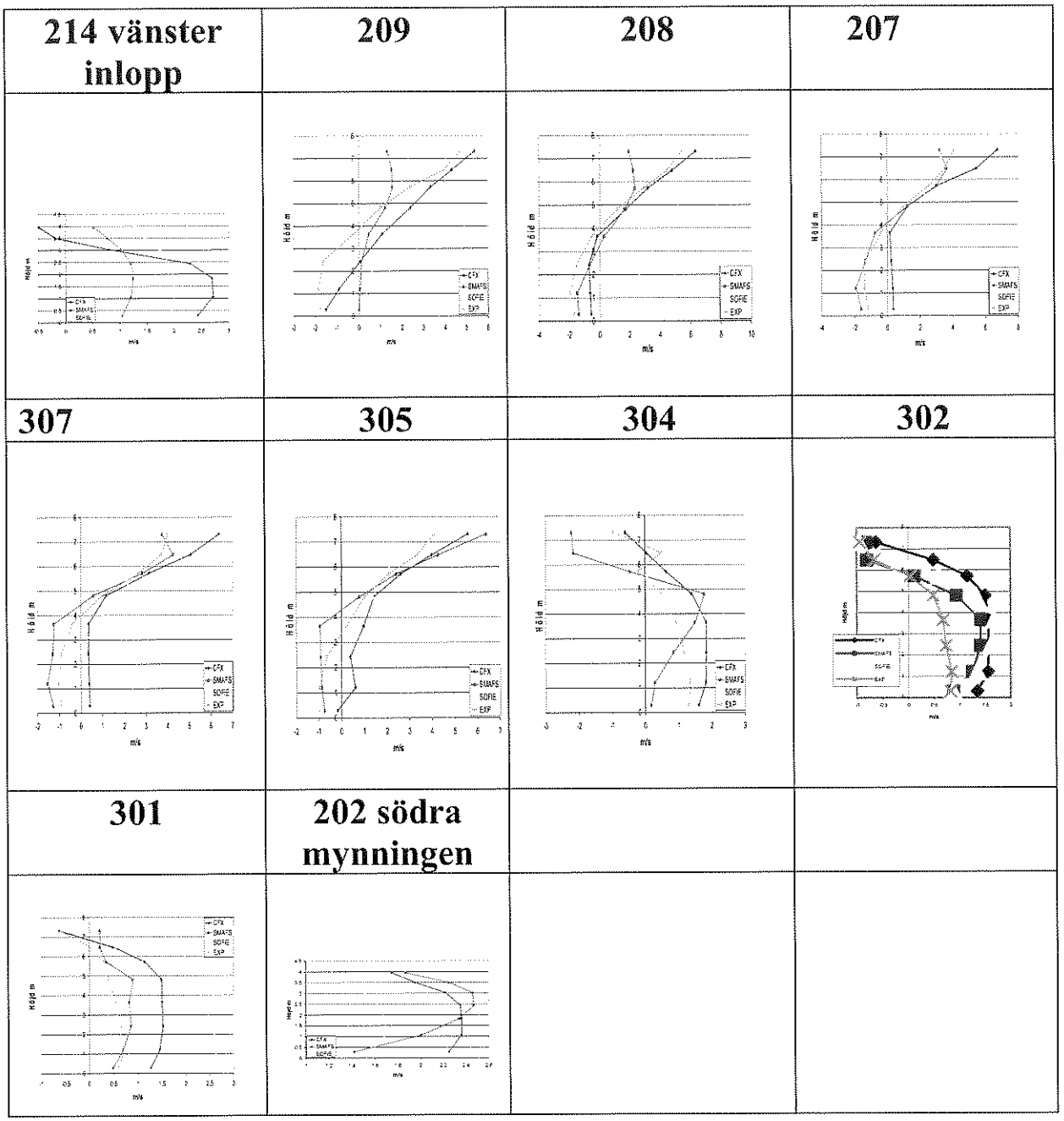



**Fig. 2.7 Hastigheter längs tunneln efter 5 minuter.**
**Svart kurva = CFX, Röd kurva = SMAFS, Gul kurva = SOFIE, Blå kurva = Experiment**

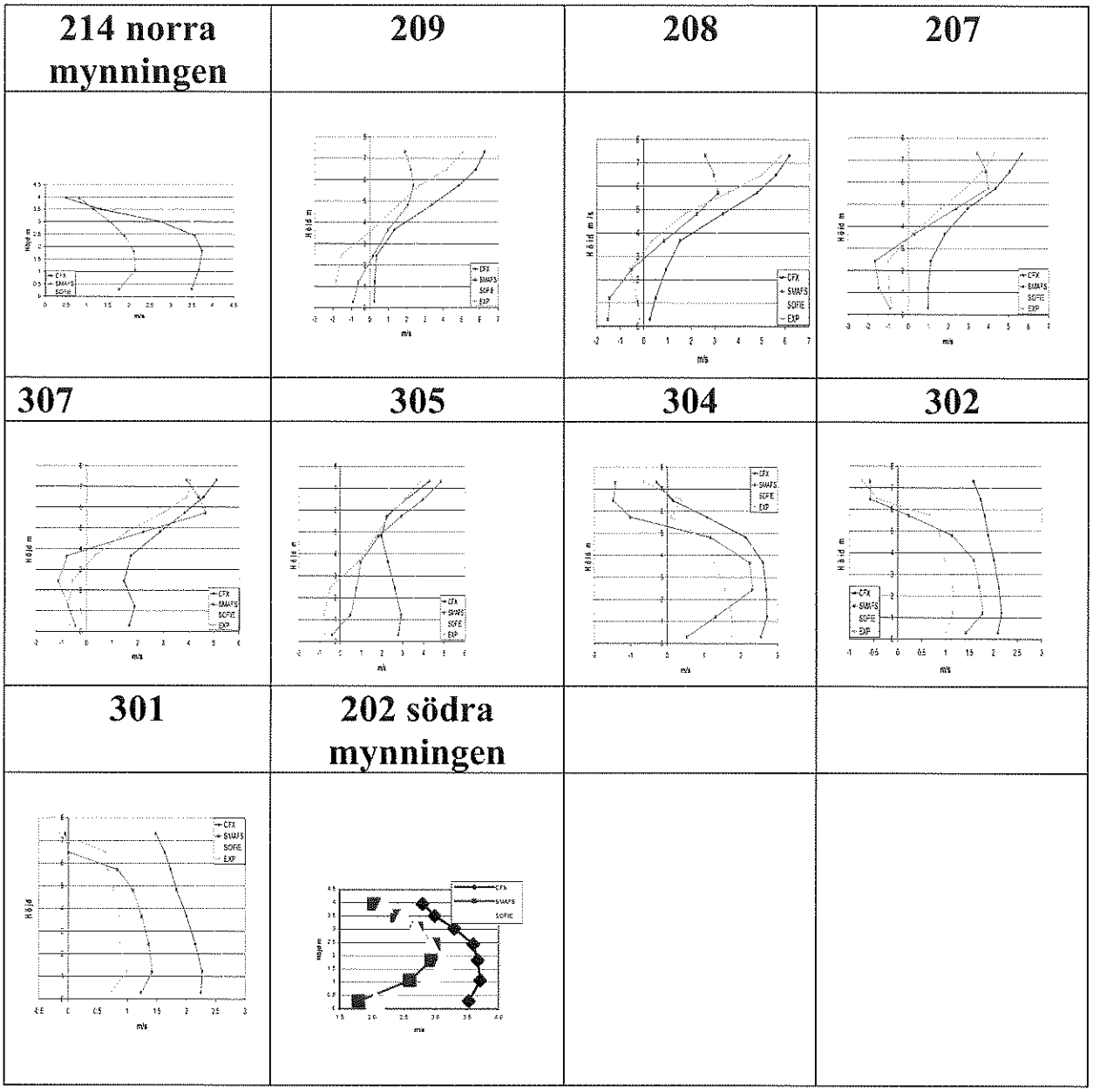



**Fig. 2.8 Hastigheter längs tunneln efter 10 minuter.**
**Svart kurva = CFX, Röd kurva = SMAFS, Gul kurva = SOFIE, Blå kurva = Experiment**

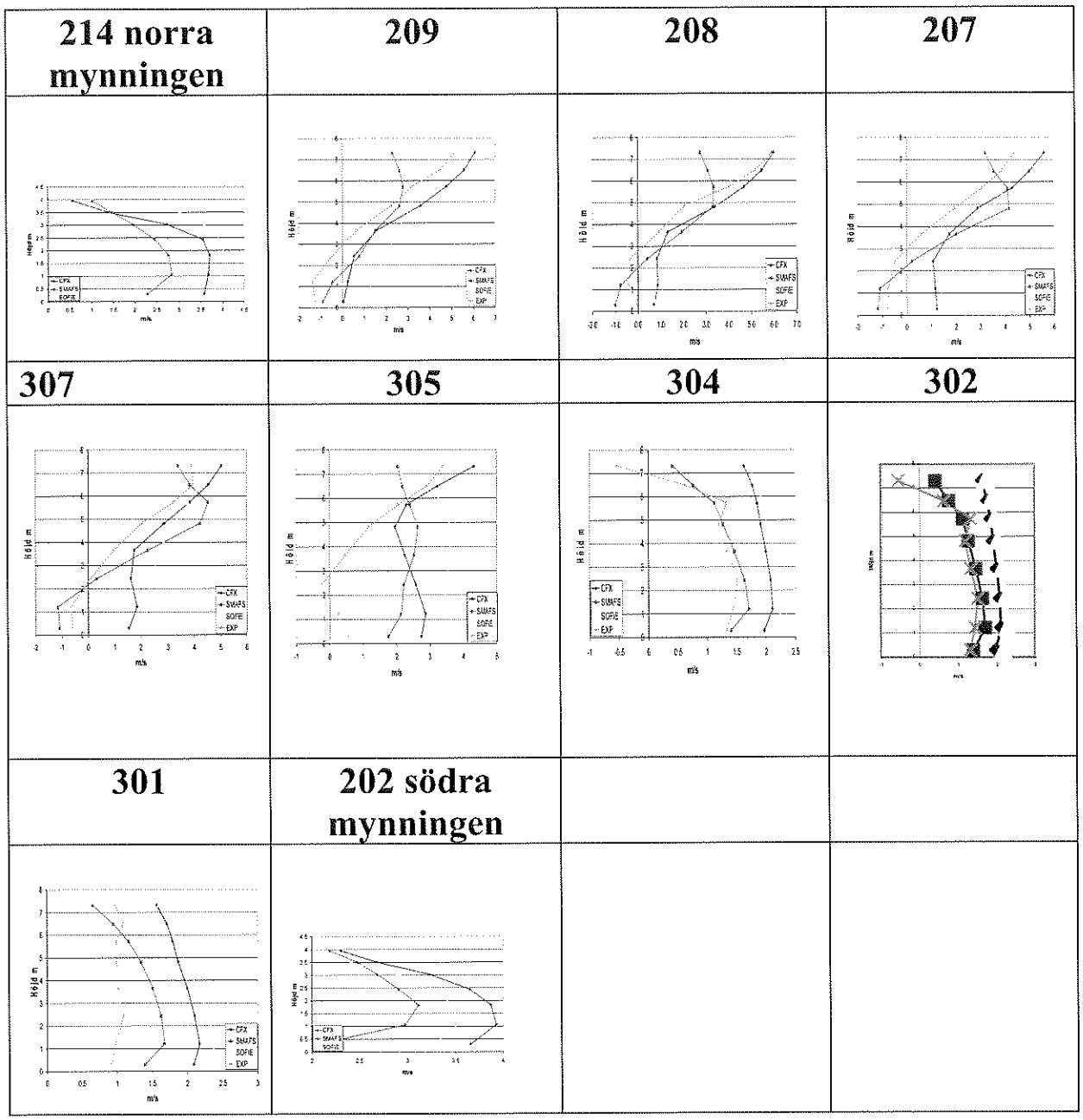
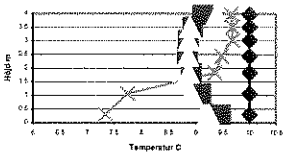
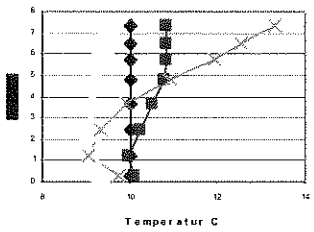
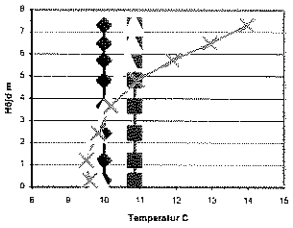
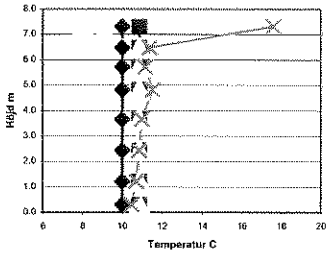
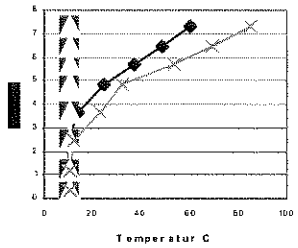
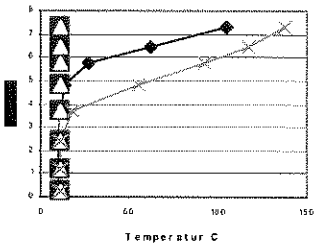
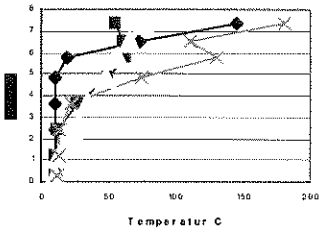
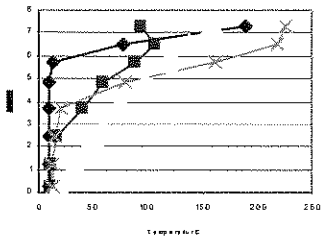
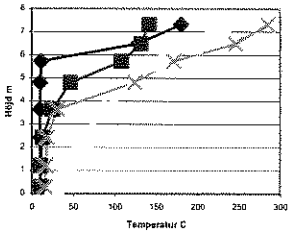
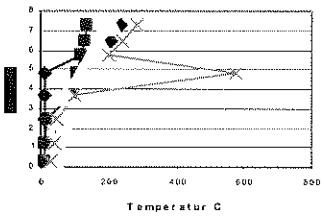
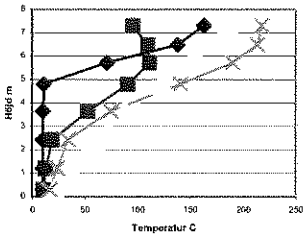
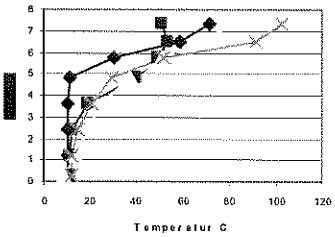
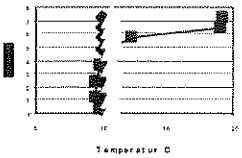
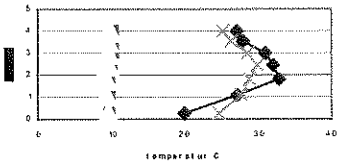
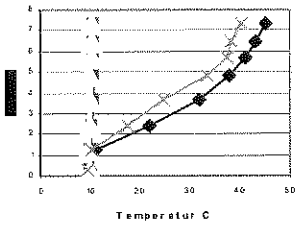
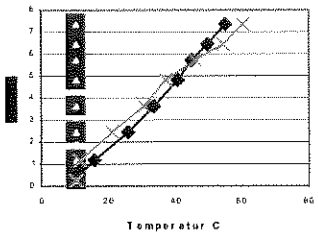
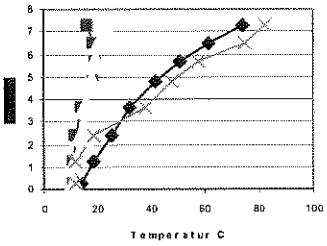
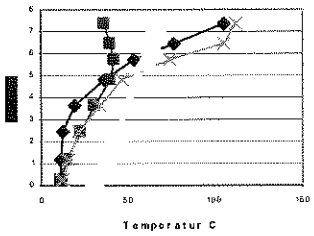
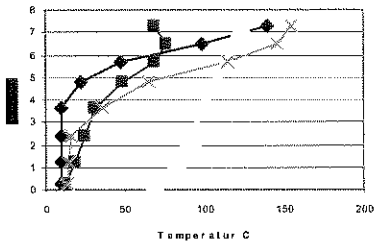
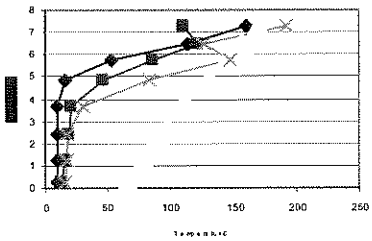
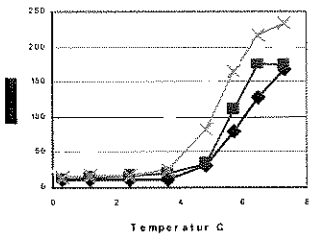
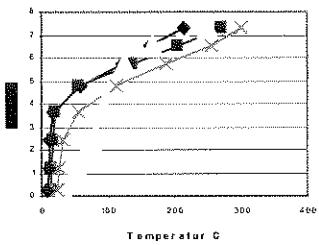
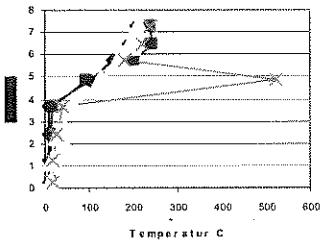
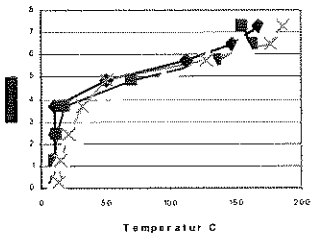
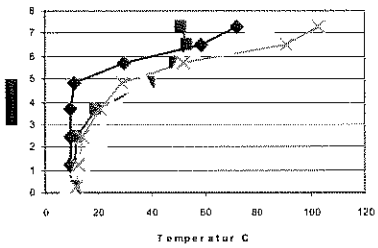
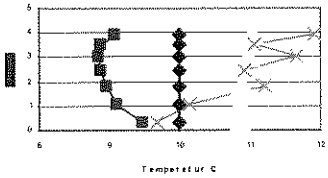
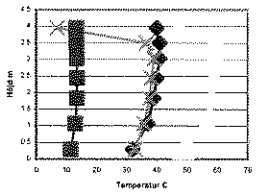
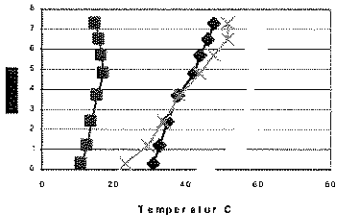
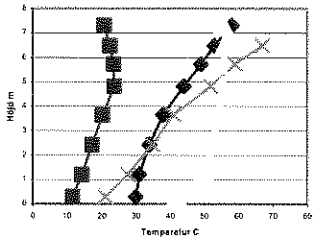
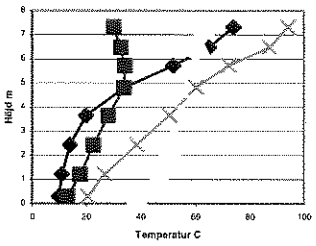
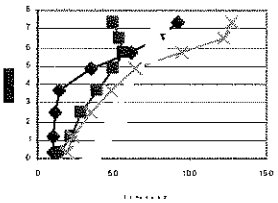
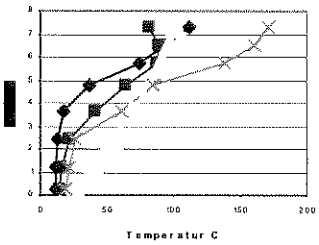
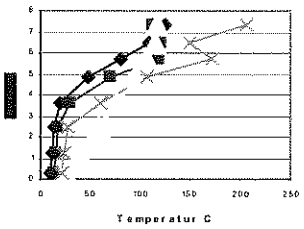
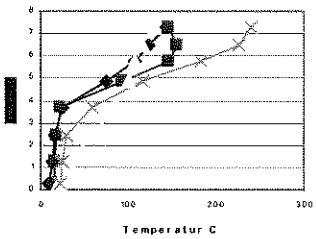
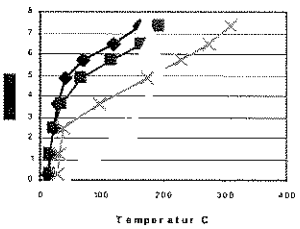
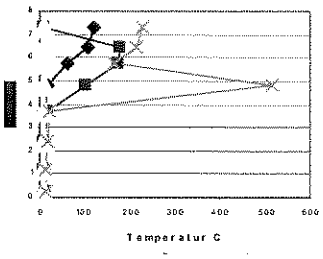
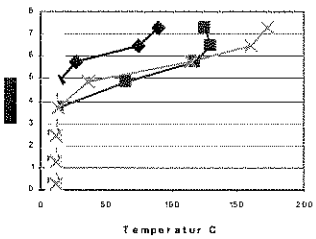
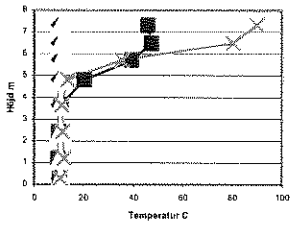
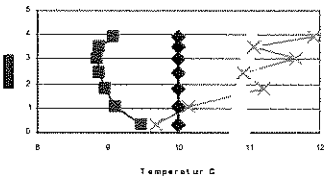


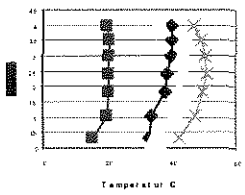
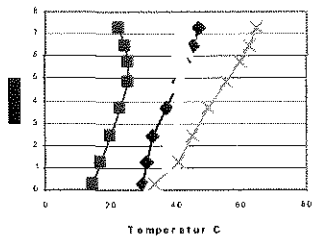
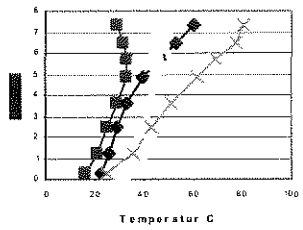
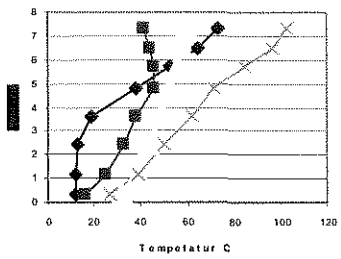
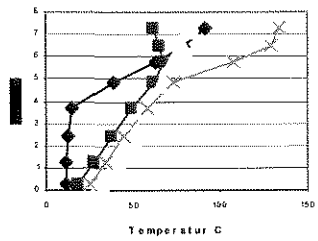
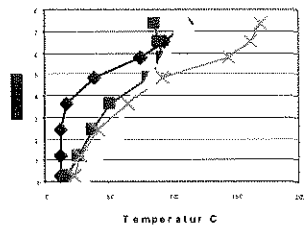
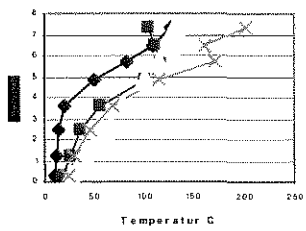
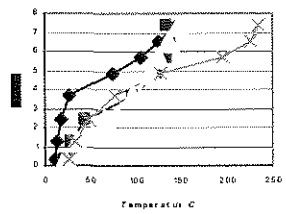
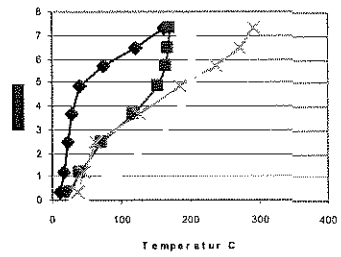
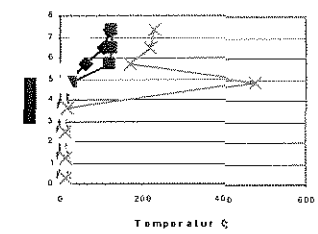
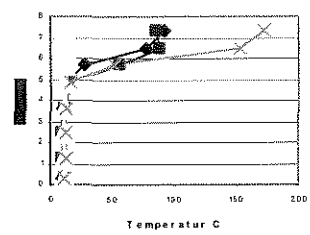
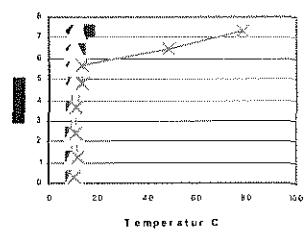
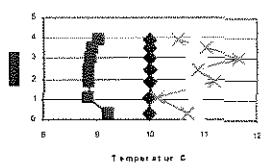

**Fig. 2.9 Hastigheter längs tunneln efter 20 minuter,**
**Svart kurva = CFX, Röd kurva = SMAFS, Gul kurva = SOFIE, Blå kurva = Experiment**

Vid experimenten mättes temperaturen i 13 termoelementträd. I Fig. 2.10-13 redovisas de uppmätta och simulerade temperaturerna efter 2, 5, 10 och 20 minuter i litet format för att man skall kunna få en ögonblicksbild av fördelningen i tunneln. Branden är placerad mellan mätträd 304 och 305. Motsvarande bilder finns i full skala i Bilaga 2.B. Den experimentella osäkerheten har inte angetts i figurerna då den är svår att kvantifiera.

| 214 norra mynningen | 213 | 211 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **209** | **208** | **207** |
|  |  |  |
| **307** | **306** | **305** |
|  |  |  |
| **304** | **303** | **302** |
|  |  |  |
| **202 södra mynningen** | | |
|  | **Fig. 2.10 Temperaturer längs tunneln efter 2 minuter** | **Svart kurva = CFX,**<br>**Röd kurva = SMAFS**<br>**Gul kurva = SOFIE**<br>**Blå kurva = Experiment** |

| 214 norra mynningen | 213 | 211 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **209** | **208** | **207** |
|  |  |  |
| **307** | **306** | **305** |
|  |  |  |
| **304** | **303** | **302** |
|  |  |  |
| **202 södra mynningen** | | |
|  | **Fig. 2.11 Temperaturer längs tunneln efter 5 minuter** | **Svart kurva = CFX,**<br>**Röd kurva = SMAFS**<br>**Gul kurva = SOFIE**<br>**Blå kurva = Experiment** |

| 214 norra mynningen | 213 | 211 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **209** | **208** | **207** |
|  |  |  |
| **307** | **306** | **305** |
|  |  |  |
| **304** | **303** | **302** |
|  |  |  |
| **202 södra mynningen** | | |
|  | **Fig. 2.12 Temperaturer längs tunneln efter 10 minuter** | **Svart kurva = CFX,**<br>**Röd kurva = SMAFS**<br>**Gul kurva = SOFIE**<br>**Blå kurva = Experiment** |

| 214 norra mynningen | 213 | 211 |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **209** | **208** | **207** |
|  |  |  |
| **307** | **306** | **305** |
|  |  |  |
| **304** | **303** | **302** |
|  |  |  |
| **202 södra mynningen** | | |
|  | **Fig. 2.13 Temperaturer längs tunneln efter 20 minuter** | **Svart kurva = CFX,**<br>**Röd kurva = SMAFS**<br>**Gul kurva = SOFIE**<br>***Blå kurva = Experiment*** |

# 7. Värdering av jämförelse mellan experiment och simuleringar

Scenariet i tunneln är mycket komplicerat. Tunneln lutar uppåt från söder mot norr med 3.2 grader vilket i den 853 m långa tunneln motsvarar en höjdskillnad på cirka 27 meter. Då branden startar medför de yttre vind- och temperaturförhållandena vid de två mynningarna att det blåser en vind från norr mot söder i hela tunneln. Efter det att det brunnit en tid vänder luftströmmen och blir riktad från söder mot norr över hela ytorna på tunnelmynningarna och inne i tunneln bildas ett komplext strömningsmönster.

**Jämförelse mellan simuleringar och experiment av hastighet och temperatur vid mynningarna i tunneln.**

Vinden vid tunnel vänder vid experimenten enligt Fig. 2.4-5 efter cirka 2 minuter och vändningen simuleras av koderna till mellan 2-3 minuter. Efter 5 minuter sker endast strömning ut från den norra och strömning in från den södra tunnelmynningen både i experiment och i simuleringar, Fig. 2.6-9. Medelvärdet av utströmningshastigheten efter 20 minuter, då variationerna i hastighetsfältet minskat, är vid mitten av den norra mynningen i experimenten 3.0 m/s. I simuleringarna varierar hastigheten mellan 2.5 – 3.7 m/s. Motsvarande temperaturnivåer är i experimenten, cirka 50 C. Simuleringarna underskattar där temperaturen med 10-30 grader, Fig. 2.10-1.13 (mätträd 214).

Vid den södra mynningen är medelvärdet av inflödet mitt i tunneln efter 20 minuter experimentellt 2.0 m/s under det att simuleringarna varierar mellan 2.5-3.5 m/s. Temperaturen vid den södra mynningen har omgivningens temperatur både vid experimenten och vid simuleringarna då det endast sker inflöde genom mynningen.

Om man förutsätter att inflödet i hela den södra tunnelmynningen är lika över tunnelns hela bredd motsvarar det ett totalt luftinflöde i tunneln efter 20 minuter på 2* 4.33*8.77 =76 $m^3/s$. Det motsvarar en syrgastillförsel på cirka 22 kg/s. Branden i tunneln på 20 MW kräver 1.5 kg/s syre dvs. tillförsel av syrgas från den södra mynningen är mer än tio gånger större än vad branden kräver.

**Jämförelse mellan simuleringar och experiment av hastighet och temperatur inne i tunneln söder om branden.**

Temperaturen och gashastigheten söder om branden mättes i experimenten på avstånden 12.2 (Träd 304, T och V), 29.6 (Träd 303, T), 66 (Träd 302, T och V) och 108 m (Träd 301, V) från branden.

Jämförelse av hastighetsfördelning mellan experiment och simuleringar finns redovisade i Fig. 2.6-9 och i Bilaga 2A. Av figurerna framkommer:

- 12.2 m från branden vänder flödet i nedre delen av tunneln efter 2-3 minuter från att vara riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) till att vara riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). Efter 5-20 minuter är flödet i nedre delen riktat från söder till norr. En takstråle utbreder sig riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) längs taket på höjder över cirka 5.5 m. Takstrålen simuleras med rätt riktning med alla koderna förutom efter 10 minuter med SOFIE.
- 66 m från branden vänder flödet i nedre delen av tunneln efter 2-3 minuter från att vara riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) till att vara riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen).
  Efter 5 minuter är flödet i större delen riktat från söder till norr. En takstråle utbreder sig riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) längs taket på höjder över cirka 6 m. Takstrålen simuleras med rätt riktning med alla koderna.

Efter 10 minuter är flödet i större delen av tunneln riktat från söder till norr. En takstråle utbreder sig riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) längs taket på höjder över cirka 6 m vid experimenten och vid simuleringen med SMAFS. Vid denna tid simulerar CFX och SOFIE ingen takstråle riktad från norr till söder.
Efter 20 minuter är flödet i större delen av tunneln riktat från söder till norr. En svag takstråle på höjder över cirka 7 m utbreder sig riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) vid experimenten. Vid denna tid simulerar SMAFS, CFX och SOFIE ingen takstråle riktad från norr till söder.

- 108 m från branden vänder flödet i nedre delen av tunneln efter 2-3 minuter från att vara riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) till att vara riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen).
  Efter 5 minuter är flödet i större delen riktat från söder till norr. Enligt experimenten och simuleringarna med CFX utbreder sig en takstråle riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) på höjder över cirka 6.5 m. Vid denna tid simulerar SMAFS och SOFIE ingen takstråle riktad från norr till söder.
  Efter 10 minuter är flödet i större delen av tunneln riktat från söder till norr. Enligt experimenten och simuleringarna med SMAFS utbreder sig en svag takstråle riktad från norr till söder (negativa värden i diagrammen) på höjder över cirka 7 m. Vid denna tid simulerar CFX och SOFIE ingen takstråle riktad från norr till söder.
  Efter 20 minuter är flödet i hela tunneln riktat från söder till norr både i experiment och i samtliga simuleringar. Den vertikala medelhastigheten i tunnelns mitt är 1 m/s i experimentet. Motsvarande medelhastigheter i simuleringarna varierar mellan 1.35 m/s (SMAFS) till 2m/s (CFX) och 2.1 m/s (SOFIE)

Jämförelse av temperaturfördelning mellan experiment och simuleringar finns redovisade i Fig. 2.10-13 och i Bilaga 2 A. Av figurerna framkommer:

- Temperaturerna i takstrålen når sin högsta nivå enligt Fig.2.14-16 vid avstånden 12.2, 29.6 och 66 meter söder om branden.

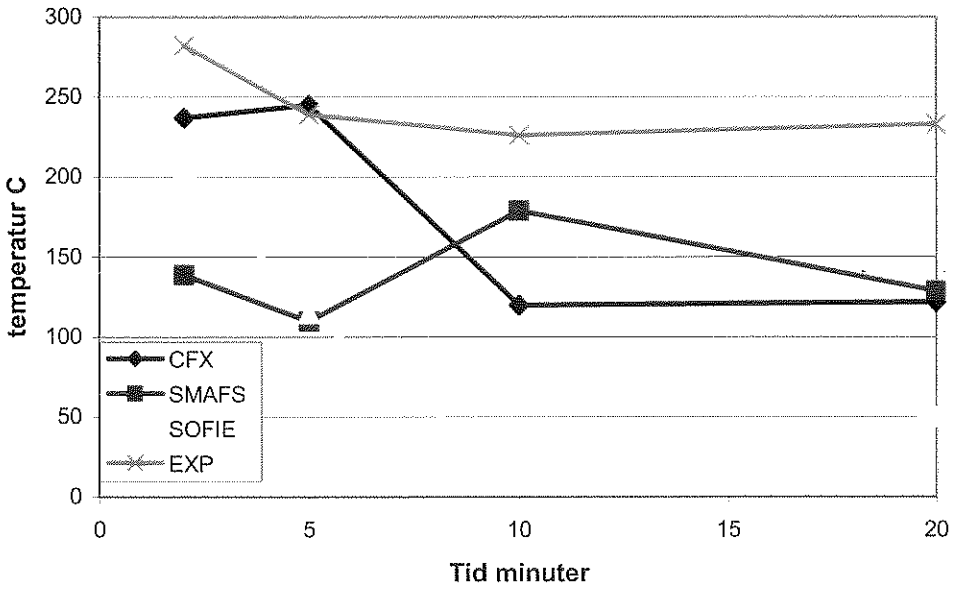



**Fig. 2.14 Maximal temperatur i takstrålen 12.2 m söder om branden**

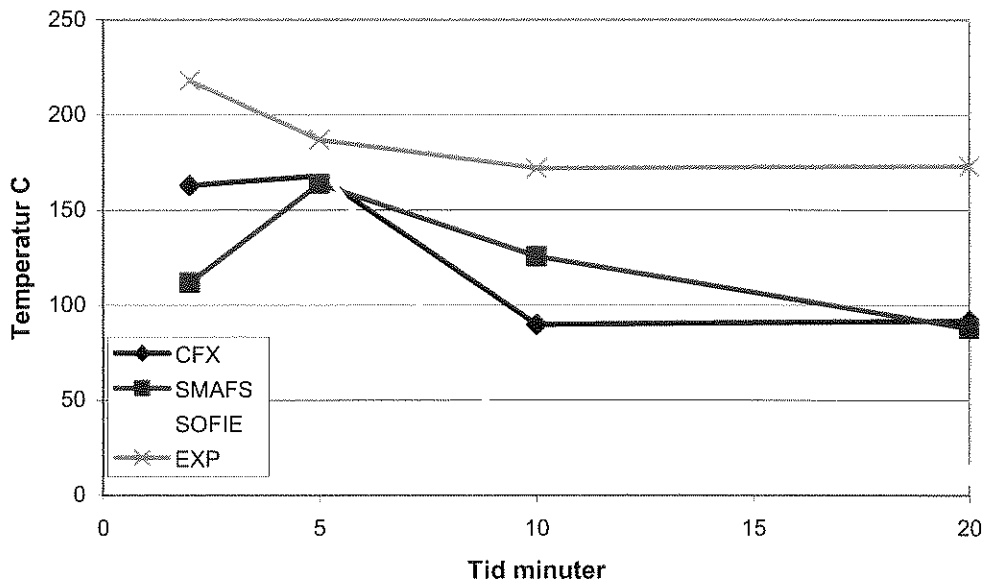



**Fig. 2.15 Maximal temperatur i takstrålen 29.6 m söder om branden**

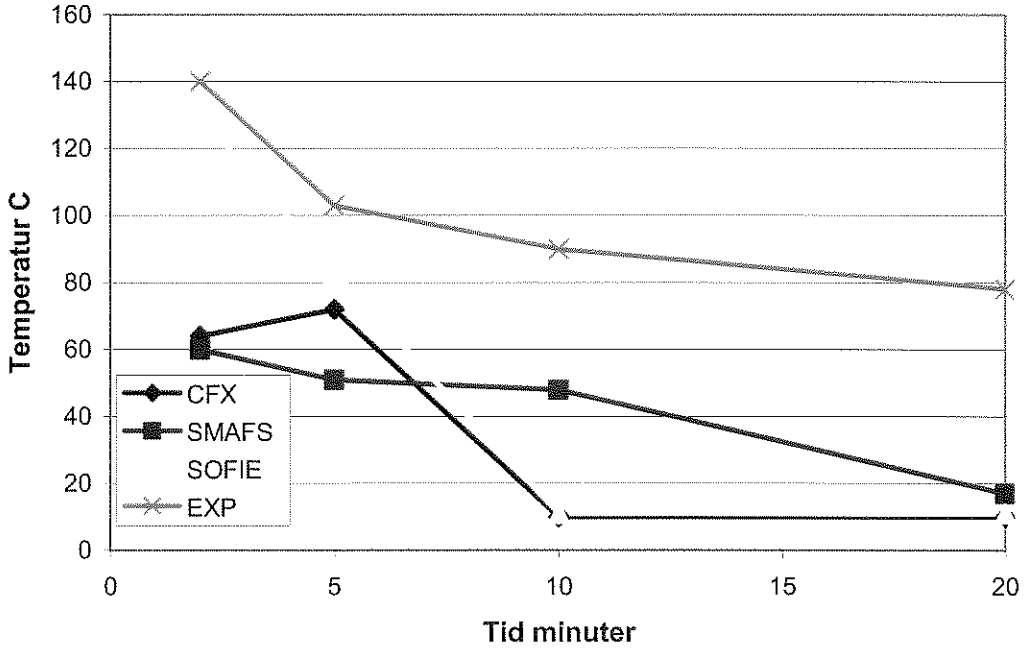



**Fig. 2.16 Maximal temperatur i takstrålen 66 m söder om branden**

Den experimentella temperaturen i takstrålen vid 2 och 5 minuter underskattas av simuleringarna på alla avstånd. Avvikelsen varierar mellan 0 till cirka 50 %.
Vid längre tider, 10 och 20 minuter svalnar temperaturen i takstrålen vid simuleringarna snabbare än vid experimenten på alla avstånd. Simuleringarna med SMAFS ger den långsammaste avsvalningen och med SOFIE den snabbaste.

**Jämförelse mellan simuleringar och experiment av hastighet och temperatur inne i tunneln norr om branden.**

Temperaturen (T) och gashastigheten (V) norr om branden mättes i experimenten på avstånden 11.3(Träd 305, T och V), 29.2(Träd 306, T), 62(Träd 307, T och V), 107(Träd 207,T och V), 189(Träd 208, T och V), 294(Träd 209, T och V), 404(Träd 211, T) och 510(Träd 213, T) m från branden.

Jämförelse av hastighetsfördelning mellan experiment och simuleringar finns redovisade i Fig. 2.6-9 och i Bilaga 2A. Av figurerna framkommer:

- 11.3 m från branden är flödet i nedre delen av tunneln efter 2 minuter riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) och över cirka 5 meters höjd riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). Överensstämmelsen mellan experimentella och simulerade hastigheter på 6.5 -7.5 m höjd är inom 30% med CFX, SOFIE och SMAFS. Under 5 m nivå ger simuleringarna med CFX stora avvikelser.
  Efter 5 minuter är flödet under 3.5 m riktat från norr till söder. Över 3.5 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 30%. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 10 minuter är flödet under 3 m delen riktat från norr till söder. Över 3 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 30% för höjder över 3 m. SMAFS ger endast ett flöde riktat från norr till söder under 1 m. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 20 minuter är i stort alla flöden riktade från söder till norr. Dock är de simulerade medelhastigheterna 2-3 ggr högre än de uppmätta
- 62 m från branden är flödet i nedre delen av tunneln efter 2 minuter riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) och över cirka 4.5 meters höjd riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). Överensstämmelsen mellan experimentella och simulerade hastigheter är på alla höjder inom 50% med SOFIE och SMAFS. Simuleringarna med CFX stora ger stora avvikelser.
  Efter 5 minuter är flödet under 4 m delen riktat från norr till söder. Över 4 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentella och simulerade hastigheter är på nästan alla höjder inom 30% med SMAFS. Simuleringarna med SOFIE ger endast flöde riktat från norr till söder för höjder under 2.5 m. Simuleringarna med CFX ger endast flöde riktat från söder till norr för alla höjder.
  Efter 10 minuter är flödet under 3.5m riktat från norr till söder. Över 3.5 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 50% för nästan alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 20 minuter är flödet under 2.5m riktat från norr till söder. Över 2.5 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 50%för alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.

- 107 m från branden är flödet i nedre delen av tunneln efter 2 minuter riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) och över cirka 4.5 meters höjd riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna med CFX är inom 50% för nästan alla höjder. För simuleringarna med SMAFS och SOFIE har flödet ännu riktat från norr till söder från golv till tak.
  Efter 5 minuter är flödet under 4 m riktat från norr till söder. Över 4 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna med SMAFS är inom 20% för alla höjder. För simuleringarna med SOFIE är flödet riktat från norr till söder endast under 1.5 m. För simuleringarna med CFX har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 10 minuter är flödet under 3.5m riktat från norr till söder. Över 3.5 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 50% för nästan alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 20 minuter är flödet under 3 m riktat från norr till söder. Över 3 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 50% för nästan alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
- 189 m från branden är flödet i nedre delen av tunneln efter 2 minuter riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) och över cirka 4.5 meters höjd riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna med CFX är inom 50% för nästan alla höjder. För simuleringarna med SMAFS och SOFIE har flödet ännu riktat från norr till söder från golv till tak.
  Efter 5 minuter är flödet under 4 m riktat från norr till söder. Över 4 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna med CFX och SMAFS är inom 70% för nästan alla höjder. För simuleringarna med SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 10 minuter är flödet under 3 m riktat från norr till söder. Över 3 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom 70% för nästan alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
  Efter 20 minuter är flödet under 2.5 m riktat från norr till söder. Över 2.5 m är flödet riktat från söder till norr. Överensstämmelsen mellan experimentet och simuleringarna SMAFS är inom cirka 70% för nästan alla höjder. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet helt vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.
- 294 m från branden är flödet i nedre delen av tunneln efter 2 minuter riktat från norr till söder (negativa värden i diagrammen) och över cirka 4.5 meters höjd riktat från söder till norr (positiva värden i diagrammen). För simuleringarna med SMAFS och SOFIE har flödet ännu riktat från norr till söder från golv till tak. För simuleringarna med CFX har flödet vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak.

Efter 5 minuter är flödet under 4 m riktat från norr till söder. Över 4 m är flödet riktat från söder till norr. För simuleringarna med SMAFS och SOFIE har flödet vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak För simuleringarna med CFX är flödet riktat från norr söder under 2.5 m och över 2.5 m meters höjd riktat från söder till norr.
Efter 10 minuter är flödet under 3.5 m riktat från norr till söder. Över 3.5 m är flödet riktat från söder till norr. För simuleringarna med SMAFS är flödet riktat från norr söder under 2.5 m och över 2.5 m meters höjd riktat från söder till norr. För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak
Efter 20 minuter är flödet under 3 m riktat från norr till söder. Över 3 m är flödet riktat från söder till norr. För simuleringarna med SMAFS är flödet riktat från norr söder under 1.5 m och över 1.5 m meters höjd riktat från söder till norr.
För simuleringarna med CFX och SOFIE har flödet vänt och är riktat från söder till norr från golv till tak

Jämförelse av temperaturfördelningen mellan experiment och simuleringar finns redovisade i Fig. 2.10-13 och i Bilaga 2A. Av figurerna framkommer:

- Temperaturerna i takstrålen når sin högsta nivå enligt Fig.2.17-16 vid avstånden 11.3, 29.2, 62, 107, 189, 294, 404 och 510 m från branden

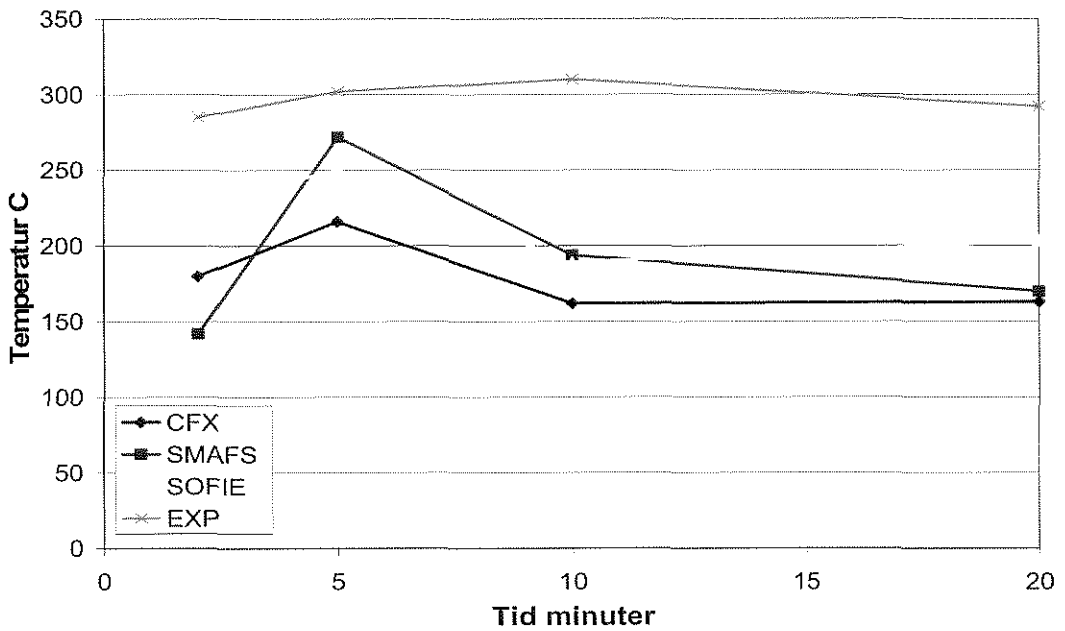



**Fig. 2.17 Maximal temperatur i brandgaslagret 11.3 m norr om branden**

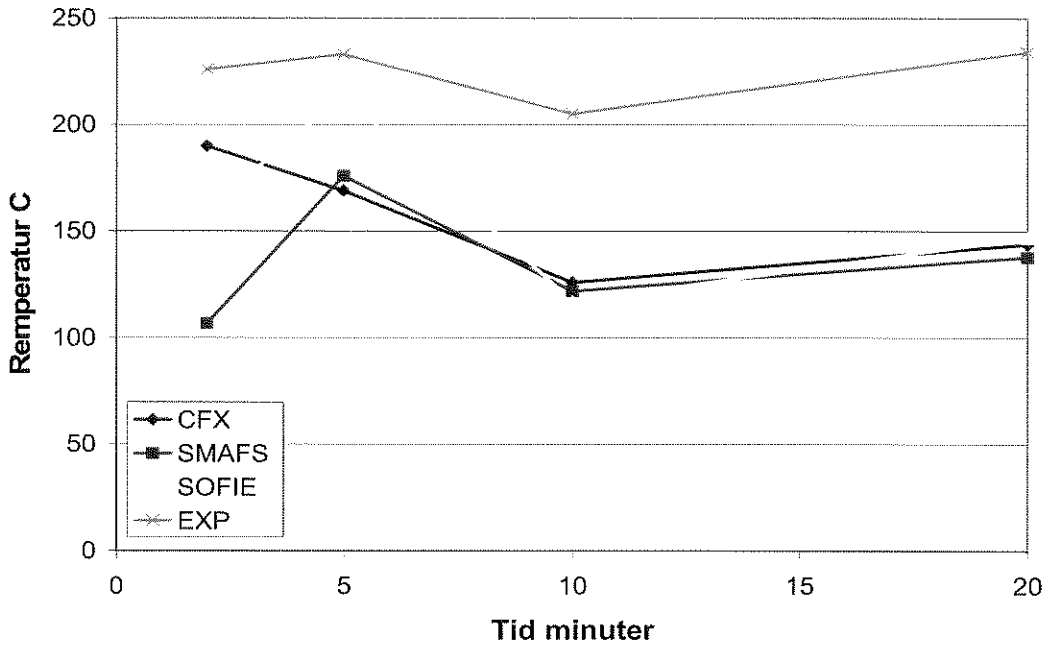



**Fig. 2.18 Maximal temperatur i brandgaslagret 29.2 m norr om branden**

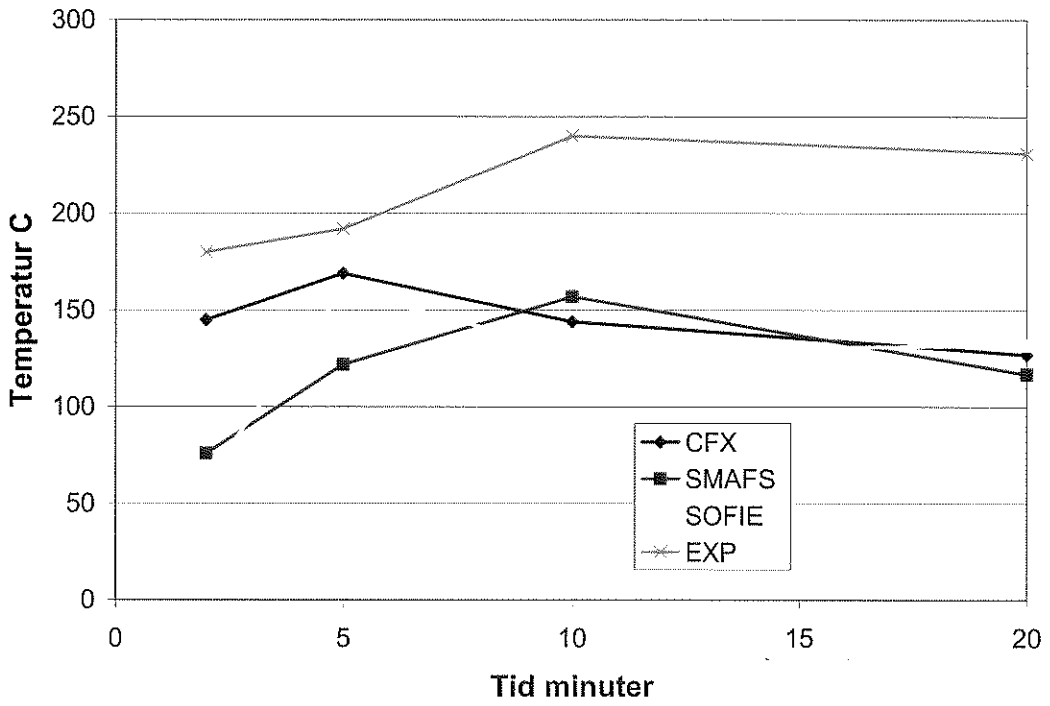



**Fig. 2.19 Maximal temperatur i brandgaslagret 62 m norr om branden**

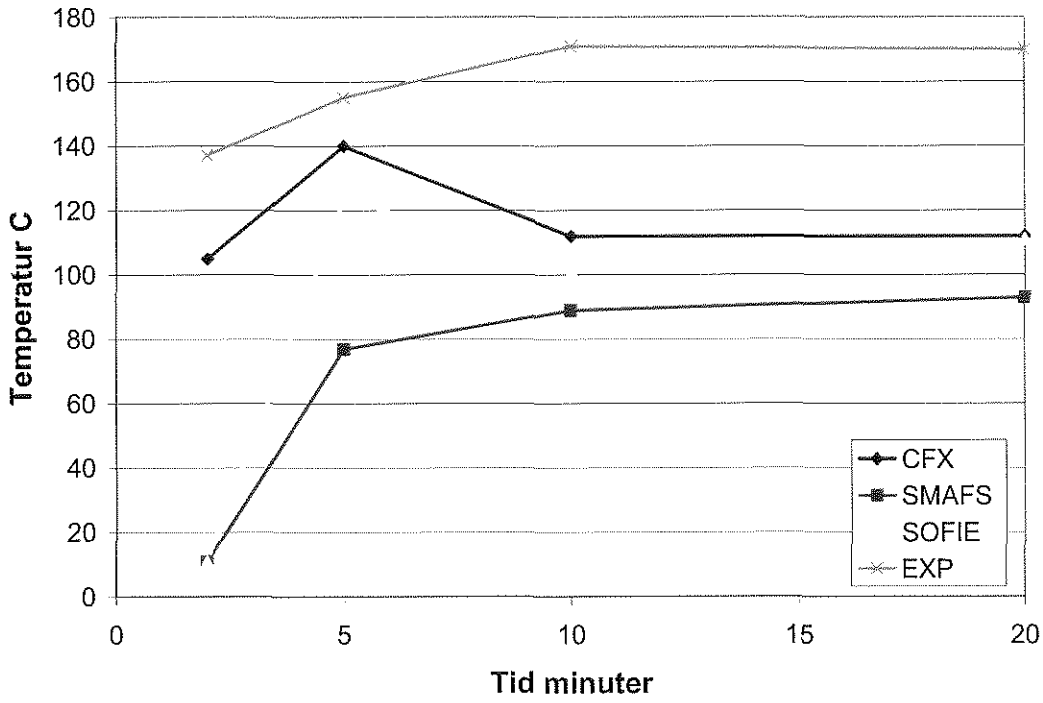



**Fig. 2.20 Maximal temperatur i brandgaslagret 107 m norr om branden**

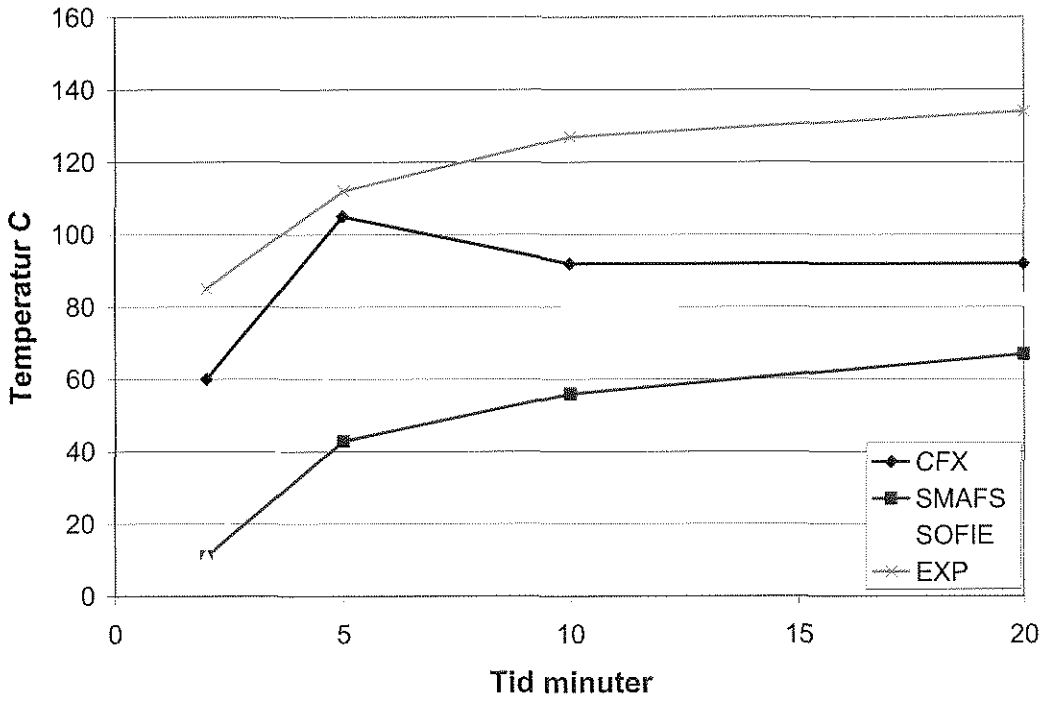



**Fig. 2.21 Maximal temperatur i brandgaslagret 189 m norr om branden**

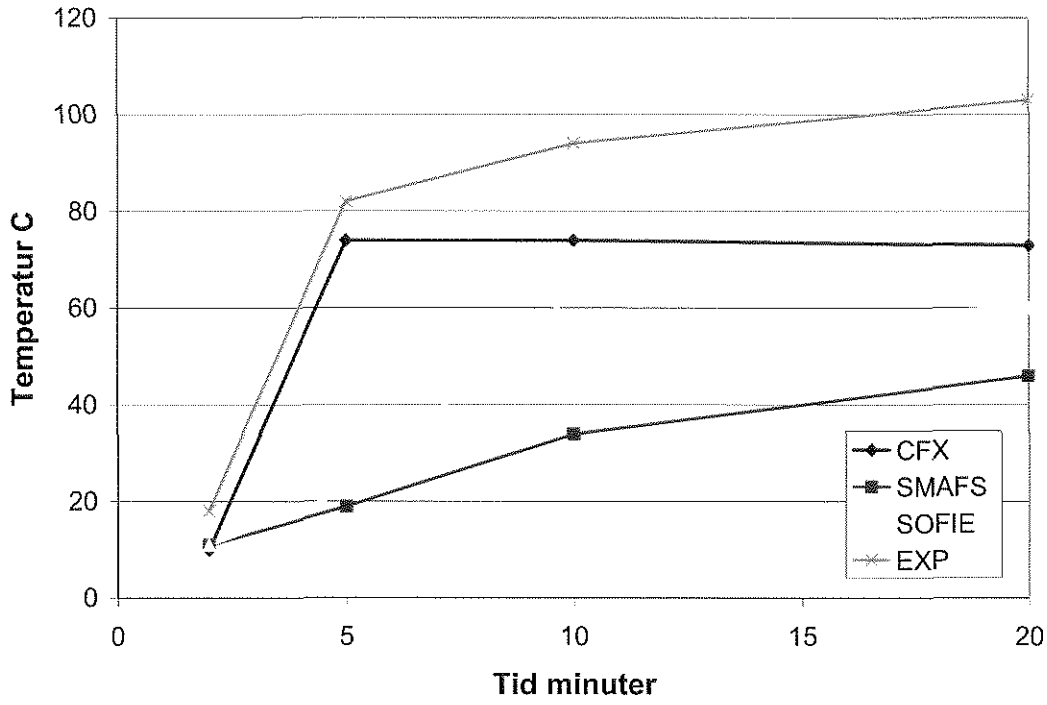



**Fig. 2.22 Maximal temperatur i brandgaslagret 294 m norrom branden**

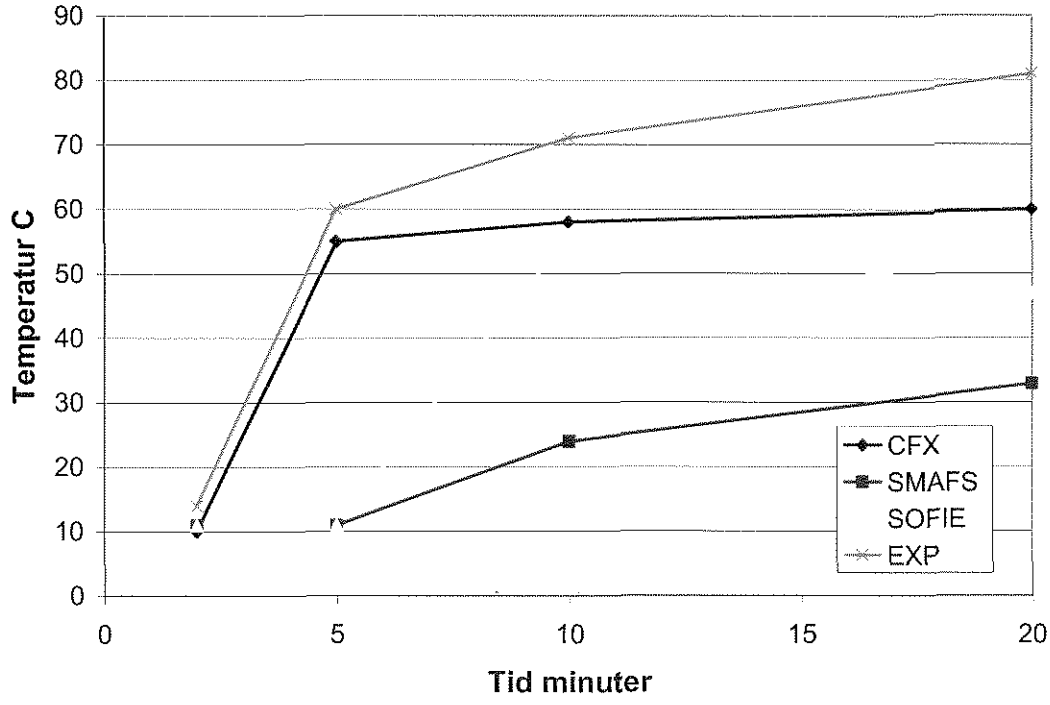



**Fig. 2.23 Maximal temperatur i brandgaslagret 404 m norr om branden**

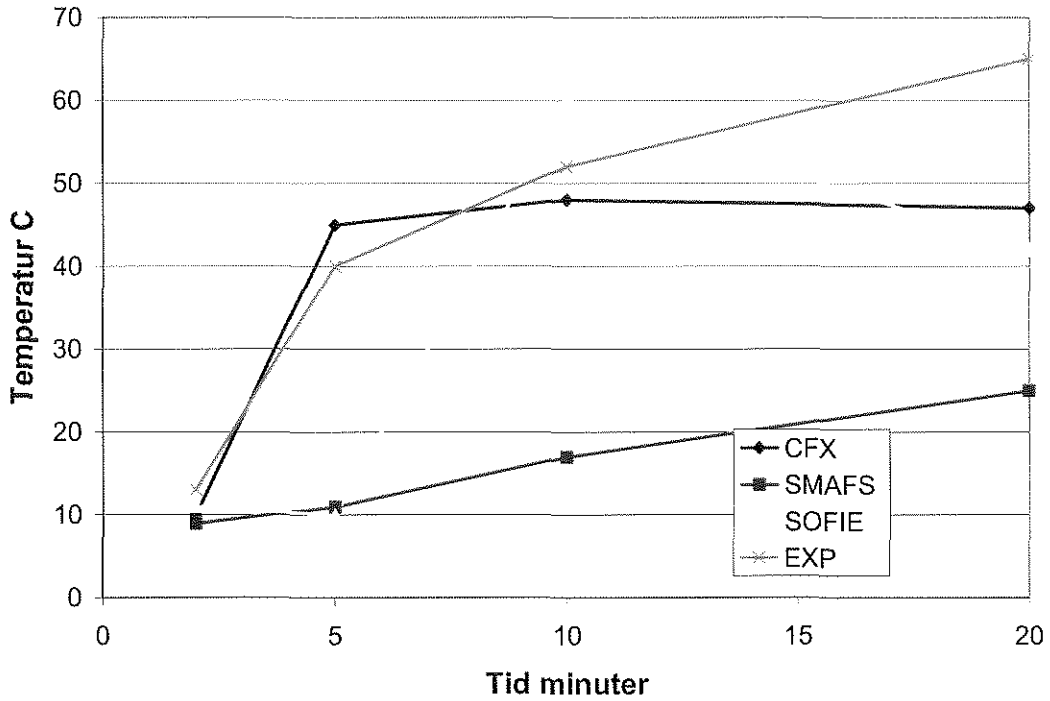



**Fig. 2.24 Maximal temperatur i brandgaslagret 510 m norr om branden**

Den maximala temperaturen i brandgaslagret underskattas med enstaka undantag av simuleringarna på alla avstånd och vid alla tiden. Avvikelsen varierar mellan 0 till cirka 100% . Simuleringarna med CFX stämmer överens med de experimentella med avvikelser mellan 20-50% för alla avstånd och tider. Simuleringarna med SOFIE ger för tiderna 10 och 20 minuter avvikelser på cirka 20-50% för alla avstånd. För kortare tider är avvikelsen större och varierar mellan 20-100 %. Simuleringarna med SMAFS ger för tiderna 10 och 20 minuter avvikelser på cirka 20-60-% för avstånd upp till 189 m . För kortare tider och längre avstånd är avvikelsen större och varierar mellan 20-100 %.

# 8 Sammanfattning

- **Tunnelscenariet är mycket komplicerat** med halvcirkelformat tak, 3.2 graders lutning, komplicerat bränsle med stor variation i effektutveckling och dåligt dokumenterade rand- och initialvillkor. Speciellt de yttre förhållandena som medför att luft strömmar från norr till söder då försöket startar medför problem för simuleringarna. Beräkningstiden för de koder som simulerade den uppmätta effekten som funktion av tid blev mycket lång. SOFIE krävde 1220 timmar på en enprocessor dator och SMAFS (parallellversion) 95 timmar på ett kluster med 12 processorer. Av samma skäl misslyckades simuleringarna med FDS.

- **Osäkerheten i experimenten** har inte kunnat kvantifieras varför det inte är meningsfullt att jämföra experimentella mätningar och simuleringar av sikt som är betydelsefull för bedömning av utrymningsmöjlighet vid brand i tunneln.

- **Tunnelns mynningar**
  - Experimentet och samtliga koder och ger en relativt likartad bild av flödet vid tunnelns mynningar. Det av yttre förhållande inducerade luftflödet i tunneln från norr till söder vänder efter 2-3 minuter till från söder till norr på grund av brandinducerade flöden och tunnelns lutning.
  - När flödena stabiliserats efter 20 minuter är avvikelsen mellan experiment och simuleringar för medelvärdet av strömningshastigheten mitt i tunneln 0-20 % i den norra (0% för CFX, 15% för SMAFS och 20% för SOFIE) och 25-75% (75% för CFX, 25% för SMAFS och 60% för SOFIE) i den södra mynningen.
  - När flödena stabiliserats efter 20 minuter är avvikelsen mellan experiment och simuleringar för medelvärdet av temperaturskillnaden mitt i tunneln 15-70% (30% för CFX, 70% för SMAFS och 15% för SOFIE) i den norra mynningen. I den södra mynningen strömmar endast omgivningens luft in tunneln. Experiment och simuleringar ger här identiska värden.

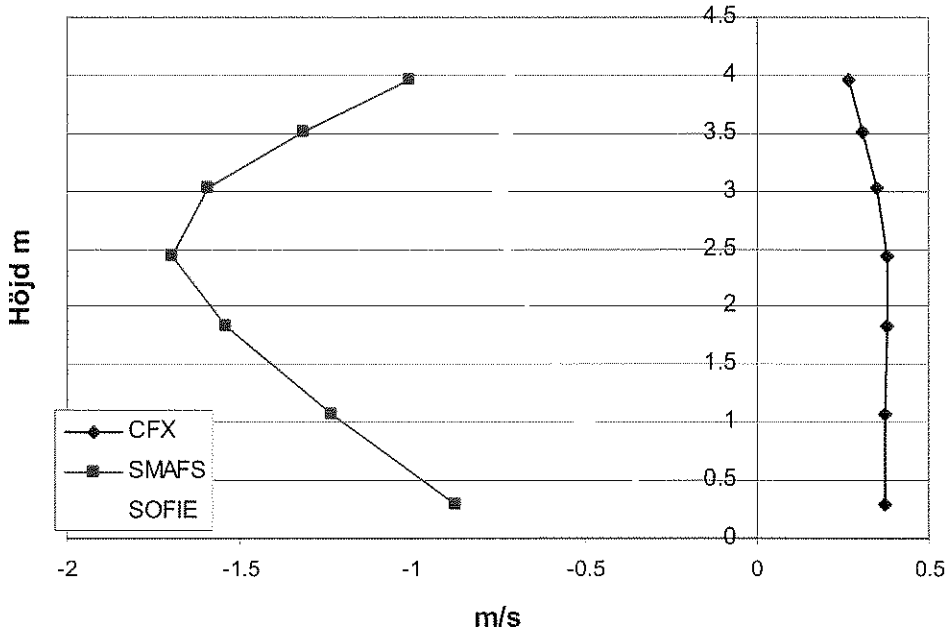
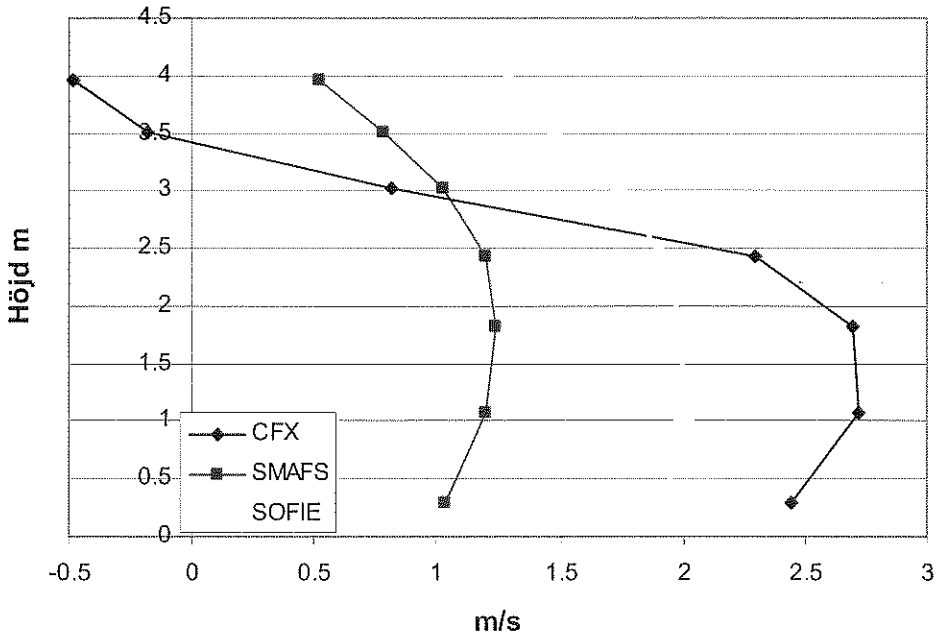
- **Söder om branden**
  - Experimentet och samtliga koder och ger en relativt likartad bild av när det av yttre förhållande inducerade luftflödet inne i tunneln, från norr till söder, vänder till från söder till norr på grund av brandinducerade flöden och tunnelns lutning. Ändringen av flödesriktningen sker efter cirka 2-3 minuter.
  - Efter 5-20 minuter är flödet i nedre delen riktat från söder till norr. En takstråle utbreder sig riktad från norr till söder längs en del av taket på höjder över cirka 5-6 m. SMAFS simulerar takstrålens utbredning mot söder vid olika tider bäst. CFX och framför allt SOFIE underskattar takstrålens utbredning vid olika tider.
  - Den experimentella temperaturen i takstrålen underskattas av simuleringarna på alla avstånd och vid alla tider.

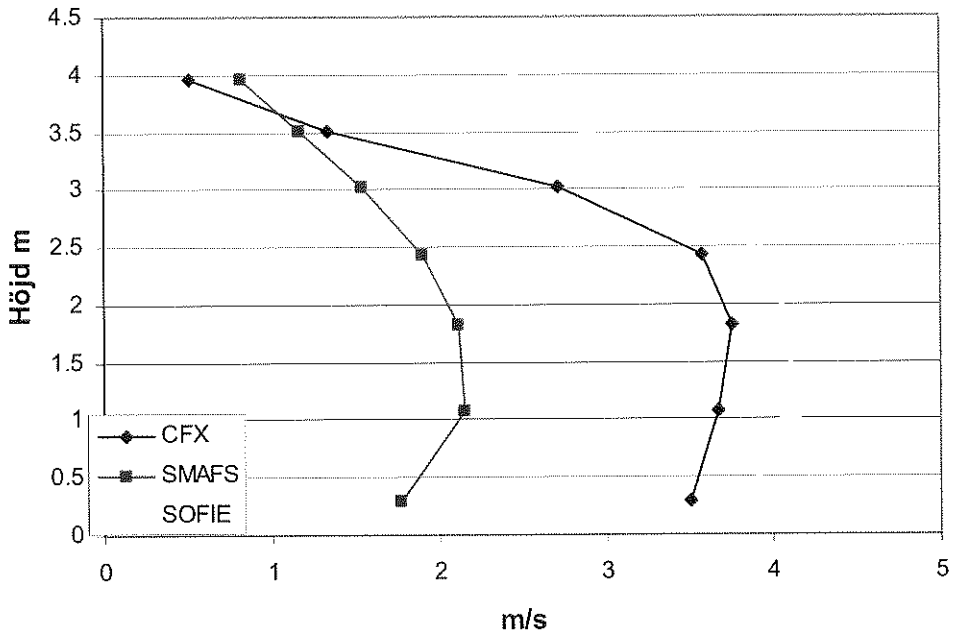
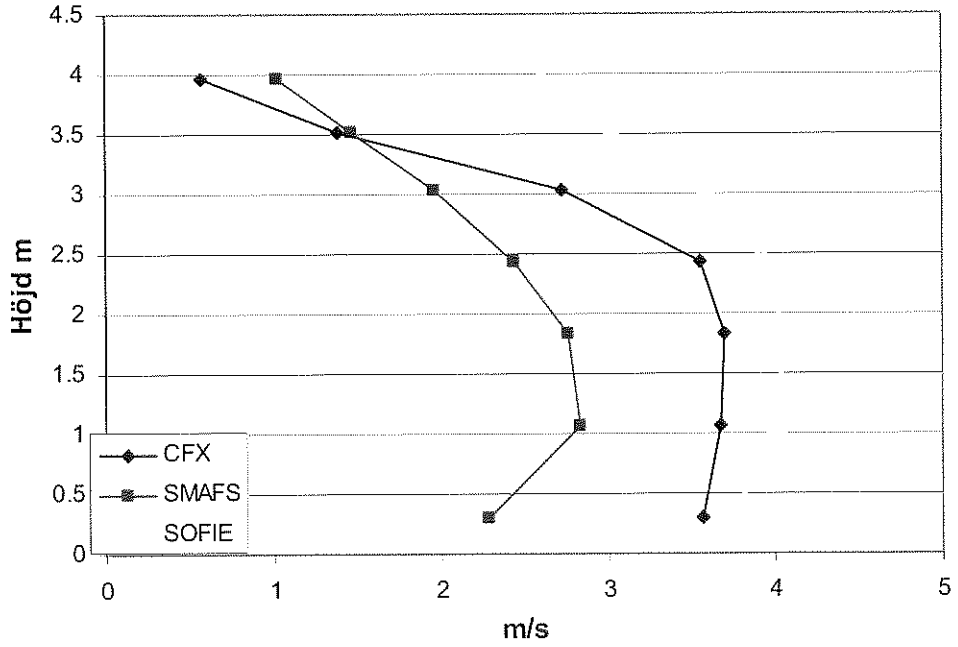
- **Norr om branden**
  - Experimentet och samtliga koder och ger en relativt likartad bild av när det av yttre förhållande inducerade luftflödet inne i tunneln, från norr till söder, vänder till från söder till norr på grund av brandinducerade flöden och tunnelns lutning. Ändringen av flödesriktningen sker efter cirka 2-3 minuter.
  - Experimentet visar att gasflödet längs golvet, upp till en höjd varierande mellan 2.5–4.5 m, strömmar från norr till söder för alla tider för avstånd mellan 11.3 m och 294 m från branden. Ovanför denna höjd strömmar gaserna från söder till norr. SMAFS simulerar utbredningen av strömningen mot branden längs golvet och neutrallägets höjd (hastigheten = 0) vid alla tider bäst. CFX och framförallt SOFIE underskattar utbredningen av strömningen mot branden längs golvet och neutrallägets höjd.
  - Den experimentella temperaturen i de gaser som strömmar längs taket från branden mot den norra mynningen underskattas vid simuleringarna av alla koder vid alla tider och på alla avstånd. För stora avstånd från branden, på 107–404 m och tider vid 10-20 minuter, underskattas temperaturerna med 30% av CFX, 50% av SOFIE och 70% av SMAFS.

# 9. Referenser

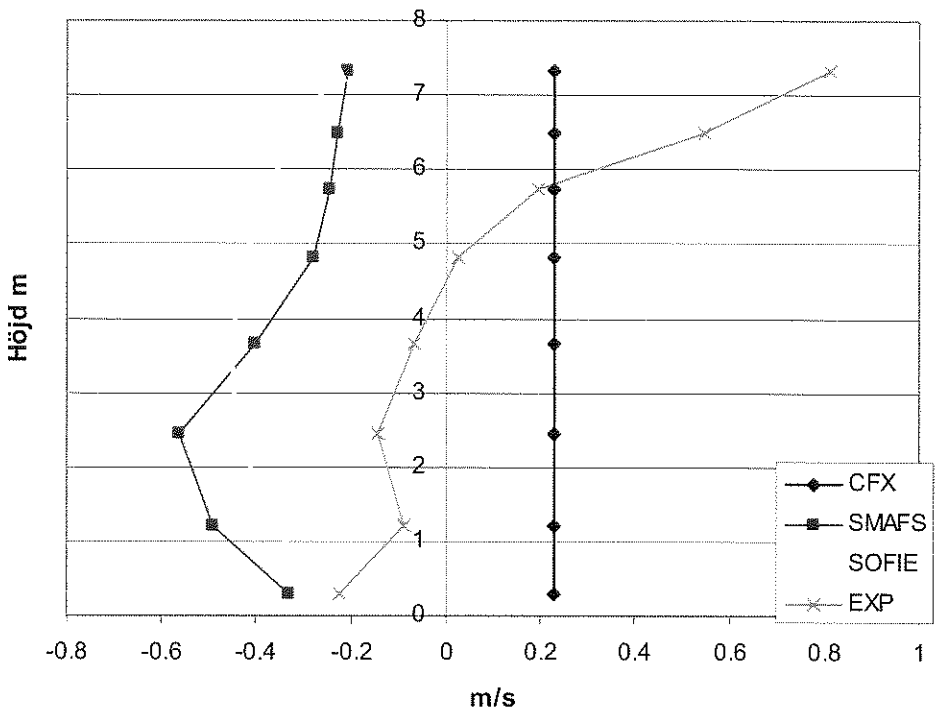

1. Massachusetts Highway Department, and Federal Highway Administration, "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program", *Interactive CD-ROM & Comprehensive Test Report,* Parsons Brickerhoff 4D Imaging, 1996
2. "Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE", Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
3. Chemical and physical imformation www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp75-C3.pdf
4. "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires",Tewarson a., Section 3 Chapter 4 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Ed.
5. "A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", McCaffrey B.J., Heskestad G., Combustion and flame 26 (1976)125-127
6. "Ceiling Jet Flows" Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.

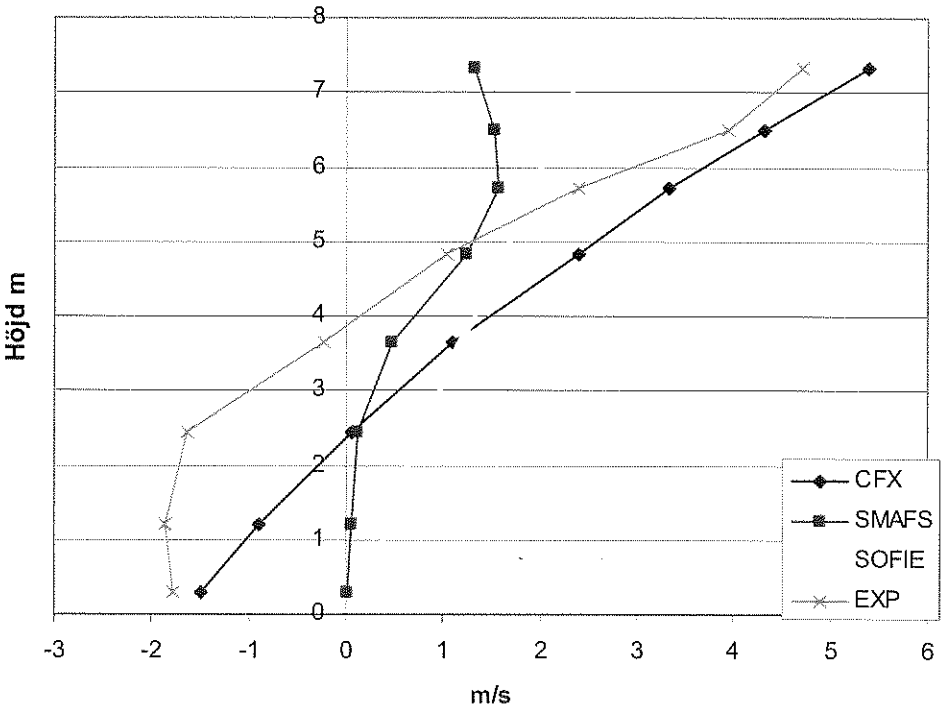
**Bilaga 2A Vertikal hastighetsfördelning vid olika tider och lägen i tunneln**

| Time sec | N to S Point 214 north entrance S to N |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

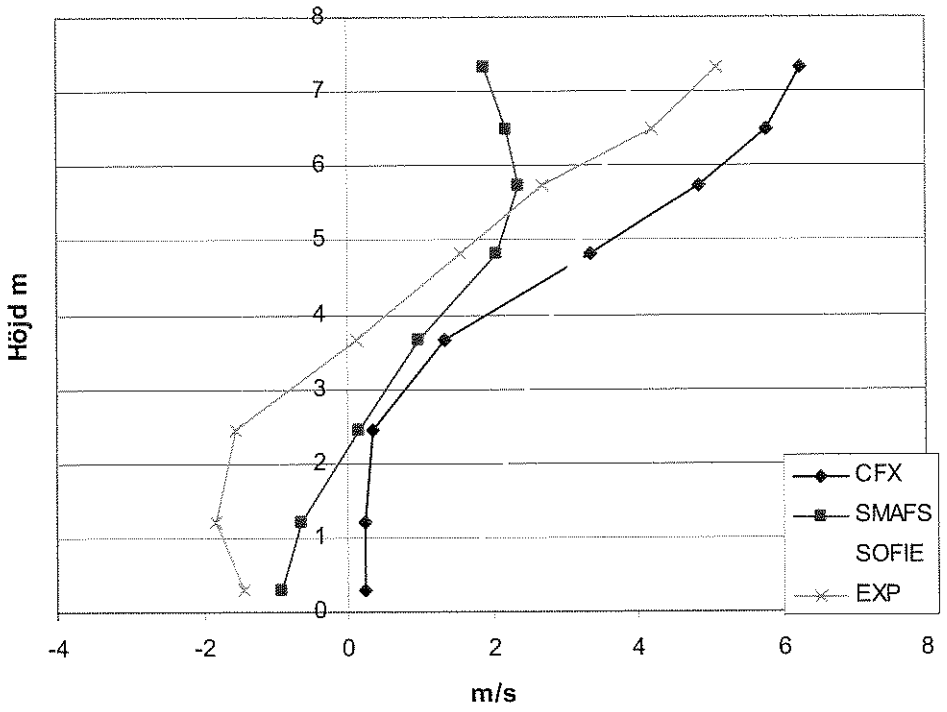
| | |
|---|---|
| 598 |  4.5<br>4<br>3.5<br>3<br>2.5<br>2<br>1.5<br>1<br>0.5<br>0<br>Höjd m<br>CFX<br>SMAFS<br>SOFIE<br>0<br>1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>m/s |
| 1198 |  4.5<br>4<br>3.5<br>3<br>2.5<br>2<br>1.5<br>1<br>0.5<br>0<br>Höjd m<br>CFX<br>SMAFS<br>SOFIE<br>0<br>1<br>2<br>3<br>4<br>5<br>m/s |

| Time sec | N to S | Point 209 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |
| 295 | | | |

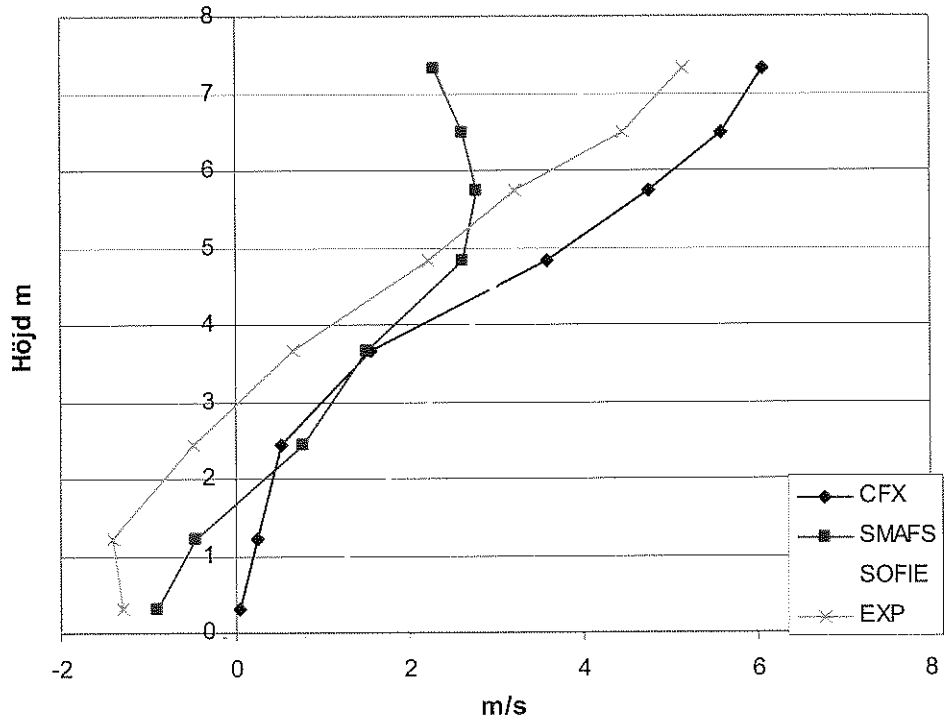


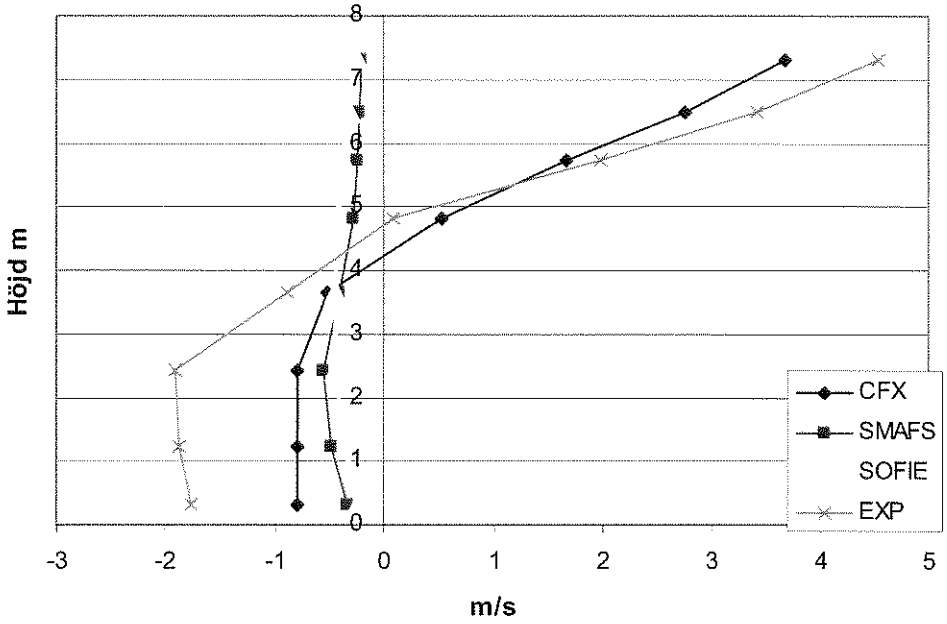
598

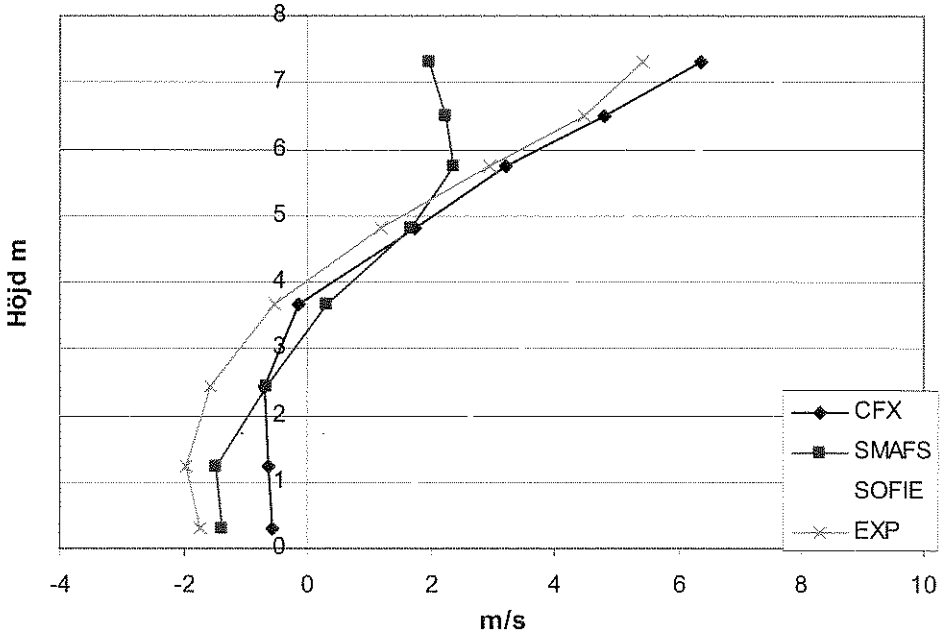



1198

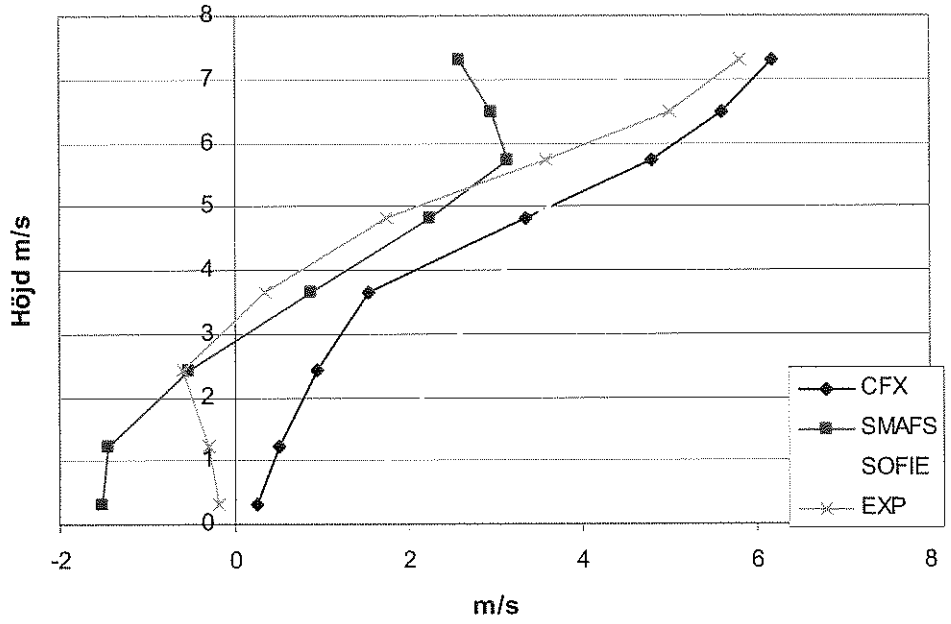


| Time sec | South | Point 208 | North |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |
| 295 | | | |

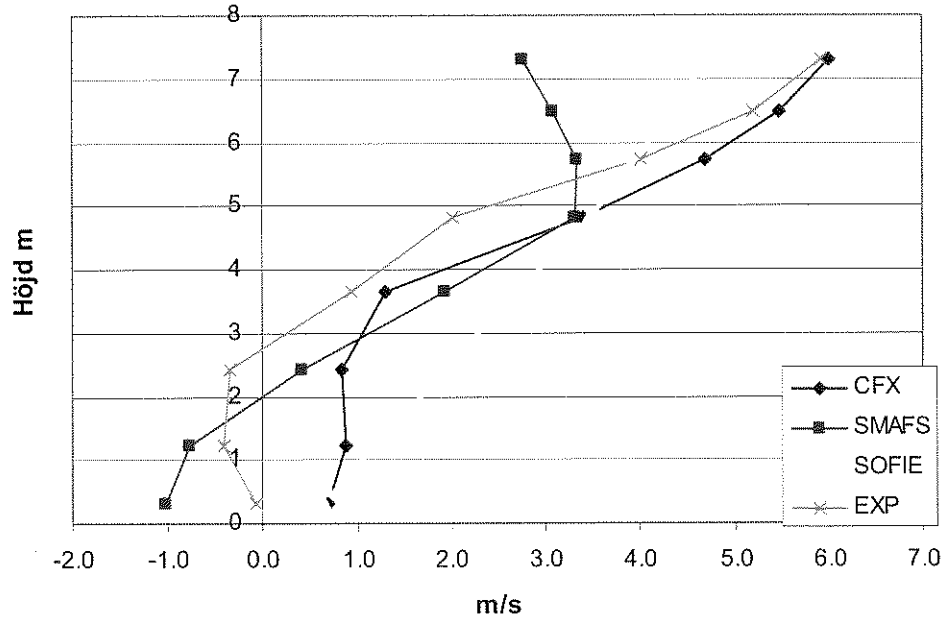


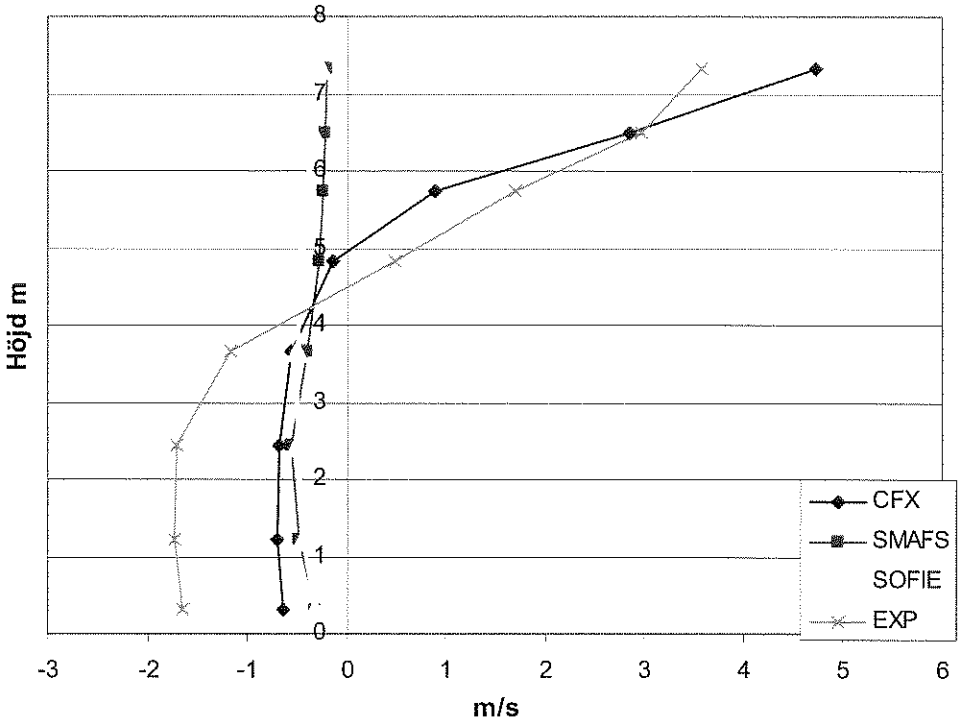
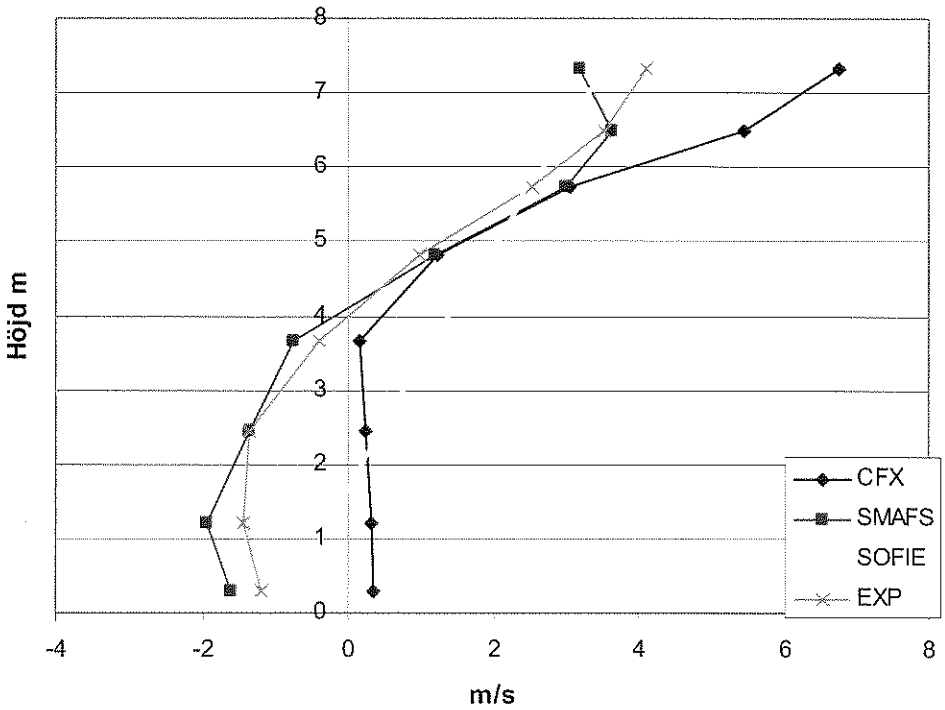



598

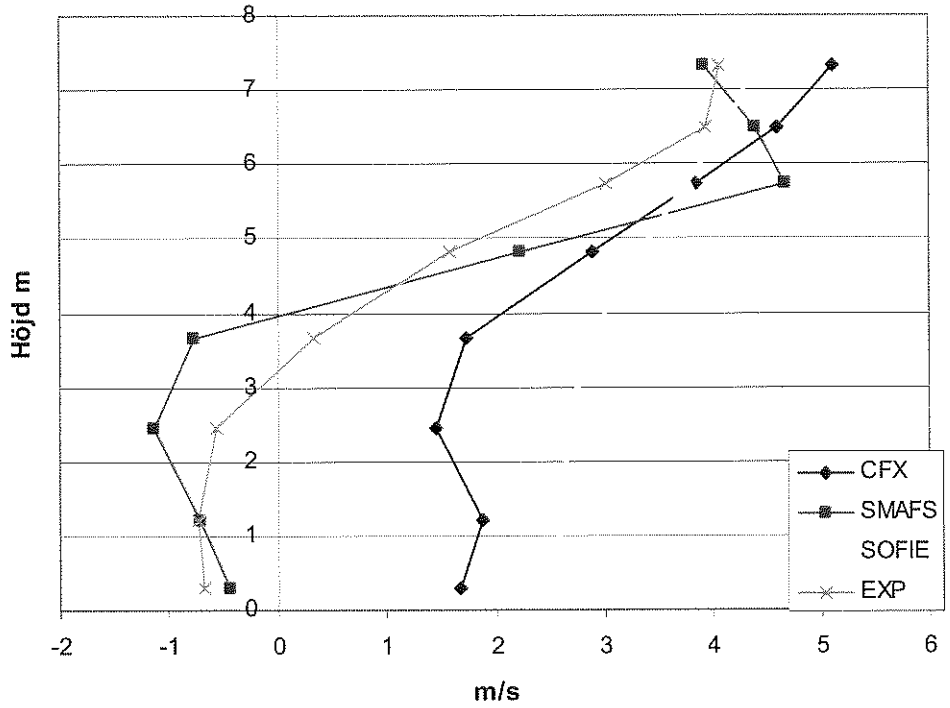



1198

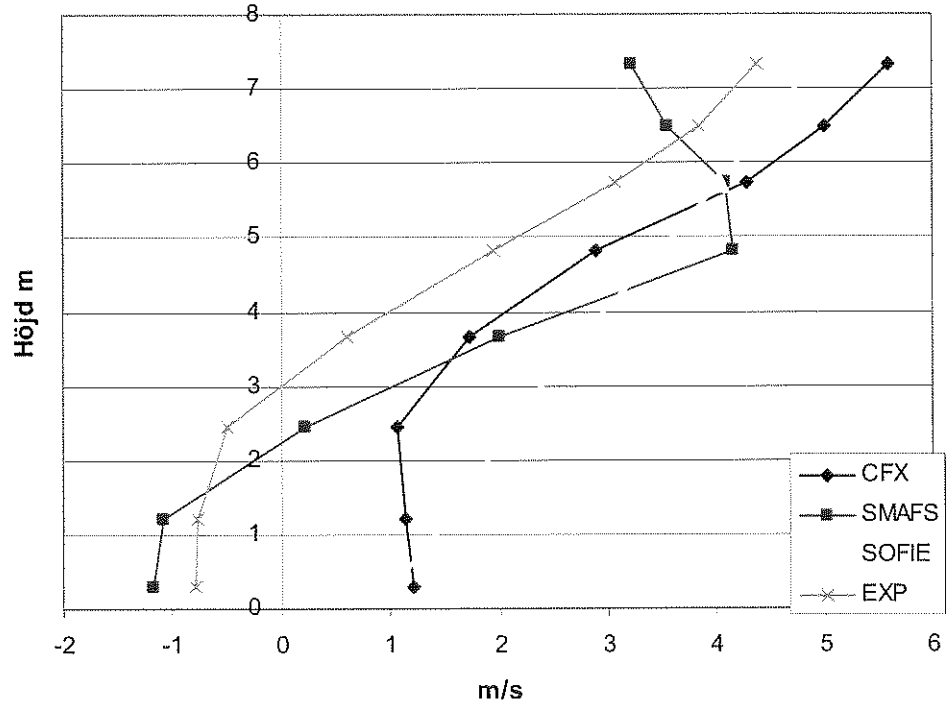


| Time sec | N to S | Point 207 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 |  | | |
| 295 |  | | |

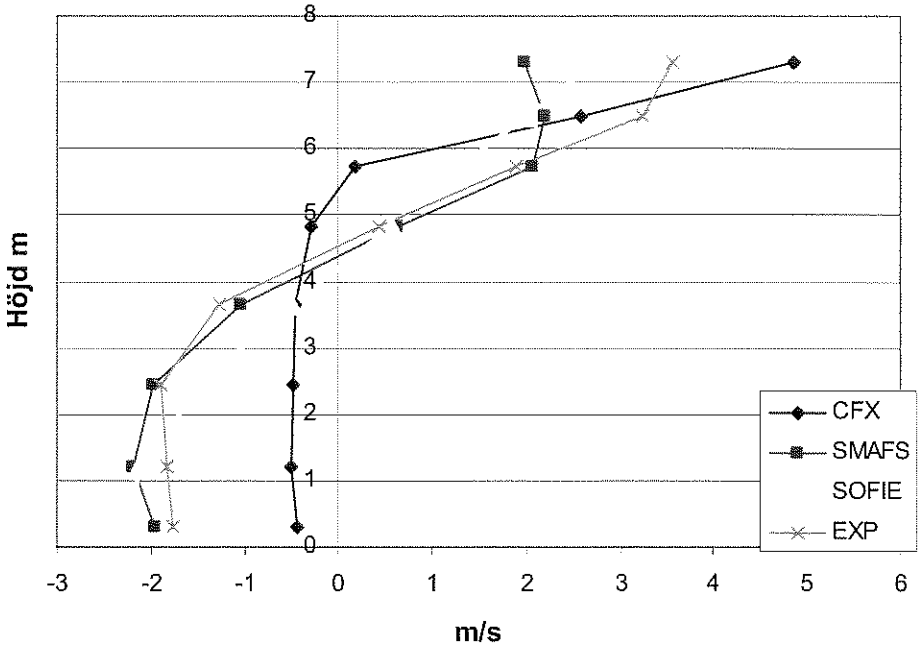
598

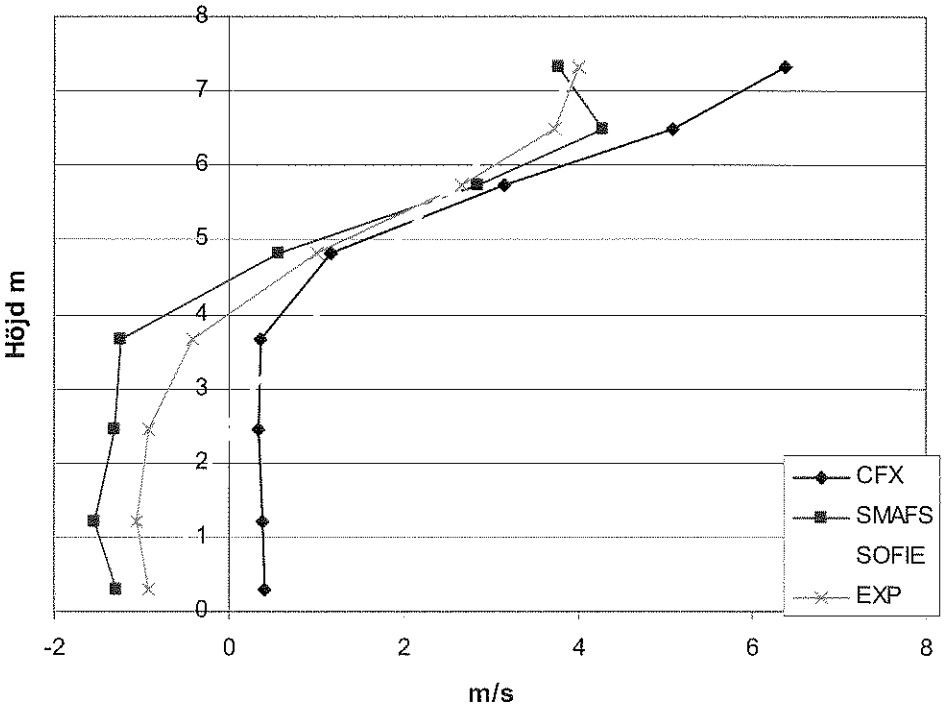



1198

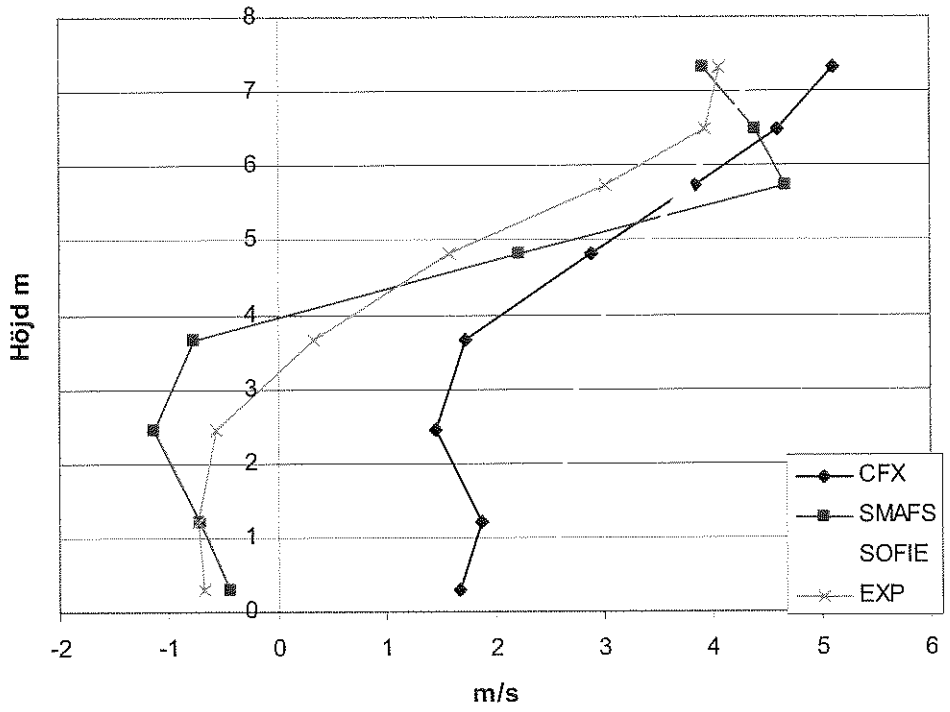


| Time sec | N to S | Point 307 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |
| 295 | | | |

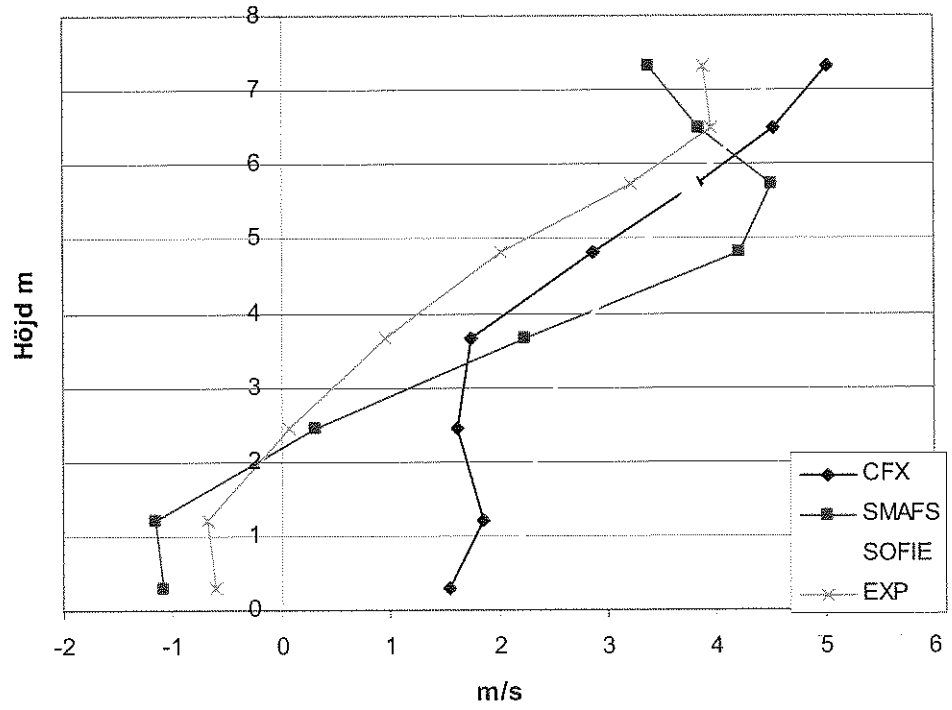


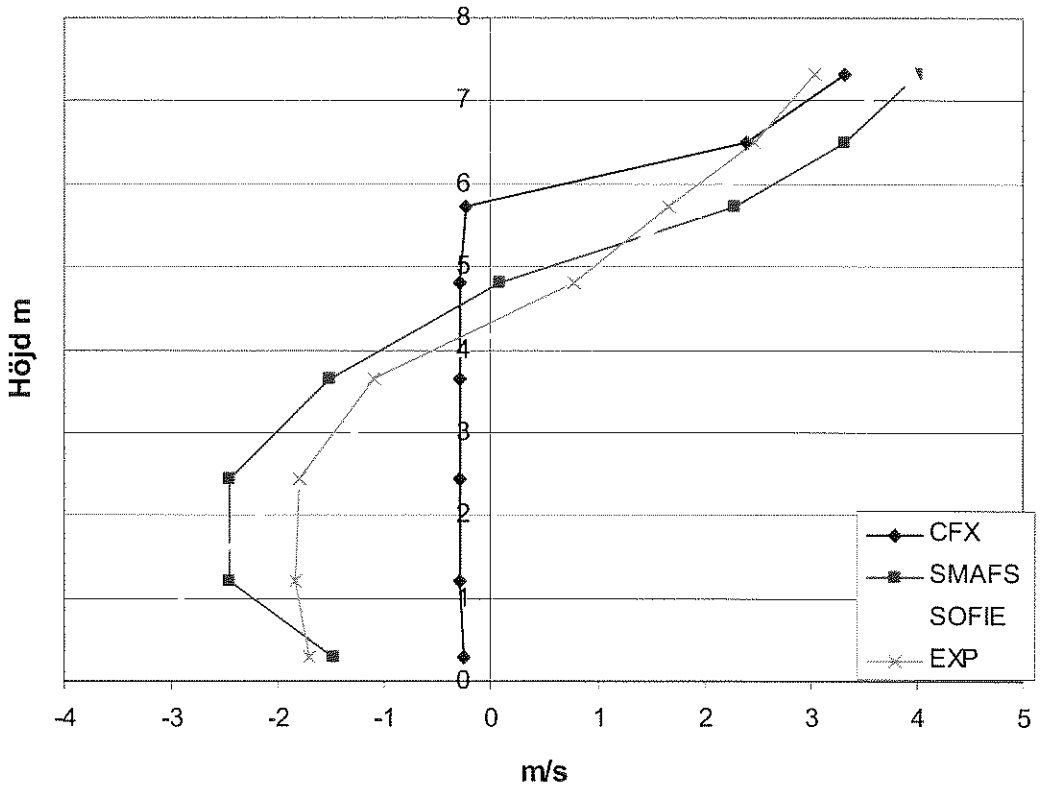
598



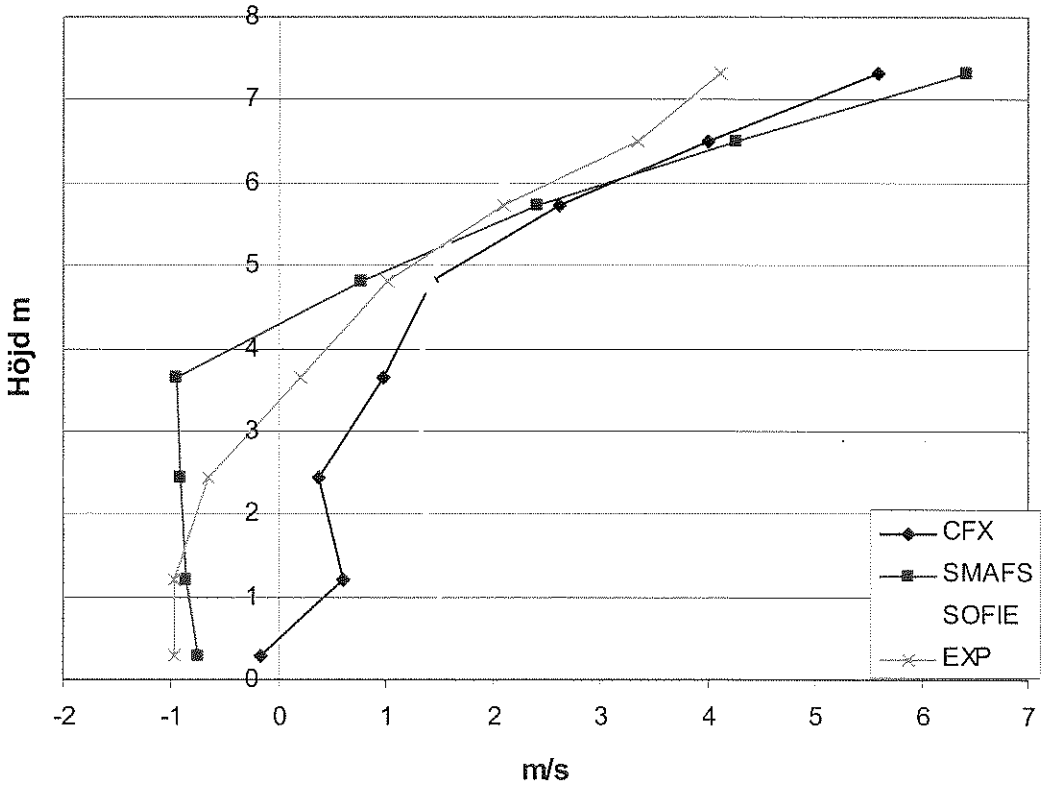

1198



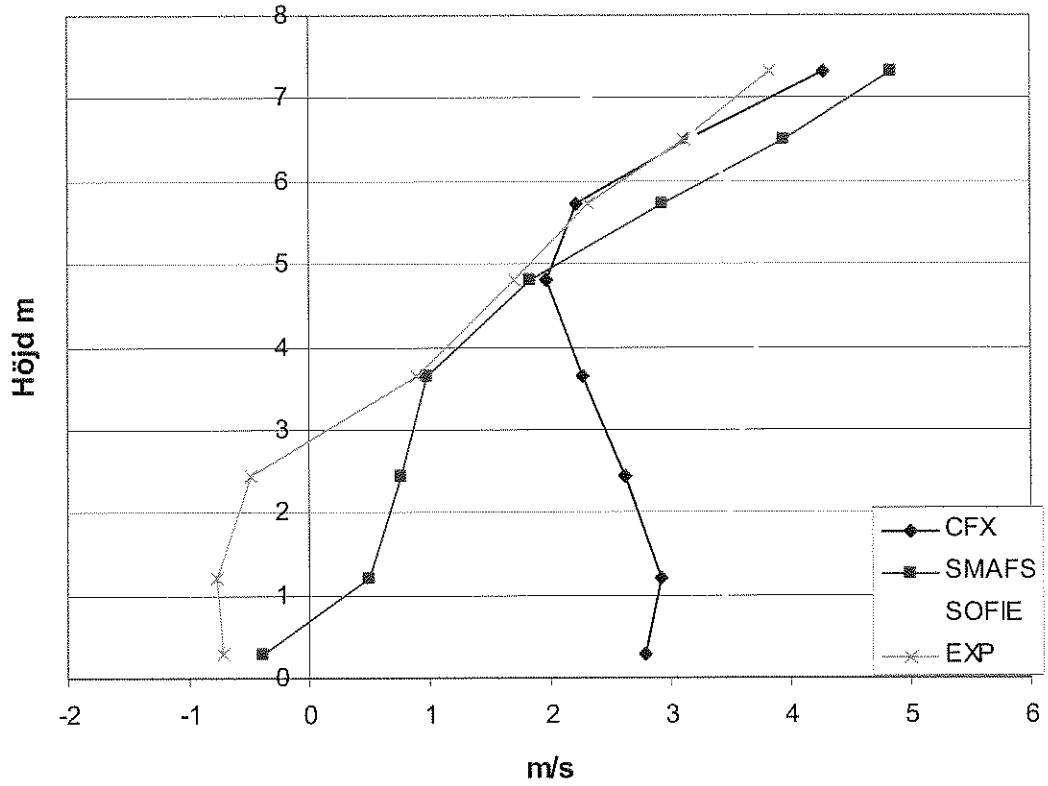
| Time sec | N to S | Point 305 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |



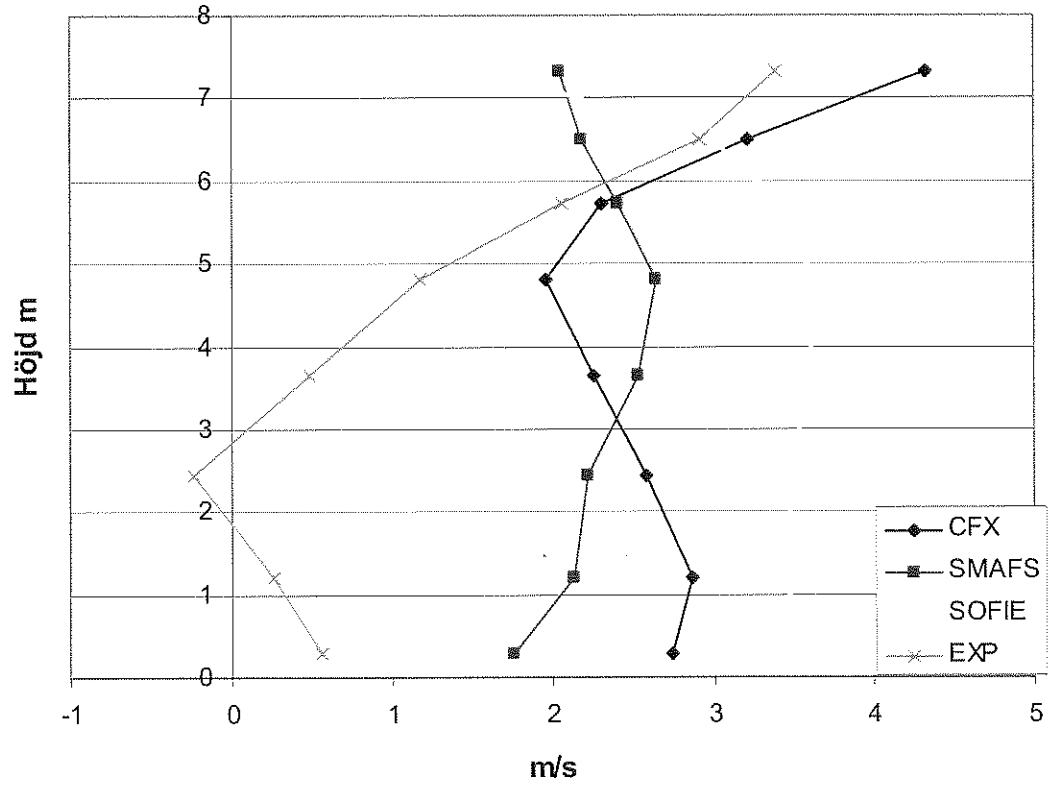

295

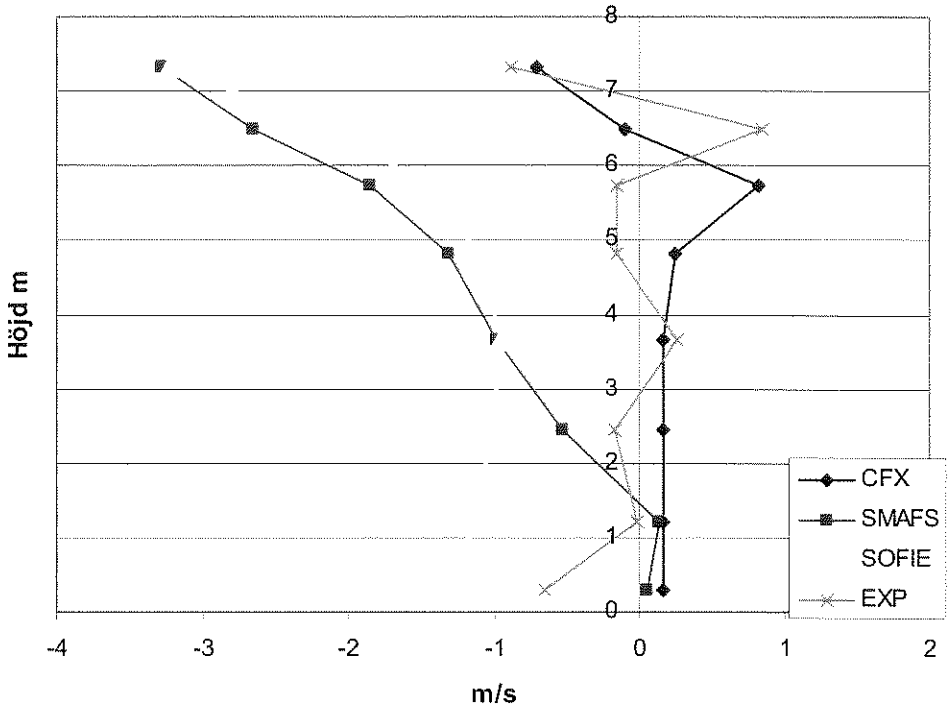
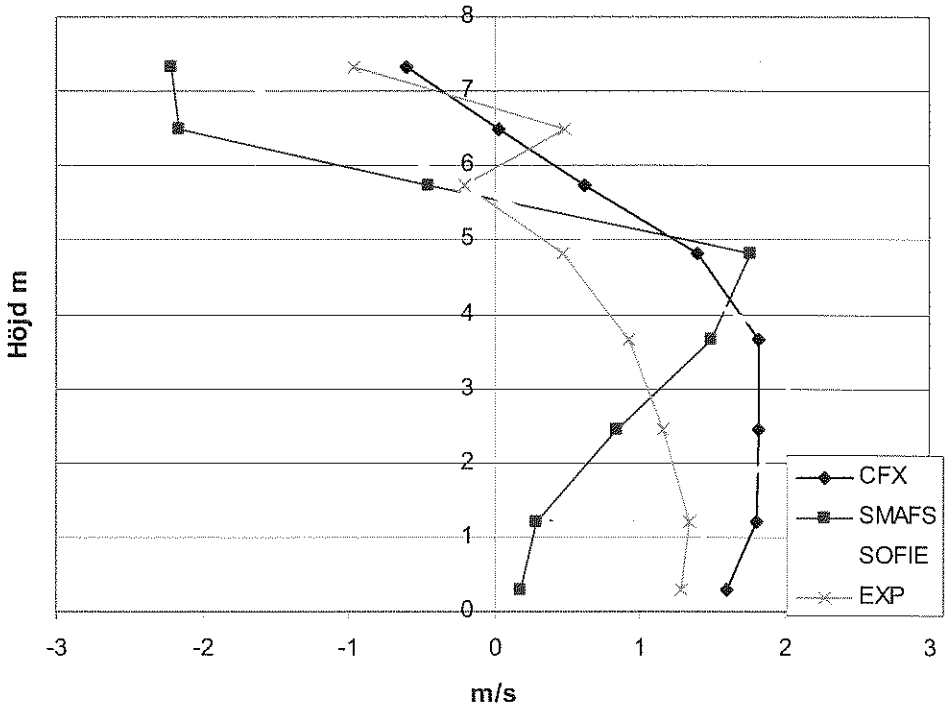


598

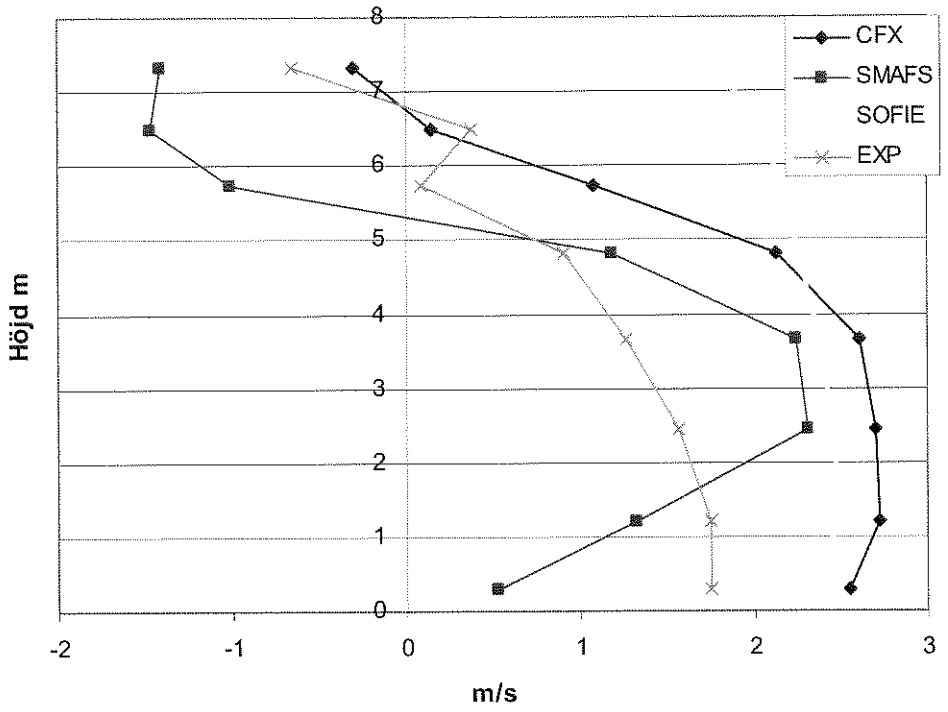



1198

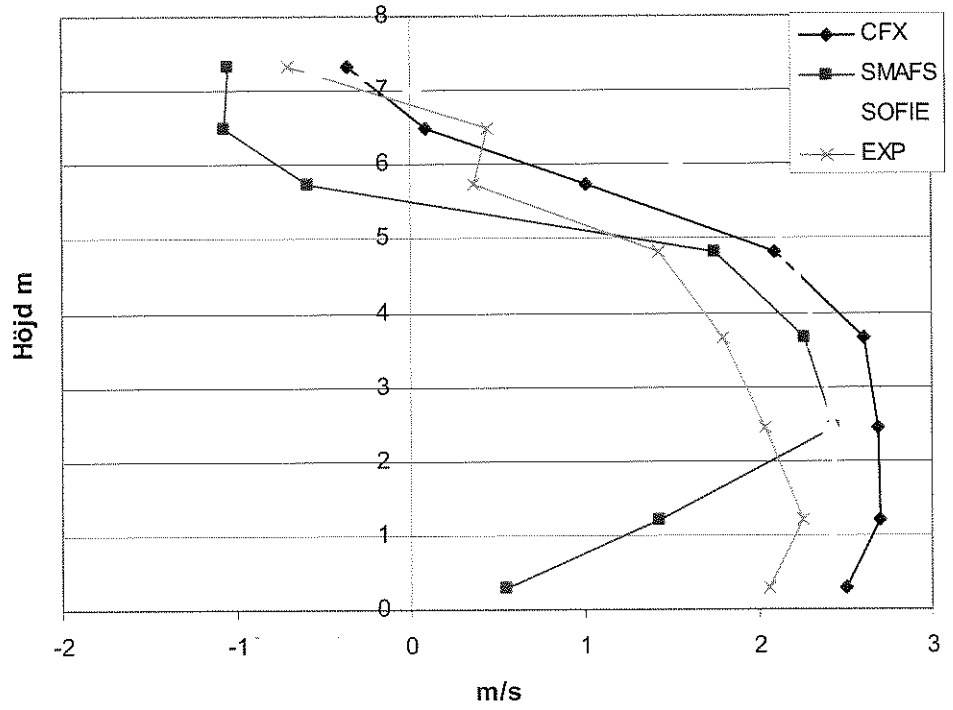


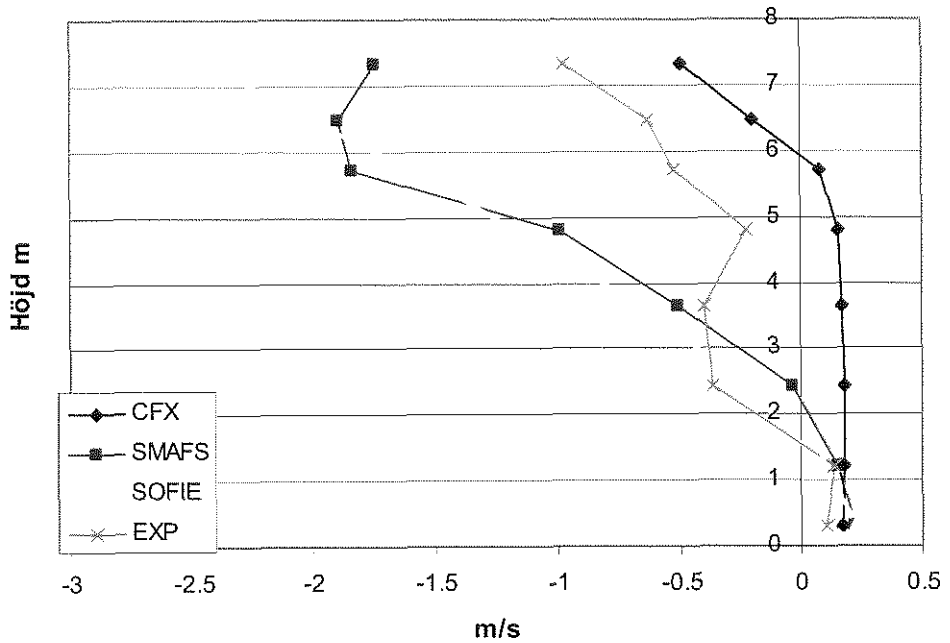
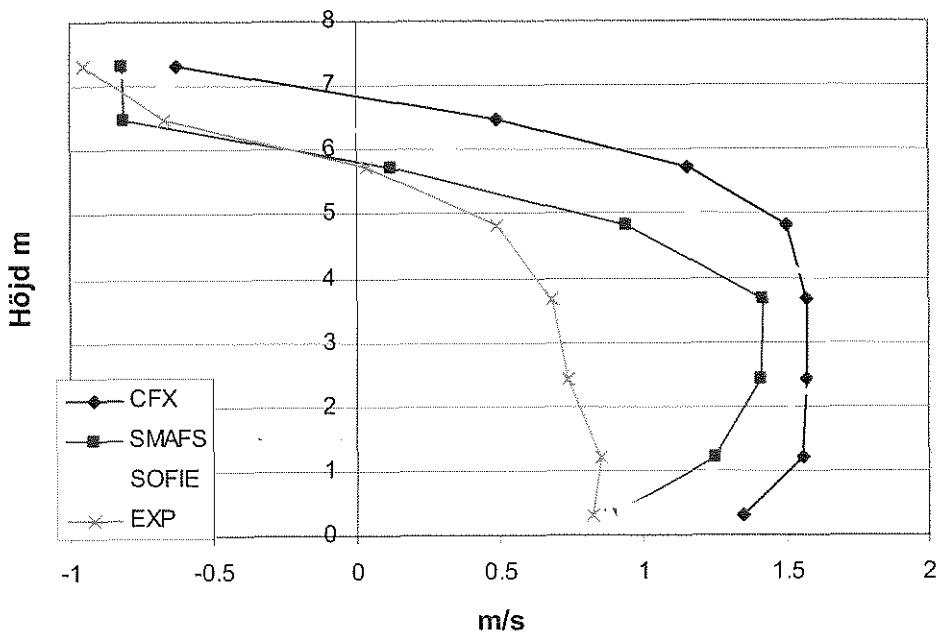
| Time sec | N to S | Point 304 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 |  | | |
| 295 |  | | |

598

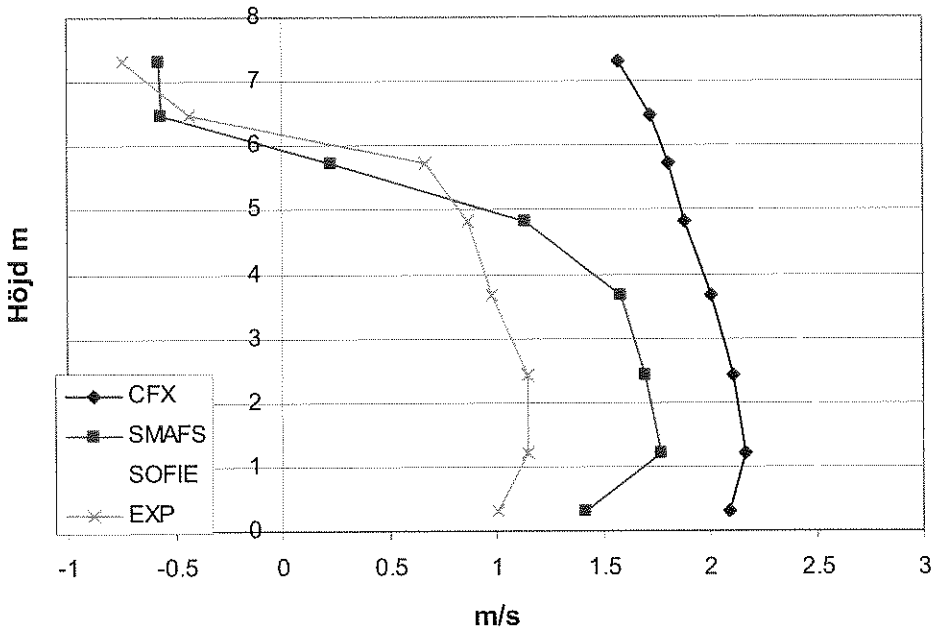

CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
Höjd m
m/s
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-2
-1
0
1
2
3

1198

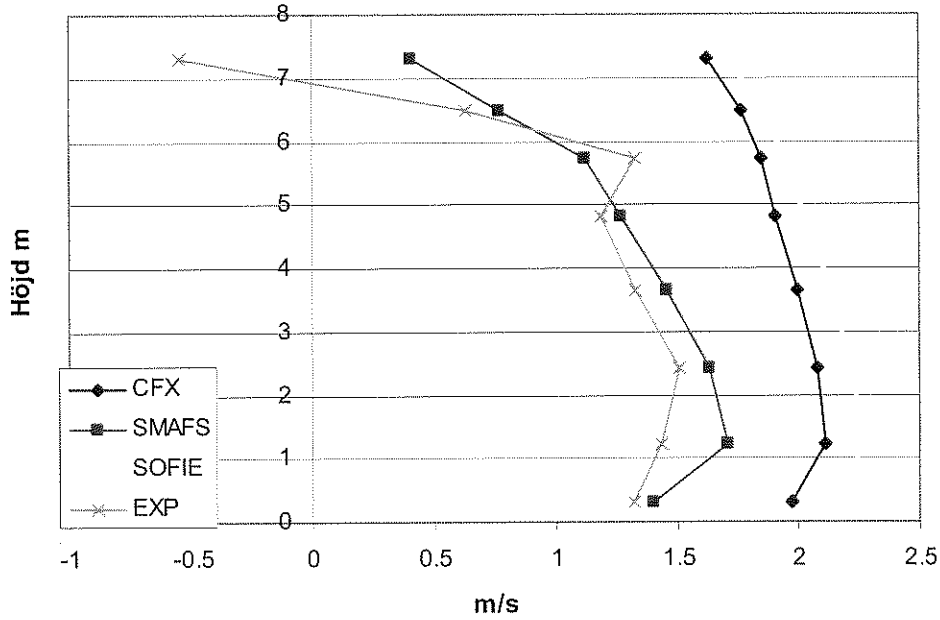

CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
Höjd m
m/s
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-2
-1
0
1
2
3

| Time sec | N to S | Point 302 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 |   | | |
| 295 |   | | |

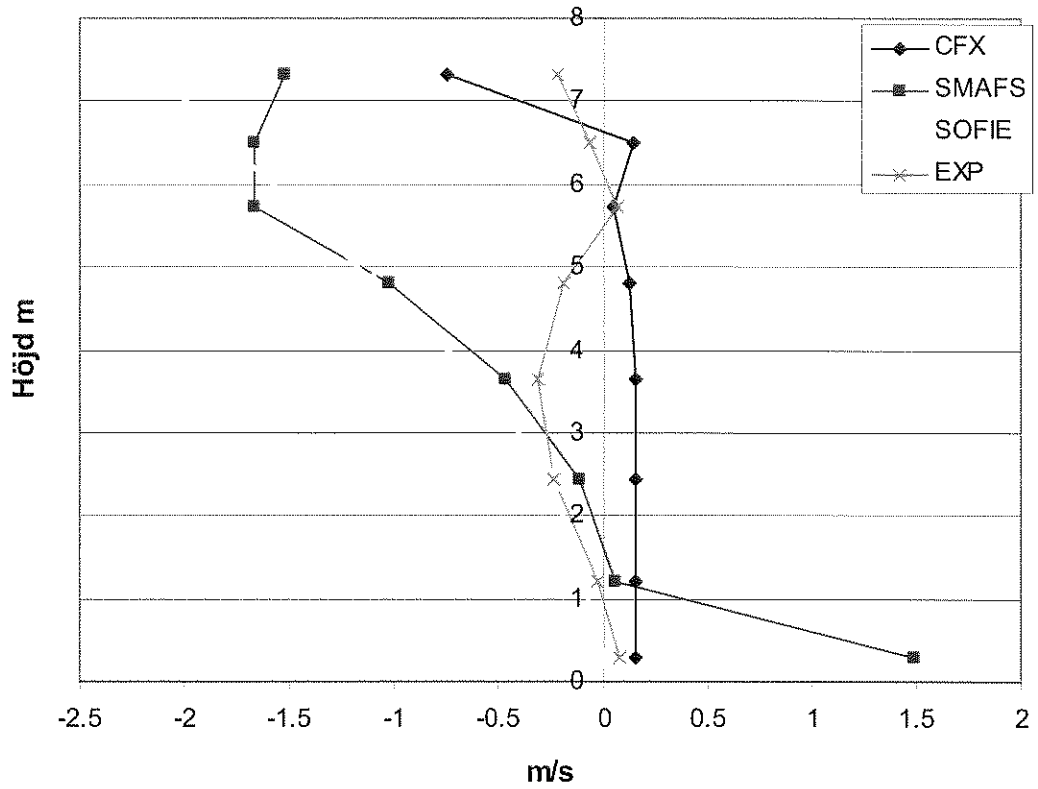
598


Höjd m
m/s
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

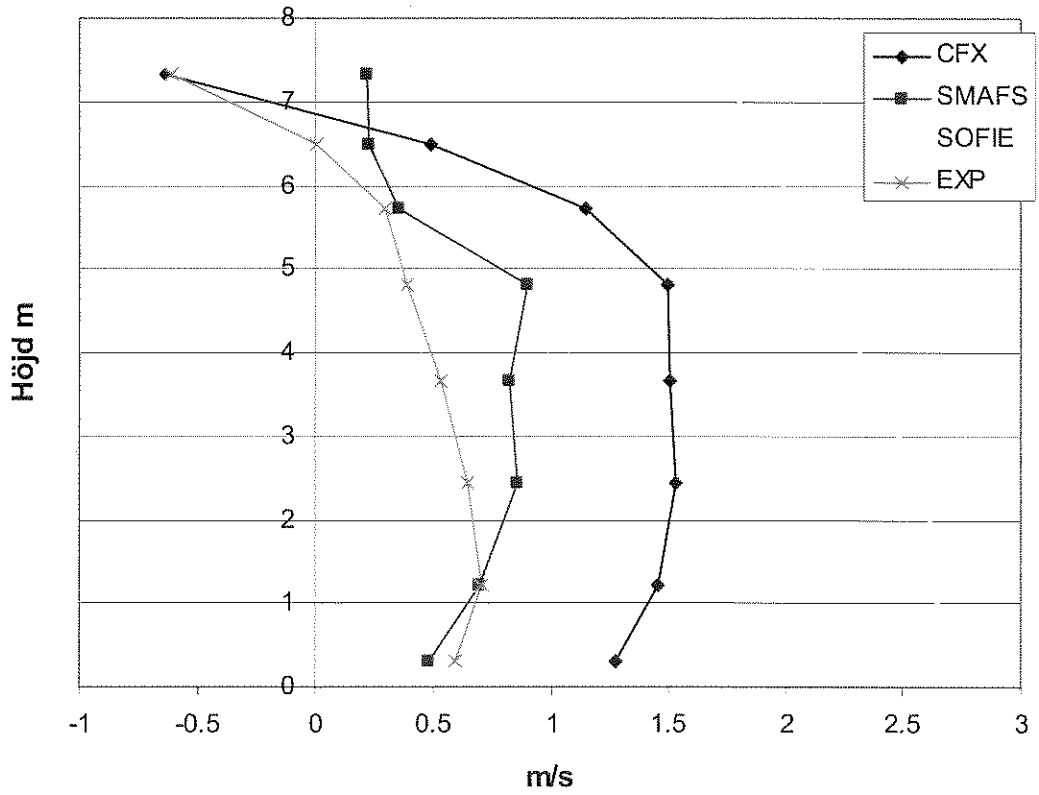
1198


Höjd m
m/s
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5

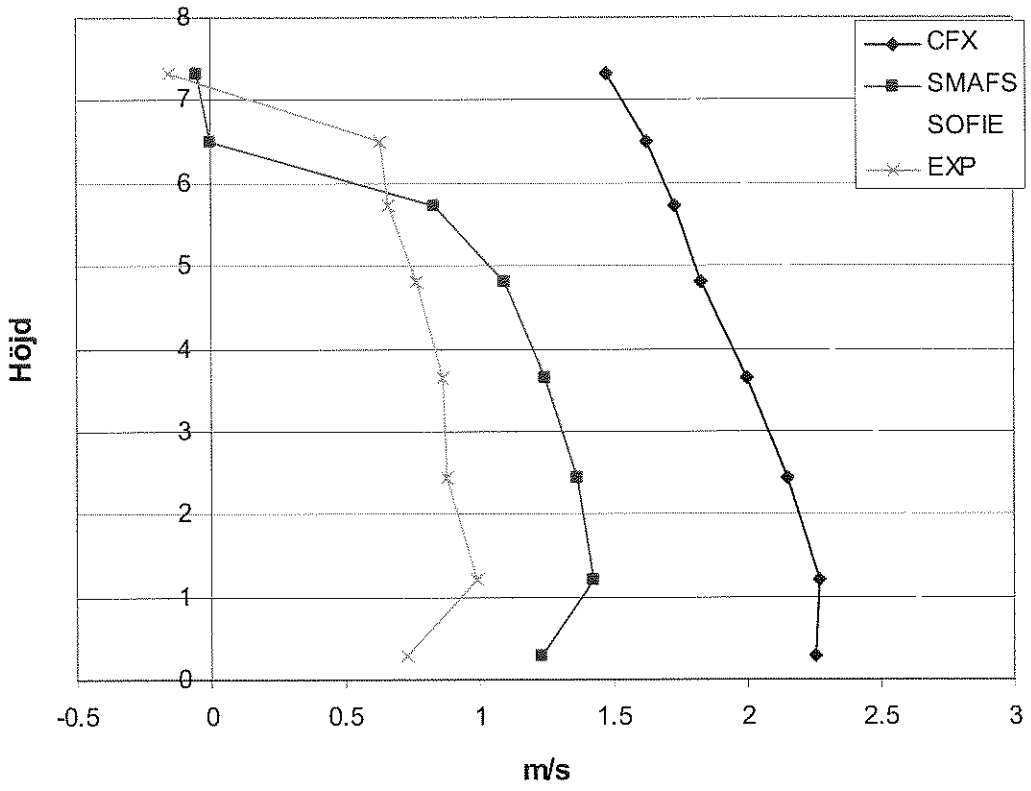
| Time sec | N to S | Point 301 | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |



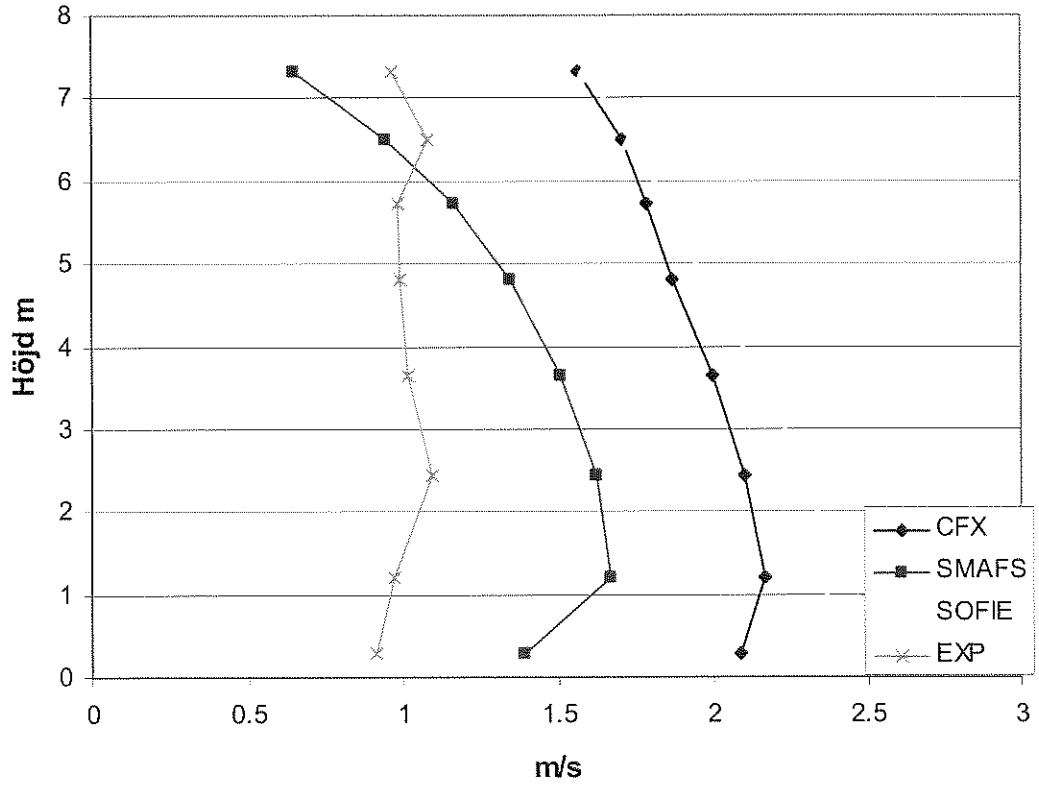

| 295 | | | |
|---|---|---|---|



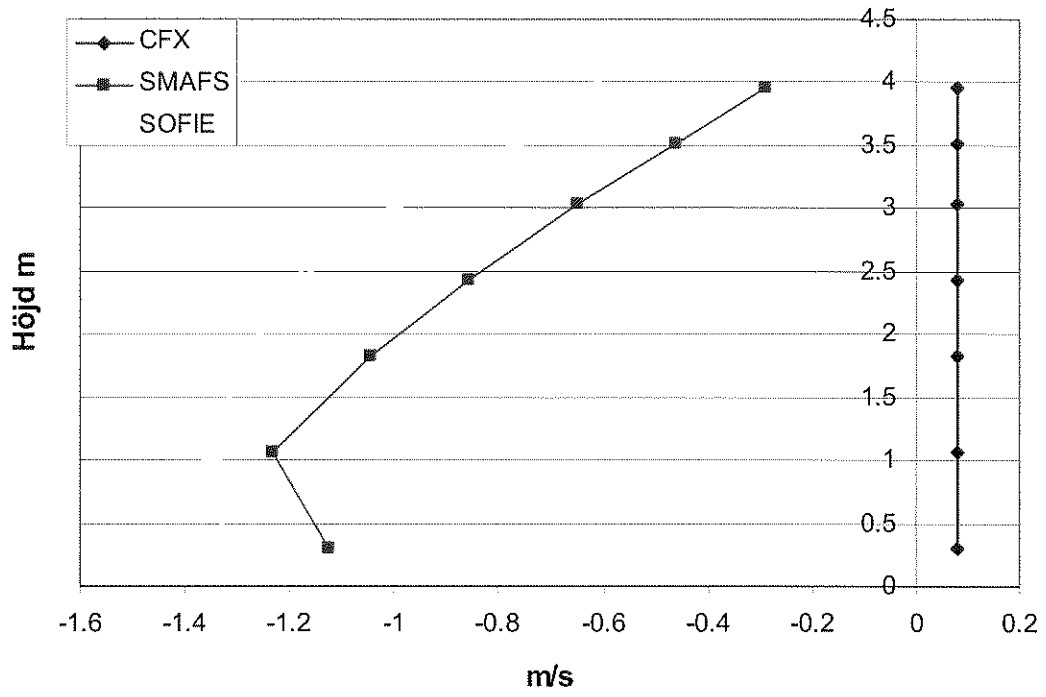
598


CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
Höjd
m/s
8
7
6
5
4
3
2
1
0
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

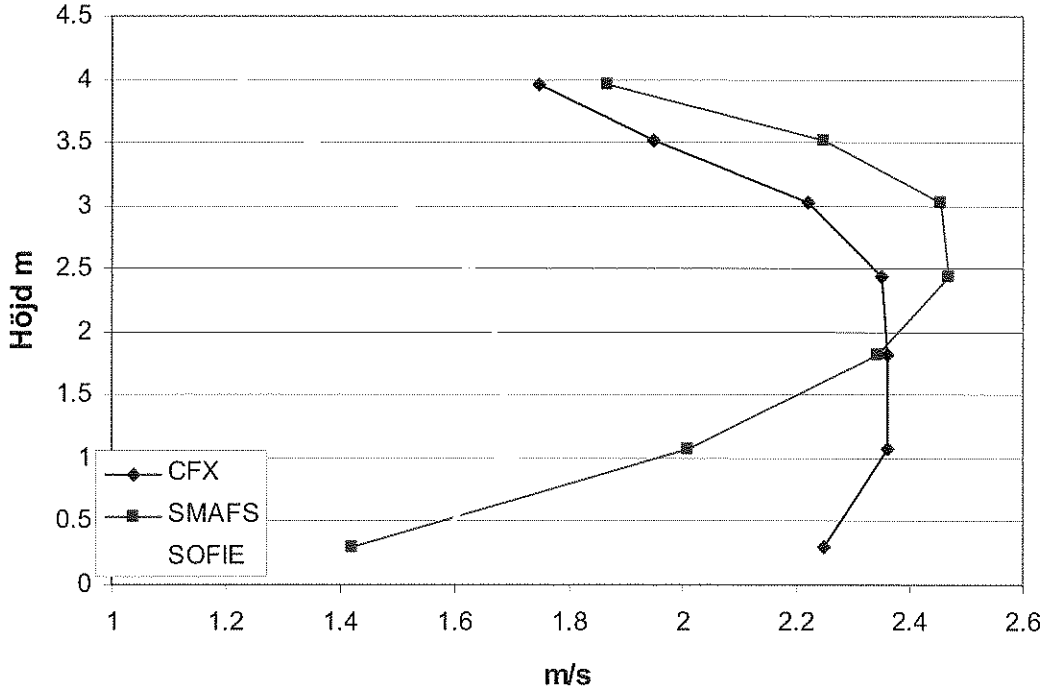
1198


CFX
SMAFS
SOFIE
EXP
Höjd m
m/s
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3

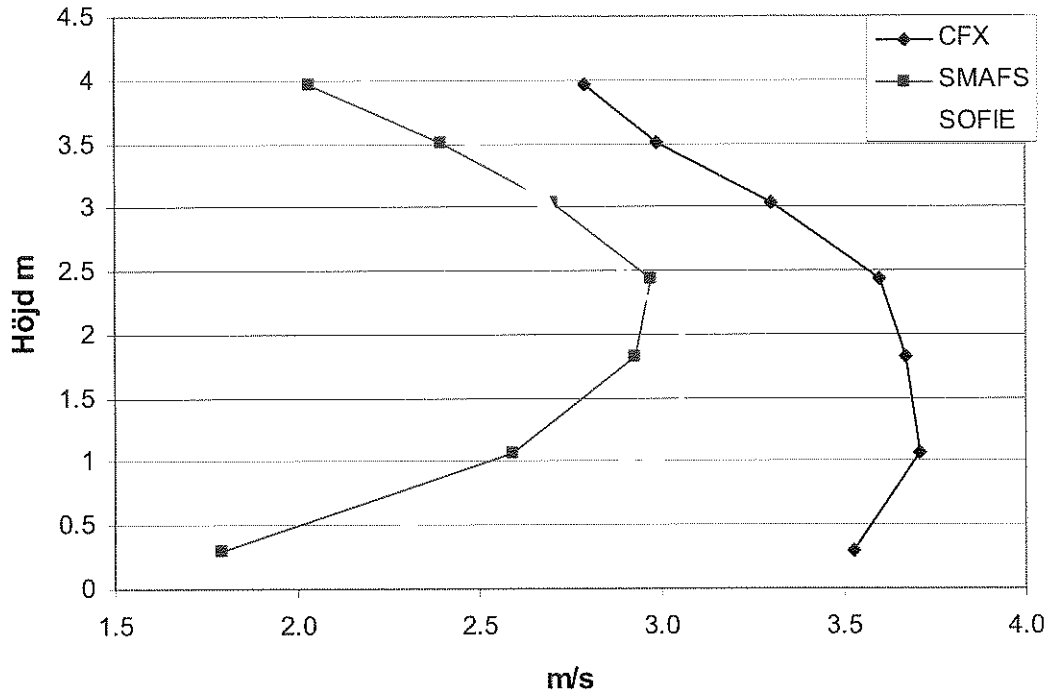
| Time sec | N to S | Point 202 south entrance | S to N |
|---|---|---|---|
| 118 | | | |



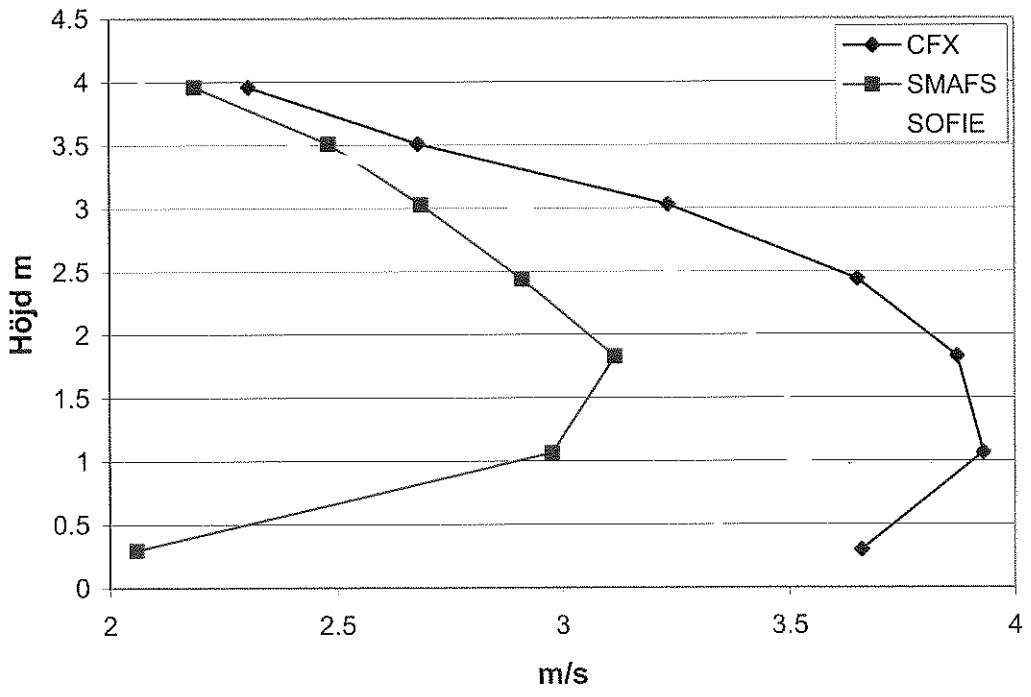

295



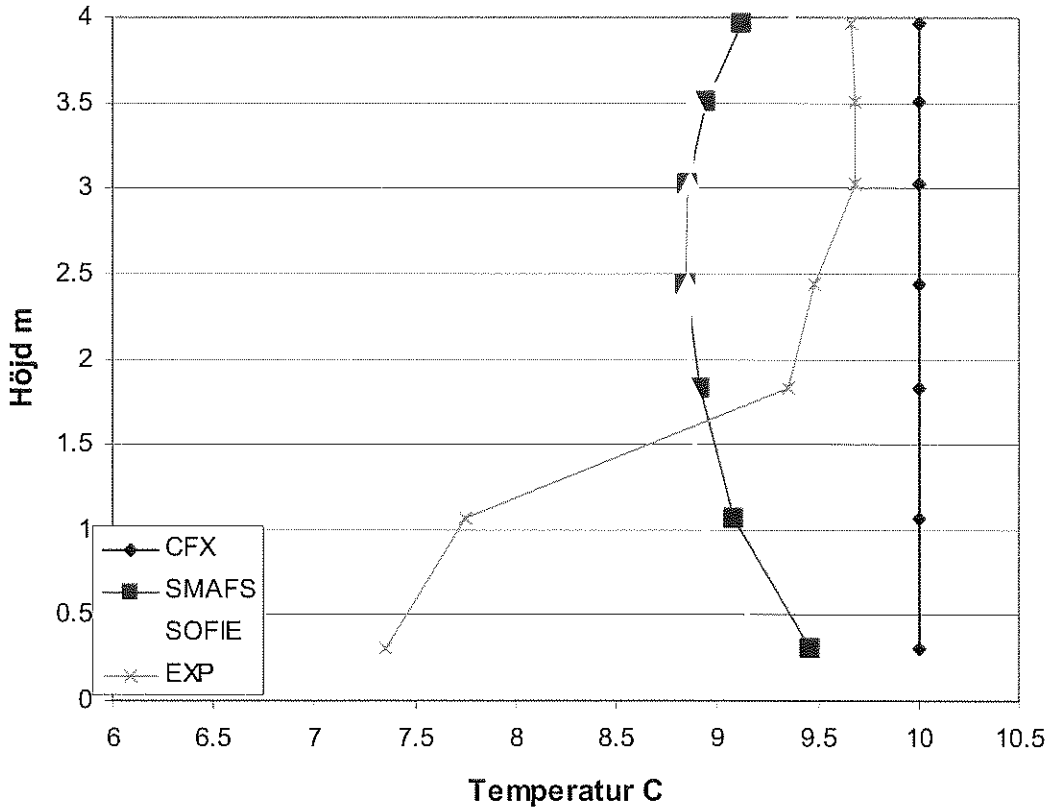
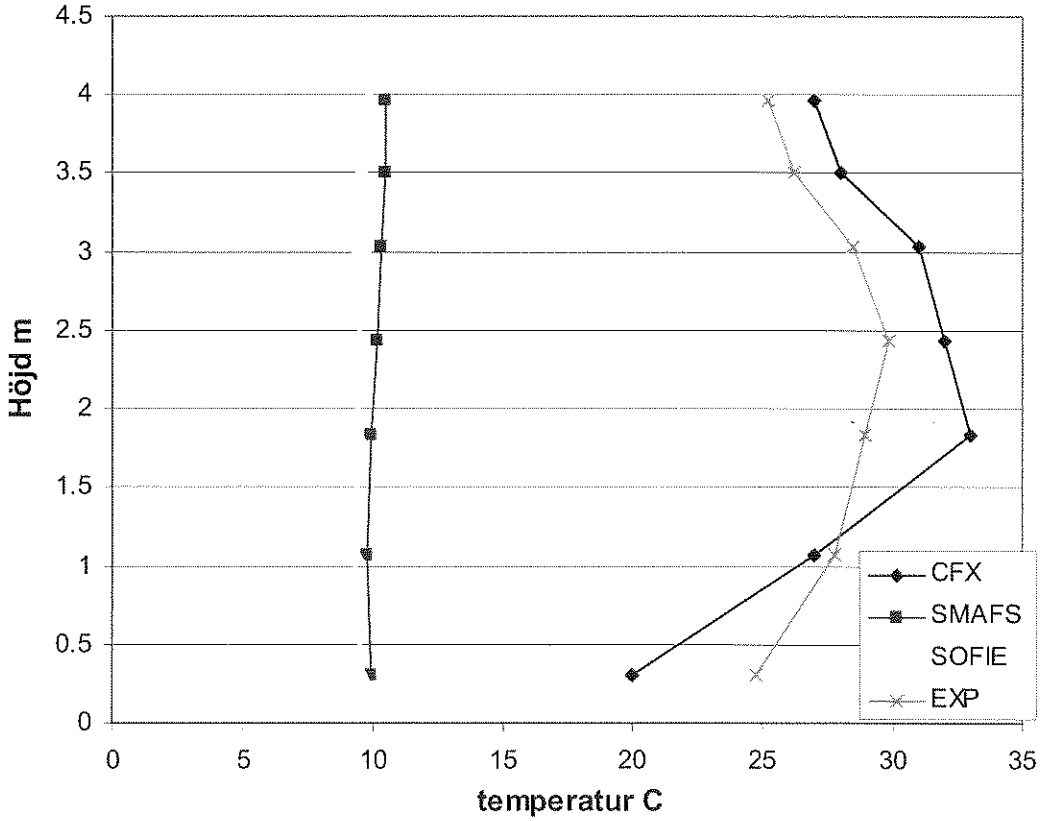
598


CFX
SMAFS
SOFIE
Höjd m
m/s
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0

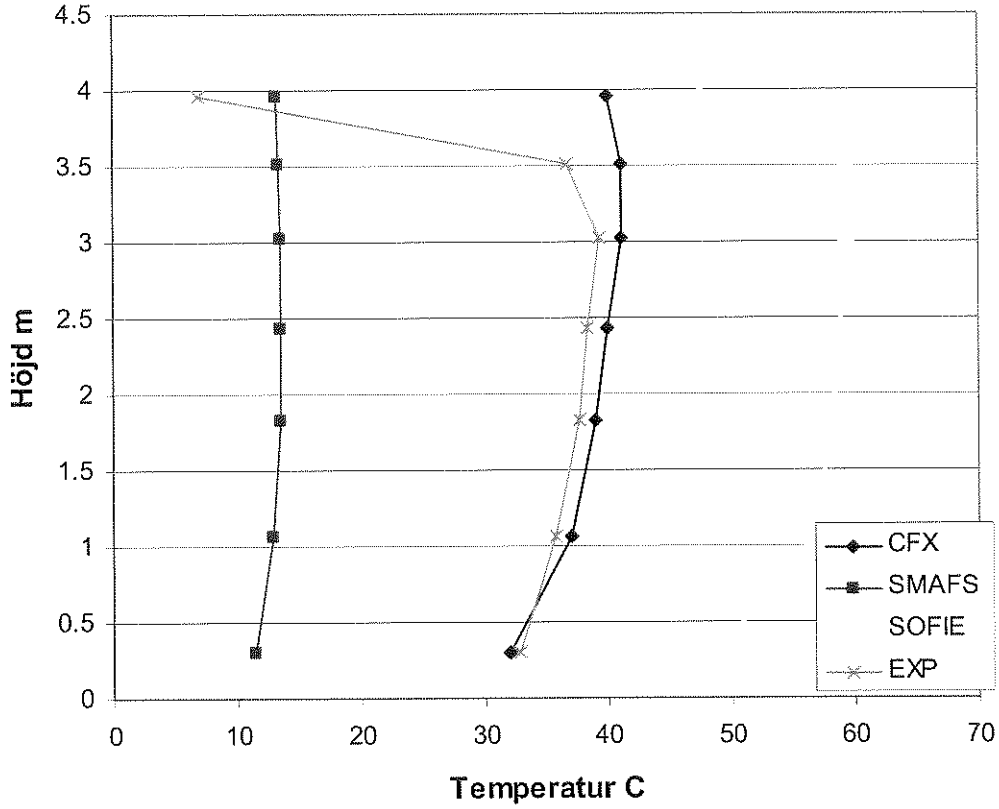
1198


CFX
SMAFS
SOFIE
Höjd m
m/s
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
2
2.5
3
3.5
4

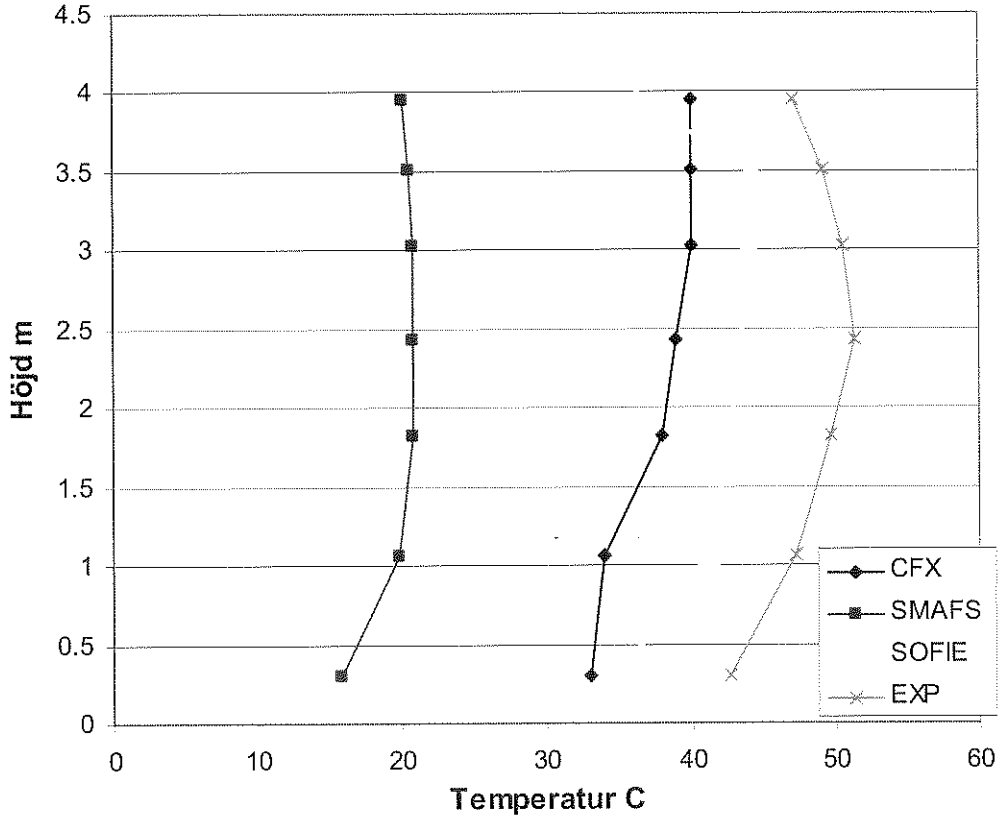
**Bilaga BA Vertikal temperaturfördelning vid olika tider och lägen i tunneln**

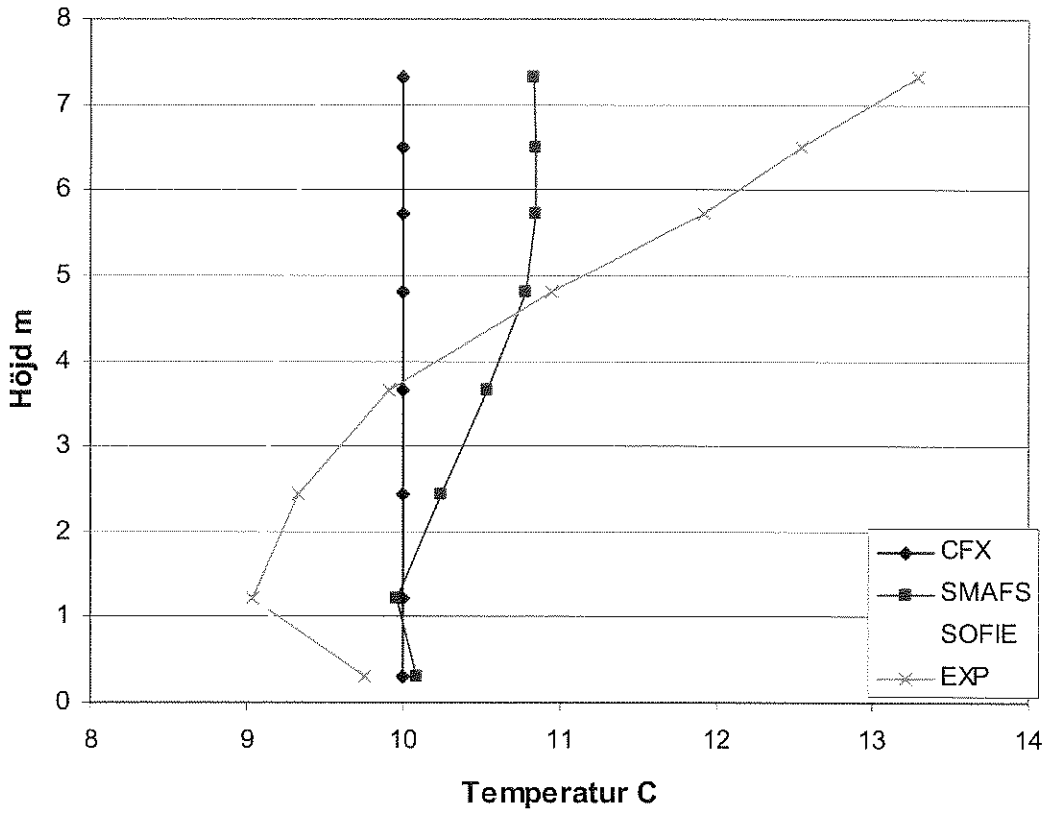
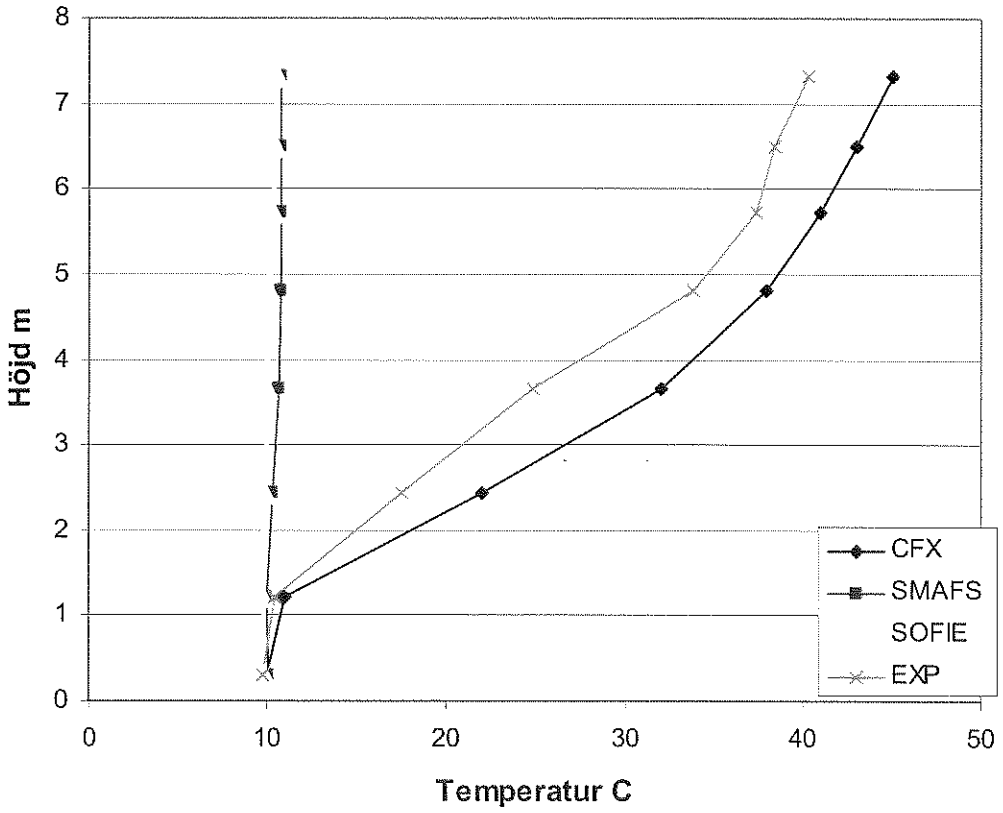
| Time sec | Point 214 north entrance |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

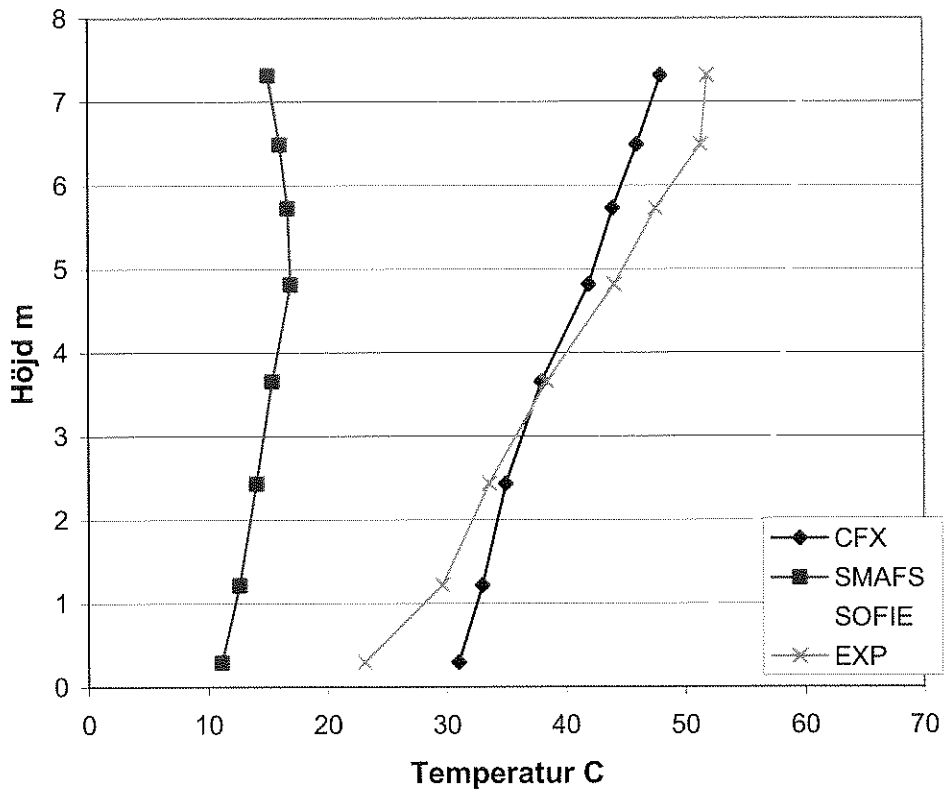

4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Höjd m
0
10
20
30
40
50
60
70
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

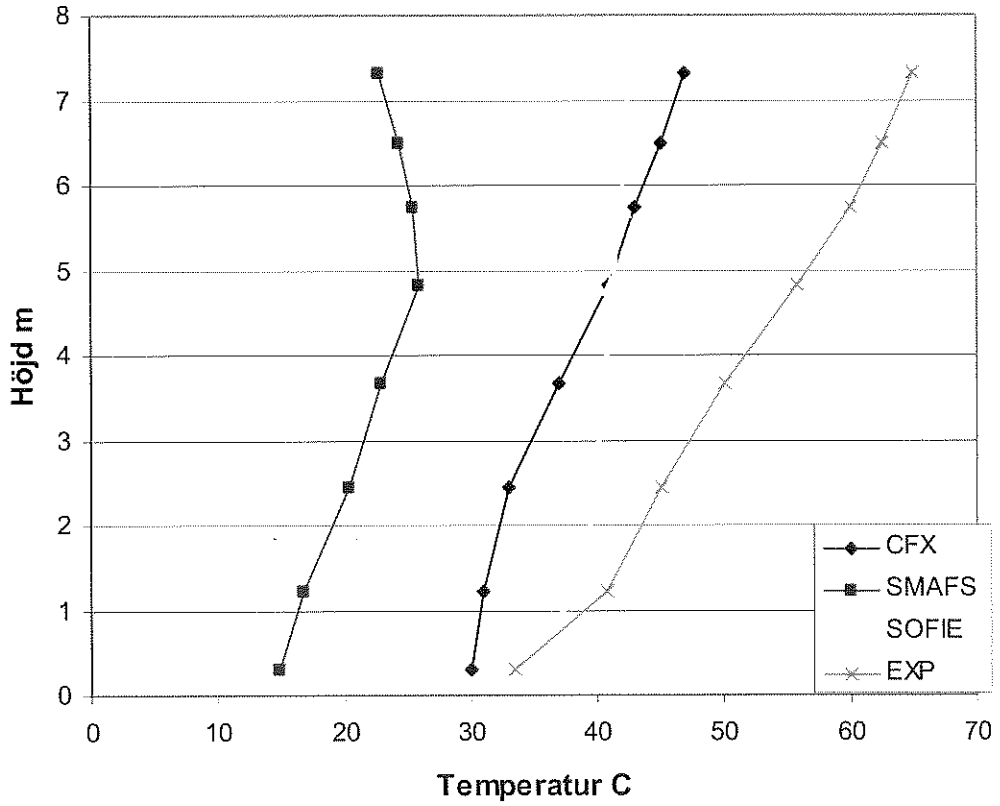

4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Höjd m
0
10
20
30
40
50
60
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

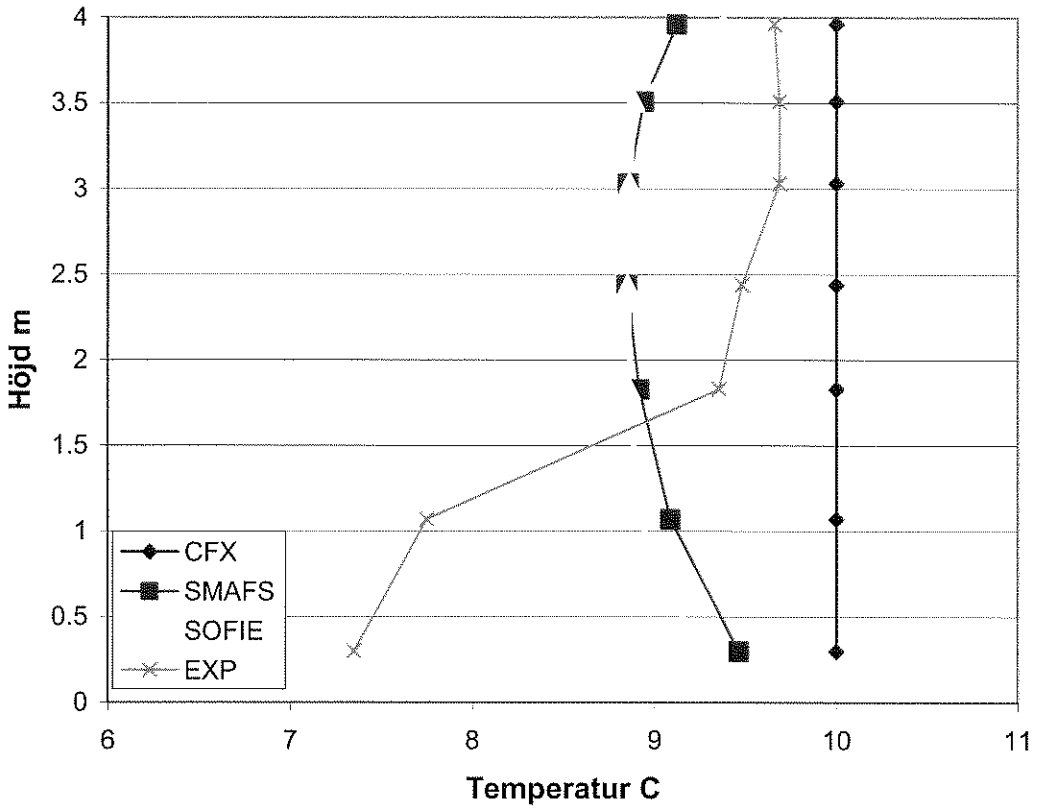
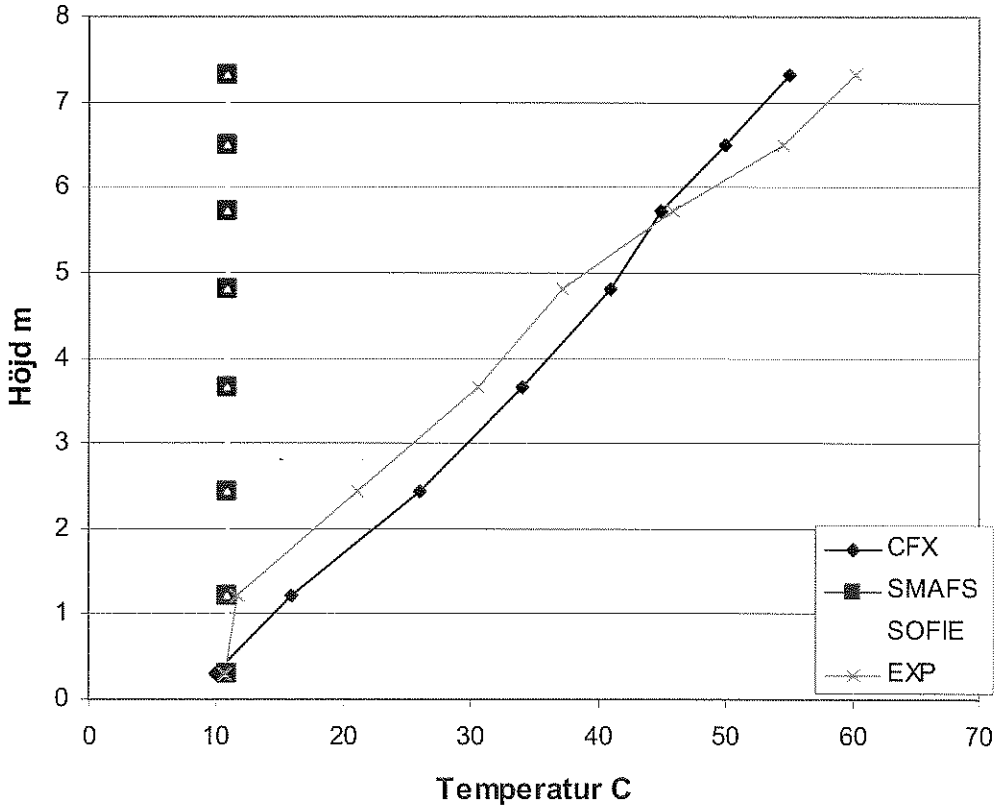
| Time sec | Point 213 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

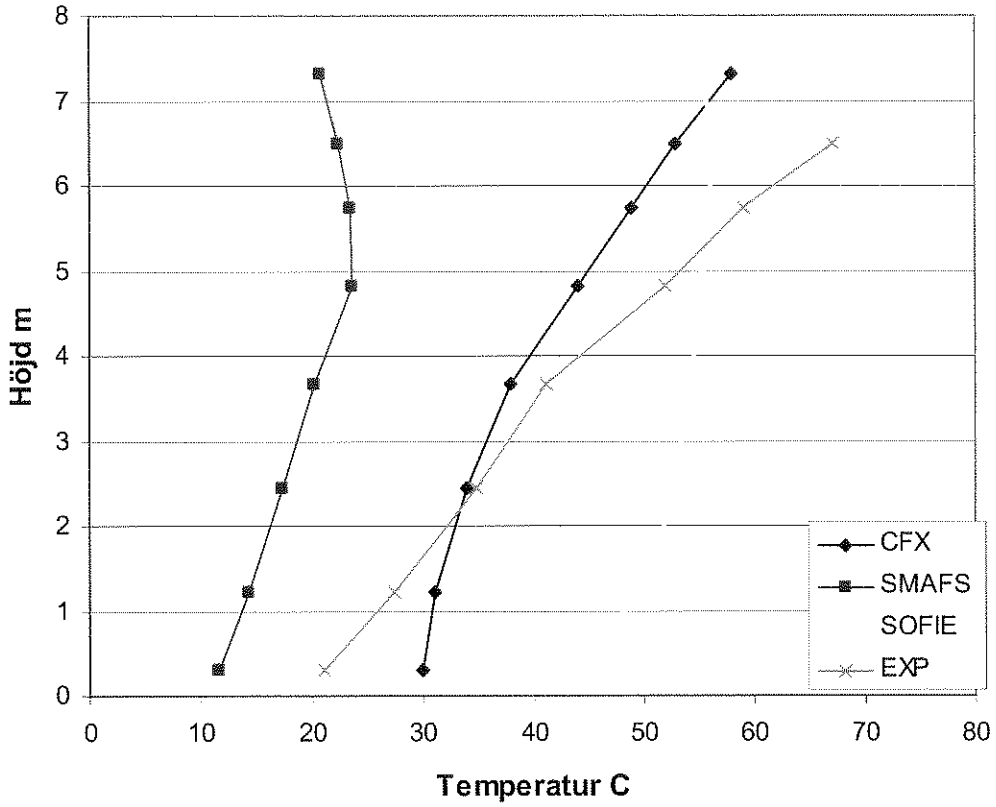

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

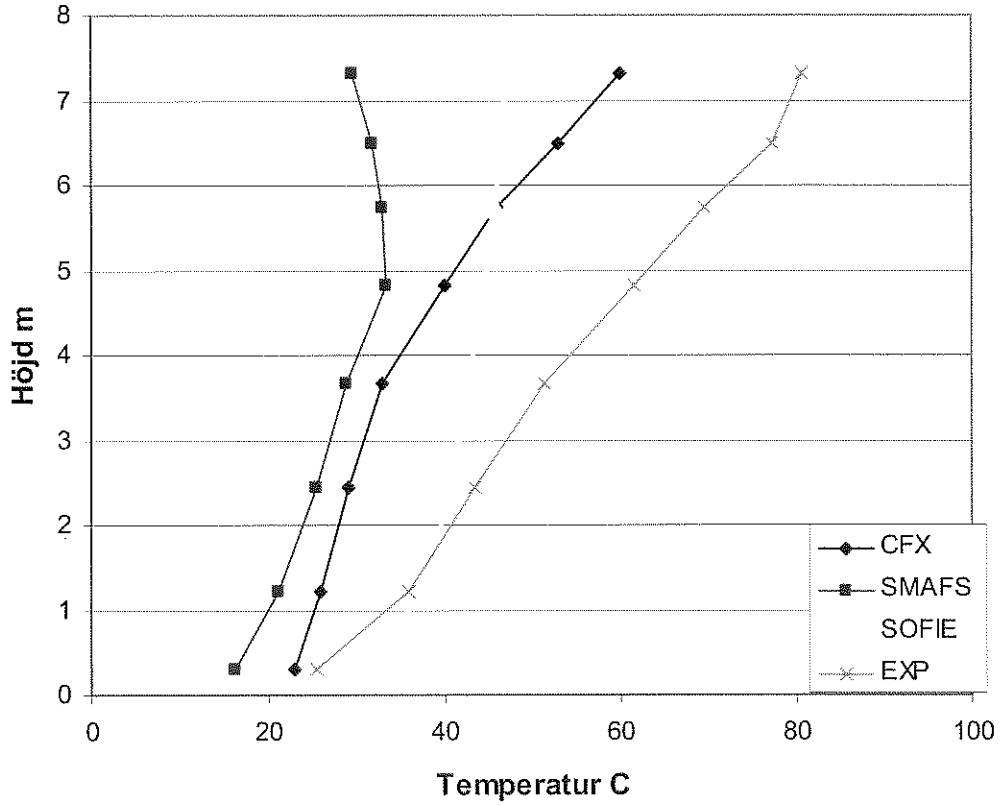

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

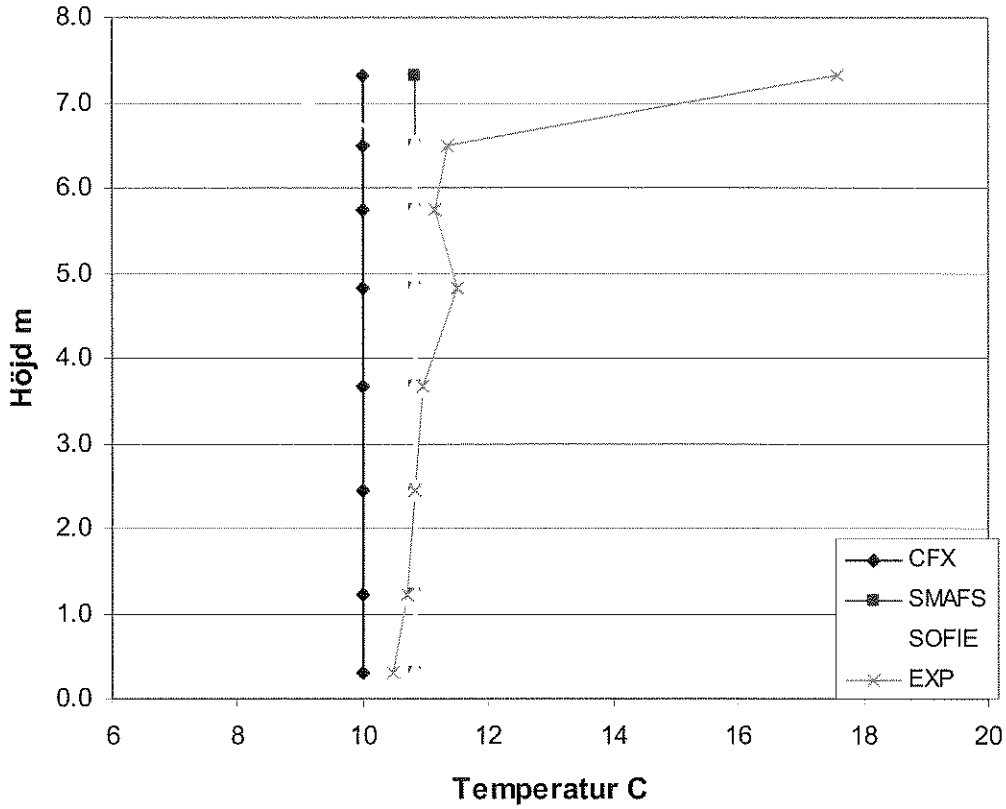
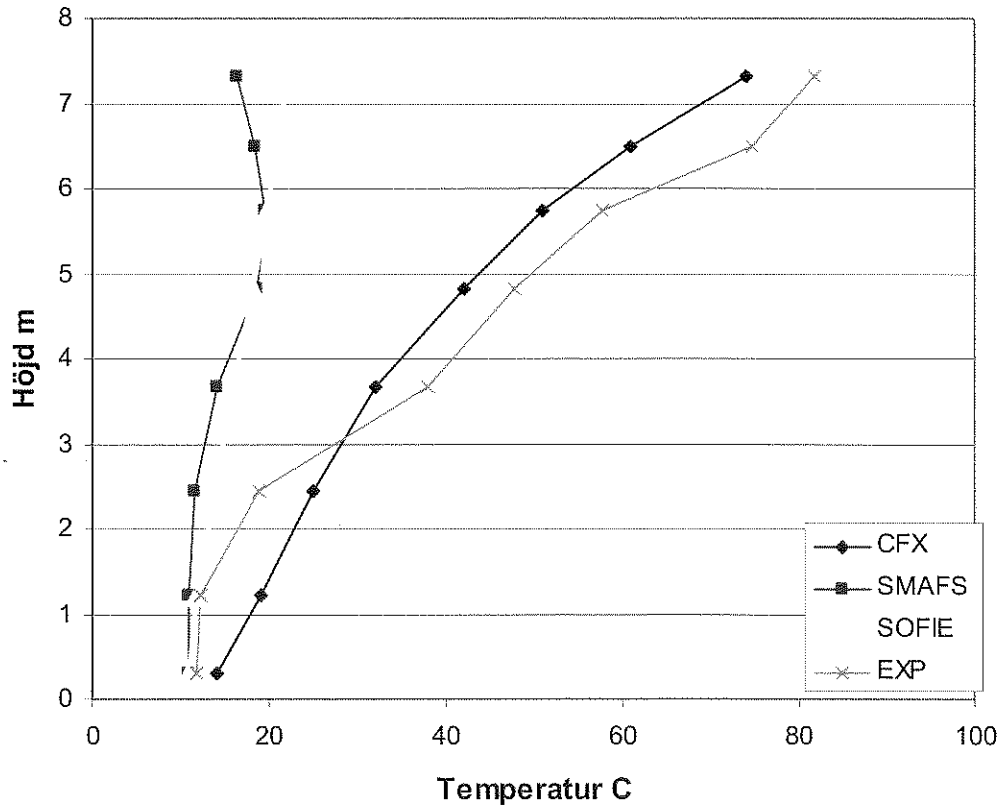
| Time sec | Point 211 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

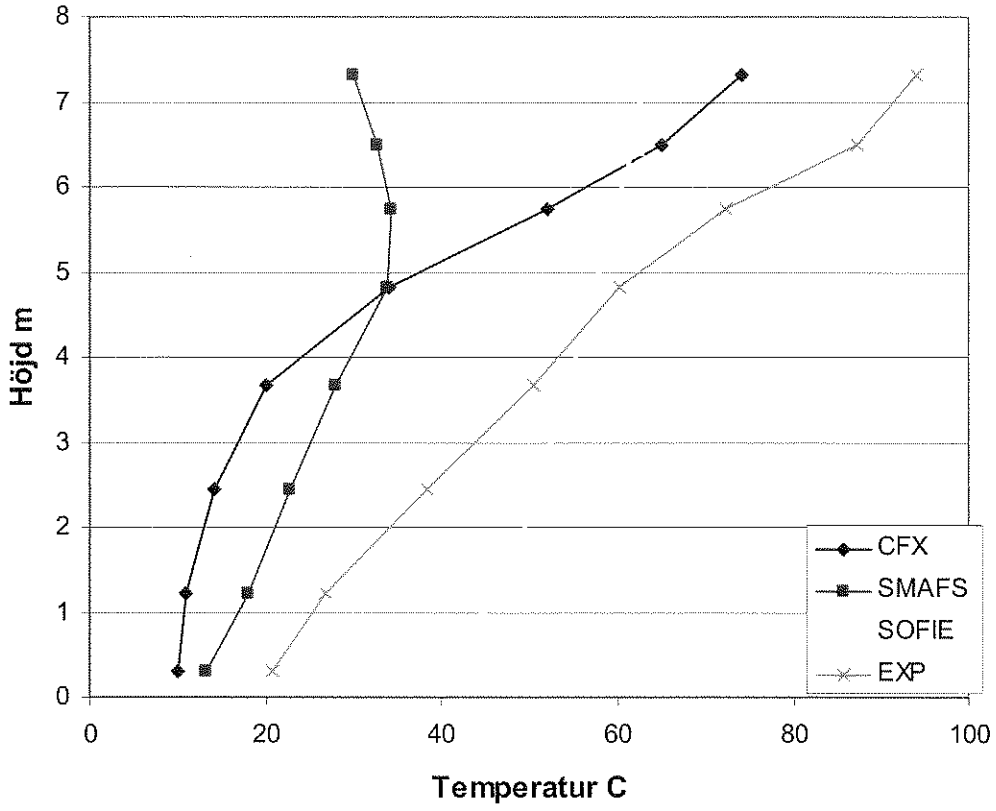

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

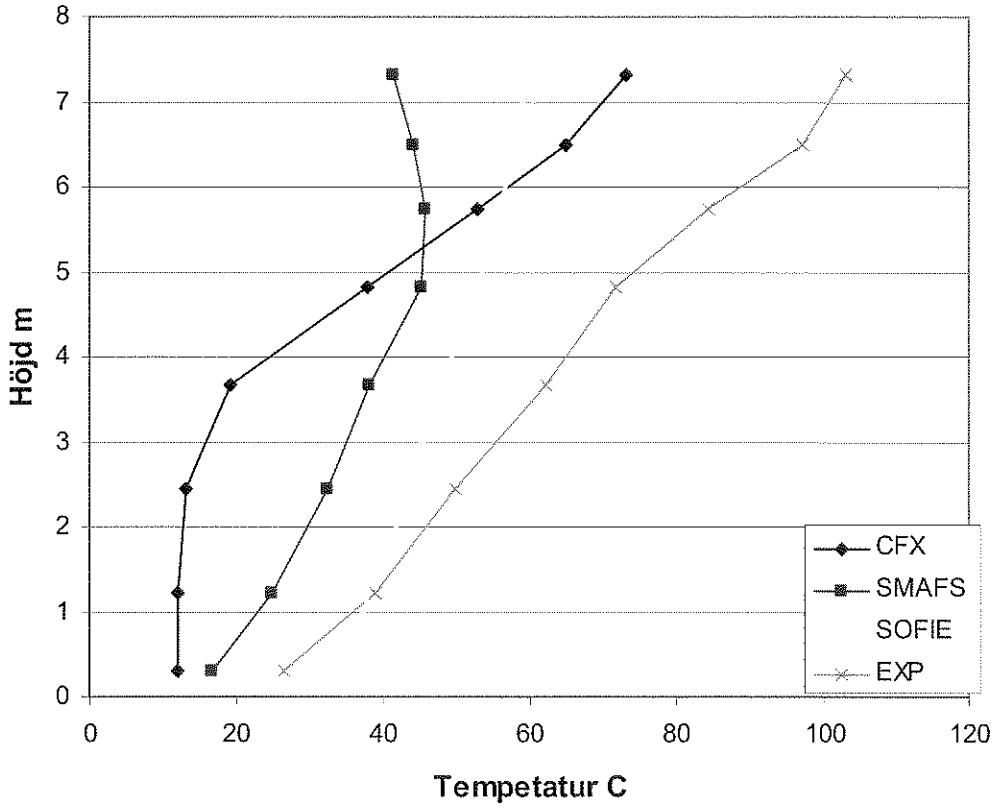

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

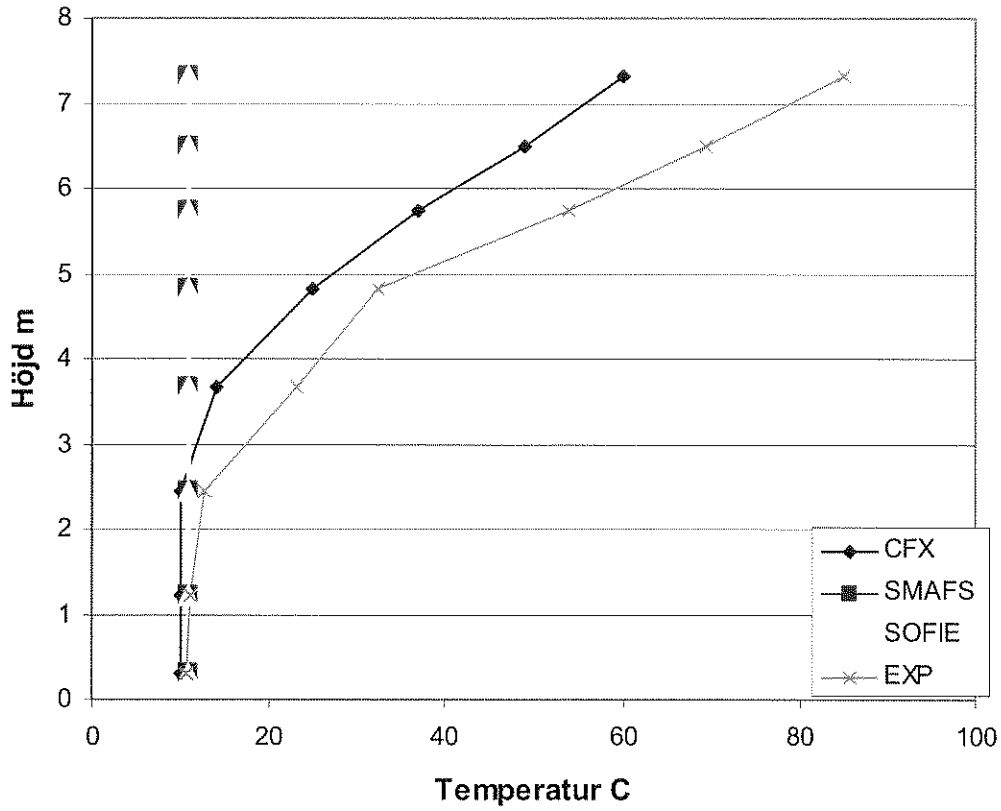
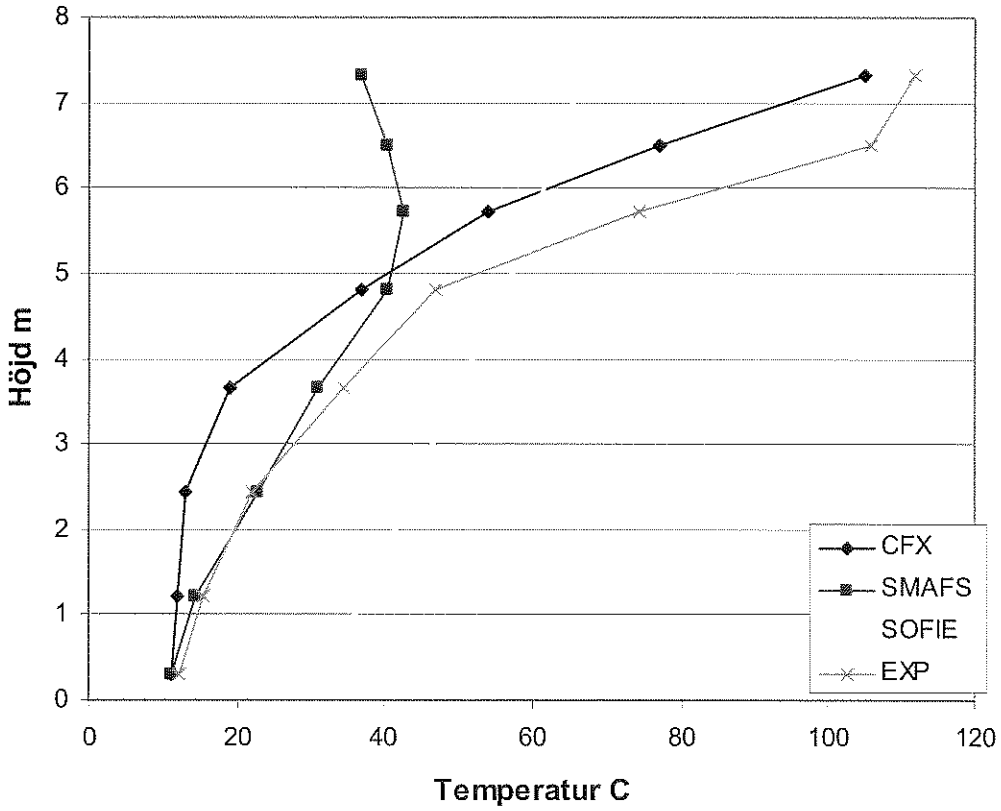
| Time sec | Point 209 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

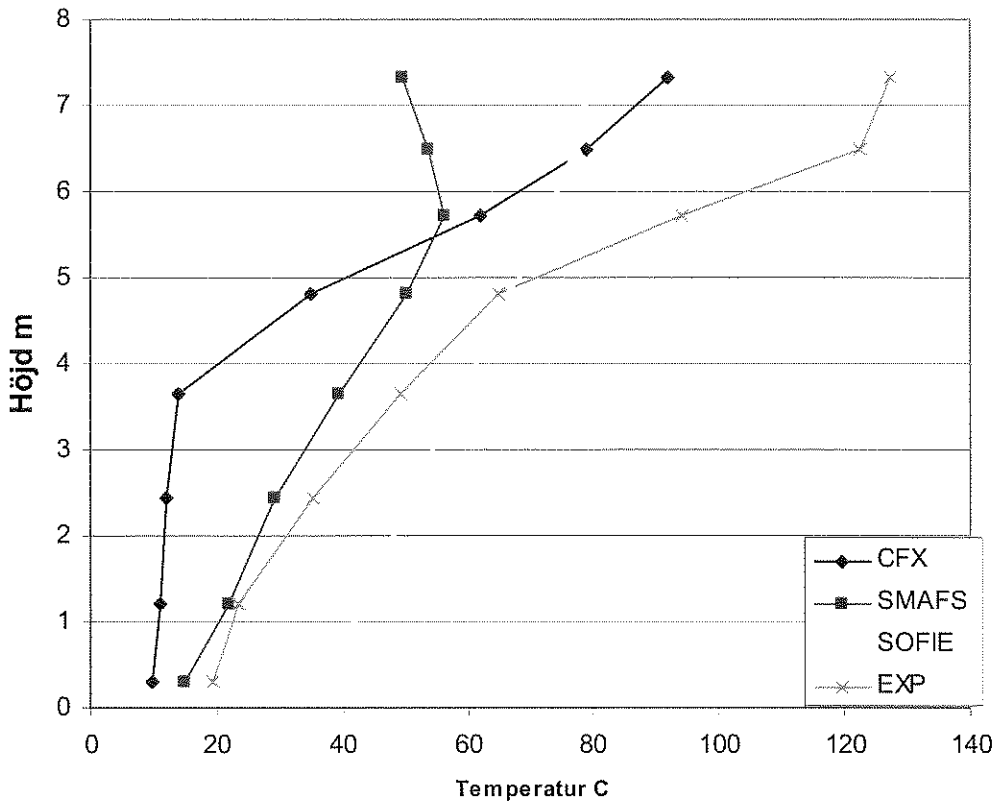

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

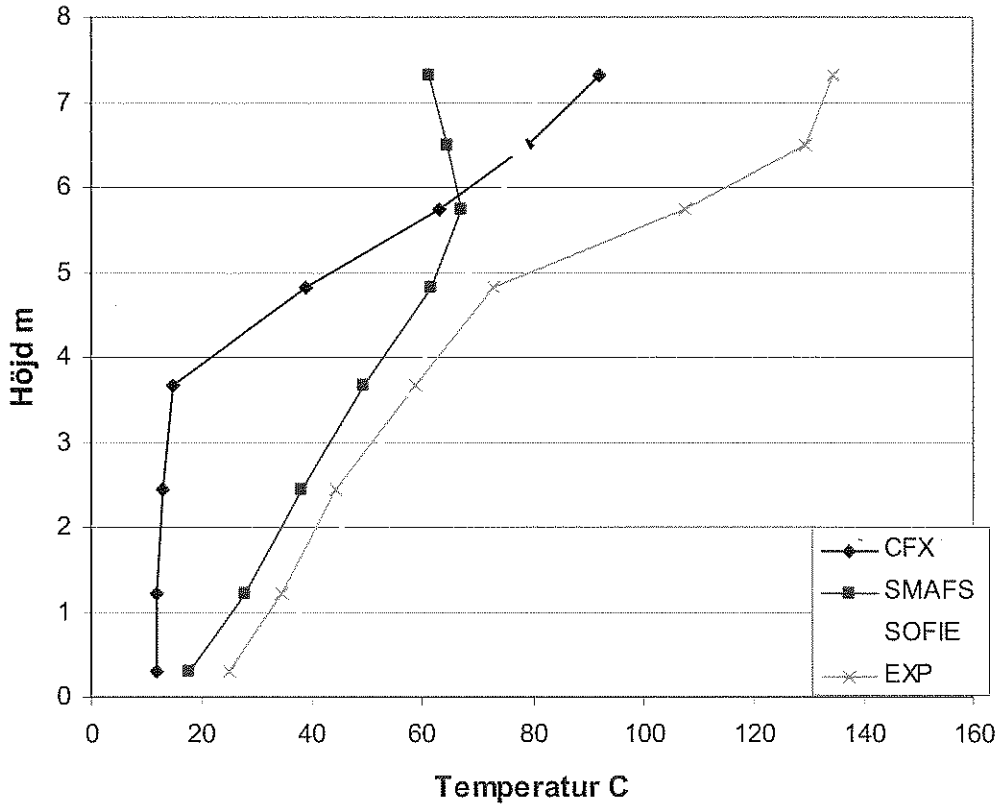

Höjd m
Tempetatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

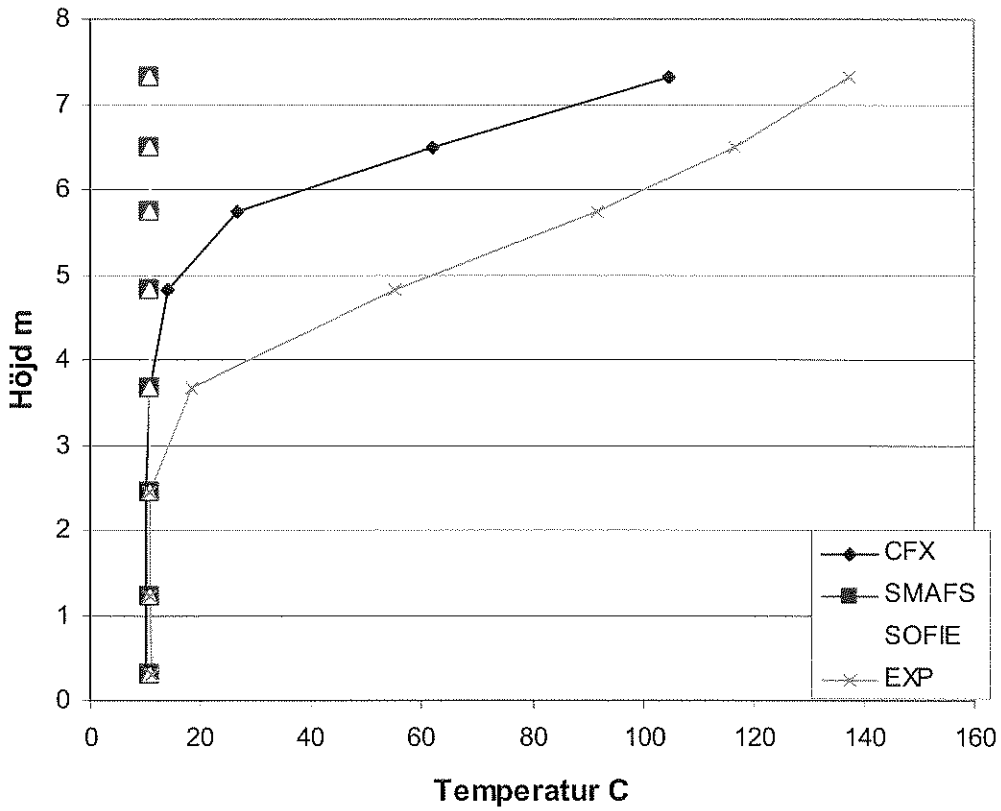
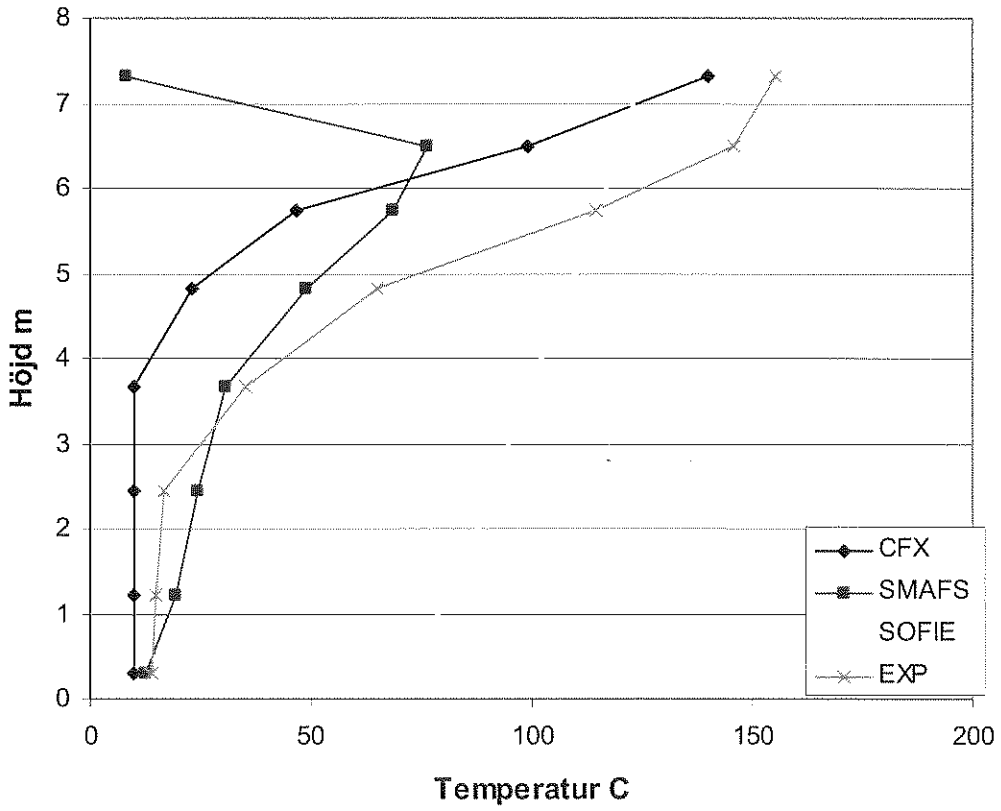
| Time sec | Point 208 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

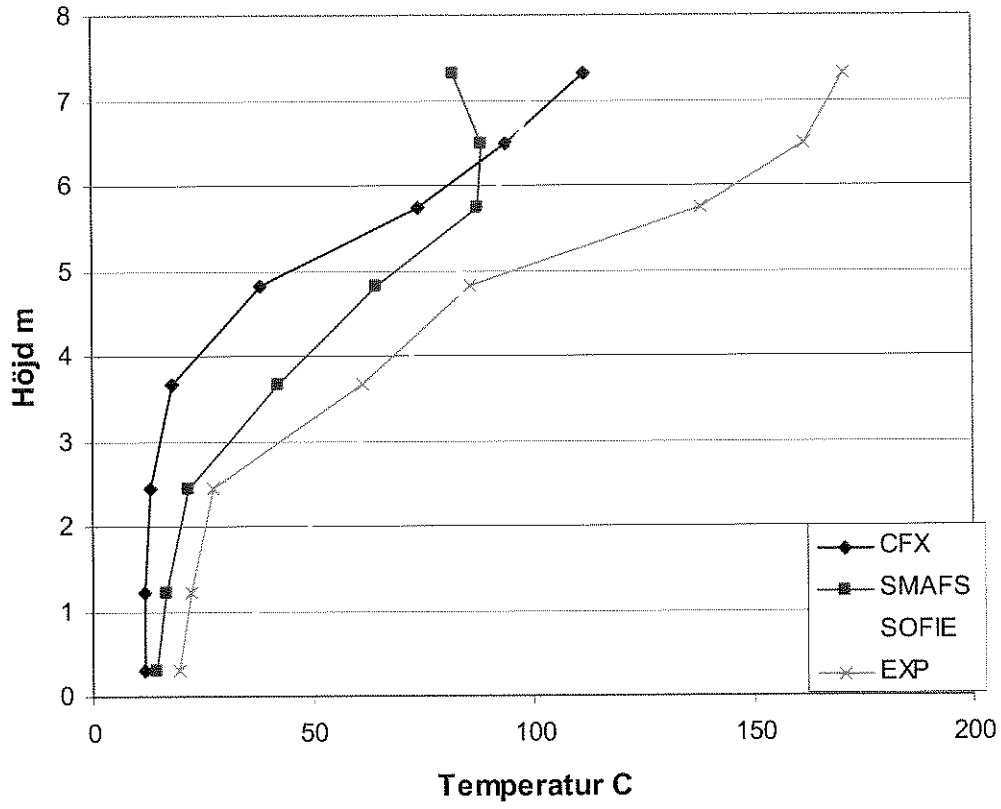

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

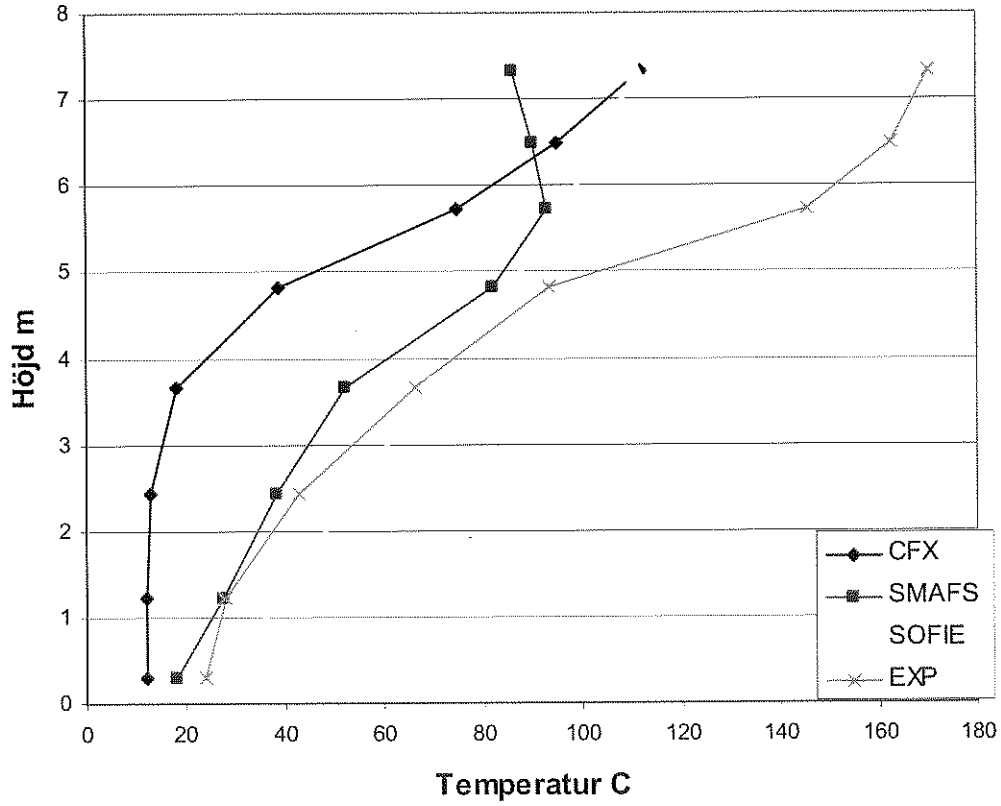

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

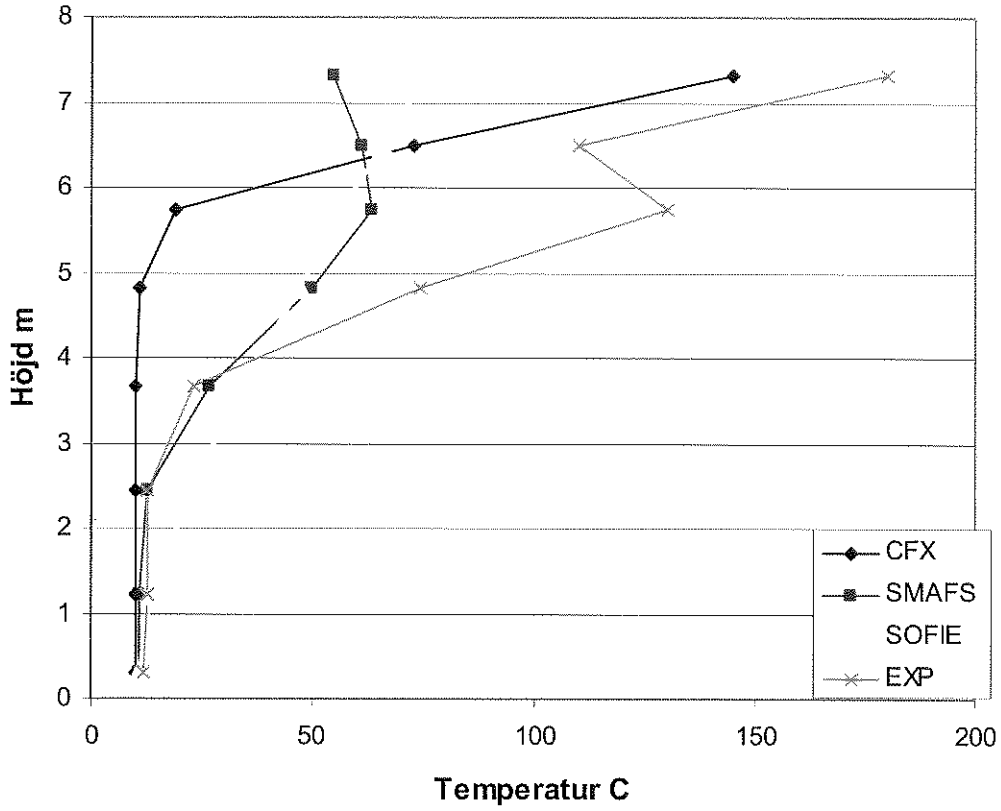
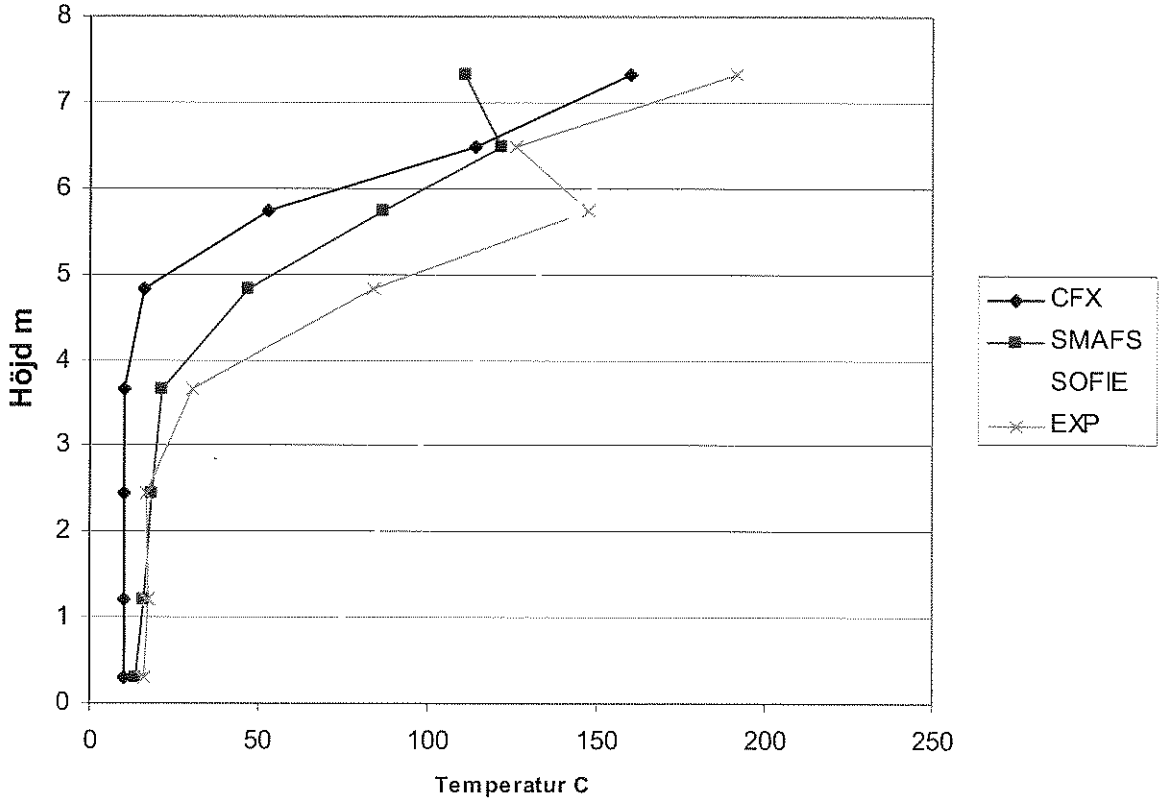
| Time sec | Point 207 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

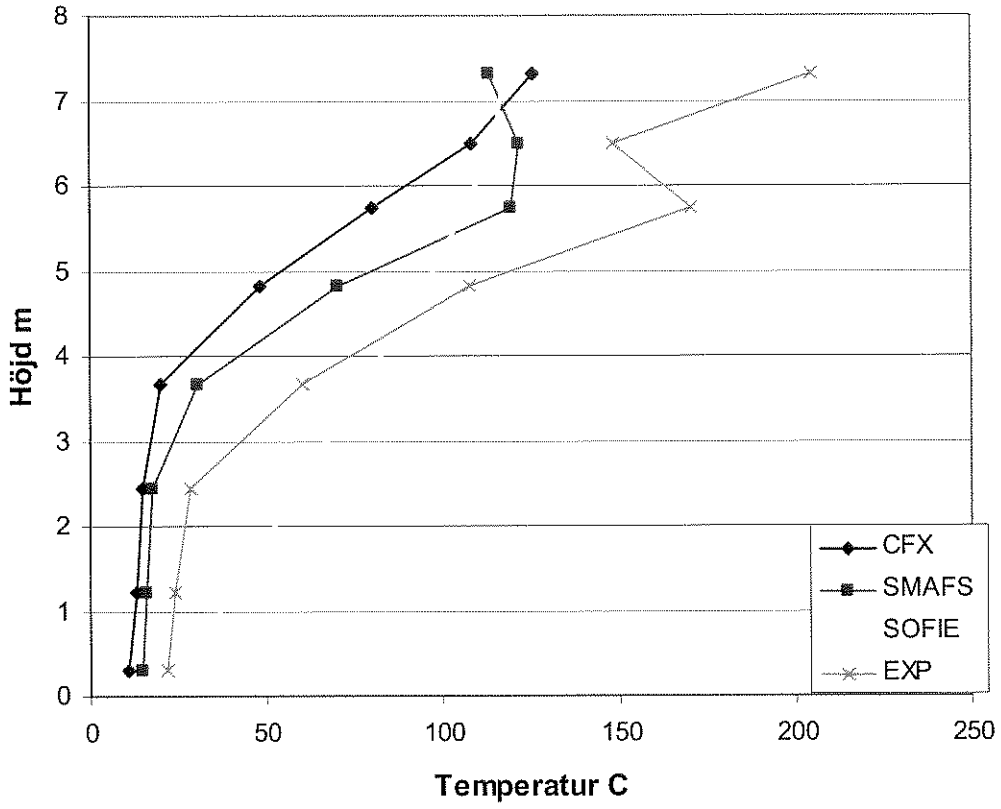

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

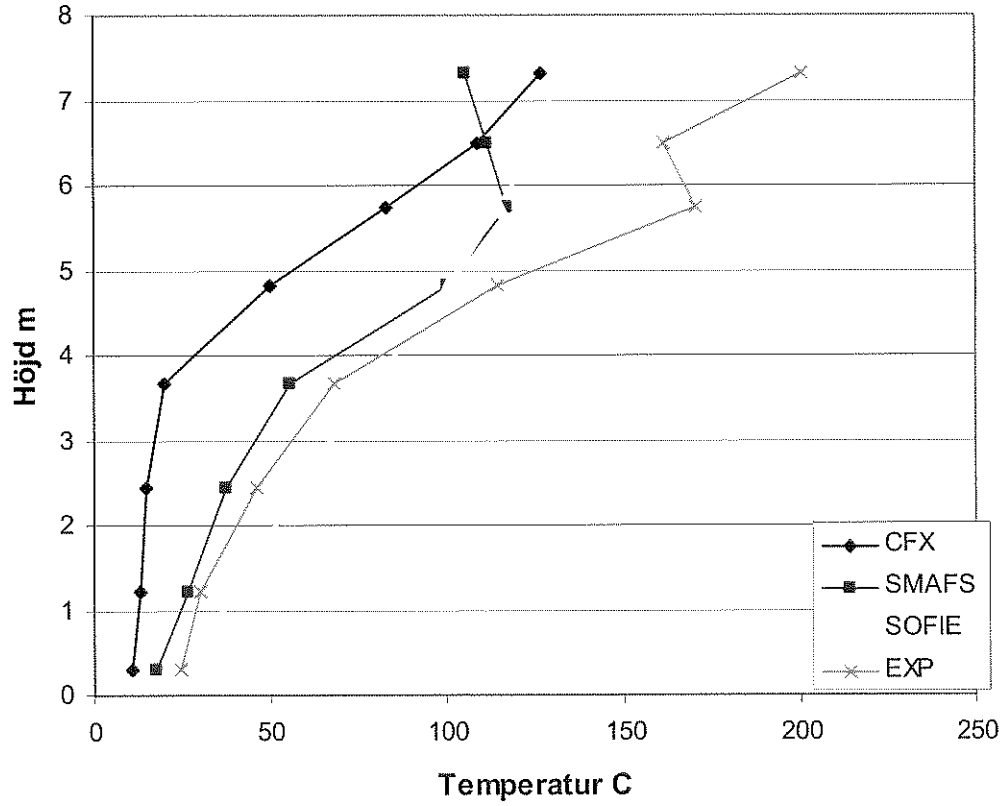

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

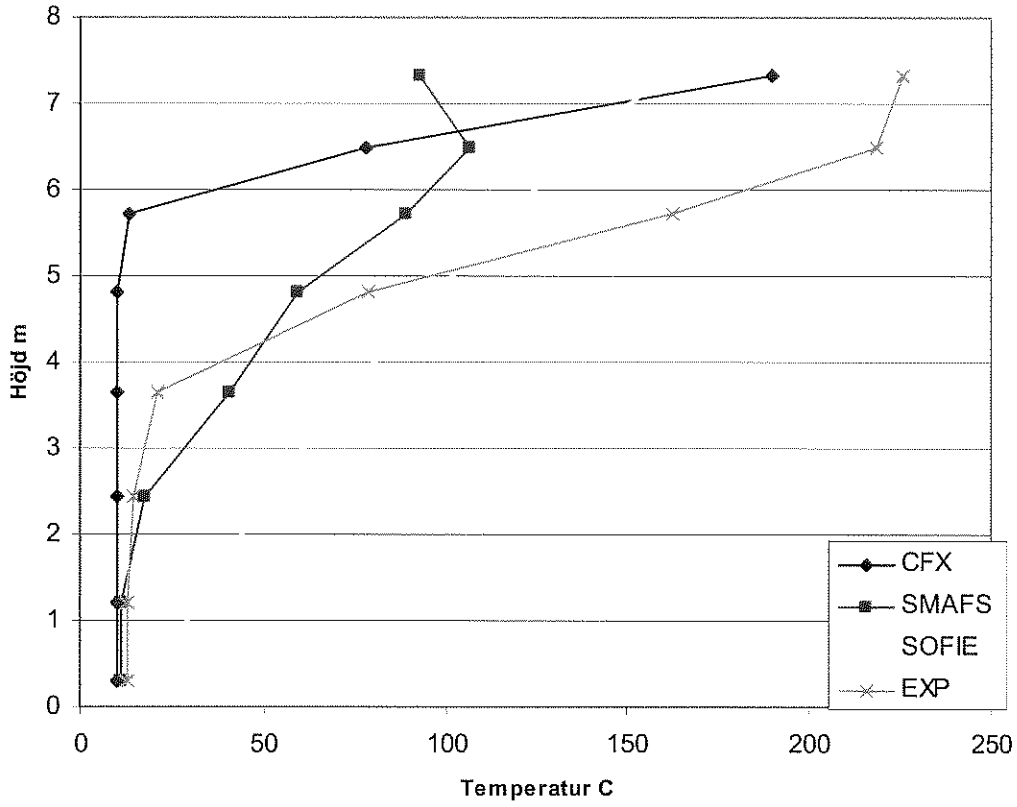
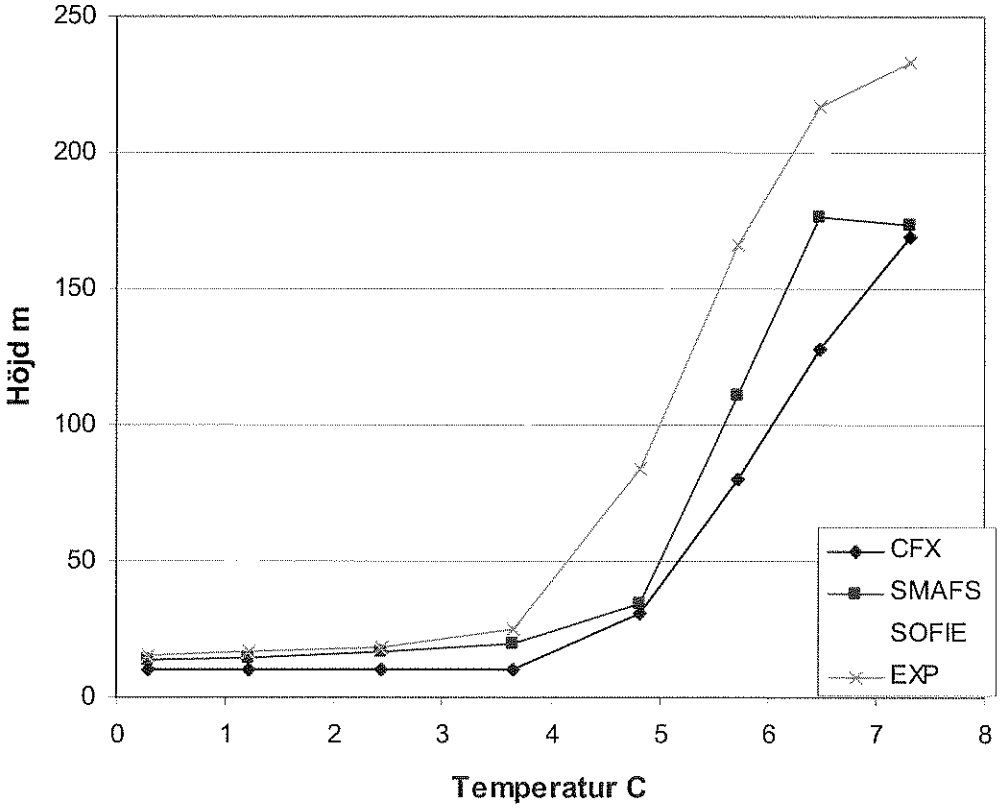
| Time sec | Point 307 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

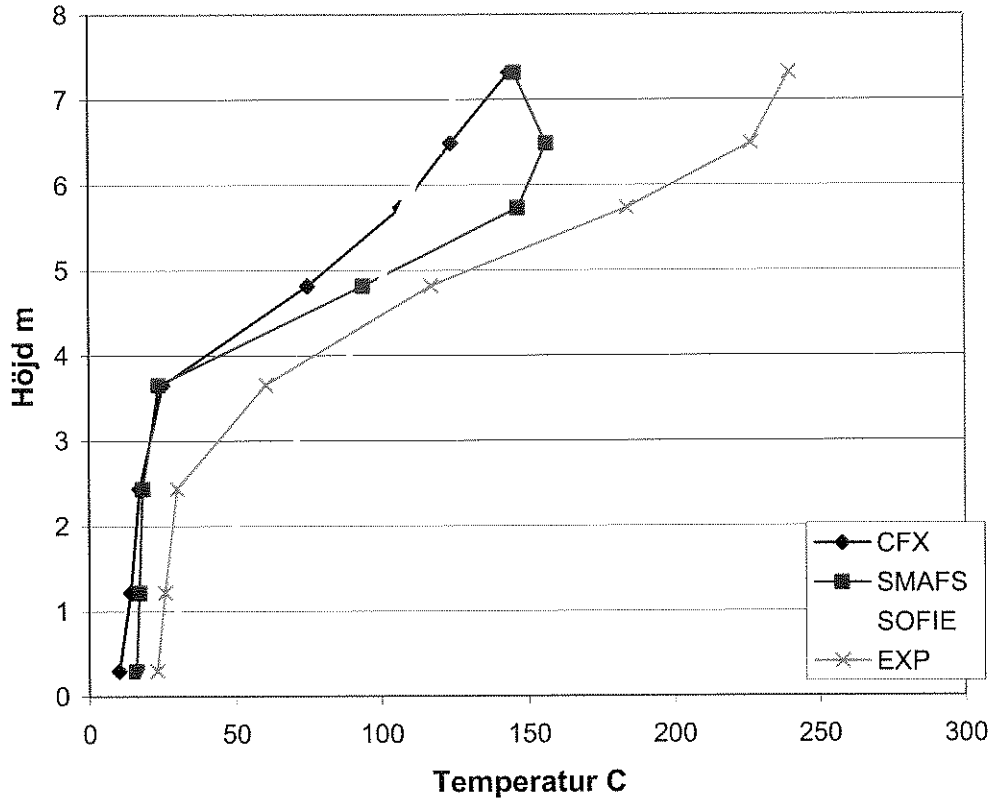

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

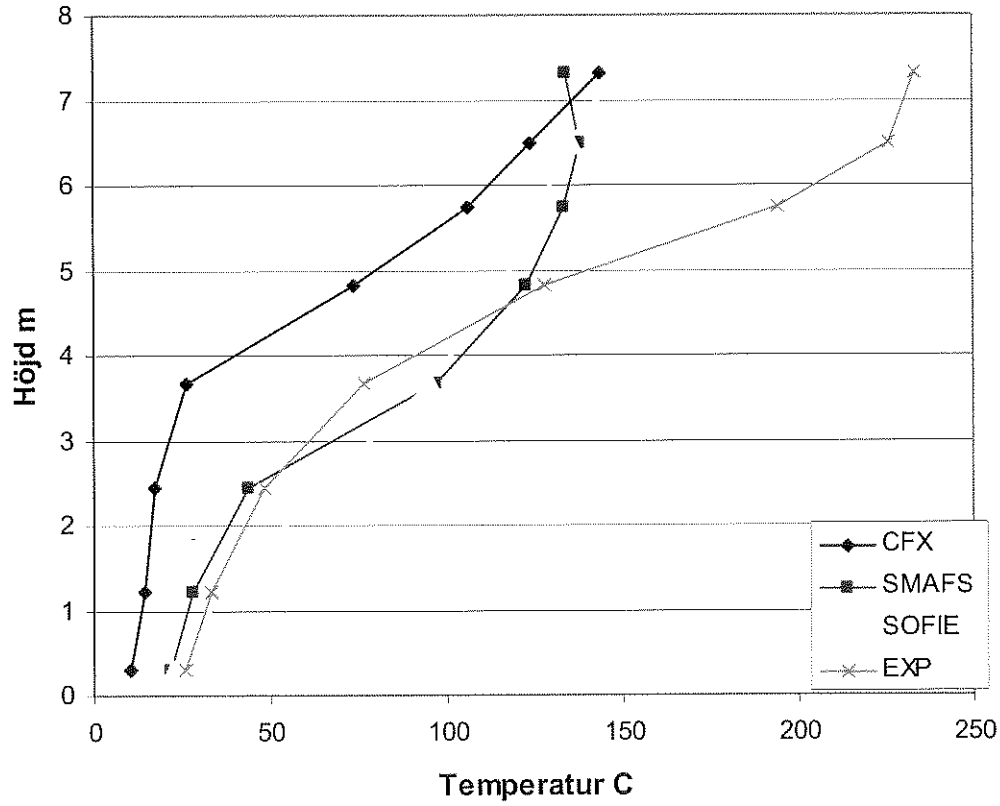

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

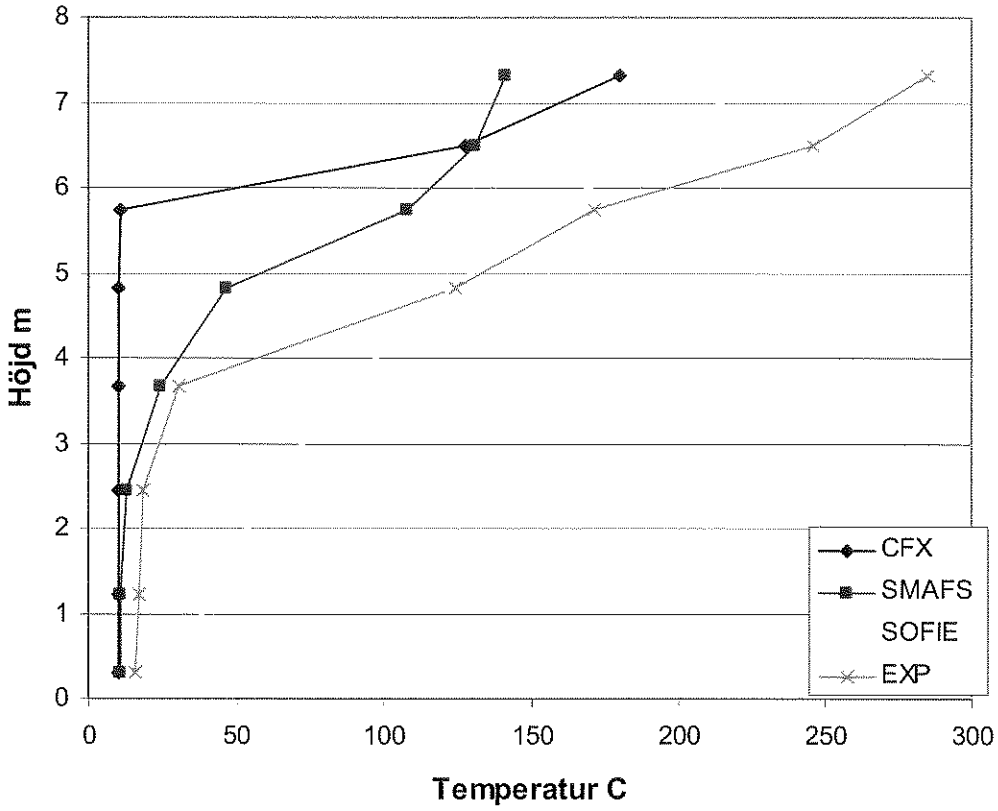
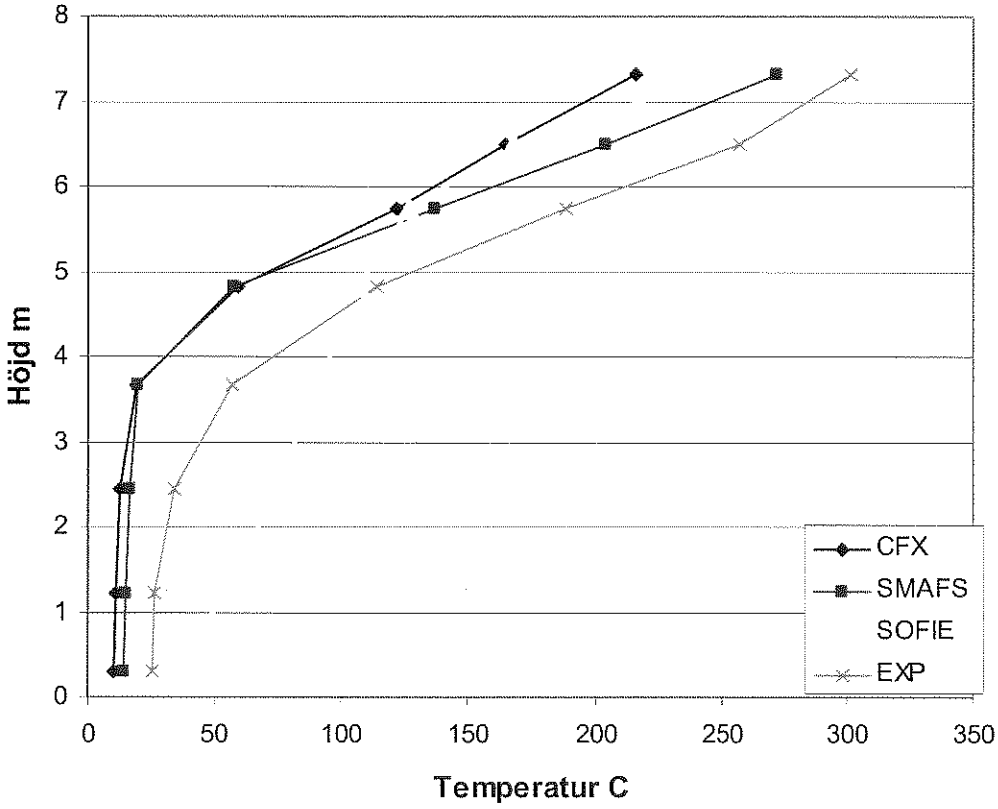
| Time sec | Point 306 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

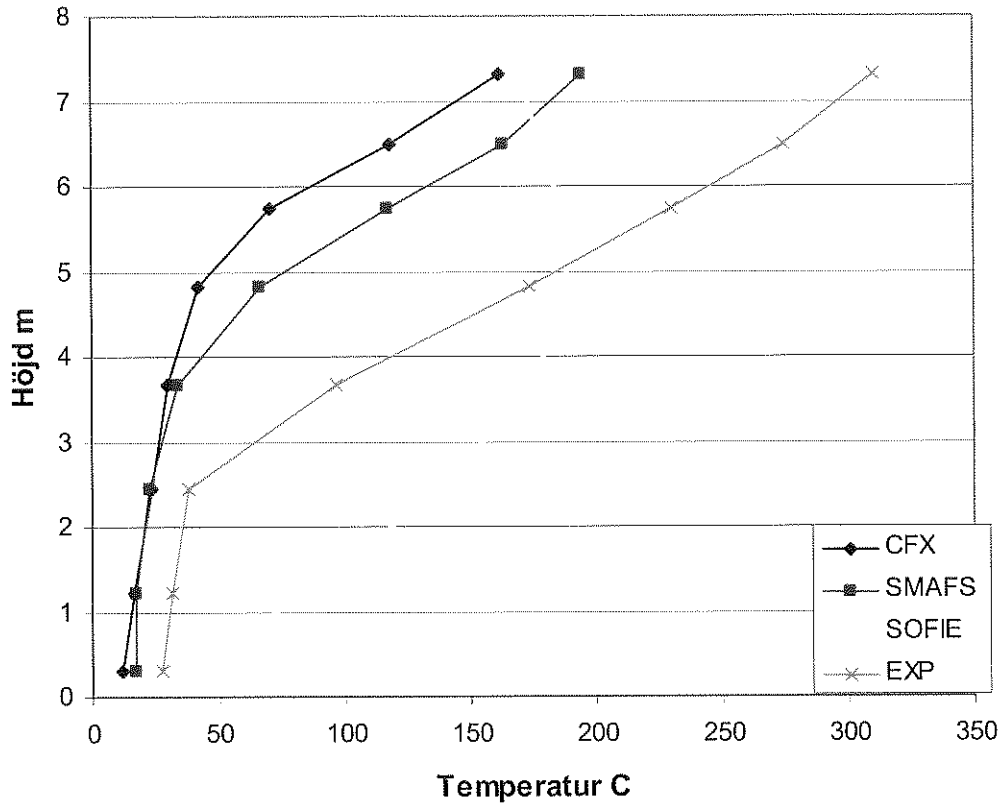

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

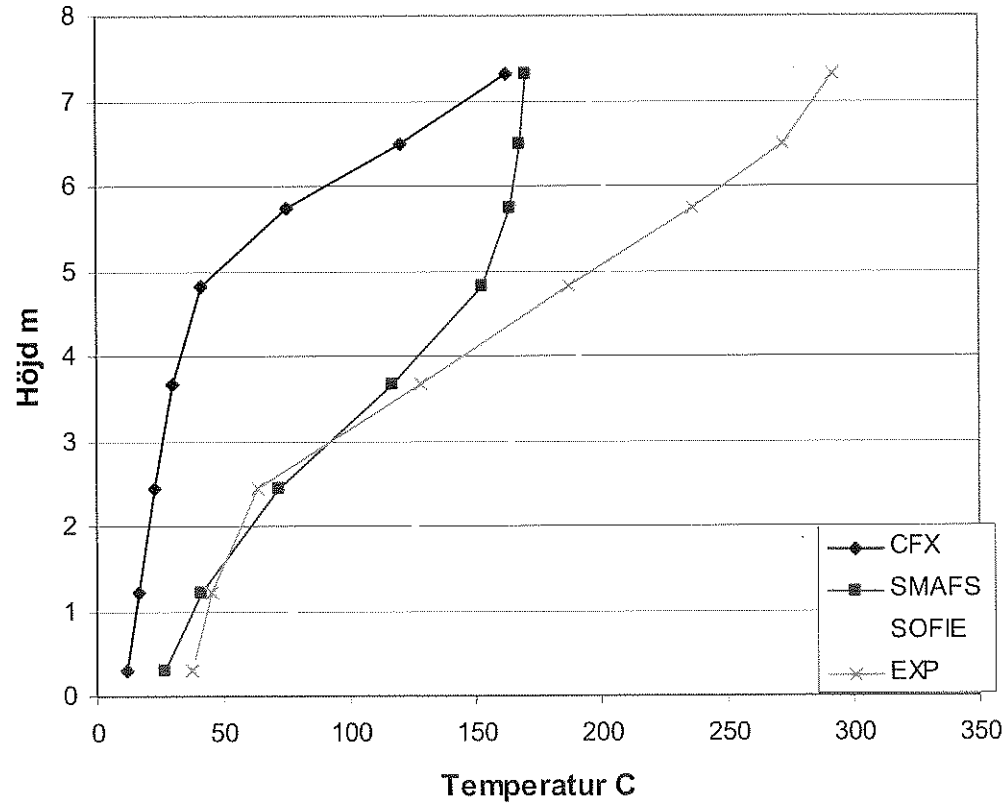

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

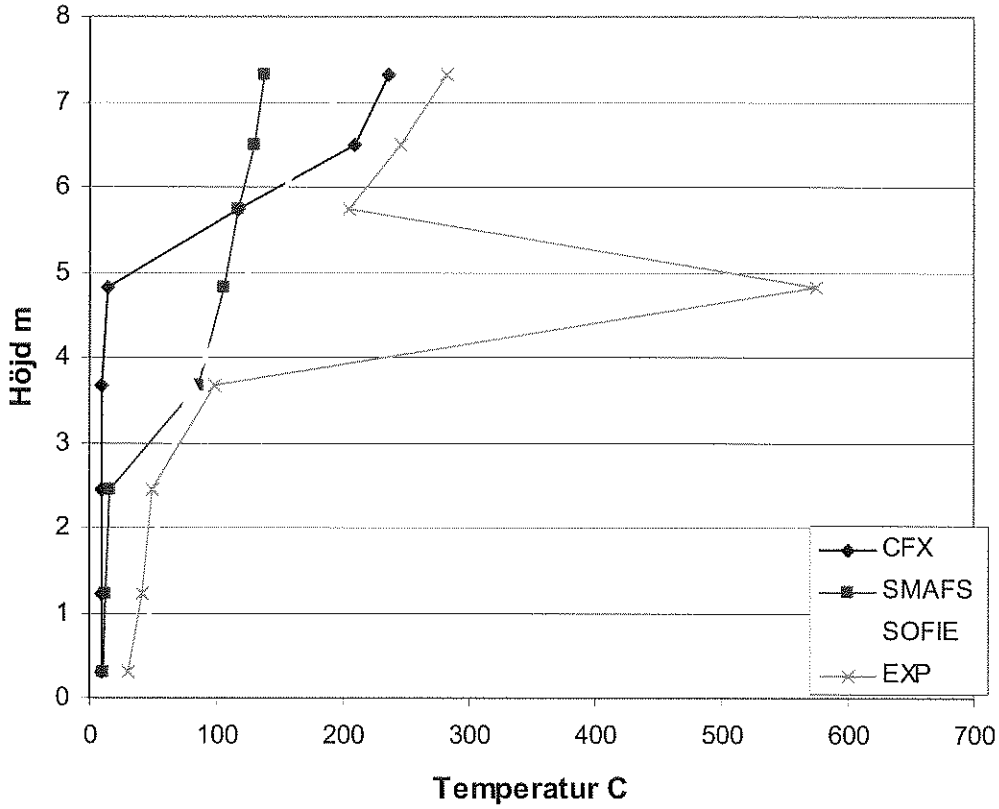
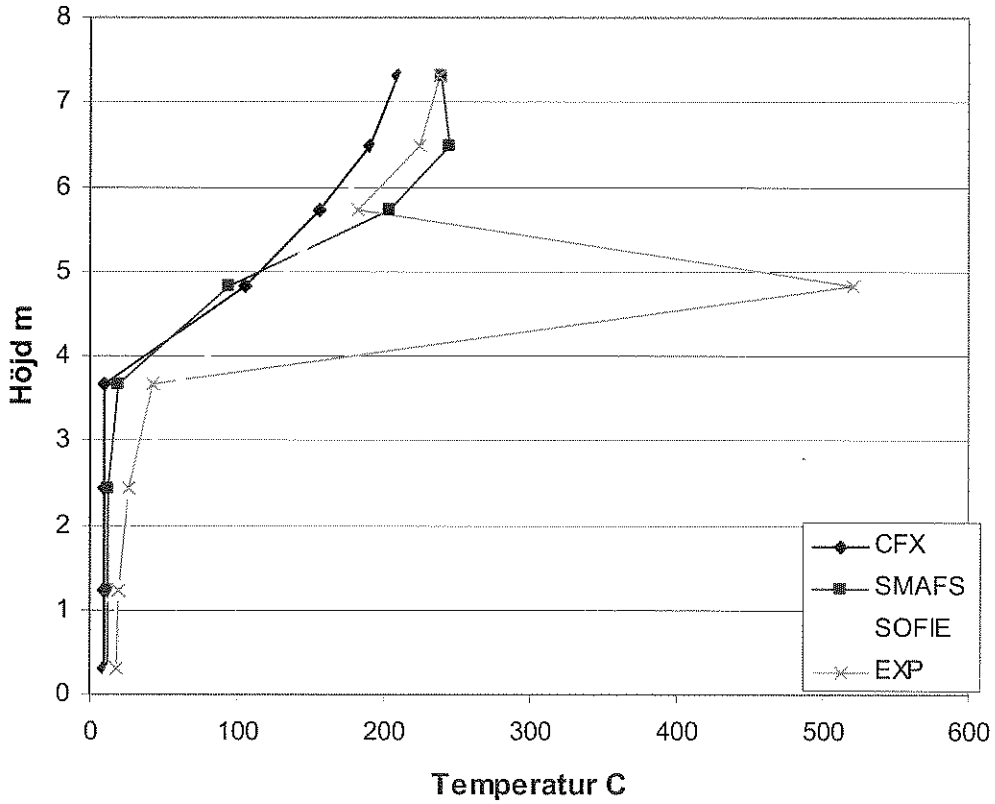
| Time sec | Point 305 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

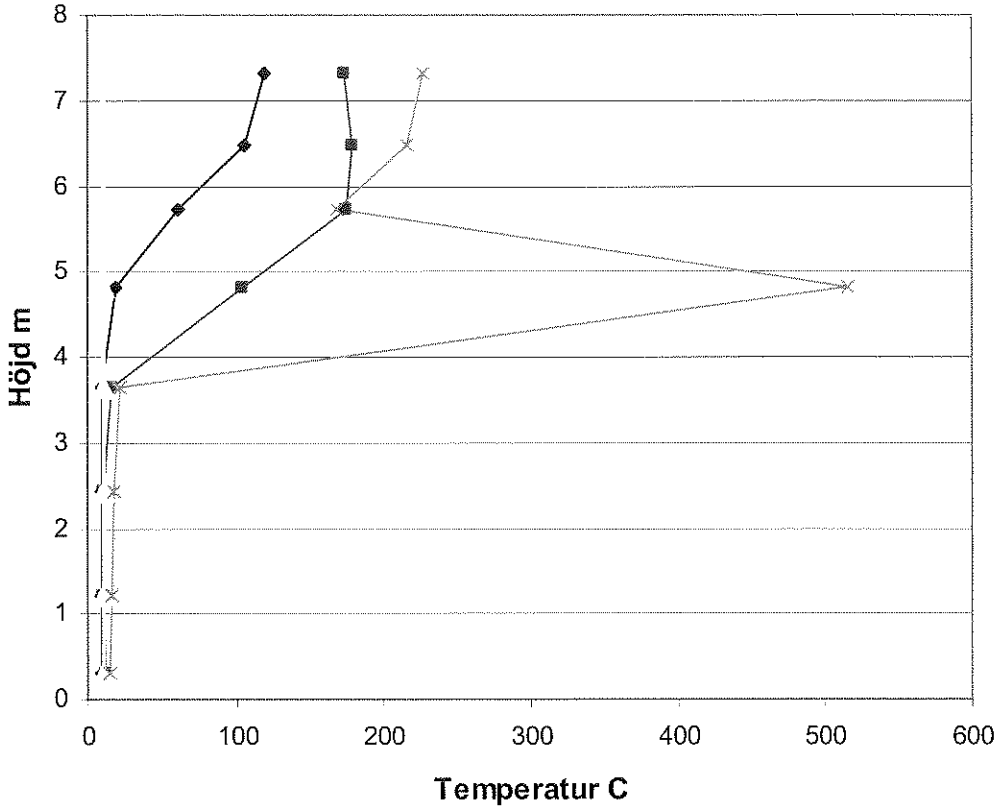

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

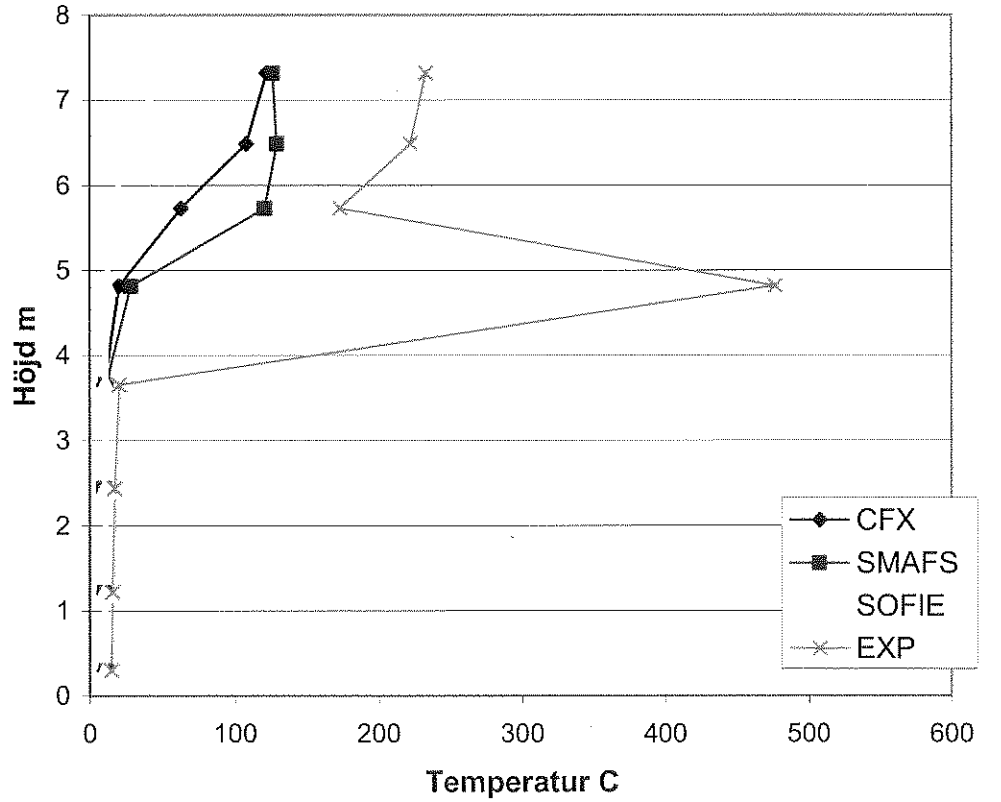

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

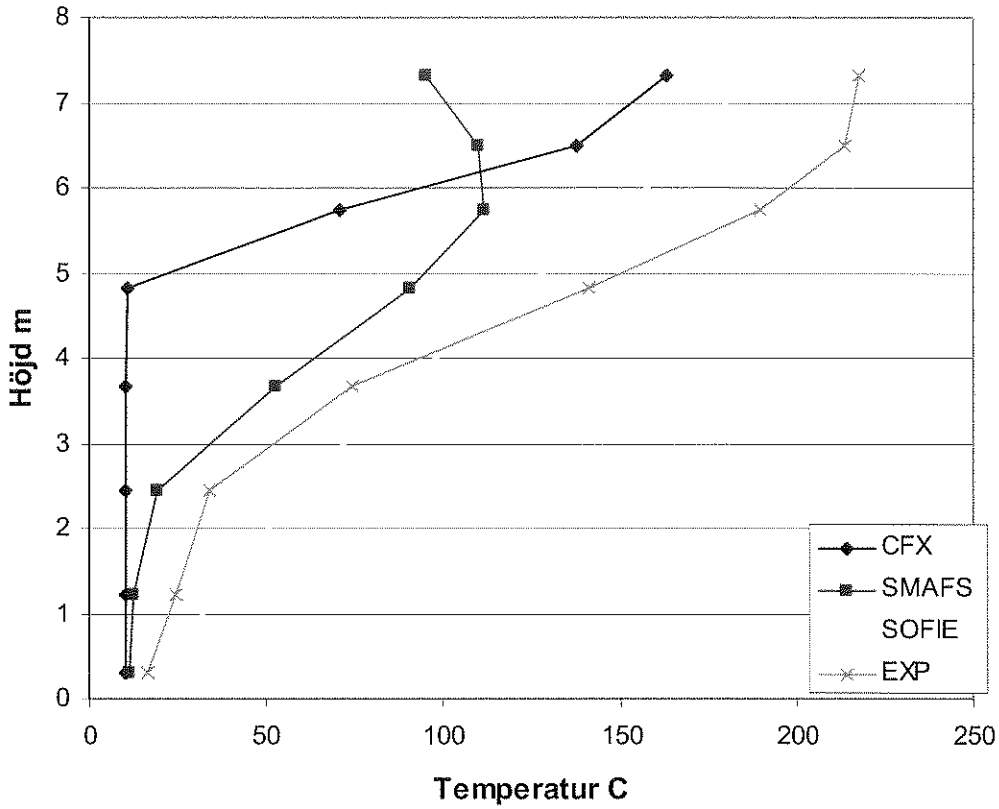
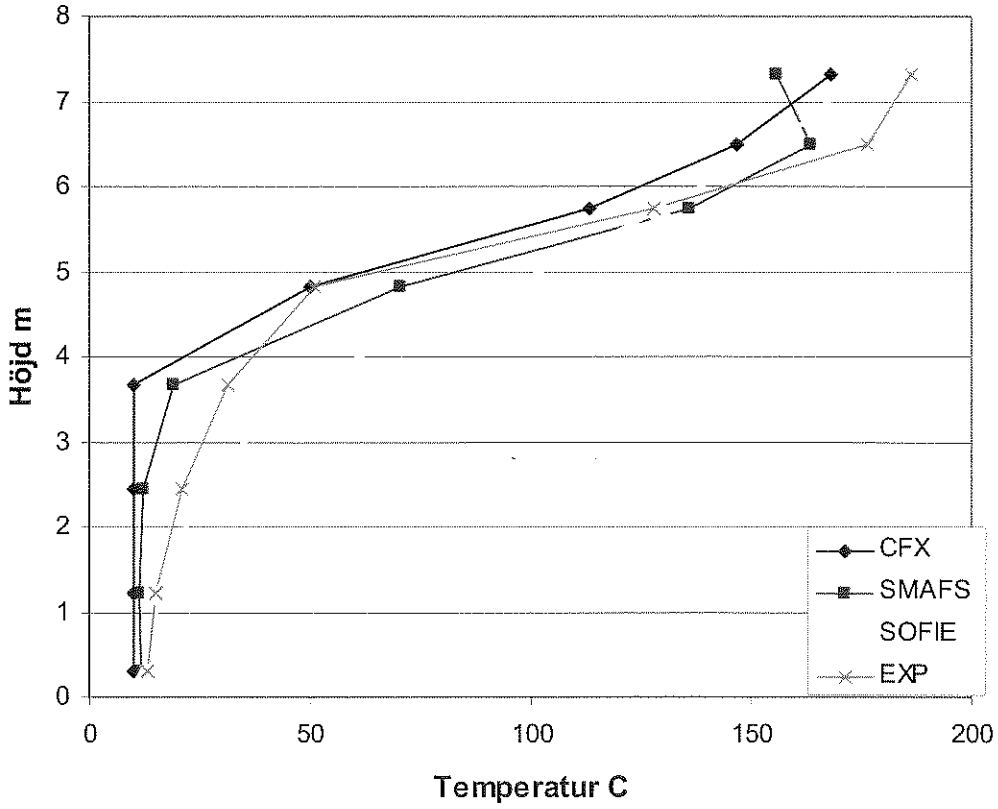
| Time sec | Point 304 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

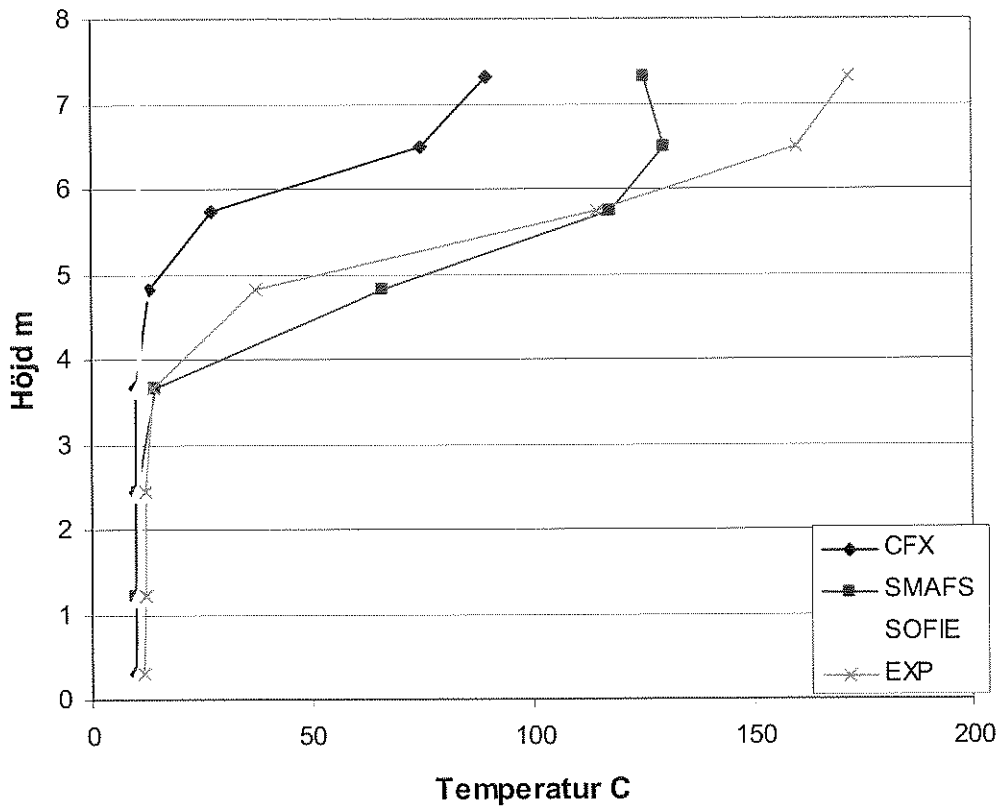

Höjd m
Temperatur C
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
100
200
300
400
500
600

1198

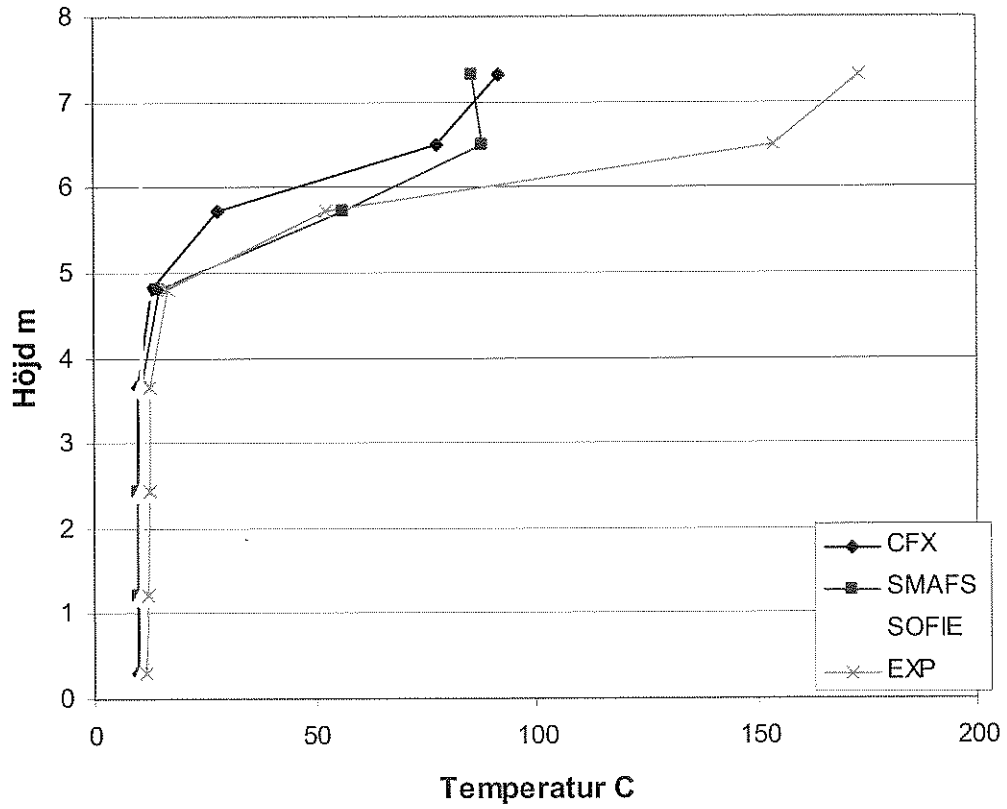

Höjd m
Temperatur C
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
100
200
300
400
500
600
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

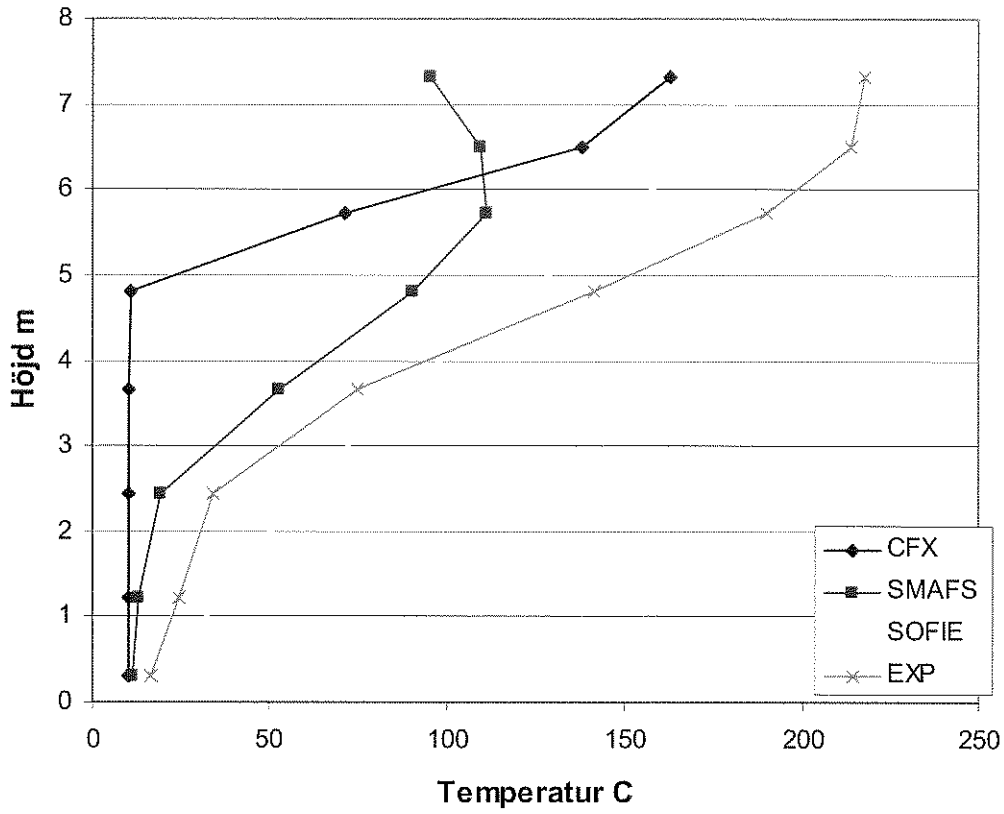
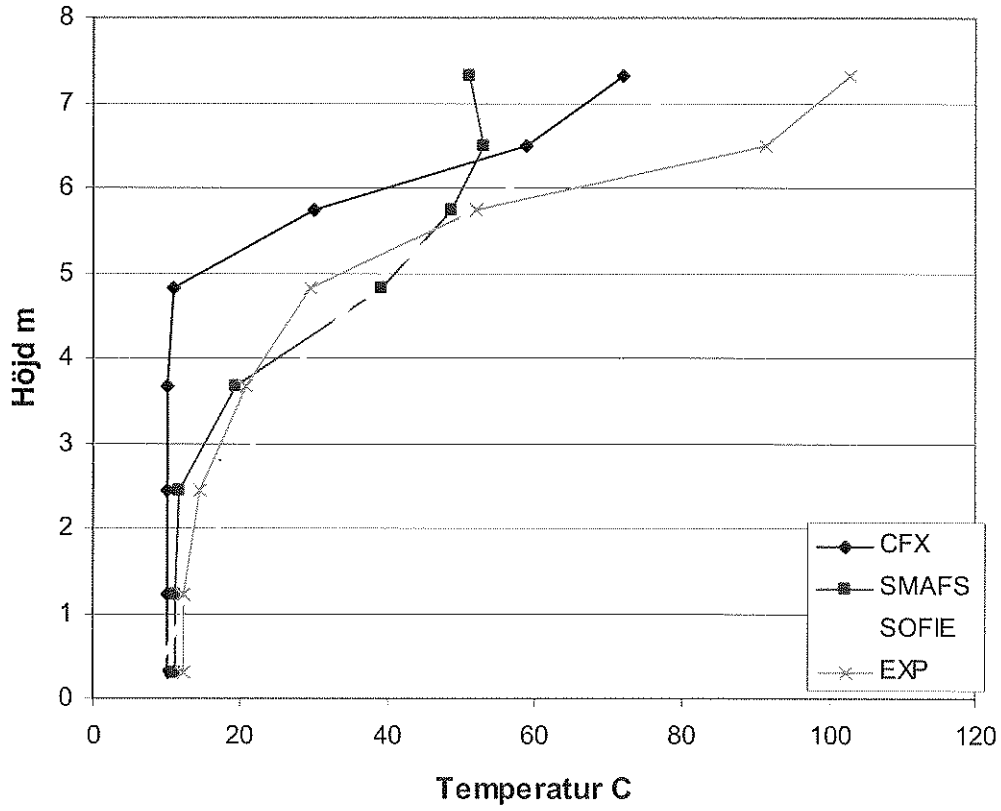
| Time sec | Point 303 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

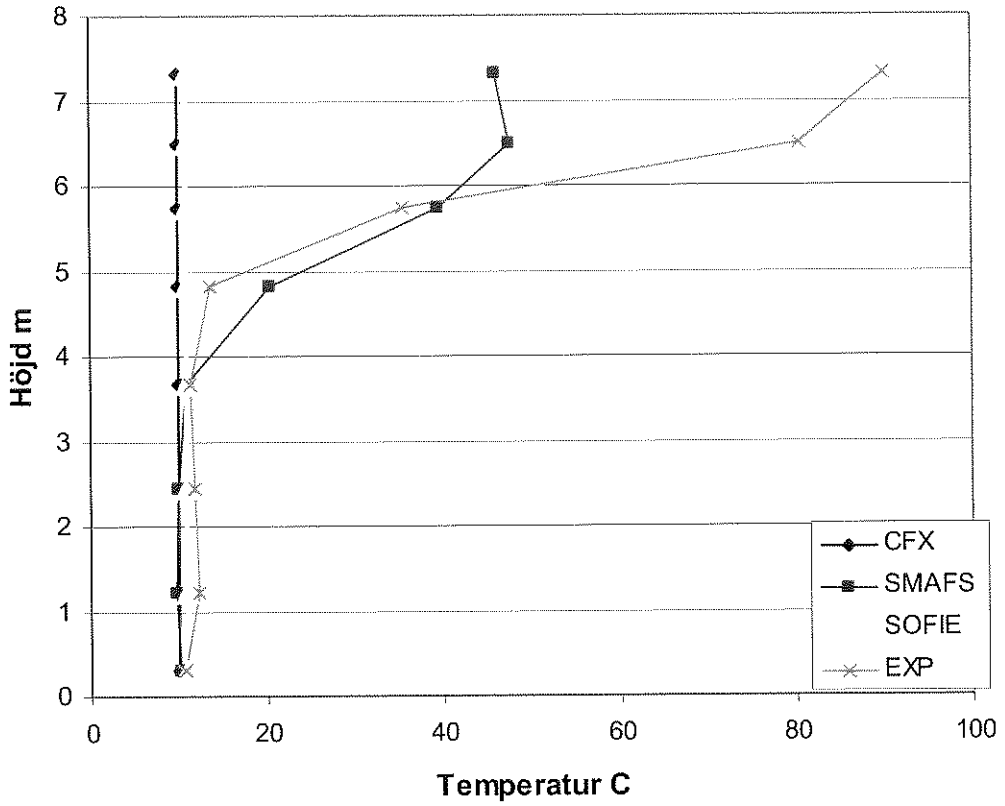

Höjd m
Temperatur C
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
50
100
150
200
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

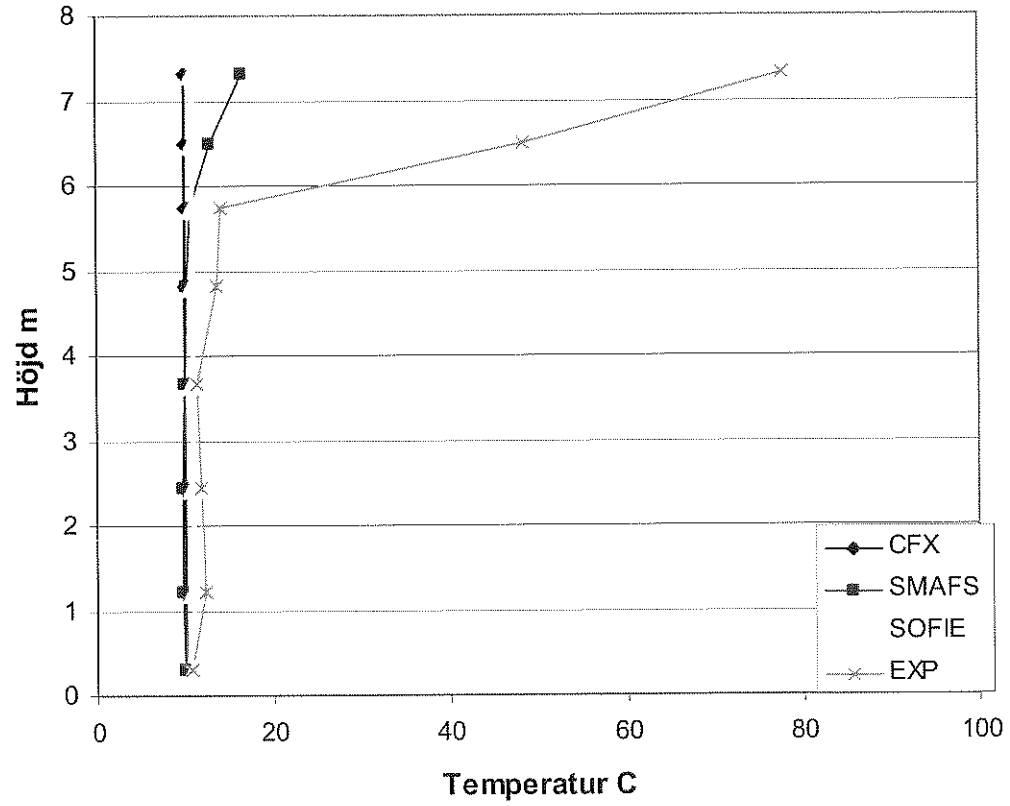

Höjd m
Temperatur C
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0
50
100
150
200
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

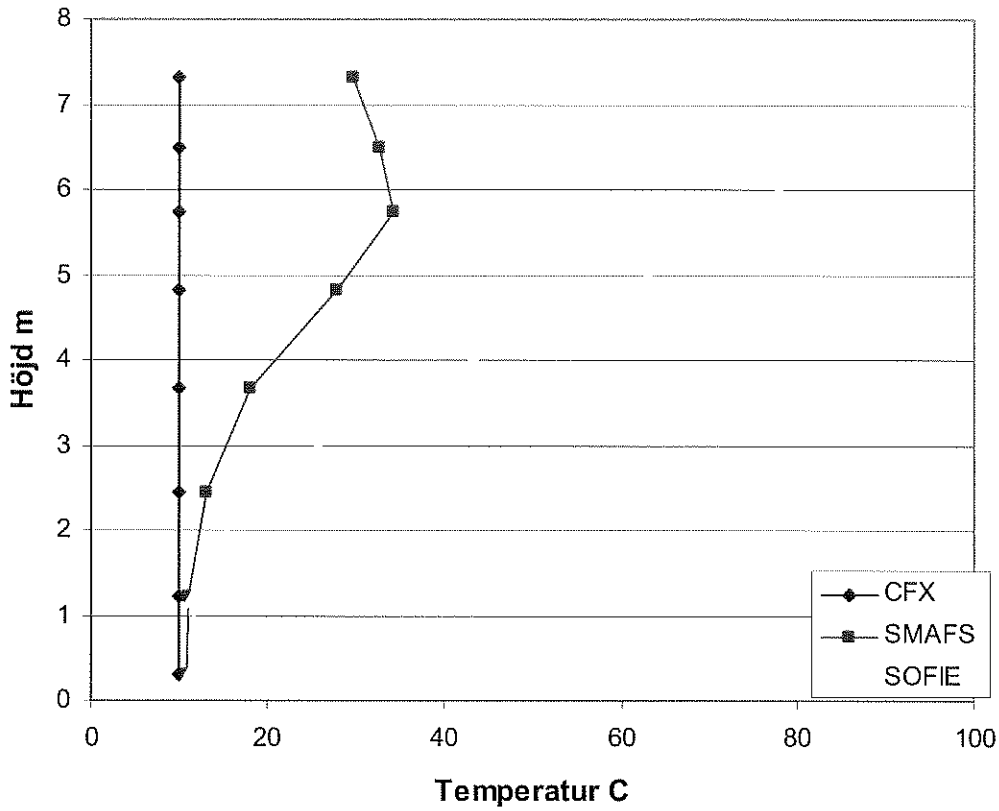
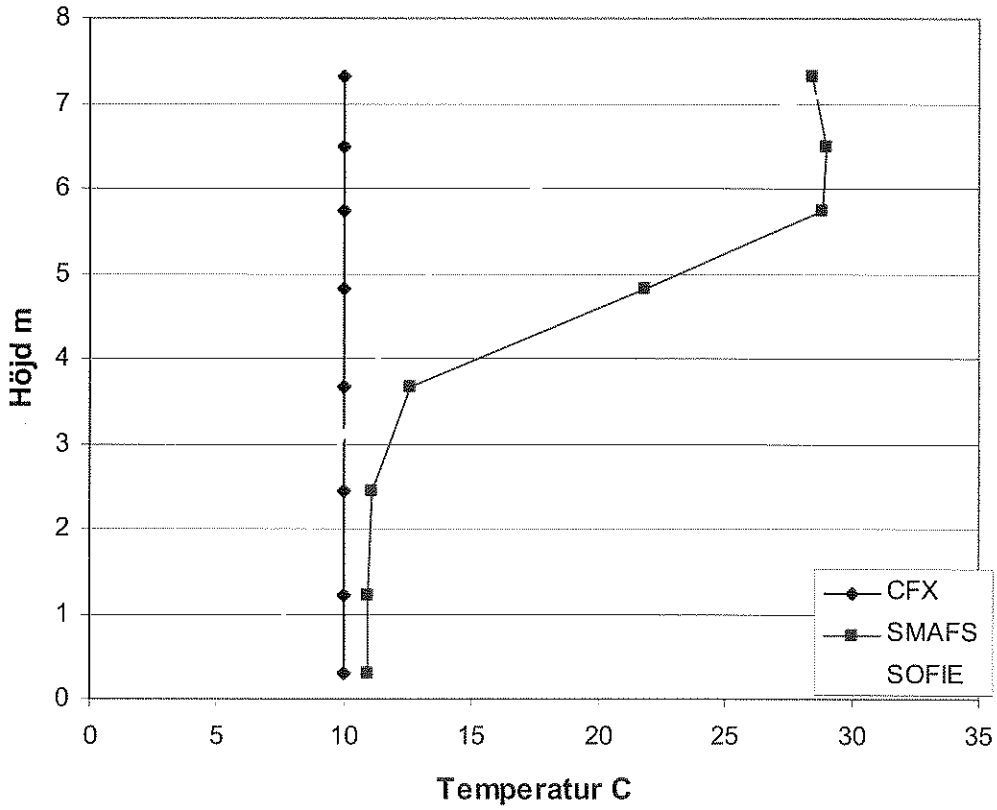
| Time sec | Point 302 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

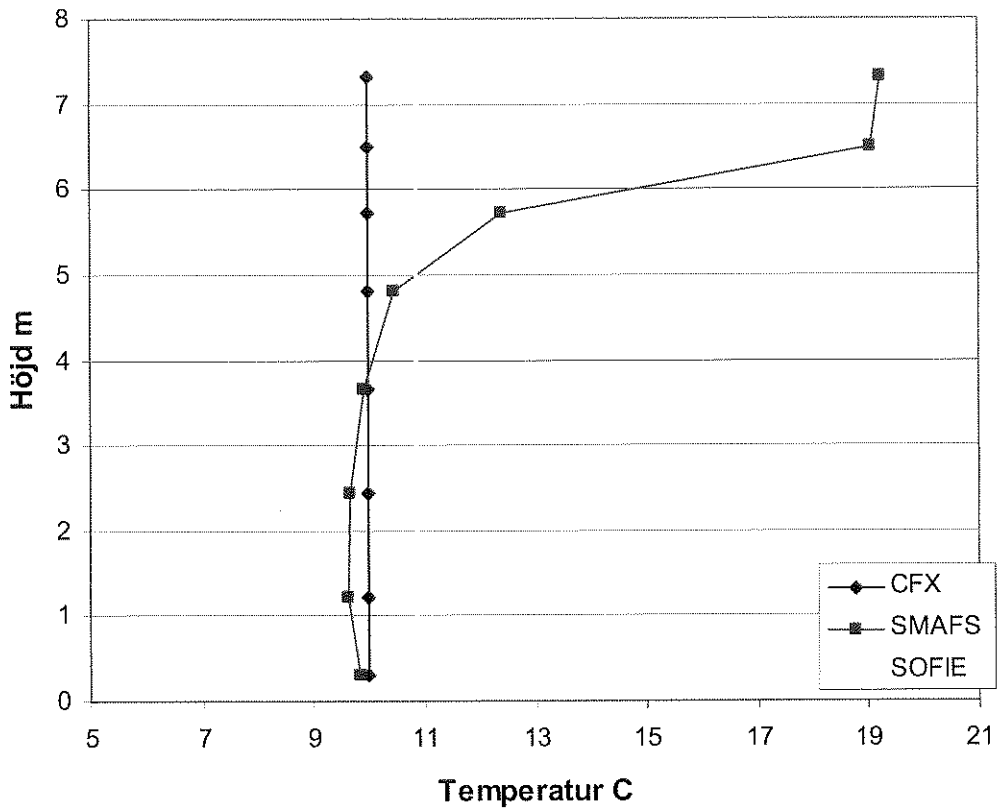

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198

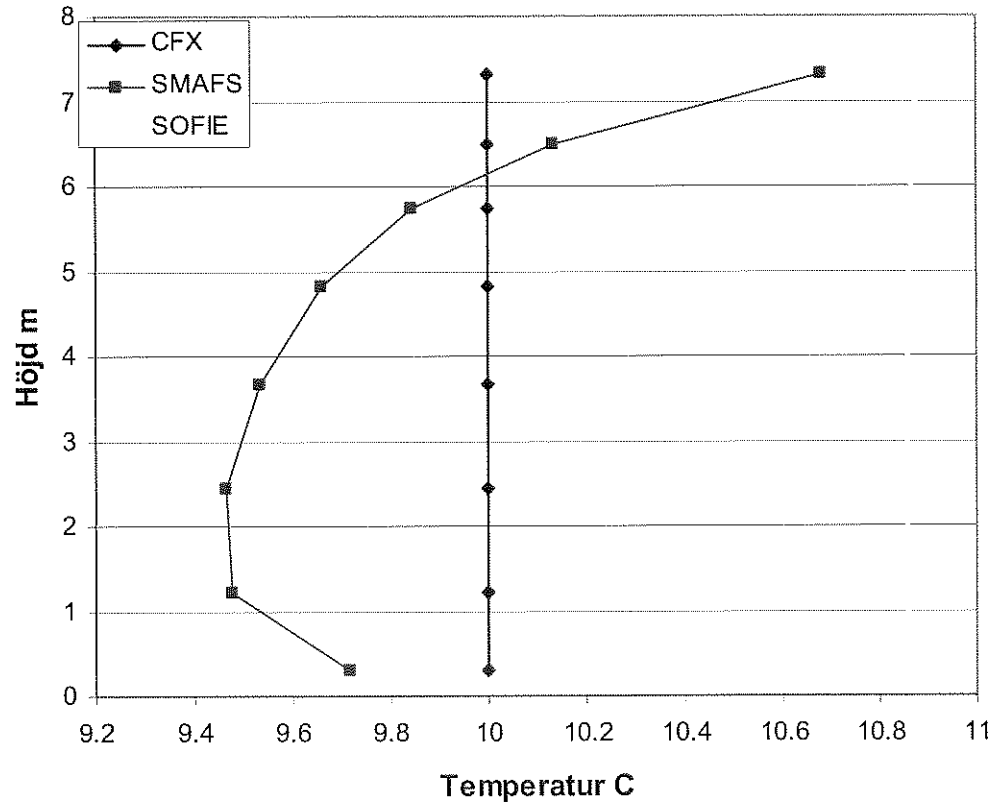

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

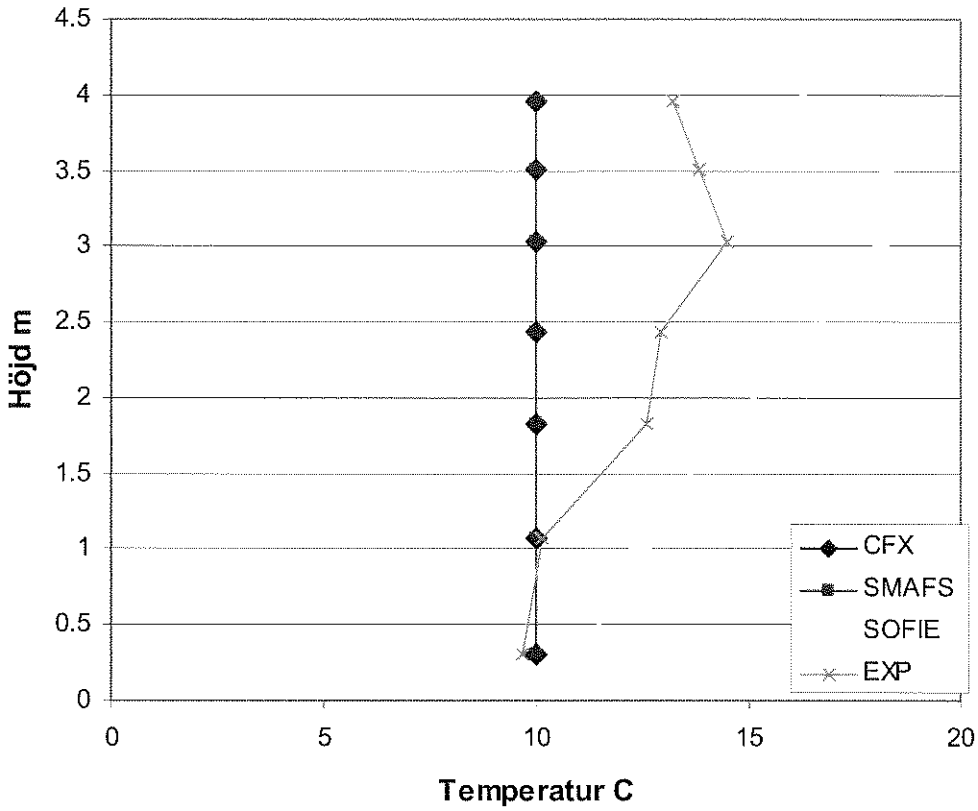
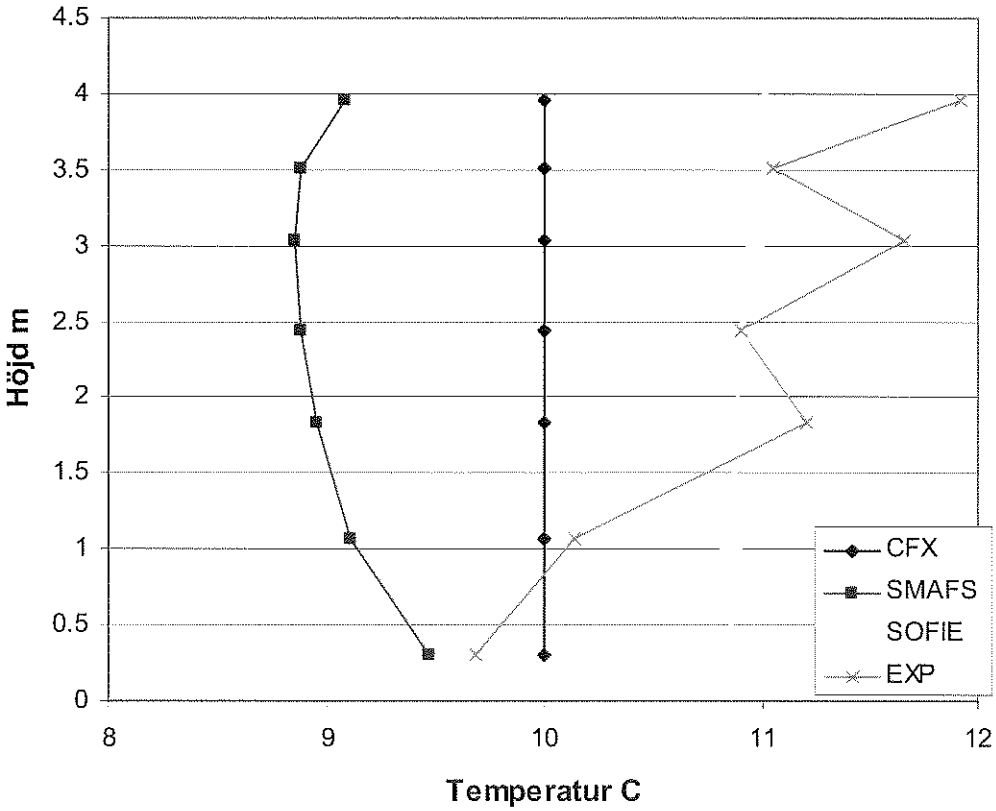
| Time sec | Point 301 |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598

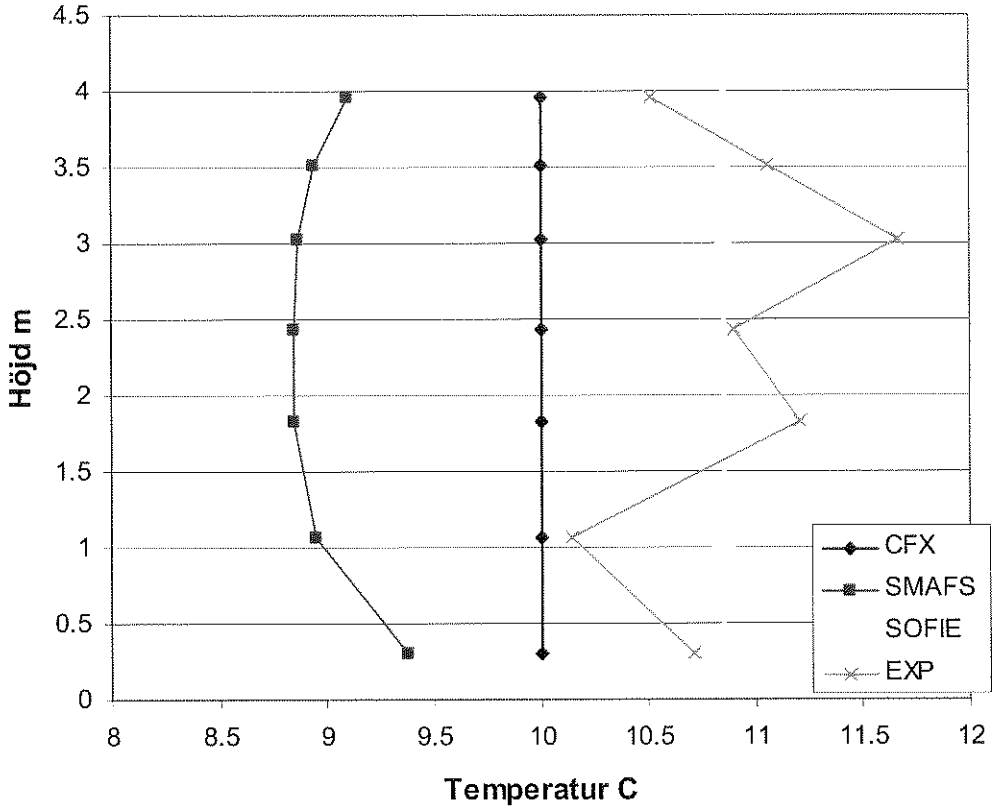

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE

1198

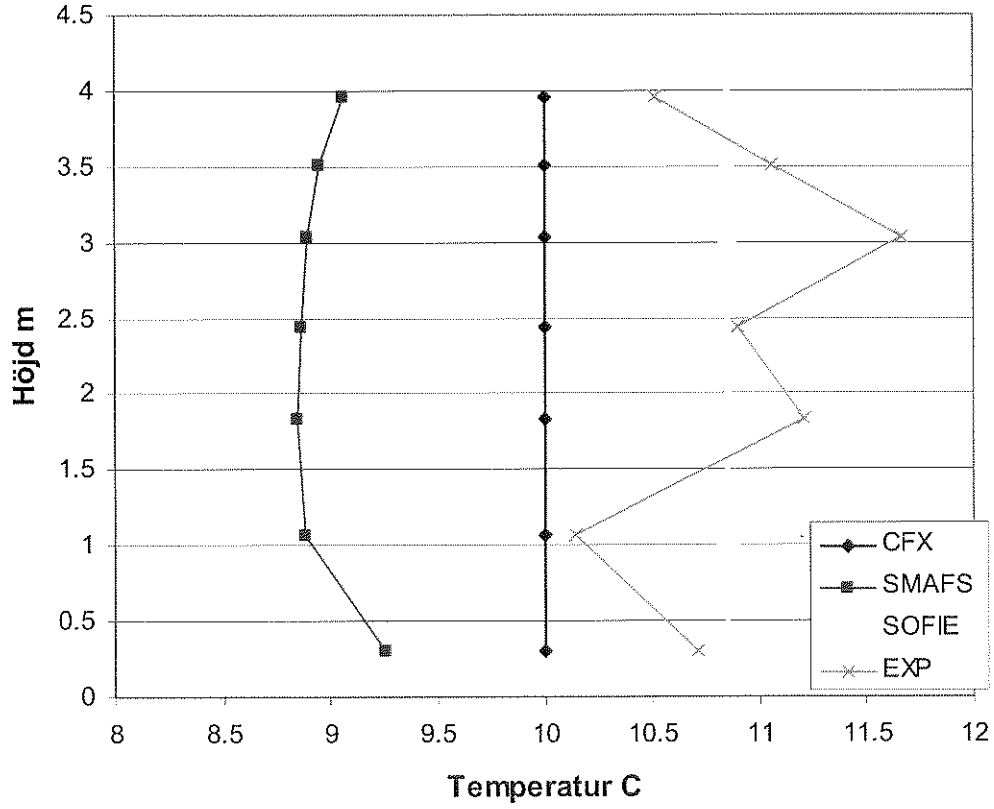

Höjd m
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE

| Time sec | Point 202 south entrance |
|---|---|
| 118 |  |
| 295 |  |

598


4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Höjd m
8
8.5
9
9.5
10
10.5
11
11.5
12
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

1198


4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Höjd m
8
8.5
9
9.5
10
10.5
11
11.5
12
Temperatur C
CFX
SMAFS
SOFIE
EXP

# Scenarum 3 Atrium

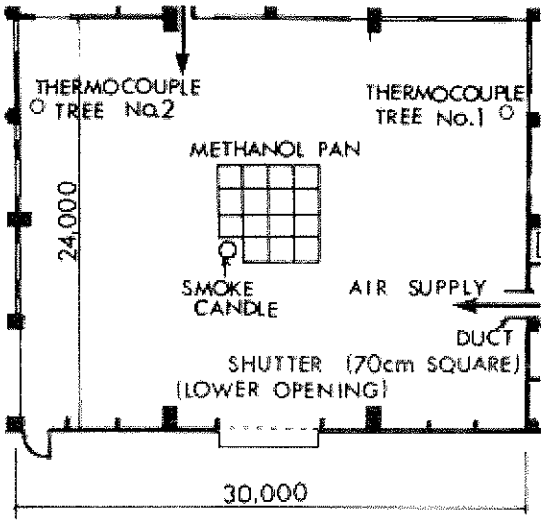
## 1. Syfte

Vid dimensionering av utrymning av ett atrium eller lokaler med stor takhöjd används ofta CFD för att beräkna hur snabbt brandgaserna fyller rummet för att avgöra hur snabbt lokalen måste utrymmas i händelse av brand.
Hur CFD-modeller beräknar luftinträngning i flammor och brandplym är av avgörande betydelse för hur väl simuleringar representerar verkligheten. Det är sällsynt att man kan göra storskaliga försök för att verifiera brandgasfyllnad i befintliga eller planerade lokaler.
I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad mitt i lokalen och har stort avstånd till väggar och tak dvs. scenariet initialskede beskriver nästan en fri brandplym.

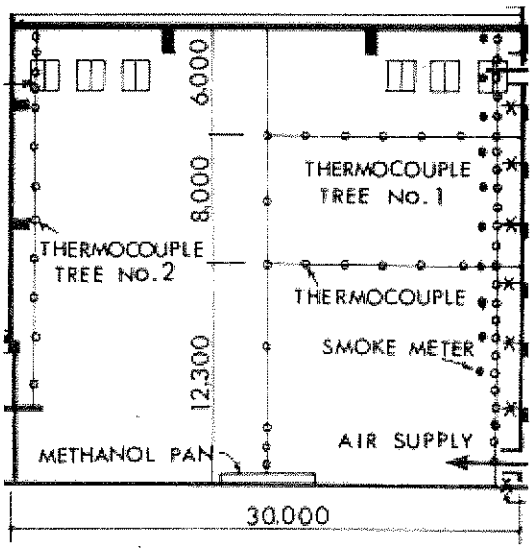
## 2. Scenarium

Scenariet är hämtat från en artikel i tidskriften Fire Science and Technology [1] och beskrivet i anvisningarna till simuleringen i Ref.2

Rummet, som visas i Figur 3.1, har en golvyta på 720 $m^2$ (30 x 24 m) och är 26.3 m högt.




**Figur 3.1a Horisontellt snitt**

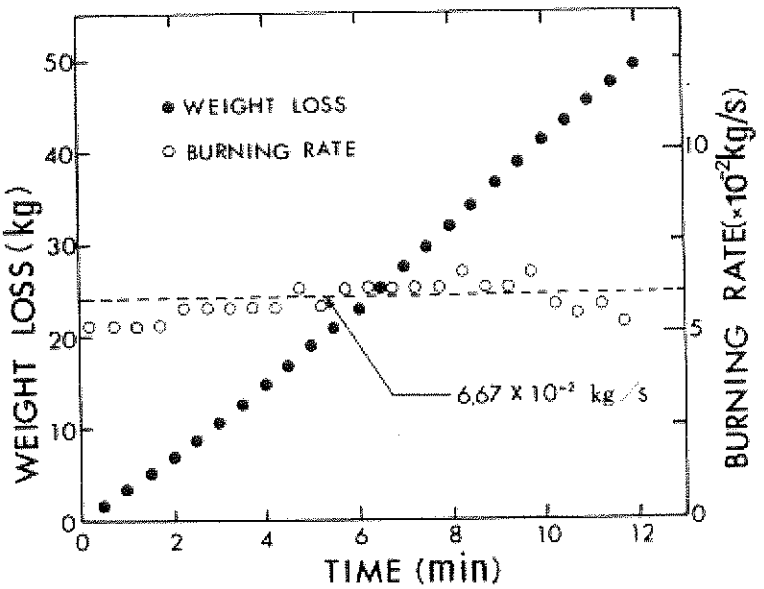



**Figur3.1b Vertikalt snitt**

I det valda scenariet saknar rummet ventilation uppåt och har endast några små ventilationsöppningar vid golvnivå. Väggarna är av tjock betong med okända termiska egenskaper. I taket finns två takbalkar som inte är måttsatta men som antas vara 1.4 m × 0.7 m placerade 9 m från den närmaste väggen och med avståndet 12 m från varandra.

**Brandkälla**

Brandkällan består av 15 stycken fyrkantiga baljor som var hopsatta till en kvadrat på 1.8 x 1.8 m. Bränslet är metanol och avbränningshastigheten uppmättes enligt Figur 3.2 och ur den beräknades medeleffektutvecklingen till 1.3 MW under de första 10 minuterna av försöket.




**Figur 3.2 Uppmätt avbrinningshastighet som funktion av tiden.**

# 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

**Repeter - och reproducerbarhet**

Experimentet har utförts en gång på ett laboratorium och det saknas således information om både repeter- och reproducerbarhet.

**Randvillkor**

Geometrin är enbart skissartad och vissa mått som takbalkarnas och den låga öppningens utformning måste man själv göra en bedömning av. Materialdata för vägg- och takkonstruktionen finns inte angivna förutom att de är av betong.

**Initialvillkor**

Mer detaljerad information om initial temperatur- och hastighetsfördelning i rummet saknas. Den enda uppgiften som anges i Ref.1 är att begynnelsetemperatur var 14° C.

**Brandbeskrivning**

Bränslet är metanol. Medelvärdet av avbrinningshastigheten under de första tio minuterna är c:a. 66.7g/s. Av diagram 3.2 framgår att avbrinningshastigheten under de första två minuterna är c:a. 20 % lägre än medelvärdet för att efter c:a. fem minuter bli något högre än medelvärdet och stannar på den högre nivån till 10 minuter. Av beskrivningen framgår inte vilken temperatur metanolen hade då den antändes. Man når inte omedelbart en konstant avbrinningshastighet när man tänder ett vätskebål. Tiden till stabil avbrinning för metanol beror på vätskans initialtemperatur, kärlets diameter, kanter mm.

**Mätteknik**

Vid försöken mättes gastemperaturen med termoelement placerade på tre vertikala och på två horisontella termoelementtråd. Det finns ingen uppgift om termoelementens tjocklek vilket gör det mycket svårt att uppskatta strålningskorrektionen för termoelementen, speciellt för de som är placerade i och rakt ovanför branden.

**Sammanfattande osäkerhetsbedömning**

Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, med 20% i motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [3] en osäkerhet i temperaturstegringen på 14 % ($\Delta T$ -- $Q^{2/3}$).

- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att strålningskorrektionen påverkar de uppmätta gastemperaturerna. Den kommer att variera mycket beroende på termoelementens placering och tjocklek.
- Att om man jämför de mätresultat som redovisas för de två termoelementtråden som är vertikalt placerade, symetriskt vid väggen på båda sidor av branden, redovisade i Fig.3.4-3.9 nedan, finner man att temperaturhöjningen på samma höjd varierar upp till c:a. 20 % vid samma tid.

# 4. Simuleringar

I tabell 3.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien.

**Tabell 3.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| **Mjukvara** | **CFX-4.4** | **FDS 4.07** | **SMAFS 5.01** | **SOFIE 3.0** |
|---|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | | |
| **Dator CPU** | Intel Pentium4 | Intel Pentium 4 | ADM Opteron | Intel Pentium 4 |
| **Klockfrekvens GHz** | 2? | 3.4 | 2.2 | 3.2 |
| **RAM GB** | 1 | 2 | 1GB/processor | 2 |
| **Antal processorer** | 1 | 1 | 6 på ett Linux Cluster | 1 |
| **Simulering** | | | | |
| **Operatör** | Bengt. Hägglund | Göran Holmstedt | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| **Gridstorlek** | 685.000 | 1.072.080 | 275.110 | 534.688 |
| **Gridförtätning** | Ja | Ja | JA | Ja |
| **Symmetriplan** | Nej | Nej | ? | 2 |
| **Tidssteg sek** | 1 | Default | ? | ? |
| **Beräkningstid timmar** | 48. | 37 | 24 | 337 |
| **Mass tolerans** | $10^{-6}$ | Default | $10^{-5}$ | $10^{-3}$ |
| **Modellval** | | | | |
| **Typ av code** | RANS | LES | RANS | RANS |
| **Turbulens** | k-ε | Smalgorinsky | k-ε | k-ε |
| **Strålning** | Ingen | Default | ? | DTRAM 16 ray |
| **Brand** | Heat source | Default | Eddy Break-up | Eddy Break-up |
| **Reduc effekt %** | 10 | 15% | ? | ? |
| **Sotfraktion** | 0.01 | 0.001 | | 0.0005 |
| **Konvektion** | Default | Default | Default | Default |

Det kan noteras att CFX simuleringarna inte använde en förbränningsmodell utan effektutvecklingen simulerades som en "heat source". Vid simuleringarna med SOFIE användes två symmetriplan dvs. vid en jämförelse med de andra modellerna har SOFIE simuleringarna en upplösning som motsvarar 4 x 534.688 dvs. 2.138.752 grid.

## 5. Jämförelse mellan simulerade och uppmätta temperaturer

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har stor betydelse är osäkerheten i avbrinningshastighet (effektutveckling) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

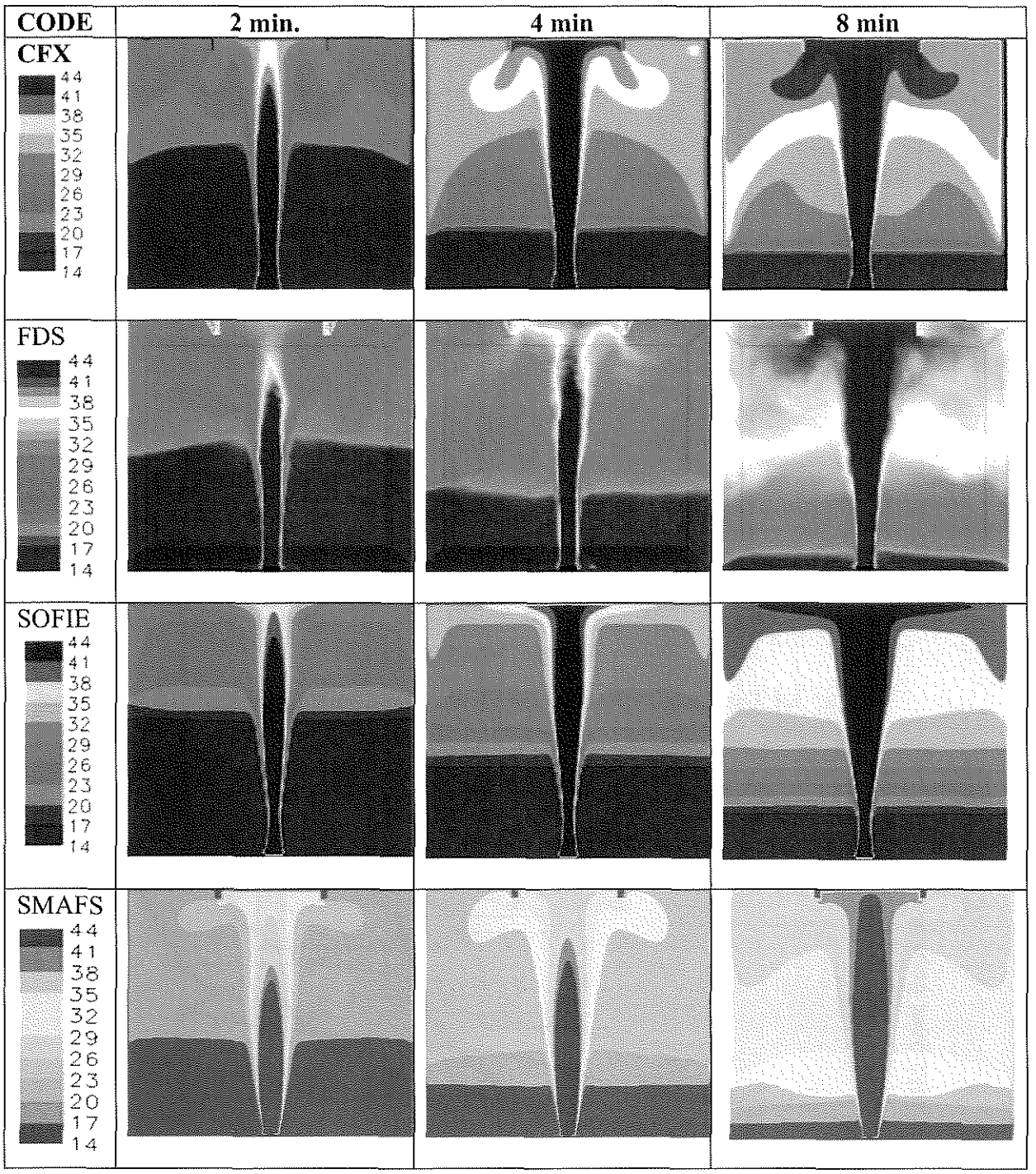
Simuleringarna är även behäftade med flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Vid simuleringarna antogs en konstant effektutveckling på 1.3 MW under det att den varierade med upp till 20% från detta värde i experimenten. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafil dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX, FDS och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I och i det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd enligt rekommendationer i en vetenskaplig artikel [4]. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

Vid experimenten uppmättes endast temperaturen i ett antal punkter i rummet vilket inte ger hela bilden av hur brandgaser fyller upp rummet. I figur 3.3 visas simuleringarna av fyllnadsförloppet efter 2, 4 och 8 minuter med likartad färgskala för olika temperaturintervall. Resultaten från FDS simuleringarna representerar tidsmedelvärdet över en 10 sekunders period. Notera att simuleringarna med SOFIE utfördes utan takbalkar. Vid jämförelserna nedan har vi valt att anta att det experimentella mätfelet härrör från osäkerheten i effektutvecklingen och strålningskorrektion. Osäkerheten i simuleringarna på grund av modeller, scenarium och operatör betraktas som avvikelse från experimenten.

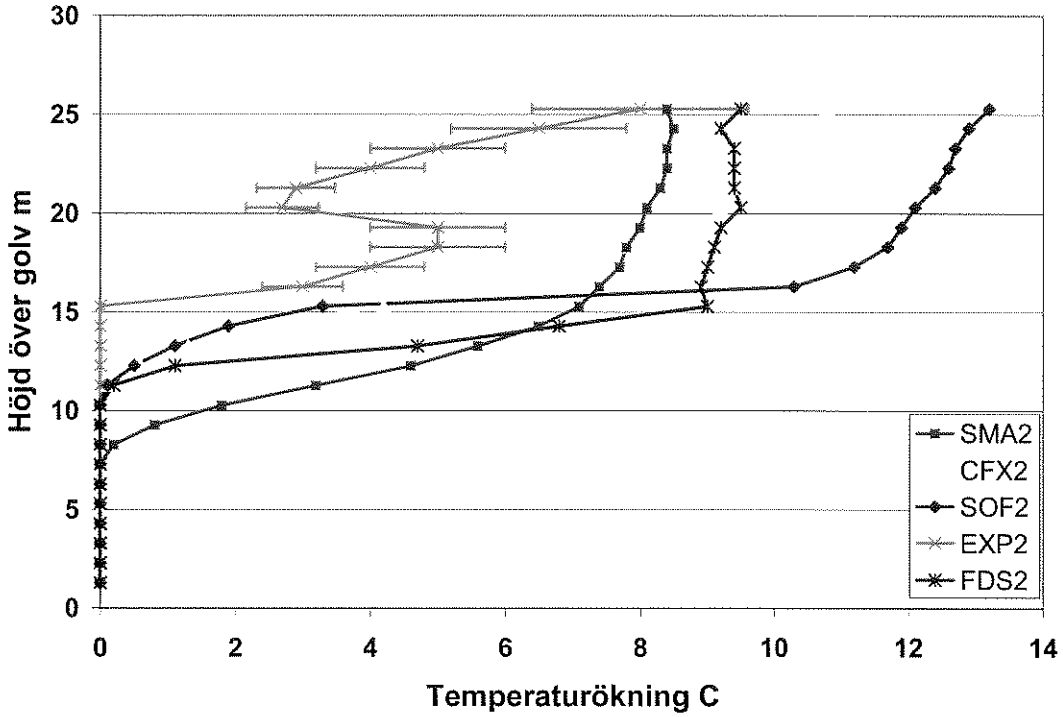



**Figur 3.3 Brandgasfyllnad av rummet vid 2, 4 och 8 minuter**

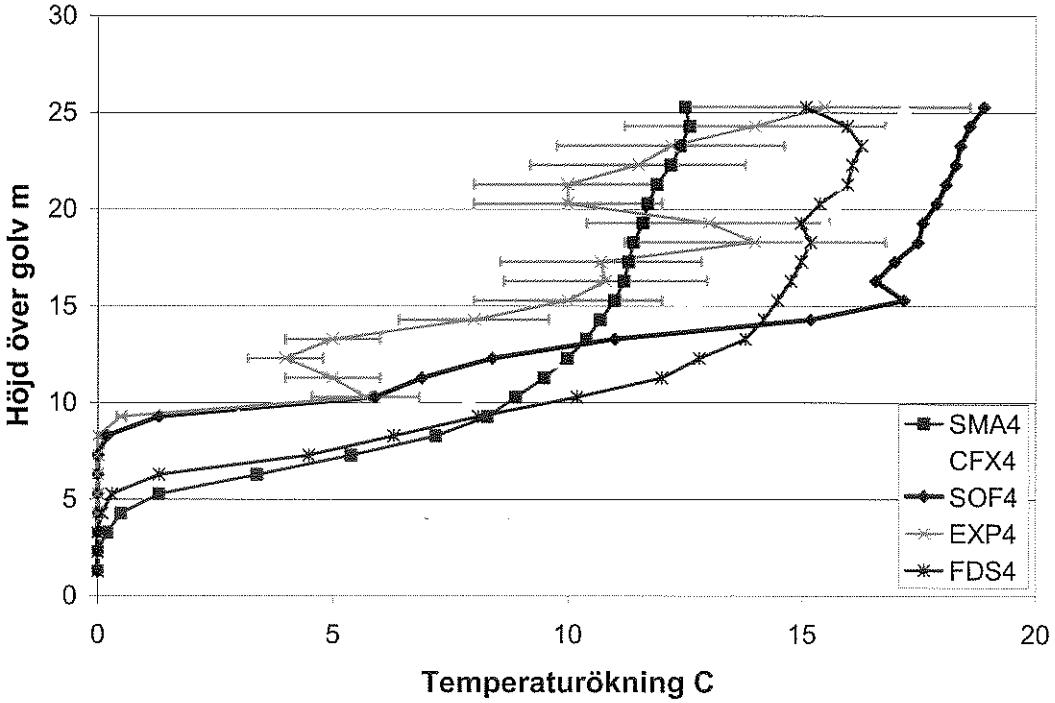
## 6. Jämförelse mellan simuleringar av temperaturer i temperaturträd.

Vid experimenten mättes temperaturen med 5 termoelementträd, tre placerade vertikalt och två horisontellt. I Fig.3.4-3.18 nedan redovisas de uppmätta och simulerade temperaturerna efter 2, 4 och 8 minuter. De experimentella mätningarna har angivits med en felstapel på 20%. Orsaken härtill är att den uppmätta temperaturen mellan de symmetriskt placerade vertikala termoelementträden 1 och 2 skiljer så pass mycket. I Fig.3.19 visas brandgaslägets läge över golvet (då temperaturen stigit 10 grader över begynnelsetemperaturen vid det vertikala termoelementträdet nr1) vid olika tidpunkter.

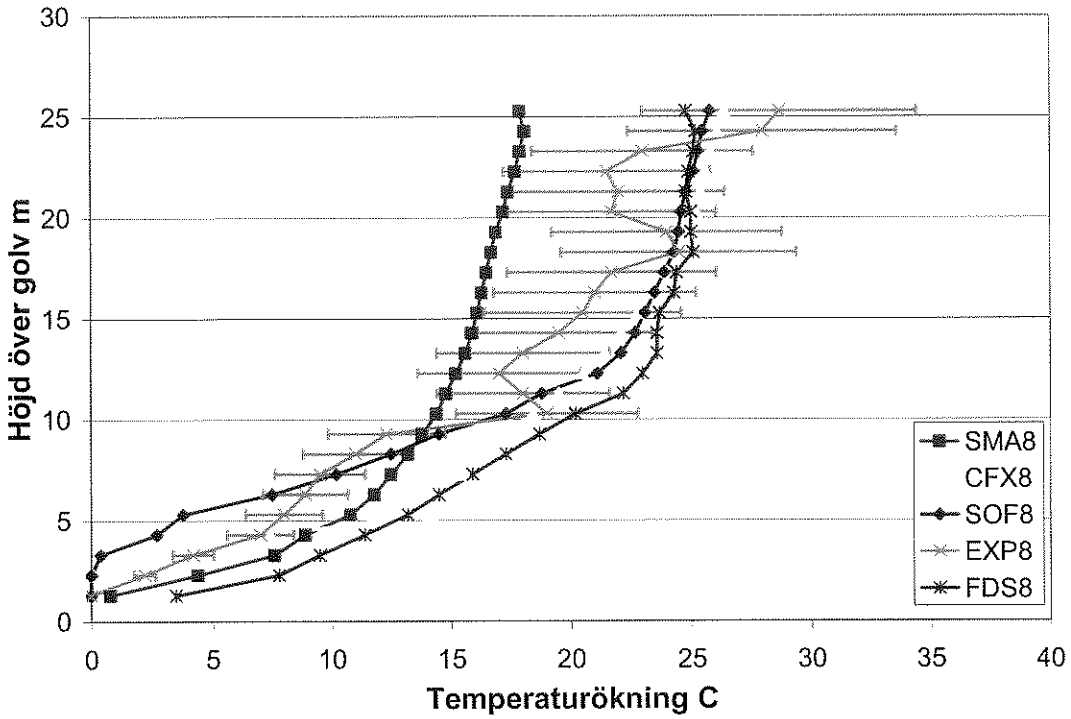
Vid simuleringarna med koden FDS redovisas temperaturerna som medelvärdet över 10 sekunder.



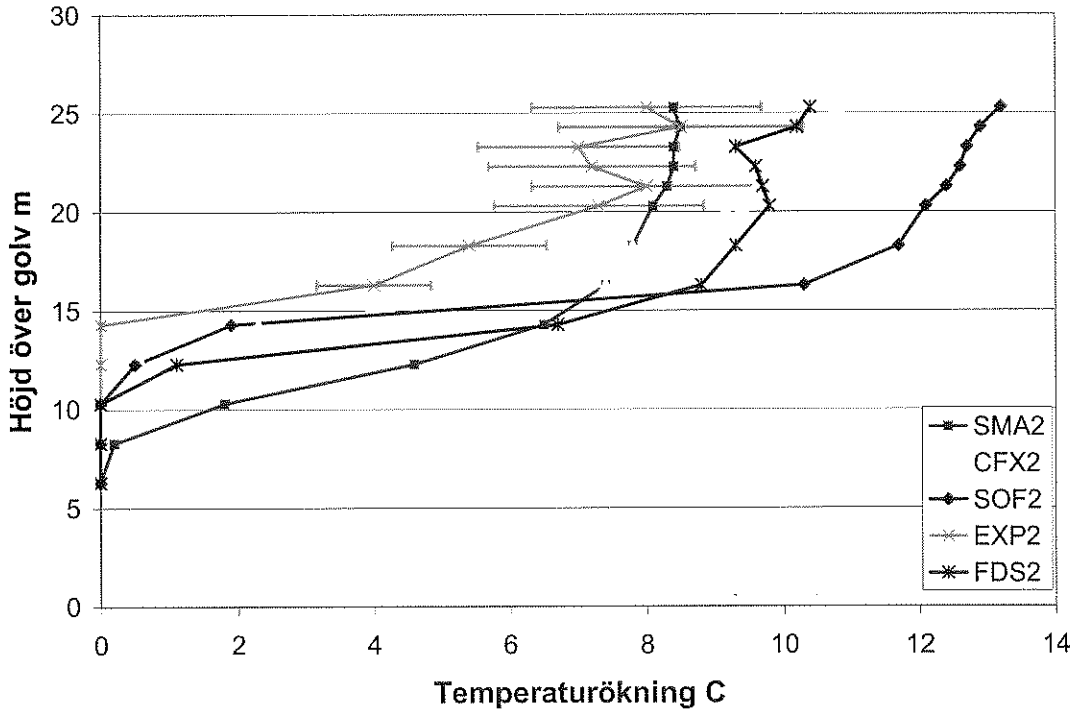

**Figur 3.4 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 1 efter 2 minuter**



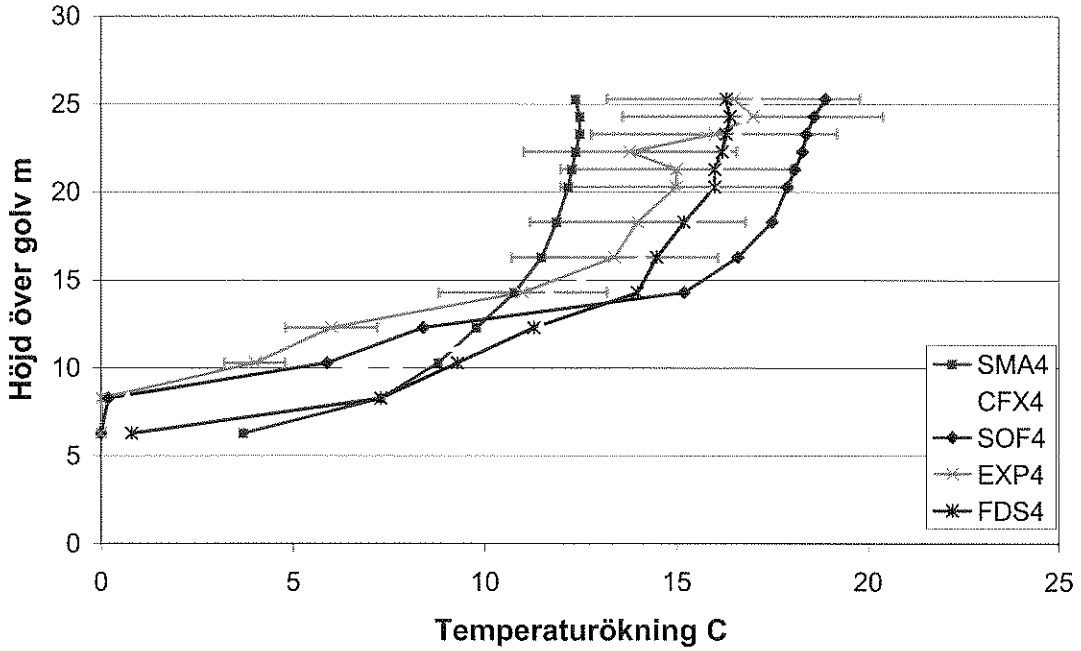

**Figur 3.5 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 1 efter 4 minuter**



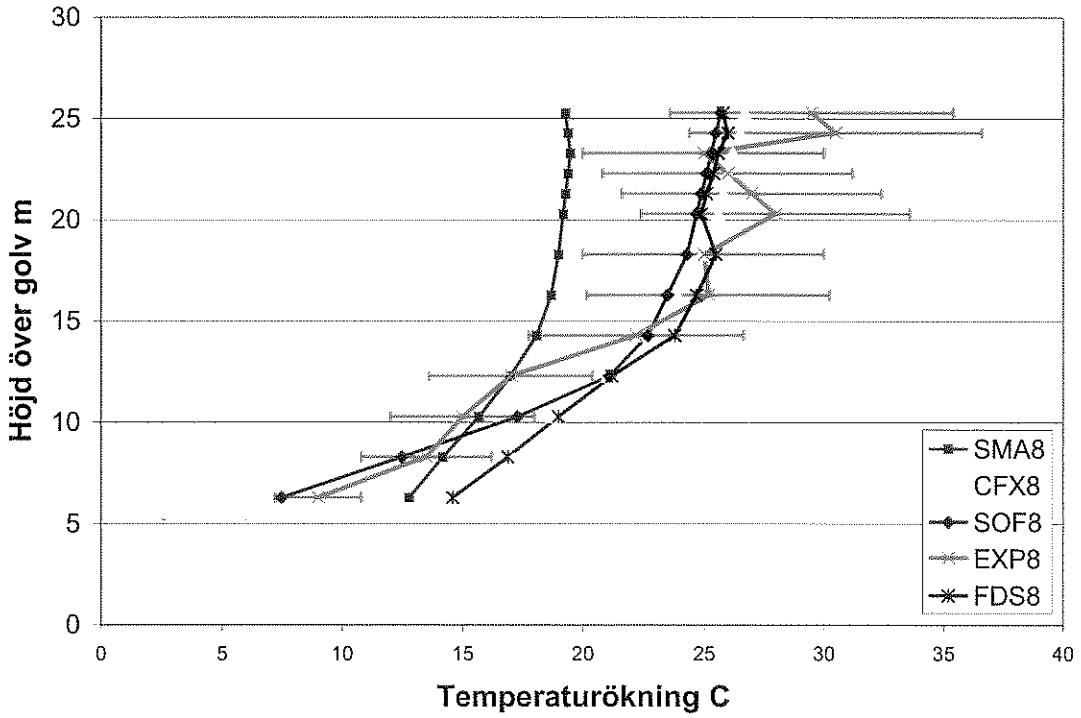

**Figur 3.6 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 1 efter 8 minuter**



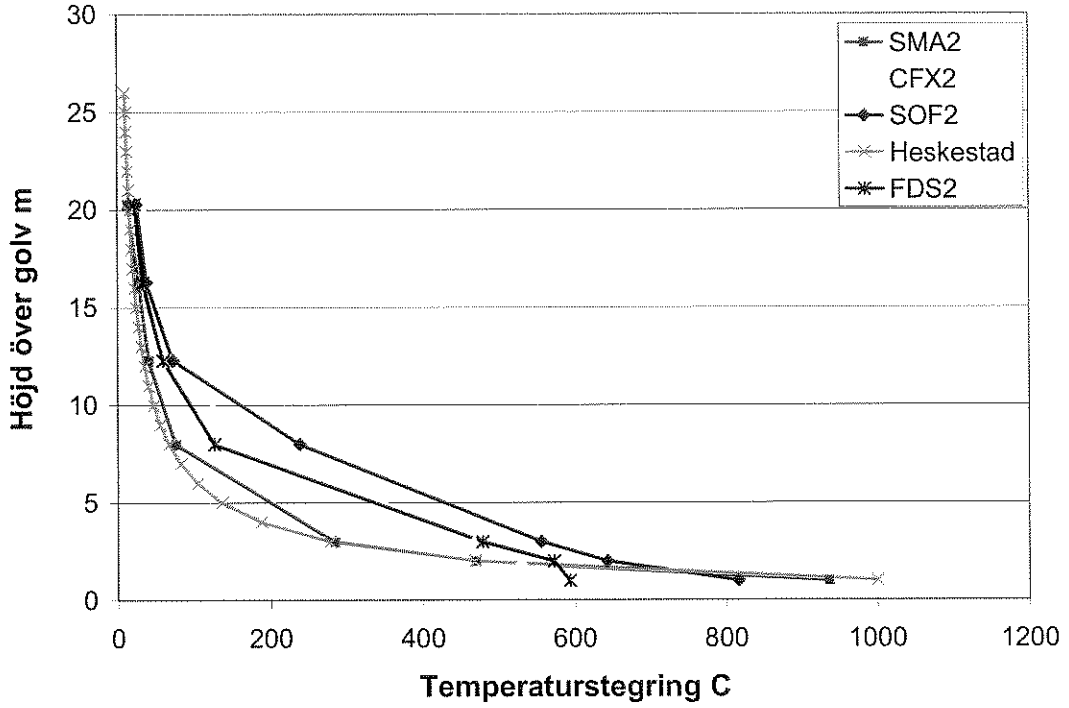

**Figur 3.7 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 2 efter 2 minuter**



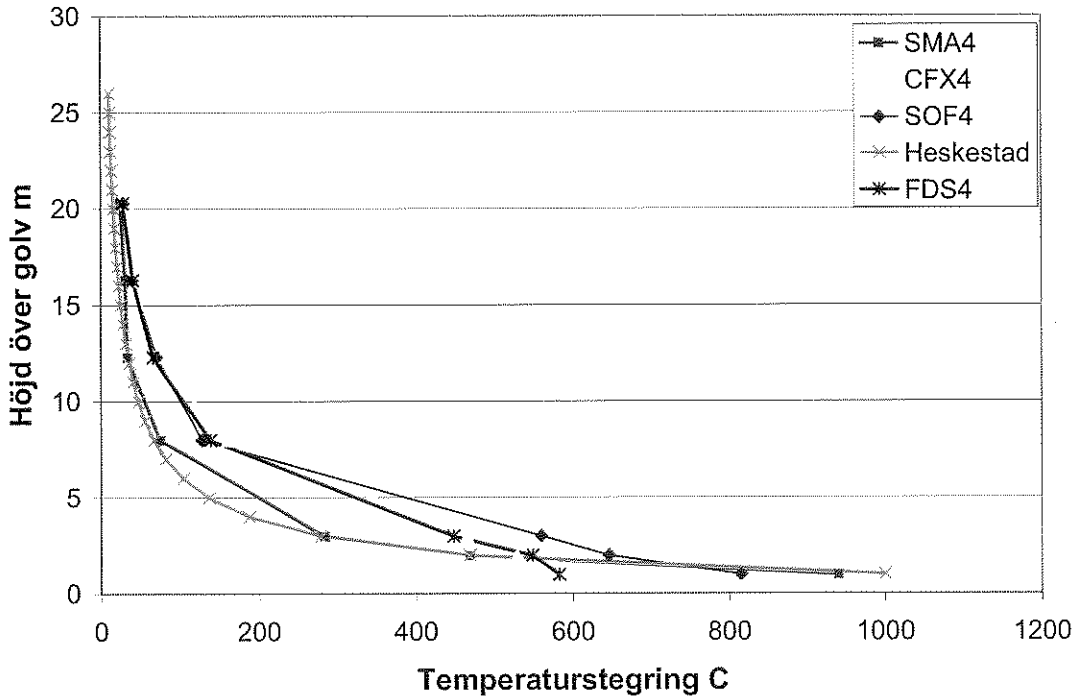

**Figur 3.8 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 2 efter 4 minuter**



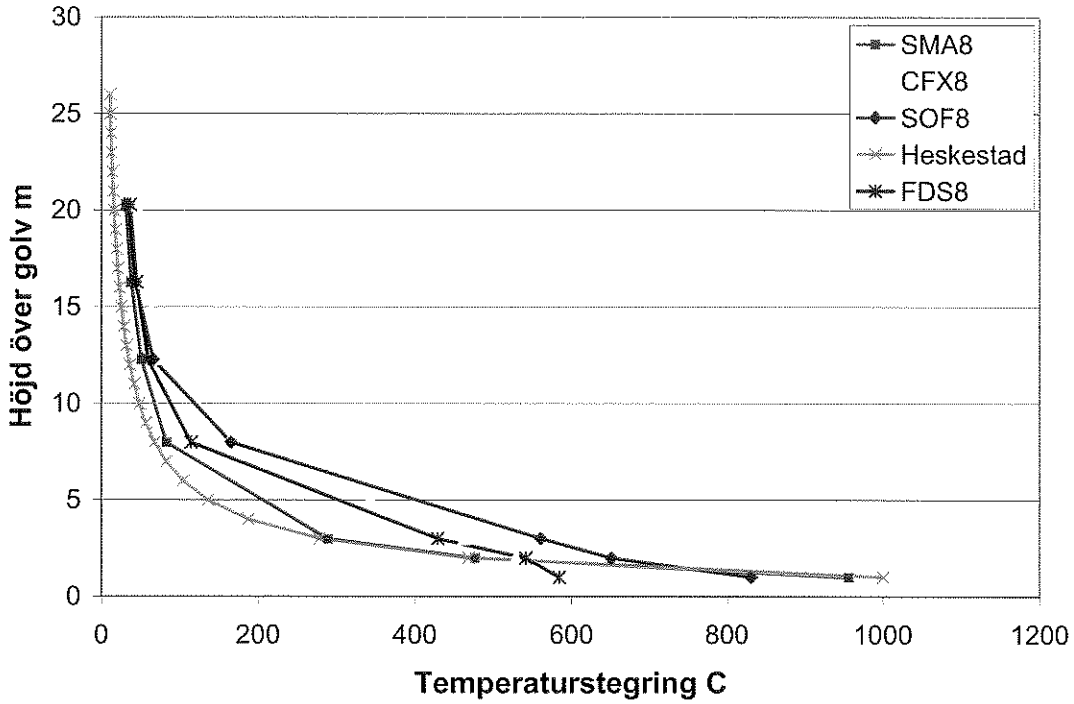

**Figur 3.9 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd nr 2 efter 8 minuter**



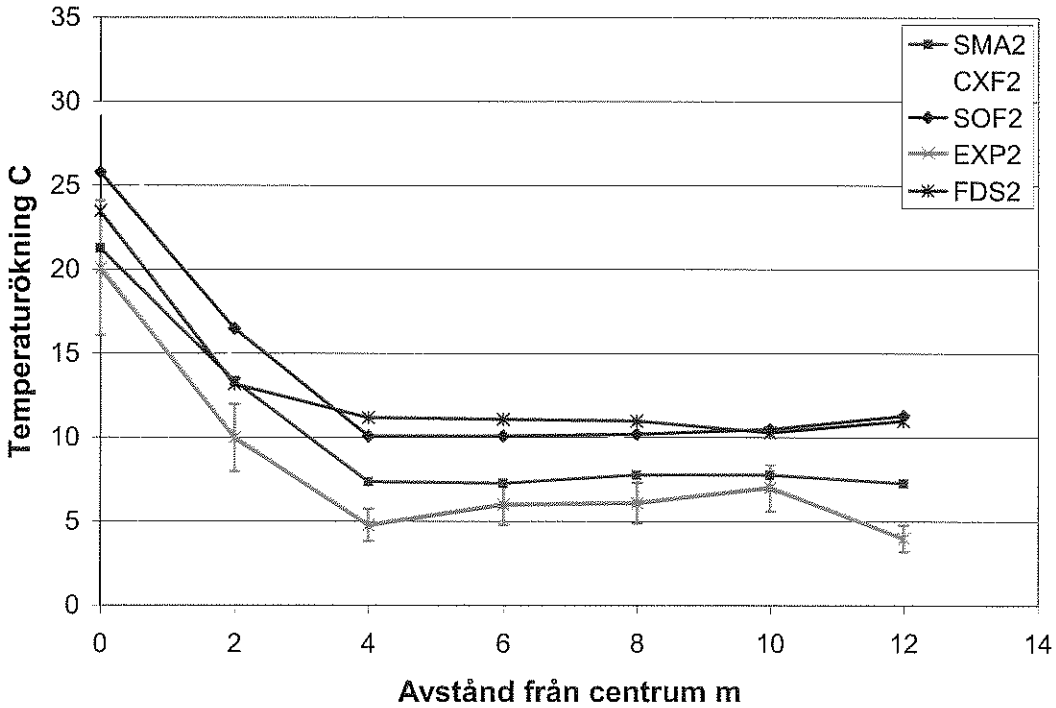

**Figur 3.10 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd rakt över branden efter 2 minuter. Heskestads formel för en fri brandplym är även inlagd, Ref 5 då experimentella data saknas.**



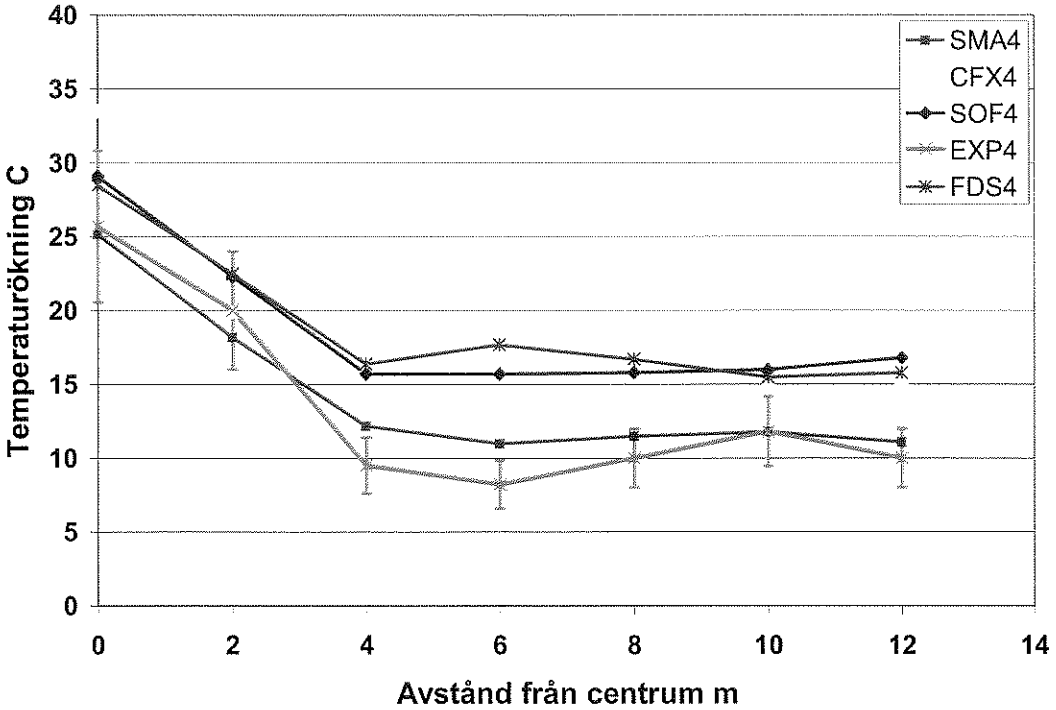

**Figur 3.11 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd rakt över branden efter 4 minuter. Heskestads formel för en fri brandplym är även inlagd, Ref 5 då experimentella data saknas.**



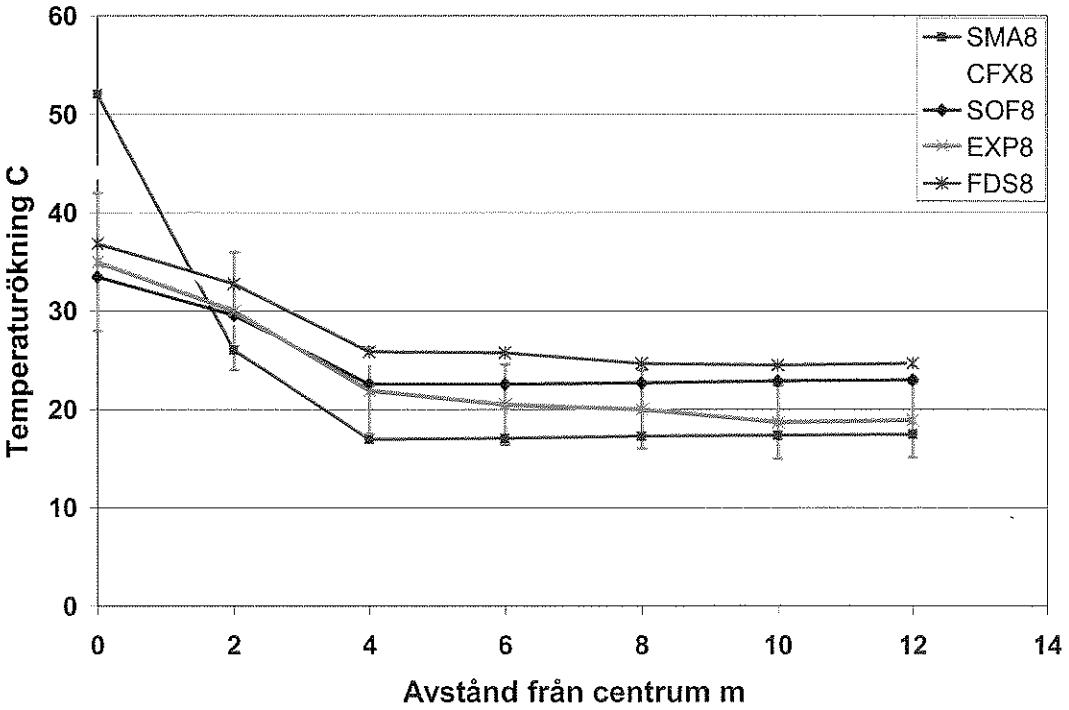

**Figur 3.12 Temperaturjämförelse för vertikalt termoelementträd rakt över branden efter 8 minuter. Heskestads formel för en fri brandplym är även inlagd, Ref 5 då experimentella data saknas.**



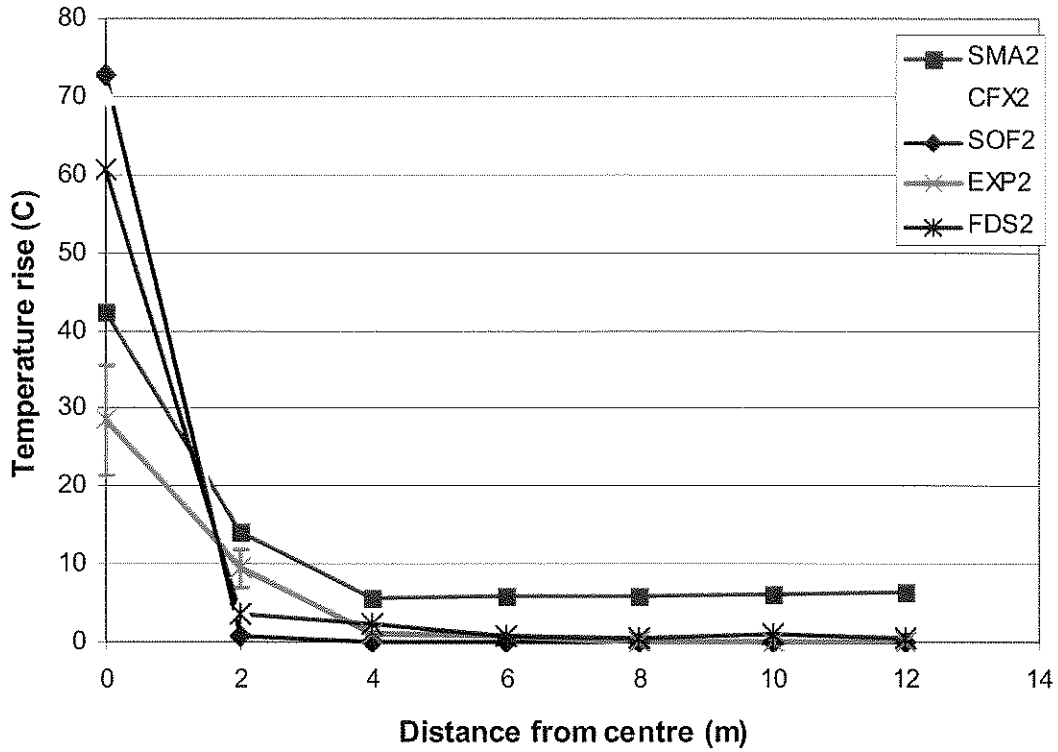

**Figur 3.13 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 20.3 m över golv efter 2 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**



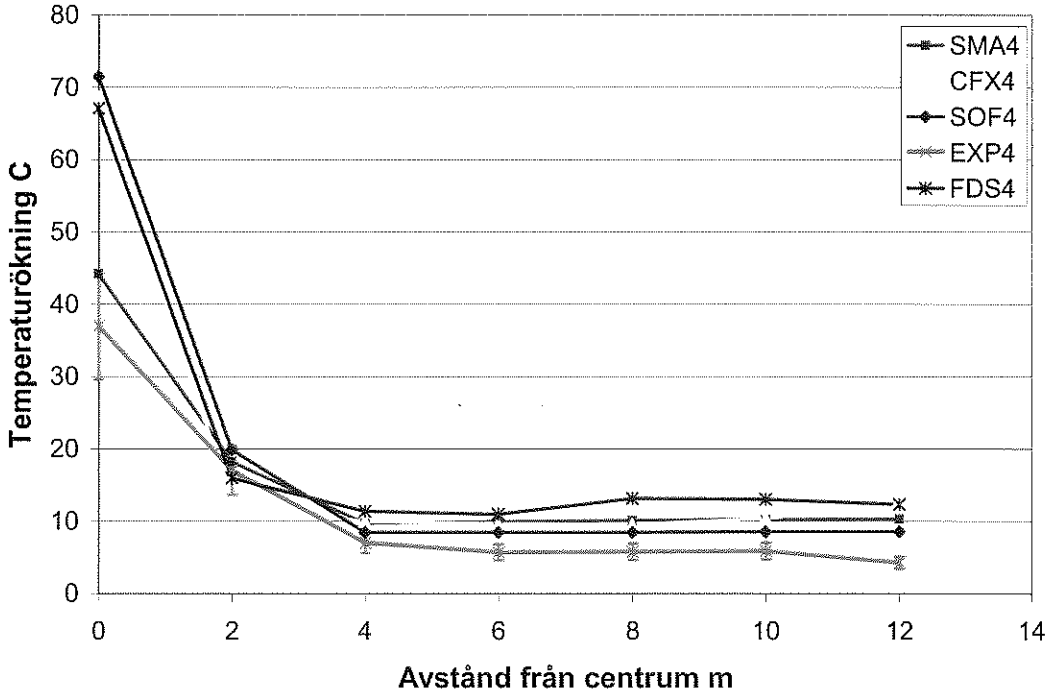

**Figur 3.14 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 20.3 m över golv efter 4 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**



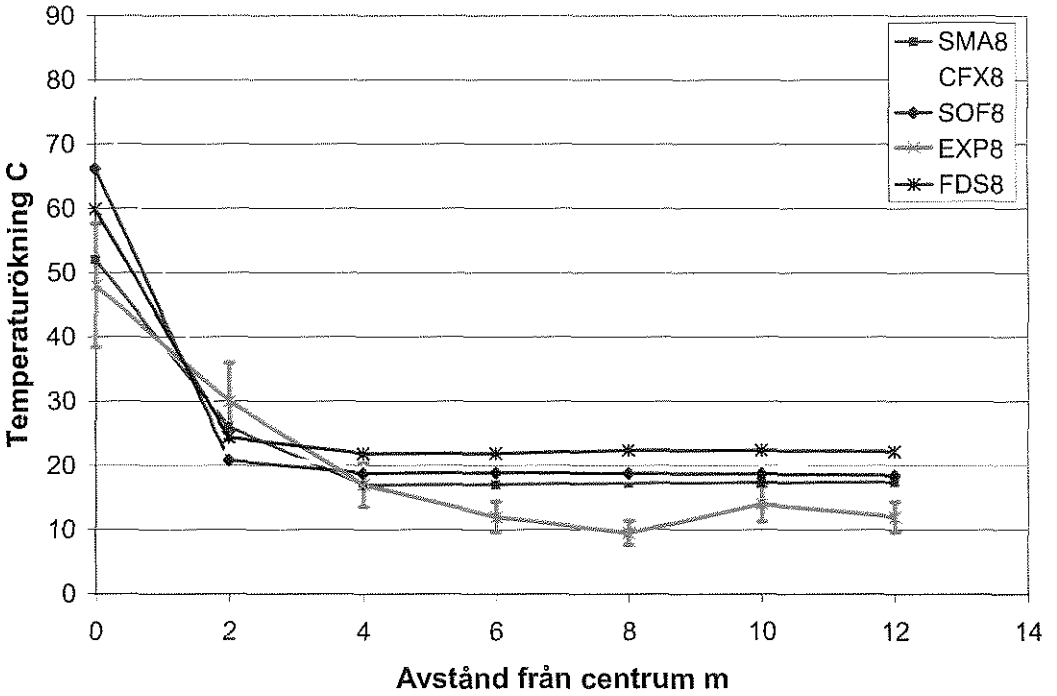

**Figur 3.15 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 20.3 m över golv efter 8 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**



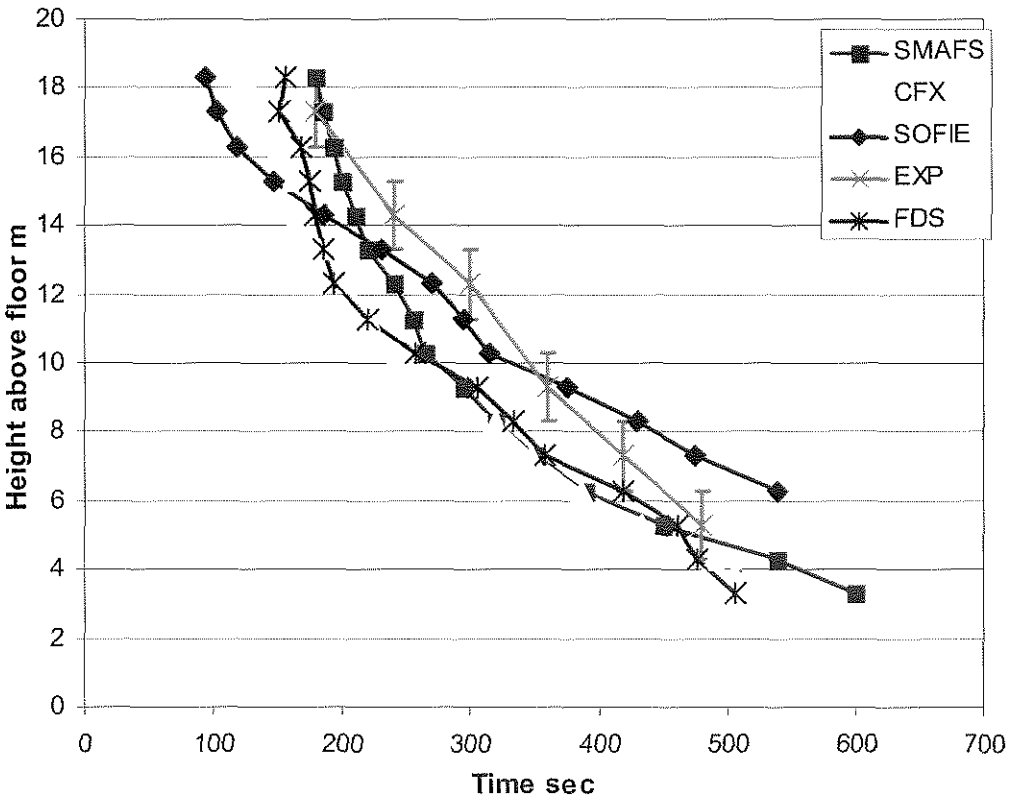

**Figur 3.16 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 12.3 m över golv efter 2 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**




**Figur 3.17 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 12.3 m över golv efter 4 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**




**Figur 3.18 Temperaturjämförelse för horisontellt termoelementträd 12.3 m över golv efter 8 minuter. Termoelementen sträckte sig från centrum till läget för termoelementträd nr 1.**




**Figur3.19 Brandgasläget vid olika tidpunkter (höjd över golvet då temperaturen stigit 10 grader över begynnelsetemperaturen vid det vertikala termoelementträdet nr 1)**

# 7. Värdering av jämförelse experimentella datasimuleringar

**Översiktlig jämförelse mellan koderna av brandgasfyllning i rummet**
De översiktliga bilderna av simuleringen av brandgasfyllnaden i rummet redovisade i figur 3.3 ger ett likartat utfall för samtliga modeller. Simuleringarna med CFD-koden SOFIE avviker något från de andra CFD-koderna genom att brandgaslagret är något varmare och inte sänker sig lika fort som för övriga simuleringar enligt Fig.3.3 och 3.19

**Jämförelse mellan simuleringar och experiment**
Experimentella värden finns för tre vertikala och två horisontella termoelementträd.
*Vertikal temperaturfördelning vid rummets sidor (termoelementträd 1-2)*
Redovisningen av temperaturmätningarna vid rummets sidor är behäftade med mätfel beskrivna ovan. Dels finns en temperaturskillnad med upp till 20 % mellan mätpunkter placerade symmetriskt i rummet och dels varierar effektutvecklingen speciellt vid försökets början. I Figur 3.4-9 redovisas jämförelse mellan experimentella data och simuleringar. Som väntat visar experimenten på lägre temperaturer än simuleringarna under de första minuterna på grund av lägre effektutvecklingen vid experimenten än den konstanta nivå på 1.3 MW som antagits vid simuleringarna. Efter 8 minuter ligger nästan alla simuleringar inom den experimentella osäkerheten i temperaturmätning på 20 % för temperaturskillnader över 10°C, Figur 3.6 och 3.9.

*Vertikal temperaturfördelning i brandplymen.*
Redovisningen av temperaturmätningarna i brandplymen, rakt ovanför branden är i tidskriftsartikeln inte tillräckligt bra. De simulerade temperaturerna i brandplymen redovisade i Figur 3.10-12 jämförs därför inbördes. I figurerna har även Heskestads plymformel, Ref 3.1 tagits med som representerar en experimentell korrelation för brandplymer i det fria. På grund av brandgasrecirkulation bör temperaturerna ovanför flamman bli högre i ett stängt rum än i en fri flamma och öka som funktion av tiden. Som framgår av figur 3.10-3.12 följer alla koderna den trenden. Vid korta tider ger koden SMAFS den temperaturfördelning som mest liknar Heskestads empiriska uttryck. Övriga koder ger för höga temperaturer i plymen för höjder mellan 2 till 10 m över branden

*Horisontell temperaturfördelning 12.3 och 20.3 m över golv.*
Redovisningen av temperaturmätningarna vid rummets sidor är behäftade med mätfel beskrivna ovan. Dels finns en temperaturskillnad med upp till 20 % mellan mätpunkter placerade symmetriskt i rummet och dels varierar effektutvecklingen (avbrinningshastigheten) speciellt vid försökets början. I Figur 3.13-18 redovisas jämförelse mellan experimentella data och simuleringar. Som väntat visar experimenten på lägre temperaturer i och utanför brandplymen än simuleringarna under de första minuterna, Figur 3.13-14 och 3.16-17, på grund av lägre effektutvecklingen vid experimenten än den som antagits vid simuleringarna.

## 8. Sammanfattning

- Samtliga koder ger en relativt likartad brandgasfyllnad i rummet som funktion av tiden. Tiden då rökgaslagret (temperaturökning 10° C) når 5-7 m nivån över golvet varierar mindre än 15 % mellan experiment och samtliga simuleringar. Avvikelsen är störst för simuleringarna med koden SOFIE. Simuleringen med SOFIE utfördes utan takbjälkar.
- Den experimentella brandeffekten de första fem minuterna är lägre än den effekt som användes vid simuleringarna. Detta medför att samtliga simuleringar ger högre temperaturer än experimenten under de första minuterna. Vid senare tider är skillnaden mellan experiment och samtliga simuleringar av temperaturskillnader över 10°C vid termoelementträd 1 och 2 i samma storleksordning som de uppskattade experimentella mätfelen, dvs. 20 %.
- Vid temperaturskillnader under 10° C är avvikelsen i % större, men i de flesta mätpunkter mindre än 5° C.
- Det saknas viktig information som repeterbarhet, reproducerbarhet och initalvillkor för experimenten.

## 9. Referenser


1. "Smoke Copntrol in Large Scale Space", Tanaka T., Yamana T., Fire Science and Technology 5 No 1 (1985) 31-40
2. "Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE", Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
3. "Ceiling Jet Flows" Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.
4. "Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations", Ma,T.G., Quintiere J.G., Fire Safety Journal 38 (2003) 467-492
5. "Fire Plumes" Heskestad G., Chapter 2.1 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.

# Scenarium 4 - Affärslokal

## 1. Syfte

Affärer har ofta golven fyllda med olika typer av varor och hyllor med olika höjder. Entredörrarna är oftast stängda. Branden har vid en del inträffade bränder spridit sig snabbt och vanligtvis inte begränsats då sprinklersystem inte är så vanligt förekommande i denna typ av lokaler. Branden kan i vissa fall även bli underventilerad och börja producera stora mängder giftiga och siktnedsättande brandgaser. I det valda scenariet har branden tillåtits växa snabbt och ventilationen i lokalen har varit mycket begränsad. Det är känt att förbränningsmodellerna i de flesta CFD-koderna är utvecklade för att beskriva välventilerade bränder. Det råder därför stor osäkerhet om hur pass väl de simulerar underventilerade bränder.

## 2. Scenarium

Scenariet, där experimenten ingick som en del av projektet, bestod av ett stort rum som efterliknade en typisk affärslokal i skala 1:2, Fig.4.1. Scenariet finns detaljerat beskrivet i Ref.1. Simuleringarna avser den experimentella skalan och inte en fullskalig affär. Lokalen har dimensionerna 18 m × 7.5 m × 2.4 m. Inne i lokalen placerades 5 ställningar (0.2 m × 4 m × 1.8 m) som simulerade hyllor för varor. Mitt på båda kortväggarna fanns en öppning nära golvnivå 1/8 $m^2$ stor med botten av öppningen 0.05 m från golvet.

Två scenarier studerades,

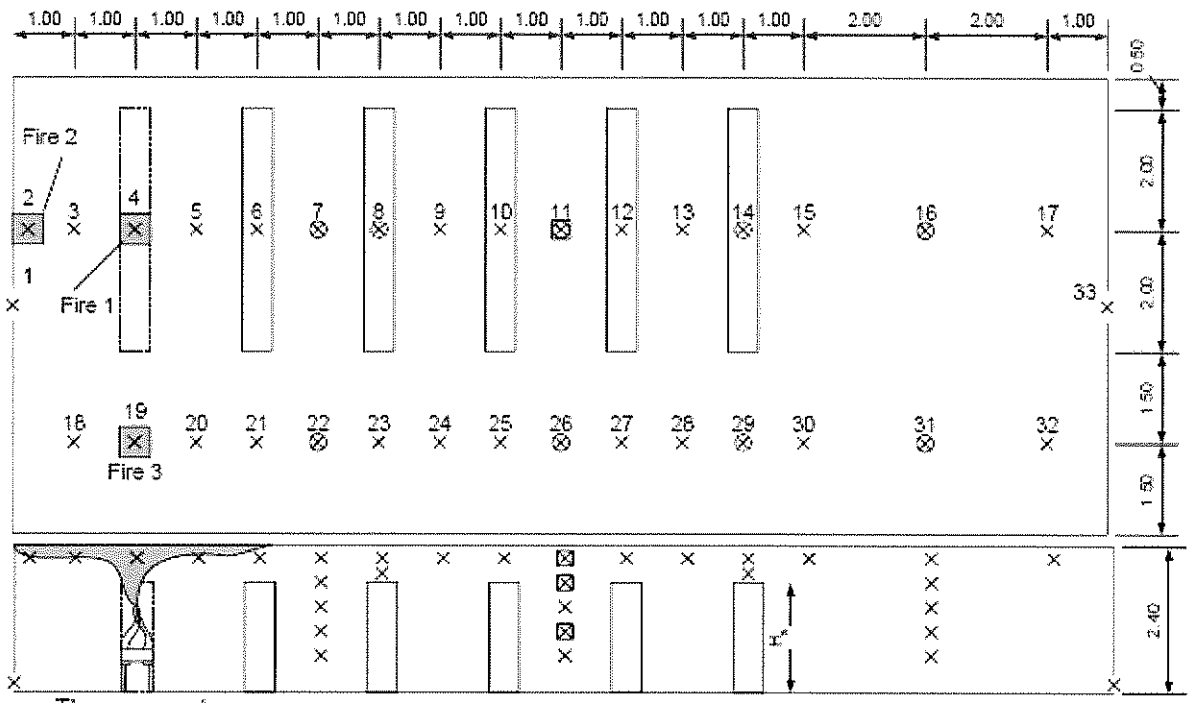
1. I fall 1 placerades branden i det öppna utrymmet mellan hylla nummer 6 i Fig.4.1 och ena kortväggen. Temperaturen i luftinflödet till SP's brandhall var 19.6°C och vätsketemperaturen10.8 °C.
2. I fall 2 placerades branden 5 cm från ena kortväggen. Temperaturen i luftinflödet till SP's brandhall var 18.5°C och vätsketemperaturen14.7°C.

Väggarna var gjorda av en trästomme som täcktes med 10 mm Promatect® H. Det mesta av taket bestod även 10 mm Promatect® H. 3.4 m av taket längst bort från branden var emellertid täckt av 6 mm gips över hela rummets bredd. Vidare var cirka 5 m av taket närmast branden skyddat av 20 mm Roxull isolering. Vägg och takmaterialet hade följande termiska egenskaper:

- Promatect® H: Täthet Density = 860 kg/m3. Värmeledningstal = 0.17 W/(m K) (20 °C) Värmeledningstal = 0.214 W/(m K) (200 °C) Värmeledningstal = 0.241 W/(m K) (400 °C) Värmekapacitivitet = 0.74 kJ/kg.K (20 °C) Värmekapacitivitet = 0.922 kJ/kg.K (200 °C) Värmekapacitivitet = 1.031 kJ/kg.K (400 °C)
- Gips: Täyhet= 910 kg/m3. Värmeledningstal = 0.22 W/(m K) Värmekapacitivitet = 1.09 kJ/kg.K
- Roxull isolering: Täthet = 180 kg/m3. Värmeledningstal = 0.039 W/(m K) = 0.79 kJ/kg.K

Lokalens golv bestod av ett tjockt betonglager. I fall 2 var även väggen (1.2 m × 2.4 m centrerad kring branden) bakom branden täckt av 20 mm isolering. Hyllorna var byggda av träställningar täckta med gips.

Lokalen Rummet var placerat i SP's stora brandhall. Brandhallen hade två stora aktiva inflöden på golvet och utflöde på hög höjd, 20 meter över golvet. Utflödet var anpassat till inflödet.




**Figur 4.1 Försökslokal med angivna positioner för mätutrustning.**

**Brandkälla**

En pöl med vätskeformig heptan utgjorde brandkällan. Pölen var 0.5 m × 0.5 m × 0.15 m och innehöll 15 liter heptan och 20 liter vatten vilket resulterade i ett fribord på 1 cm. Bränsleytan var placerad 0.62 m över golvnivå. Vid försöken mättes brandkärlets viktsminskning vilket utgjorde indata till simuleringarna. I Fig.4.2-3 visas viktsminskningen dvs. förångad bränslemängd som funktion av tiden för fall1 och 2.

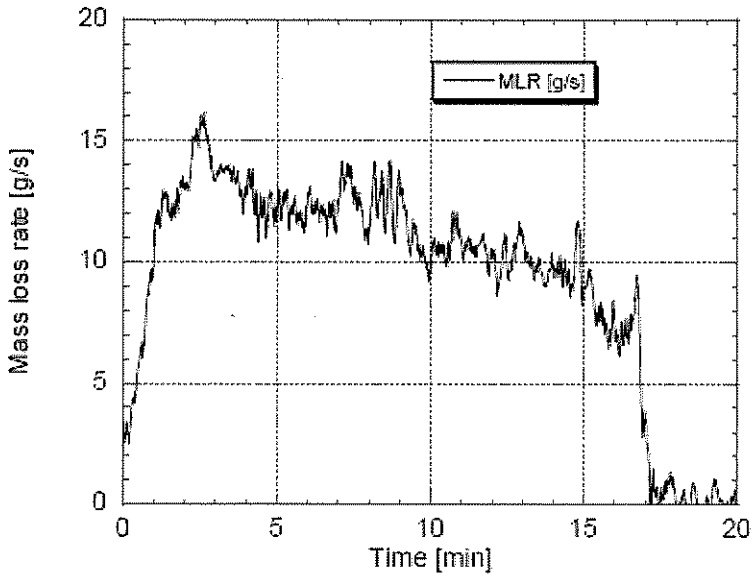



**Fig.4.2 Avbrinningshastighet i fall 1.**

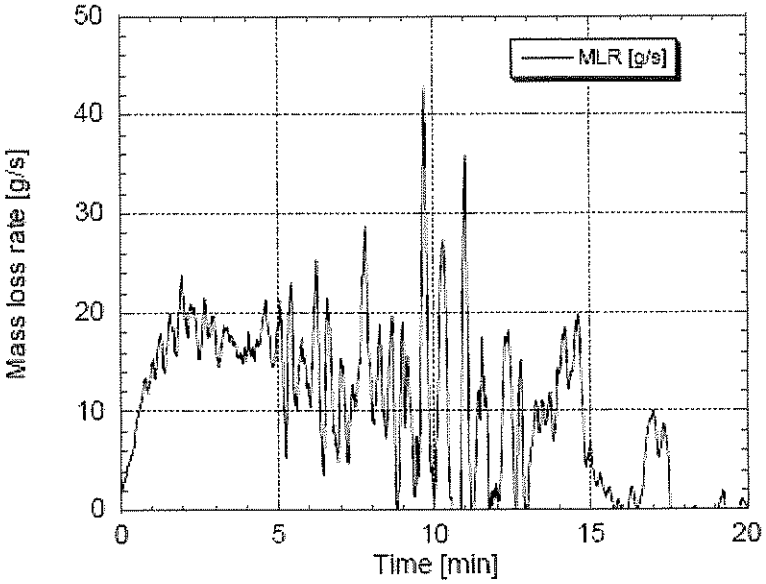



**Fig.4.2 Avbrinningshastighet i fall 2.**

Vid försöken tändes vätskepölen manuellt. Det medförde att en dörr, 0.8 m bred och 2 m hög, placerad på ena långväggen långt från branden, stod öppen när branden startade. Dörren stängdes 30 sekunder efter det att branden startat.

# 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

## Repeter- och reproducerbarhet

Experimentet, fall 1, har utförts två gånger på ett av SP´s laboratorium. Det saknas information om experimentets reproducerbarhet.

I Fig.4.3 redovisas repeterbarheten för temperaturen under taket i mätträd 17, långt från banden i fall1

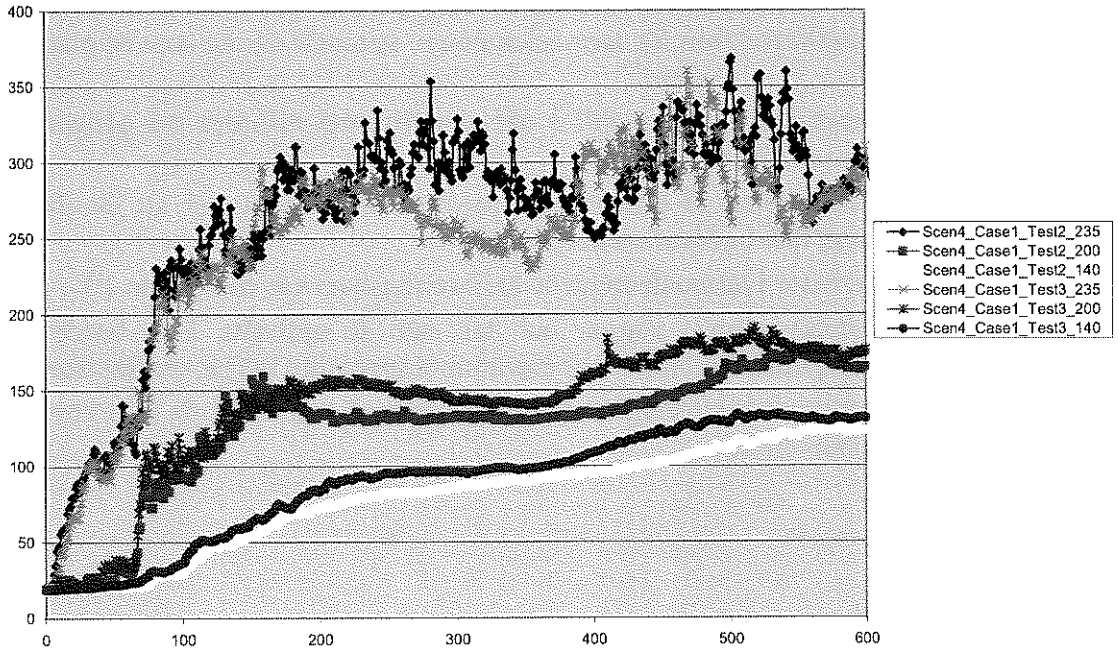



**Fig.4.3 Repeterbarheten av temperaturen mätt under taket vid mätträd 17.**

**Randvillkor**
Detaljer om geometrin och materialdata finns redovisade i Ref.1.
**Initialvillkor**
Detaljerad information om initial temperatur i brandrummet och temperatur i inflödet till SP's brandhall finns att tillgå i Ref.1. Det finns ingen mätning av initialtemperaturen för väggar och tak i brandrummet.
**Brandbeskrivning**
Bränslet var heptan med en uppmätt avbrinningshastighet. Osäkerheten i avbrinningshastigheten är svår att uppstatta. I fall 2 t.ex. varierar den från 0 till 44 g/s mellan 9-10 minuter efter det att branden startat, se Fif.4.3.
**Mätteknik**
Vid försöken mättes gastemperatur med termoelement placerade på vertikala termoelementträd, under taket. Termoelementen var i alla mätpunkter 0.25 mm tjocka. Viss uppgift finns om strålningskorrektionen för termoelementen. I rummets små öppningar mättes även gashastigheten med bi-directional pitotrör och ett termoelement. Bi-directional pitotrör har ett felaktigt vinkelberoende [2] och mäter inte normalkomponenten av hastigheten på rätt sätt när strömningsriktningen är skild från normalriktningen. Tryckskillnaden över pitotrören för gashastigheter under 0.5 m/s är dessutom mindre än 0.15 Pa vilket medför stor osäkerhet i tryckmätningen. Vid försöken mättes även tryckskillnaden mellan lokalen och SP's brandhall.

**Sammanfattning avseende mätfel och scenarioosäkerhet**
Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- Att onoggrannheten i mätningarna av avbrinningshastigheten och uppgiften om bränslets förbränningseffektivitet resulterar i en osäkerhet i effektutvecklingen som är svår att uppskatta. Speciellt stor är osäkerheten i mätningen av avbrinningshastigheten i fall 2 vid tider efter 4 minuter. En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, med 30 % motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [3] en osäkerhet i temperaturstegringen på ($\Delta T$ -- $Q^{2/3}$) 21%. Osäkerheten i mätning av temperaturer påverkas även av avsaknaden av strålningskorrektion för termoelementen, speciellt för de som är placerade nära branden.
- Att temperaturmätningen i fall 1 där experimentet utfördes två gånger visade på variationer på 20% (Fig.4.3).
- Att mätosäkerheten på effektutvecklingen i fall 2 är så stor att jämförelser med simuleringar inte bedöms meningsfulla.
- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att initialtemperatur i väggar och tak inte är uppmätt. Den borde rimligtvis påverka temperaturförloppet i brandrummet speciellt i början av försöket.
- Att mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel då de inte korrigerats för sitt vinkelberoende.

## 4. Simuleringar

I tabell 4A.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien.

**Tabell 1A.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| **Mjukvara** | **CFX-4.4** | **FDS 4.07** | **SMAFS 5.01*** | **SOFIE 3.0** |
|---|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | | |
| Dator CPU | Intel Pentium4 | Intel Pentium 4 | 10st ADM opteron | Intel Pentium 4 |
| Klockfrekvens GHz | 2 | 3.4 | 2.2 | 3.2 |
| RAM GB | 1 | 2 | | 2 |
| Antal processorer | 1 | 1 | 6 | 1 |
| **Simulering** | | | | |
| Operatör | Bengt. Hägglund | Göran Holmstedt | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| Gridstorlek fall1 | 720.000 | 618.096 | 643.568 | 140 300 |
| Gridstorlek fall2 | ----- | 618.096 | 643.568 | |
| Gridförtätning | Nej | Ja | | Ja |
| Symmetriplan | Nej | Nej | | Nej |
| Tidssteg sek | 1 och 2 | Default | Varierar | 1 |
| Beräkningstid Timmar fall1 | 36 | 73.5 | 60 | 206 |
| Beräkningstid Timmar fall2 | ----- | 73.5 | 60 | |
| Mass tolerans | $10^{-6}$ | Default | $10^{-6}$ | $10^{-3}$ |
| Modellval | | default | | |
| Typ av code | RANS | LES | RANS | RANS |
| Turbulens | k-ε | Smalgorinsky | k-ε | k-ε |
| Strålning | Ingen | Default | | DTRAM 16 ray |
| Brand | Heat source | Default | | Eddy Break-up |
| Tid att uppnå full effekt, sek | | 1 | | |
| Reduc effekt % | 35 | 35% rad. fraction | 0 | 0 |
| Sotfraktion | 0.03 | 0.015 | | 0.03 |
| Konvektion | Default | Default | | Default |

## 5. Översiktlig jämförelse mellan simuleringarna

I Fig.4.4 – 4.18 visas den simulerade temperaturfördelningen för samtliga koder i ett vertikalt snitt mitt i rummet 0.5, 1, 2.5, 5, och 10 minuter efter det att branden startade. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder.

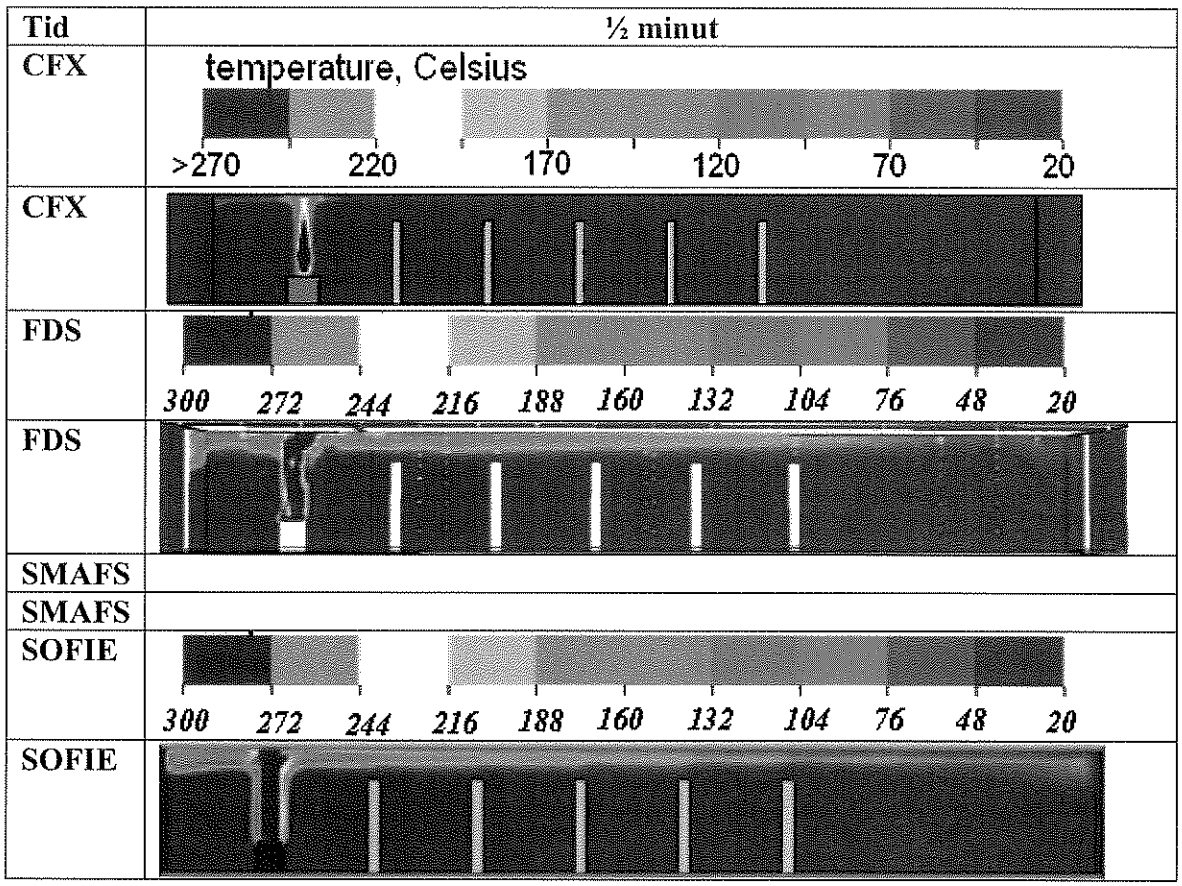



**Fig 4.4 Vertikal temperaturfördelning genom branden (Träd 2-17).**

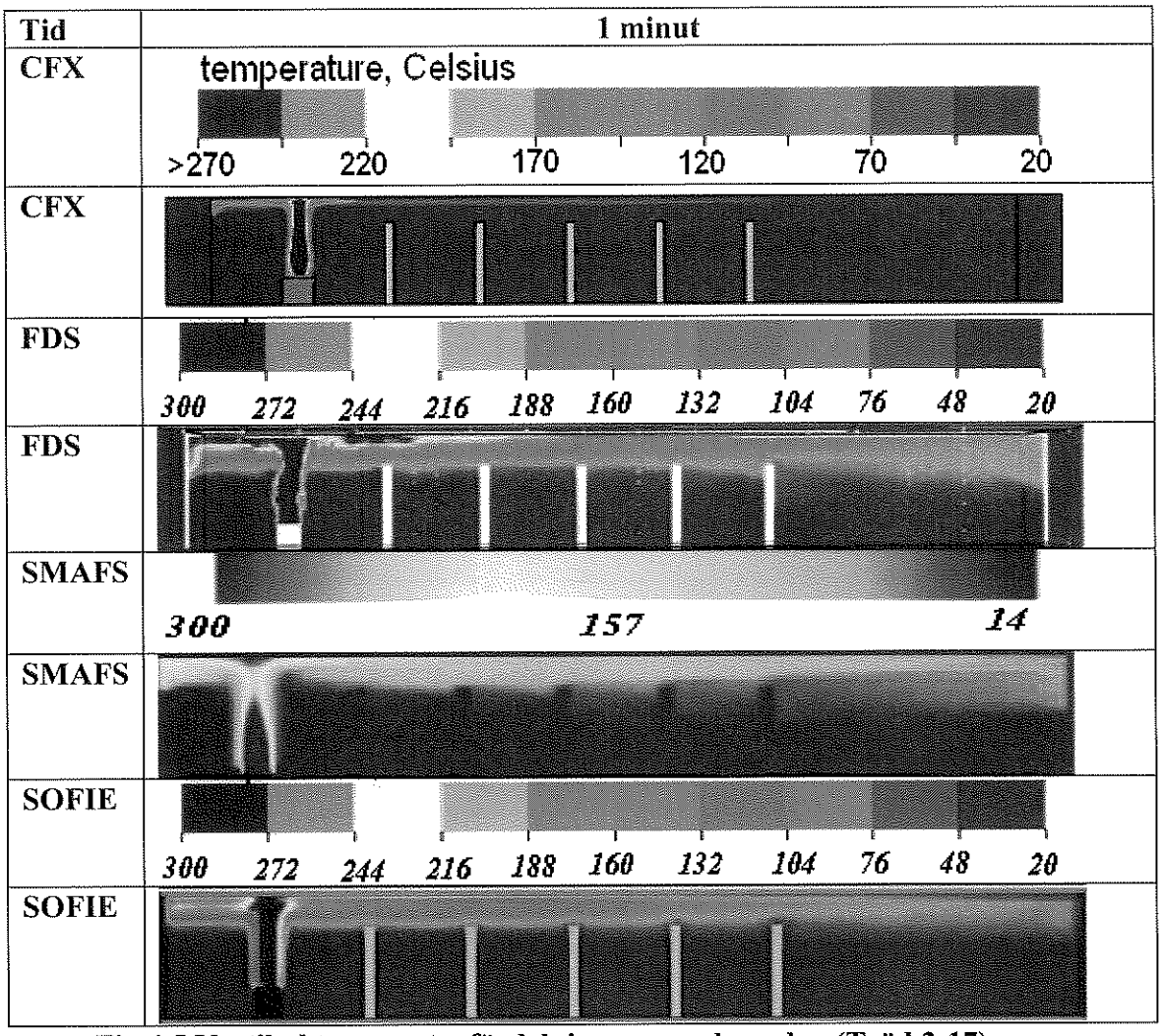



**Fig 4.5 Vertikal temperaturfördelning genom branden (Träd 2-17).**

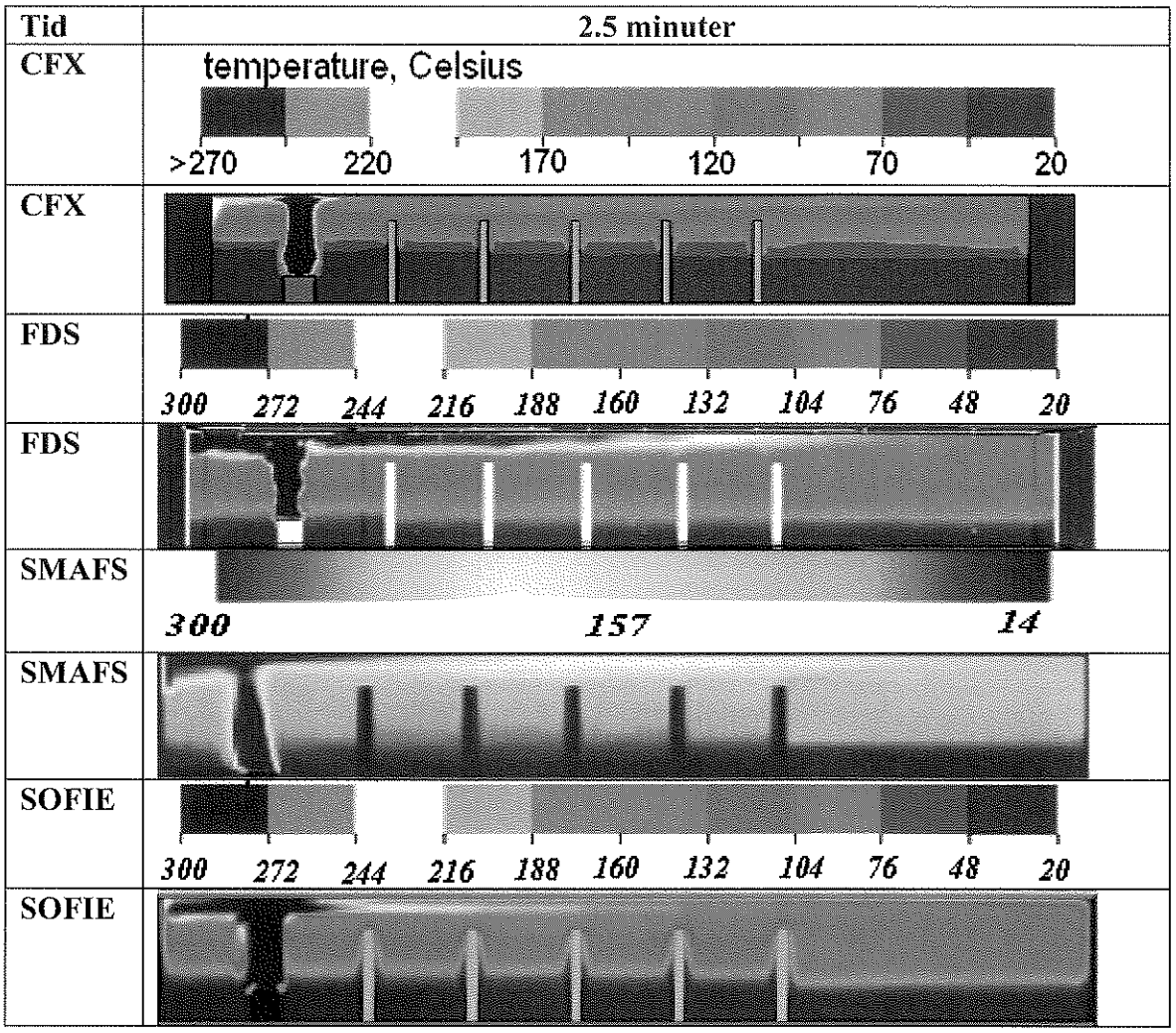



**Fig 4.6 Vertikal temperaturfördelning genom branden (Träd 2-17).**

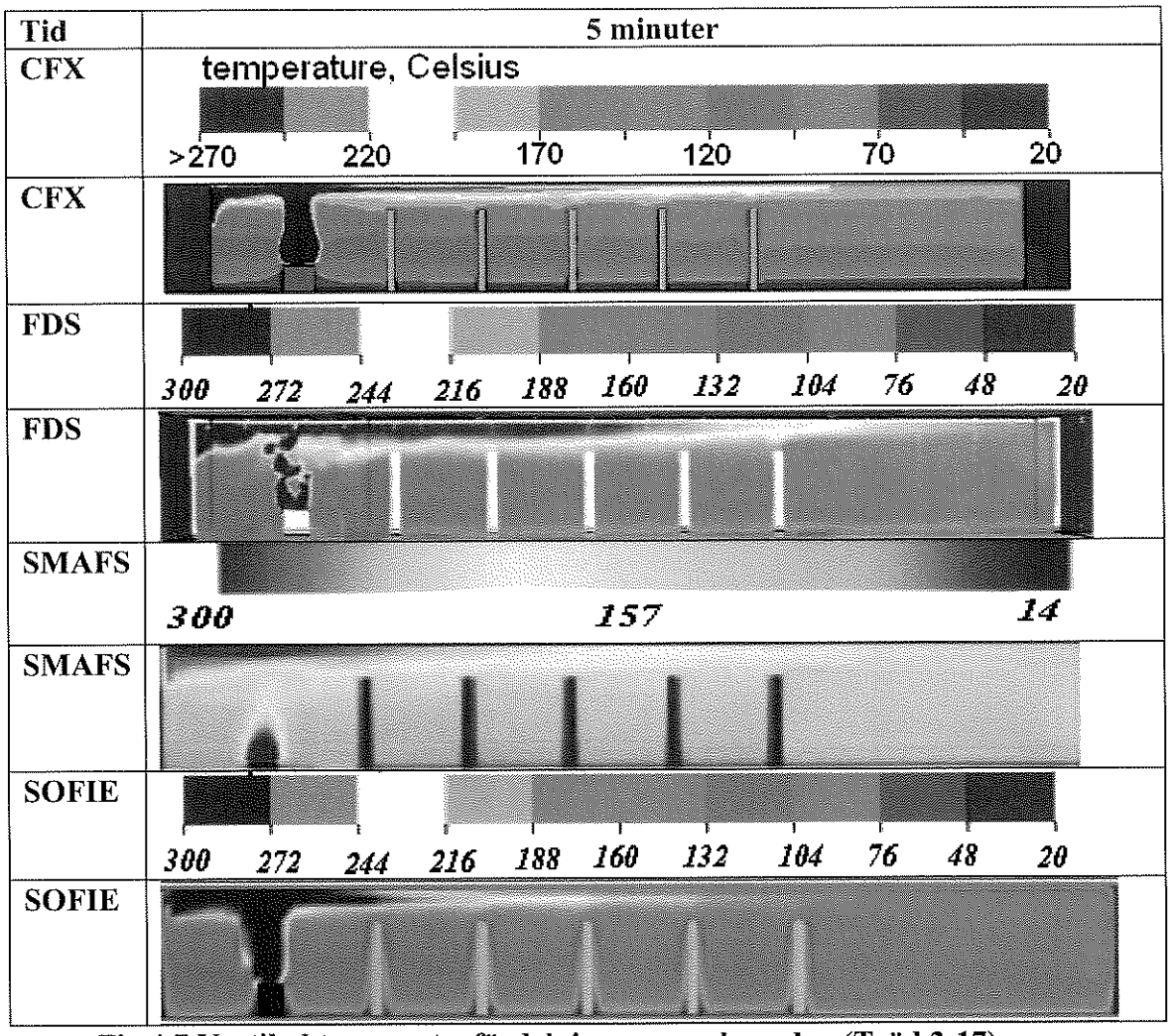



**Fig 4.7 Vertikal temperaturfördelning genom branden (Träd 2-17).**

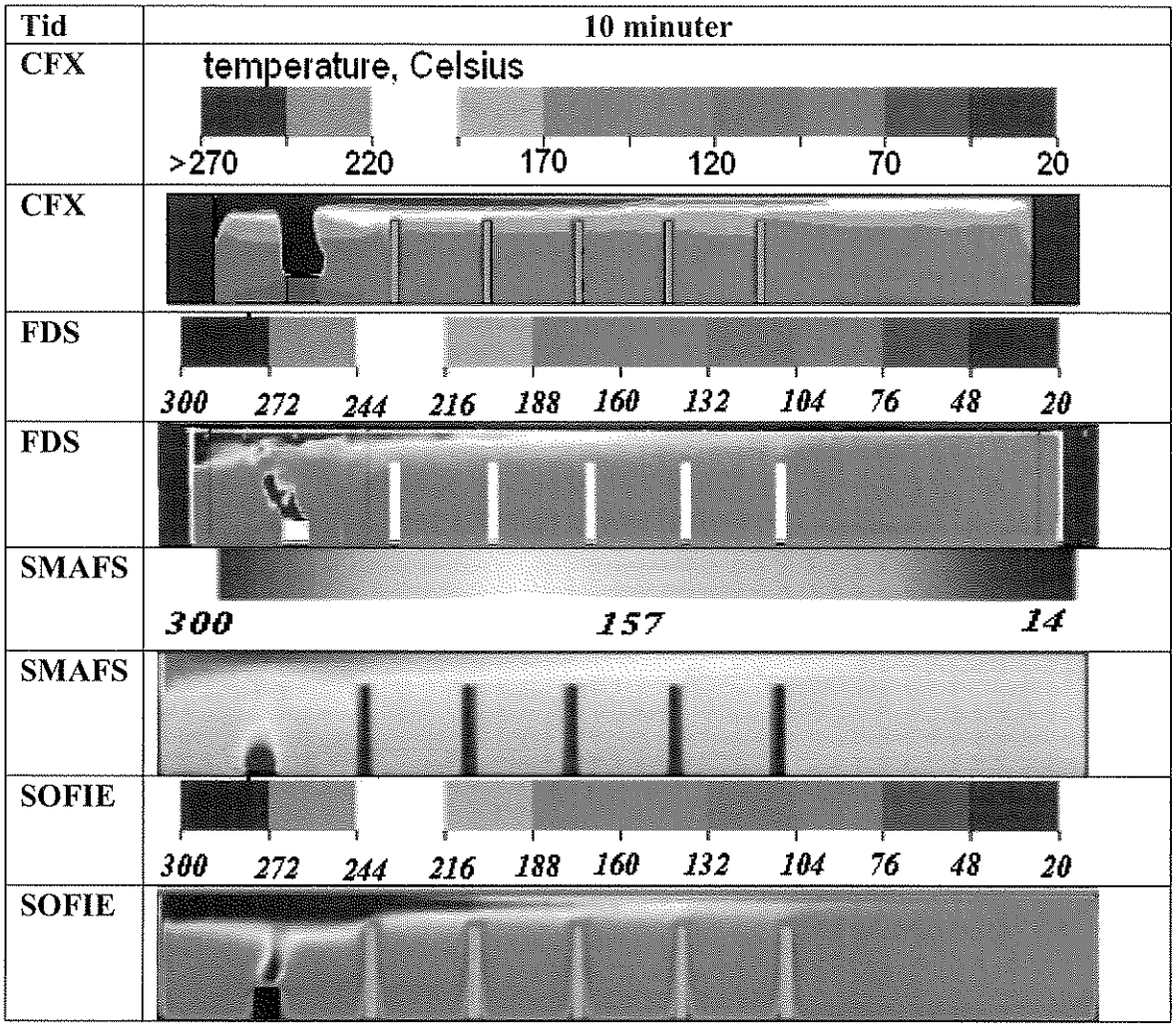



**Fig 4.8 Vertikal temperaturfördelning genom branden (Träd 2-17).**

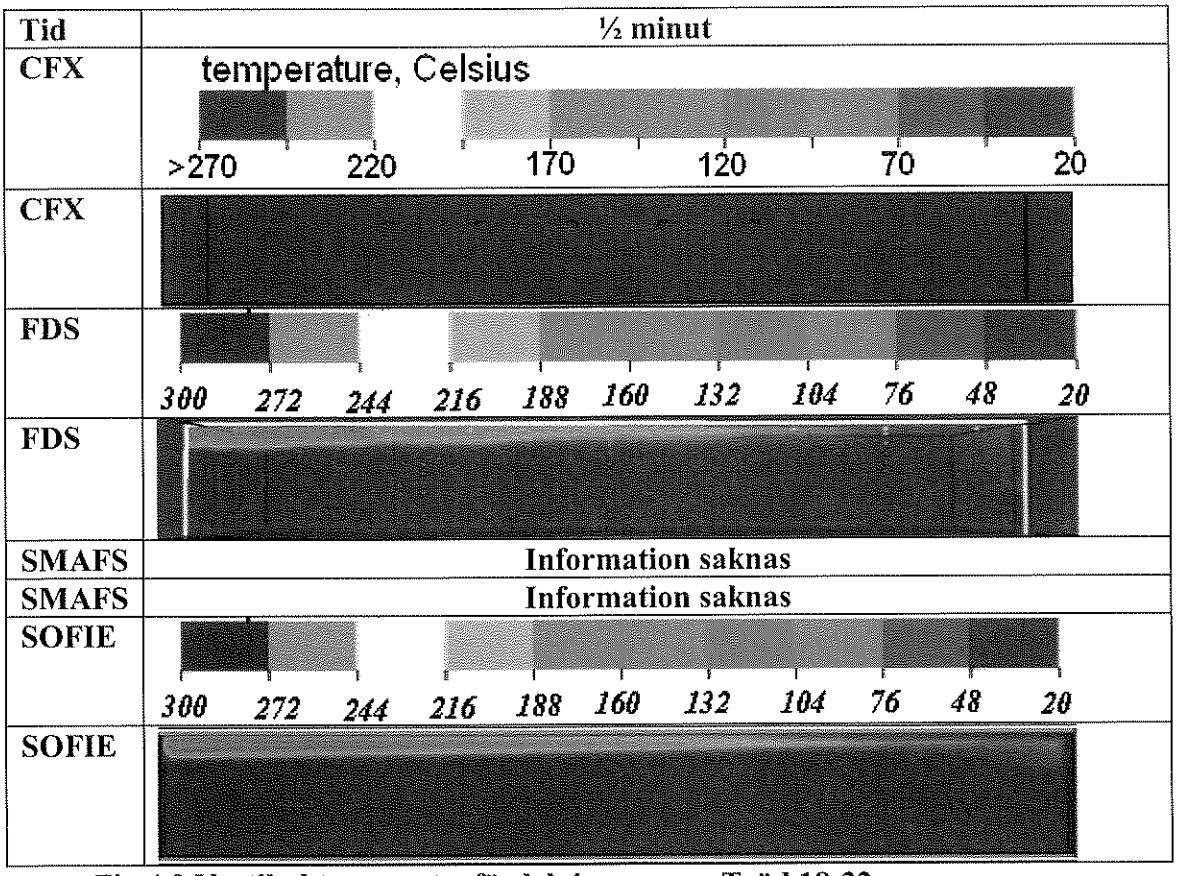



**Fig 4.9 Vertikal temperaturfördelning genom Träd 18-32.**

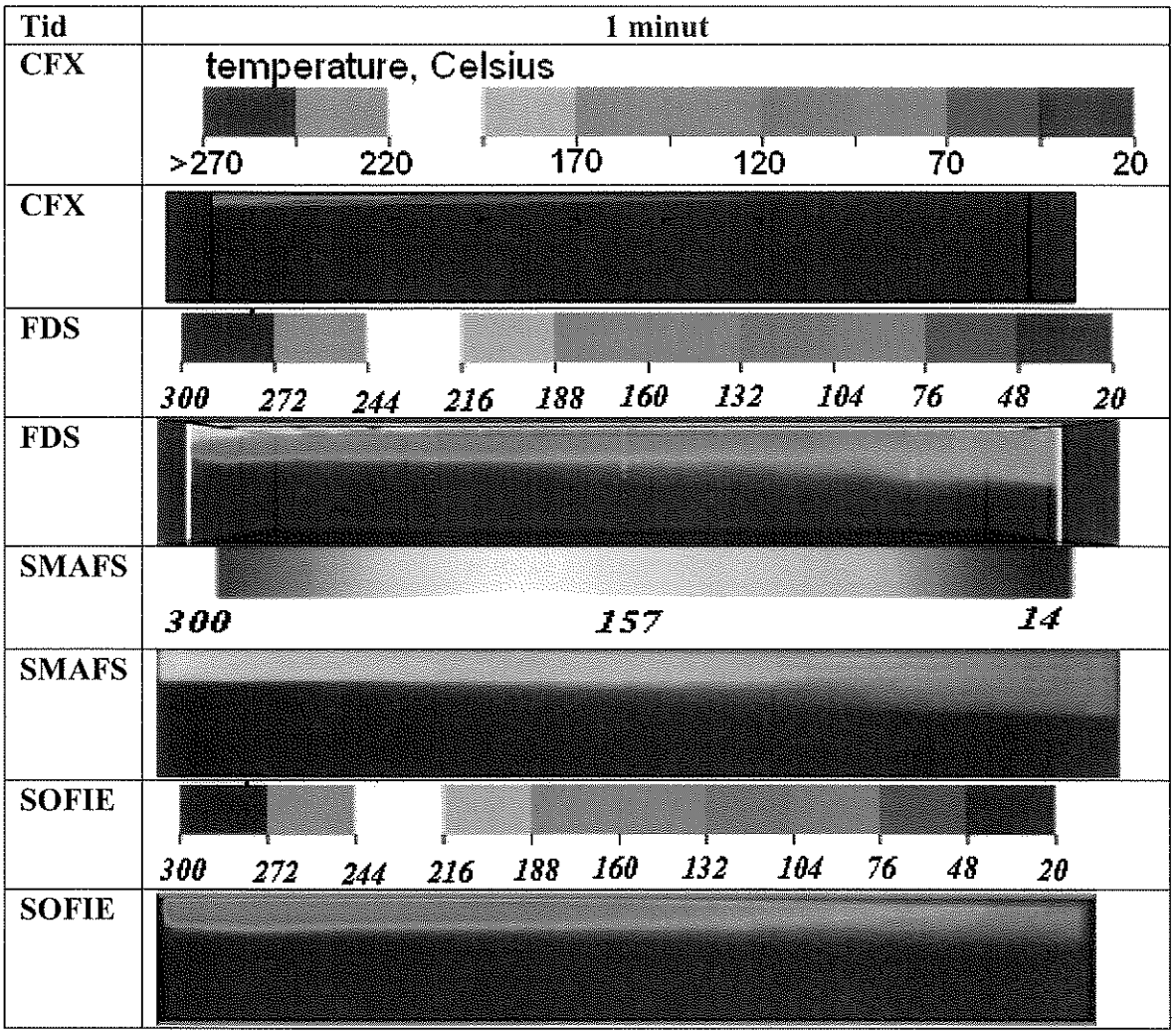



**Fig 4.10 Vertikal temperaturfördelning genom Träd 18-32.**

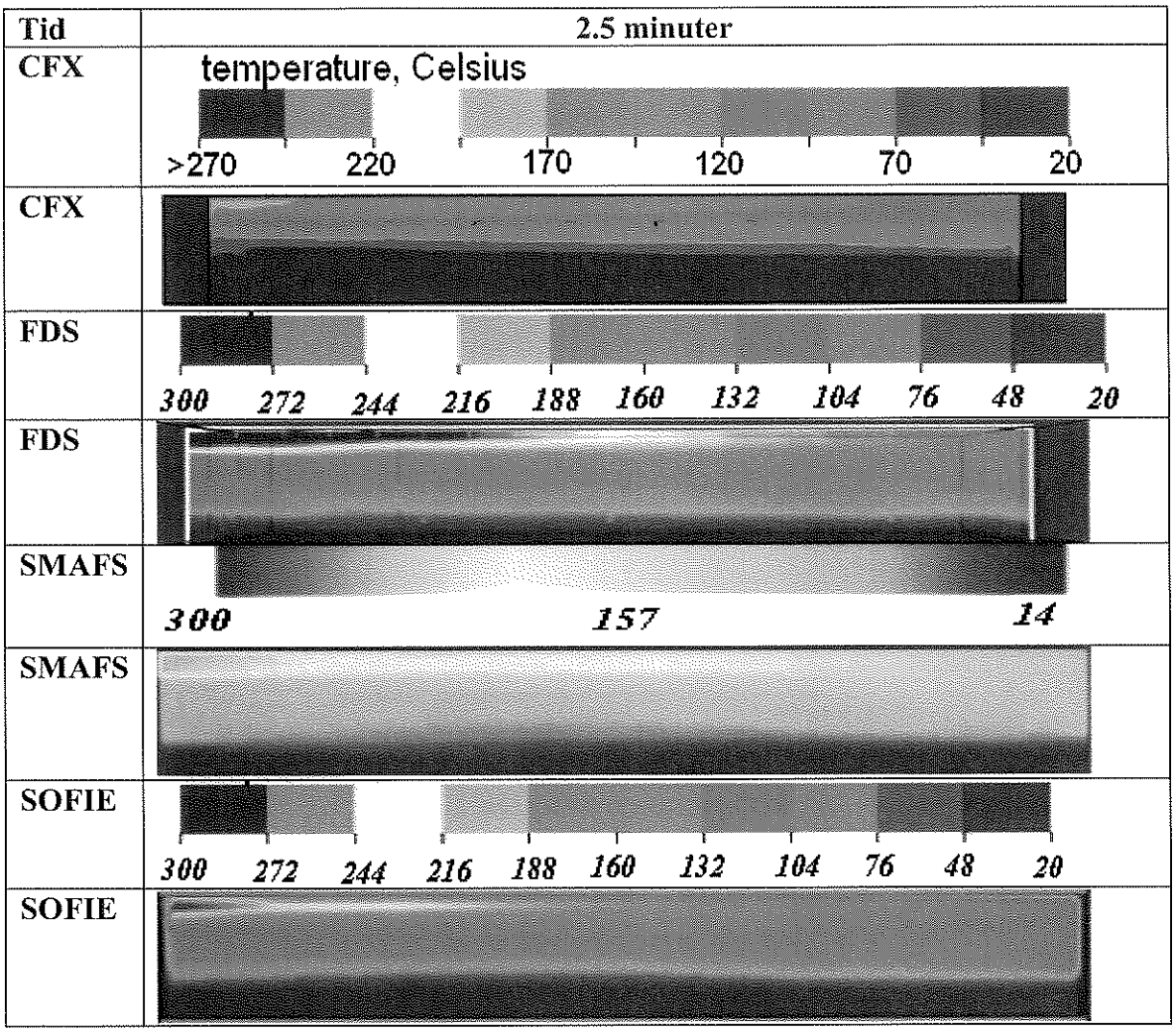



**Fig 4.11 Vertikal temperaturfördelning genom Träd 18-32.**

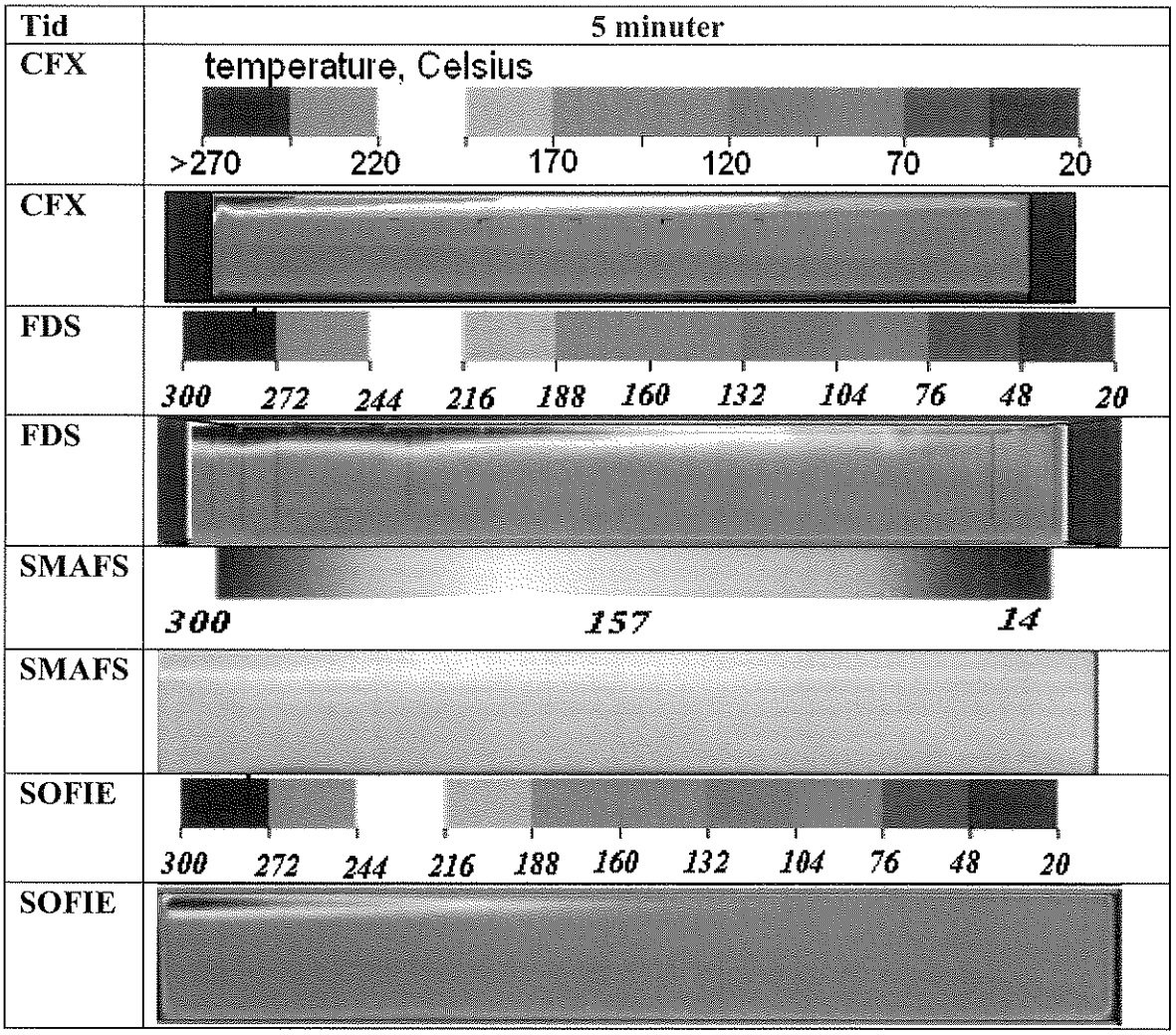



**Fig 4.12 Vertikal temperaturfördelning genom Träd 18-32.**

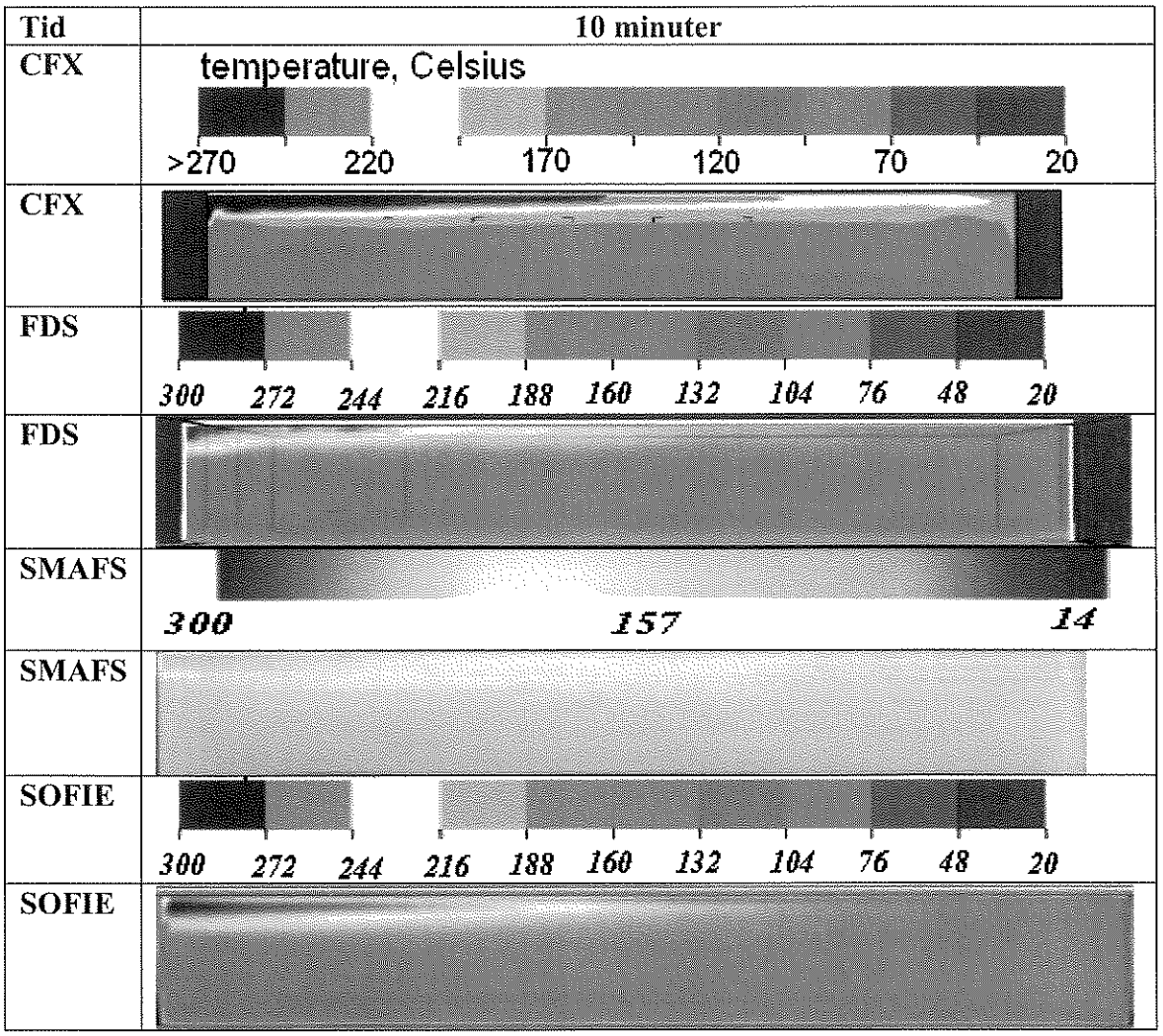



**Fig 4.13 Vertikal temperaturfördelning genom Träd 18-32.**

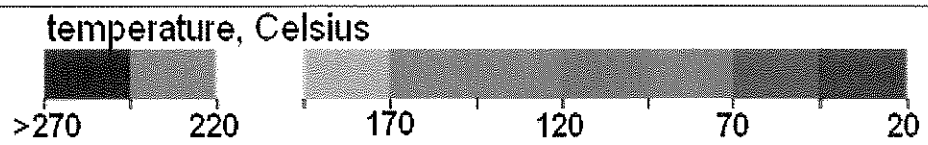
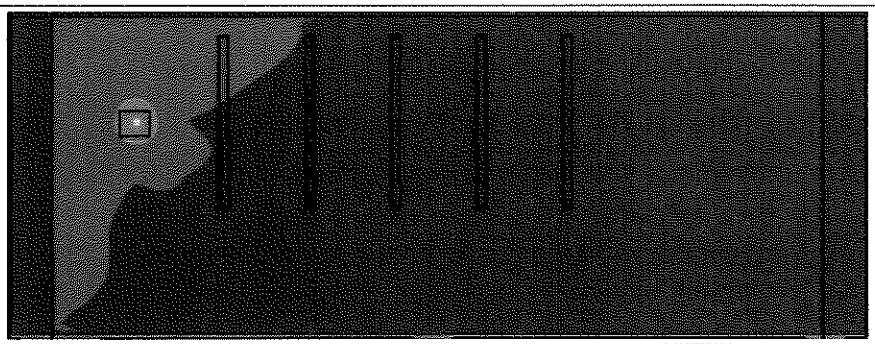
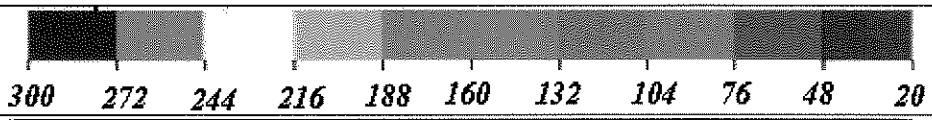
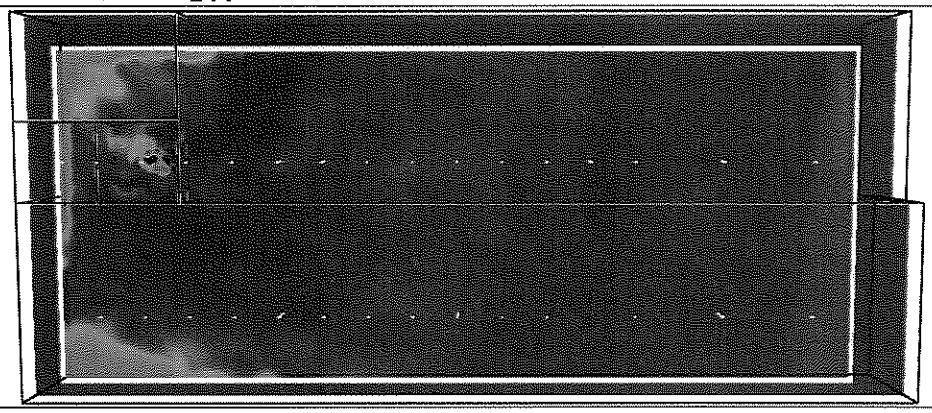
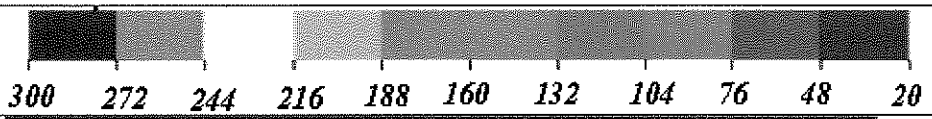
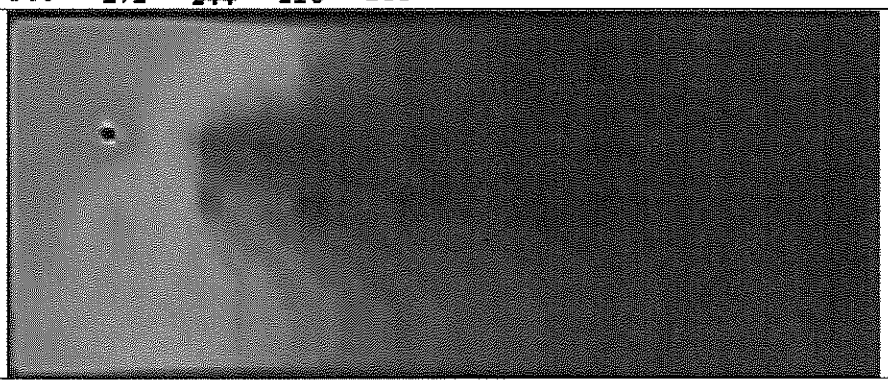
| Tid | ½ minut |
|---|---|
| CFX |   |
| CFX |  |
| FDS |   |
| FDS |  |
| SMAFS | Information saknas |
| SMAFS | Information saknas |
| SOFIE |   |
| SOFIE |  |

**Fig 4.14 Horisontell temperaturfördelning 10 cm under taket (15 cm för SOFIE).**

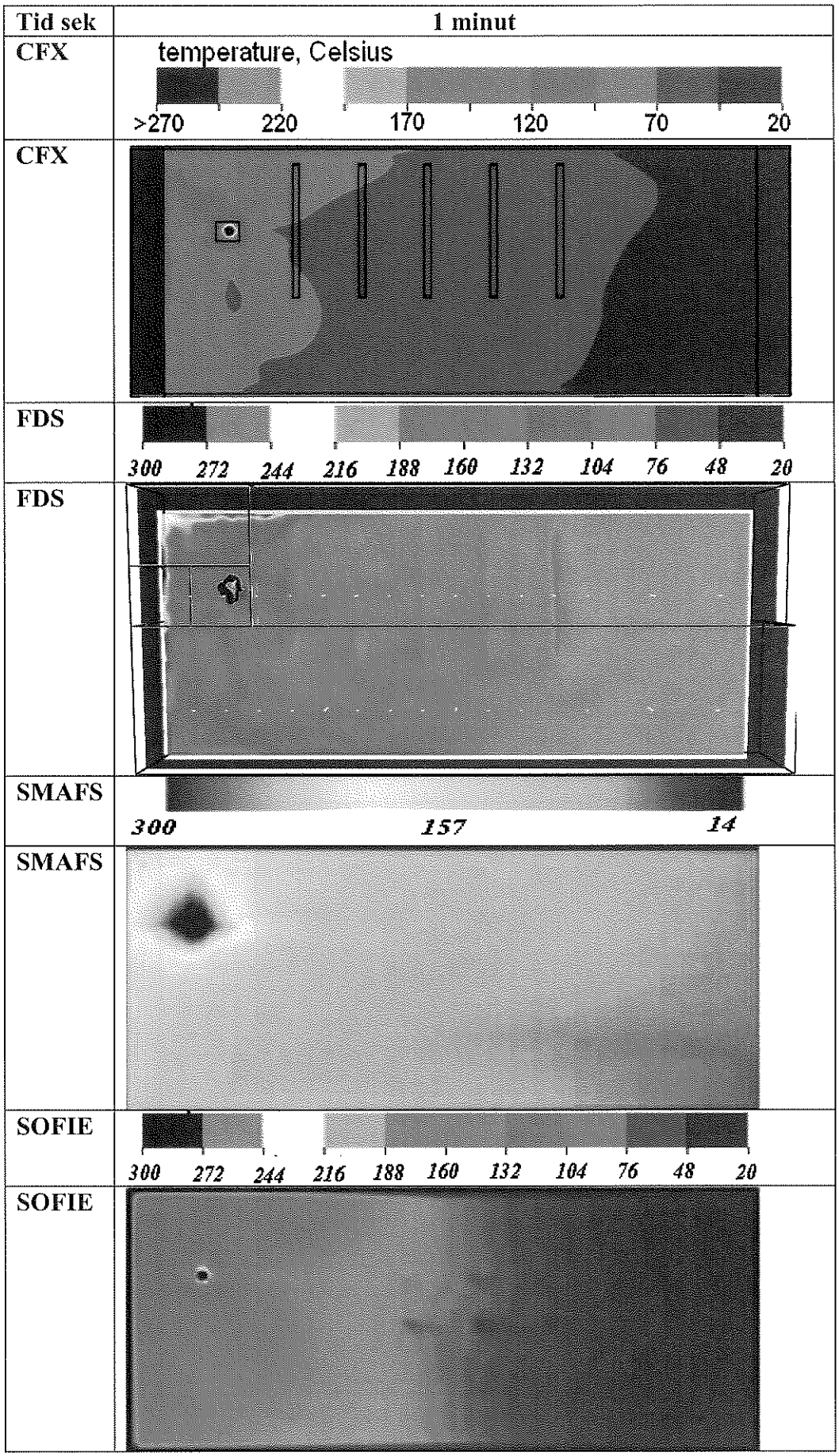



**Fig 4.15 Horisontell temperaturfördelning 10 cm under taket (15 cm för SOFIE).**

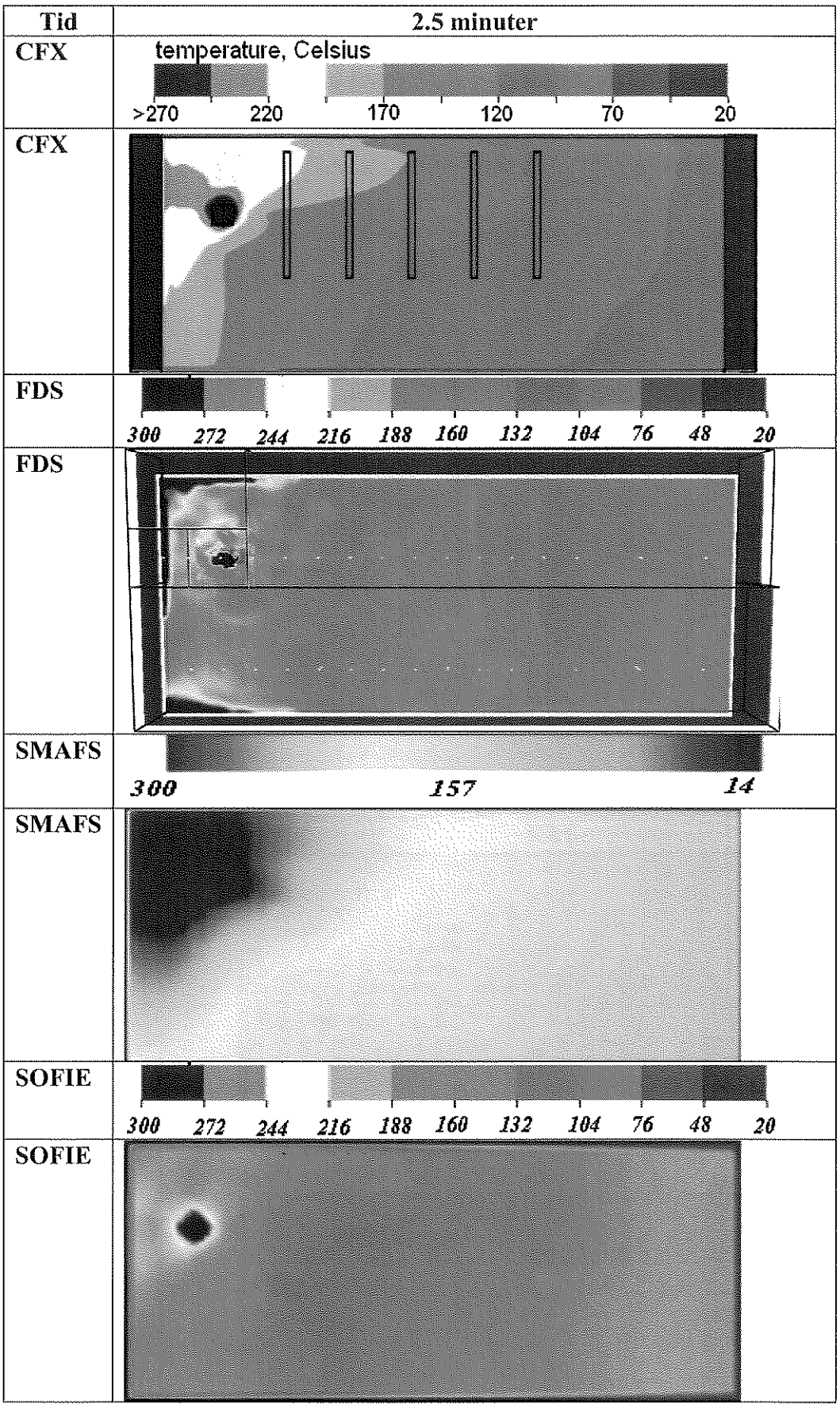



**Fig 4.16 Horisontell temperaturfördelning 10 cm under taket (15 cm för SOFIE).**

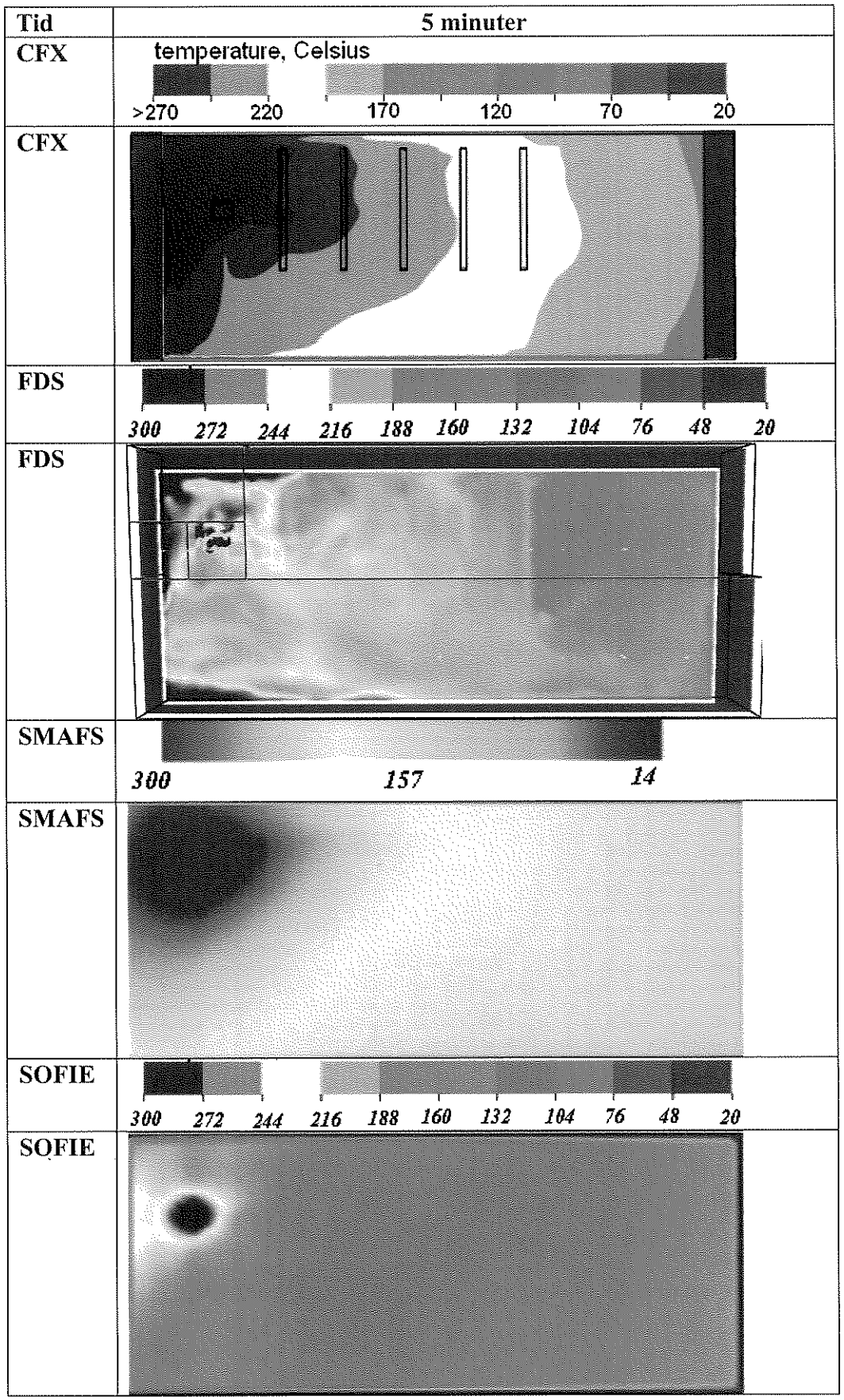



**Fig 4.17 Horisontell temperaturfördelning 10 cm under taket (15 cm för SOFIE).**

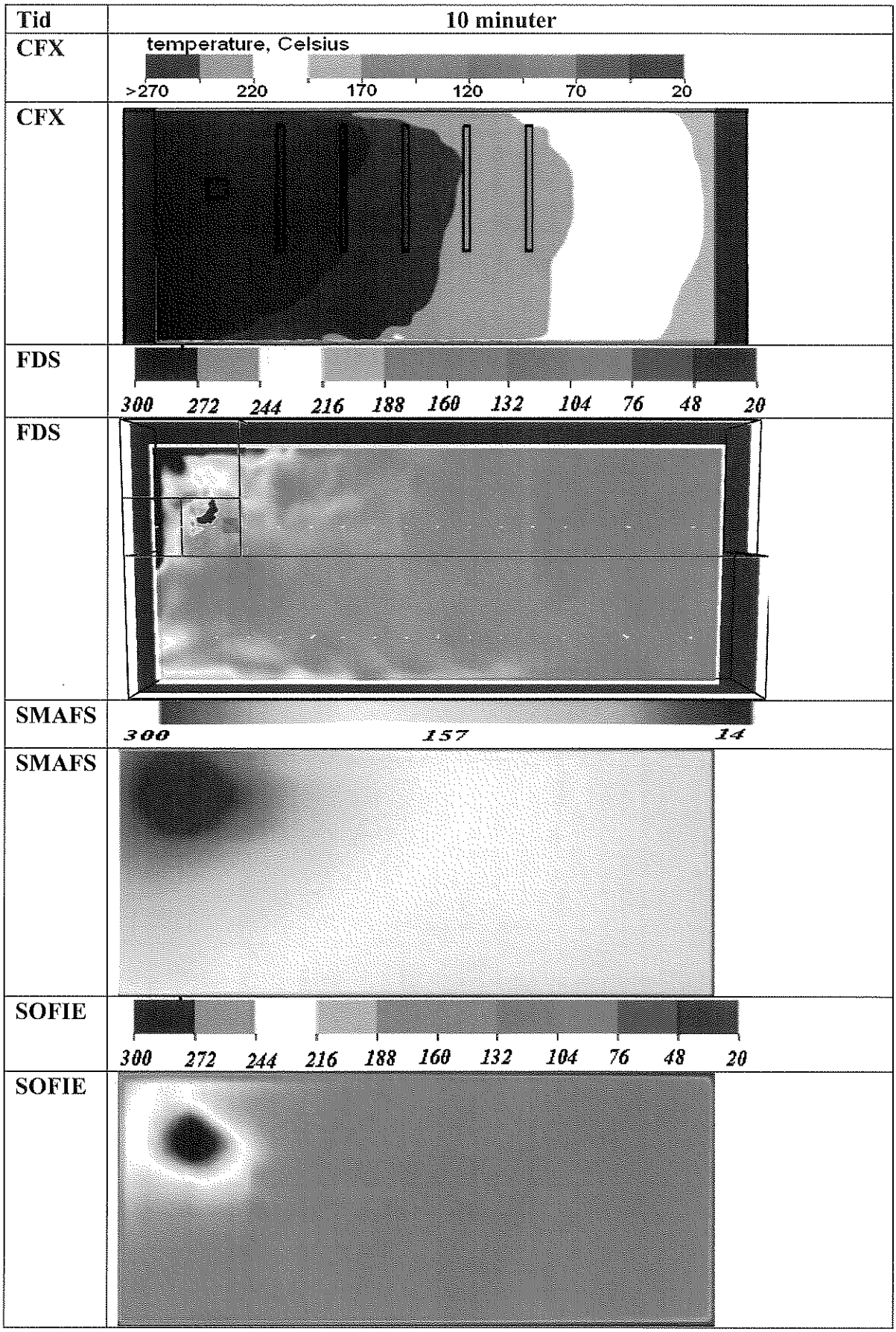



**Fig 4.18 Horisontell temperaturfördelning 10 cm under taket (15 cm för SOFIE).**

# 6. Detaljerad jämförelse mellan simuleringar ar och experiment

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har störst betydelse är osäkerheten i avbrinningshastigheten (effektutvecklingen) och strålningskorrektionen för termoelementen.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. För fall 1 var repeterbarheten av temperaturmätningarna cirka 20%. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

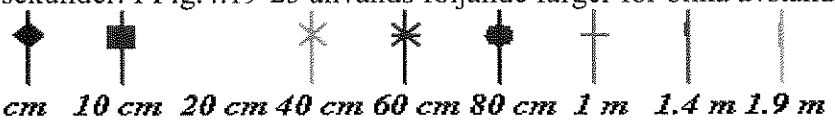
Simuleringarna är även behäftade flera olika felkällor:

- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafilen dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

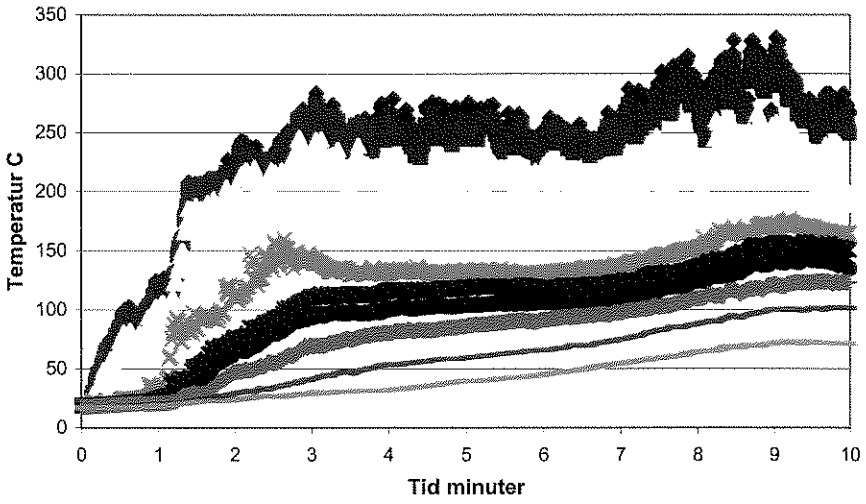
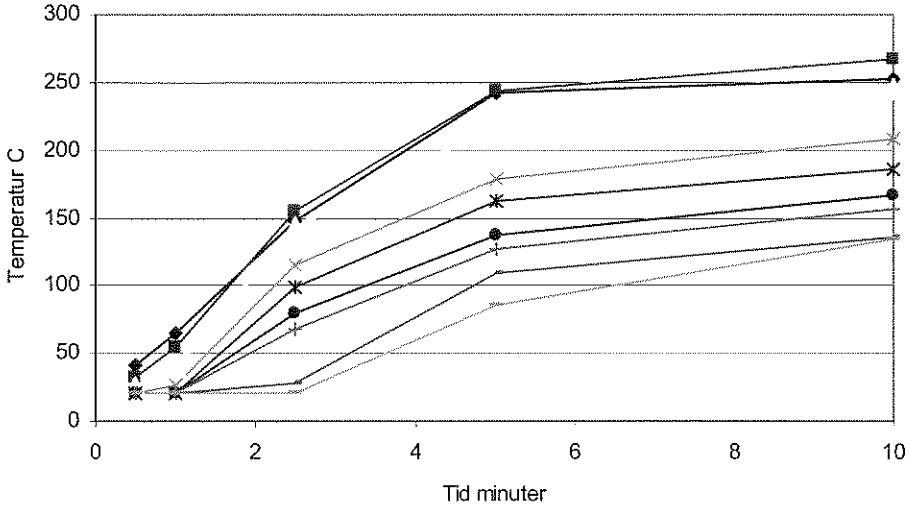
- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX, FDS och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I och i det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd enligt rekommendationer i en vetenskaplig artikel [4]. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet och ytterligare fördubblats utanför brandrummet. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

I Fig.4.19 – 23 visas experimentellt uppmätt temperatur utan strålningskorrektion och simulerad temperatur för samtliga koder i sex vertikala termoelementträd för tider upp till 10 minuter efter antändning av bålet. För FDS-koden redovisas tidsmedelvärdet över 10 sekunder. I Fig.4.19-25 används följande färger för olika avstånd under tak:




Vid jämförelserna i figurerna redovisa inte det experimentella mätfelet som uppskattas till cirka 20%. Osäkerheten i simuleringarna på grund av modeller, scenarium och operatör kan inte separeras utan utgör avvikelse från det experimentella värdet.

I Fig.4.24 visas visibiliteten mitt i lokalen vid mätträd 11 för avstånden 5, 20 och 80 cm under taket.
Mätningar av gashastighet är behäftade med mätfel som är svåra att kvantifiera. Kvantitativa jämförelser mellan experimentellt uppmätta hastigheter och simuleringar görs därför inte i denna rapport.

| Kod | Termoelementträd 7 3m från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

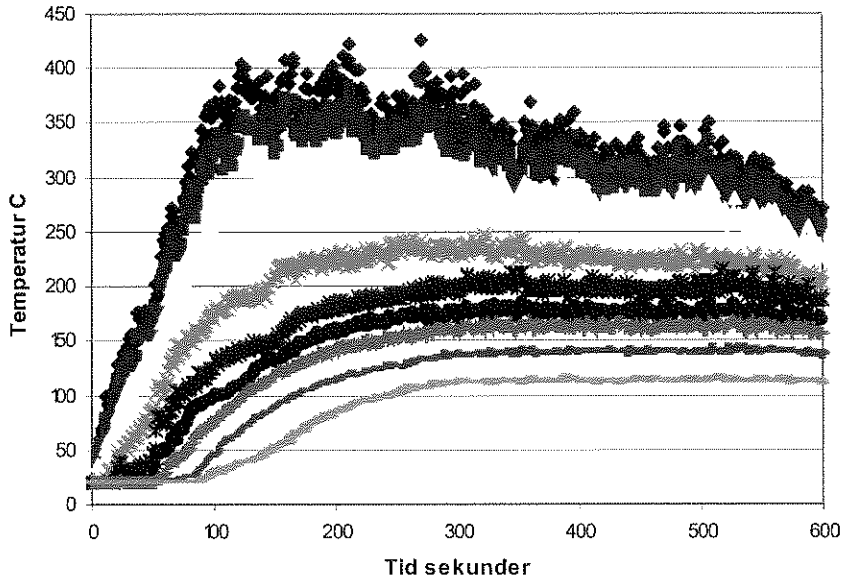
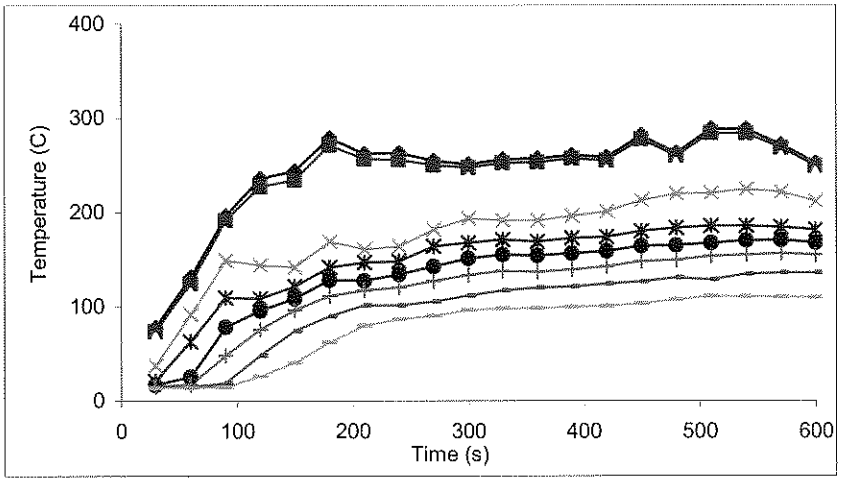
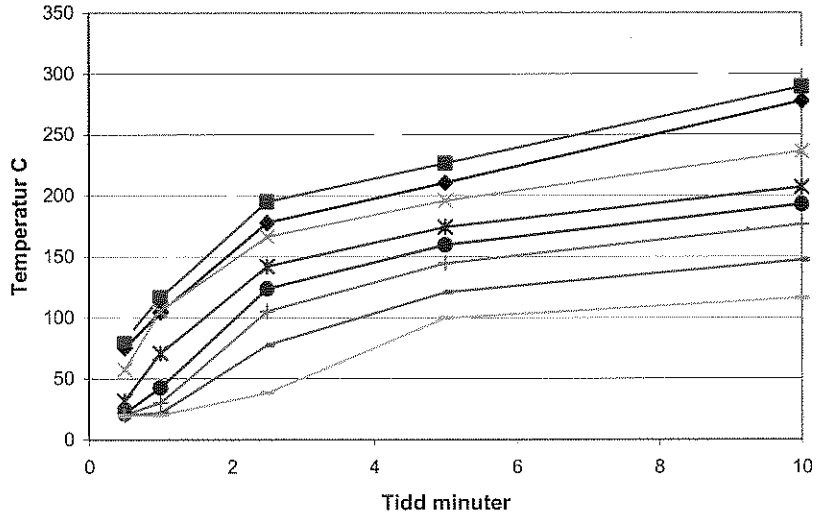
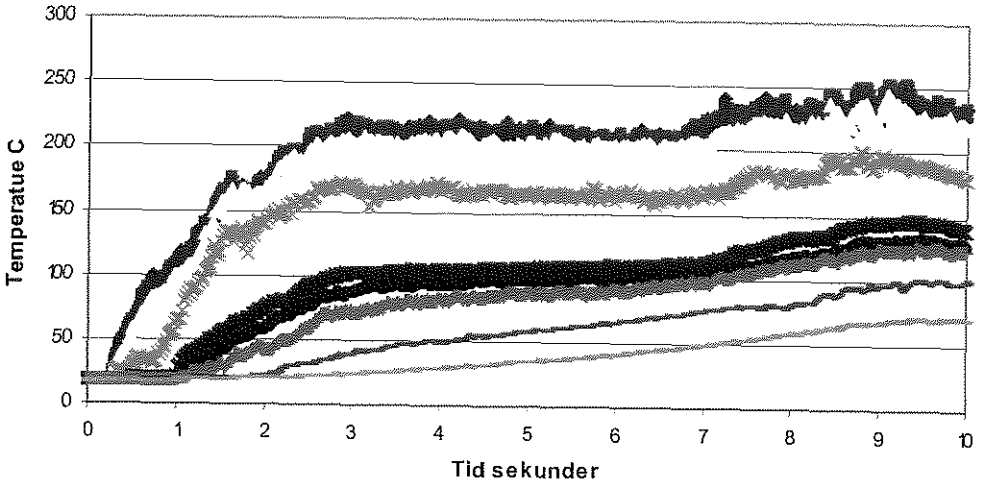
| Kod | Termoelementträd 7 3m från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.19 vertikal temperaturfördelning vid träd 7.**

| Kod | Termoelementträd 11 7m från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX | Utskrift saknas |

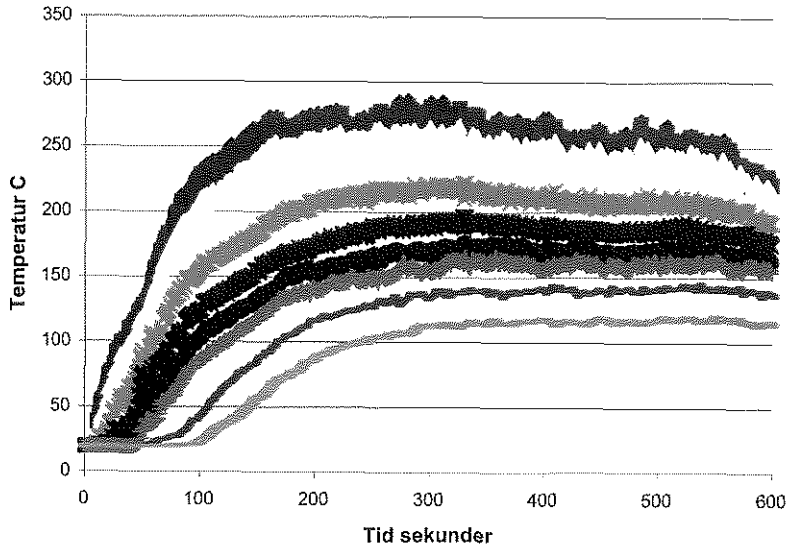
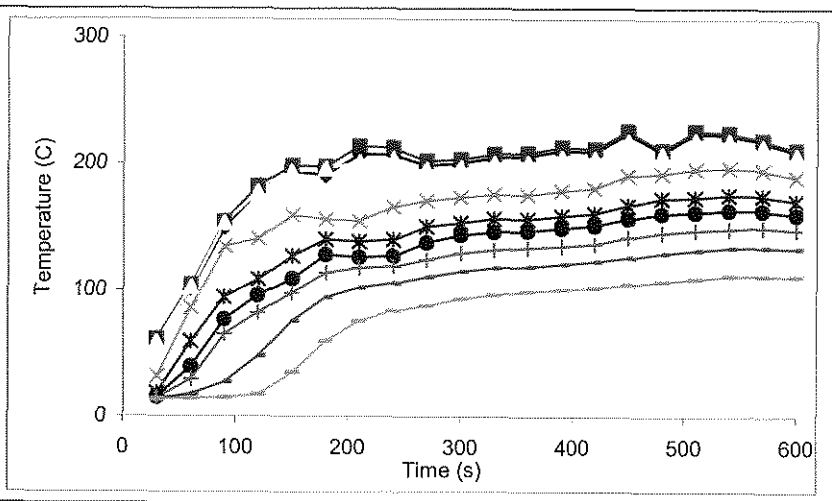
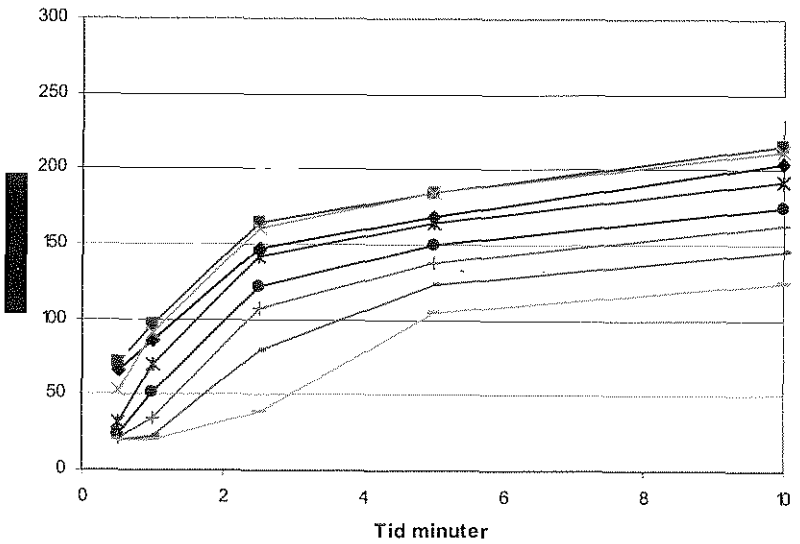
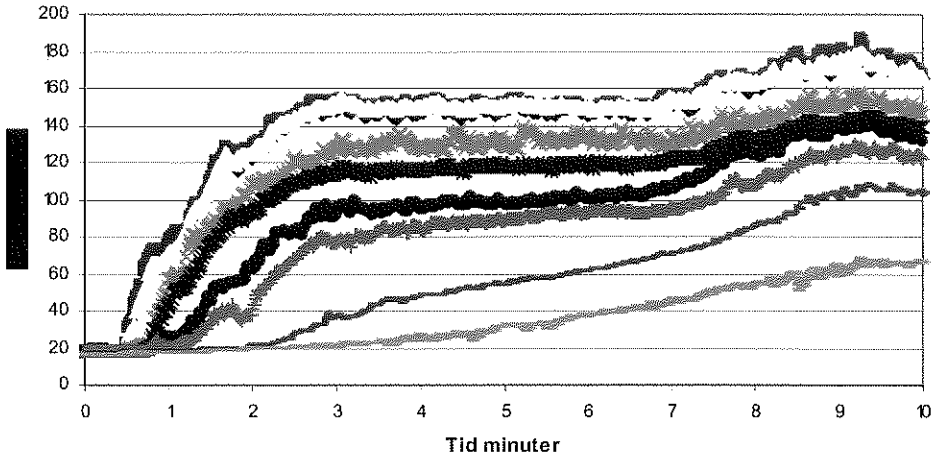
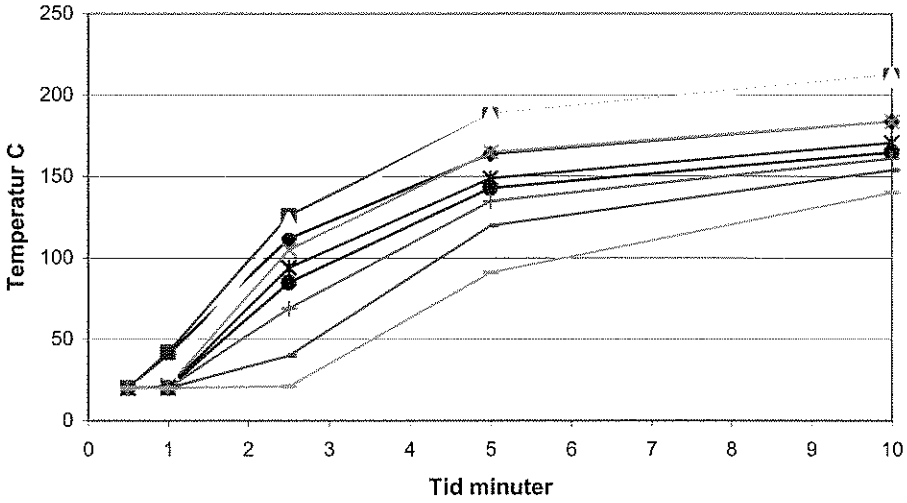
| Kod | Termoelementträd 11 7m från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.20 vertikal temperaturfördelning vid träd 11.**

| Kod | Termoelementträd 16 13m från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

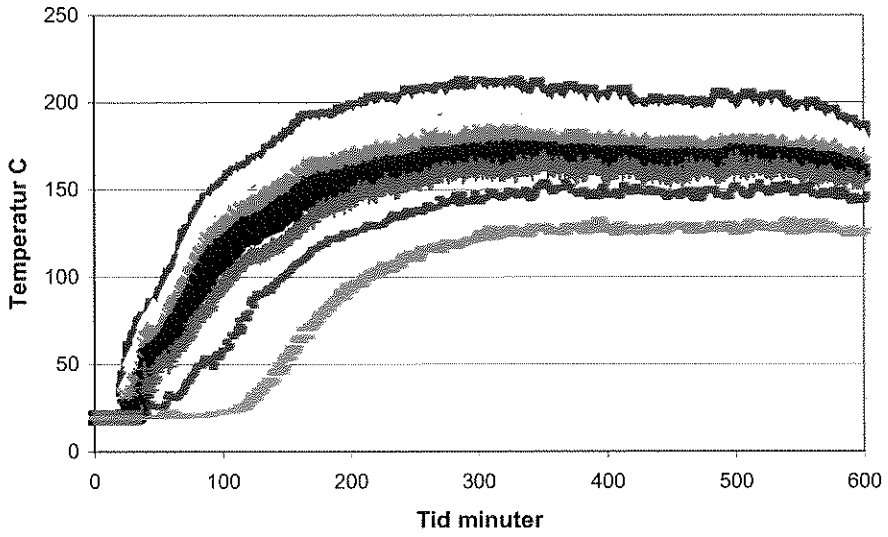
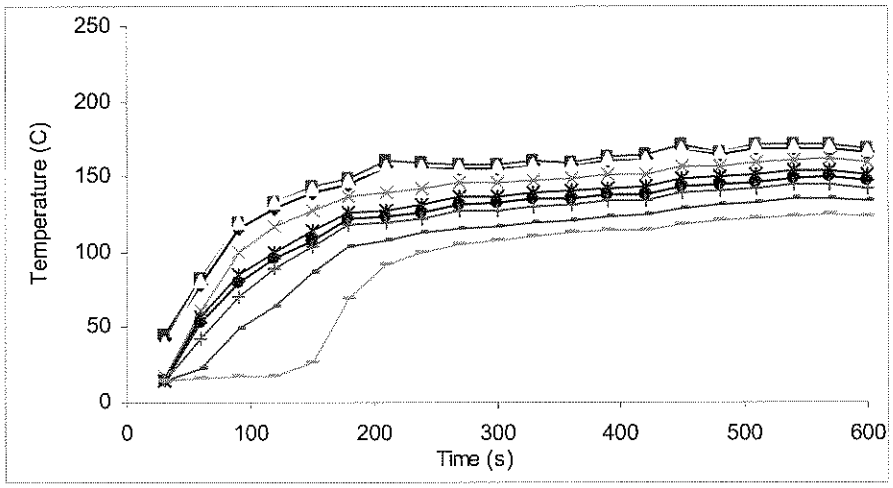
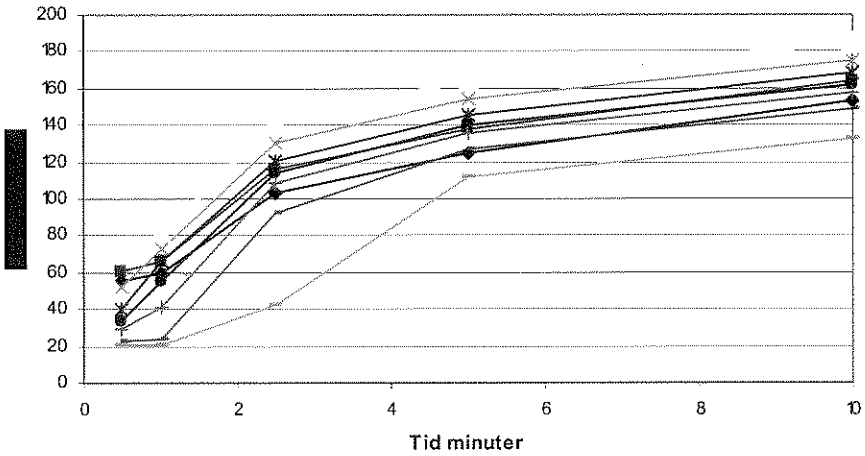
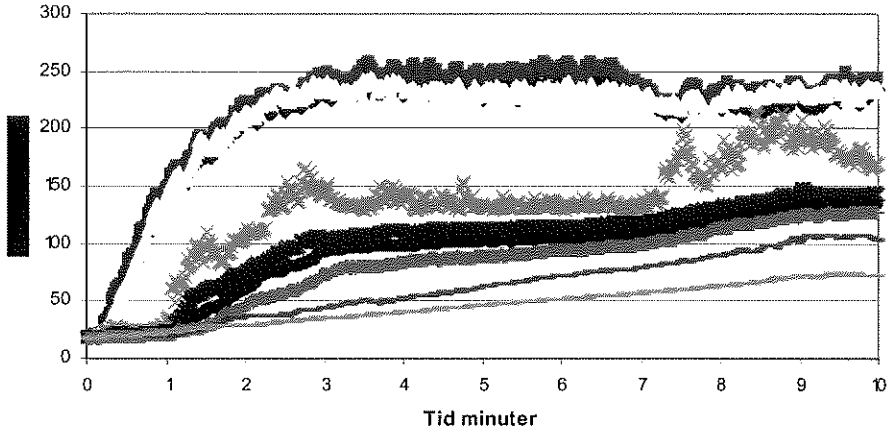
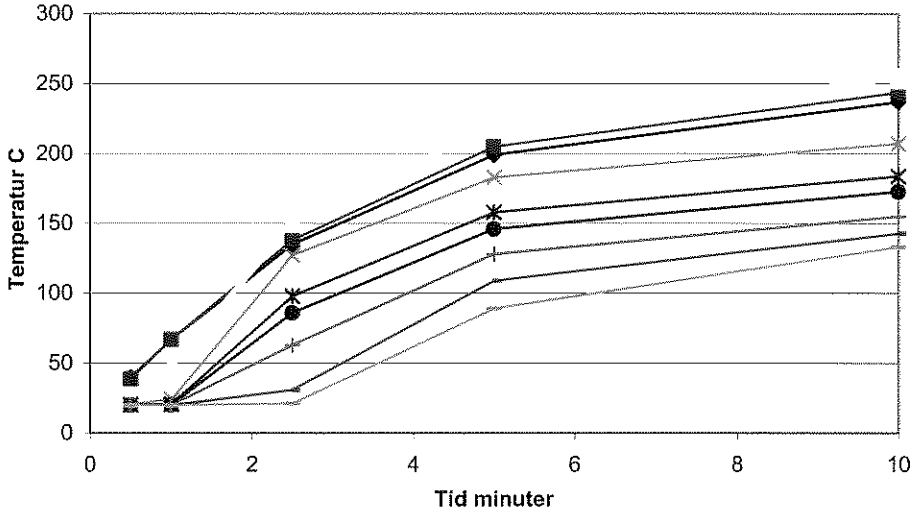
| Kod | Termoelementträd 16 13m från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.21 vertikal temperaturfördelning vid träd 16.**

| Kod | Termoelementträd 22 3m i längsled 3.5 m i sidled från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

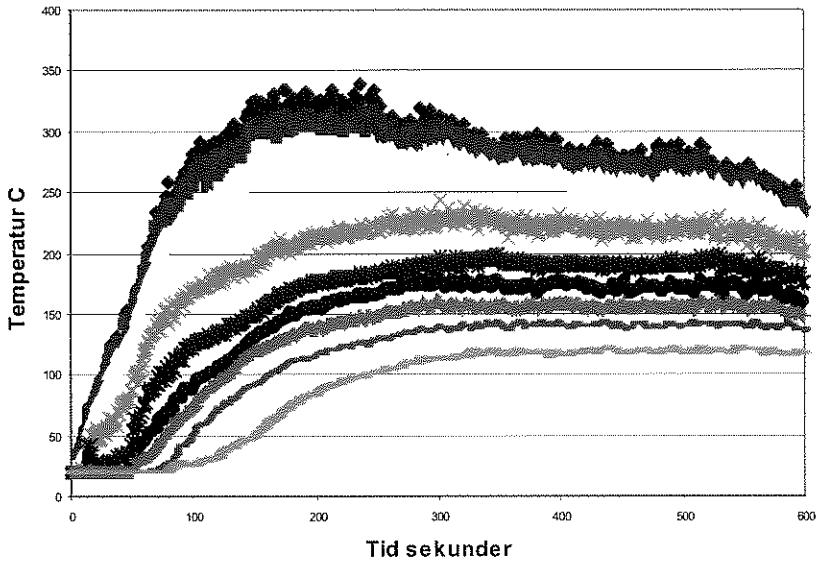
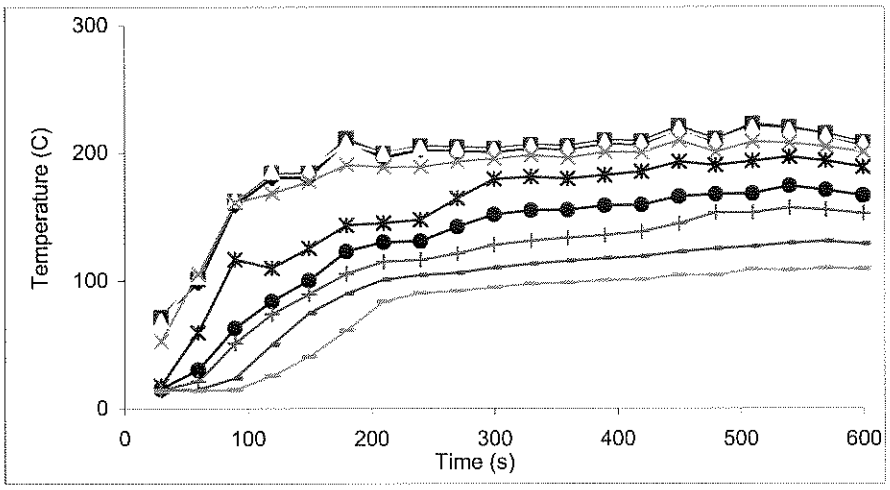
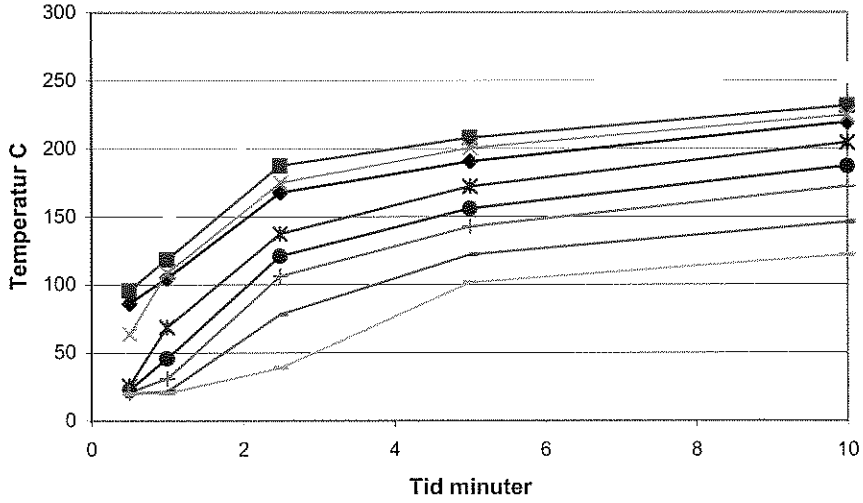
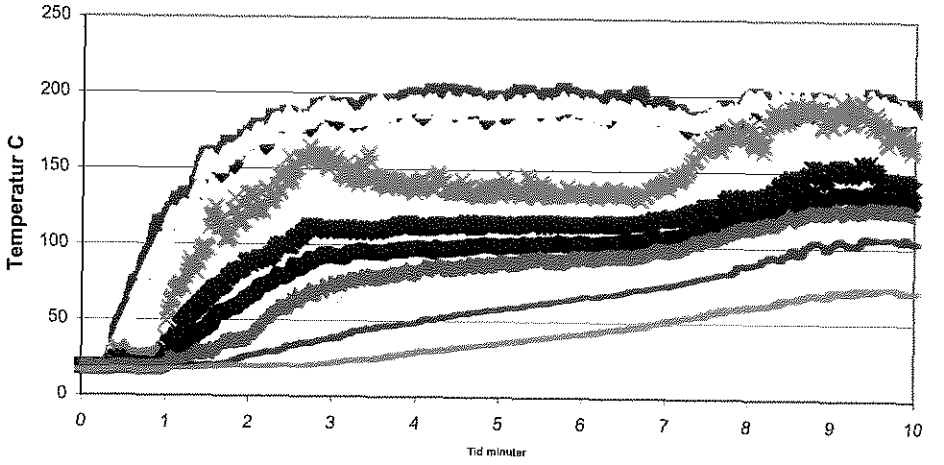
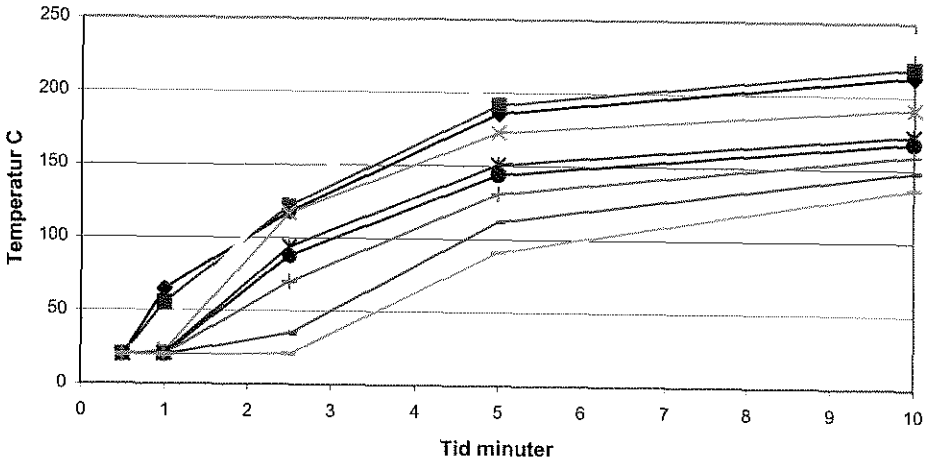
| Kod | Termoelementträd 22 3m i längsled 3.5 m i sidled från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.22 vertikal temperaturfördelning vid träd 22.**

| Kod | Termoelementträd 26 3m i längsled 3.57 m i sidled från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

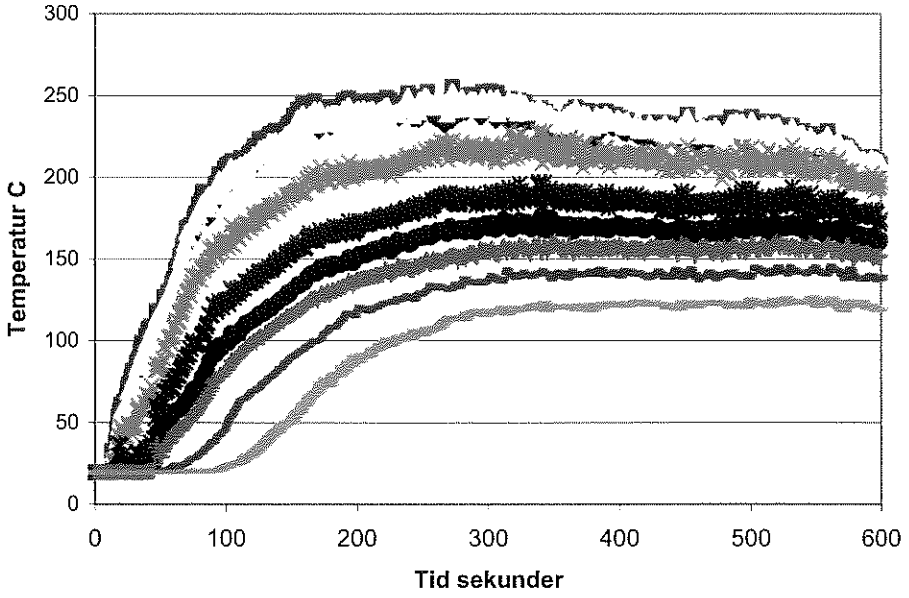
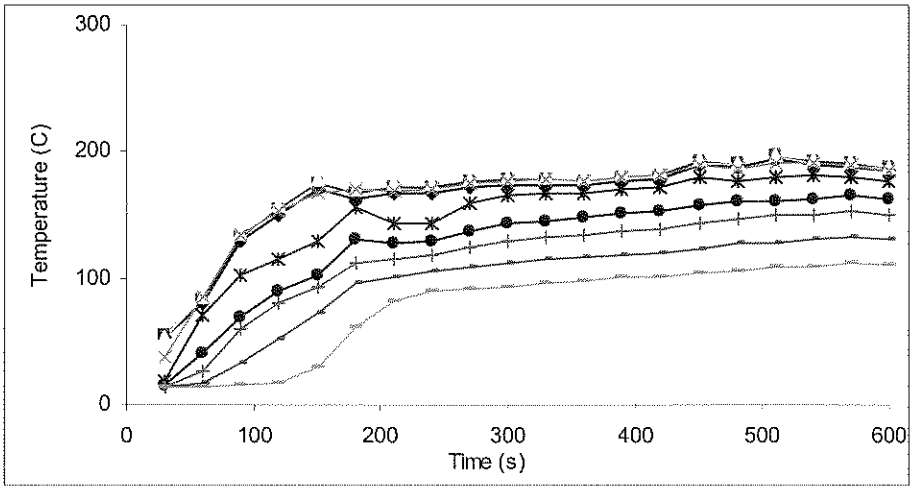
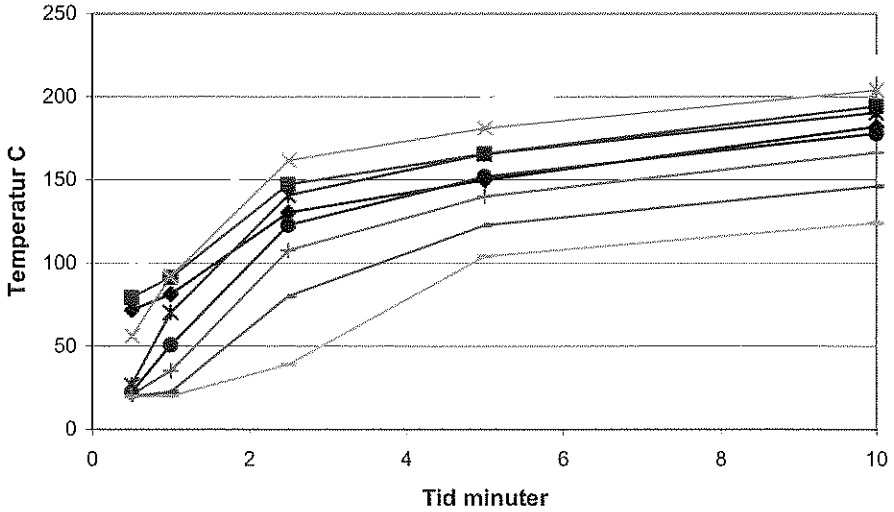
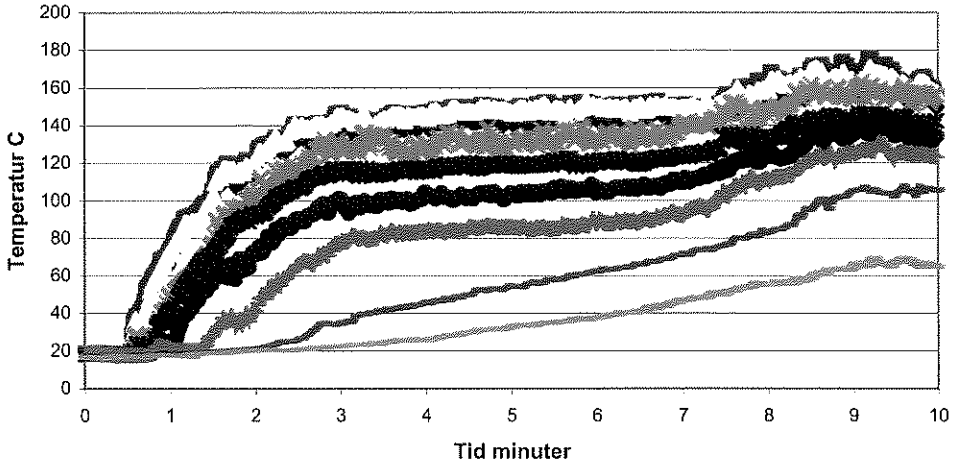
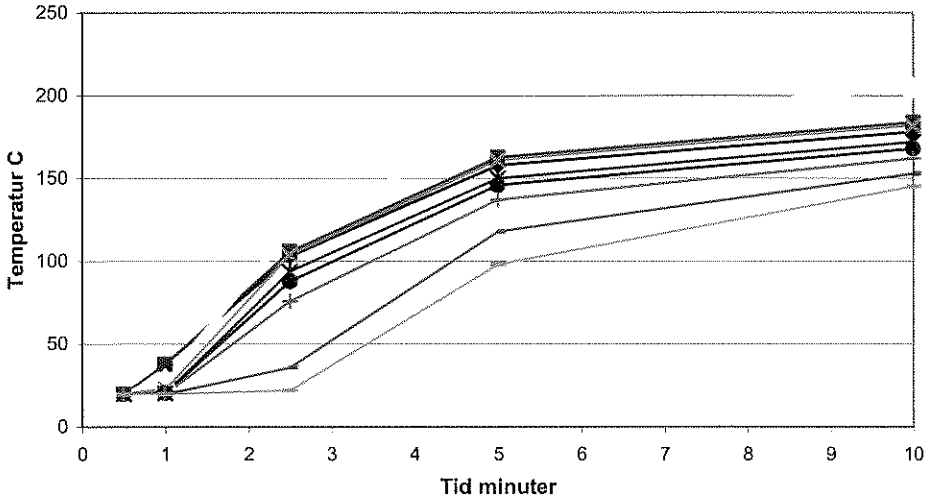
| Kod | Termoelementträd 26 7m i längsled 3.5 m i sidled från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.23 vertikal temperaturfördelning vid träd 26.**

| Kod | Termoelementträd 31 13m i längsled 3.5 m i sidled från branden |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

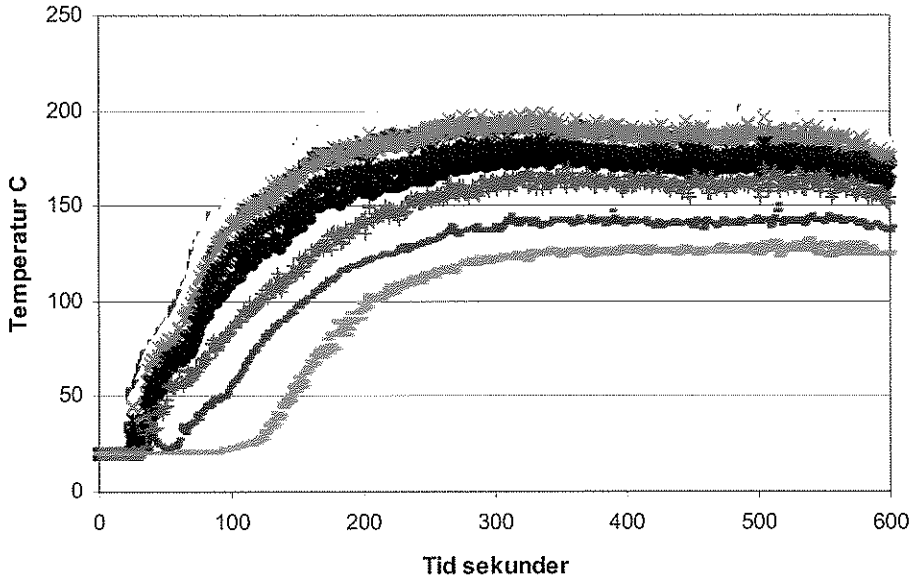
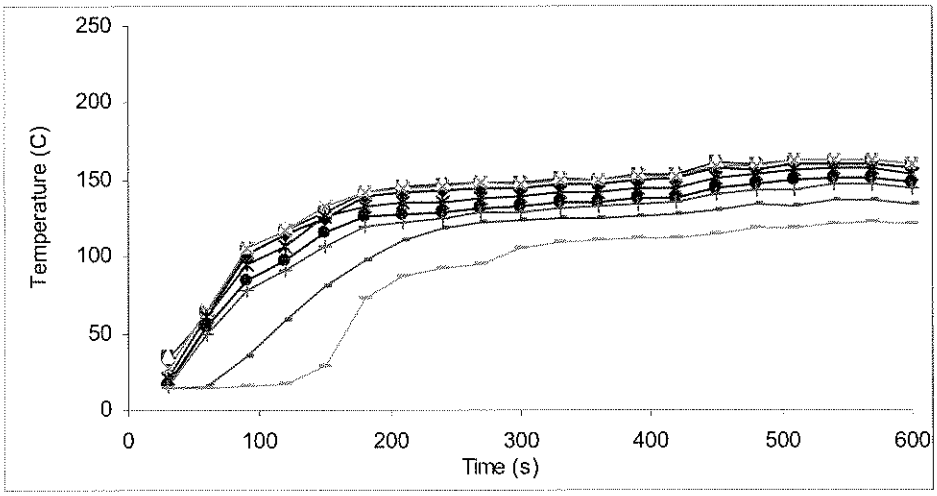
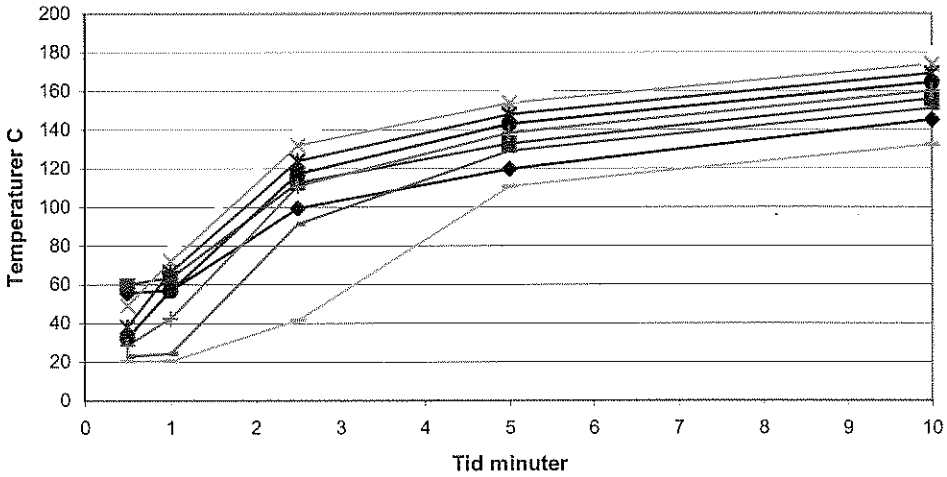
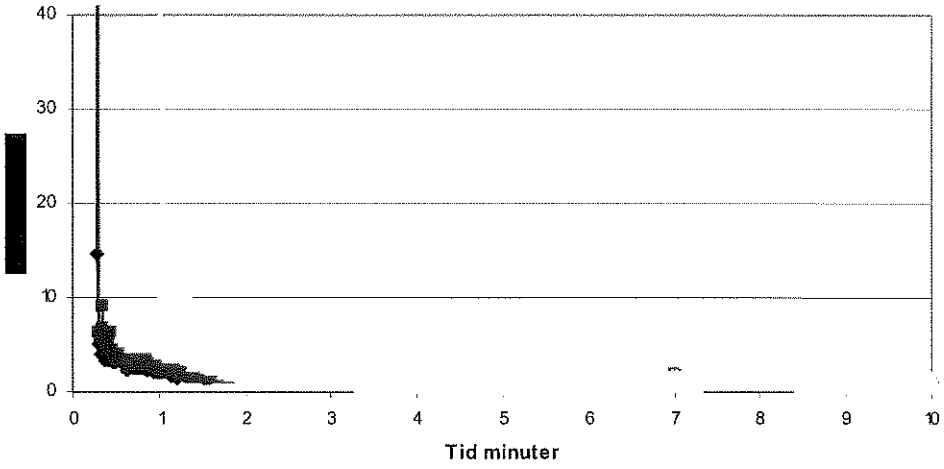
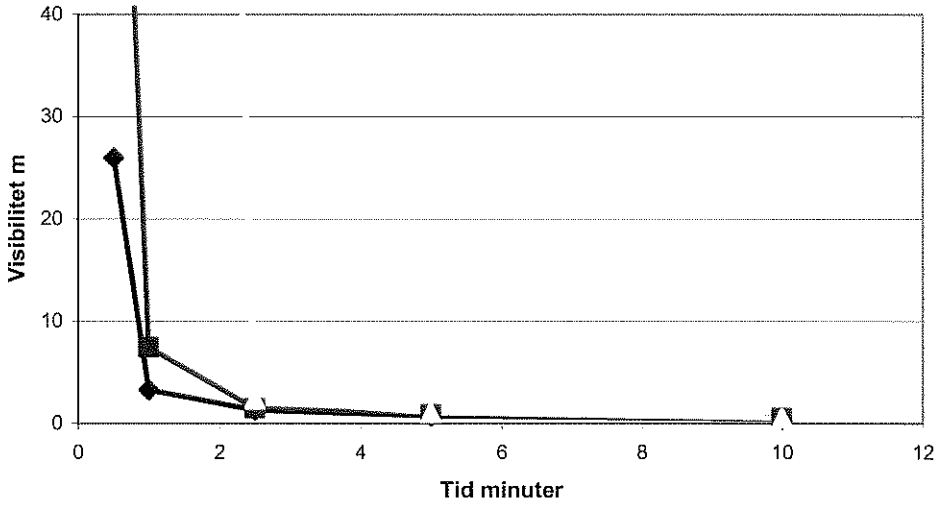
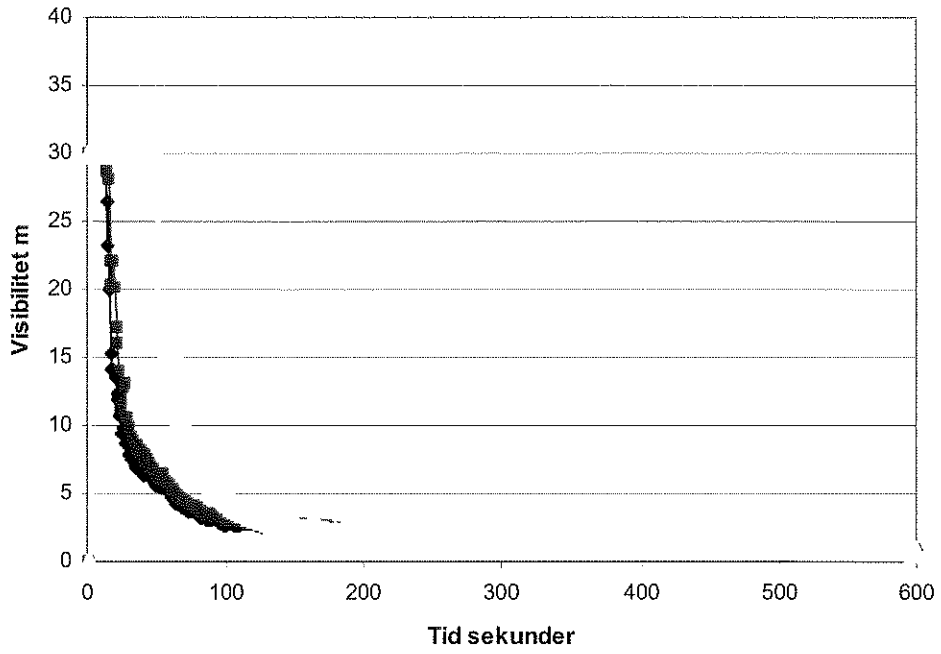
| Kod | Termoelementträd 31 13m i längsled 13 m i sidled från branden |
|---|---|
| FDM |   |
| SMAFS |   |
| SOFIE |   |

**Fig 4.23 vertikal temperaturfördelning vid träd 31.**

| | Visibilitet vid träd 11 5 (svart) 20 (röd) och 80 (gul) cm under tak |
|---|---|
| EXP |   |
| CFX |   |

FDS




SOFIE

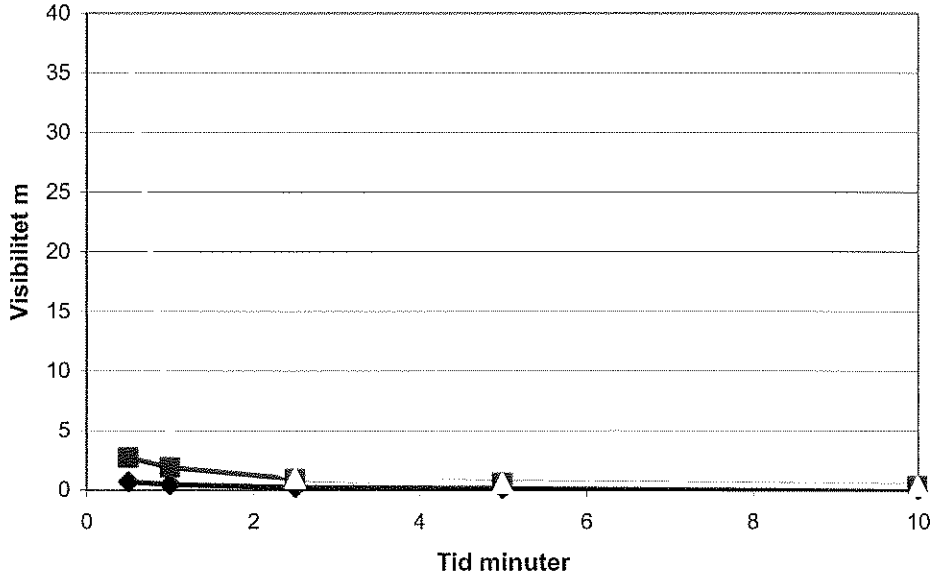



**Fig 4.24 Visibilitet vid träd 11, 5 (svart) 20 (röd) och 80 (gul) cm under tak**

# 7. Värdering av jämförelse mellan experiment och simuleringar

**Översiktlig jämförelse mellan koderna av brandgasfyllning i rummet**
Samtliga fyra simuleringar som redovisas i Fig.4.4 - 18 ger en likartad bild av brandgaslagrets tjocklek jämfört med experimentet med undantag för simuleringen med CFX som ger ett tunnare brandgaslager för tider upp till 5 minut efter antändning.

**Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment**
Experimentella värden finns för vertikala hastighetsprofiler i två längdsnitt i lokalen redovisade i Fig.4.19-23. Temperaturerna i brandgaslagret övre i hela lokalen simuleras med en avvikelse från de experimentella värdena på som mest 25% för samtliga koder. Simuleringarna med FDS ger nära branden temperaturer som är 25% över de experimentella närmast taket men närmare de experimentella på lägre nivåer. Det kan påpekas att den experimentella osäkerheten är 20 %. De experimentellt uppmätta gastemperaturerna i brandgaslagret vid taket är för låga och under 1 m för höga på grund av strålningskorrektionen.
Experimentella värden på visibiliteten vid mätträd 11 på nivåerna 5, 20 och 80 cm under taket, Fig 4.24, simuleras tillfredsställande av koderna FDS och SOFIE. Gränsen för utrymning, cirka 10 m visibilitet inträffar 0.8 m under tak efter 70 +/- 10 sekunder både vid experimenten och vid simuleringarna. Vid simuleringen med CFX nås 10 m gränsen 0.8 m under taket något senare (visibiliteten är 330 m efter 60 sekunder och 2.5 m efter 150 sekunder)

# 8. Sammanfattning

- Samtliga fyra koder simulerar en realistisk bild av brandgaslagrets tjocklek för tider över 5-10 minuter trots att branden enligt simuleringarna med FDS blir kraftigt underventilerad efter 1-2 minuter vid mätträd 11. CFX ger för kortare tider ett tunnare brandgaslager än övriga koder.
- Det uppmätta trycket i lokalen kunde inte simuleras tillfredsställande vilket man kan tolka som om lokalen inte var så tät som angavs i avisningarna till simuleringen.
- Den experimentella osäkerheten i temperaturmätarna uppskattas till 20% förorsakad av en 30% osäkerhet i effektutvecklingen.
- Den uppmätta temperaturen i 6 vertikala snitt i brandrummet simuleras av samtliga koder med en osäkerhet på högst 25 %.
- Den tid då visibiliteten 0.8 m under taket mitt i rummet (träd 11) blir 10 m simulerades med en avvikelse mindre än 15% av FDS och SOFIE. Osäkerheten var större vid simuleringarna med CFX.
- Avvikelsen mellan experiment och simuleringar innefattar fel pga. ofullständigheter i fysikaliska och numeriska modeller, systematiska fel vid beskrivning av scenariet och operatörsberoende.
- Det går inte att uppskatta hur stora bidrag till avvikelsen de olika felkällorna och operatörsberoendet medför.

## Referenser


1. ”Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE”, Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
2. “A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application”, McCaffrey B.J., Heskestad G., Combustion and flame 26 (1976)125-127
3. “Ceiling Jet Flows” Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.
4. “Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations”, Ma,T.G., Quintiere J.G., Fire Safety Journal 38 (2003) 467-492

# Scenarium 5 Korridor rum

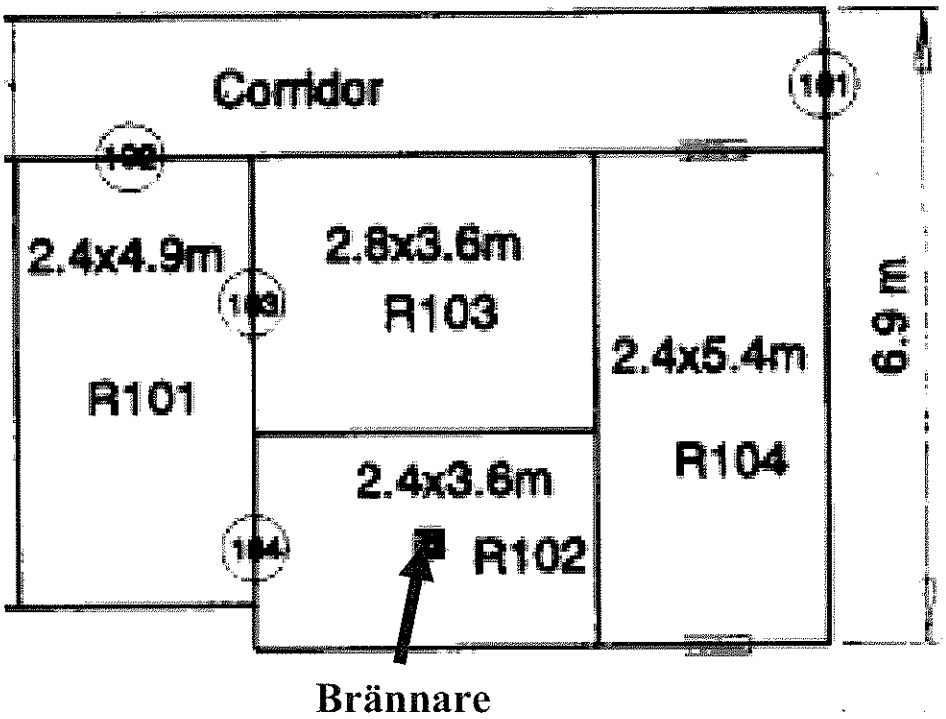
## 1. Syfte

Vid dimensionering av utrymning av kontor och avdelningar på sjukhus och vårdhem där patienterna även kan vara sängliggande och bundna till viss apparatur är det viktigt att känna till hur snabbt brandgaserna sprider sig från rum till korridor och andra rum. Det valda scenariet representerar en typisk byggnadsdel i kontor, sjukhus, vårdhem eller fängelse som har en lång korridor med angränsande rum och normal takhöjd. I det valda scenariet är branden, som har en konstant effektutveckling, placerad mitt i ett rum. Brandgaserna sprids från brandrummet till angränsande korridorer och rum.

## 2. Scenarium

Scenariet är hämtat från en artikel i tidskriften Fire Safety Journal [1] och beskrivet i anvisningarna till simuleringen i Ref.2

Av rummen, som visas i Figur 5.1, användes rum R101, R102, R103 och korridoren vid försöken. Dörren till rum R104 från korridoren var stängd. Korridoren var öppen till höger och stängd till vänster.




**Figur 5.1 Försöksrum**

Storleken av rummen visas i figur 5.1. Höjden i rummen var 2.5 m och korridoren var 1.4 m bred. Dörrarna mellan rummen och rum R101 och korridoren var 0.8 m breda och 2 m höga. Öppningen ut från korridoren var helt öppen upp till 2.5 m. Väggarna bestod av ett lager 16 mm gips och taken av två lager 16 mm gips. I brandrummet, R102 var de övre delarna av väggarna och taket även täckta med ett lager brandbeständig gips.

**Brandkälla**

Brandkällan består av en fyrkantiga 10 cm hög sandfylld propanbrännare med måttet 0.3 x 0.3 m. Effekten var konstant 300 kW och den tilläts brinna så länge att man uppnådde ett stationärt läge, dvs. 20-40 minuter.

## 3. Mätteknik och experimentell osäkerhet

**Repeter- och reproducerbarhet**

Experimentet har utförts en gång på ett laboratorium och det saknas således information om både repeter- och reproducerbarhet.

**Randvillkor**

Geometrin är enbart skissartad och vissa mått som vissa väggars tjocklek måste man själv göra en bedömning av. Materialdata för vägg- och takkonstruktionen finns inte angivna förutom att de är av gips. Då försöket varar i 20-40 minuter påverkar materialens tjocklek temperaturfördelningen i rummen.

**Initialvillkor**

Mer detaljerad information om initial temperatur- och hastighetsfördelning i rummet saknas. I rapporten anges endast en begynnelsetemperatur, 20°C.

**Brandbeskrivning**

Bränslet är propan med en angiven effektutveckling på 300 kW. I tidskriftsartikeln finns endast en uppgift att massflödet propan var 6 g/sekund samtidigt som gasens energiinnehåll angavs till 50 kJ/g. Uppgiften om propans energiinnehåll är felaktig och relaterar sig till metan. För propan borde den vara 44-46 kJ/g och beror på om man tagit hänsyn till den en delvis ofullständig förbränning (sotbildning, oförbrända kolväten och kolmonoxid). I instruktionen till simuleringarna [2] angavs endast att effektutvecklingen var 300 kW. Simulerarna hade inte tillgång till artikeln som beskrev scenariet [1].

**Mätteknik**

Vid försöken mättes gastemperaturen med termoelement placerade på vertikala termoelementträd. Det finns ingen uppgift om termoelementens tjocklek vilket gör det mycket svårt att uppskatta strålningskorrektionen för termoelementen, speciellt för de som är placerade nära branden.

Vid försöken mättes gashastigheten i dörrarna med bi-directional pitotrör och termoelement. Bi-directional pitotrör har ett felaktigt vinkelberoende och mäter inte normalkomponenten av hastigheten på rätt sätt när strömningsriktningen är skild från normalriktningen [3]. Tryckskillnaden över pitotrören för gashastigheter under 0.5 m/s är dessutom mindre än 0.15 Pa vilket medför stor osäkerhet i tryckmätningen.

**Sammanfattande osäkerhetsbedömning**

Mot bakgrund av ovanstående bedömer vi:

- En osäkerhet i effektutvecklingen, Q, med 10% motsvarar enligt Alperts formel för takstrålar och Delichatsios formel för korridor [4] en osäkerhet i temperaturstegringen på 7 % ($\Delta T$ -- $Q^{2/3}$).
- Att osäkerheter i termoelementens kalibreringskurva är mindre än 1°C.
- Att strålningskorrektionen påverkar de uppmätta gastemperaturerna. Den kommer att variera mycket beroende på termoelementens placering och tjocklek.
- Att interpolationen av mätdata till isotermer bidrar med fel i temperaturnivåer.
- Det finns ingen uppgift om vilken konstruktion som omsluter försöksrummen.
- Att osäkerheten i hastighetsmätningarna beror av flera faktorer. Är inte strömningsriktningen parallell med pitotröret blir den uppmätta hastigheten beroende av strömningsriktningen. Enligt Ref .3 är mätfelet i normalkomponenten av hastigheten 0, 6, 15, 21, 31, 29 % för vinklarna 0, 10, 20, 30, 40, 50 grader mellan pitotrör och strömningsriktning. Till detta kommer mätosäkerheten i tryckmätningen som är större för små hastigheter än för stora på grund av de små tryckdifferenserna. Osäkerheten i temperaturmätningen vid pitotröret pga.

osäkerheten i effektmätningen och strålningskorrektion bidrar även till mätfelet i gashastigheten [3]. I Fig 5.4 och 5.6 har det experimentella felet angetts med 35%.

# 4. Simuleringar

I tabell 5.1 ges en sammanfattning om den hårdvara, strategi för simulering och val av modeller som använts i studien.

**Tabell 5.1 Hårdvara, simulering och modellval**

| Mjukvara | CFX-4.4 | FDS 4.07 | SMAFS 5.01* | SOFIE 3.0 |
|---|---|---|---|---|
| **Hårdvara** | | | | |
| **Dator CPU** | Intel Pentium4 | Intel Pentium 4 | | Intel Pentium 4 |
| **Klockfrekvens GHz** | 2? | 3.0 | | 3.2 |
| **RAM GB** | 1 | 1 | | 2 |
| **Antal processorer** | 1 | 1 | | 1 |
| **Simulering** | | | | |
| **Operatör** | Bengt. Hägglund | Göran Holmstedt | Zhenghua Yan | Heimo Tuovinen |
| **Gridstorlek** | 375.000 | 602.568 | | 314.496 |
| **Gridförtätning** | Nej | Ja | | Ja |
| **Symmetriplan** | Nej | Nej | | Nej |
| **Tidssteg sek** | 1 och 2 | Default | | ?Stationär |
| **Beräkningstid timmar** | 27. | 560 | | 4.5 |
| **Mass tolerans** | $10^{-6}$ | Default | | $10^{-3}$ |
| **Modellval** | | | | |
| **Typ av code** | RANS | LES | | RANS |
| **Turbulens** | k-ε | Smalgorinsky | k-ε | k-ε |
| **Strålning** | Ingen | Default | | DTRAM 16 ray |
| **Brand** | Heat source | Default | | Eddy Break-up |
| **Reduc effekt %** | 35 | | ? | ? |
| **Sotfraktion** | 0.09 | 0.01 | | 0.02 |
| **Konvektion** | Default | Default | | Default |

* Betyder hårddisken gick sönder, endast vissa resultat bevarade.

Det kan noteras att CFX simuleringarna utfördes som en tidsberoende lösning och att branden simulerades som en värmekälla, s.k "heat source". Simuleringarna med SOFIE utfördes som en tidsoberoende lösning, s.k. "steady state" och med 10 cm tjock vägg istället för 16 respektive 32 mm. Efter simuleringarna med SMAFS fick datorn ett hårddiskhaveri vilket medförde att endast några få data från simuleringarna är tillgängliga.

# 5. Jämförelse mellan simulerade och experimentell temperaturer

När man jämför experiment med simuleringar måste man ta hänsyn till olika felkällor. Experimenten är behäftade med olika felkällor:

- Osäkerhet i mätutrustningen s.k. mätfel. Exempel på mätfel som i detta fall har stor betydelse är osäkerheten i propangasflödet (effektutvecklingen), strålningskorrektionen för termoelementen och flödesriktningen vid pitotrören.
- Systematiska fel som ofta är svåra att belägga om inte försöket både repeterats och reproducerats vid ett annat laboratorium. Exempel på systematiska fel är osäkerheter i materialdata, geometri, begynnelse- och randvillkor mm.

Simuleringarna är även behäftade flera olika felkällor:

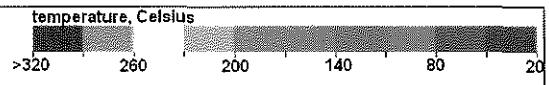
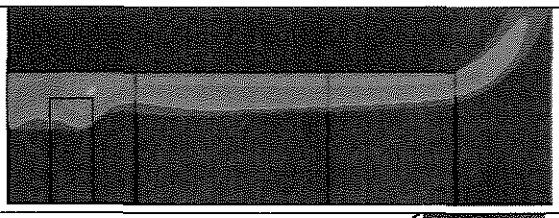
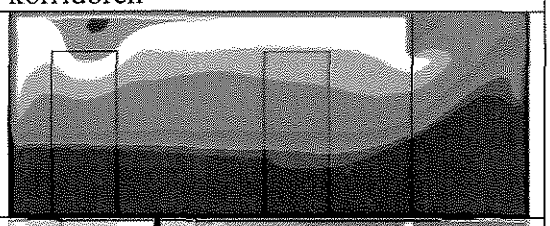
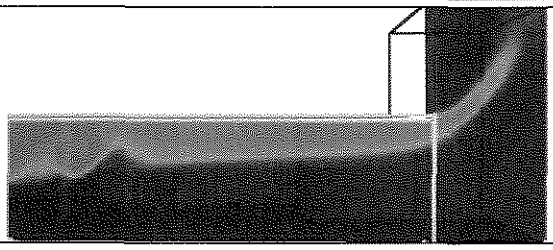
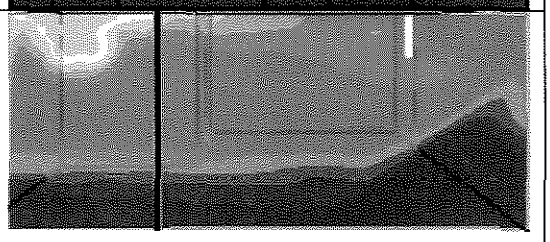
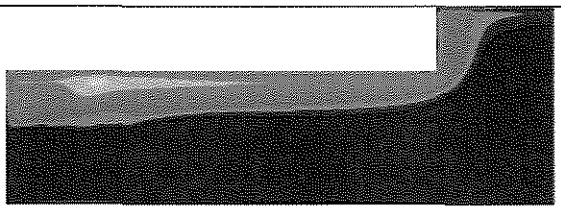
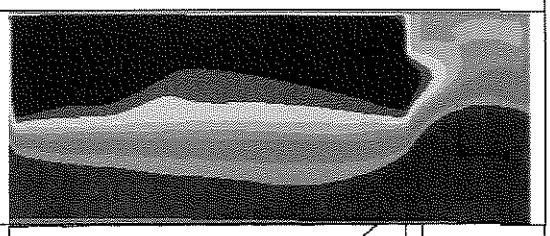
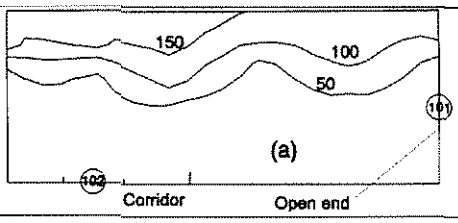
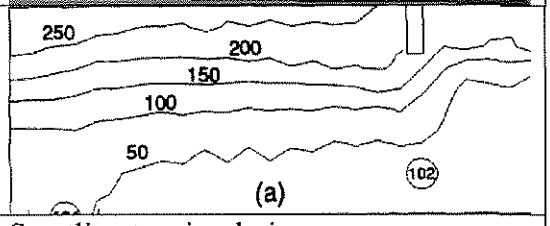
- Ofullkomligheter i fysikaliska (turbulens, värmeöverföring, förbränning m.m..) och numeriska modeller (gridberoende, explicit och implicit modell mm.)
- Osäkerheter i de scenarier som skall simuleras s.k. scenarieosäkerheter. Exempel på scenarieosäkerheter är osäkerheter i alla indata som används vid beräkningarna. I det aktuella fallet inkluderas här alla systematiska fel och osäkerheten i effektutvecklingen. Effektutvecklingen är för de flesta scenarier av avgörande betydelse för utfallet av simuleringen.
- Operatörsberoende. I samtliga koder finns det ett stort urval av olika fysikaliska och numeriska submodeller som operatören kan välja mellan. En operatör kan välja att låta branden växa upp olika snabbt då en stegändring av effekten medför numeriska problem, välja olika begynnelse och randvillkor (t.ex. initialtemperatur, materialdata), approximera geometrin på olika sätt (vissa koder har enbart ett kartesiskt koordinatsystem) och göra misstag. Det är därför mycket viktigt att kodens versionsnummer och indatafilen dokumenteras för att man skall kunna kvalitetsgranska en simulering.

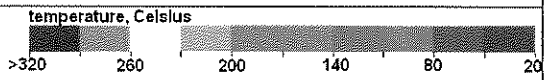
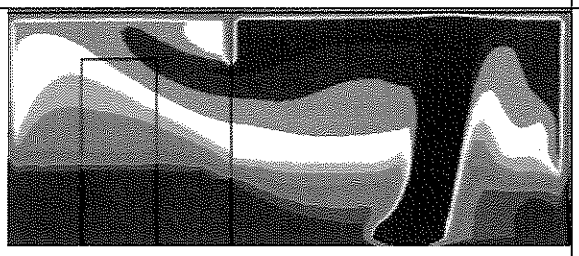
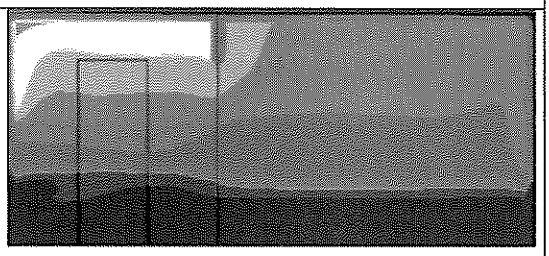
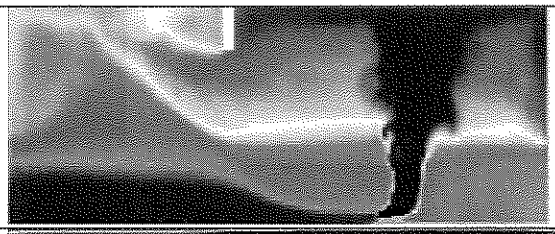
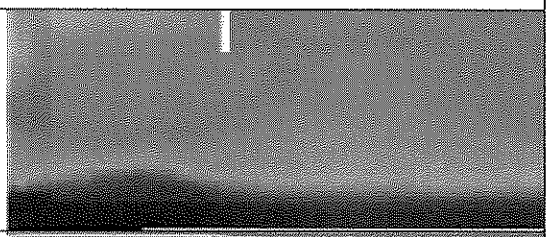
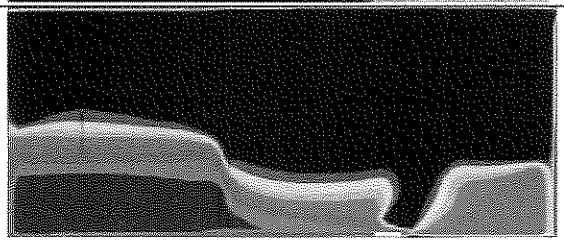
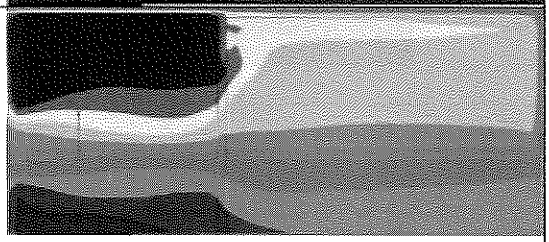
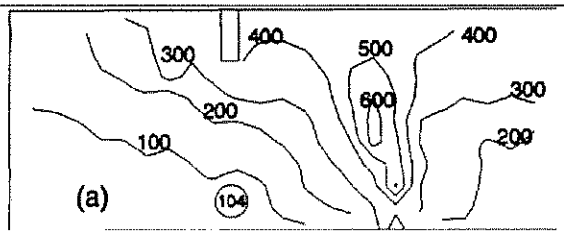
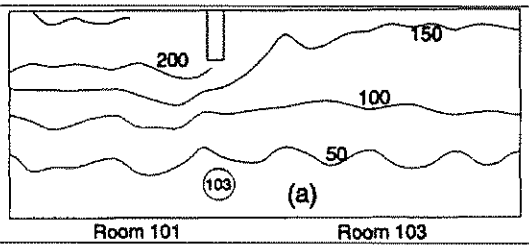
För att minimera operatörsberoendet har följande åtgärder vidtagits vid simuleringarna:

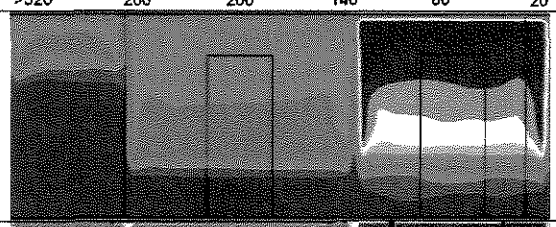
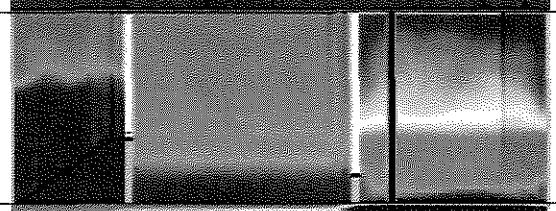
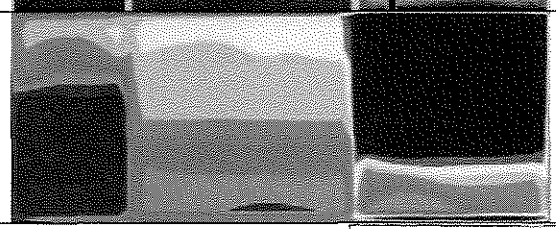
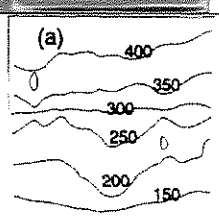
- Operatörerna vid simuleringarna har antingen själv utvecklat koden (SMAFS) och/eller har flerårig erfarenhet av simuleringar med koden (CFX, FDS och SOFIE) både i vetenskapliga och kommersiella sammanhang.
- För koderna av RANS-typ (CFX, SMAFS och SOFIE) har simuleringarna utförts med två olika gridnät för att få en gridoberoende lösning.
- För koden FDS av LES typ har en annan strategi valts. I och i det närmaste området kring brännaren har ett gridnät valts som är 5-7 % av brännarens bredd enligt rekommendationer i en vetenskaplig artikel [5]. Utanför detta område har gridnätet storlek fördubblats i brandrummet och i halva rum R101 och ytterligare fördubblats i övriga rum. Alla gridnät är anpassade så att fyra celler enbart möter en cell vid ökning av cellstorlek en faktor två.

Vid experimenten uppmättes endast temperaturen i ett antal punkter i rummet vid stationärt tillstånd. Med utgångspunkt från mätningarna beräknades isotermerna. I Figur 5.2 ges en sammanställning av temperaturfördelningen efter lång tid (stationärt tillstånd), för de simulerade och experimentella värdena i fem vertikala snitt i olika rum. Resultaten från FDS simuleringarna representerar tidsmedelvärdet över en 20 sekunders period. Vid jämförelserna nedan har vi valt att anta att det experimentella mätfelet härrör från osäkerheten i effektutvecklingen, strålningskorrektion och strömningsriktning.

Osäkerheten i simuleringarna på grund av modeller, scenarium och operatör betraktas som avvikelse från experimenten.

| | | |
|---|---|---|
| | |  |
| | Temperaturprofilen i ett vertikalt snitt i centrum av korridoren | Temperaturprofilen i ett vertikalt snitt i centrum av rum R101 och ut i korridoren |
| CFX |  |  |
| FDS |  |  |
| | | |
| SO-FIE |  |  |
| Exp.t |  |  |
| | Samtliga tre simuleringar ger en realistisk bild av rökgaslagrets tjocklek även om experimenten på vissa punkter visar på stora fluktuationer i korridorens längdled. Temperaturerna för 50, 100 och 150°C isotermerna avviker från experimenten med upp till 25% för FDS och CFX men är upp till 50% för hög för SOFIE. | Samtliga tre simuleringar ger en realistisk bild av rökgaslagrets tjocklek även om experimenten på vissa punkter visar på stora fluktuationer i rummets längdled. Temperaturerna för 50, 100 150 och 200°C isotermerna avviker från experimenten med upp till 25% för FDS och CFX men är upp till 50% för hög för SOFIE. |

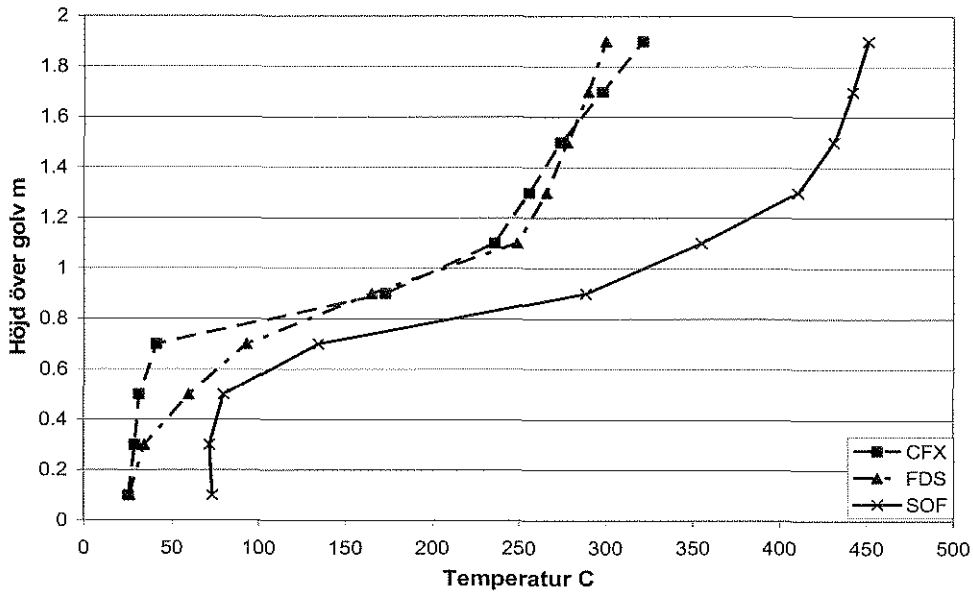
| | | |
|---|---|---|
| | Temperaturprofilen i ett vertikalt snitt i brandrummet och ut i rum R101 | Temperaturprofilen i ett vertikalt snitt i centrum av rum R102 och ut i rum R103 |
| | |   |
| CFX |  |  |
| FDS |  |  |
| SOFIE |  |  |
| Experimentt |   |   |
| | Samtliga tre simuleringar ger en realistisk bild av rökgaslagrets tjocklek även om experimenten på vissa punkter visar på stora fluktuationer i rummets längdled. Temperaturerna för 100, 200 och 300°C isotermerna avviker från experimenten med upp till 25 % för FDS och CFX men är upp till 50% för hög för SOFIE<br>Det bör observeras att de experimentella mätningarna utfördes nära flammorna och att strålningskorrektionen för termoelementen kan vara avsevärd i vissa mätpunkter. | Samtliga tre simuleringar ger en realistisk bild av rökgaslagrets tjocklek även om experimenten på vissa punkter visar på stora fluktuationer i rummets längdled. Temperaturerna för 50, 100 och 150°C isotermerna avviker från experimenten med upp till 25 % för FDS och CFX men är upp till 50% för hög för SOFIE. |

| | | |
|---|---|---|
| | Temperaturprofilen i ett vertikalt snitt i brandrummet halvvägs mellan flamman och dörren genom rum R103 och korridor korridoren | |
| | | |
| CFX |  | |
| FDS |  | |
| SOFIE |  | |
| Exp |  | |
| | Samtliga tre simuleringar ger en realistisk bild av rökgaslagrets tjocklek även om experimenten på vissa punkter visar på stora fluktuationer längs brandrummets bredd. Temperaturerna för 150, 200, 250 och 300°C isotermerna avviker från experimenten med upp till 25 % för FDS och CFX men är upp till 50% för hög för SOFIE.<br><br>Det bör observeras att de experimentella mätningarna utfördes nära flammorna och att strålningskorrektionen för termoelementen kan vara avsevärd i vissa mätpunkter. | |

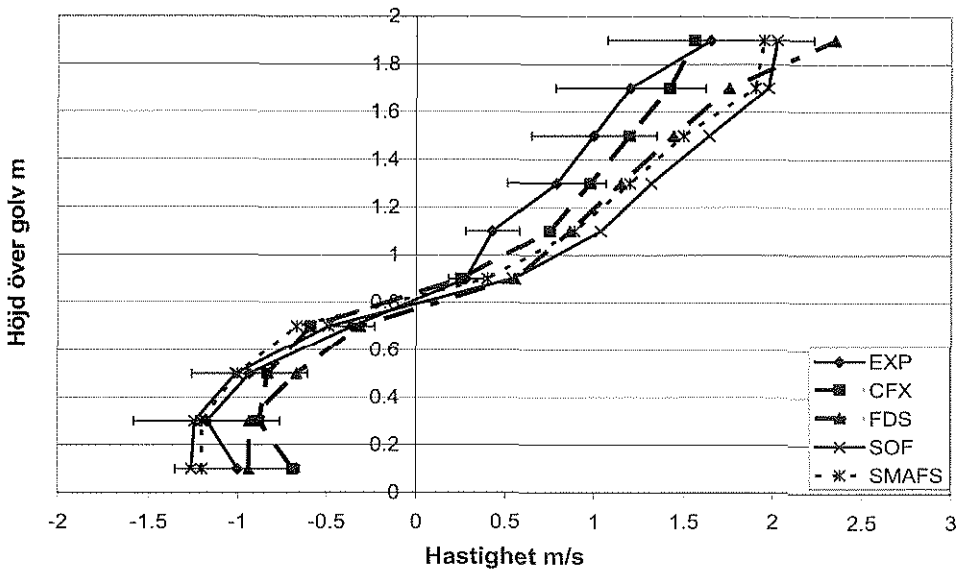
**Figur 5.2 Brandgasfyllnad av rum R101, R102, R103 och korridor**

## 6. Jämförelse mellan simuleringar av temperaturer och av uppmätta gashastigheter i dörrarna.

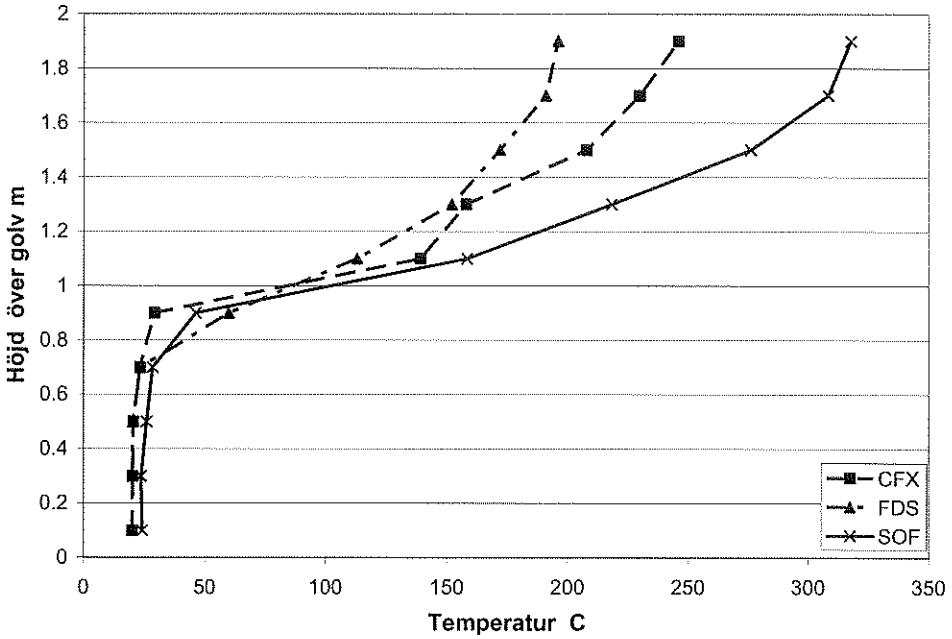
Vid experimenten mättes gashastigheten mitt i dörrarna 102 och 104 med tio vertikalt placerade givare (bi-directional pitotrör och termoelement). I Fig.5.3-7 redovisas de uppmätta och simulerade gashastigheterna i dörr 102, och 104 och de simulerade temperaturerna i dörr 102, 103 och 104. Vid simuleringarna med FDS redovisas temperaturerna som medelvärdet över 20 sekunder. Det experimentella felegränsen i den uppmätta normalkomponenten av gashastighetenten har i figurerna antagits till 35%.



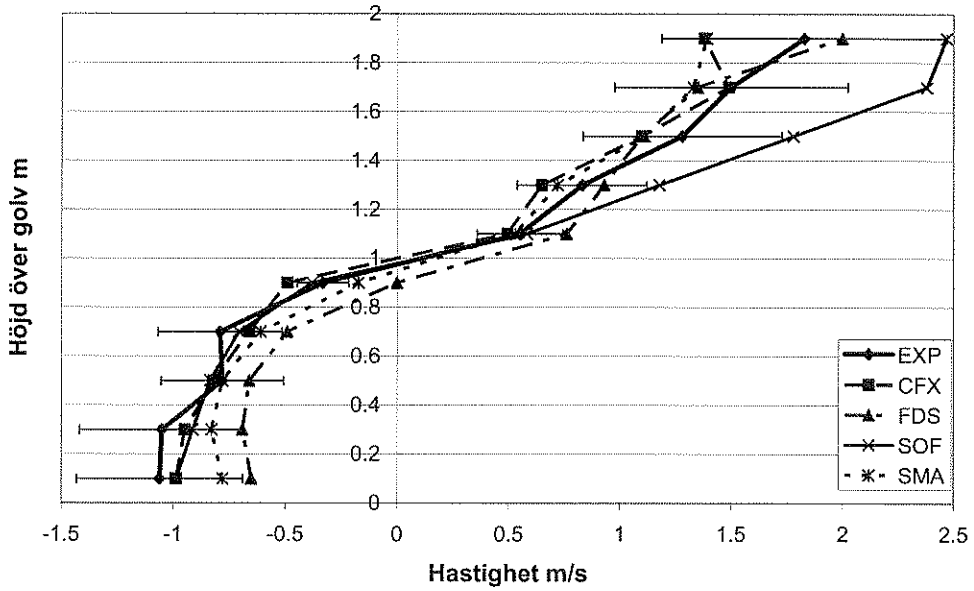

**Figur 5.3 Jämförelse mellan simulerad vertikal temperaturprofil mitt i dörren till brandrummet (dörr 104).**



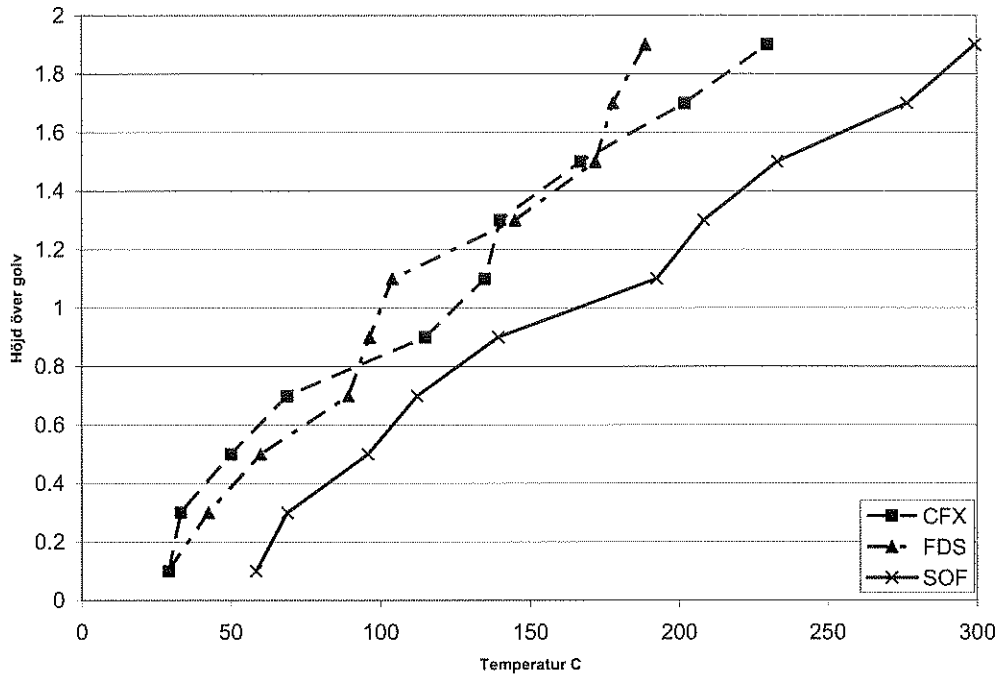
**Figur 5.4 Jämförelse mellan simulerad och experimentell vertikal hastighetsprofil mitt i dörren till brandrummet (dörr 104).**




**Figur 5.5 Jämförelse mellan simulerad vertikal temperaturprofil mitt i dörren till korridoren (dörr 102).**




**Figur 5.6 Jämförelse mellan simulerad och experimentell vertikal hastighetsprofil mitt i dörren till korridoren (dörr 102).**




**Figur 5.7 Jämförelse mellan simulerad vertikal temperaturprofil mitt i dörren till sidorummet (dörr 103).**

# 7. Värdering av jämförelse experimentella datasimuleringar

**Översiktlig jämförelse mellan koderna av brandgasfyllning i rummen**
Samtliga tre simuleringar som redovisas i Fig.5.2 ger en likartad bild av brandgaslagrets tjocklek jämfört med experimentet. Brandgaslagrets undre gräns, där hastigheten ut genom dörren är noll, stannar vid dörren till brandrummet, Fig.5.4, på 0.80 m +/- 0.05 m över golvet både i experiment och i simuleringar. Brandgaslagrets undre gräns stannar vid dörren till korridoren, Fig.5.6, på 0.90 m +/- 0.05 m över golvet både i experiment och i simuleringar.

**Detaljerad jämförelse mellan simuleringar och experiment**
Experimentella interpolerade isotermer finns i fem vertikala snitt i rummen, redovisade i Fig.5.2. Temperaturerna i brandgaslagret övre del, (50, 100 och 150°C) simuleras med en avvikelse från de experimentella värdena på upp till 25% för koderna CFX och FDS och upp till 50% för koden SOFIE. Det kan påpekas att den experimentella osäkerheten är svår att uppskatta på grund av osäkerheten i effektutveckling, strålningskorrektion och interpolation. Enbart osäkerheten i effektutveckling (10%) bidrar med en temperaturosäkerhet på 7 % [4].
Hastighetsprofilen i dörren till brandrummet (Fig.5.4) och korridoren (Fig.5.6) har experimentella uppmätta neutralläge (v = 0) på 0.8 respektive 0.9 m höjd över golvet. Samtliga koder simulerar neutralläget med en osäkerhet mindre än 0,05 m. De uppmätta gastigheterna avviker med upp till 40% från de uppmätta värdena.

# 8 Sammanfattning

- Koderna CFX, FDS och SOFIE simulerar en realistisk bild av brandgaslagrets tjocklek. Brandgaserna når i dörrarna till brandrummet och till korridoren ner till 0.8 respektive 0.9 m från golvet.
- Koderna CFX och FDS simulerar 50, 100 och 150°C isotermerna i övre brandgaslaget med en avvikelse från experimentet på upp till 25%. Koden SOFIE simulerar 50, 100 och 150°C isotermerna i övre brandgaslaget med en avvikelse från experimentet på upp till 50%.
- Samtliga fyra koder, CFX, FDS, SMAFS och SOFIE; simulerar neutralläget i dörrarna till brandrummet och korridoren med en avvikelse på några få centimeter.
- För höjder över och under neutralläget i dörrarna till brandrummet och korridoren ger simuleringar med samtliga fyra koder gashastigheter som ligger upp till 40% över de experimentella värdena.
- Det är inte möjligt att utifrån information i Ref. 1 göra en bedömning av storleken på den experimentella osäkerheten då det saknas uppgifter om reproducerbarhet, repeterbarhet,, materialdata, geometri, strålningskorrektioner och inverkan av interpolationen av mätdata till isotermer.
- Avvikelsen mellan experiment och simuleringar innefattar fel pga. ofullständigheter i fysikaliska och numeriska modeller, systematiska fel vid beskrivning av scenariet och operatörsberoende.
- Det går inte att uppskatta hur stora bidrag till avvikelsen de olika felkällorna och operatörsberoendet medför.
- De höga temperaturnivåerna vid simulering med koden SOFIE beror till stor del av ett felaktigt val av väggtjocklek och termiska egenskaper i rummens väggar (operatörsfel). Rätt val av väggtjocklek och termiska egenskaper är speciellt viktigt när man simulerar långa tider eller stationära tillstånd där värmevågen nått igenom rummets väggar.
- Den långa simuleringstiden för FDS beror på den fina gridindelningen som krävs för att uppfylla kravet på en gridstorlek av 5-7% av brännarens sida kombinerat med en stor effektutveckling (3.3 $MW/m^2$) och en lång reell tid att simulera (20-40 min). Huvuddelen av simuleringstiden gick åt för att uppfylla konvergenskriteriet i det finaste gridnätet som omfattade brännaren och brandplymen.

# 9 Referenser


1. Mingchun Luo & Vaughan Beck, "The Fire Environment in a Multi-Room Building-Comparison of Predicted and Experimental Results", Fire Safety Journal 23 (1994) 413-438
2. "Experimentella scenarier för validering av CFD-koderna CFX, FDS, SMAFS och SOFIE", Holmstedt G., Blomqvist, P. Report 3144 Appendix 1, Brandteknik Lund 2008
3. "A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application", McCaffrey B.J., Heskestad G., Combustion and flame 26 (1976)125-127
4. "Ceiling Jet Flows" Alpert L.R., Chapter 2.2 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Ed.
5. "Numerical simulation of axi-symmetric fire plumes: accuracy and limitations", Ma,T.G., Quintiere J.G., Fire Safety Journal 38 (2003) 467-492