



**Norges branntekniske  
laboratorium as**

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse: Tiller Bru, Tiller

Telefon: 73 59 10 78  
Telefaks: 73 59 10 44  
E-post: nbl@nbl.sintef.no  
Internet: nbl.sintef.no

Foretaksregisteret: NO 982 930 057 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

## Analyse av brannlast

FORFATTER(E)

Geir Berge og Øyvind Brandt

OPPDRAGSGIVER(E)

Oljedirektoratet

|                                                         |                           |                                                                                 |                                                      |
|---------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| RAPPORTNR.<br><b>NBL A04108</b>                         | GRADERING<br><b>Åpen</b>  | OPPDRAGSGIVERS REF.<br><b>Harald Olstad</b>                                     |                                                      |
| GRADER. DENNE SIDE                                      | ISBN                      | PROSJEKTNR.<br><b>10718301</b>                                                  | ANTALL SIDER OG BILAG<br><b>43</b>                   |
| ELEKTRONISK ARKIVKODE<br><b>PR-NBL-03-003-V0_ko.doc</b> |                           | PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.)<br><b>Geir Berge</b>                                | VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.)<br><b>Kristen Opstad</b> |
| ARKIVKODE                                               | DATO<br><b>2003-12-30</b> | GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.)<br><b>Kjell Schmidt Pedersen, Adm. dir.</b> |                                                      |

### SAMMENDRAG

Det er gjennomført en analyse av eksperimentaldata for å få frem kunnskap om de prosesser som skjer i komponenter som eksponeres for brann når komponentene inneholder væske og gass. Sentralt i dette arbeidet er varmeovergang mellom væske, gass og faste stoffer.

For å gjennomføre analysen er det etablert en simulator for analyse av eksperimentelopsettet og for å gjenskape de effektene som kommer frem under eksperimentene. På den måten blir det mulig å studere fysikken som inngår i prosessen og utvikle mer presise modeller. I tillegg til tidligere eksperimenter er det utført ny supplerende eksperimenter.

Resultatene viser et godt samsvar mellom modellene som er utviklet og målingene utført i eksperimentene. Årets eksperimenter er dokumentert i rapporten sammen med simuleringsresultatene. Modellene fungerer godt både ved ulik veskefylling i prøveobjektet og med tørt objekt.

| STIKKORD   | NORSK         | ENGELSK           |
|------------|---------------|-------------------|
| GRUPPE 1   | Sikkerhet     | Safety            |
| GRUPPE 2   | Brann         | Fire              |
| EGENVALGTE | Brannlast     | Heat load         |
|            | Prosessutstyr | Process equipment |
|            |               |                   |

## INNHALDSFORTEGNELSE

|          |                                                                   |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduksjon.....</b>                                          | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Problembeskrivelse .....</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>Simuleringer4</b>                                              |           |
| 3.1      | Oppbygging av simuleringsmodell .....                             | 4         |
| 3.2      | Teoretisk grunnlag for simuleringsmodell .....                    | 8         |
| 3.3      | Resultater av simulering .....                                    | 10        |
| <b>4</b> | <b>Eksperimenter .....</b>                                        | <b>13</b> |
| <b>5</b> | <b>Varmetransport og varmeovergang i prosesskomponenter .....</b> | <b>15</b> |
| <b>6</b> | <b>Emissivitet 18</b>                                             |           |
| <b>7</b> | <b>Referanseliste.....</b>                                        | <b>23</b> |
| <b>8</b> | <b>Appendiks A Eksperimenter.....</b>                             | <b>25</b> |
| 8.1      | Case 1-03.....                                                    | 26        |
| 8.2      | Case 2-03.....                                                    | 27        |
| 8.3      | Case 3-03.....                                                    | 29        |
| 8.4      | Case 4-03.....                                                    | 30        |
| 8.5      | Case 9-03.....                                                    | 32        |
| <b>9</b> | <b>Appendiks B Beregningsresultater fra VessFire.....</b>         | <b>34</b> |
| 9.1      | Case 1-03.....                                                    | 34        |
| 9.2      | Case 2-03.....                                                    | 37        |
| 9.3      | Case 3-03.....                                                    | 39        |
| 9.4      | Case 4-03.....                                                    | 41        |
| 9.5      | Case 9-03.....                                                    | 42        |

## 1 Introduksjon

Brann er en trussel for sikkerheten både i privatboliger og i industriell sammenheng. Derfor er brann et fenomen som det må tas høyde for ved konstruksjon av bygninger og anlegg.

Noe av problemet er at brann ikke er et entydig begrep, men et resultat av mange tilfeldige omstendigheter. Det er store variasjoner i brennstoff, tilgang på oksygen, innflytelse fra omgivelser, osv. Med andre ord, en brann kan arte seg på mange forskjellige vis og brannbelastningen vil variere tilsvarende.

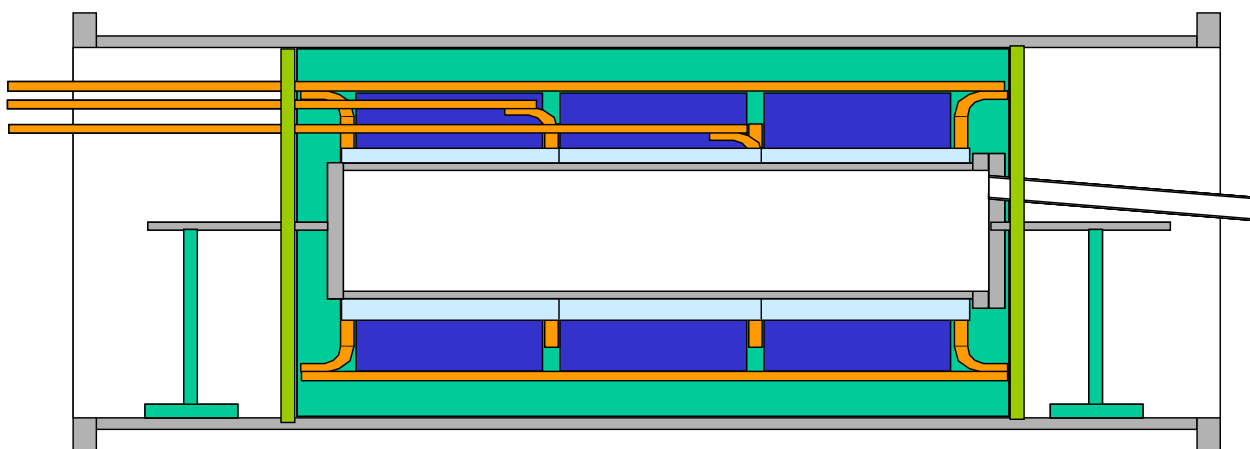
For å dimensjonere utstyr til å motstå en brann må vi ha en ide om hvilke varmelast brannen representerer. Å eksponere en gjenstand for en flamme er ikke noe eksperimentelt problem. Det som er problemet er å fastslå hvilke belastning gjenstanden fikk, reelt sett. Varmebelastning fra en flamme domineres av to varmeoverføringsmekanismer: konveksjon og stråling. Disse to mekanismene er fysisk sett svært forskjellige og vil variere med forskjellige parametre. Selv om temperaturen i flammen er en viktig parameter for begge mekanismene, reagerer de ulikt på temperaturutviklingen.

Belastningsprofilen fra de to varmeoverføringsmekanismene varierer over eksponeringstiden. Det vil med andre ord si at vi kan eksponere en gjenstand med en flamme og vi kan se resultatet, men vi kan ikke med sikkerhet si hvor stor varmelastningen fra flammen var. Det siste er et vesentlig problem fordi det er nettopp varmelastningen vi benytter i våre matematiske modeller ved dimensjonering av utstyr og komponenter. Det er derfor vesentlig for et pålitelig resultat at det er en god korrelasjonen mellom eksperiment og beregningsmetoder.

Dette prosjektet fokuserer på denne problemstillingen.

## 2 Problembeskrivelse

Prosjektet startet i 2002 og resultatet ble dokumentert i rapporten "Brannlast for prosessutstyr", ref. [1]. I 2002-prosjektet ble det bygget en elektrisk "ovn" som består av et sirkulært varmeelement som omslutter et prøvestykke. Se figur 1. Prøvestykket ble eksponert opp mot 250 kW/m<sup>2</sup>. Største delen av prosjektet gikk med til konstruksjon av ovnen samt utføring av eksperimenter.



**Figur 1** Skisse av prøveoppsett.

Målsetningen for årets prosjekt (2003) er en videreføring av prosjektet fra 2002. På bakgrunn av de resultatene som kom frem under siste års prosjekt ser en i dette prosjektet på de prosesser som

skjer i komponenter som eksponeres for brann når komponentene inneholder væske og gass. Sentralt i dette arbeidet er varmeovergang mellom væske, gass og faste stoffer.

### **3 Simuleringer**

Simuleringene er viktig av to årsaker. Det ene er at en i dette prosjektet ønsker å studere fordeling mellom konveksjon og stråling. Det andre er at en ønsker å verifisere målingene.

Eksperimentelle målinger er vanskelig både i gjennomføring og tyding av hva som er målt. Det gjelder ikke bare for dette prosjektet, men generelt. Teoretisk behandling av en problemstilling i tillegg til eksperimentelle målinger utfyller hverandre, de eliminerer ikke hverandre. Det er som å se en figur fra ulike vinkler, det gir en bedre forståelse av figuren samt muligheter til å oppdage og korrigere feil ved en av synsvinklene.

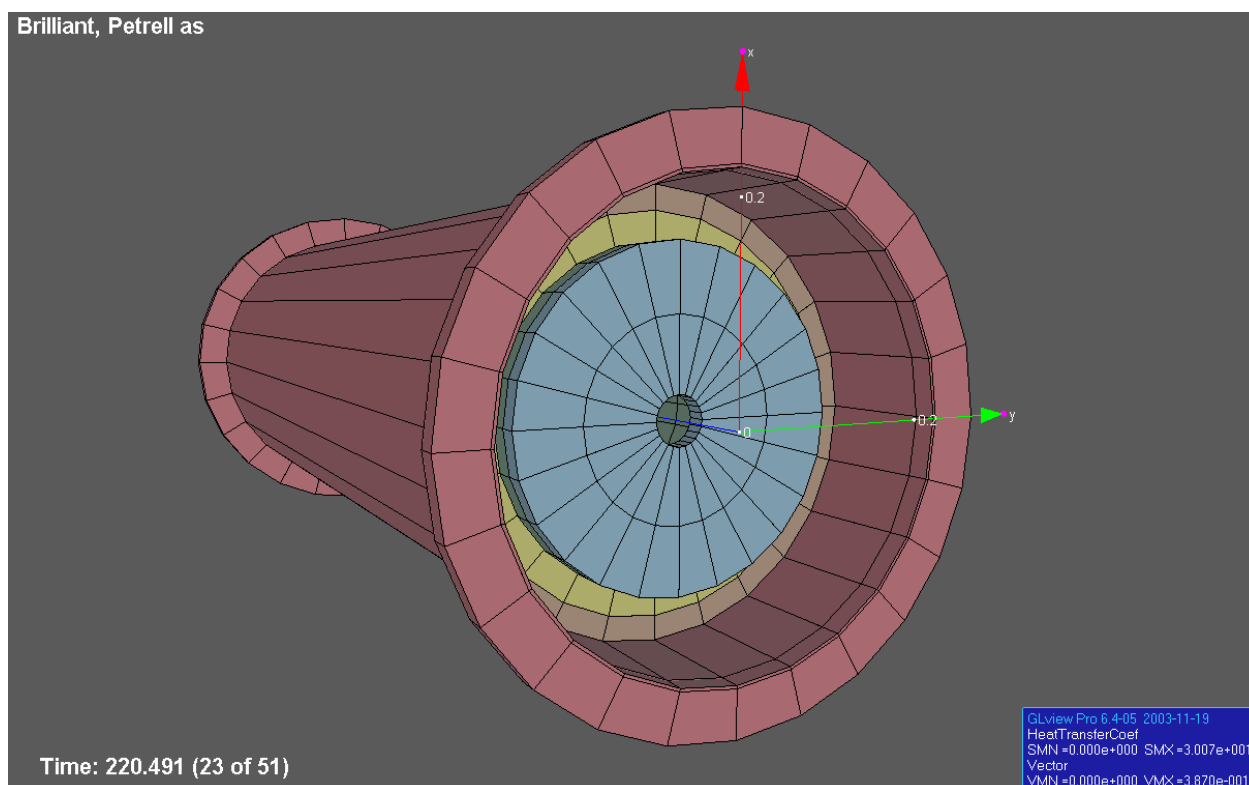
I dette prosjektet har det derfor vært et ønske å gjennomføre simuleringer for å ha en kontroll på målingene. Spesielt har det vært viktig å ha kontroll på energiflyten i eksperimentalutrustningen. For å kunne stole på målingene må disse stemme overens med den totale varmebalansen.

I tillegg til verifisering, gir en simulering muligheter til å få frem mer informasjon om selve oppvarmingsprosessen og varmetransporten mellom faste materialer og fluider. Dette er informasjon som også kan overføres til bruk i industriell sammenheng.

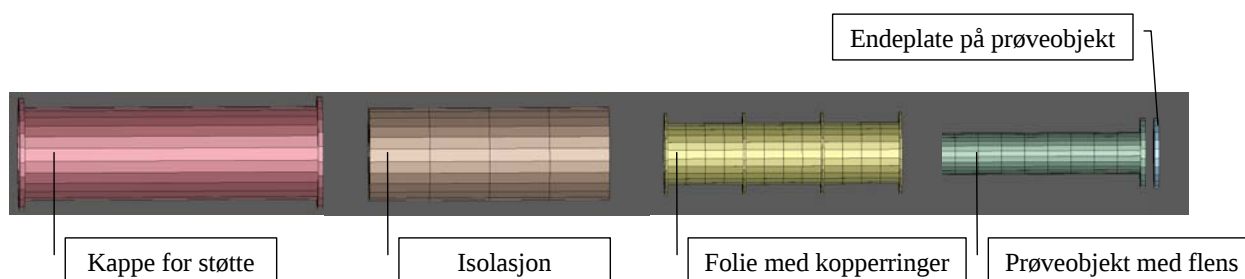
#### **3.1 Oppbygging av simuleringsmodell**

Simuleringsmodellen er bygget på basis av simuleringssystemet Brilliant, ref, [4]. Brilliant er et generelt simuleringssystem for masse og varmetransport, et såkalt CFD-system (Computational Fluid Dynamic). Det spesielle ved Brilliant er at det er basert på objektteknologi og har derfor en unik fleksibilitet til å passe geometri og operere ulike simuleringsmodeller samtidig, såkalt "multi-physics simulations". Dette var en forutsetning for å kunne utføre denne simuleringen.

Simuleringsmodellen er bygget opp i samme dimensjoner som eksperimentalstanden. Det er tatt med detaljer så langt som det anses nødvendig for at modellen skal være representativ. De eneste komponentene som er utelatt er de strømførende skinnene som bindersammen kopperringene. Det vil være noe tap i skinnene, men tapet er relativt lite og mulig å estimere ut fra temperaturen på skinnene.

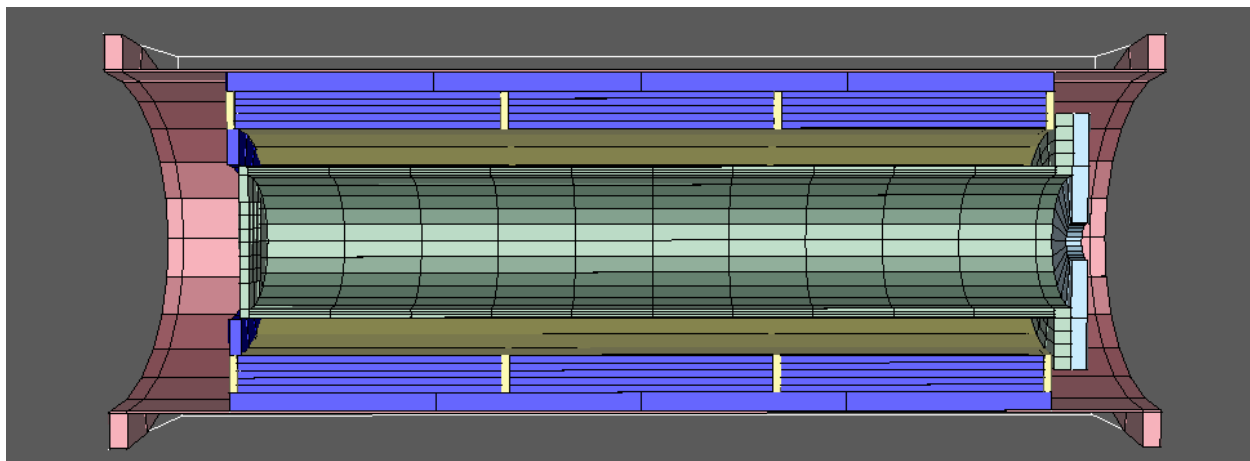


**Figur 2** Modellen sett inn fra enden. Tyngdekraften virker i negativ retning langs x-aksen. Gjennom hullet i endeplaten skimtes prøveobjektet innvendig.

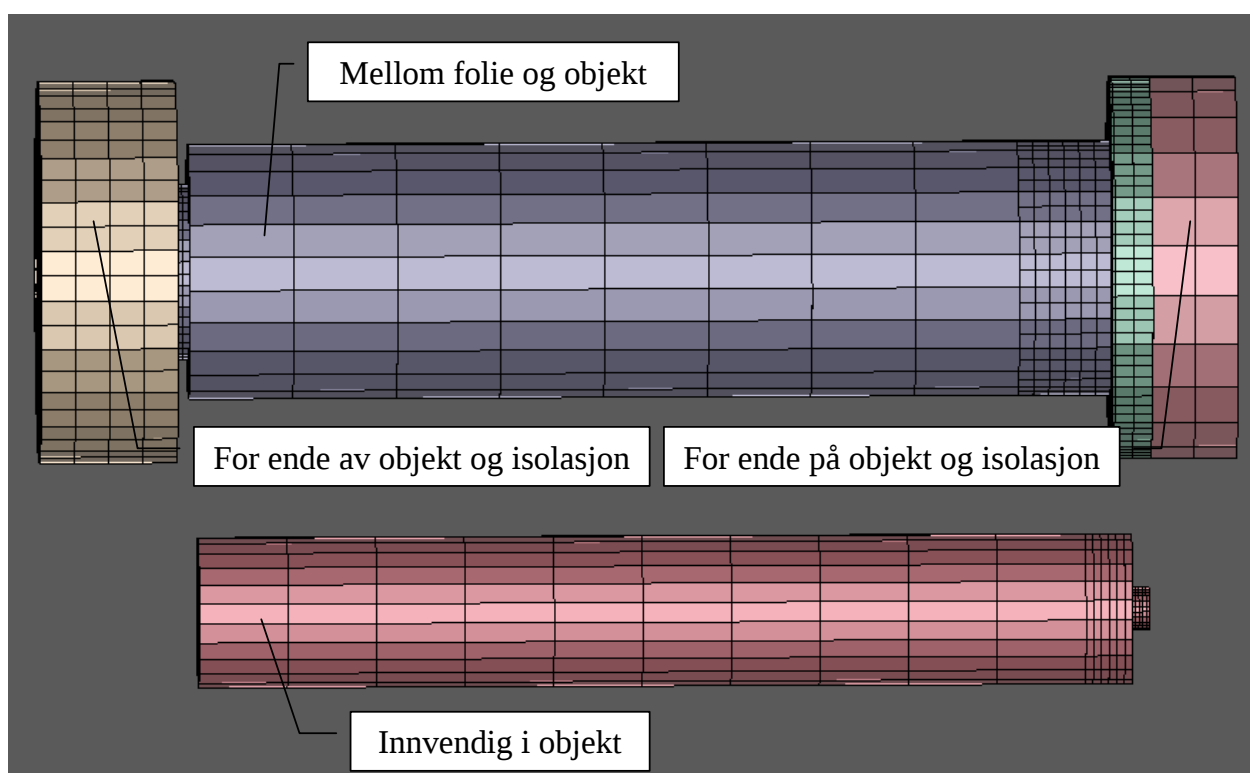


**Figur 3** Modellen er bygget opp av komponentene over. Komponentene ligger inne i hverandre slik Figur 2 viser.

Figur 2 og Figur 3 viser komponentene av fast materiale som inngår. Ytre kappe er av aluminium. Kappen har ingen funksjon utenom å være støtte for varmeelementet. Innenfor kappen ligger et lag isolasjon av Kaowool. Isolasjonen ligger helt inntil folien og mellom kopperringene. Mellom folien og objektet beregnes strømming og stråling. Mellom flensen på objektet og den ytterste kopperringen er det lagt inn en 4 mm spalt slik at luft kan trenge ut. I motsatt ende av objektet (motsatt flensenden) er det en 2 mm bred spalt mellom objekt og isolasjon. Figur 5 viser et snitt gjennom sentrum av simuleringsmodellen for de komponentene det regnes konveksjon.

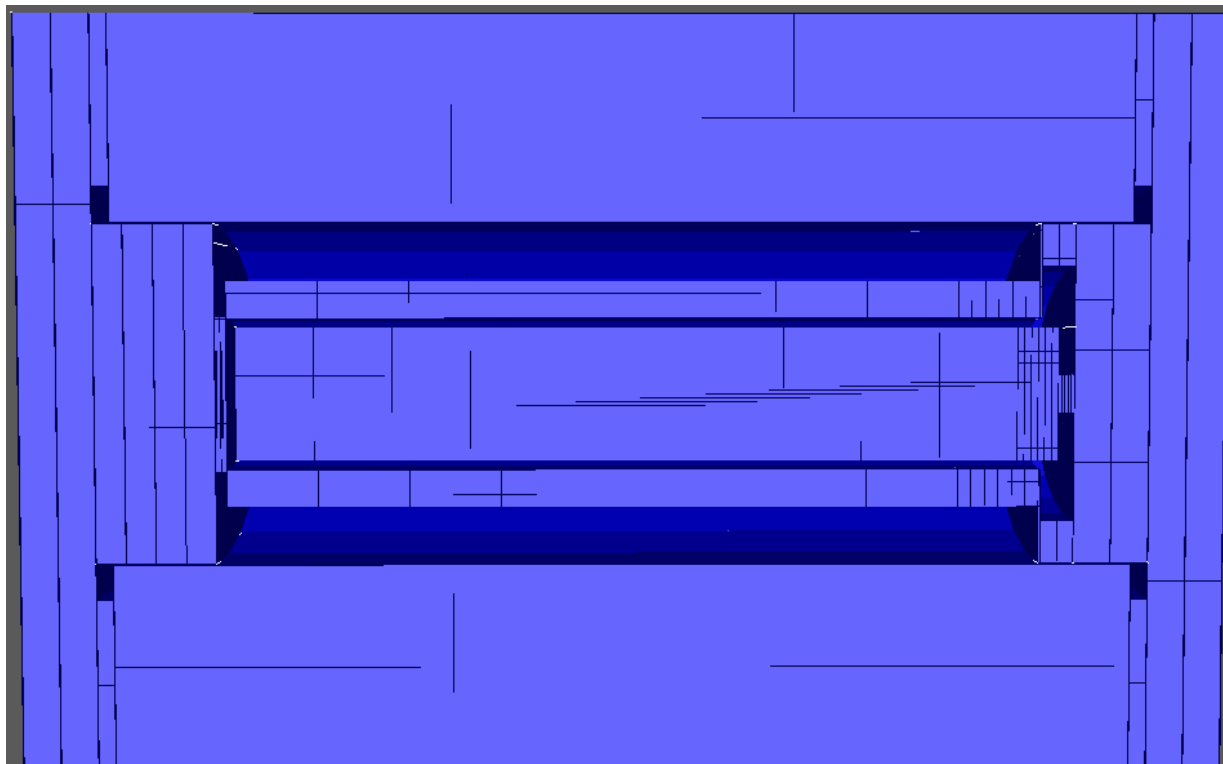


**Figur 4** Figuren viser de faste materialene i modellen gjennomskåret i senter. Det blir regnet konduksjon i alle delene som er vist her.

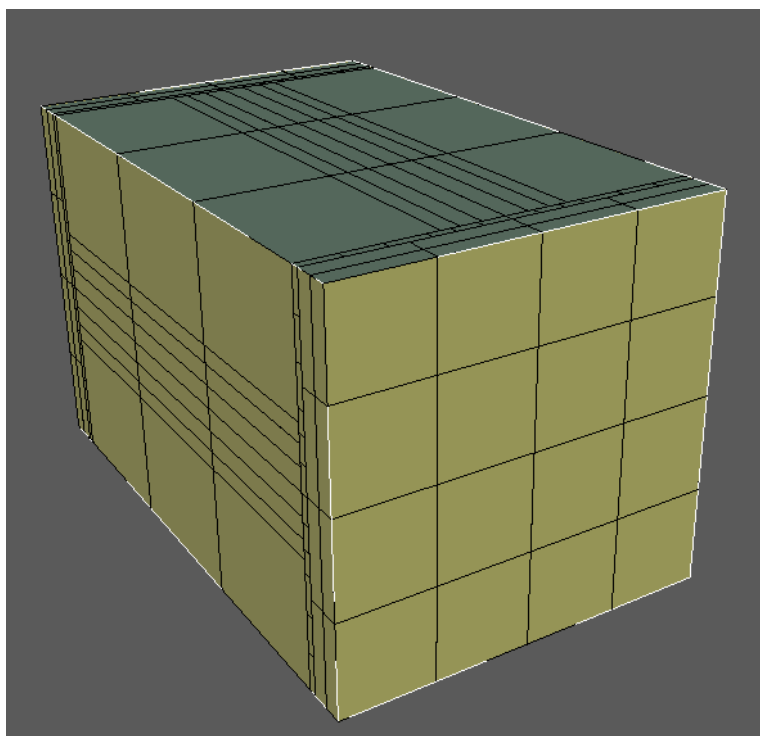


**Figur 5** Figuren viser områder der modell for egenkonveksjonsstrømning er benyttet.

Figur 5 vise områdene der det regnes strømning. Alle områdene henger sammen, men i simuleringen er det bare i området mellom objekt og folie det regnes stråling. Figur 6 vider et snitt gjennom senter av modellen der kun strømningområdene er tatt med. Figur 7 viser den totale modellen sett utenfra. Områdene utenfor den ytre kappen er av liten interesse for simuleringen. Den er tatt med i beregningene kun for å sikre at grensevilkårene ikke påvirker selve oppvarmingsprosessen.



**Figur 6**      **Figuren viser de områdene der det regnes strømming. I tillegg regnes stråling mellom folie og objekt.**



**Figur 7**      **Beregningsmodellen har en endelig utstrekning som vist i figuren. Grensevikårene er fast overflate i bunn og på sidene mens på toppen er det gitt konstant trykk. Dette for at gassen i systemet skal få ekspandere ved oppvarming.**

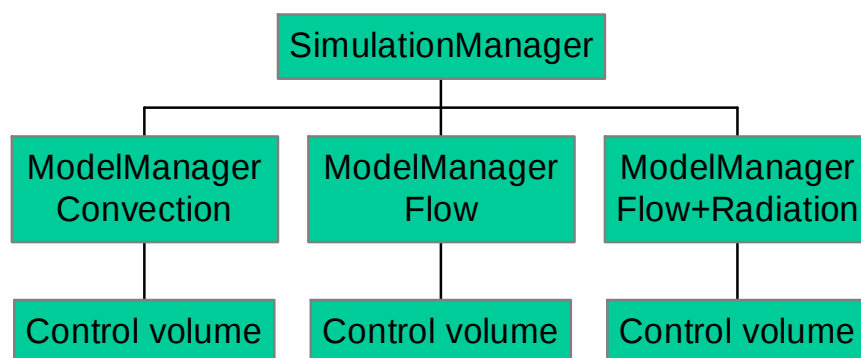
### 3.2 Teoretisk grunnlag for simuleringsmodell

Det teoretiske grunnlaget for Brilliant er for omfattende til å bli presentert i denne rapporten. Teoriene er imidlertid godt dokumentert i en rekke tekstbøker, for eksempel gir ref. [7] en grei introduksjon. Noe grunnelementer og elementer som er spesielle for Brilliant eller er av særlig betydning for denne simuleringen skal likevel behandles her.

Brilliant bygger på prinsippet om konservering av impuls, masse og energi. For et fluid vil det si Navier-Stokes ligninger for impuls, kontinuitetsligningen for masse og energiligningen for energi. Energiligningen behandler imidlertid ikke stråling. Derfor må stråling behandles spesielt, men knyttes opp mot energiligningen. For faste materialer er det normalt bare energiligningen som anvendes. Faste materialer blir imidlertid også påvirket av stråling og energiligningen for faste materialer må derfor også knyttes opp mot behandling av stråling.

Det finnes flere måter å behandle stråling på. Den metoden som er benyttet i Brilliant er den såkalte "Discrete Transfer" metoden, ref. [8] og [9]. Metoden inkluderer absorpsjon i gass og væske samt emissivitet på overflater. I Brilliant er den implementert slik at det blir tatt hensyn til orienteringen av flater. Det vil si at det tas hensyn til skyggeeffekter.

#### Brilliant



**Figur 8** Programstruktur for Brilliant

Brilliant er bygget opp for å anvende forskjellige modeller med interaksjon mellom modellene. Med modeller menes i denne sammenheng en samling av ligninger som til sammen simulerer et fysisk fenomen. For eksempel er termisk konduksjon en modell, turbulent eller laminar strømning en annen modell, spredning av enkeltkomponenter i gass eller væske en modell og stråling en annen modell. De ulike modellene er egne objekter som har sine egne egenskaper. En modell kan imidlertid bygge på en annen modell. Eksempel på det er spredning av gass eller væske som bygger på modell for turbulent strømning. Avhengig av hvilke modeller som anvendes vil grensene mellom modellene bli valgt. Dersom de ulike modellene har felles ligninger vil disse bli løst samtidig. Det er også mulig å anvende samme modell i på flere områder, men med ulike egenskaper i de ulike områdene.

**Figur 8** viser i prinsipper hvordan Brilliant er organisert. Figuren viser bruk av tre modeller, men det er ingen begrensning i antall som kan benyttes. Hver modell administrerer et antall kontrollvolum. Det er ingen bergrensninger i antall kontrollvolum og de ulike modellene kan disponere ulikt antall og dimensjonene kan velges fritt og uavhengig. Kontrollvolumene kommuniserer med hverandre uavhengig av hvilke modeller som de disponeres av.

En vesentlig del av simuleringsmodellen er beskrivelsen av den konvektive varmeovergangen. Brilliant benytter, generelt, veggfunksjonen som bindeledd mellom strømning og faste materialer.

Det gjelder både for impulslikningen og energilikningen. Den veggfunksjonen som anvendes i Brilliant er beskrevet slik den originalt ble presentert i ref. [10]. Det finnes noen varianter som modifierer konstantene i funksjonen for å tilpasse bruken til ulike ruhetsgrader.

Veggfunksjonen gjelder strengt tatt bare for etablert grenseskikt. Det vil si stasjonær strømming over flater. Den er imidlertid det beste estimatet for overføring av impuls og energi mellom faste og flytende materialer ved turbulent strømming og blir ofte benyttet for ikkestasjonære problemer. Den gjelder imidlertid ikke for lave hastigheter. Typiske hastigheter som opptrer i denne simuleringen er under 1 m/s. Det vil si svært lave hastigheter. Ved lave hastigheter anvender derfor Brilliant varmeledningsevnen for det faste og strømmende materialet.

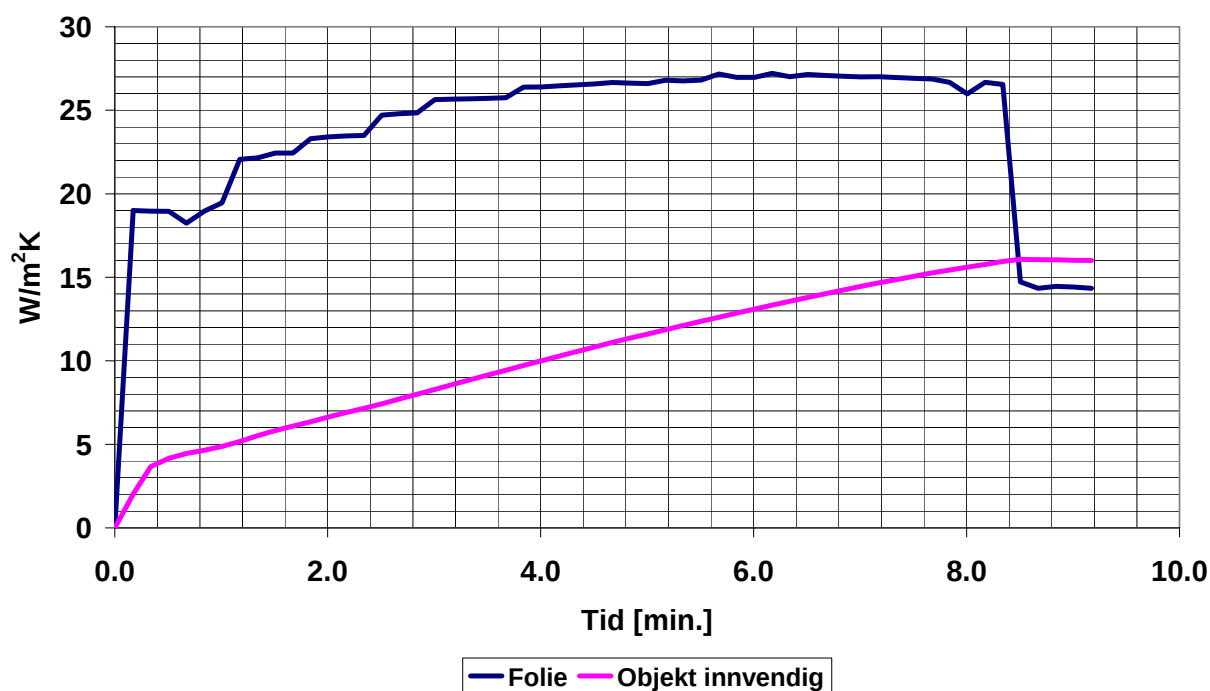
$$\frac{1}{h'} = \frac{l_f}{k_f} + \frac{l_s}{k_s}$$

Her er  $h$  varmeovergangstallet [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ],  $k_f$  og  $k_s$  er respektive varmeledningstall [ $\text{W}/\text{mK}$ ] for fluid og fast materiale.  $l_f$  og  $l_s$  er satt som en fast lengde. Det vil si for lave hastigheter blir varmetransporten styrt av ledningsevnen til de involverte materialene. Den dominerende parameteren ved varmeovergang mellom luft og stål for lave strømningshastigheter er da varmeledningsevnen til luft. I tillegg er det innført en avhengighet av temperaturdifferansen mellom overflaten og det strømmende materialet

$$h = h' \frac{\rho}{\rho_{\text{ln}}} (T_s - T_f)^{0.25}$$

her er  $\rho_{\text{ln}}$  tetthet for luft ved normaltilstanden (trykk 1.01325 bar og  $0^\circ\text{C}$ ). I simuleringene har dette synt seg å gi de beste resultatene. Overgangen mellom bruk av veggfunksjonen og ren varmeledning blir bestemt av den største verdien av de to funksjonene.

Figur 16 viser typiske verdier på konvektiv varmeovergangskoeffisient mellom folie og luft (objekt på utsiden og luft) og mellom objekt og luft på innsiden av objektet. Som det fremgår av figuren varierer varmeovergangskoeffisienten med energitilførsel, det vil si temperaturdifferansen mellom fast overflate og det strømmende mediet.



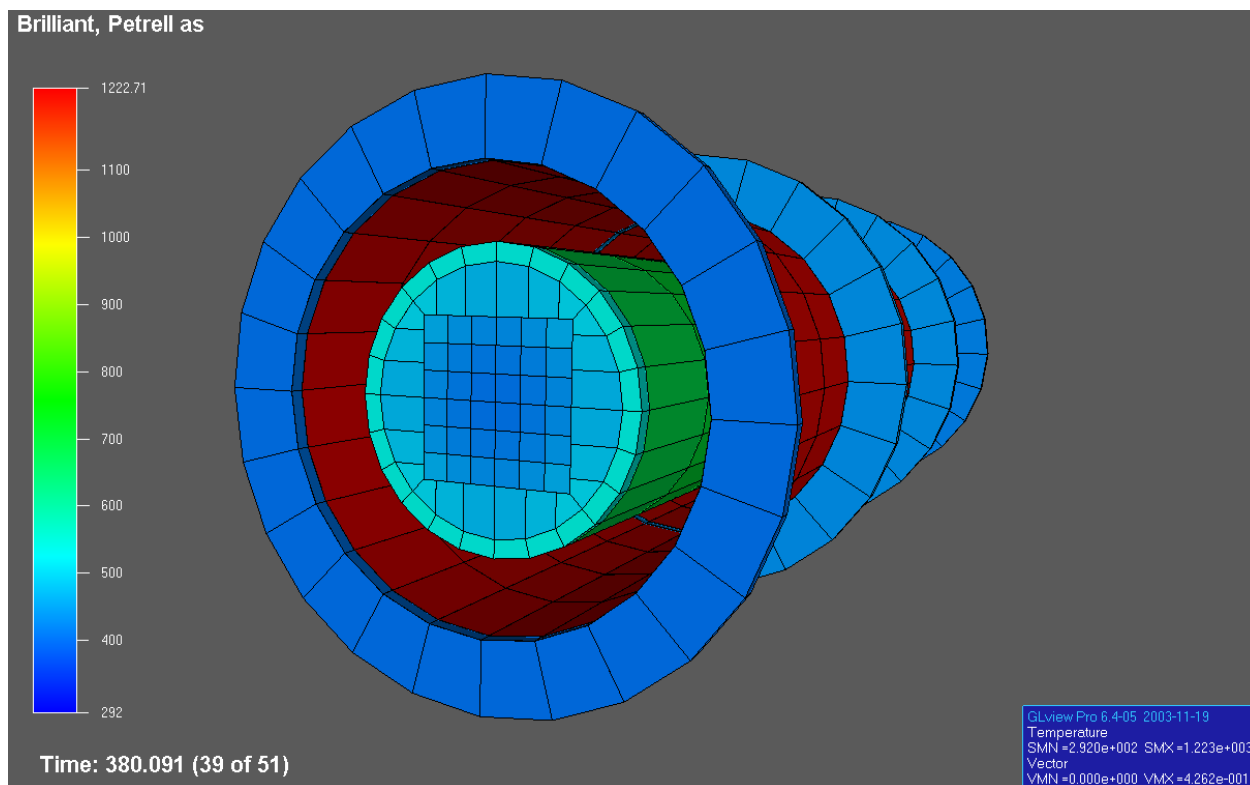
**Figur 9** Figuren viser beregnet varmeovergangskoeffisient i mellomrommet mellom folie og objekt, og objekt og innvendig luft, case-9-03 (Brilliant).

Brilliant er bygget for å handtere flere faser av en substans og overgang mellom fasene. Det er derfor bygget inn modeller for simulering av materialegenskaper til fluider samt gjennomføring av "flash" beregninger for å gi konsentrasjoner i de ulike fasene. Noen av eksperimentene omhandler fordampning av vann. Det anvendes derfor også termodynamiske egenskaper for vann. De termodynamiske modellene er beskrevet i ref. [12]. I referansene [11] og [13] er programpakken som anvendes, beskrevet.

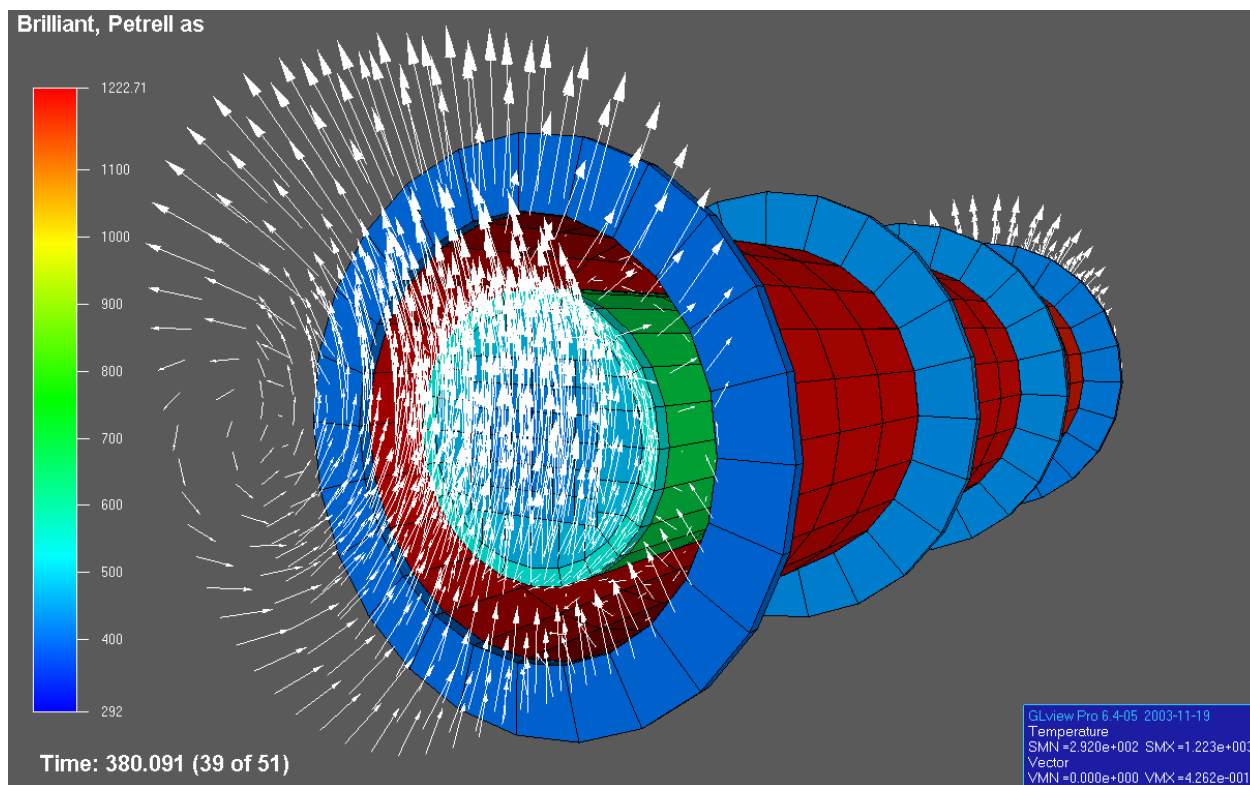
### 3.3 Resultater av simulering

Noe av bakgrunnen for å gjøre simuleringer var å kartlegge strømmingen mellom folie og objekt. Det var på forhånd antatt at det ville opptre en sirkulasjon oppover langs folieflaten og nedover langs objektflaten. Figur 10 viser et bilde av temperaturdifferansen mellom folien og objektet. Figur 11 strømmingen for enden av objektet og Figur 12 tar med strømmingen mellom flatene. Det syner seg at luften mellom objektet og folien først ekspanderer og det strømmer ut av området. Deretter etableres en strøm inn på undersiden av objektet som trekker innover fra flensenden, opp langs sidene og ut på toppen av flensen. Figur 12 viser en sirkulasjon i lengderetning langs objektet. Sirkulasjonen er større enn det lekkasjen inn i underkant av objektet tilsier. Mellom folie og objekt er det hastigheter i størrelsesorden 0,1 m/s, mens det i spalten mellom flensen og kopperringen er hastigheter i størrelsesorden 0,3 m/s.

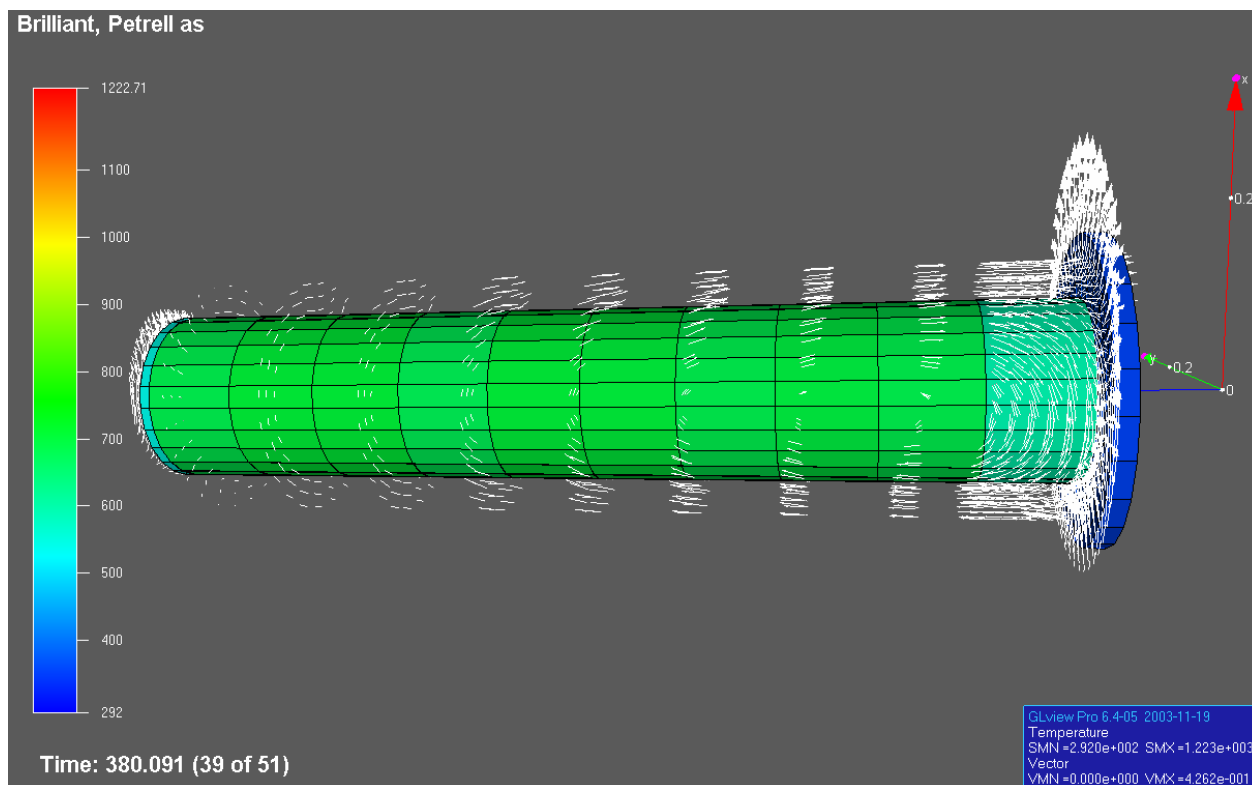
Figur 13 viser en typisk strømmingssituasjon innvendig i objektet. Her er den typiske strømmingen oppover langs den varme flaten og nedover i midten, men også her er det en strømming i lengderetning som går innover i bunn og utover i toppen av objektet. Hastighetene er imidlertid lave, opp til 0,04 m/s.



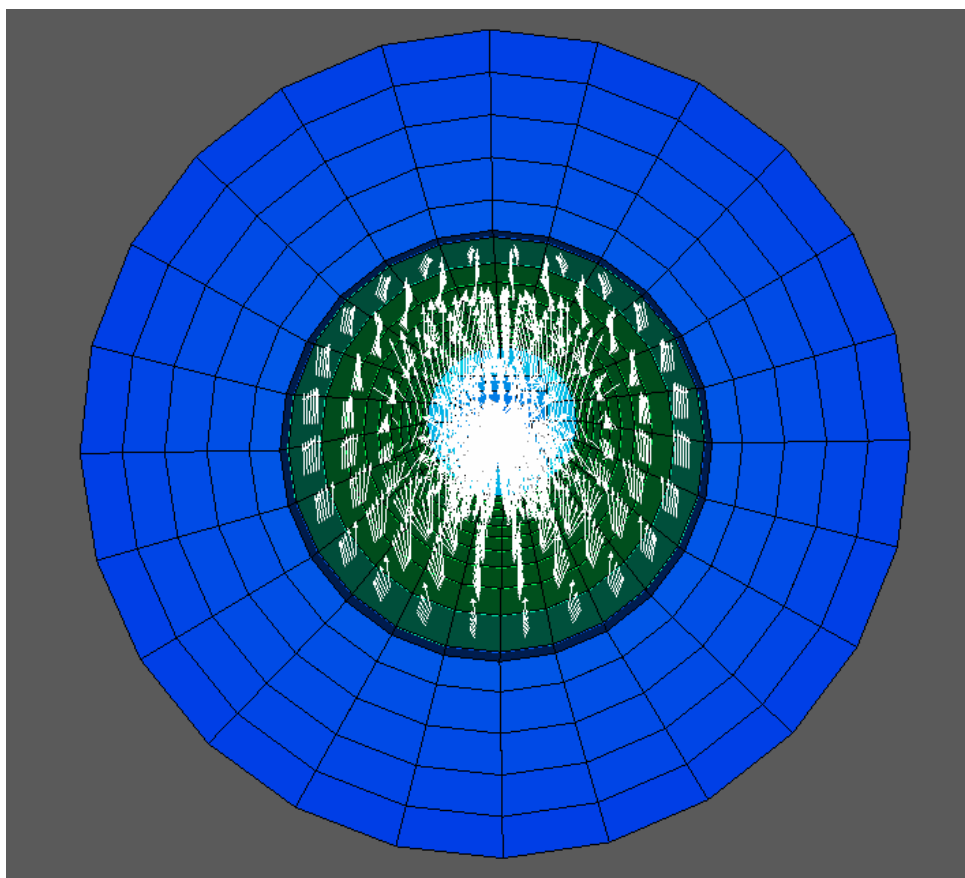
**Figur 10** Figuren viser folie og kopperringe som omslutter objektet. Figuren viser temperaturdifferansen mellom de to enhetene. Temperaturene er vist i K.



**Figur 11** Figuren viser objekt, folie og kopper samt strømning utenfor og mellom objekt og folie.

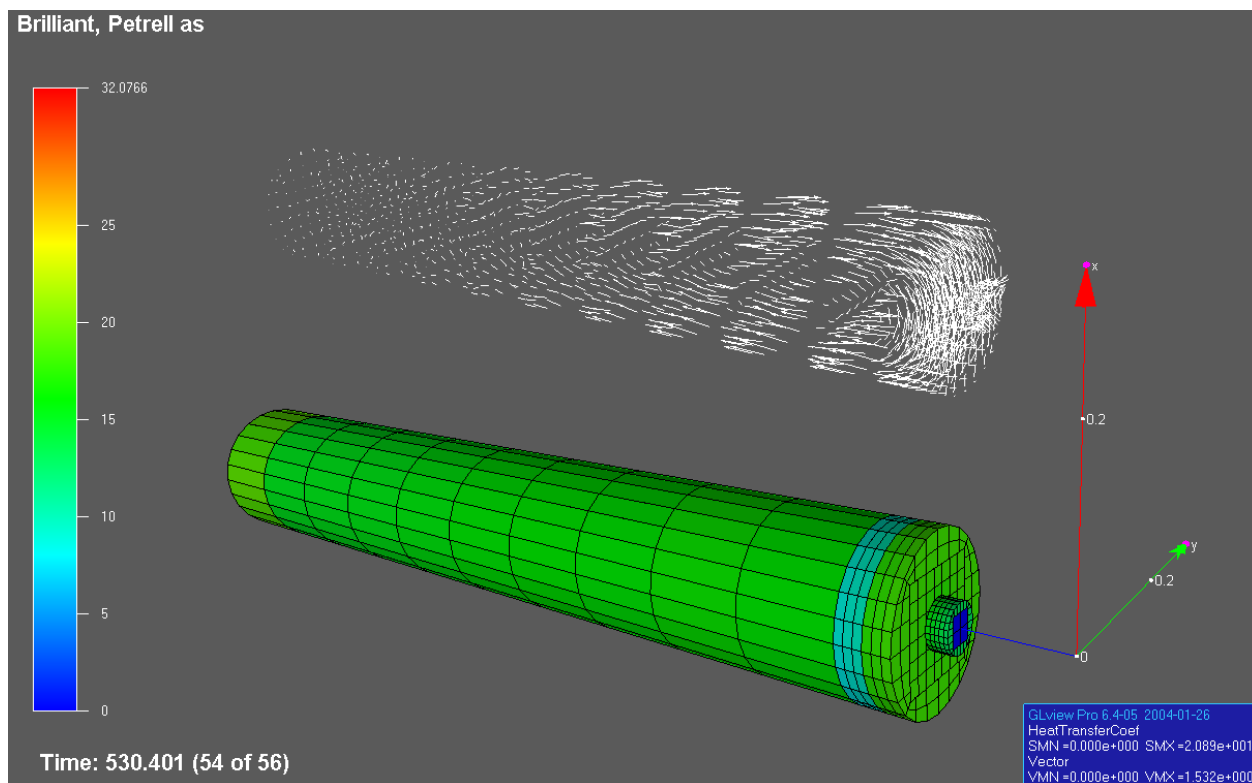


**Figur 12** Figuren viser strømning mellom folie og objekt sett fra siden, (Brilliant).



**Figur 13** Figuren viser strømning innvendig i objekt sett fra enden.

Figur 14 viser variasjon i varmeovergangskoeffisienten innvendig i objektet. De laveste verdiene ligger i området  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mens de høyeste ligger opp mot  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Gjennom utløpet er det beregnet verdier i området  $30 \text{ W/m}^2\text{K}$ , men de er av mindre betydning for temperaturen innvendig i objektet. De høyeste verdiene er i området rundt utløpet. Det er her de største hastighetene



**Figur 14** Figuren viser varmeovergangskoeffisienten [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ] for varmeovergang innvendig i objektet. Vektorer som symboliserer strømmingen er også vist, case-9-03 (Brilliant).

Resultatene fra simuleringene som viser sammenligning med eksperimentene er vist i Appendiks B Beregningsresultater.

## 4 Eksperimenter

Eksperimentene innenfor dette års prosjekt hadde to formål: Det ene var å fastlegge emissiviteten til folien og det andre var å supplere fjorårets eksperimenter i forhold til resultatene fra simuleringene.

Det var også planer om å bytte materiale i folien i eksponeringsenheten. Det ble gjort nokså omfattende undersøkelser om hvilke materialer som egnet seg. Konklusjonen ble å beholde rustfritt stål, det samme materiale som tidligere. Det var to grunner til det:

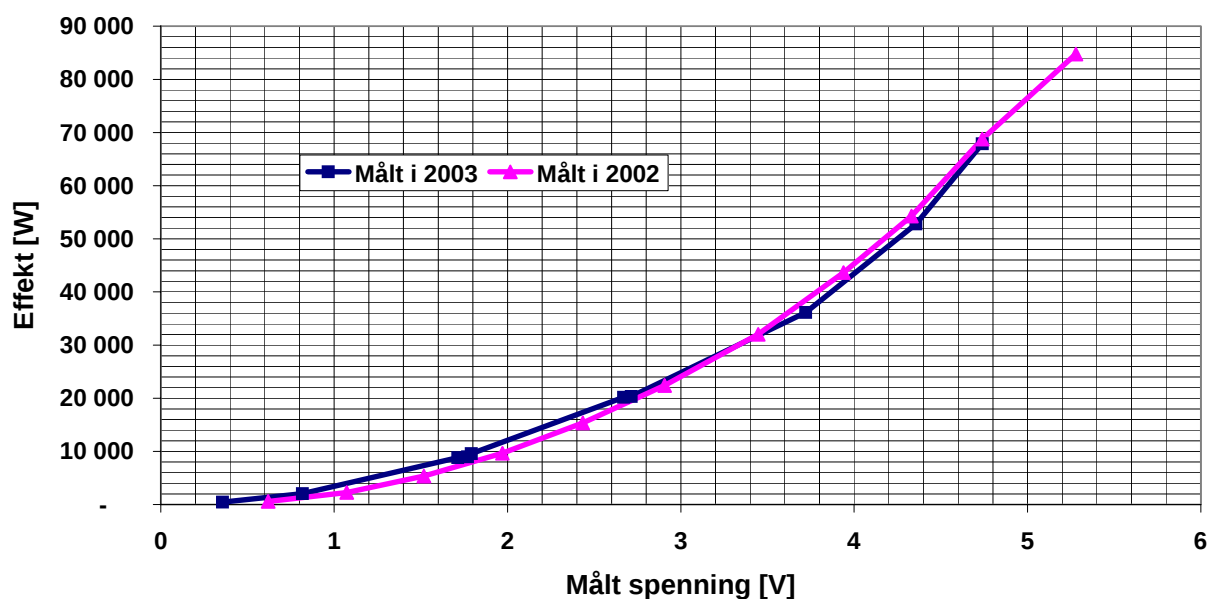
- Med eksisterende materiale kan en komme opp i overflatetemperaturer på folien på  $1100^\circ\text{C}$ . Dette er tilfredsstillende. På basis av de simuleringene som er bygget opp kan det gjøres ekstrapoleringer med rimelig grad av sikkerhet. Usikkerheten vil ligge i nøyaktigheten av materialegenskapene til de materialene som anvendes.
- Det finnes flere materialer som har høyere smeltetemperatur enn rustfritt stål. Problemet ligger i oksydering ved høye temperaturer. I tillegg leveres denne type tynne materialer i noe ukurante dimensjoner.

Tabell 1 viser årets eksperimenter.

**Tabell 1 Oversikt over**

| Eksperiment | Temperatur [°C]     | Vannfylling [Kg] | Kommentar                                      |
|-------------|---------------------|------------------|------------------------------------------------|
| Case 1-03   | 900                 | 2.98             |                                                |
| Case 2-03   | 900                 | 1.5              |                                                |
| Case 3-03   | 900                 | 2.               |                                                |
| Case 4-03   | 1000                | 2                |                                                |
| Case 9-03   | 900°C               | ingen            | Repetisjon av case 5 fra forrige års prosjekt. |
|             |                     |                  |                                                |
|             |                     |                  |                                                |
|             |                     |                  |                                                |
| Emissivitet |                     |                  |                                                |
| Em 2        | Måling på ny folie. |                  |                                                |
|             |                     |                  |                                                |

Det ble gjennomført ny kalibrering for å fastlegge sammenhengen mellom logget signal og effekt. Dette ble gjennomført i samarbeid med representant for NEMCO. Resultatene var i god overensstemmelse med tidligere kalibrering.



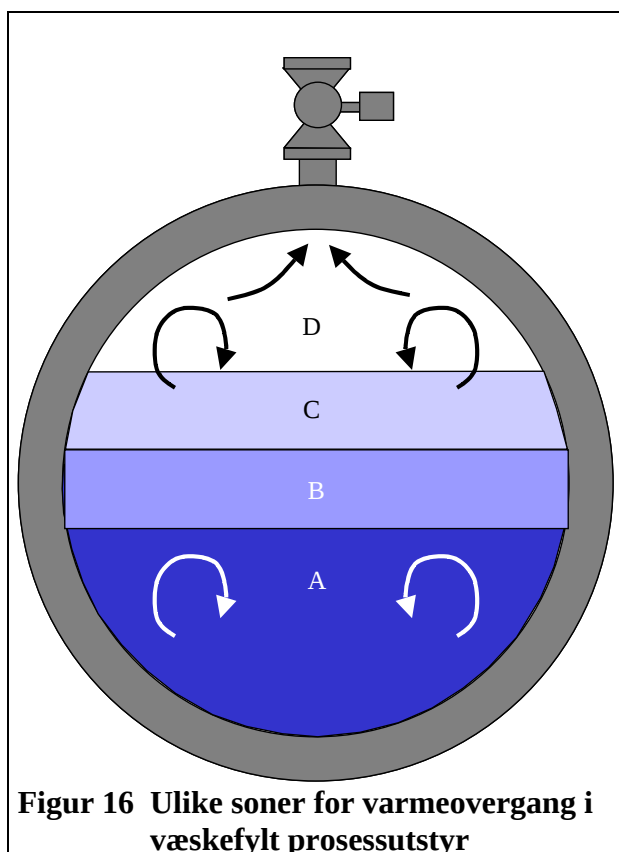
**Figur 15** Figuren viser sammenheng mellom målt effekt og målt signal.

Resultatene fra eksperimentene er vist i Appendiks A. Det ble gjennomført en repetisjon av eksperiment nr. 5 fra 2002 for å verifisere resultatene. Videre ble det gjennomført noen flere beregninger med ulik fylling av vann i objektet.

## 5 Varmetransport og varmeovergang i prosesskomponenter

Konvektiv varmeovergang er vesentlig for beregning av respons fra en brann som eksponerer et objekt som inneholder gass og veske. Varmeovergangen har en vesentlig innflytelse på temperaturen i det faste materialet. Det gjelder varmeovergangen mellom fast materiale og gass så vel som fast materiale og væske.

Konvektiv varmeovergang er avhengig av strømningshastighet. Når et prosessanlegg eksponeres for brann gjøres en del operative tiltak for å redusere konsekvensen av brannen. Prosessegmentet som eksponeres isoleres ved å stenge ESD-ventilene (Emergency Shut Down) i segmentet. Samtidig åpnes EBD-ventilen (Emergency Blow Down) for trykkavlastning.

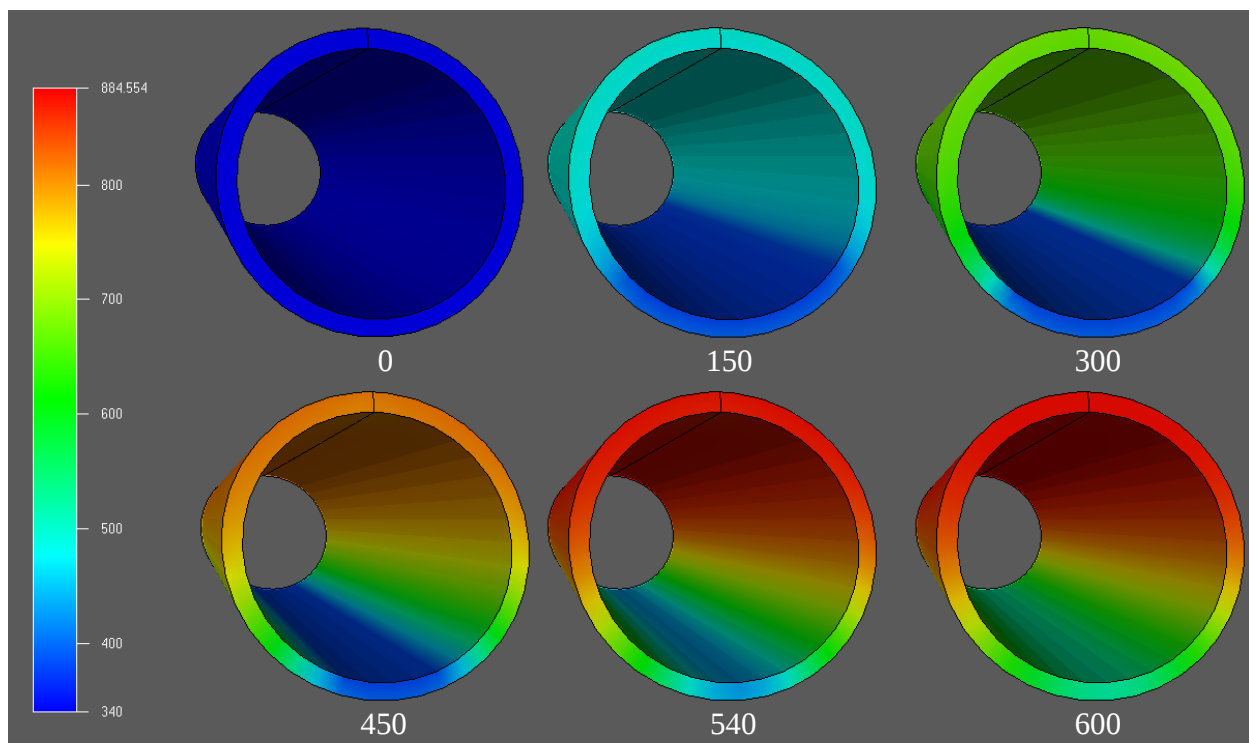


**Figur 16 Ulike soner for varmeovergang i væskefylt prosessutstyr**

I denne situasjonen er det lite strømming i systemet. I en tidligfase, etter ESD-ventilene er stengt, vil væske renne til det laveste nivået i systemet og bli liggende rolig. Gass vil strømme mot EBD-ventilen og skape en viss bevegelse. Som regel er EBD-ventilen knyttet opp mot en tank med noe volum. Dermed vil bevegelsene i gassen være begrenset (sone C og D, Figur 16). Bevegelsen i væsken (sone A) vil i stor grad være bestemt av egenkonveksjon forårsaket av oppvarming eller nedkjøling fra skallveggen. Ved trykkavlastning og oppvarming vil det også kunne foregå koking av væsken, noe som vil forårsake bevegelse på væskeoverflaten (sone B). Ved kraftig koking kan dråper rives med og treffe veggen i gassonen (sone C). Det vil gi en effektiv fordampning av disse dråpene.

Hver av sonene som er illustrert i Figur 16 har sin spesielle forhold for varmeovergang. Betydningen av hver enkelt sone vil variere med varmebelastning, sammensetning av væske og væsknivå. Innvendig varmeovergang i

prosessutstyr eksponert for brann, er komplisert å modellere. I dette prosjektet er VessFire benyttet for å beregne prosessen som foregår inne i objektet. Modellene for varmeovergang er beskrevet i [3].



**Figur 17** Figuren viser temperaturvariasjonen langs objektveggen som funksjon av tid. Fra 450 sekunder syner sone D (Figur 16) seg klart. Temperaturen på figuren er i Kelvin (VessFire).

Ved måling av lufttemperatur og sammenligning med beregninger, må det tas hensyn til at termoelementet som anvendes til måling ikke alltid viser den reelle lufttemperaturen. Det er to årsaker til det:

- Varmerovergangen mellom termoelementet og luften som skal måles er avhengig av strømningsforholdene omkring termoelementet. Ved liten bevegelse i luften vil konvektiv varmeovergang være lav.
- Termoelementet bli påvirket av stråling fra omliggende flater.

Ved lave temperaturer på omgivelsene, under 300 °C, vil som regel den konvektive varmeoverføringen dominere. Ved høyere omgivelsestemperaturer vil varmeoverføring ved stråling dominere. I prinsippet kan en korrigere for disse forholdene enten ved å korrigere målt temperatur eller ved å korrigere beregnet temperatur. Det enkleste er å korrigere beregnet temperatur. Dersom det er støy på målingene vil det være svært vanskelig å korrigere målt temperatur.

I de beregningene som er gjort her er de beregnede temperaturene korrigert. Dette er gjort ved å korrigere temperaturen etter

$$\frac{m_t c_p \Delta T}{\Delta t} = Q_c + Q_t$$

der  $\Delta T$  er temperaturøkningen på termoelementet over tiden  $\Delta t$ ,  $m_t$  er massen til termoelementet per m og  $c_p$  er spesifikk varmekapasitet for termoelementet (Inconel). Den konvektive varmeovergangen til termoelementet regnes som

$$Q_c = h_t A_t (T_l - T_t)$$

der  $A_t$  er overflateareal pr. m på termoelementet,  $T_l$  og  $T_t$  er temperaturen henholdsvis for luft og termoelement og  $h_t$  varmeovergangstallet som er gitt som funksjon av Nusselt og Reynolds tall

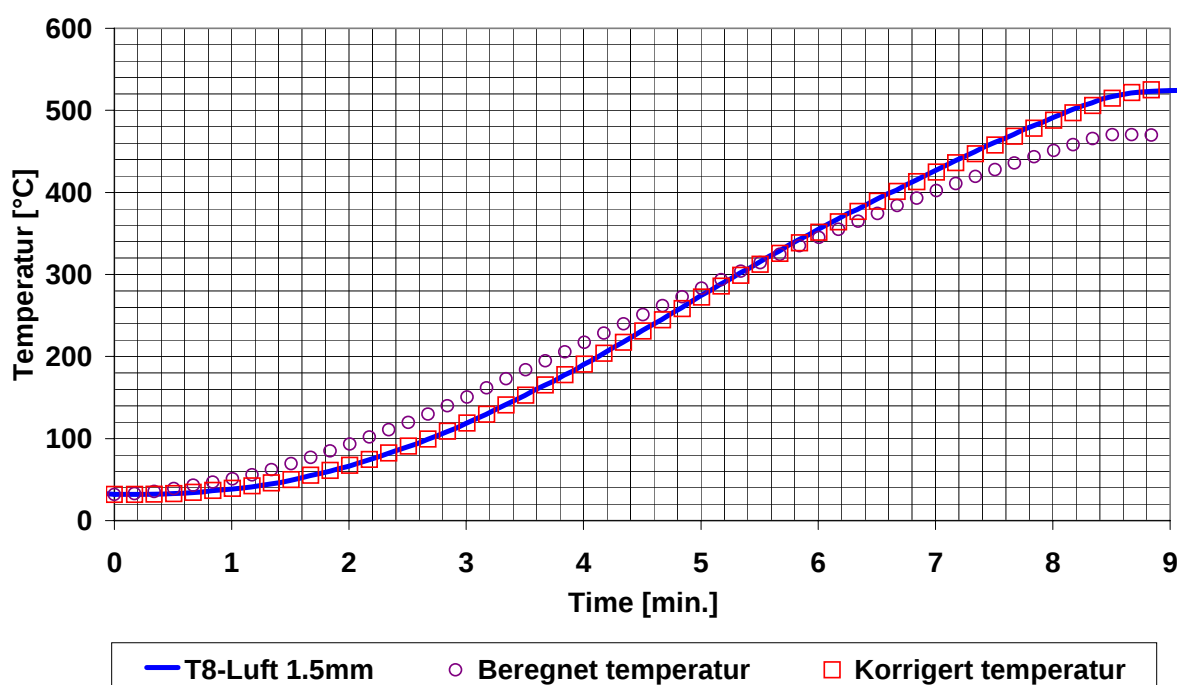
$$h_t = 0.2673 \frac{\lambda}{d_t} Nu \cdot Re^{0.33}$$

der  $\lambda$  er varmeledningstall for luft og  $d_t$  er diameteren på termoelementet. Varmeovergangen ved stråling er beregnet som stråling mellom en sylinder inne i en sylinder. Det gir en netto varmetransport ved stråling

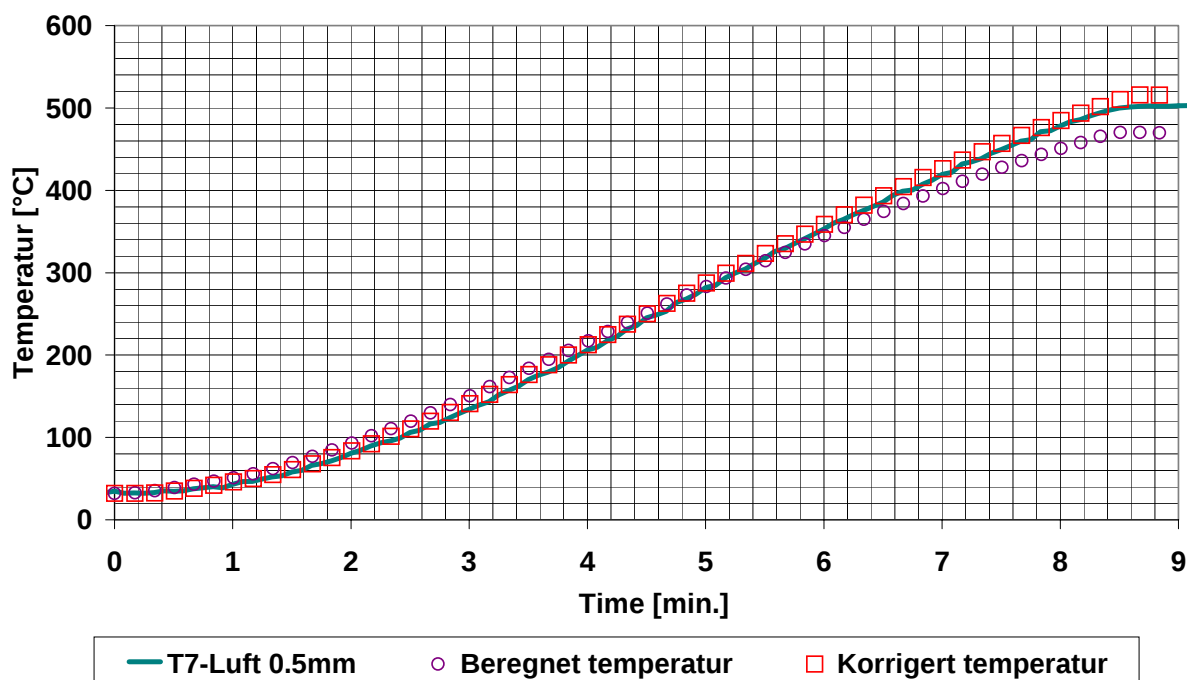
$$Q_s = \frac{A_t \sigma (T_s^4 - T_t^4)}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{A_t}{A_s} \left( \frac{1}{\varepsilon_s} - 1 \right)}$$

Her er  $A_s$  areal av omsluttende sylinder per m,  $\varepsilon_t = 0.3$  er emissiviteten til termoelementet (Inconel, [15]),  $\varepsilon_s = 0.7$  som er emissiviteten til prøvestykket innvendig og  $\sigma$  som er Stefan-Boltzmann konstant for svart stråling.

Figur 18 og Figur 19 viser resultatet av korrigeringen for to ulike tykkelser av termoelementer. Begge tykkelsene ble benyttet samtidig for å kunne sammenligne resultatene. Samme korreksjon er benyttet på begge tykkelsene, bare korrigert for diameter og masse.



**Figur 18** Figuren viser målt temperatur for 1.5mm termoelement, temperatur beregnet med Brilliant for case-9-03 og temperatur korrigert for stråling og konveksjon (Brilliant).



**Figur 19** Figuren viser målt temperatur for 0.5mm termoelement, temperatur beregnet med Brilliant for case-9-03 og temperatur korrigert for stråling og konveksjon (Brilliant).

## 6 Emissivitet

Emissivitet er en viktig parameter ved beregning av varmeovergang ved stråling. Den har en verdi mellom 0 og 1, og den angir forholdet mellom utstrålt energi og svart stråling. Emissiviteten for et materiale er avhengig av temperaturen på materialet,  $T$ , bølgelengde av utstrålt energi,  $\lambda$ , samt utstrålingsvinkel i rommet der  $\theta$  angir dreining omkring normalen til den strålende overflaten og  $\alpha$  er utstrålt vinkelen i forhold flatenormalen.

$$\varepsilon(\lambda, T, \alpha, \theta) = \frac{i_{\lambda}(\lambda, T, \alpha, \theta)}{i_{\lambda b}(\lambda, T)}$$

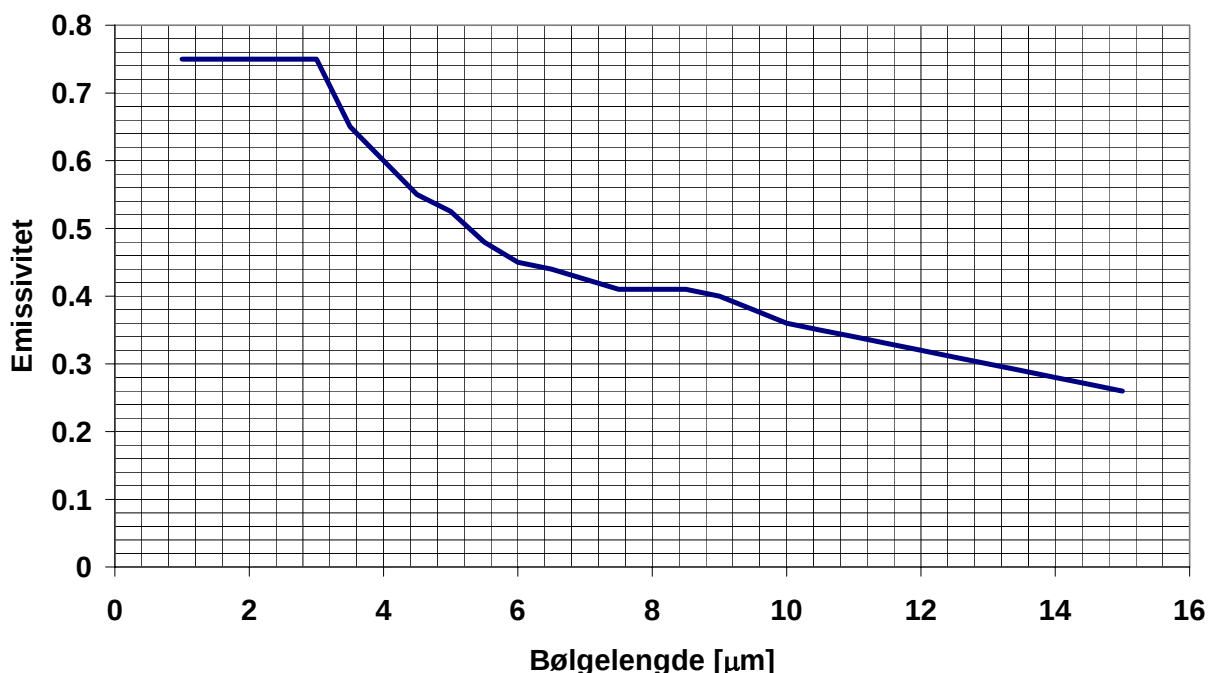
$i_{\lambda}$  er spektral intensitet definert som

$i_{\lambda} \equiv \text{strålingsenergi/tid/areal normalt til strålingsretning/romvinkel/bølgelengde.}$

For praktiske formål gjøres noen forenklinger ved at emissiviteten antas å være uavhengig av retning. En overflate som har denne egenskapen kalles for en diffus flate (diffus emitter) eller en Lambert overflate. En spektral hemisfærisk emissivitet defineres da som

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{i_{\lambda}(\lambda, T)}{i_{\lambda b}(\lambda, T)}$$

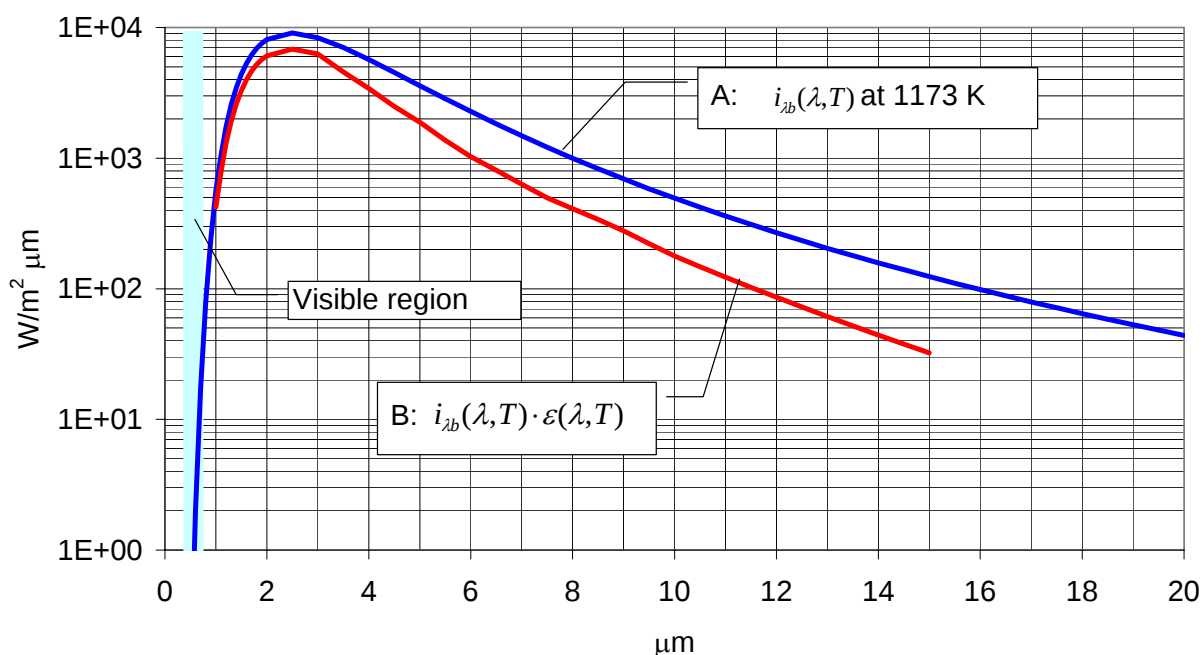
Ved å integrere over bølgespekteret finnes den totale emissiviteten for materialet ved en gitt temperatur. Figur 20 viser målt emissivitet for et materiale noe tilsvarende det som ble benyttet i folien. Dataene er tatt fra [14].



**Figur 20** Emissivitet som funksjon av bølgelengde ved 523 °C for stål med 5.0% Cr, 1.3% Mo, 0.9% Si, 0.5% V, 0.4% C, 0.3% Mn og Fe. Dataene er hentet fra [14].

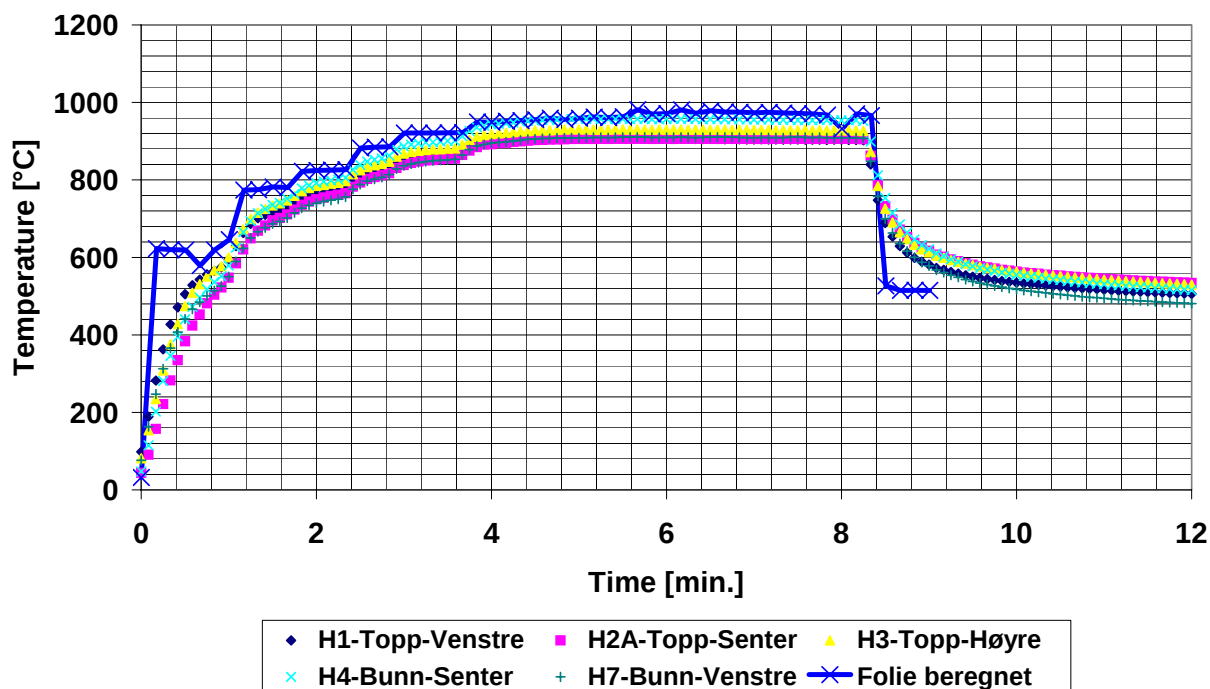
Figur 21 viser energiinnholdet i termisk stråling ved temperatur 900 °C. Dette tilsvarer omtrent konstant temperatur i forsøk Case 9-03. Kurve A viser energiinnhold for svart stråling og kurve B viser energiinnhold i utstrålt energi basert på spektral emissivitet som vist i Figur 20.

Ved å integrere de to kurvene A og B med hensyn på bølgelengde finnes total emissivitet ved gitt temperatur. Det forutsettes her at emissiviteten ikke varierer vesentlig med temperaturen. Resultatet er en total emissivitet i området 0.55.



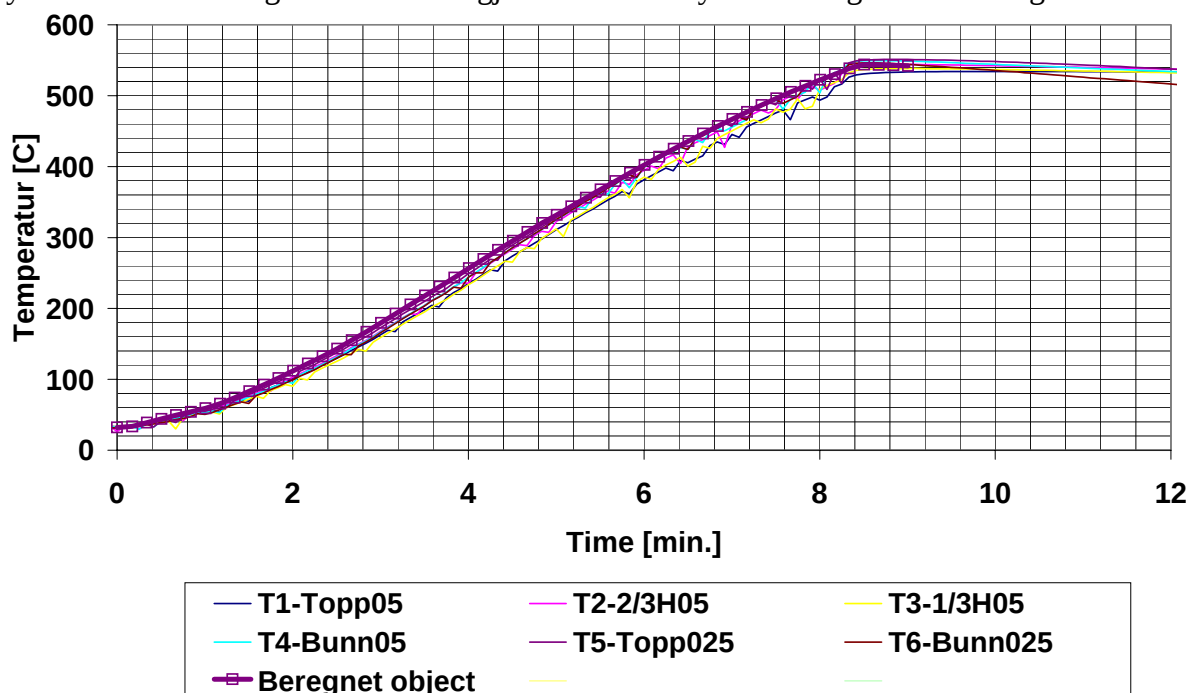
**Figur 21**      **Figuren viser energiinnhold som funksjon av bølgelengde ved 900 °C (1173 K). Dette tilsvarer omtrent den stabile delen av temperaturen på folien for Case 9-03.**

Simuleringene utført med Brilliant baseres på effektkurven fra målingene. Denne kurven gir ved konstant temperatur på folien tilnærmet den effekten som overføres mellom folien og prøveobjektet. Det vil si at den beregnede temperaturen på folien er i hovedsak en funksjon av emissiviteten til folien. Ved høy emissivitet på folien blir folietemperaturen lav. Senkes emissiviteten til folien, øker temperaturen på folien for å overføre den samme effekten til prøveobjektet. Emissiviteten til objektet har også en innflytelse på folietemperaturen, men innflytelsen er mindre på grunn av at formfaktoren fra objektet til folien er mindre enn formfaktoren fra folien til objektet. Det vil si at folien ser seg selv og dermed bidrar til å opprettholde sin egen temperatur.



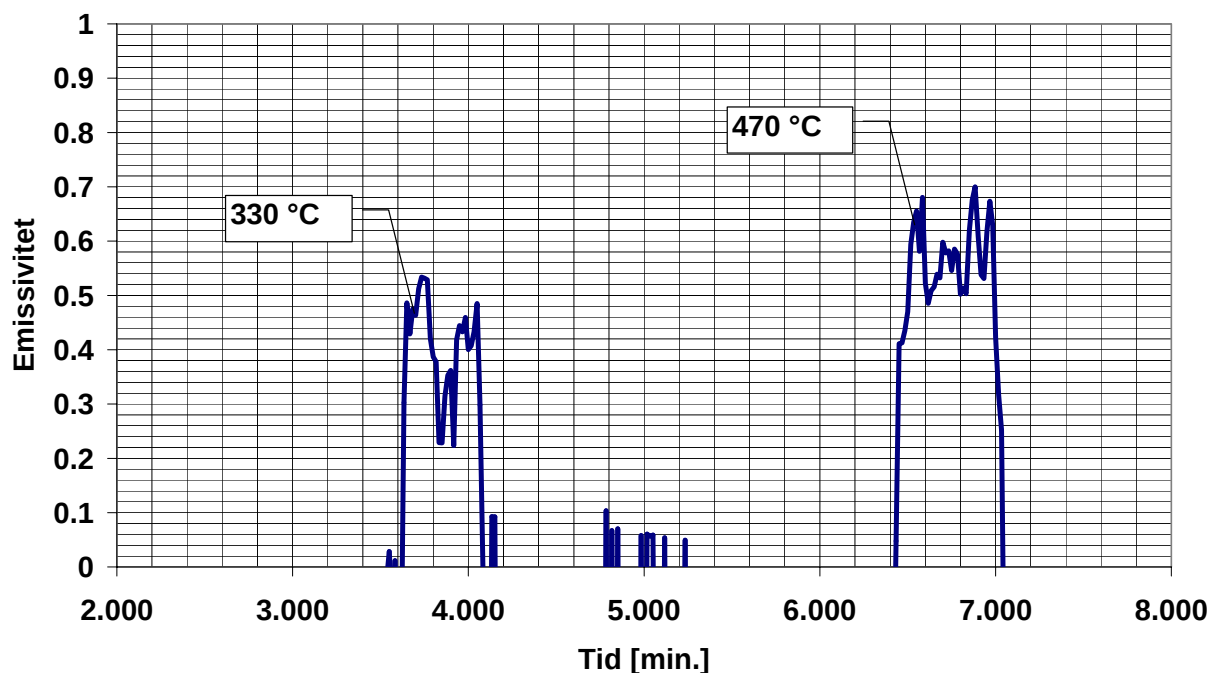
**Figur 22** Figuren viser simulering av folietemperaturen utført med Brilliant sammenlignet med målte verdier. Anvendt emissivitet er 0.55. Beregningene viser en at det er en viss treghet i termoelementene i oppvarmingsfasen. Case-9-03

Dette forholdet gjør at folietemperaturen kan benyttes som korreksjon for å finne relevant emissivitet på folien. Når en simulering viser riktig folietemperatur og samtidig viser riktig objekttemperatur, vil de riktige emissivitetene være anvendt. Dette forutsetter at effekten inn i systemet er målt riktig, det ble derfor gjennomført en ny kalibrering som vist i Figur 15.



**Figur 23** Figuren viser beregnet temperatur på objektet sammenlignet med målt temperatur ved bruk av emissivitet for objektet på 0.7 og emissivitet på folie 0.55, case-9-03 (Brilliant).

Stråling fra folien ble også forsøkt målt med hjelp av fluksmeter holdt inn mot folien. Fluksmetret målte i denne situasjonen både stråling og konvektivt bidrag. Målingene ble foretatt uten objektet til stede, noe som gav en økt konveksjon omkring folieflaten. En ytterligere usikkerhet ligger i at fluksmetret faktisk påvirket folien dersom den ble holdt for nært inn til folieflaten. Figur 24 viser noen av resultatene fra denne målingen. Målingen ble gjort i forbindelse med innsetting av ny folie. Denne ble gradvis oppvarmet og følgelig oksidert. Målingene må sees på som et supplement til data fra litteraturen som vist i Figur 20 samt resultatene fra beregningene med Brilliant. På basis av tilgjengelige data, målinger og beregninger kan det med rimelig god sikkerhet antas at den totale emissiviteten til folien ligger i område 0.55 og at emissiviteten for objektet ligger i området 0.7. Dette er også i samsvar med data fra [15] og [16].



**Figur 24** Resultat fra måling av emissivitet på folie ved hjelp av fluksmeter.

VessFire forutsetter at varmekraften som spesifiseres eksponerer direkte overflaten til prosesskomponenten eller segmentet. Det er ekvivalent med en optisk tykk flamme som omslutter komponenten. Formfaktoren mellom flammen og prosesskomponenten er lik 1.

For å finne eksponerende fluks i eksperimentene benyttes temperaturen på folien. Folien har en indre diameter på 300mm og prøvestykket har en ytre diameter på 202mm. Det vil si at folien ser en del av seg selv. For å finne riktig varmekraft slik den er definert i VessFire må en innføre en ekvivalent emissivitet mellom folien og objektet. Dette er gjort ved å ta utgangspunkt i stråling mellom en sylinder inne i en sylinder. For to uendelig lange sylindere gjelder

$$q_{Net} = \frac{\sigma(T_R^4 - T_r^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{d_r}{d_R} \left( \frac{1}{\epsilon_R} - 1 \right)}$$

For endelig lange sylindere er dette en tilnærming, men med akseptabel nøyaktighet.  $T_R$  og  $\epsilon_R$  er henholdsvis temperaturen og emissiviteten på folien,  $T_r$  og  $\epsilon_r$  er temperaturen og emissiviteten på

overflaten av objektet,  $d_R$  og  $d_r$  er radiene på folien og objektet og  $q_{\text{net}}$  er netto overført energi til objektet. Ekvivalent emissivitet kan nå regnes ut som

$$\frac{1}{\varepsilon_e} = \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{d_r}{d_R} \left( \frac{1}{\varepsilon_R} - 1 \right)$$

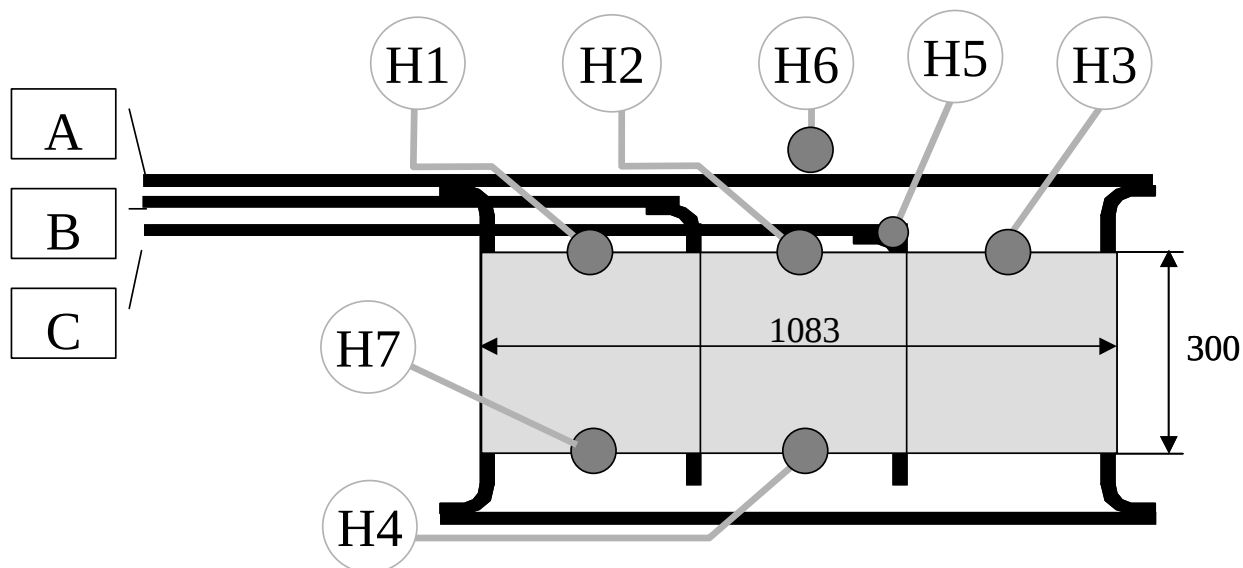
Med en emissivitet på folien på 0.55 og 0.7 på objektet gir dette en ekvivalent emissivitet på 0.56. Denne verdien er benyttet ved simulering av eksperimentene. Det er imidlertid bare for eksperimentene denne omregningen skal benyttes. Ved simulering der flammen direkte eksponerer objektet skal emissiviteten for objektet benyttes uten omregning.

## 7 Referanseliste

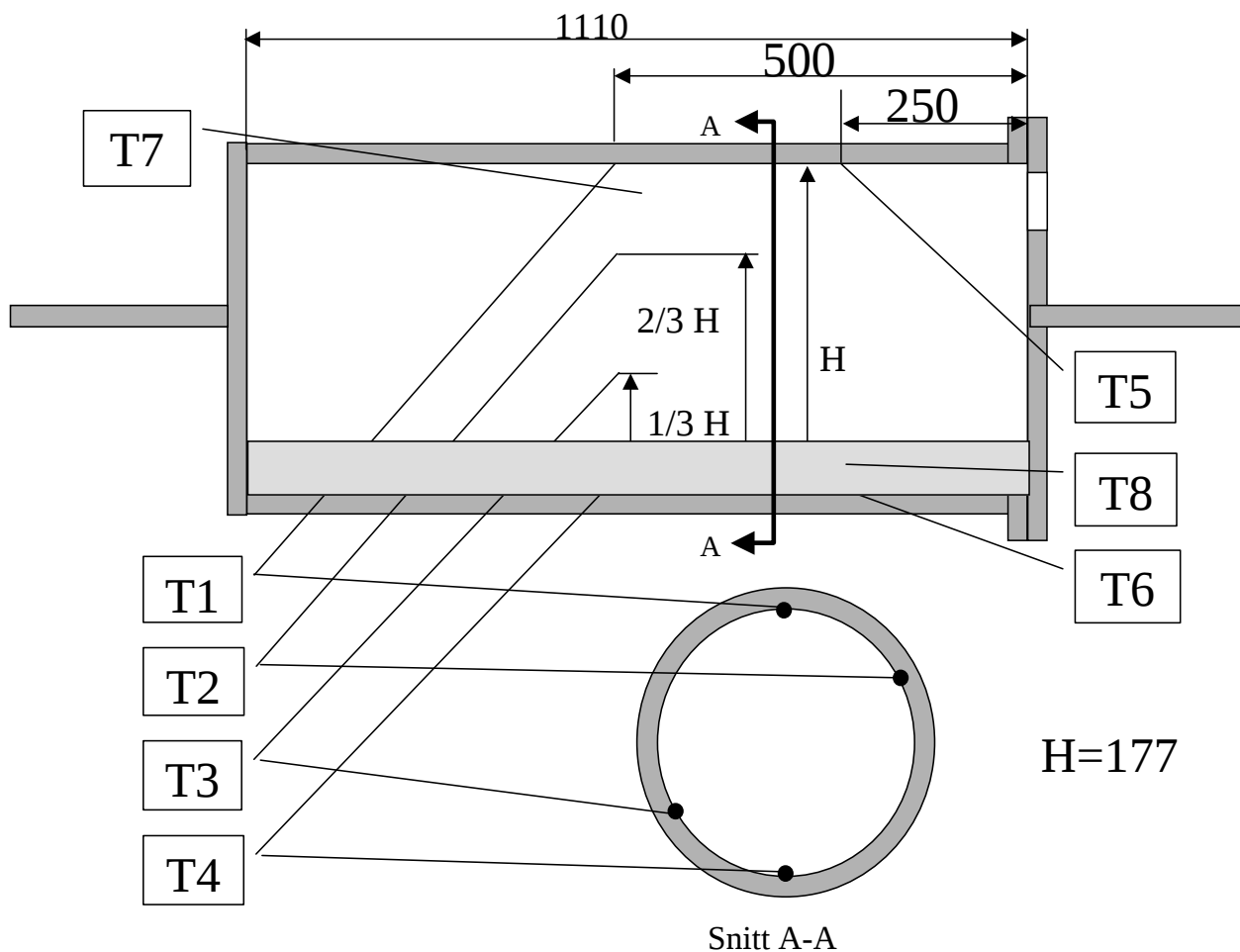
- [1] Rapport fra NBL, Rapport A03111, Brannlast for (prosess)utstyr, Geir Berge og Øyvind Brandt, 2002.
- [2] "VessFire" Brukermanual, Geir Berge, Petrell as, 2003
- [3] "VessFire" Technical Manual, Geir Berge, Petrell as, 2003
- [4] "Brilliant" Brukermanual, Geir Berge, Petrell as, 2003
- [5] Rapport fra SINTEF, NBL, prosjekt 22N166.01. Intention of test: "Verify the thermal response of an un-insulated steel pipe to serve as a reference for the thermal exposure of tubular sections larger than recommended by the test protocol", Ragnar Wighus, NBL.
- [6] Determination of temperatures and flare rates during depressurization and fire. Sverre J. Overå, Ellen Stange and Per Salater, Norsk Hydro, 15. mars 1993.
- [7] An introduction to Computational Fluid Dynamics, H.K. Versteeg & W. Malalasekera. ISBN 0-582-21884-5, Longman Group Ltd. 1998
- [8] The computation of radiation heat transfer, N. G. Shah, Thesis for PhD. at Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science and Technology. 1979
- [9] A new radiation solution method for incorporation in general in general combustion prediction procedures, F.C. Lockwood and N.G. Shah, Eighteenth Symposium (International) on Combustion. The combustion institute, pp 1405 – 1409, 1981.
- [10] The Numerical Computation of Turbulent Flows, B.E. Launder and D.B. Spalding. Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng. Volume 3 (1974) pp. 269-289.
- [11] NIST Standard Reference Database 4, NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database. (SUPERTRAPP). Version 3.1. February 2003. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899
- [12] Robert C. Reid, John M. Prausnitz and Bruce E. Poling The Properties of Gases & Liquids. Forth Edition, McGraw-Hill International Editions, 1988
- [13] NIST Standard Reference Database 10, NIST/ASME Steam Properties, Version 2.2 U.S. Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, Maryland 20899
- [14] Touloukian, Ys., "Touloukian Thermophysical Properties of Matter - Metallic Elements and Alloys", John Wiley and Sons Ltd; (May 6, 1976)

- [15] Siegel, R. and Howel, J., “Thermal radiation heat Transfer”, 4<sup>th</sup> edition, Taylor & Francis, 2002
- [16] Modest, M.F, “Radiative Heat Transfer”, 2<sup>nd</sup> edition, Academic Press, 2003.

## 8 Appendiks A Eksperimenter



**Figur 25** Figuren viser plassering av termoelementene på varmefolien.

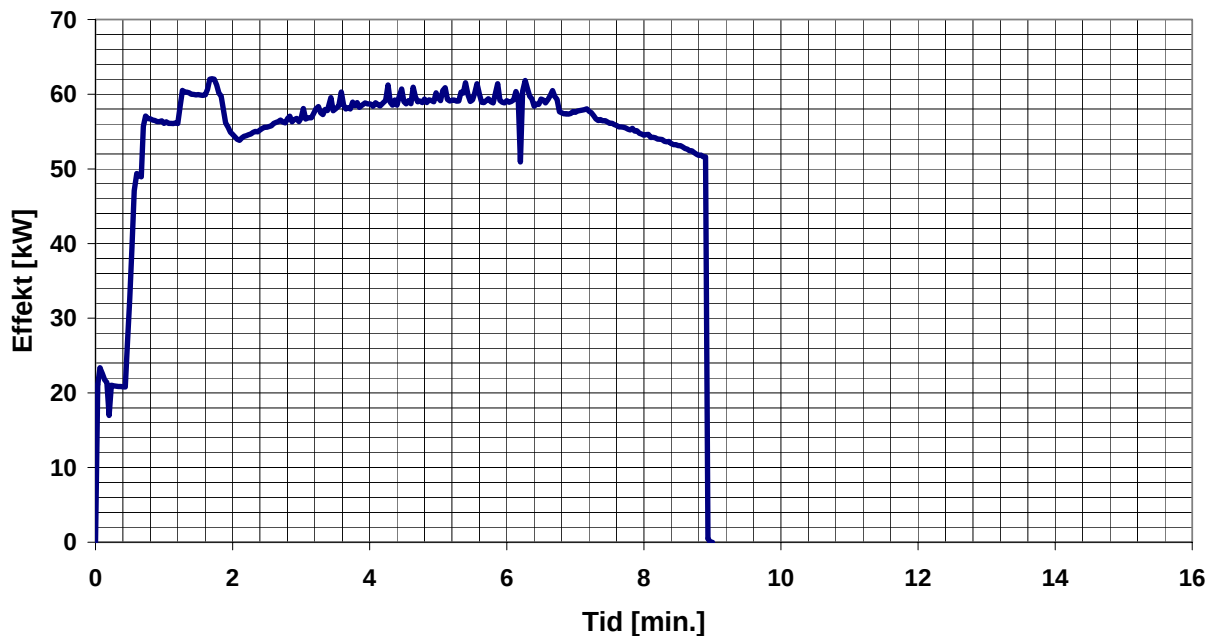


**Figur 26** Figuren viser plassering av termoelementene på objektet.

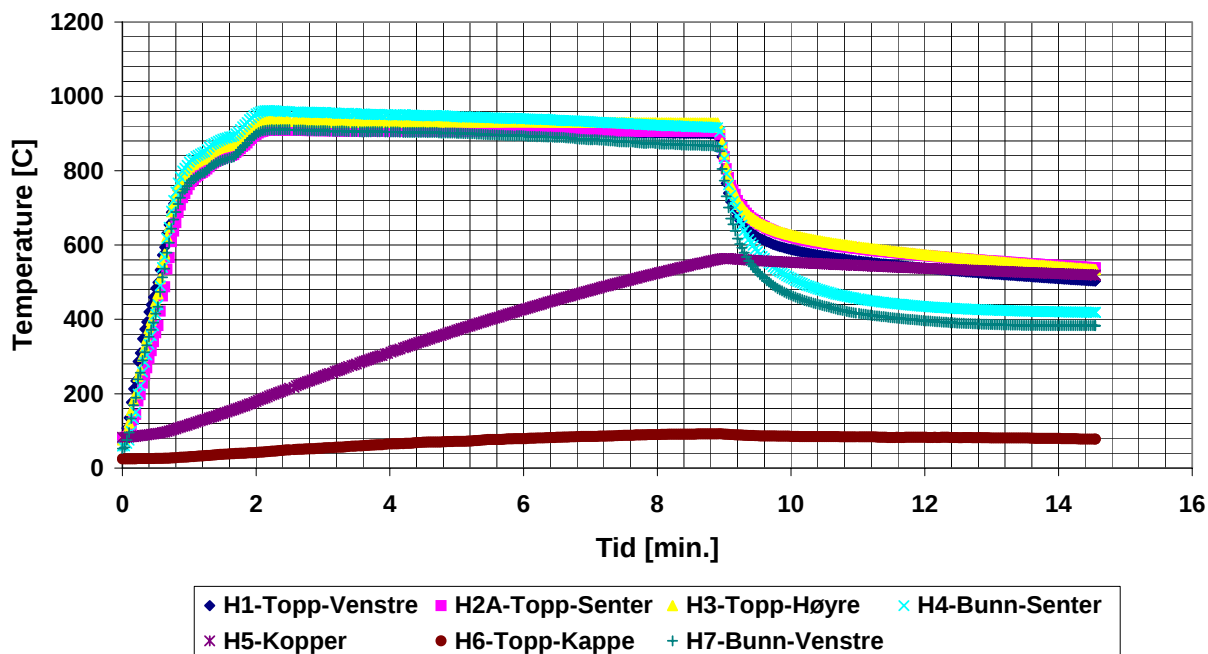
### 8.1 Case 1-03

Folietemperatur: 900°C

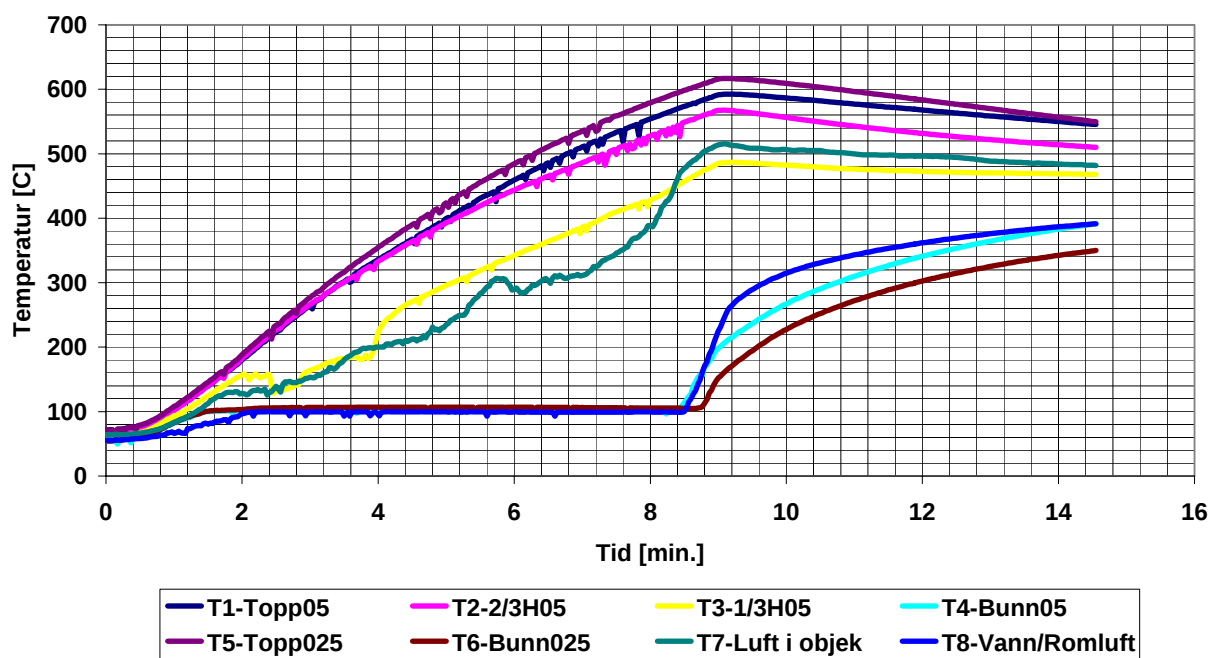
Vannfylling: 2.98 kg



**Figur 27** Figuren viser tilført effekt målt på kablene inn til kopperskinnene på varmelementet (merket A, B og C på Figur 25).



**Figur 28** Figuren viser temperaturen på folien under test. Plassering av termoelementene er vist på Figur 25.

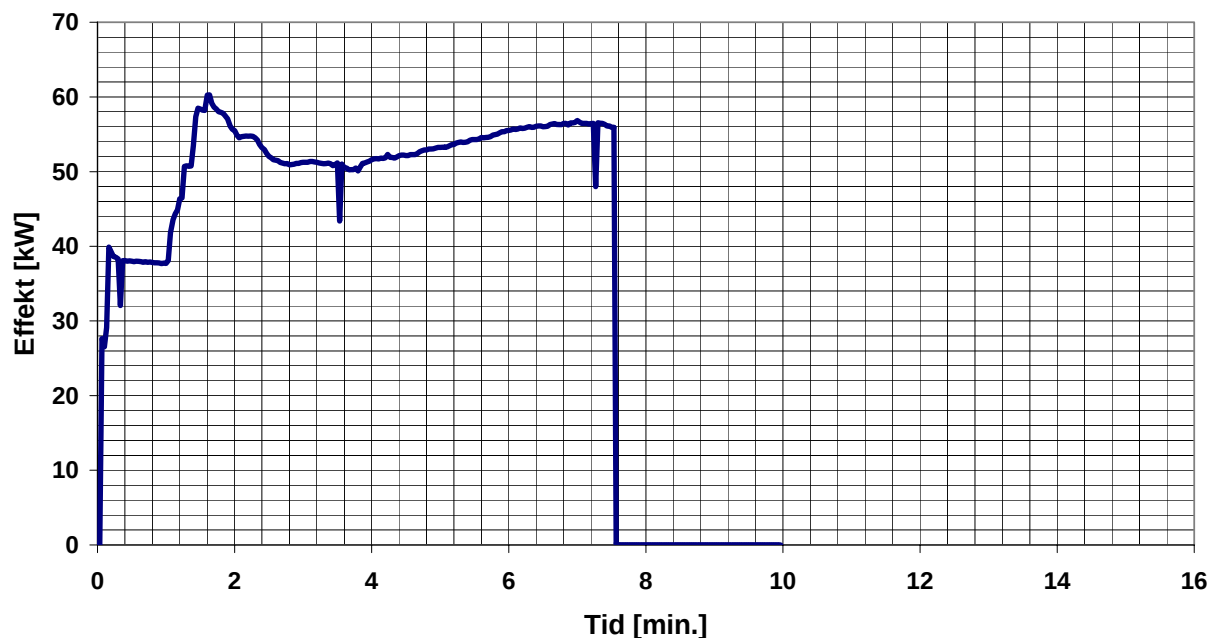


**Figur 29** Figuren viser temperaturene målt på prøvestykket. Plassering av termoelementene er vist på Figur 26.

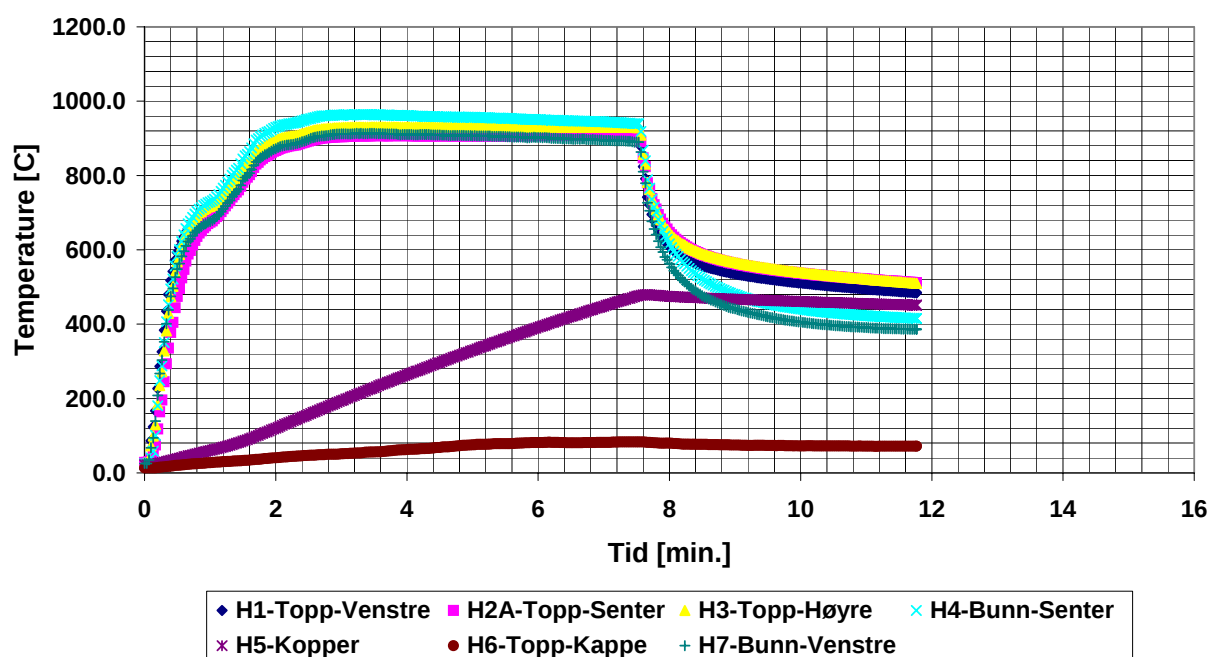
## 8.2 Case 2-03

Folietemperatur: 900°C

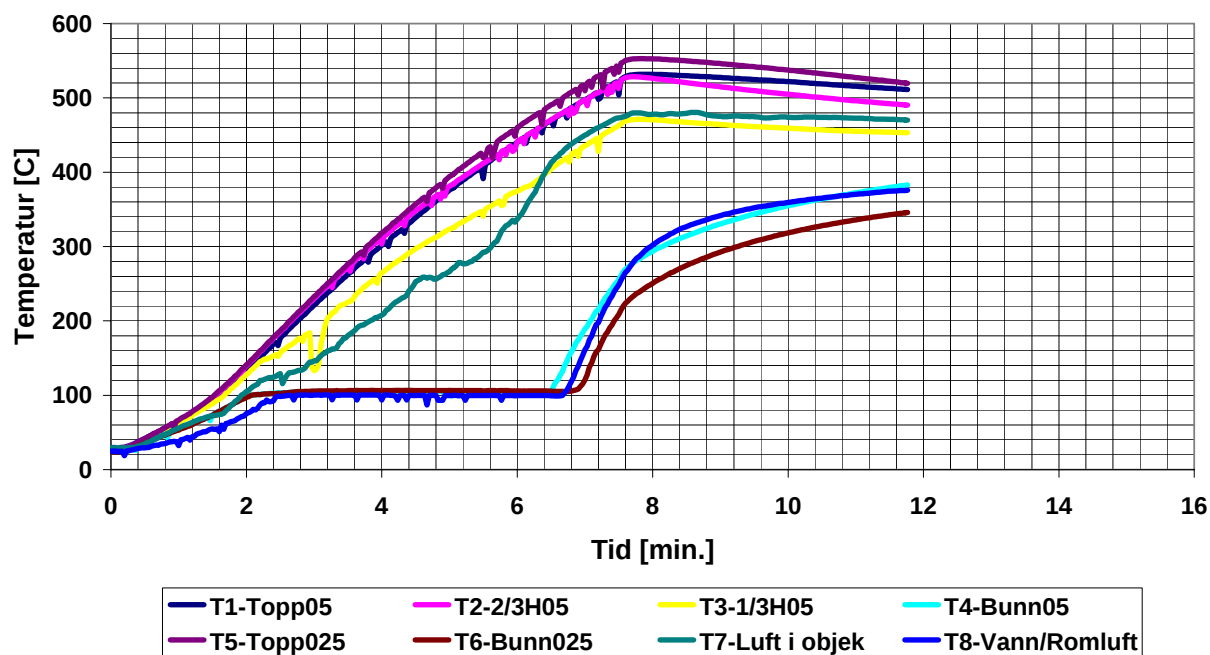
Vannfylling: 1.5 kg



**Figur 30** Figuren viser tilført effekt målt på kablene inn til kopperskinnene på varmelementet (merket A, B og C på Figur 25).



**Figur 31** Figuren viser temperaturen på folien under test. Plassering av termoelementene er vist på Figur 25.

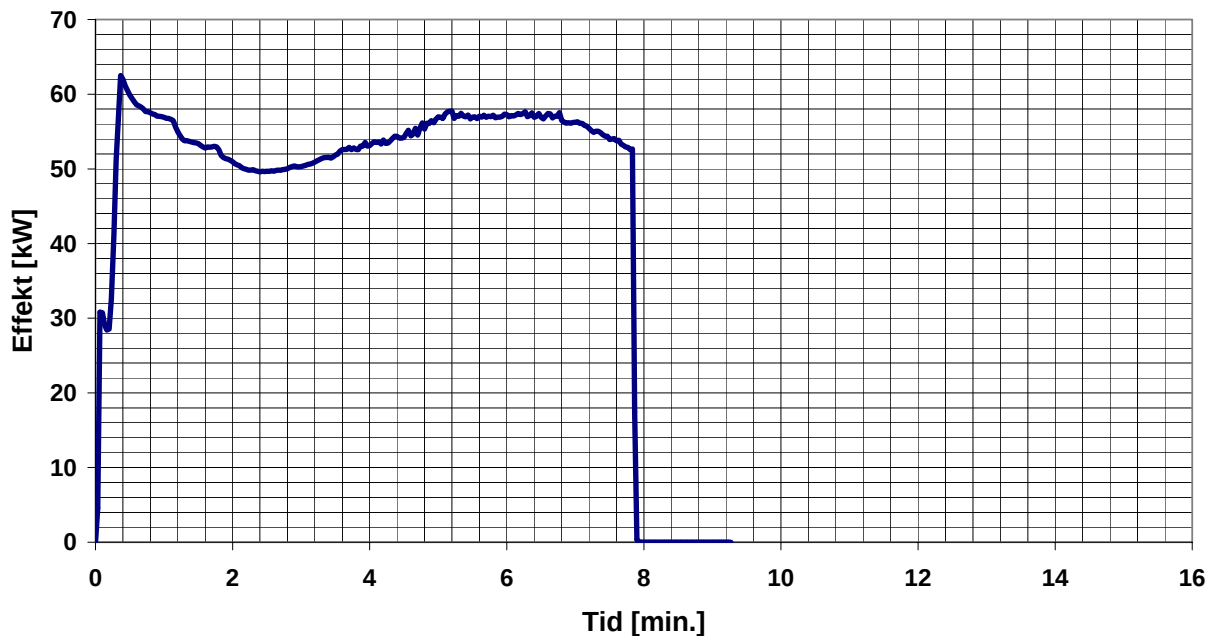


**Figur 32** Figuren viser temperaturene målt på prøvestykket. Plassering av termoelementene er vist på Figur 26.

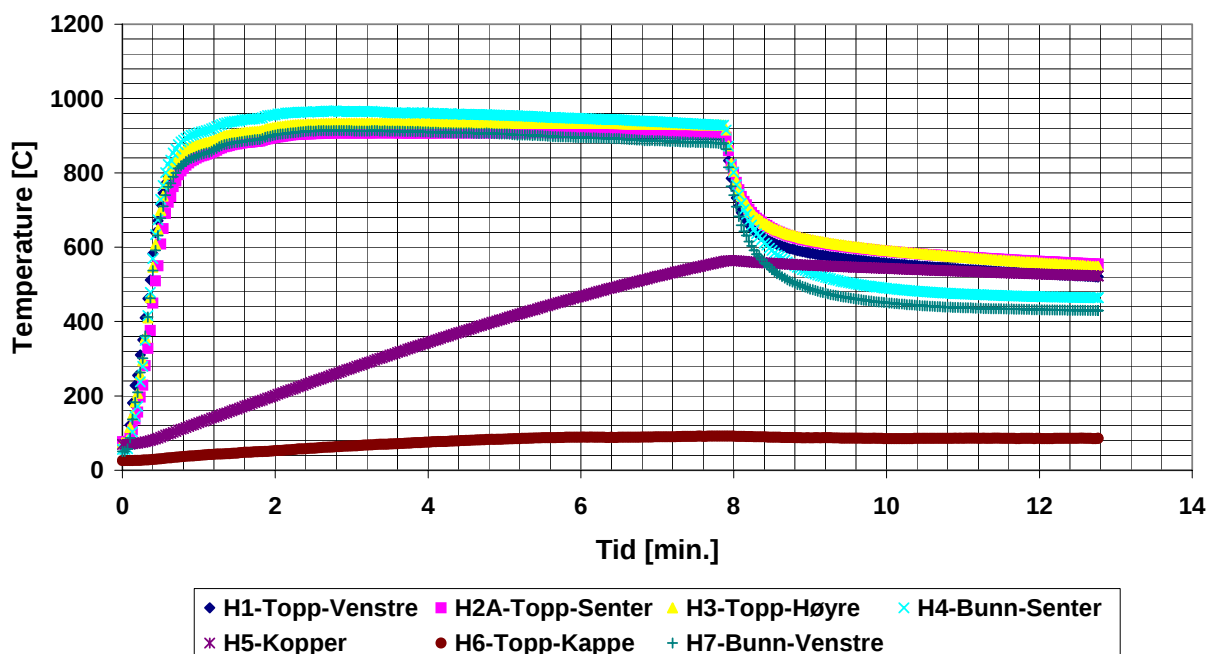
### 8.3 Case 3-03

Folietemperatur: 900°C

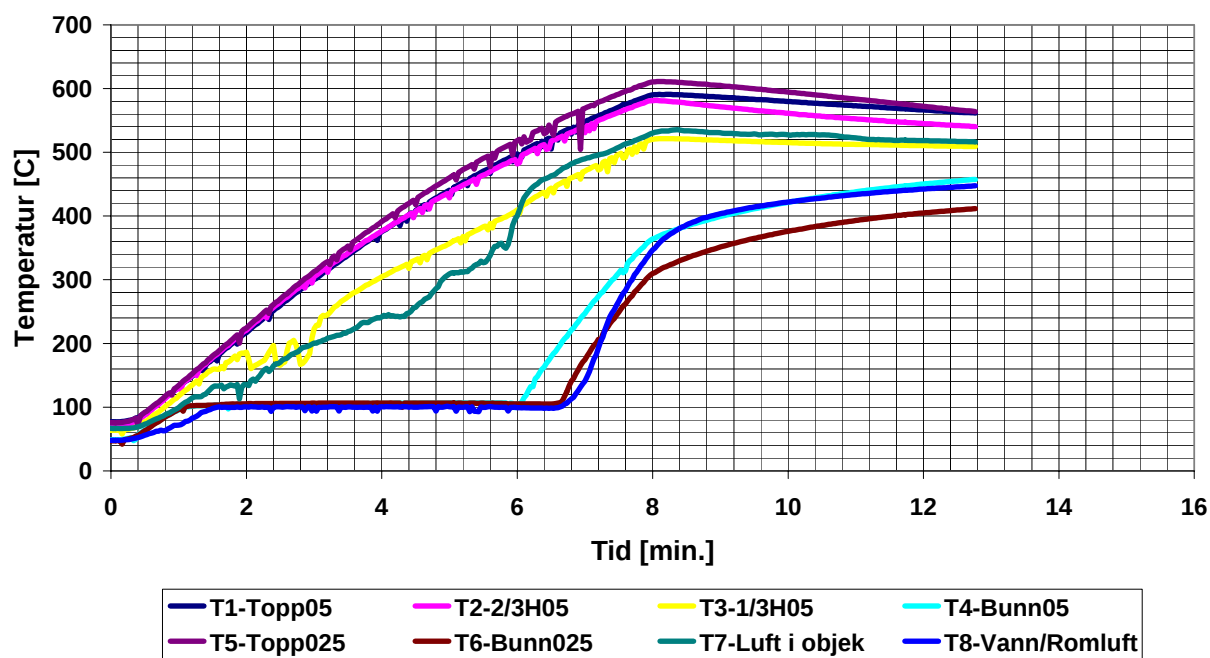
Vannfylling: 2 kg



**Figur 33** Figuren viser tilført effekt målt på kablene inn til kopperskinnene på varmelementet (merket A, B og C på Figur 25).



**Figur 34** Figuren viser temperaturen på folien under test. Plassering av termoelementene er vist på Figur 25.

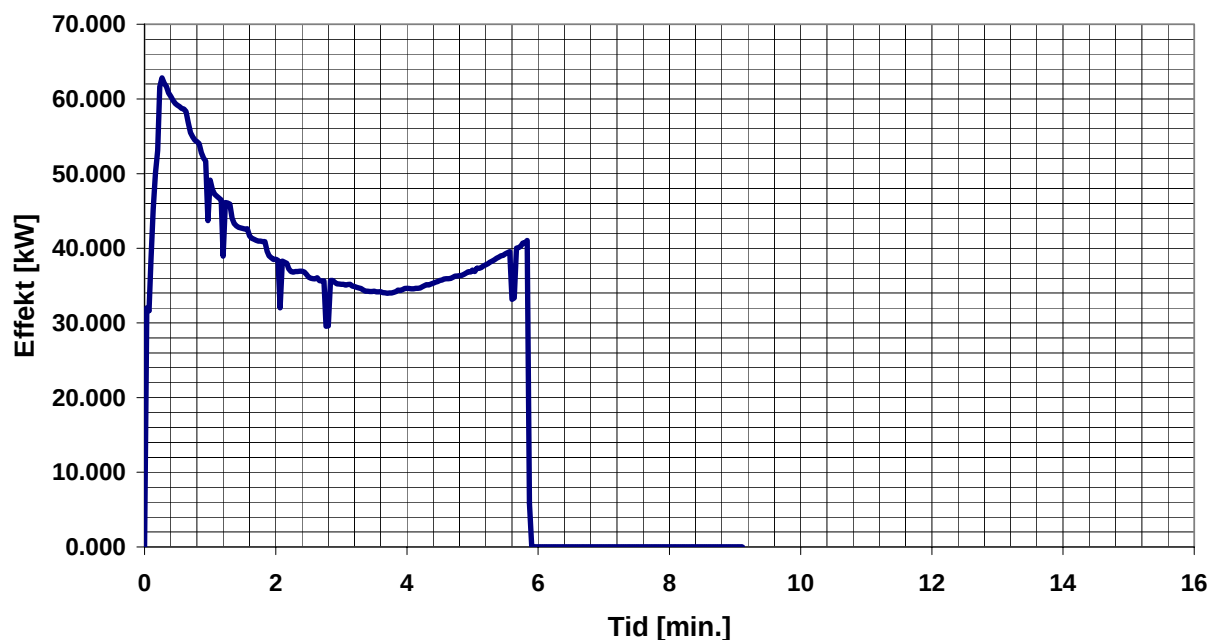


**Figur 35** Figuren viser temperaturene målt på prøvestykket. Plassering av termoelementene er vist på Figur 26.

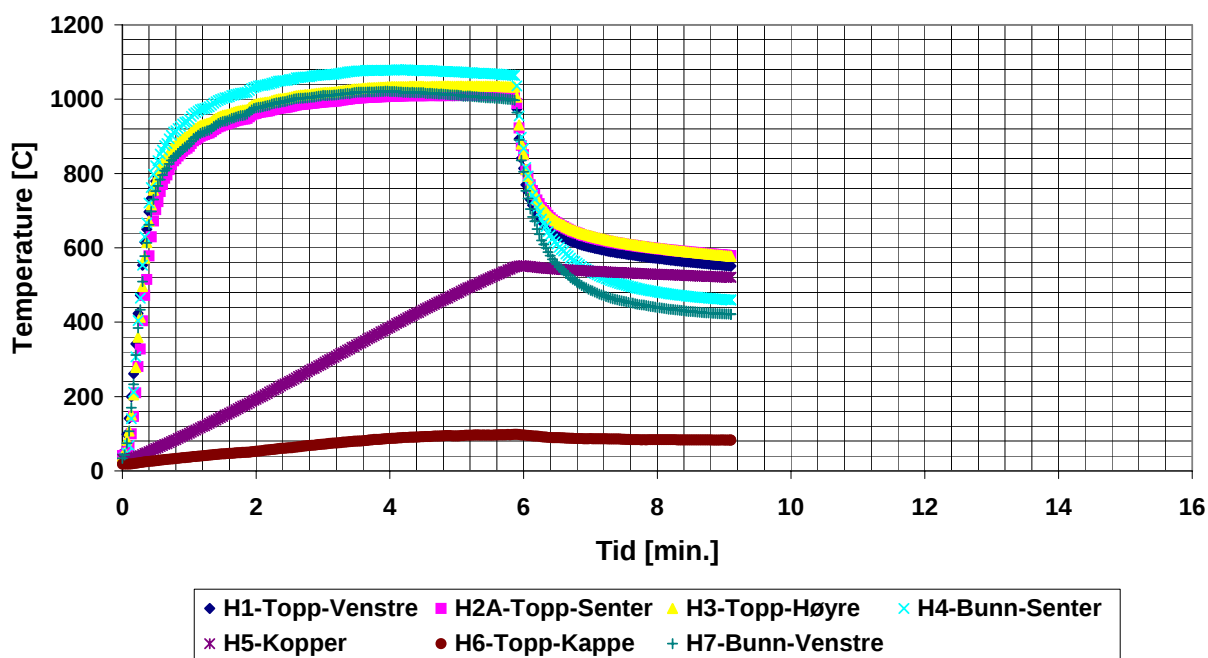
#### 8.4 Case 4-03

Folietemperatur: 1000°C

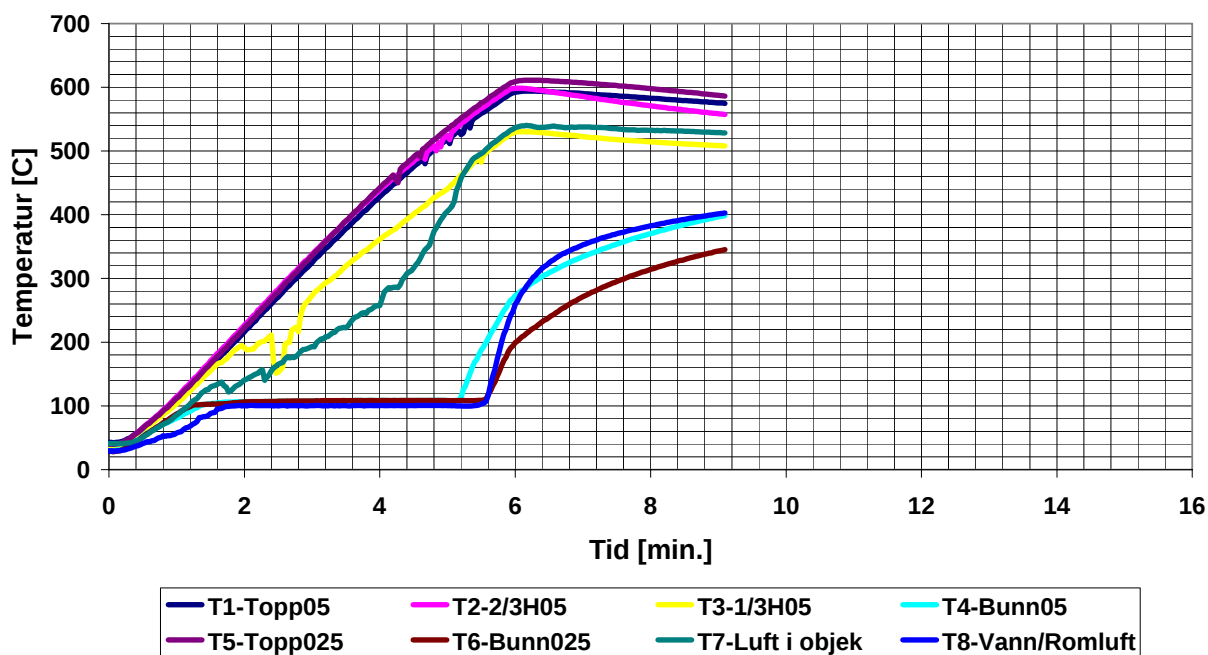
Vannfylling: 2 kg



**Figur 36** Figuren viser tilført effekt målt på kablene inn til kopperskinnene på varmelementet (merket A, B og C på Figur 25).



**Figur 37** Figuren viser temperaturen på folien under test. Plassering av termoelementene er vist på Figur 25.



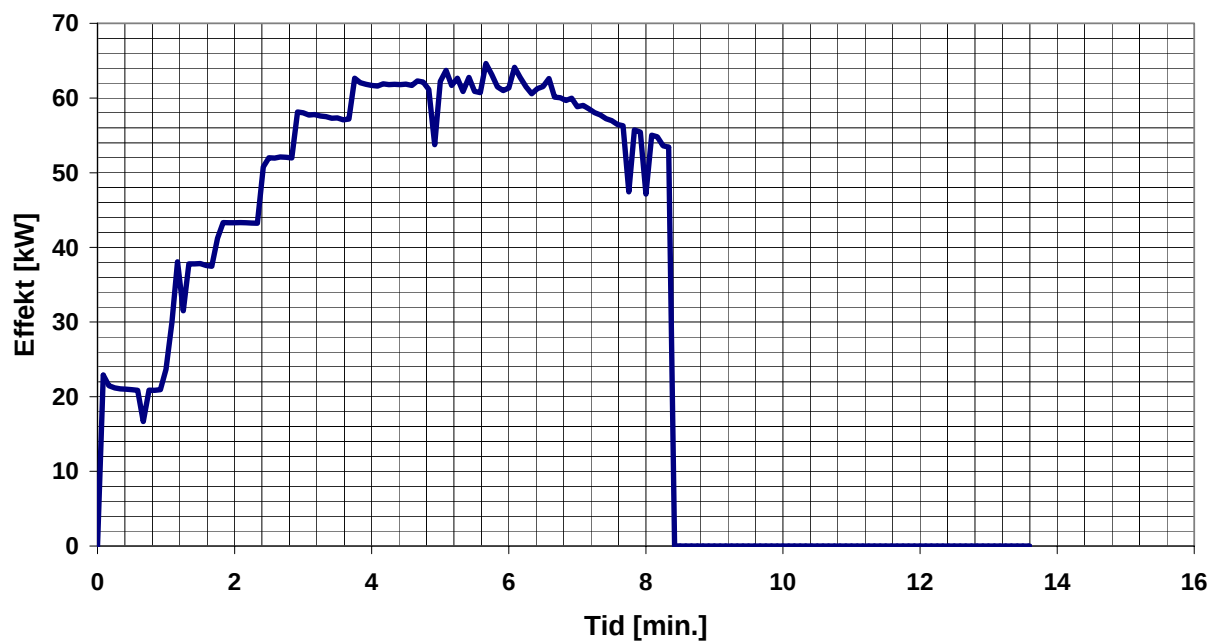
**Figur 38** Figuren viser temperaturene målt på prøvestykket. Plassering av termoelementene er vist på Figur 26.

### 8.5 Case 9-03

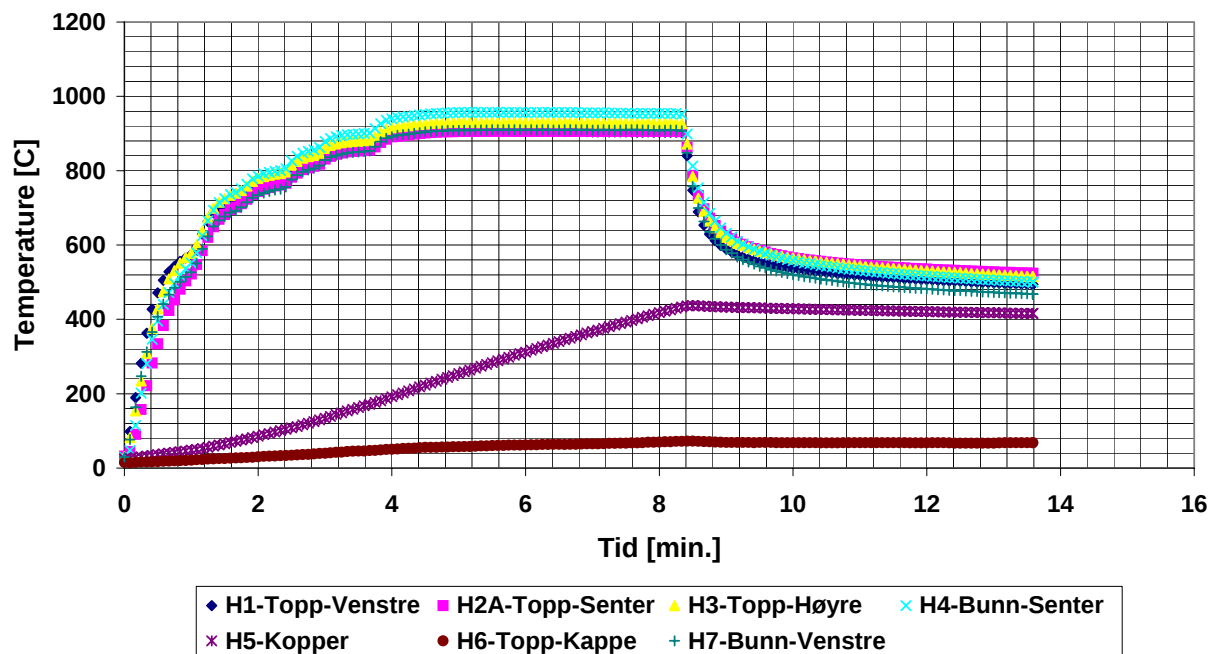
Folietemperatur: 900°C

Vannfylling: ingen vannfylling

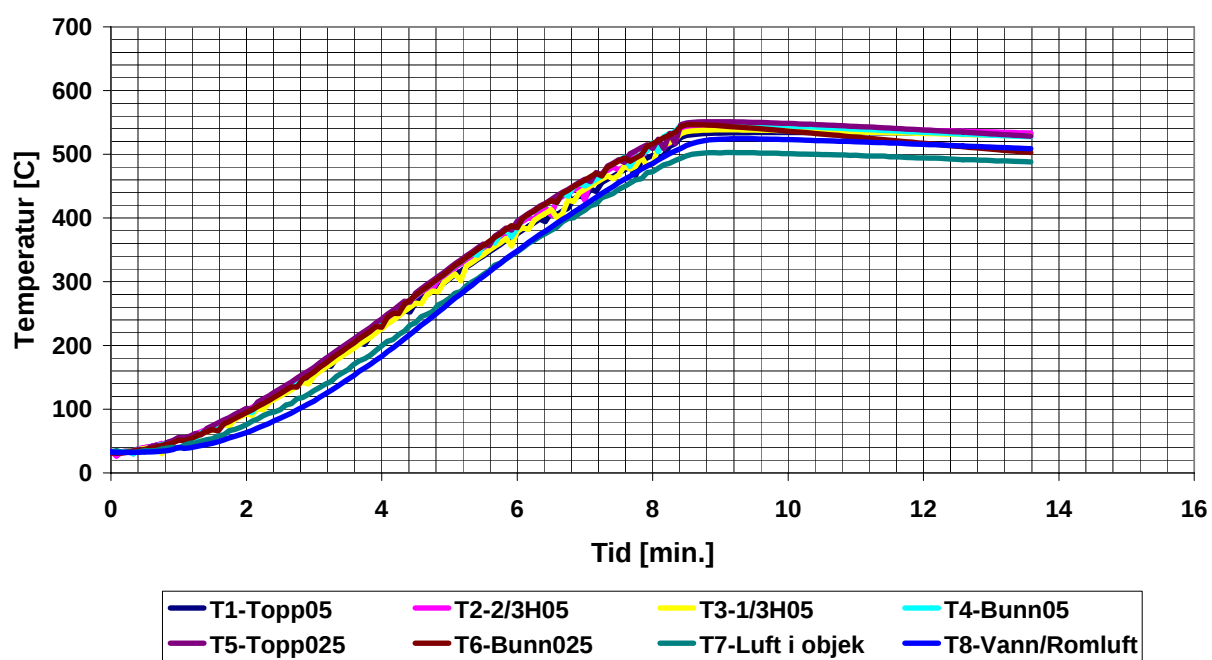
Forsøket er en repetisjon av forsøk nr. 5 i 2002.



**Figur 39** Figuren viser tilført effekt målt på kablene inn til kopperskinnene på varmeelementet (merket A, B og C på Figur 25).



**Figur 40** Figuren viser temperaturen på folien under test. Plassering av termoelementene er vist på Figur 25.



**Figur 41** Figuren viser temperaturene målt på prøvestykket. Plassering av termoelementene er vist på Figur 26.

## 9 Appendiks B Beregningsresultater fra VessFire.

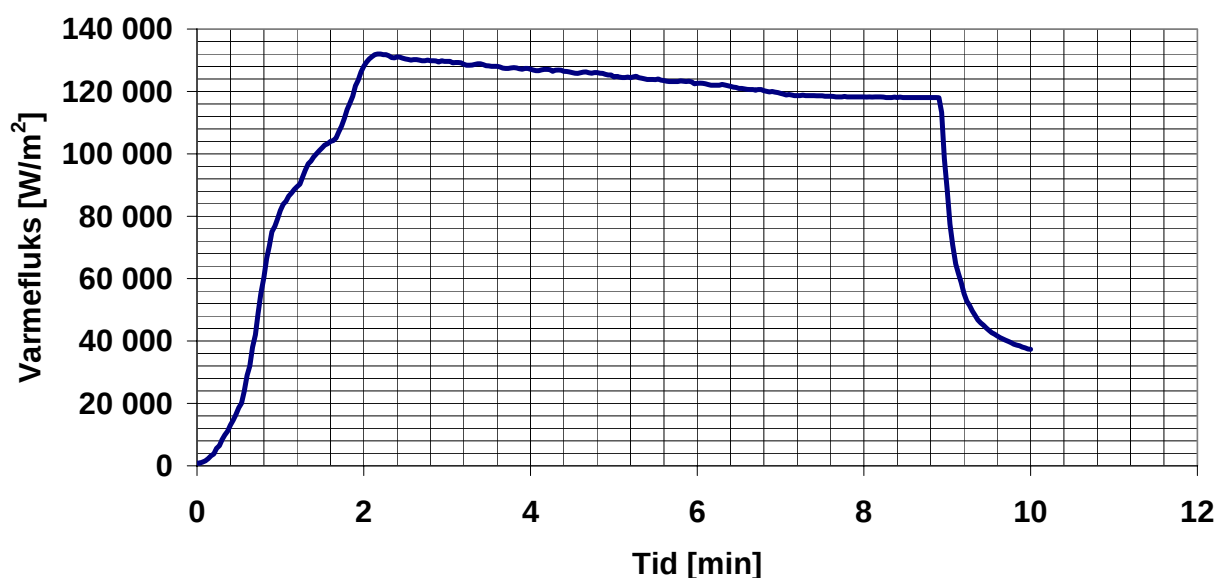
Beregningene er utført med bruk av Brilliant og VessFire. Brilliant benytter målt effekt som grunnlag for energifordelingen i systemet, mens VessFire benytter varmekraft basert på temperaturene målt på folien. Appendiks B inneholder simuleringer utført med VessFire. Plassering av målepunktene i grafene er gitt av figurene 25 og 26 i appendiks A. Beregningene utført med Brilliant er omtalt i selve rapporten. Hensikten med beregningene utført med Brilliant er å verifisere at målingene samsvarer med energifordelingen i systemet.

### 9.1 Case 1-03

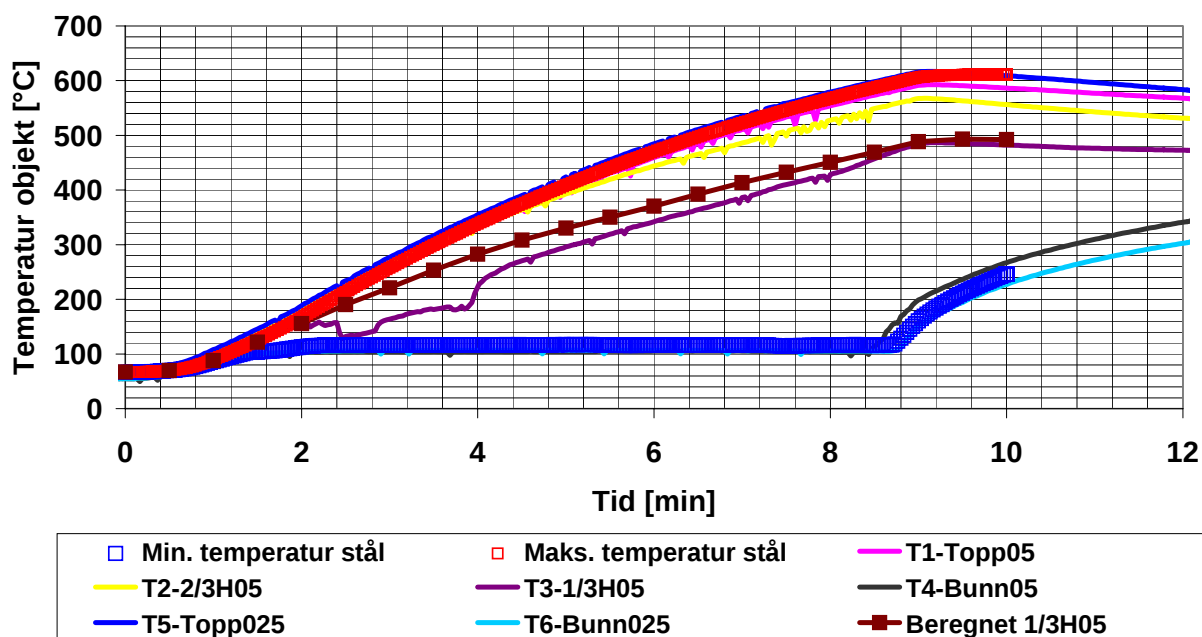
Beregnet med VessFire

Folietemperatur: 900°C

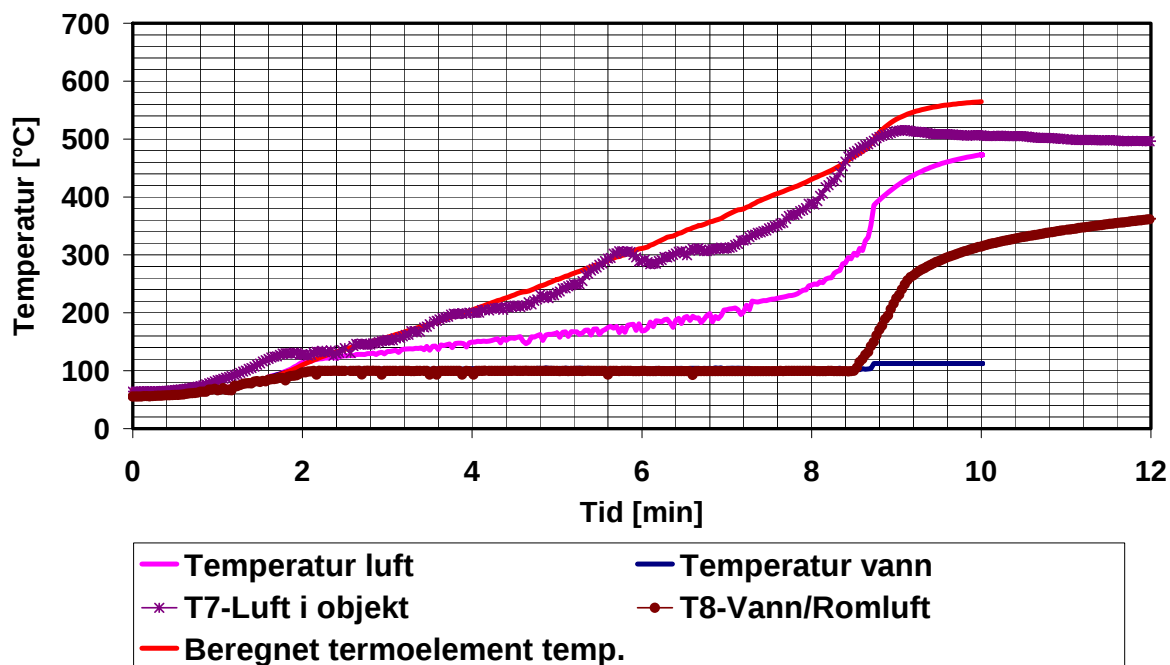
Vannfylling: 2.98 kg



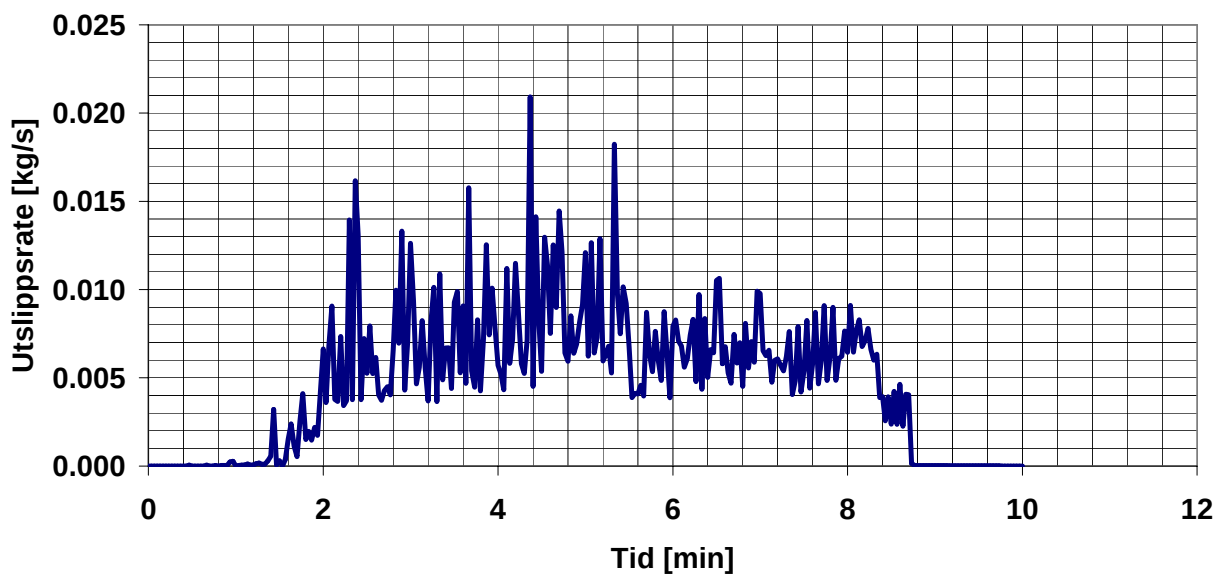
Figur 42 Eksponert varmekraft basert på folietemperatur.



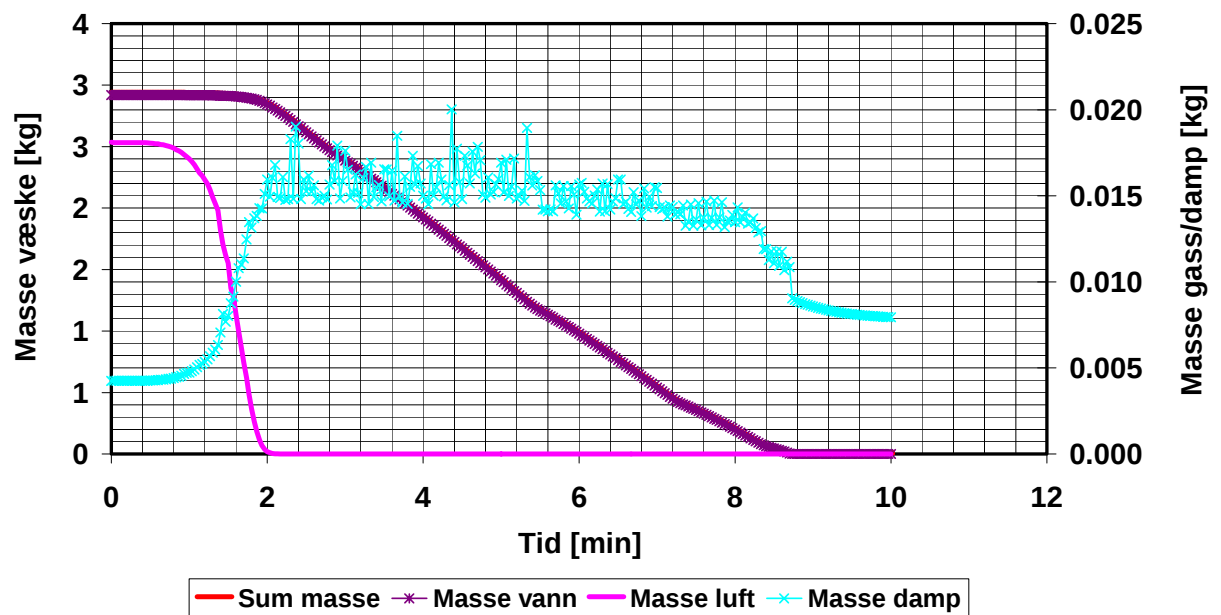
**Figur 43** Maksimum og minimum ståltemperatur som funksjon av tid sammenlignet med målinger. Temperaturen målt like over vannflata (T3-1/3H05) har en noe lavere temperatur en målingen på toppen av prøveobjektet.



**Figur 44** Figuren viser temperaturen i væske og gassfase som funksjon av tid. Beregnet termoelement temperatur viser god samsvar med målinger. Beregningene treffer godt fordampningsperioden for vann.



**Figur 45** Figuren viser utslippsrate som funksjon av tid. Utslippsraten er nært knyttet til fordampningsrate, men ikke helt sammenfallende.



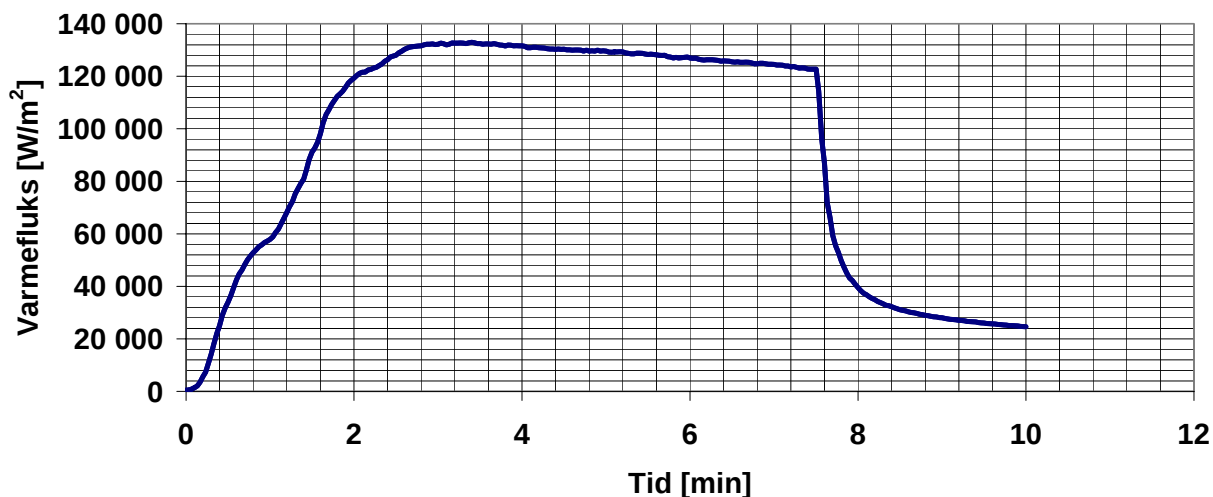
**Figur 46** Figuren viser massebalansen av luft/damp og vann inne i objektet som funksjon av tid.

## 9.2 Case 2-03

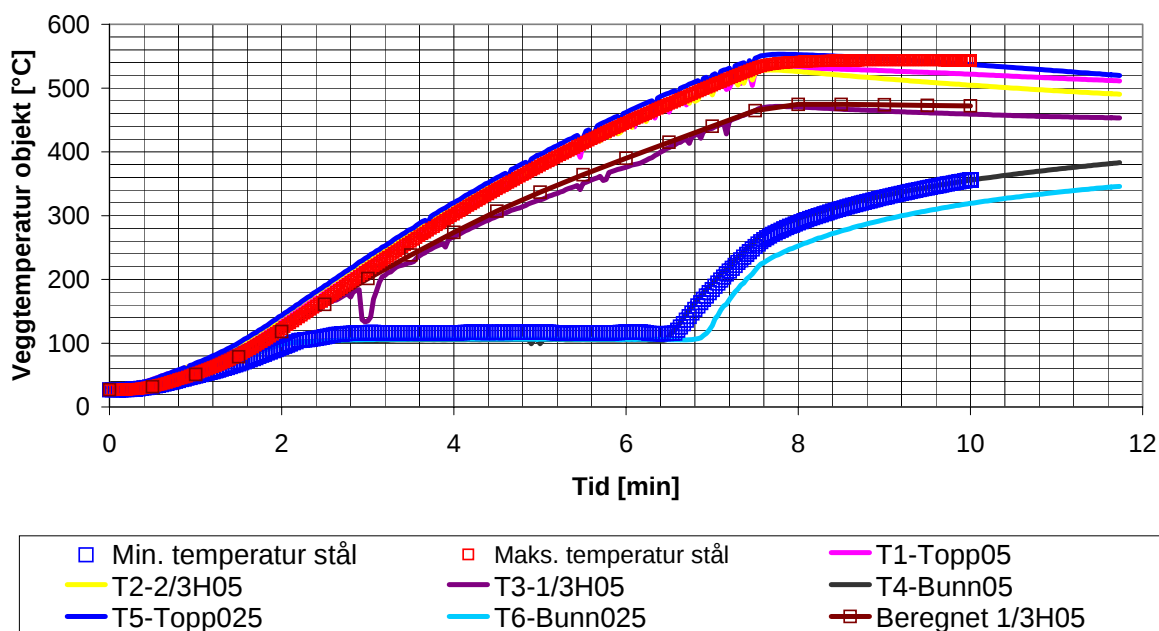
Beregnet med VessFire

Folietemperatur: 900°C

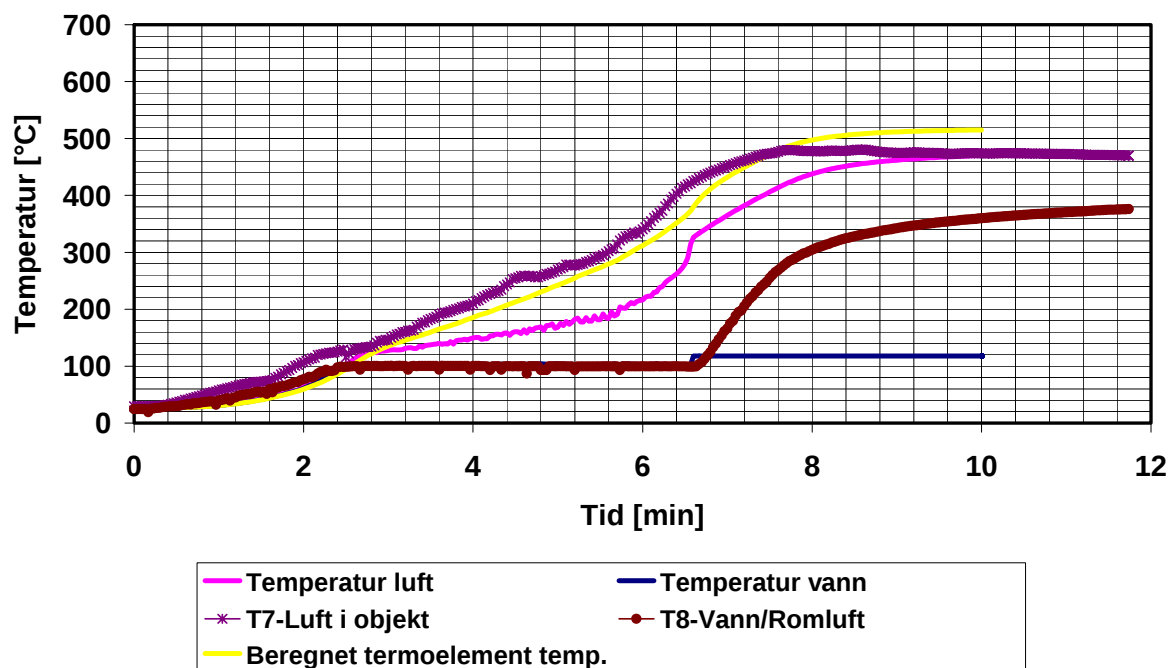
Vannfylling: 1.5 kg



Figur 47 Eksponert varmekraft basert på folietemperatur.



Figur 48 Maksimum og minimum ståltemperatur som funksjon av tid sammenlignet med målinger. Temperaturen målt like over vannflata (T3-1/3H05) har en noe lavere temperatur en målingen på toppen av prøveobjektet.



**Figur 49**

Figuren viser temperaturen i væske og gassfase som funksjon av tid. Beregnet termoelement temperatur viser god samsvar med målinger. Beregningene treffer godt fordampningsperioden for vann.

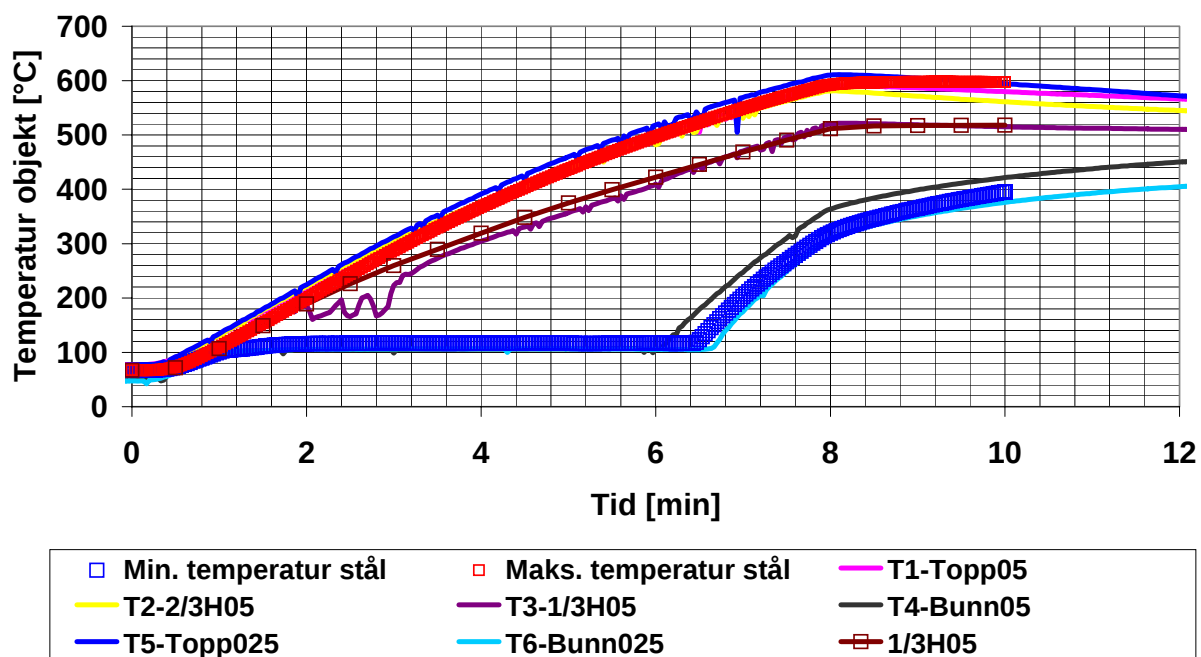
### 9.3 Case 3-03

Beregnet med VessFire

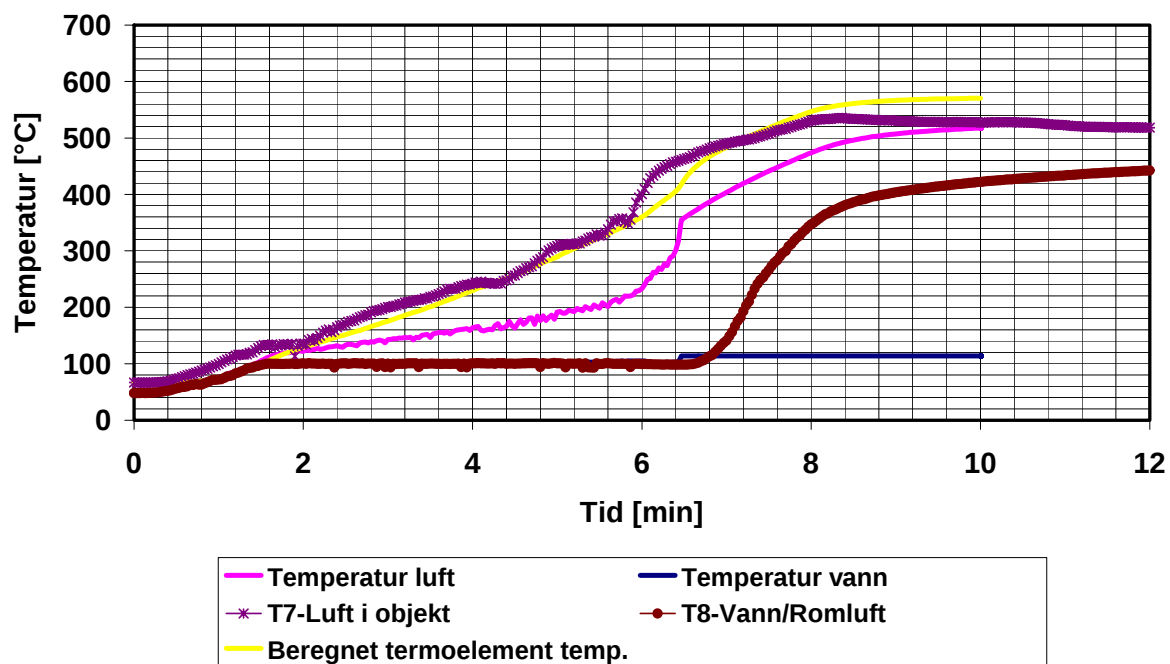
Folietemperatur: 900°C

Vannfylling: 2. kg

**Figur 50** Eksponert varmekraft basert på folietemperatur.



**Figur 51** Maksimum og minimum ståltemperatur som funksjon av tid sammenlignet med målinger. Temperaturen målt like over vannflata (T3-1/3H05) har en noe lavere temperatur en målingen på toppen av prøveobjektet.



Figur 52

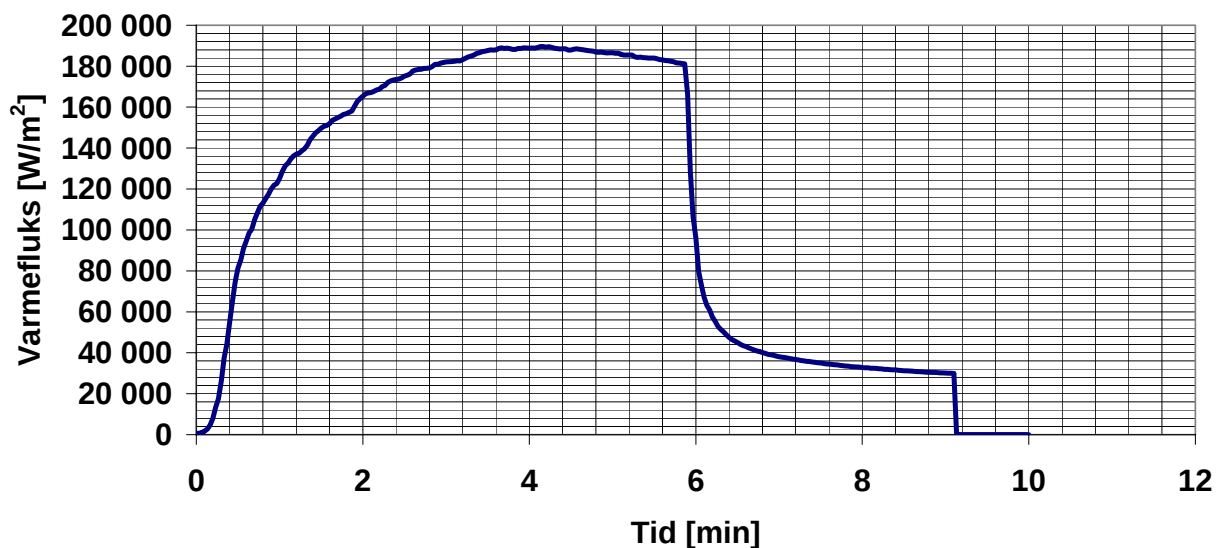
Figuren viser temperaturen i væske og gassfase som funksjon av tid. Beregnet termoelement temperatur viser god samsvar med målinger. Beregningene treffer godt fordampningsperioden for vann.

#### 9.4 Case 4-03

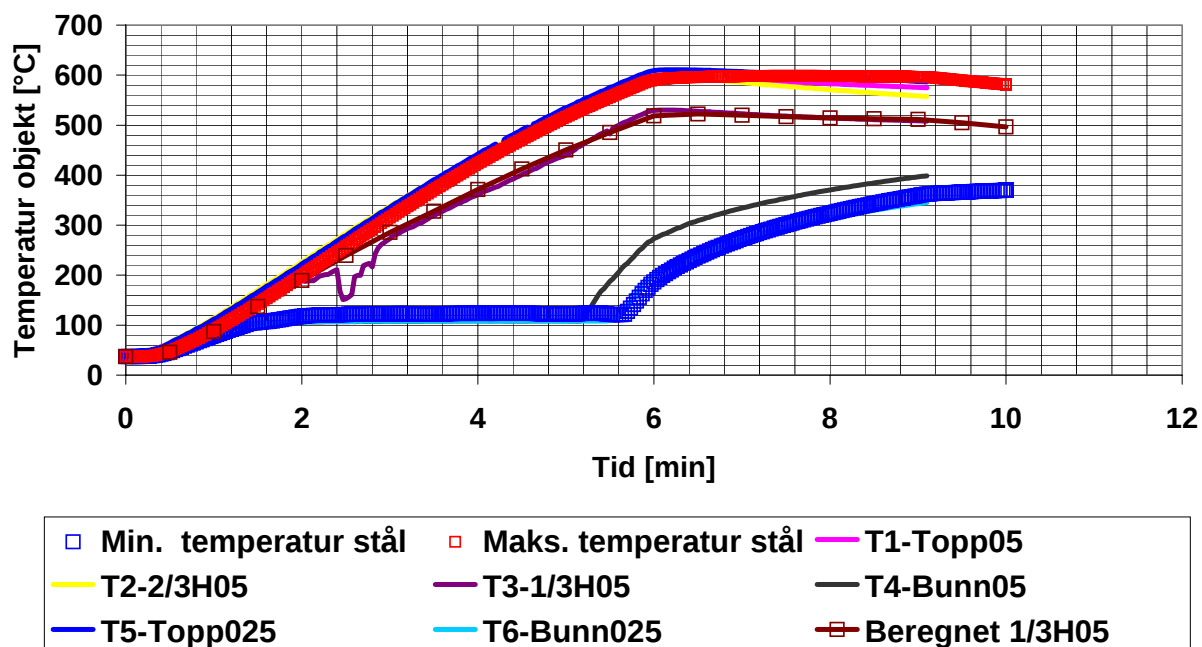
Beregnet med VessFire

Folietemperatur: 1000°C

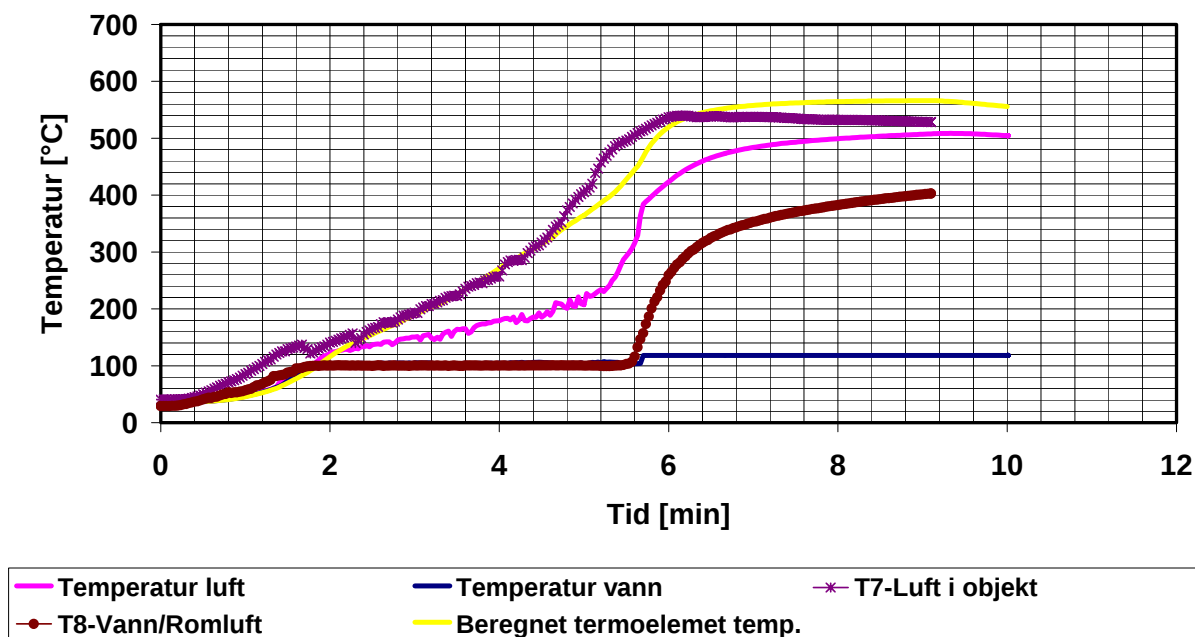
Vannfylling: 2. kg



Figur 53 Eksponert varmeklukt basert på folietemperatur.



Figur 54 Maksimum og minimum ståltemperatur som funksjon av tid sammenlignet med målinger. Temperaturen målt like over vannflata (T3-1/3H05) har en noe lavere temperatur en målingen på toppen av prøveobjektet.



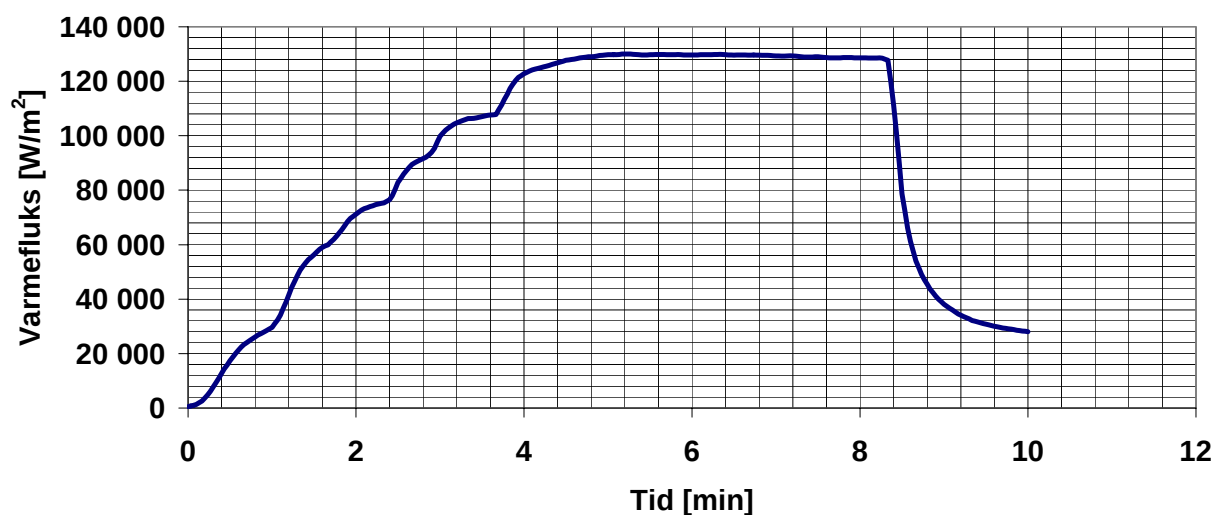
**Figur 55** Figuren viser temperaturen i væske og gassfase som funksjon av tid. Beregnet termoelement temperatur viser god samsvar med målinger. Beregningene treffer godt fordampningsperioden for vann.

### 9.5 Case 9-03

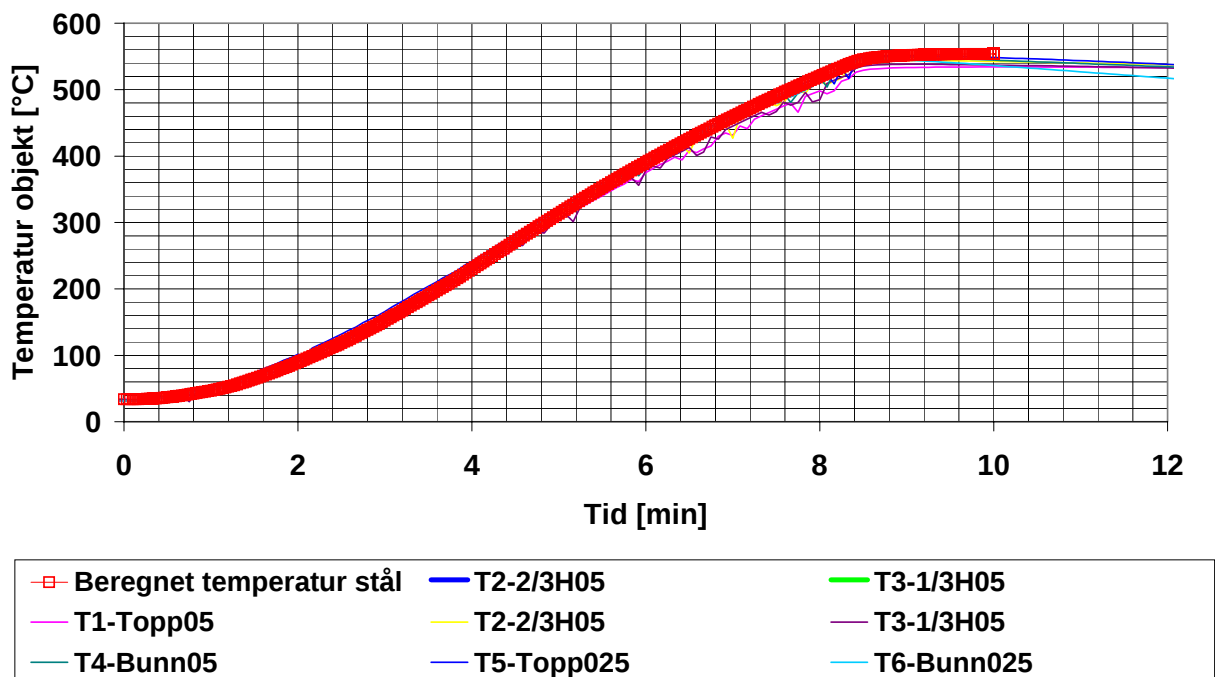
Eksperimentet er beregnet med både VessFire og Brilliant. Nedenfor er vist beregningene utført med VessFire. Beregningene utført med Brilliant er vist i Figur 9, Figur 12, Figur 14, Figur 18, Figur 19, Figur 22 og Figur 23.

Folietemperatur: 900°C

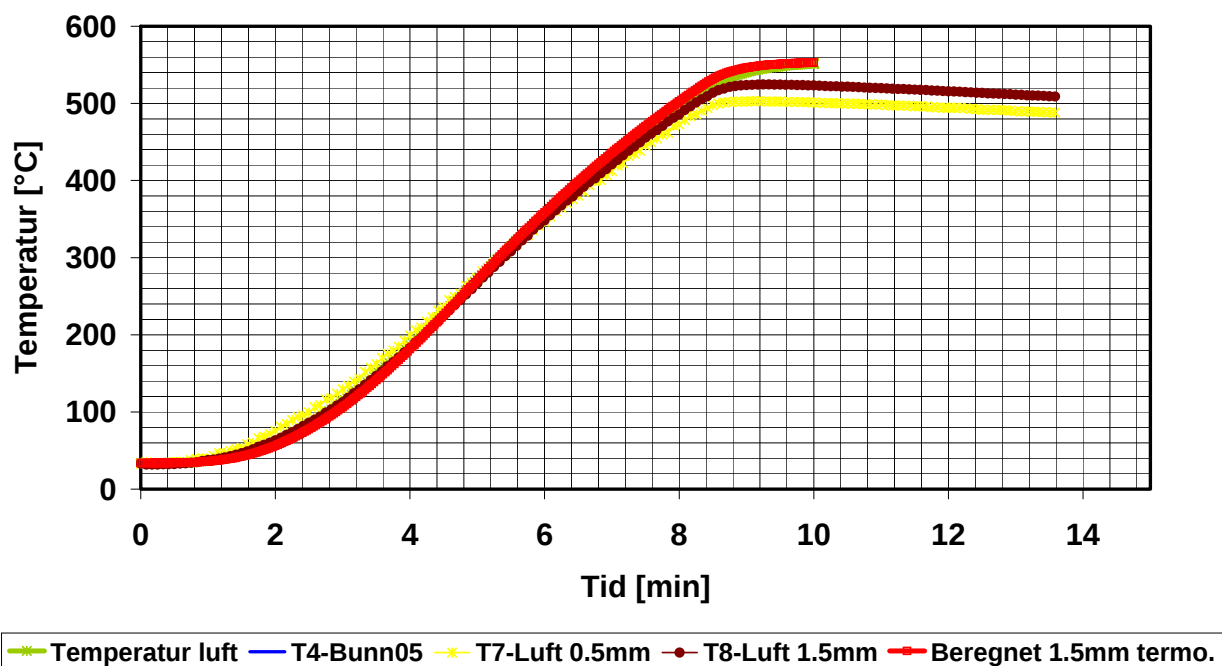
Vannfylling: ingen



**Figur 56** Beregnet med VessFire. Eksponert varmekraft basert på folietemperatur.



**Figur 57** Beregnet med VessFire. Maksimum og minimum ståltemperatur som funksjon av tid sammenlignet med målinger. Temperaturen målt like over vannflata (T3-1/3H05) har en noe lavere temperatur en målingen på toppen av prøveobjektet.



**Figur 58** Beregnet med VessFire. Figuren viser temperaturen i luften som funksjon av tid. Beregnet termoelement temperatur viser god samsvar med målinger. Avviket mellom beregnet lufttemperatur og beregnet temperatur for termoelementet er her ikke så stor.