



RI.
SE

RI.
SE

FRIC

FRIC

Effektiv, skånsom og miljøvennlig slokking av brann i mindre bygningseenheter

RISE RAPPORT 2021:73

Christoph Meraner

Edvard Aamodt

Karolina Storesund

Trond Wingdahl

Ole Anders Holmvaag

RISE Fire Research AS

Division RISE SAFETY AND TRANSPORT

Effektiv, skånsom og miljøvennlig slokking av brann i mindre bygningenheter

Christoph Meraner, Edvard Aamodt, Karolina
Storesund, Trond Wingdahl, Ole Anders Holmvaag

Abstract

Efficient, low-exposure and environmentally friendly extinguishing of fires in small building units

This study evaluates efficient, low-exposure and environmentally friendly extinguishing of fires in small building units and is commissioned by the Norwegian Directorate for Civil Protection (DSB) and the Norwegian Building Authority (DiBK). The main objective is to increase the knowledge on how to extinguish fires in smaller building units efficiently in terms of time and water amount, with minimal exposure of the fire service to smoke, heat and direct contact with soot, as well as minimal environmental exposure in case of extinguishing water run-off. For a holistic evaluation of firefighting methods, the tactical assessments and priorities of the fire service were also studied.

In total seven medium-scale fire tests were carried out in a 13.5 m² compartment with a ceiling height of 2.4 m, a ventilation opening of 0.54 m² and an adjacent corridor. The fuel in the experiments consisted mainly of a sofa with mattresses according to specifications given in the "open space" test specified in the standard IMO Resolution 265 (84) and walls clad with OSB boards. One experiment was carried out with real furniture. The study focuses on indirect extinguishing (i.e., cooling of the fire gases) with four different extinguishing methods, which are:

- *Coldcut cobra* cutting extinguisher and water,
- Spray nozzle and water,
- Spray nozzle and foam,
- *Fognail* extinguishing spear and water.

The extinguishing was started based on a temperature criterion of 350°C, 80 cm below the ceiling. The water consumption during extinguishing, the fire compartment temperature, as well as the particle and the gas concentration (CO, CO₂, etc.), were measured during the experiments. Measuring devices for temperature, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particulate phase and volatile organic compounds (VOCs) were attached to a firefighter's jacket to measure exposure. The firefighters stayed, during all experiments, for at least 1.5 minutes in the fire compartment to ensure a measurable PAH and VOC exposure. The experiments were furthermore documented with video recordings from several angles and infrared video of the fire compartment. After four of the trials, interviews with the fire service were conducted to evaluate the tactical assessments made during the firefighting effort.

In the experiments, all extinguishing methods caused the temperature in the smoke layer to drop below 150°C within 2.5 minutes and the flaming fire was extinguished. The fire re-ignited in all experiments approx. 6 minutes after the start of the experiment, except for experiment F4, extinguishing with foam, where there was re-ignition after approx. 4 minutes. The experiments showed that the cutting extinguisher and *Fognail* have a good effect, even under "artificial" limitations in the experiments (duration and direction of the extinguishment). Both of these extinguishing methods used approximately the same amount of water. As the purchase costs for a *Fognail* are significantly less than for a cutting extinguisher, the *Fognail* has been found to be not only an efficient extinguishing method but also beneficial from a cost/benefit perspective. Purchasing costs are important for the fire service, especially for smaller fire services. Foam had

the poorest cooling effect in the experiments and led to the fastest re-ignition. It was therefore concluded that foam is at high temperatures the least suited extinguishing method to reduce the temperature in the fire compartment. However, it is important that the use of foam is considered depending on the given fire scenario since the present study did not evaluate all properties and possible benefits of foam (such as the ability to cover flammable liquid). Furthermore, it can be assumed that foam can have a better effect when the temperature in the fire compartment is first lowered by using an external extinguishing method. The combination of foam and external extinguishing methods was not investigated in the present study. It is therefore recommended to evaluate this combination in future studies.

To use an external extinguishing method (cutting extinguisher or *Fognail*) as an immediate measure in advance of internal firefighting gives the following advantages compared with smoke diving without the use of an external extinguishing method:

- less soot and less explosive/toxic fire gases in the fire compartment,
- better effect of the secondary internal extinguishing agent,
- faster reduction of the temperature in the fire compartment,
- less *sauna effect* (high humidity can cause heat to penetrate the clothes of the firefighters, which in turn can lead to injuries and that the smoke divers must retreat).

The measurements during the experiments show that the use of cutting extinguishers or extinguishing spears can reduce exposure to the fire brigade with regard to heat and contact with particles. It was not possible to identify a clear trend for exposure to the carcinogens (PAH and VOC) measured at the firefighter's jacket, by comparing the different extinguishing methods in the experiments.

The experiments and interviews with the fire service further showed that the firefighter underestimated the negative ejector effect that ventilation openings into the fire compartment have. That is, placing a nozzle near an opening can lead to more oxygen being supplied to the fire which aggravates the situation. The video recordings from the experiments are published together with this report and will be a good learning tool for the fire service.

This project was presented at DiBK's «fagdag om brann» 2021. The presentation is available here:

<https://dibk.no/om-oss/Kalender-DiBK/fagdag-om-brann---2021/> (video)

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-56407> (slides)

The video recordings from the fire experiments are available here:

F1: <https://youtu.be/Wx9r0Y4sas0> (Cutting extinguisher and water)

F2: <https://youtu.be/PtMKENzniR4> (Cutting extinguisher and water)

F3: <https://youtu.be/1UwrOai95A8> (Spray nozzle and water)

F4: <https://youtu.be/Y8ksjAV-VK4> (Spray nozzle and foam)

F5: <https://youtu.be/Yvm9xlyIbPE> (*Fognail* and water)

F6: <https://youtu.be/Kfredqebjdo> (*Fognail* and water)

Key words: Slokking, skjærslokker, brannvesenet, brannforsøk, utvendig slokkemetoder

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2021:73

ISBN: 978-91-89385-63-4

Prosjektnummer: 20508

Kvalitetssikring: Ragni Fjellgaard Mikalsen

Finansiert av: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK)

Forsidebilde: Utvendig slokking under sløkkeforsøkene (Foto: RISE Fire Research)
Trondheim 2021

Innhold

Abstract	2
Innhold	5
Sammendrag	7
1 Innledning	9
1.1 Bakgrunn.....	9
1.2 Målsetting.....	9
1.3 Overordnet forskningsmetode.....	9
1.4 Begrensninger.....	9
2 Tidligere studier	10
3 Planlegging og forsøksversikt	11
3.1 Numeriske simuleringer.....	11
3.2 Planlegging av slokkeslokker.....	15
3.3 Forsøksversikt.....	18
4 Metode	19
4.1 Måling av vannforbruket.....	19
4.2 Registrering av forsøksforløp.....	20
4.3 Eksponeringsmålinger.....	21
4.4 Innsatspersonellens taktiske vurderinger.....	23
4.4.1 Feltstudier gjennom observasjon.....	23
4.4.2 Videointervju med innsatspersonell.....	24
4.4.3 Dokumentanalyse.....	24
5 Resultater og diskusjon	25
5.1 Pretest.....	25
5.1.1 F1 – Forsøksforløp.....	25
5.1.2 Justeringer i forsøksgjennomføring etter F1.....	32
5.2 Hovedforsøksserie.....	33
5.2.1 F2 – Skjærslokker og vann.....	33
5.2.2 F3 – Strålerør og vann.....	40
5.2.3 F4 – Strålerør og skum.....	45
5.2.4 F6 – Slokkespyd og vann.....	52
5.2.5 Vurdering av slokkeeffektiviteten.....	57
5.2.6 Vurdering av eksponering for brannvesenet.....	62
5.3 Ekte møbler.....	67
5.4 Overtenning.....	71
6 Konklusjoner	73
6.1 Effektivitet og vannforbruk.....	73

6.2	Eksponering og gassmålinger.....	73
6.3	Taktiske vurderinger fra innsatspersonell	74
7	Referanser	76
	Vedlegg A: Forsøksoppsett og -prosedyre.....	i
	Vedlegg B: Videobilder fra forsøkene	ix
	Vedlegg C: Gassmålinger	xxii

Sammendrag

Denne studien omhandler effektiv, skånsom og miljøvennlig slokking av brann i mindre bygningsenheter, og er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). Hovedmålet er å øke kunnskapen om hvordan man kan slokke brann i mindre bygningsenheter på en effektiv måte med hensyn til tid og mengde vann, og med minimal eksponering for brannvesenet med tanke på røyk, varme og direkte kontakt med sot, samt minimal miljøeksponering ved avrenning av slokkevann. For en holistisk evaluering av slokkemetoder ble også innsatspersonellens taktiske vurderinger og prioriteringer studert.

Det ble gjennomført syv mellomskala brannforsøk i et rom med et grunnareal på 13,5 m², en takhøyde på 2,4 m og en ventilasjonsåpning på 0,54 m², med tilstøtende gang. Brensel i forsøkene var hovedsakelig en sofa med madrasser etter spesifikasjoner gitt i «open space» testen angitt i standarden IMO Resolution 265(84) og vegger kledd med OSB-plater. Det ble også gjennomført et forsøk med ekte møbler. Studien fokuserer på indirekte slokking, altså kjøling av branngassene, med fire forskjellige slokkemetoder, som er:

- Skjærslokkeren *coldcut cobra* og vann,
- Strålerør og vann,
- Strålerør og skum,
- Slokkespyddet *Fognail* og vann.

Slokkingen ble startet basert på et temperaturkriterium på 350°C, 80 cm oppunder taket. Det ble målt vannforbruk, temperatur i rommet, partikkelkonsentrasjon og gasskonsentrasjon (CO, CO₂, m.m.). I målepunkt festet på jakken til en brannkonstabel ble det målt temperaturer, polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) i partikulær fase og flyktige organiske forbindelser (VOC). Brannvesenet oppholdte seg i alle forsøk i minst 1,5 minutter i brannrommet for å få tilstrekkelig eksponeringstid, med tanke på måling av PAH og VOC. I tillegg ble forsøkene dokumentert med videoopptak fra flere vinkler og infrarød video av brannrommet. Etter fire av forsøkene ble det gjennomført intervju med innsatspersonell for å evaluere de taktiske vurderingene som ble gjort under slokkeinnsatsen.

I forsøkene førte alle slokkemetoder til at temperaturen i røyksjiktet sank under 150°C innen 2,5 minutter og brannen ble slått ned. I alle forsøkene ble det gjentenning av brannen ca. 6 minutter etter forsøkstart, med unntak av forsøk F4, slokking med skum, hvor det ble gjentenning etter ca. 4 minutter. Forsøkene viste at skjærslokker og slokkespyd har god effekt, selv under «kunstige» begrensninger i forsøkene (varighet og slokkeretning). Begge disse slokkemetodene brukte ca. like mye vann. Ettersom innkjøpskostnader for slokkespyd er betydelig mindre enn for en skjærslokker, er dermed slokkespydet funnet å være ikke bare et effektivt slokkeverktøy, men også gunstig fra et kost/nytte perspektiv. Innkjøpskostnader er viktig med tanke på tilgjengelighet for brannvesener, spesielt for mindre brannvesen. Skum hadde dårligst kjøleeffekt i forsøkene og førte til raskest gjentenning. Det konkluderes derfor at skum er minst egnet som slokkemiddel for å redusere temperaturen i brannrommet ved høye temperaturer. Imidlertid er det viktig at bruk av skum vurderes avhengig av brannscenario siden denne studien ikke evaluerte alle egenskaper og eventuelle fordeler ved skum (for eksempel evne til å tildekke brennbare væske). Videre kan det antas at skum kan ha bedre effekt når temperaturen senkes først ved å benytte en utvendig slokkemethode. Kombinasjonen av skum og utvendig slokkemetoder ble ikke undersøkt i denne studien og det anbefales derfor at fremtidig forskning evaluerer potensialet av denne kombinasjonen.

Å benytte en utvendig slökkemetode (skjærslukker eller sløkkespyd) som umiddelbart tiltak i forkant av innsats med røykdykking gir følgende fordeler sammenlignet med røykdykking uten bruk av en utvendig slökkemetode:

- mindre sot og mindre eksplosjonsfarlige/giftige branngasser i brannrommet,
- bedre virkning av det sekundære, innvendige slökkemiddelet,
- raskere reduksjon av temperaturen i brannrommet,
- mindre badstueffekt (høy luftfuktighet kan gi varmegjennomslag i klærne til innsatspersonellet, som igjen kan føre til skader, og at innsatspersonellet må trekke ut).

Målinger under forsøkene viser at bruk av skjærslukker eller sløkkespyd kan redusere eksponering for brannvesenet med tanke på varme og kontakt med partikler. Det var ikke mulig å identifisere en klar trend for eksponering til de kreftfremkallende stoffene (PAH og VOC) målt på jakken til brannkonstabelen, ved sammenligning av de ulike slökkemetodene i forsøkene.

Forsøkene og intervjuene med innsatspersonell viser videre at brannvesenet undervurderte den negative ejektoreffekten som lufteåpninger har inn til brannrommet. Det vil si at plassering av et strålerør i nærheten av en åpning kan føre til at mer oksygen blir tilført til brannen som forverrer situasjonen. Videoopptakene fra forsøkene som er publisert sammen med denne rapporten vil være et godt læringsverktøy for brannvesenet.

Dette prosjektet ble presentert på DiBK's fagdag om brann 2021. Presentasjonen er tilgjengelig her:

<https://dibk.no/om-oss/Kalender-DiBK/fagdag-om-brann---2021/> (video)

<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-56407> (slides)

Videoopptakene fra brannforsøkene er tilgjengelig her:

- F1: <https://youtu.be/Wx9r0Y4sas0> (Skjærslukker og vann)
 F2: <https://youtu.be/PtMKENzniR4> (Skjærslukker og vann)
 F3: <https://youtu.be/1UwrOai95A8> (Strålerør og vann)
 F4: <https://youtu.be/Y8ksjAV-VK4> (Strålerør og skum)
 F5: <https://youtu.be/Yvm9xIYIbPE> (Sløkkespyd og vann)
 F6: <https://youtu.be/Kfredqebjdo> (Sløkkespyd og vann)

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

RISE har i løpet av de siste årene gjennomført flere studier med tema effektive slokkeinnsatser, tilgjengelig og nødvendig mengde slokkevann, nye slökkemetoder og brannvesenets eksponering for røyk:

- Slokkevannsmengder (Storesund, Hox, Bøe og Wighus), 2013 [1]
- Slökkemetoder med lite vann (Hox og Bøe), 2017 [2]
- Utredning i forbindelse med brannvesenets dimensjonering (Storesund, Hox, Steen-Hansen, Sesseng og Ishol), 2017 [3]
- PartiKle-prosjektet (Storesund og Mikalsen), 2019 [4,5]

Det er likevel fremdeles behov for mer kunnskap om hvordan man kan redusere brannvesenets eksponering for røyk, hvordan slokking kan utføres mer effektivt, og hvordan redusere miljøpåvirkning ved avrenning av giftige stoffer til grunnen og røykutslipp.

1.2 Målsetting

Målet med dette prosjektet er å øke kunnskapen om hvordan man kan slokke brann i mindre bygningsenheter på en effektiv måte med hensyn til tid og mengde vann, og med minimal eksponering for brannvesenet med tanke på røyk, varme og direkte kontakt med sot, samt minimal miljøeksponering ved avrenning av slokkevann.

Et delmål i prosjektet er samarbeid med prosjekter i forskningssenteret FRIC hvor det er overlappende tema, for å dra nytte av synergieffekter og felles læringspunkter.

De viktigste nytteverdiene fra prosjektet vil være et tydeligere kunnskapsgrunnlag som myndigheter og brannvesen vil kunne bruke for opplæring internt, til bruk ved Norges brannskole og ved valg av slokkeverktøy.

1.3 Overordnet forskningsmetode

Studien er basert på tilgjengelig forskningslitteratur og mellomskala brannforsøk. Kapittel 3 gir en detaljert oversikt over forskningsmetoden. Forsøksoppsettet, instrumentering og rammen for forsøksgjennomføring er beskrevet i Vedlegg A.

1.4 Begrensninger

Resultatene fra brannforsøkene i studien er kun gyldige for de brannscenarier som er undersøkt. I den grad det går an å trekke mer generelle konklusjoner fra funnene, er det spesifisert i rapporten.

2 Tidligere studier

Slokkeutstyr og slökkemetoder for brannvesenet utvikles stadig, men spesielt sent på 90-tallet og begynnelsen av 2000-tallet skjedde det mye utvikling på området. Nytt utstyr som for eksempel skjærslokker, utviklet i 1996, og sløkkespyd ble introdusert og muliggjorde at brannvesenet kunne gjennomføre slukkeinnsats fra utsiden av bygningen. Det nye utstyret førte også til endringene i slokketaktikken (for eksempel introduksjon av Quadrant-modellen [6]). De siste årene har forskningsfokuset flyttet i økende grad til effekt av vannavrenning og tilsetningsstoffer som skum på mennesker og miljø.

En nylig publisert rapport fra FRIC (Fire Research & Innovation Centre) [7] oppsummerer kunnskapsfronten innen manuelt brannsløkkingsutstyr som brukes av brannvesenet for å bekjempe bygningsbranner, og gir en oversikt over kunnskapshull og utfordringer innen fagfeltet. Rapporten konkluderer blant annet at det er skjærslokker og sløkkespyd som er mest lovende for å effektivt og med minst mulig vannforbruk slukke branner i mindre bygningsenheter.

Skjærslokkeren ble også vurdert å være den beste slökkemetoden i en tidligere studie fra Hox og Bøe [2] som gjennomførte en rekke brannforsøk for å undersøke skjærslokker, CAFS (*compressed air foam system*), sløkkespyd og «tradisjonell» sløkking med strålerør og motorsag. Imidlertid fokuserte branntestene fra Hox og Bøe på hulromsbranner som har annen karakteristikk enn rombranner, men rapporten inkluderer også erfaringer fra nedbrenning av et bygg, som i denne studien ble brukt for å etablere begrensningene for skjærslokker og sløkkespyd (se kapittel 3.2). Et annet viktig funn fra Hox og Bøe er at selv om mange brannvesen (81%) kjenner til skjærslokker, så er det kun 19% som har tilgang til en skjærslokker. Det vil si at det er viktig å fokusere også på slökkemetoder som kan potensielt gi en sammenlignbar effekt, men til en lavere kost, som for eksempel sløkkespyd. Dette er spesielt viktig for mindre brannvesen.

En annen relevant studie ble gjennomført av Van den Dikkenberg et al. [8] som sammenligner fem forskjellige slokketmetoder (*fognails*, skjærslokker, *spray distribution nozzle*, CAFS OneSeven og strålerør) i fire forskjellige brannscenarier. Det konkluderes at det viktigste er å gjennomføre ekstern sløkking fra utenfor rommet der brannen befinner seg eller så nær brannen som mulig. Van den Dikkenberg fokuserer på evnen å oppholde seg i rommet (engelsk *tenability*) for personer som allerede befinner seg i en bygning og eventuelt prøver å rømme, mens i denne studien fokuserer vi på eksponering for brannvesenet. Ettersom brannvesenet har på seg åndedrettsvern, er for eksempel CO-konsentrasjonen ikke relevant for eksponering og brukes kun som indikasjon over fullstendigheten av forbrenningen.

En omfattende rapport av praktiske erfaringer fra bruk av skjærslokkeren og *cutting extinguisher concept* generelt gis av Fallberg et al. [9]. Studien indikerer at skjærslokkeren ofte velges for å unngå risikoen for å antenne branngasser som har akkumulert seg. Videre konkluderer Fallberg et al. blant annet at siden skjærslokkeren gjør at det mulig å kontrollere branngassene før eventuell ventilasjon av rommet startes, så kan høytrykksventilasjon brukes, noe som kan være fordelaktig for slökkearbeidet.

For sløkking med skum og spesielt for indirekte sløkking, altså kjøling av røyksjiktet, er også studien fra Van den Dikkenberg [10] relevant, som sammenligner kjøleevnen av CAFS, Firedos (leverandør av skumutstyr), lavtrykk strålerør og høytrykk strålerør. Det konkluderes at vannbaserte slökkemetoder er bedre egnet for kjøling av røykgassene, men det understrekes at konklusjonene er kun gyldig for brannscenariene som ble undersøkt.

3 Planlegging og forsøksoversikt

For å kvantifisere mulige forskjeller mellom ulike slökkemetoder med tanke på effektivitet, skånsomheten og miljøvennligheten var det behov for et stort forsøksoppsett som krever lang sløkkevarighet. Ved kort sløkkevarighet er det vanskelig å skille mellom forskjellene på ulike slökkemetoder og forskjellene på grunn av utilsiktede variasjoner i eksperimentene. Derfor var målet i planleggingsfasen å utvikle et størst mulig rom innenfor den økonomiske rammen av prosjektet. Det ble også vurdert å inkludere romdelere som tillater røykspredning, men samtidig forhindre at slökkemiddel lett kommer fram til brannen. Imidlertid, vil romdelere gjøre instrumenteringen vanskeligere, spesielt videoopptak med vanlige og infrarøde (IR) kameraer. Det vil også kreve mer arbeid i riggingsfasen før hvert forsøk. Derfor ble det besluttet å bruke et «åpent» rom på 13,5 m² uten videre inndeling. Utenfor rommet ble en korridor bygd (se Figur 3-1) for å simulere spredningen av røyksjikt ut fra brannrommet (relevant for eksponeringsmålingen), noe som gjør innsatsen og tilkomst for brannvesenet mer realistisk (relevant for vurdering av *non-technical skills*). Utforming av rommet er beskrevet i detalj i Vedlegg A.

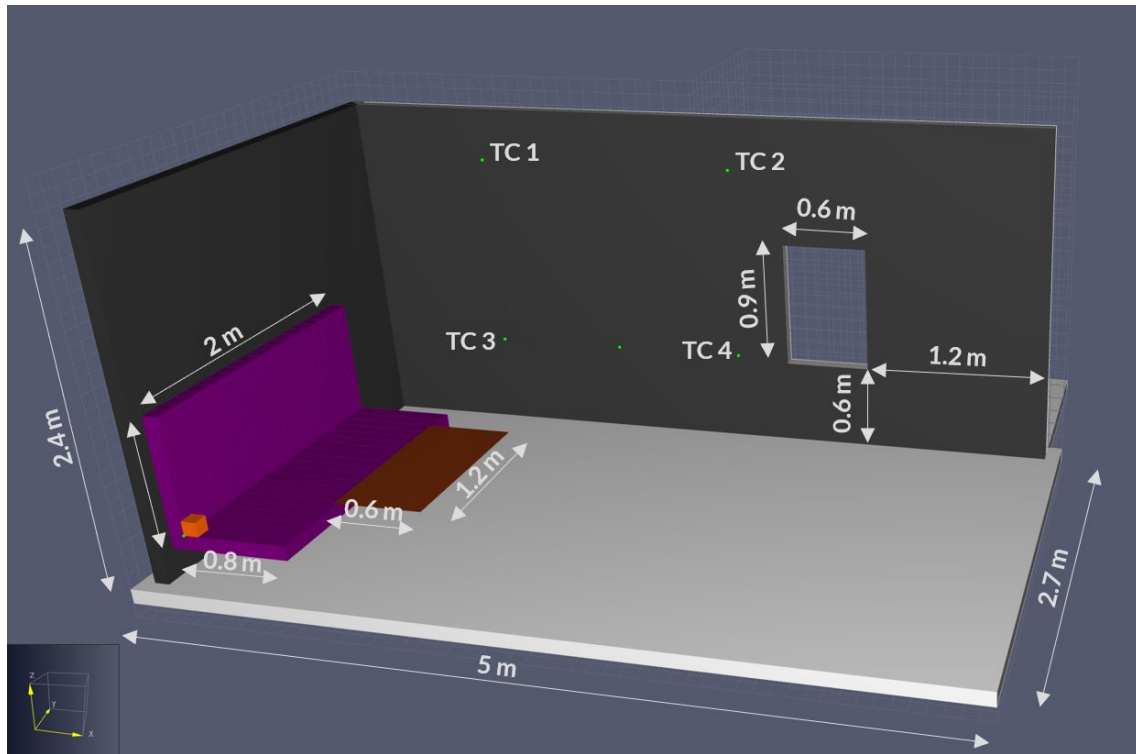


Figur 3-1 Testoppsett sett utenfra, med brannrommet til høyre og korridor til venstre. Ventilasjonsåpningen vises midt i bildet, her uten luke.

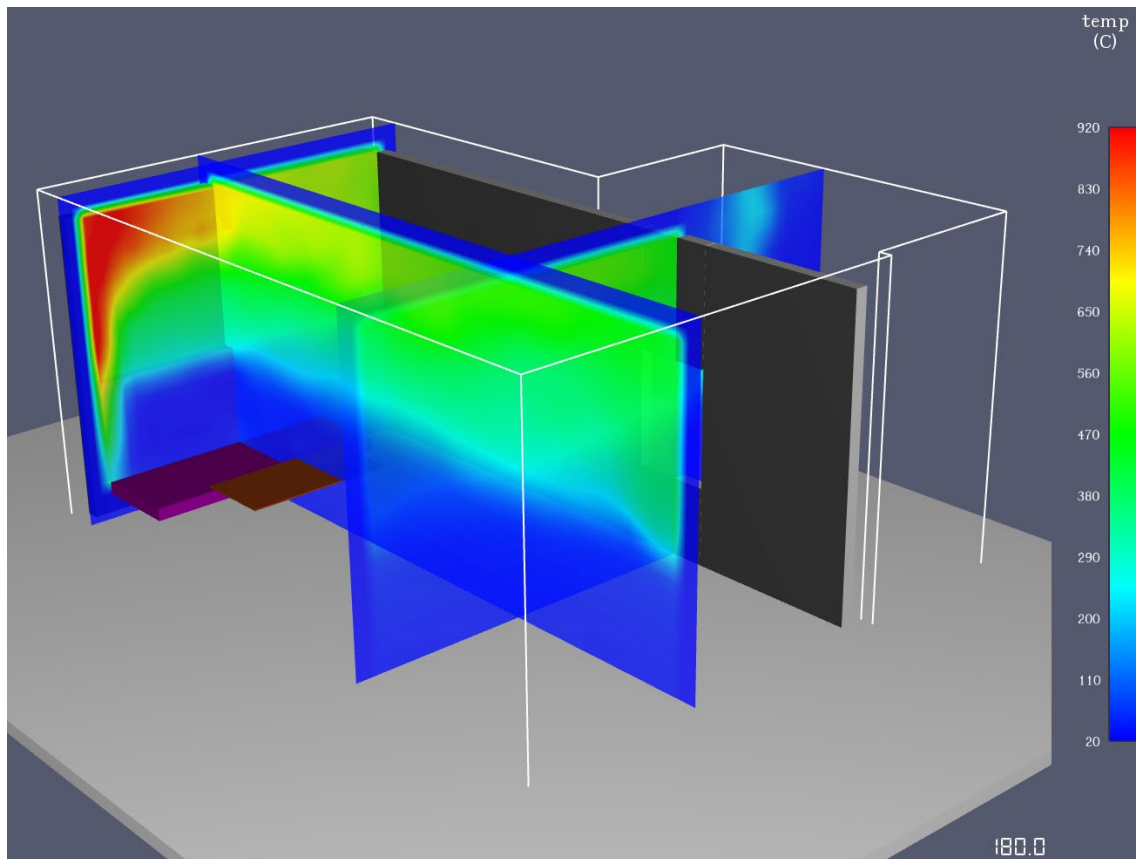
3.1 Numeriske simuleringer

I planleggingsfasen ble CFD (*computational fluid dynamics*) simuleringer gjennomført for å støtte prosessen med å utarbeide forsøksoppsettet. Figur 3-2 viser 3D-modellen som ble brukt i simuleringene. CFD-modellen ble bygd basert på en eksisterende modell som inneholder kun én forbrenningsreaksjon. Det vil si simuleringen er representativ for en brann hvor hovedbidraget til brannen (*heat release rate*, HRR) enten er fra polyuretan-skum eller fra rent treverk. I denne studien ble polyuretan-skummadrasser og OSB-plater brukt som brensel. Derfor ble to simuleringer gjennomført; én for å representere brann i polyuretan-skum og én for treverk. Resultatene fra simuleringene (se eksempel i Figur 3-3) gir derfor kun et grovt inntrykk av

forventet brannforløp og størrelsesorden. Resultatene fra simuleringene forventes derfor ikke å gjenspeile nøyaktig resultatene fra sløkkeforsøkene.

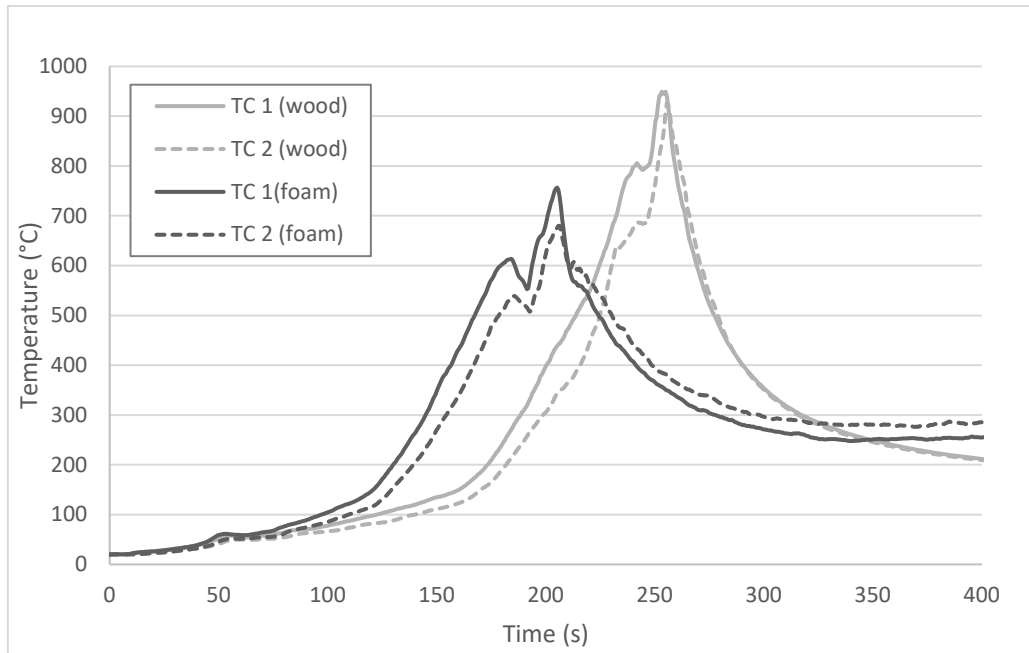


Figur 3-2 3D-geometri brukt i CFD-simuleringene. Tennkilden er illustrert av en oransje boks. Modellen tilsvarer ikke forsøksoppsettet i sin helhet.

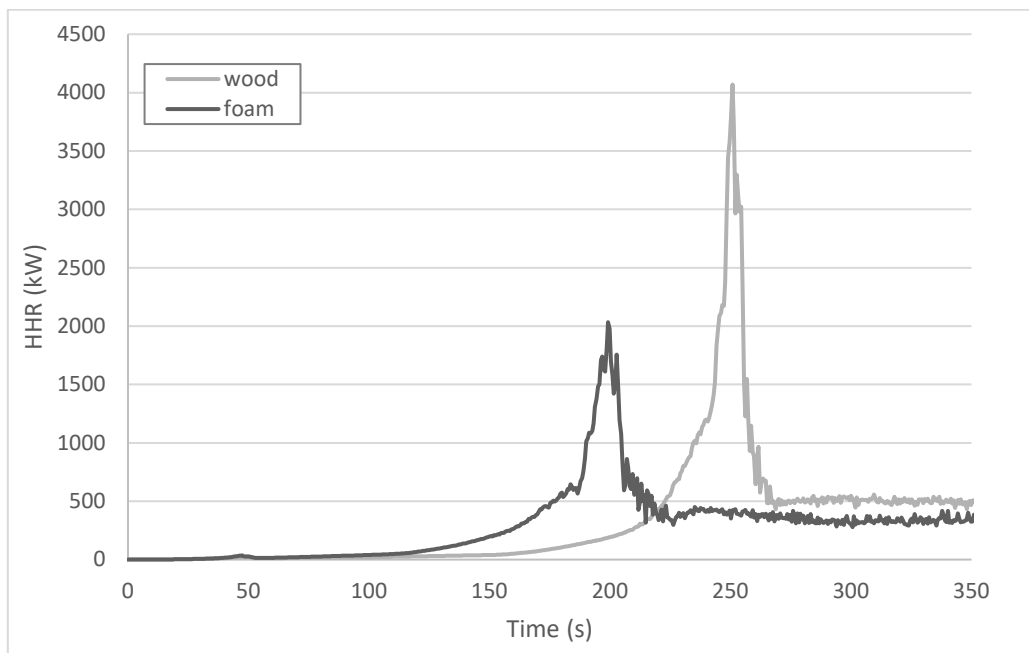


Figur 3-3 Temperaturforløpet etter 3 minutter for simulering som er representativ for brann i polyuretan-skummadrass.

Figur 3-4 viser temperaturdata fra simuleringene. Etter 100 s – 150 s starter temperaturene å stige raskt og oppnår en makstemperatur på henholdsvis 750°C og 950°C ved overtenning på ca. 200 s og 250 s. Maks HRR på dette tidspunktet er 2 000 kW og 4 000 kW henholdsvis (se Figur 3-5). Figur 3-6 viser HRR fordelingen fra en av simuleringene etter 180 s og 200 s. Etter 180 s er temperaturen i røyksjiktet rundt 600°C og røyksjiktet begynner å antenne.

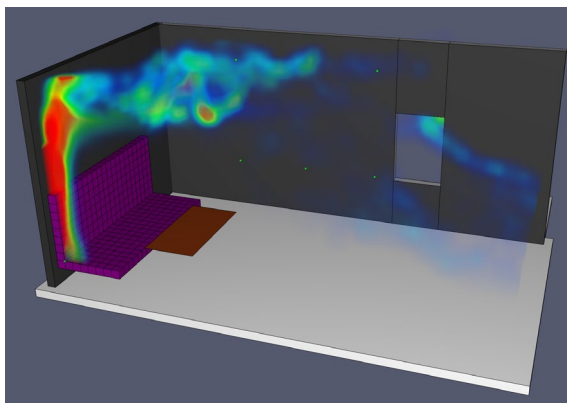


Figur 3-4 Temperaturförloppene simulert i termoelement TC1 og TC2 for simuleringen som er representativ for brann i polyuretan-skummadrass (foam) og treverk (wood).

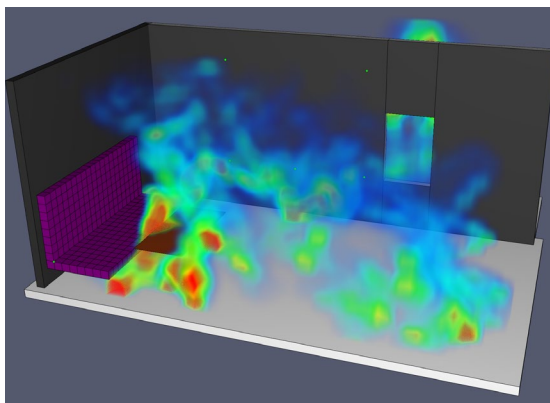


Figur 3-5 Varmeavgivelseshastighet (HRR) for simuleringene som er representativ for brann i polyuretan-skummadrass (foam) og treverk (wood).

Tid = 180 s.



Tid = 200 s.

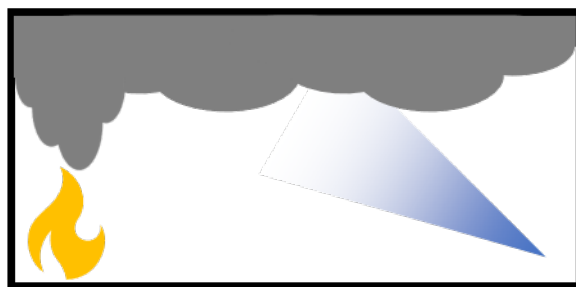


Figur 3-6 Varmeavgivelseshastighet (HRR) for simuleringen som er representativ for brann i polyuretan-skummadrass etter 180 sekunder (venstre) og 200 sekunder (høyre). Fargeskala er likt i begge bilder, rød betyr høy og blå lav HRR.

3.2 Planlegging av slokketaktikken

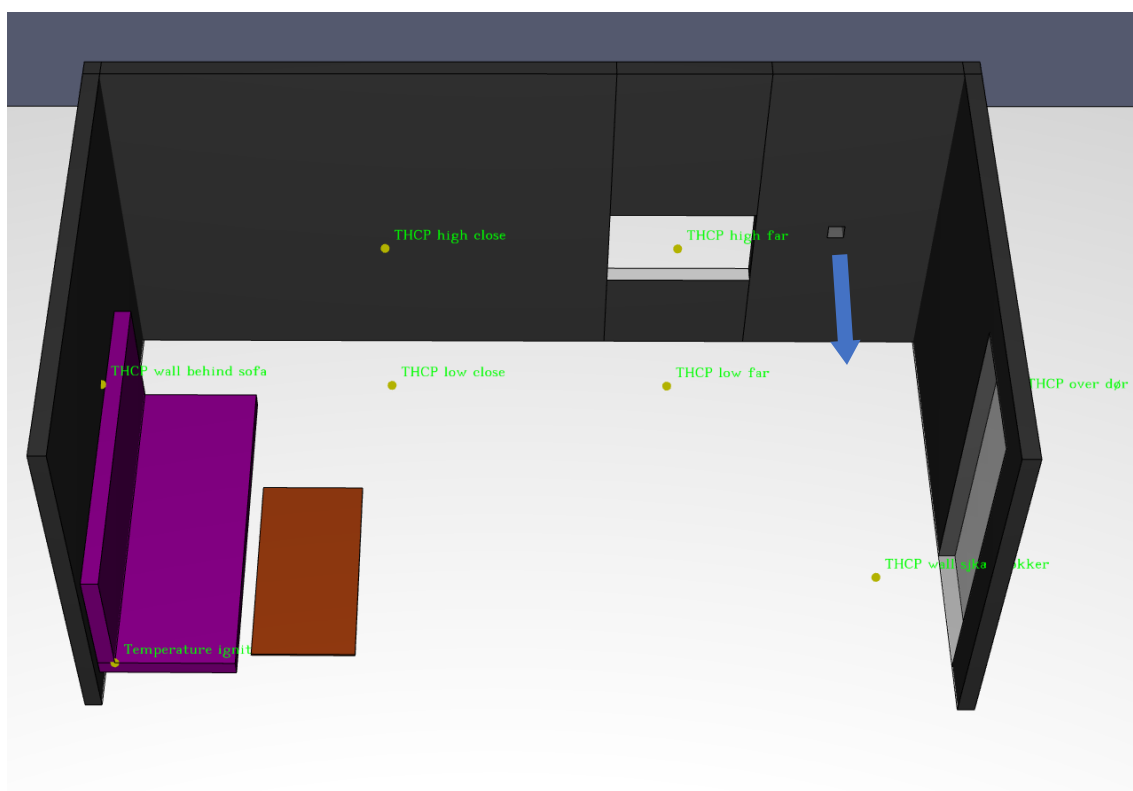
Simuleringene indikerer et relativt raskt brannforløp (ca. 3 minutter til overtenning) med en maks temperatur på rundt 950°C ved overtenning. Basert på simuleringene og erfaringer ble en testprosedyre etablert som bruker temperaturmåling oppunder taket for å styre start av slokkeinnsatsen. Målet var å starte slokking litt før overtenning. Grunnen for å starte slokkingen før rommet er overtent er for å ha mulighet til å evaluere slokkemetodens evne til å forhindre brannspredning til uantente overflater (minimere pyrolyse og avgassing fra disse overflatene). Samtidig er det ønskelig å gi brannen nok tid for å oppnå underventilerte forhold i rommet, som anses mest relevant for brannvesenets innsats. Basert på disse vurderingene ble 350°C, 5 cm oppunder taket, satt som startkriterie for å starte slokkeinnsatsen. Det bemerkes at kun sideveggene var brennbare (OSB-plater), mens gulvet og takk ikke var kledd med brennbart materiale. Å ha en brennbar kledning i himlingen hadde antageligvis gitt et bedre grunnlag for å evaluere evne av slokkemetoden for å minimere avgassingene fra uantente overflate. Imidlertid, ble en ubrennbar kledning valgt for å unngå at instrumentering som var festet oppunder taket måtte skiftes etter hvert forsøk.

På grunn av begrenset romstørrelse vil et direkte angrep med strålerør eller en «lengre» innsats av skjærslokkeren/slokkespyd føre til for kort slokking, med tanke på mulighet for å sammenligne effektiviteten for forskjellige slokkemetoder, samt måling og sammenligning av eksponering for farlige stoffer under innsats. Derfor ble slokking med strålerør begrenset til indirekte slokking oppunder taket med en åpningsvinkel på 30° (Figur 3-7).



Figur 3-7 Illustrasjon av slokkevinkel for slokking med strålerør.

På samme bakgrunn ble lokasjon og retningen for skjærslokke og slokkespyd valgt. I et reelt scenario hadde skjærslokkeren typisk blitt brukt for å etablere en vanntåkestråle rettet i en vinkel oppover mot brannen og inn i røyksjiktet. For å forhindre for tidlig slokking ble både skjærslokke og slokkespyd posisjonert slik at strålen gikk horisontalt på tvers av rommet (se Figur 3-8). Det ble boret et hull ($\varnothing = 5$ cm) 1,15 m fra gulvet og 1,15 m fra nærmeste vegg. Hullet ble laget for å utelukke at tiden for å skjære eller bryte seg gjennom veggen påvirket tiden til starten av vannpåføring, samtidig som det er lettere å forsikre seg at posisjonen av skjærslokke og slokkespyd er det samme for alle forsøkene.



Figur 3-8 Illustrasjon av rommet. Hull i vegg hvor skjærslokke var satt inn (grå firkant), samt retningen av vannstrålen fra skjærslokkeren (blå pil) er indikert. Posisjonen av åtte termoelement (gule sirkler) er indikert.

Siden skjærslokkeren ble brukt på tvers av den korte siden av rommet (2,7 m) ville strålen treffe vegg på motsatt siden av rommet. En test utenfor rommet ble gjennomført for å evaluere visuelt

i hvilken grad det vil forhindre at det dannes vanntåke¹. Det ble konkludert at skjærslokkeren fortsatt genererer tilstrekkelig vanntåke, selv om den treffer på en vegg etter 2,7 m. Et bilde fra forsøket vises i Figur 3-9.



Figur 3-9 Spredning av skjærslokker strålet når den treffer vegg på motsatt siden av rommet. Avstand av skjærslokkeren i dette bildet til OSB-plate tilsvarer samme avstand som rom bredden.

Skjærslokkeren leverer nominelt 57 l/min. Det vil si nesten en liter per sekund (0,95 l/s), som danner rundt 1,6 m³ vanndamp, antatt at alt vann fordamper. Etter 10 sekund av skjærslokkerinnsats er dermed ca. 25% av romvolumet fylt med vanndamp. Dette estimatet ble lagt til grunn for å begrense slokkingen med skjærslokker og slokkespyd i utgangspunktet til 8 sekund, og deretter fortsette med intern slokking, hvis nødvendig. Å bruke skjærslokker eller slokkespyd fra utsiden etterfulgt av intern slokking med strålerør er også en representativ taktikk i en reel slokkeinnsats. Rommet i denne studien har et grunnareal på 13,5 m², en takhøyde på 2,4 m og en ventilasjonsåpning på 0,54 m². Hox og Bøe rapporterer at brannvesenet brukte 15 s og 20 s for å slokke en brann i et rom på 9,5 m² med takhøyde 2,4 m og 1,8 m² ventilasjonsåpning med en skjærslokker. Dette tilsvarer henholdsvis 12 og 16 liter vann. For samme romkonfigurasjon ble også et slokkespyd testet som slokket brannen etter 12 s, med 3 støt på 11 liter hver [2]. Rinne et al. rapporterer at et brann i et rom på 12 m² ble slokket med en skjærslokker og ca. 50 liter [11]. Disse studiene støtter den «kunstige» begrensingen til 8 s for å forhindre at brannen slokkes for fort og at det dermed ikke er mulig å evaluere variasjoner mellom forsøkene.

¹ Vanntåke: «Dråpedusj hvor 90 % av mengden av vannet har en diameter mindre enn 1000 mikrometer (1 mm), målt i den groveste delen av dråpedusjen, i et plan 1 m fra dysen». Kilde: <http://kbt.no>

3.3 Forsøksoversikt

Totalt ble sju slokkeforsøk gjennomført (se Tabell 3-1).

Tabell 3-1 Forsøksoversikt. De fire forsøkene som er del av hovedforsøksserien og som er sammenlignbare med hverandre er markert lysegrått.

Forsøk	Slokkeutstyr	Slokkemedium	Brensel
F1	Skjærslokke	Vann	3 madrasser og OSB-plater
F2	Skjærslokke	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F3	Strålerør	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F4	Strålerør	Skum	2,5 madrasser og OSB-plater
F5	Skjærslokke	Vann	Ekte møbler og OSB-plater
F6	Slokkespyd	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F7	Strålerør	Vann	Udefinert

Forsøkene deles inn som følgende:

- Pretest (F1)**
 Forsøk F1 ble gjennomført med skjærslokken og vann. Forsøket ble gjennomført for å etablere en egnet slokkeprosedyre (slokkestartkriterie, slokketeknikk, osv.) og identifisere eventuelle nødvendige endringer i oppsettet (konfigurasjon av sofa/ brensel, ventilasjonsåpning, osv.)
- Hovedforsøksserien (F2, F3, F4 og F6)**
 Formålet med i denne serien var å gjennomføre forsøkene i henhold til samme prosedyre, hvor kun slokkeutstyr og slokkemedium varieres for å gjøre forsøkene sammenlignbare med hverandre.
- Forsøk med ekte møbler (F5)**
 Forsøk F5 ble gjennomført med ekte møbler, dvs. puter, sofa, gardiner og bord bl.a. bestående av trefiberplater, polyester, bomull og cellulose. Formålet med forsøket var å evaluere i hvilken grad eksponering og røyksammensetning endres når ekte møbler blir brukt istedenfor standardisert brensel. I tillegg ble en annen tennkilde, tilsvarende en fyrstikks-flamme (IMO FTPC Part 8, 4.3 [12] og NS-EN1021-2:2014, 6.4 [13]) brukt. Dette ble gjort for å generere data til samarbeidende prosjekter, FRIC² og HERO³. Metoden for antenning påvirker ikke slokking.
- Overtenningsforsøket (F7)**

² <https://fric.no/forside>

³ <https://www.sintef.no/prosjekter/2019/helserisiko-og-helseeffekter-ved-brannslukking/>

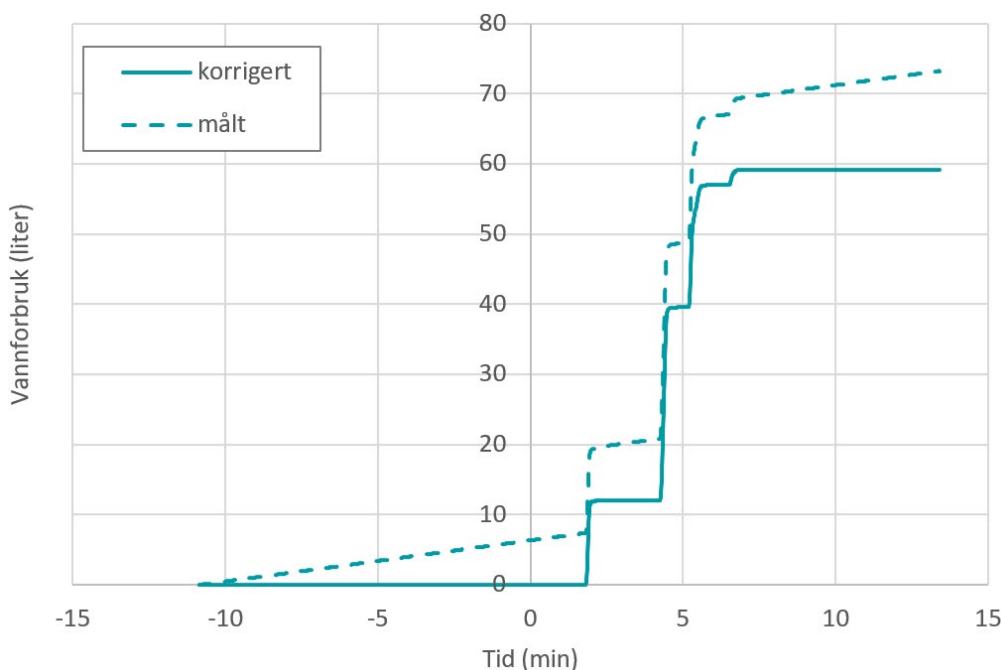
Forsøk F7 ble gjennomført i regi av brannvesenet uten å følge en fast prosedyre for slokking. Formål var å benytte anledningen til at brannvesenet kunne gjennomføre øving inkludert flere overtenninger.

4 Metode

Denne studie er basert på storskala brannforsøk. Forsøksoppsettet og prosedyre er beskrevet i (0).

4.1 Måling av vannforbruket

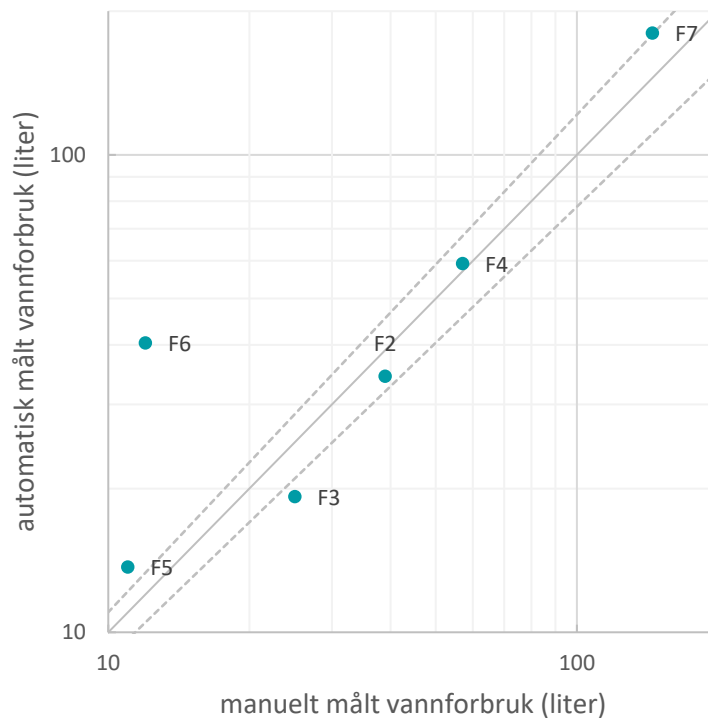
Vannforbruket under slokkingen ble målt med en vannstrømningsmåler (Coriolis, NBL-2290). Vannet ble levert av en brannbil, hvor vannslangen fra brannbilen ble koblet inn på vannstrømningsmåleren og slangen med slokkeutstyret ble koblet på etter vannstrømningsmåleren. Mengden vann ble logget av en datalogger. For alle forsøk ble det registrert vanntap, blant annet fra skader i slangene. For å korrigere for det, ble gjennomsnittstapet over ett minutt før slokkingen startet beregnet for alle forsøk. Vannmålingene ble deretter justert tilsvarende for å ta hensyn til vanntapet (se Figur 4-1).



Figur 4-1 Akkumulert vannforbruk for forsøk F4 målt direkte (stiplet linje) og korrigert for vanntapet (solid line).

I tillegg til ovennevnte korrigering for vanntap ble vannforbruket avlest manuelt rett før og etter slokking for å ta hensyn til vanntapet når det ikke ble gjennomført slokking. Den manuelle metoden tar imidlertid ikke hensyn til vanntapet under slokking og er generelt i større grad avhengig av personen som noterer målinger. Figur 4-2 viser sammenligningen mellom disse to målemetodene. Avviket mellom metodene ligger i størrelsesorden av 25%, med unntak av forsøk F6 som er viser en betydelig større forskjell. På grunn av større usikkerhet knyttet til de

manuelle målingene, er alle videre vannmålinger i denne studie basert på de korrigerte målinger fra loggesystemet.



Figur 4-2 Vannforbruk målt manuelt (x-aksen) og korrigerte målinger fra loggingssystemet (y-aksen) for hovedforsøksserien (F2, F3, F4 og F6) og forsøket med ekte møbler (F5). De to stiplede linjer indikerer +/-25% avvik mellom de to målemetodene.

4.2 Registrering av forsøksforløp

Forsøksforløpet ble analysert basert på videoopptakene fra flere kameraer. Det ble brukt ett til to kameraer i brannrommet, to kameraer som filmet gjennom ventilasjonsåpningen, et oversiktskamera og et infrarødt kamera som filmet gjennom ventilasjonsåpningen (se Vedlegg A for detaljer om forsøksoppsett). I tillegg ble en temperatur på 50°C målt med termoelement ved tennkilden brukt for å definere starten på antenning. De ble brukt et termoelement på vegg på motsatt side av ventilasjonsåpningen for skjærslokke og slokkespyd for å bekrefte start av slokkingen og et termoelement over døra på utsiden av brannrommet for å overvåke når døren ble åpnet.

4.3 Eksponeringsmålinger

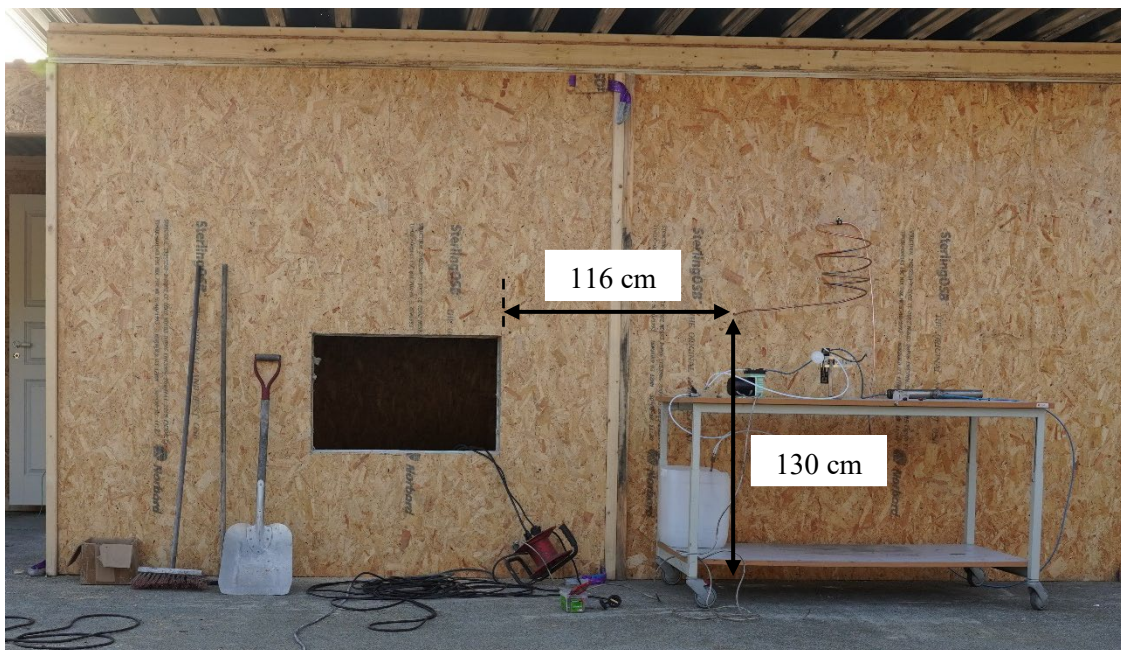
Det ble målt innhold av ulike typer partikler og gass i røyken under slukkeforsøkene, som representerer ulike uheldige eksponeringer for brannfolk. Ulike metoder og instrumenter ble brukt, som spesifisert nedenfor. Resultatene fra eksponeringsmålingene vil bli beskrevet kort i denne rapporten, men vil bli tilgjengelige i sin helhet i forskningsprosjektet HERO⁴.

Logget partikkelkonsentrasjon per volum forsøksluft, ved bruk av en partikkelteller av typen TSI 8525 P-Ttrak Ultrafine Particle Counter, som måler antall partikler i størrelsesorden 0,02 til 1 μm . Logging av partikkelkonsentrasjonen ble i utgangspunktet begrenset til å omfatte tidspunktet fra antennelse til da slukkeinnsatsen startet på grunn av instrumentenes følsomhet for fukt. Avvik fra denne planen er kommentert.

Akkumulert partikkelkonsentrasjon per volum forsøksluft, vha. mikrofiltre som filtrerer ut alle partikler $\geq 1 \mu\text{m}$. Akkumulert partikkelkonsentrasjonen ble bare målt i forkant av slukkeinnsatsen på grunn av risiko for at slukkemediet ville skade filtrene. Avvik fra denne planen er kommentert.

Det ble brukt gassanalysator av typen Dräger X-Am 5000 og Dräger X-Am 5600 for å måle karbonmonoksid (CO) og karbondioksid (CO_2) som var plassert i ventilasjonsåpningen. Røykgasskomponenter ble bare målt før slukkeinnsatsen startet siden slukkemediet kan ødelegge testresultatene. Gassmålingene er mindre relevant for røykdykkere og er derfor kun presentert i Vedlegg C.

Plassering av prøveluftsuttak for partikkelkonsentrasjoner var tatt ved 130 cm høyde, for å representere høyden en brannkonstabels hode er på, ved kneling. Måleposisjonen var 30 cm ut fra veggen og 116 cm til høyre for ventilasjonsåpningen (se Figur 4-3 og Figur 4-4).



Figur 4-3 Plassering av prøveluftsuttak for partikkelkonsentrasjoner fra utsiden av brannrommet.

⁴ <https://www.sintef.no/prosjekter/2019/helserisiko-og-helseeffekter-ved-brannslukking/>

Prøvene ble etter forsøk pakket inn i aluminiumsfolie og holdt kjølig, før de ble sendt samlet til SINTEF NORLAB for analyse (NIOSH 5515, issue 2 (GC-MS-MS) for PAH og TD-GC/MS for VOC).



Figur 4-5 Plassering av prøvetakingsutstyr på røykdykker.

Resultatene fra PAH- og VOC målingene ble deretter normalisert for å vise et representativt bilde av eksponeringen for brannkonstablene. Normaliseringen ble gjort ved å spre akkumulert stoffmåling over faktisk eksponeringstid inne i brannrommet. På denne måten blir eventuell tid før og etter brannkonstablene går inn i brannrommet ikke med.

4.4 Innsatspersonellets taktiske vurderinger

Datagrunnlaget for den delen av forsøket som omhandler innsatspersonellets taktiske vurderinger er dokumentanalyse, observasjon og påfølgende intervju med slangefører (røykdykker) og sikringsperson (utrykningsleder). Personellet som utførte slokkingen var på forhånd informert om brenselstype og mengde, brannrommets utforming og størrelse og temperatur når slokkingen skulle starte og stoppe. Personellet var også instruert om minuttliter utgang fra slokkeverktøy, og utgangstrykk fra brannpumpe.

4.4.1 Feltstudier gjennom observasjon

Forsøkene F1-F4 ble filmet med 8-10 meters avstand fra objektet og innsatspersonellet. Hensikten med dette er å skape et observasjonsgrunnlag for de taktiske vurderingene og operasjonsmønsteret til innsatspersonellet som var med på forsøkene. Videoopptakene er under analysen sammenstilt

med videointervjuene for å skape et helhetlig bilde av det faktiske operasjonsmønsteret og refleksjonene til innsatspersonellet. Ved slik metodetriangulering er det større sjanse for å få et riktig bilde av de taktiske vurderingene til innsatspersonellet.

4.4.2 Videointervju med innsatspersonell

Intervjuene ble gjennomført umiddelbart etter hvert forsøk ble utført. Røykdykkeren som ble intervjuet var slangefører. Utrykningsleder hadde det øverste ansvaret for slokkingen. De samme personene ble intervjuet etter alle forsøkene for å ikke få perspektivforskjeller. Det ble på forhånd utarbeidet intervjueskjema (vedleggsoversikt). Intervjuene ble gjennomført med en kvalitativ design, og semistrukturert. Under analysedelen er videoopptak fra forsøkene (F1-F4) og videoopptak fra intervjuene (F1-F4) sammenstilt, og utgjør til sammen grunnlaget for vurderinger og konklusjon.

Tabell 4-1 Videoopptak av intervju med innsatspersonell (røykdykker RD og utrykningsleder UL) og forskere (prosjektleder og prosjektdeltaker fra RISE).

Forsøk	Slokkeutstyr	Slokkemiddel	Intervju	Varighet intervju
F1	Skjærslokke	Vann	UL og RD	08:22
F2	Skjærslokke og strålerør	Vann	UL og RD	05.01
			2 Forskere	04.51
F3	Strålerør	Vann	UL og RD	04.04
F4	Strålerør	Skum	UL og RD	05.23
F5	Skjærslokke	Vann	Ingen intervju ble gjennomført	
F6	Slokkespyd	Vann		
F7	Strålerør	Vann		

4.4.3 Dokumentanalyse

Relevant teori og empiri er lagt som grunnlag for utarbeidelsen av design på feltobservasjon og intervju. I tillegg er relevant litteratur og tidligere resultater sammenstilt med observasjon og intervju i de utførte vurderinger og konklusjonen. Benyttede dokumenter er referert.

5 Resultater og diskusjon

I dette kapittel presenteres resultat er og diskusjon fra sløkkeforsøkene F1 – F7. Forsøkene er delt inn i: pretest (F1), hovedforsøksserien (F2, F3, F4 og F6), Forsøk med ekte møbler (F5) og overtenningsforsøket (F7). Forsøkene ble gjennomført over tre dager: F1 og F2 den 30.09.2020, F3 og F4 den 01.10.2020 og F5, F6 og F7 den 09.10.2020.

5.1 Pretest

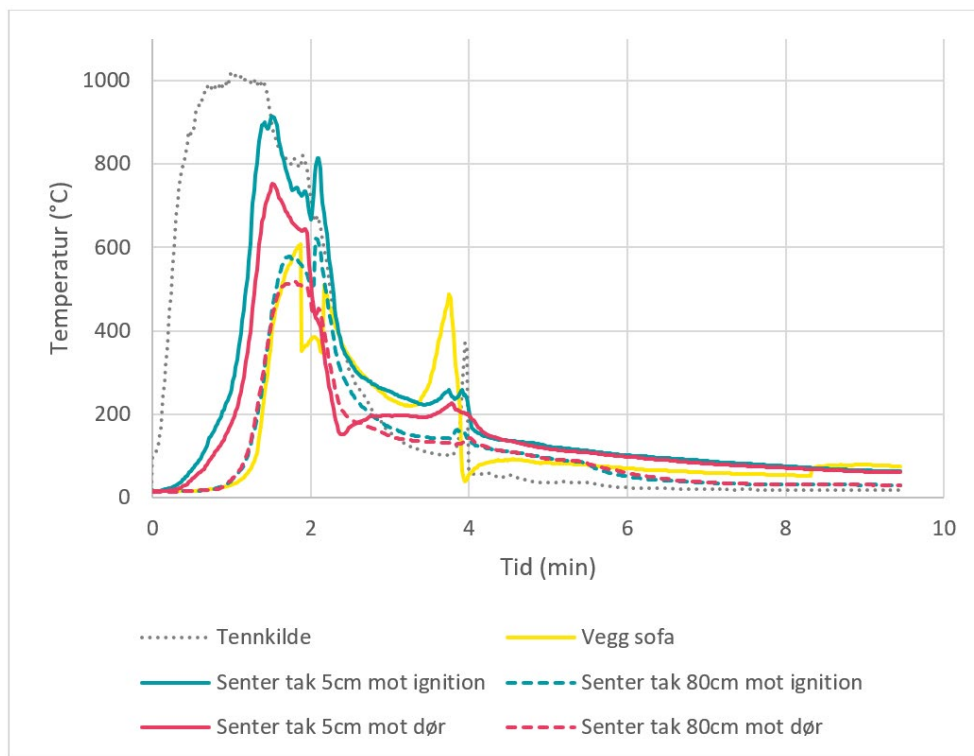
5.1.1 F1 – Forsøksforløp

Tabell 5-1 viser forsøksloggen for forsøk F1. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til sløkking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

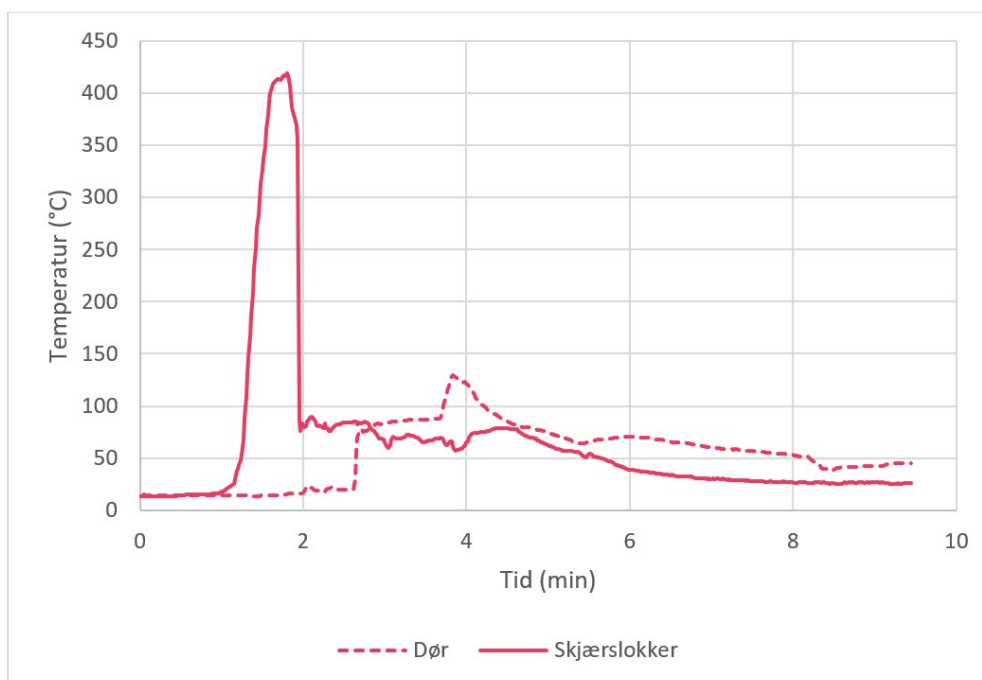
Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-1 og Figur 5-2. Videobilder (fra infrarødt og vanlig kamera) fra ulike tidspunkter av forsøket som for eksempel Figur 5-3 finnes i Vedlegg B. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/Wx9r0Y4sas0>.

Tabell 5-1 Forsøkslogg for F1.

Hendelse	Klokkeslett	Tid etter antenning (min:sek)
Antennelse.	11:25:19	0:00
Start skjærsløkker.	11:27:08	1:49
Full effekt skjærsløkker.	11:27:14	1:55
(Synk.tid for målinger ref. kapittel 4.3)	11:27:22	2:03
Stopp skjærsløkker.	11:27:41	2:22
Start VOC og PAH målinger.	11:27:52	2:33
Dør åpnes helt, og brannfolk går inn.	11:27:57	2:38
Re-tenning.	11:28:36	3:17
Start indirekte slokking.	11:29:04	3:45
Start direkte slokking.	11:29:16	3:57
Stopp slokking.	11:29:21	4:02
Brannfolk går ut.	11:29:59	4:40
Dør lukkes helt.	11:30:05	4:46
Stopp VOC og PAH målinger.	11:30:20	5:01
Dør åpnes, slokking av ulming.	11:30:53	5:34
Maks temperatur målt < 100°C.	11:31:27	6:08



Figur 5-1 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.



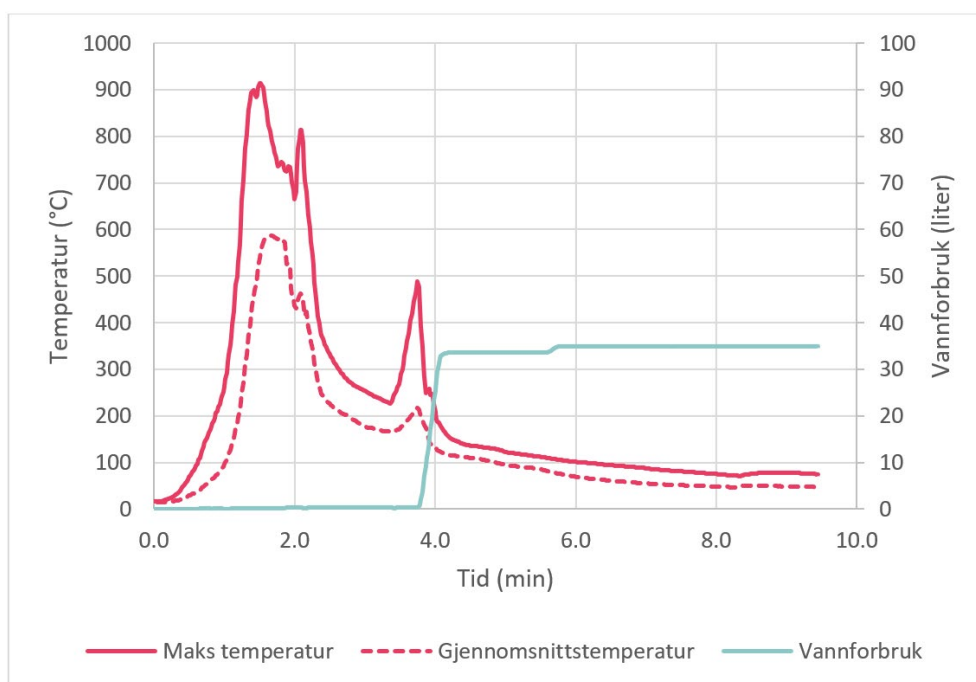
Figur 5-2 Temperaturmåling på veggen på motsatt side av åpningen for skjærslokker og slokkespyd (solid linje) og temperaturmålingen over døra på utsiden av brannrommet (stiplet linje).



Figur 5-3 Videobilde ved forsøksstart.

5.1.1.1 F1 – Vannforbruk

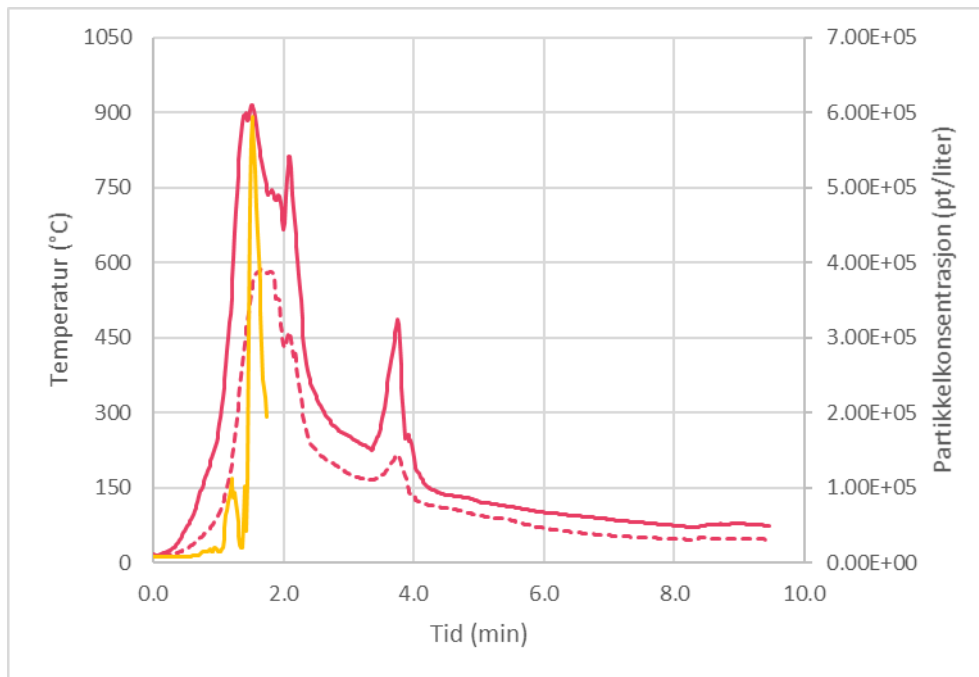
Figur 5-4 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk. Det tar litt tid før pumpene til skjærslokker gir full effekt (ca. 6 sekund). Deretter ble skjærslokkeren brukt i ca. 27 sekunder, altså lenger enn planlagt (se avsnitt 3.2). Dette skjedde på grund av dårlig kommunikasjon. Ved full effekt er vannforbruket for skjærslokkeren 57 liter per minutt. Vannforbruket i forsøk F1 er estimert å være mellom 26 og 31 liter.



Figur 5-4 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksiktet basert på målingene vist i Figur 5-1 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk. Vannforbruket av skjærslokkeren ble ikke direkte målt og er derfor ikke inkludert i figuren. Vannforbruk i figuren er kun fra etterslokking med strålerør.

5.1.1.2 F1 – Røykgasseksponering

Tabell 5-6 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F1. Den største toppen er på 595 000 partikler per kubikkcentimeter.



Figur 5-5 Nivåer med partikler i røykgassen sammen med maks- og gjennomsnittstemperatur i forsøk F1.

Total VOC (sum av akkumulert mengde for 35 vanlige VOC forbindelser) målt under hele prøvetakingen (06:48 min:sek, eller 408 sek), er gitt i Tabell 5-2. PAH målinger fra pretesten er ikke tilgjengelige på grunn av utstørsfeil. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (02:02 mm:ss, eller 122 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker.

Pretesten gav det nest høyeste innholdet av VOC av alle forsøkene.

Tabell 5-2 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slokkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

Forsøk F1	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	Ingen tilgjengelig data	-	-
Reell eksponering	Ingen tilgjengelig data	-	-
	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
	73402	6:48/408	179,9
Totalt			
Reell eksponering		2:02/122	601,7

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.1.1.3 F1 – Taktiske vurderinger - Forsøk med skjærslokker

En av de viktige taktiske grepene som innsatspersonellet utfører ved brann, er umiddelbare tiltak. I brannfysikkfaget beskrives fenomenet “doblingsprinsippet”, som en utvikling der en størrelse blir dobbelt så stor for hvert konstante tidsintervall som er lik doblingstiden [14]. Umiddelbare tiltak har som hensikt å redusere den eksponentielle utviklingen en brann har, ifølge *Taktikkboken* av Mattsson og Eriksson [15]. Umiddelbare tiltak har ikke nødvendigvis som hensikt å slokke brannen, men å hindre at overtenning eller at brannen når en terskel som gjør den u håndterlig. De umiddelbare tiltakene skal iverksettes uten opphold når innsatspersonellet ankommer brannen.

Direkte etter forsøket med skjærslokker og vann, intervjues de samme representantene fra innsatspersonellet, røykdykker 1 og utrykningsleder. I intervjuet etterpå beskriver innsatspersonellet (IP) at de trodde rommet ville få en hurtig temperaturstigning på grunn av den høye brannbelastningen som polyuretan-skummadrassene utgjorde. Videre beskriver de at det ble antatt at røyken kom til å bli «feit» (red: høyt innhold av brennbare gasser i forhold til luft) og meget brennbar. Derfor antar IP at innsats med skjærslokker måtte gjøres ganske raskt etter antennelse. IP fikk rett i at temperaturen steg raskt, og at slokking med skjærslokker måtte igangsettes raskt. Som IP forventet hadde skjærslokkeren meget god effekt i brannrommet, til tross for at rommet ikke var lufttett, men hadde fri tilgang på luft fra det åpne vinduet. I intervjuet beskriver IP at den største overraskelsen ved dette forsøket, var at skjærslokkeren hadde såpass god effekt, til tross for at skjærslokkeren ikke ble rettet mot det området med høyest energi. Dette var besluttet på forhånd, og IP var godt kjent med at det ikke ble slokket mot et optimalt punkt. Egenskapene som er fremtredende ved å bruke en skjærslokker tidlig ved brann, er kjøling av branngasser, fortregning av oksygen og det at oksygen ikke tilføres utenfra [16].

«Vi ser at selv om vi ikke “skjot” på et optimalt punkt, hadde skjærslokkeren overraskende god effekt, og slokket veldig hurtig. Vi ble forbauset over at temperaturen falt så fort. Jeg tipper det gikk 4-5 sekunder med skjærslokkeren, for å ta ned temperaturen fra 400 til 200 grader.»

Innsatspersonellet beskriver at brannen var nesten helt slått ned da de entret rommet. Det var bare to veldig små flammer igjen i sofaen. Videre beskriver de at luften var så fuktig, uttynnet med

damp og temperaturen var så lav at det ikke var noen fare for tenning av branngassene etter deres vurdering [17].

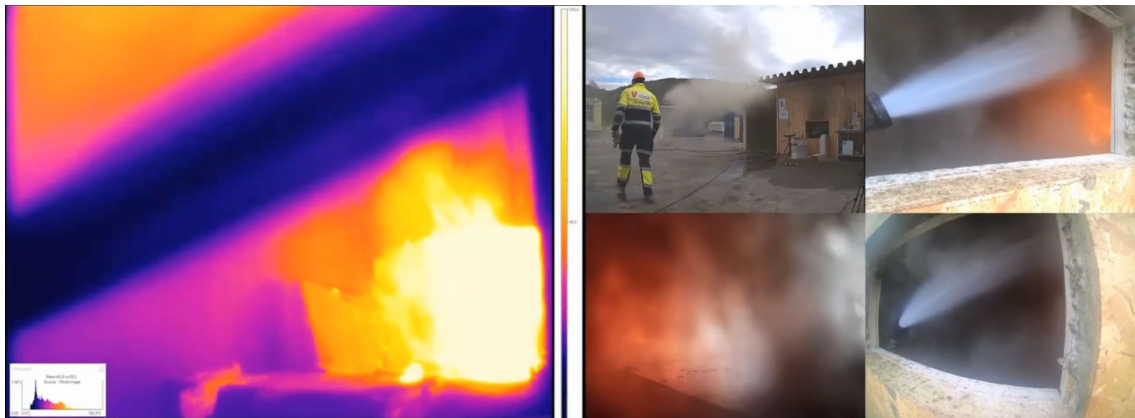
Et annet læringspunkt oppsto utilsiktet da forsøket var gjennomført og røykdykkerne skulle kjøle ned brannrommet før omrigging til neste forsøk. Røykdykkerens posisjon var på dette tidspunktet hjørnet ved siden av ventilasjonsåpningen (se Figur 5-6). Plutselig oppsto det gjentenning i det nedkjølte brannrommet, der IP antok at brannen var helt sløkket. Videobildene (se Figur 5-7) viser at brannen tok seg raskt opp som begrunnes med oksygentilførsel fra ejektoreffekten av vannstrålen. Dette skjedde når IP brukte spredt stråle for å fukte ned det området initialbrannen hadde vært:

«Men det vi oppdaget da vi skulle kjøle ned området der brannen hadde vært, fikk vi retenning fra initialbrannstedet. Dette tror vi skjedde på grunn at vi satt ved det åpne vinduet og brukte spredt stråle ved vinduet. Det vi faktisk gjorde da, var å tilføre brann oksygen, slik at vi fikk retenning»



Figur 5-6 Brannvesenets posisjon i rommet under pretest.

Innsatspersonellet sier at de kjenner til ejektoreffekten som oppstår ved bruk av spredt stråle, men at den ville tilføre såpass mye oksygen fra det åpne vinduet, var overraskende. De mener dette helt klart er et læringspunkt, fordi innsatspersonell ikke nødvendigvis tenker over problemet med at ejektoreffekten tilfører såpass mye oksygen. Grunnen til dette er at utnyttelsen av ejektoreffekten som regel brukes til å evakuere brannfarlige røykgasser ut av brannrommet [14].



Figur 5-7 IR bildet (venstre) og videobildene (høyre) under intern sløkkeinnsats (tid 3 minutter og 50 sekunder).

Til slutt beskriver IP skjærslokkeren som et altfor lite brukt sløkkeredskap i forkant av røykdykking.

«Skjærslokker gir helt klart en større sjans for å redde liv. Det handler om at vi sparer mye tid».

De legger til grunn at vannforsyning ofte er et problem som brannvesenet må ta hensyn til i akuttfasen [18]. Skjærslokkeren bruker lite vann, men holder et høyt trykk, og sprer dermed den lille vannmengden i et stort område, på kort tid. Derved er sløkkeeffekten raskt temperaturfall og fuktig miljø i brannrommet [16]. Dette gjør at når innsatspersonellet starter røykdykkingen, kan de raskt gjennomføre søk etter savnede.

5.1.2 Justeringer i forsøksgjennomføring etter F1

Basert på resultatene av pretesten ble følgende endringene i forsøksgjennomføring iverksatt, som gjelder for alle videre forsøkene:

- Før skjærslokkeren brukes for sløkking blir den brukt utenfor brannrommet for å få raskere fyll og mer jevn effekt under sløkkeinnsatsen,
- Brannvesenet overvåket selv at bruk av skjærslokker og sløkkespyd ble begrenset til 8 – 10 s, som gir estimert mengde vann for å fylle ca. 25% av rommet med vanddamp,
- Et temperaturkriterium for start av sløkkeinnsats ble satt på 350°C 80 cm oppunder taket,
- Brannvesenets posisjon i rommet ble endret fra siden ved siden av vinduet (se Figur 5-6) til hjørnet foran døra (se Figur 5-8) for å unngå uheldig ejektoreffekt. De ble laget et hull i døra for gjennomføring av brannslangen mens døren var lukket.
- Ventilasjonsåpning ble modifisert, slik at oksygentilgangen kunne reguleres. Åpningen var helt åpent ved antennelse og etter sløkkingen startet. I etableringsfasen av brannen (før sløkkestart) ble 2/3 av åpningen tildekket.



Figur 5-8 Brannvesenets posisjon i rommet fra og med forsøk F2.

5.2 Hovedforsøksserie

5.2.1 F2 – Skjærslokke og vann

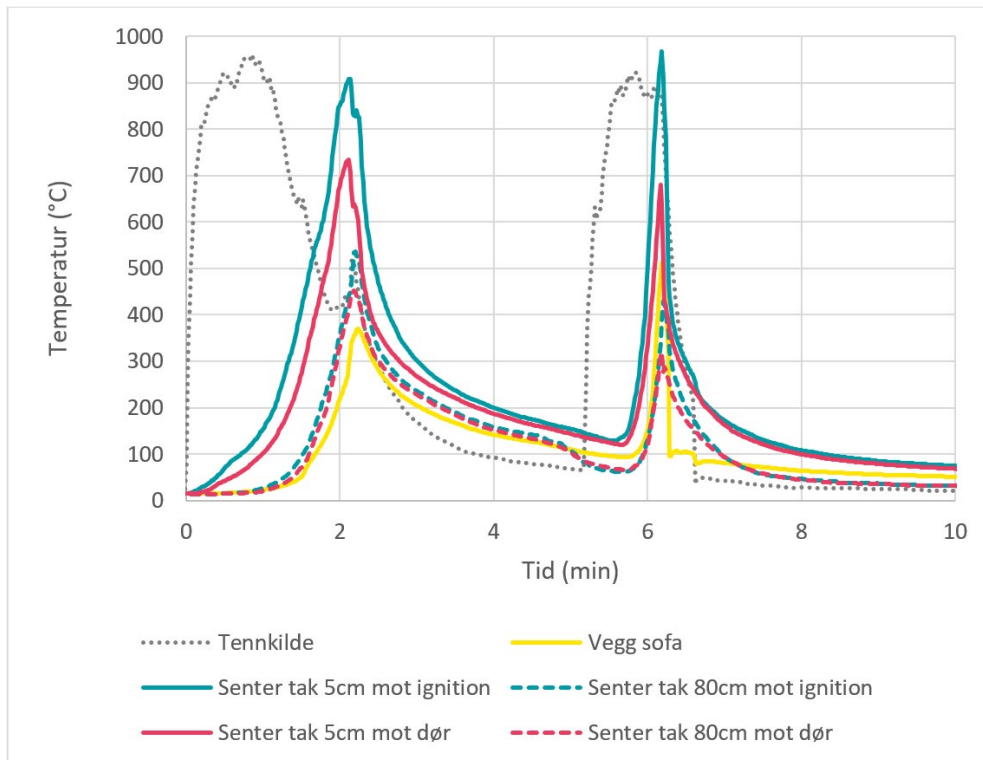
5.2.1.1 F2 – Forsøksforløp

Tabell 5-3 viser forsøksloggen for forsøk F2. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til slokking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

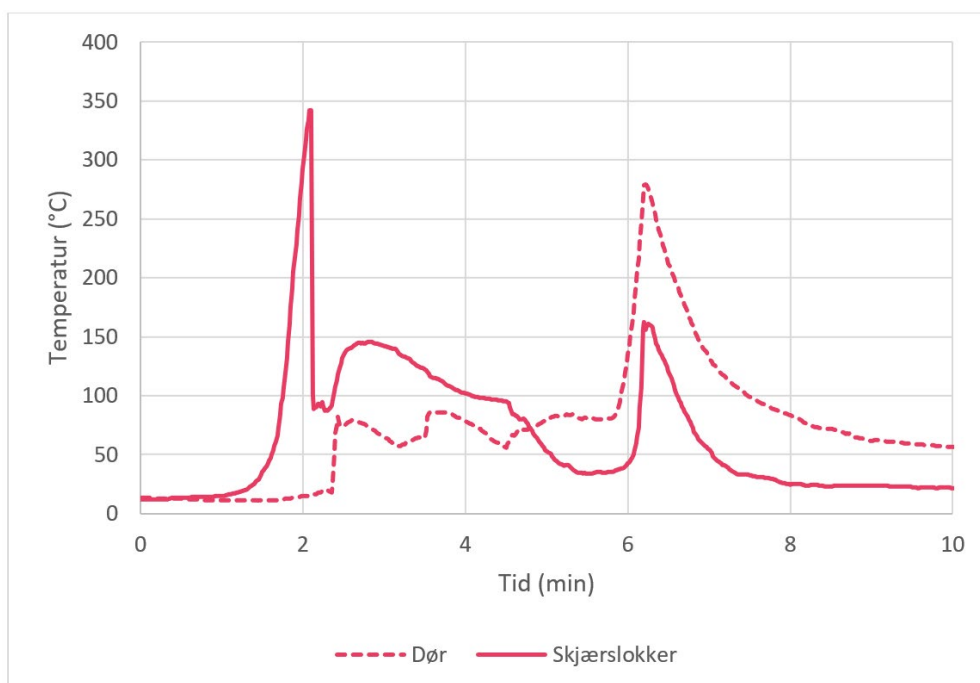
Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-9 og Figur 5-10. Videobilder (fra infrarødt og vanlig kamera) fra ulike tidspunkter av forsøket som for eksempel Figur 5-3 finnes i Vedlegg B. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/PtMKENzniR4>.

Tabell 5-3 Forsøkslogg for F2.

Hendelse	Klokkeslett	Tid etter tenning (min:sek)
Antennelse.	15:59:06	0:00
2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.	16:00:27	1:21
Start skjærslokke.	16:01:14	2:08
(Synk.tid for målinger ref. kapittel 4.3)	16:01:16	2:10
Stopp skjærslokke.	16:01:24	2:18
Ventilasjonsåpningen åpnes, og brannfolk går inn i rommet (døren lukkes igjen).	16:01:30	2:24
Dør åpnes helt og brannfolk kommer ut.	16:03:38	4:32
Stopp PAH og VOC.	16:04:00	4:54
Re-tenning ved tennkilden.	16:04:15	5:09
Brannen slokkes med strålerør.	16:05:17	6:11
Maks temperatur målt < 100°C.	16:07:13	8:07



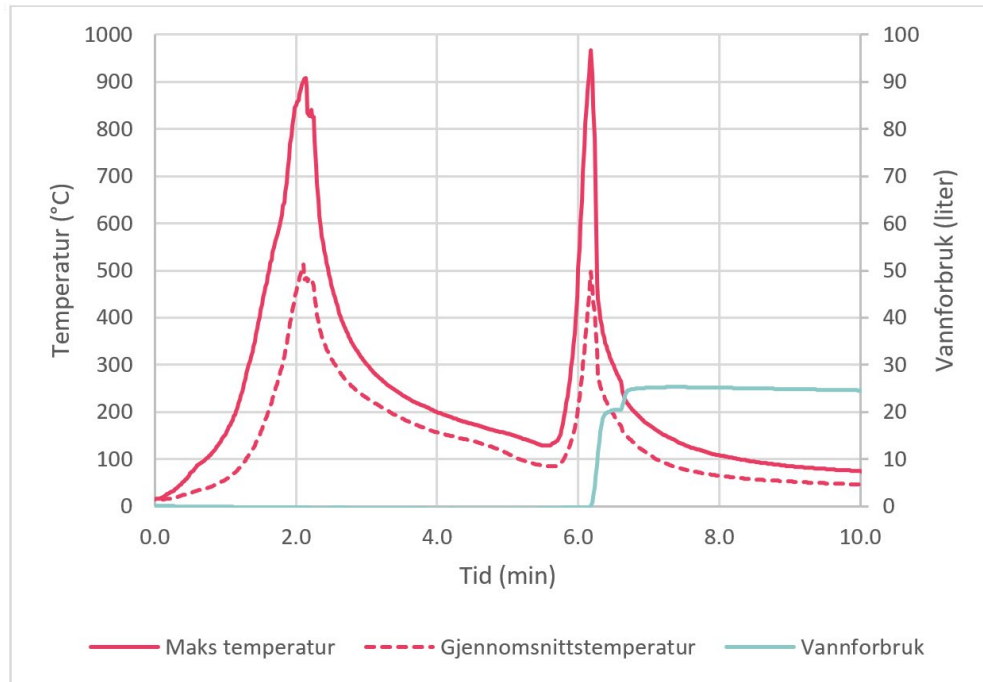
Figur 5-9 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.



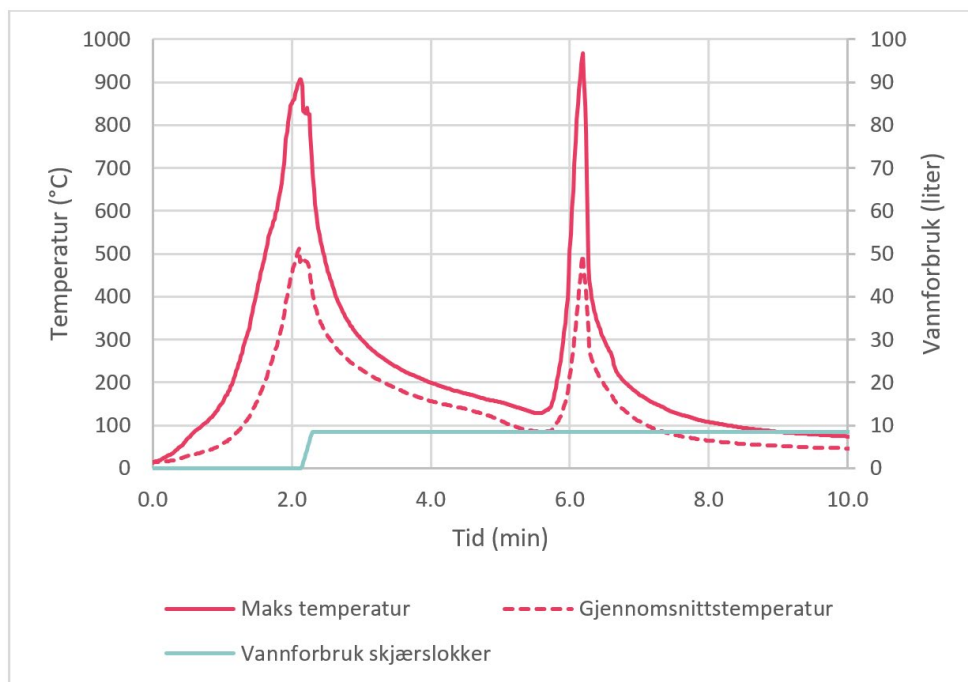
Figur 5-10 Temperaturmåling på veggen på motsatt siden av åpningen for skjærslokker og slokkespyd (solid linje) og temperaturmålingen over døra på utsiden av brannrommet (stiplet linje).

5.2.1.2 F2 – Vannforbruk

Figur 5-11 og Figur 5-12 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk. Likt som i forsøk F1 vises kun vannforbruk fra strålerør som ble brukt etter gjen tenning av brannen. Basert på den nominelle vannraten for skjærslokkeren ble forbruket estimert (se Figur 5-12).



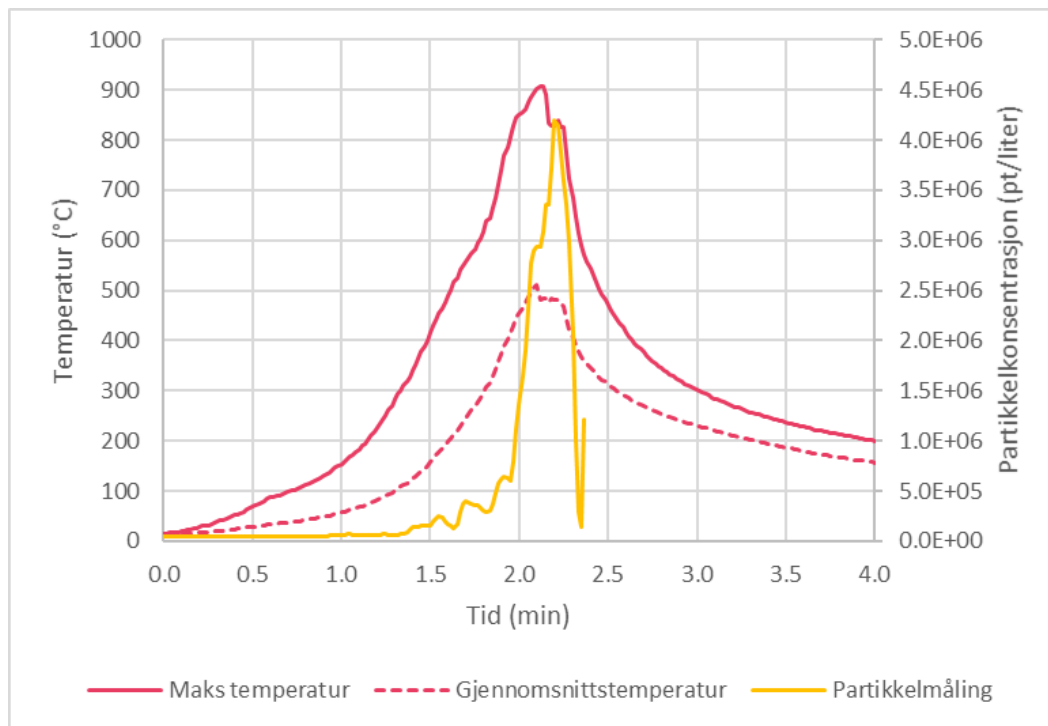
Figur 5-11 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksiktet basert på målingene vist i Figur 5-9 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje). Vannforbruket av skjærslokkeren ble ikke direkte målt og er derfor ikke inkludert i figuren. Vannforbruk i figuren er kun fra etterslokking med strålerør.



Figur 5-12 Maksimal (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksjiktet basert på målingene vist i Figur 5-9 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser estimert vannforbruk for skjærslokkeren (solid blå linje).

5.2.1.3 F2 – Røygasseksponering

Figur 5-13 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F2. Den største toppen er på 4 200 000 partikler per kubikkcentimeter som er høyere tall sammenlignet med forsøk F1 som brukte samme sløkkemetode. Sammenlignet med de andre forsøkene var det bare strålerør med skum, i forsøk F4, som hadde høyere partikkelkonsentrasjon. Målingene viser også en økning i partikler etter at sløkkeinnsatsen er satt i gang.



Figur 5-13 Nivåer med partikler i røygassen sammen med maks- og gjennomsnittstemperatur i forsøk F2.

Total mengde PAH (sum av akkumulert mengde for 20 vanlige PAH forbindelser) målt under hele prøvetakingstiden (04:46 min:sek, eller 286 sek), og VOC (sum av akkumulert mengde for 35 vanlige VOC forbindelser) målt under hele prøvetakingen (06:54 min:sek, eller 414 sek), er gitt Tabell 5-4. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (02:06 min:sek, eller 126 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker. Forsøk F2 gav nest laveste innhold av PAH, men det tredje høyeste innholdet av VOC av forsøkene.

Tabell 5-4 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under sløkkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

Forsøk F2	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)/(s)	Eksposering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	870	4:46/286	3,0
Reell eksponering	870	2:06/126	6,9
Forsøk F2	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksposering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
Totalt	69943	6:54/414	168,9
Reell eksponering		2:06/126	546,4

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.2.1.4 F2 – Taktiske vurderinger - Forsøk med skjærslokker og vann

Direkte etter forsøket med skjærslokker og vann, intervjues de samme representantene fra innsatspersonellet, røykdykker 1 og utrykningsleder. Skjærslokkeren ble brukt i kort tid før innsatspersonellet (IP) entrer brannrommet med strålerør som leverer 375 l/min. De beskriver at brannrommet var helt sort av røyk ved entring. De beskriver videre at de tror forskjellene fra pretest (F1) ligger i at det ikke var full åpning på vindu ved dette forsøket. Ved dette forsøket ble vinduet delvis tildekket. IP beskriver at denne startbrannen med tildekket vindu, er mer likt et reelt brannforløp i starten. På spørsmål om de konkrete forskjellene på F1 og F2, svarer de følgende:

«Temperatur sannsynligvis, og mer ventilasjonsstyrt. Forrige gang var det full åpning på vindu, nå var vinduet delvis tildekket. Denne gangen er det mer likt en reell brannsituasjon»



Figur 5-14 Variabel ventilasjonsåpning fra utsiden.

Dette betyr altså, at selv om brannrommet holdt en lavere temperatur, var mengden og konsentrasjonen av brennbare gasser større, på det tidspunktet IP entret rommet med strålerør. I brannfysikkfaget beskrives utviklingen av brennbare gasser som større, ved lavere temperatur [14]. Det vil si brannrøyken inneholder større mengde brennbar gass ved lavere temperatur, siden forbrenningsprosessen ikke er ren ved lave temperaturen. Dette kan også forklares med at sidene i branntrekanten er uforholdsmessig (lav temperatur). Øker temperaturen, blir også forbrenningen renere, og brannrøyken inneholder mindre brennbart gass. Etter IP sin oppfatning burde innsatsen med skjærslokker vart lengre, hvis forholdene for IP skulle vært optimale.

Læringspunktet i dette forsøket er at den negative effekten tilluft har, ikke må undervurderes. Bruk av skjærslokker, gir muligheten til å bruke brannvann med høyt trykk, uten at du etablerer åpninger som gir brannen mer oksygen [19].

«Når du jobber som røykdykker er det fy-fy å slippe inn luft. Bruker du strålerøret gjennom vinduet, så vil du dra med deg luft fra utsiden og inn – det skal man ikke gjøre. Det samme om du står i døråpningen og slipper inn luft til brannen. Du MÅ unngå at du drar med deg luft inn, når du kaster finfordelt vann opp i branngassene»

Etter F1 og F2 oppsummerer IP med at det er vel verdt å bruke noen sekunder ekstra på innsats med skjærslokker. Hovedgrunnen til dette, er at sikkerhet for IP og de som eventuelt er savnet vil være mye bedre, fordi effektiv slokking kan foregå uten at man tilfører brannen luft. Det høye trykket og finfordelingen på vannet, gjør at selv små mengder vann gjør stor nytte.

«Du kan ta en brann i en liten leilighet med 6-7 liter»

IP beskriver at de fra tidligere har erfaring med at kombinasjonen skjærslokker og «vanlig» slokkemetode med vann fungerer bra i små enheter. Dette er underbygd av tidligere forskning utført av Rinne, som er utført under lignende prøvebetingelser [11].

5.2.2 F3 – Strålerør og vann

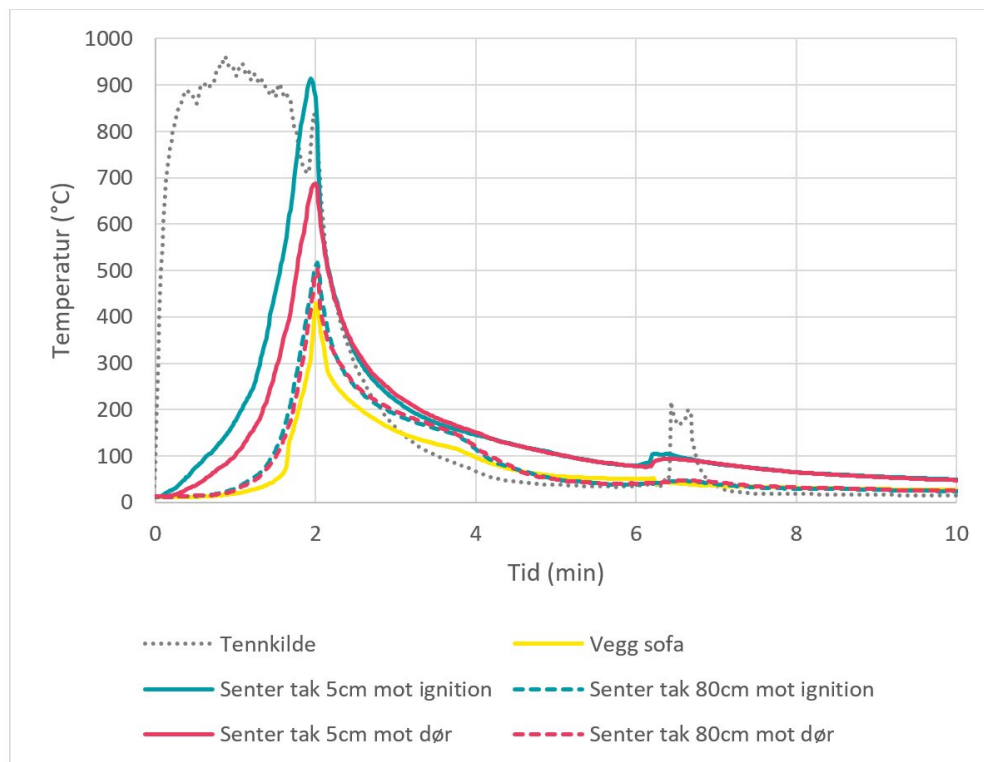
5.2.2.1 F3 – Forsøksforløp

Tabell 5-5 viser forsøksloggen for forsøk F3. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til slokking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

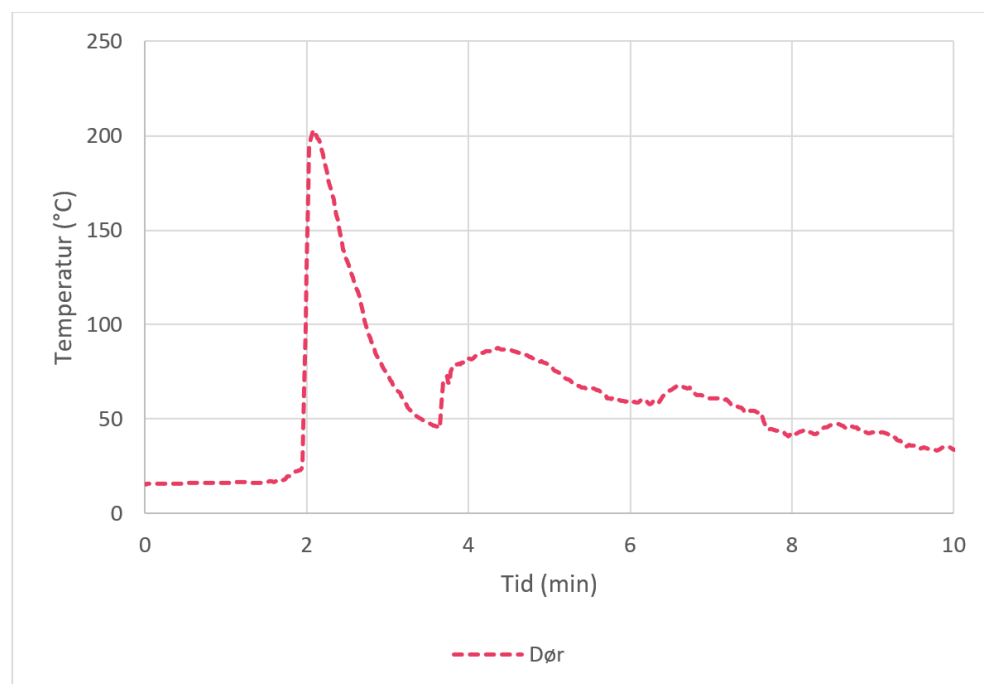
Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-15 og Figur 5-16. Videobilder (fra infrarødt og vanlig kamera) fra ulike tidspunkter av forsøket som for eksempel Figur 5-3 finnes i Vedlegg B. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/1UwrOai95A8>.

Tabell 5-5 Forsøkslogg for F3.

Hendelse	Klokkeslett	Tid etter tenning (min:sek)
Antennelse.	11:11:49	0:00
2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.	11:13:04	1:15
Ventilasjonsåpningen åpnes, og brannfolk går inn i rommet (døren lukkes igjen).	11:13:48	1:59
Start indirekte slokking med strålerør.	11:13:50	2:01
(Synk.tid for målinger ref. kapittel 4.3)	11:13:50	2:01
Dør åpnes og brannfolk kommer ut, og venter i gangen/dør.	11:15:30	3:41
Brannfolk går inn i rommet igjen. Døren er fortsatt åpent.	11:16:32	4:43
Maks temperatur målt < 100°C.	11:16:47	4:58
Brannfolk løfter midtpute som fortsatt ulmer.	11:16:54	5:05
Midtputen settes på høykant nærmere tennkilden.	11:17:06	5:17
Brannfolk går ut igjen.	11:17:09	5:20
Brannfolk går inn igjen.	11:17:21	5:32
Re-tenning ved midd-puten nærmere tennkilden.	11:17:22	5:33
Stopp VOC og PAH.	11:17:14	5:25
Start direkte slokking med strålerør.	11:17:58	6:09
Det forsøkes å kvele brannen med puten.	11:18:11	6:22
Brannen slokkes direkte med strålerør.	11:18:31	6:42



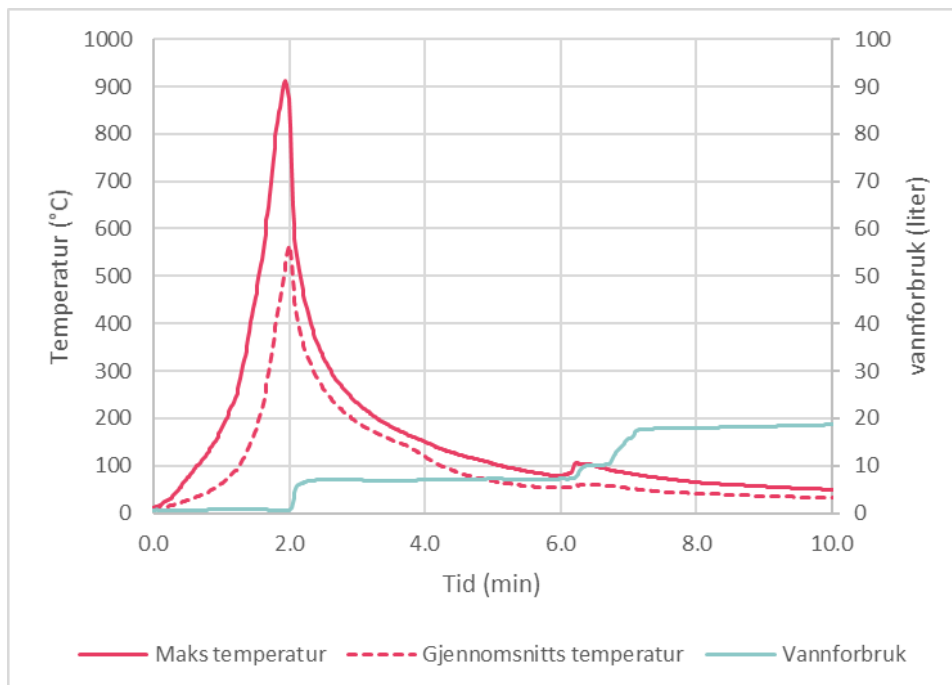
Figur 5-15 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.



Figur 5-16 Temperaturmåling over døra på utsiden av brannrommet (stiplet linje).

5.2.2.2 F3 – Vannforbruk

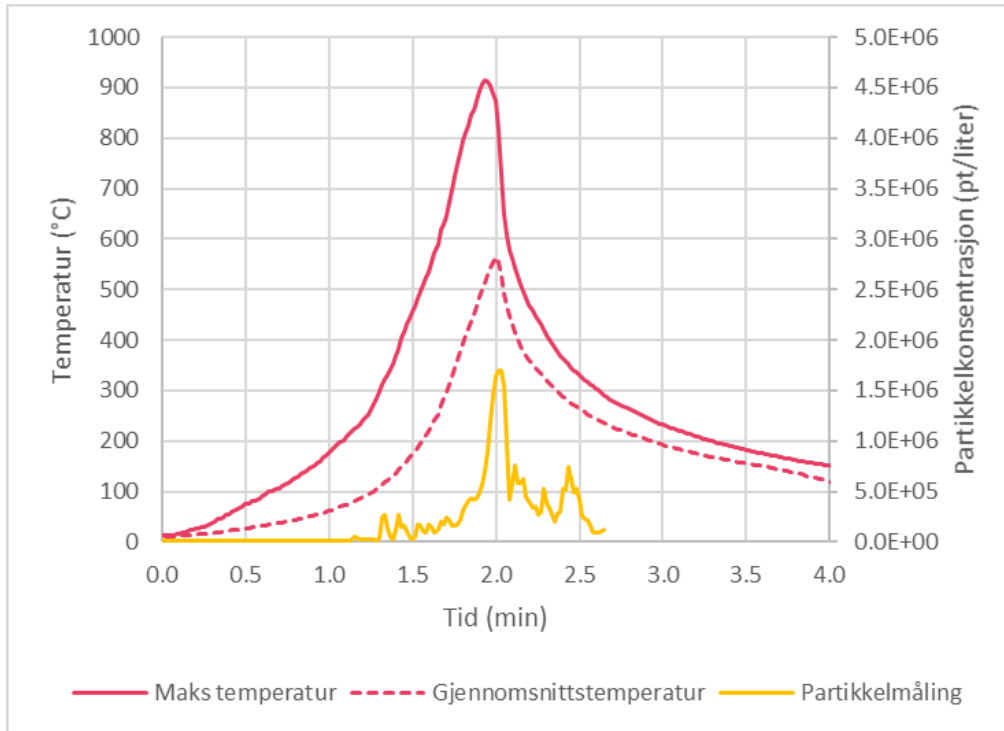
Figur 5-17 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk.



Figur 5-17 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksiktet basert på målingene vist i Figur 5-15 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje).

5.2.2.3 F3 – Røykgasseksponering

Figur 5-18 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F3. Den største toppen er på 1 700 000 partikler per kubikkcentimeter som er lavere tall sammenlignet med forsøk F2 og F4. Resultatene indikerer at partikkelkonsentrasjonen går opp etter slukkeinnsatsen settes inn.



Figur 5-18 Nivåer med partikler i røykgassen sammen med maks og gjennomsnittstemperatur i forsøk F3.

Total mengde PAH (sum av akkumulert mengde for 20 vanlige PAH forbindelser) målt under hele prøvetakingstiden (07:46 min:sek, eller 466 sek), og VOC (sum av akkumulert mengde for 35 vanlige VOC forbindelser) målt under hele prøvetakingen (07:45 min:sek, eller 465 sek), er gitt i Tabell 5-6. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (02:17 min:sek, eller 137 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker. Forsøk F3 gav nest høyest innhold av PAH og det høyeste innholdet av VOC av forsøkene.

Tabell 5-6 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slokkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

Forsøk F3	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	2560	7:46/466	5,5
Reell eksponering	2560	2:17/137	18,7
Forsøk F3	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
Totalt	90674	7:45/465	195
Reell eksponering		2:17/137	661,9

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.2.2.4 F3 – Taktiske vurderinger - Forsøk med vann

Direkte etter forsøket med vann og strålerør (konvensjonell metode), intervjues de samme representantene fra innsatspersonellet, røykdykker 1 og utrykningsleder. I dette forsøket er det ikke utført noen andre slokketiltak i forkant, slik som ved F2, da det ble utført innsats med skjærslokker i forkant. Innsatspersonellet (IP) beskriver at de entrer brannrommet raskt på avtalt temperaturskkel. Døren som IP går inn gjennom, lukkes raskt for å hindre at det kommer unødvendig luft inn i brannrommet. IP anslår at slokkingen tar 3-5 sekunder. Videre beskriver de at slokkingen etter instruks forgår indirekte. Dette vil si at den spredte vannstrålen rettes mot branngassene, og ikke mot selve flammene.

IP får spørsmål om hvordan de opplever forskjellene med (F2) og uten (F3) bruk av skjærslokker i forkant.

«Forskjellen er....Som utrykningsleder og med ansvaret for sikkerheten, er jeg ikke i tvil om hva vi bør gjøre. I dette forsøket gjør vi ting som er risikabelt, vi vet jo ikke hvilket materiale som brenner, og hvor nær det er før brannrommet overtennes. Og når vi gjør det som vi gjør på dette forsøket, slipper jeg jo inn røykdykkerne i et område som er utrygt i forhold til flere farer. Det er større sjans for branngasseksplasjon eller backdraft. En annen ting er at når vi starter innsatsen med å sende røykdykkerne inn, blir de eksponert for farlige gasser. Du ser jo hvor sotete røykdykkeren er. Det slipper vi hvis vi gjør sånn som i går (F2), der vi tar ned temperaturen med en skjærslokker eller et slokkespyd. Så både på kort og lang sikt er det gunstig å ta ned energi og temperatur, med for eksempel skjærslokker, før du slipper røykdykkerne inn»

IP beskriver hvor stor forskjell det er på røyk og luftfuktighet når det ikke er gjort innsats i forkant før IP entrer brannrommet. Røyken beskrives nå som helt svart og feit, glinsende. IP antar da at røyken både er mer brennbar og giftig. Siden det ikke er gjort innsats med skjærslokker i forkant, er det også høyere temperatur i brannrommet når røykdykkerne starter slokking med vann. Dette gir en slags «badstueeffekt» som kan være en trussel mot de som oppholder seg i brannrommet. Badstueeffekt, kan gi varmegjennomslag til røykdykkerne, som igjen kan føre til alvorlige skader.

«Denne gangen (F3) var det mye svartere røyk når vi gikk inn, og vi føler mer den badstueeffekten, i motsetning til forsøket der vi kjørte skjærslokker først (F2)»

IPs opplevelse av miljøet i brannrommet uten bruk av skjærslokker i forkant, er underbygd av tidligere forsøk som er utført under lignende prøvebetingelser, av Fallberg et.al. [9]

5.2.3 F4 – Strålerør og skum

Slokkeforsøkene med skum ble gjennomført med et skum av type BIO FOR N. Dette er ifølge leverandøren et biologisk nedbrytbart skum som brukes for klasse A branner (0,1% – 0,5%) og for klasse B branner (0,5% – 3,0%). Ved lavere konsentrasjoner virker konsentrat-vann blanding som en *wetting agent* (se Figur 5-19), mens høyere konsentrasjoner gir skum (se Figur 5-20). I forsøkene ble en konsentrasjon av 3% brukt, altså en høy konsentrasjon, for å forsterke forskjellen mellom sløkking med skum (F4) sammenlignet med referanseforsøk med vann (F3). Konsentratet ble blandet inn i sløkevannet ved bruk av et system fra FireDos for å proporsjonere blandingsforholdet.



Figur 5-19 Skum med et blandingsforhold av 0.3% på sideveggen av en kontainer. Som bildet viser, gir slike lave konsentrasjoner ikke synlig skum, men brukes som *wetting agent*.



Figur 5-20 Skum med et blandingsforhold av 3% på sideveggen av en kontainer.

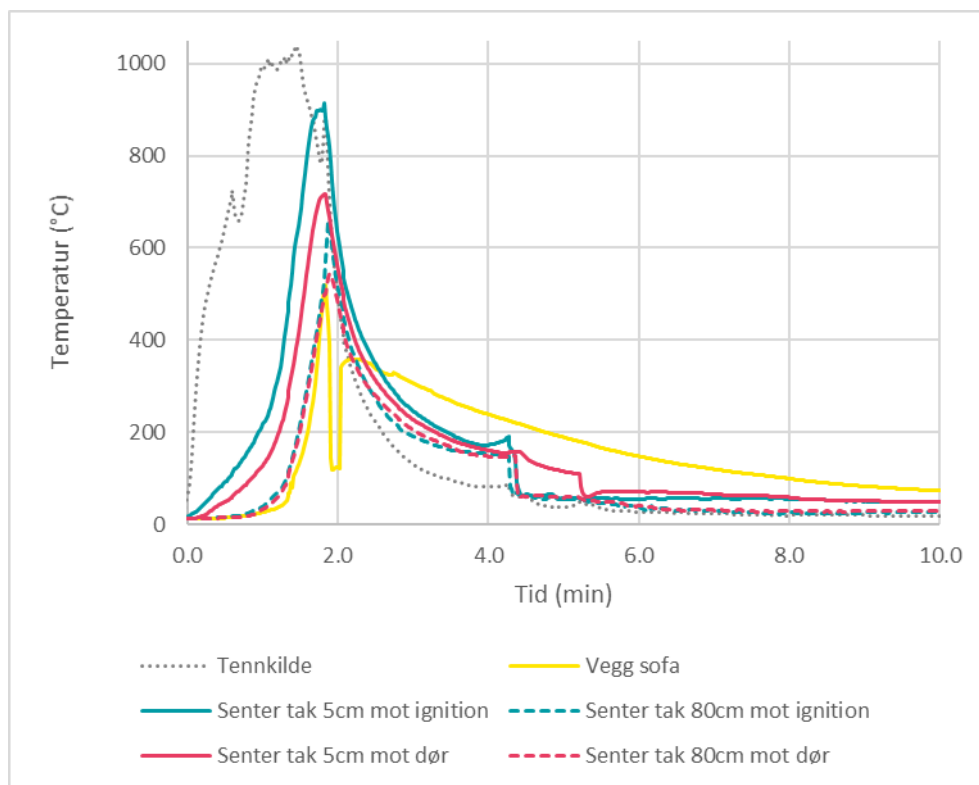
5.2.3.1 F4 – Forsøksforløp

Tabell 5-7 viser forsøksloggen for forsøk F4. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til slokking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

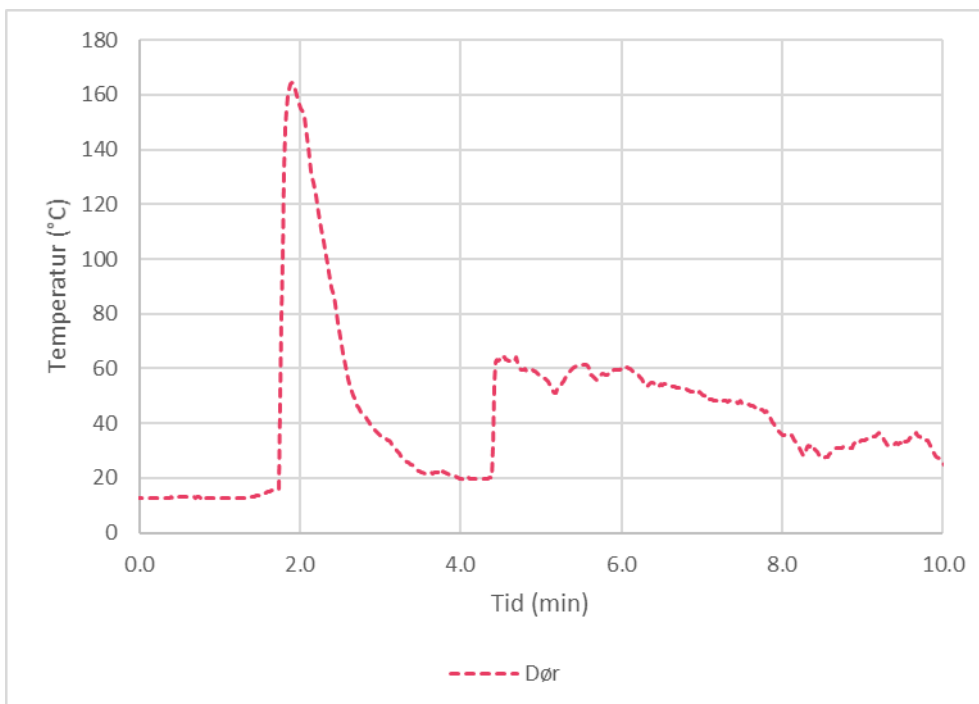
Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-21 og Figur 5-22. Videobilder (fra infrarødt og vanlig kamera) fra ulike tidspunkter av forsøket som for eksempel Figur 5-3 finnes i Vedlegg B. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/Y8ksjAV-VK4>.

Tabell 5-7 Forsøkslogg for F4.

Hendelse	Klokkeslett	Tid etter tenning (min:sek)
Antennelse.	14:26:00	0:00
2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.	14:27:13	1:13
Brannfolk går inn og ventilasjonsåpningen åpnes.	14:27:51	1:51
(Synk.tid for målinger ref. kapittel 4.3)	14:27:52	1:52
Re-tenning observeres.	14:28:53	2:53
Start indirekte slokking	14:30:18	4:18
Døren åpnes.	14:30:30	4:30
Stopp indirekte slokking.	14:30:36	4:36
Brannfolk går ut, noen flammer er fortsatt synlige.	14:31:41	5:41
Brannen slokkes direkte.	14:31:17	5:17
Maks temperatur målt < 100°C	14:33:48	7:48



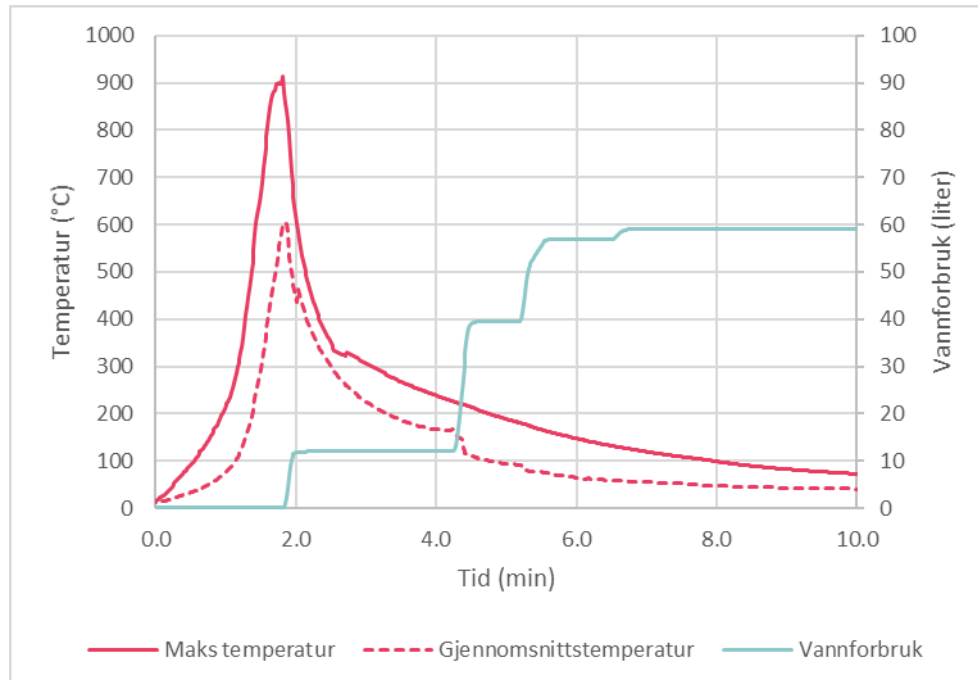
Figur 5-21 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.



Figur 5-22 Temperaturmåling over døra på utsiden av brannrommet.

5.2.3.2 F4 – Vannforbruk

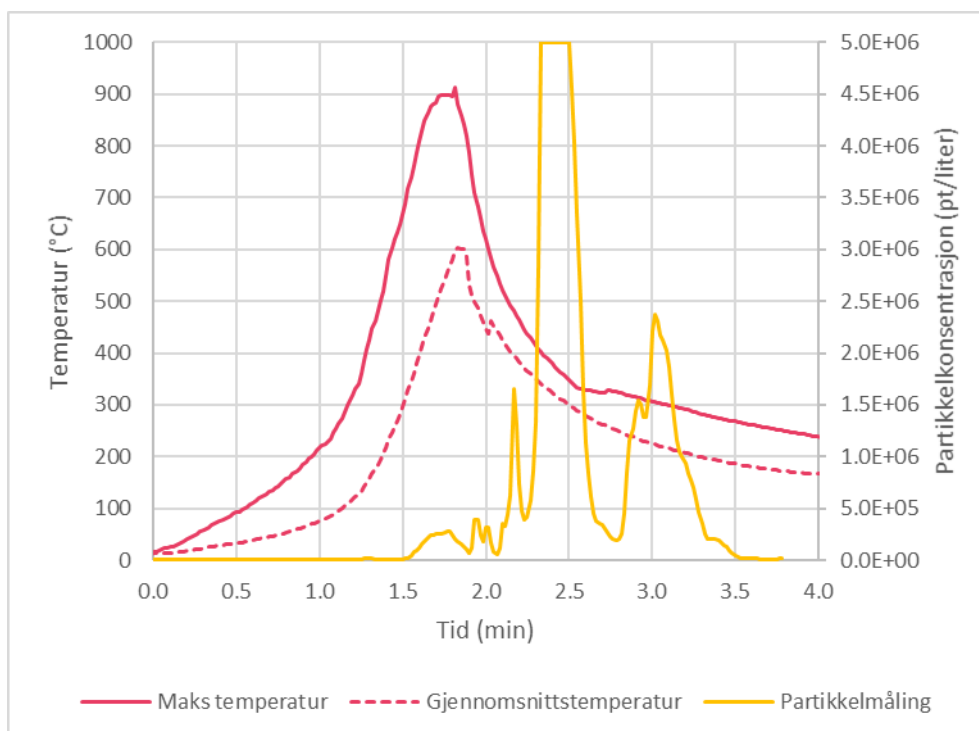
Figur 5-23 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk.



Figur 5-23 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksiktet basert på målingene vist i Figur 5-21 Figur 5-10(måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje).

5.2.3.3 F4 – Røykgasseksponering

Figur 5-24 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F4. Den største toppen gikk over metningspunktet til instrumentet, på 500 000 partikler. Resultatet indikerer at partikkelkonsentrasjonen øker når slokkingsinnsatsen settes inn.



Figur 5-24 Nivåer med partikler i røykgassen sammen med maks og gjennomsnittstemperatur i forsøk 4.

Total mengde PAH (sum av akkumulert mengde for 20 vanlige PAH forbindelser) målt under hele prøvetakingstiden (08:13 min:sek, eller 493 sek), og VOC (sum av akkumulert mengde for 35 vanlige VOC forbindelser) målt under hele prøvetakingen (08:06 min:sek, eller 486 sek), er gitt i Tabell 5-8. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (04:50 min:sek, eller 290 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker. Forsøk F4 gav tredje laveste innhold av PAH og det laveste innholdet av VOC av forsøkene.

Tabell 5-8 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slokkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

Forsøk F4	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	3163	8:13/493	6,4
Reell eksponering	3163	4:50/290	10,9
	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
	4741	8:06/486	9,8
Reell eksponering		4:50/290	16,3

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.2.3.4 F4 – Taktiske vurderinger - Forsøk med skum

I forsøket med slokkeskum beskriver innsatspersonellet (IP) at de gikk inn på samme tidspunkt som ved F3. De beskriver også at de vurderer avstander, slokketeknikk og slokketid som ved forsøket med strålerør og vann. Etter forsøket diskuterer IP skumtypen som brukes. Fellesbetegnelsen for skum der skumvæsken er tilført vannet under trykk, er CAFS (Compressed Air Foam System). Det finnes mange forskjellige leverandører på skumvæske og blandepumper. Det systemet som ble brukt under forsøk F4, har et lavt skumtall. Det vil si at det er lite luft i blandingen med skumvæske og vann [20]. Dette kalles også for lightwater.

I intervjuet beskriver IP sine forventninger til skum, og forskjeller fra rent slokkevann. De uttrykker at de helt klart forventet at skummet skulle være mer effektivt enn vann, siden skummet hadde en antatt effekt mot gjentennning. Den forventede effekten beskrives som at skummet legger seg som en hinne over alt brennbart materiale, og dermed forhindrer avdamping av brennbare gasser (pyrolyse). I utdanningen av brannkonstabler i Norge, undervises det i at skum kan brukes som slokkemiddel, for å hindre gjentennning⁶. Det finnes også rapporter som viser til skum som effektivt slokkemiddel for å hindre gjentennning, slik som Rakowska [21].

Forsøket viste derimot at skummet hadde en betydelig dårligere effekt enn rent vann. Imidlertid er det viktig å fremheve at brannvesenet hadde instruks å ikke bruke strålerør direkte på brannen. Det kan antas at dette påvirker også effektiviteten av skummet mot gjentennning.

“Det som skjedde etterpå var at brannen re-antente (red: gjentennning) mye forttere, enn når vi brukte vanlig slokkevann”

IP forklarer at det kan virke som at skummet brenner opp, før det får lagt seg som en hinne over brennbart materiale. De antar at den kjølede effekten som skummet har, er dårligere enn den kjølede effekten som rent vann har. IP hevder at skum er godt egnet som slokkemiddel, men bare hvis temperaturene i brannrommet tillater dette. I dette tilfellet, der temperaturen var 400 °C, var skum lite egnet som slokkemiddel. Her ville kanskje skum vært meget godt egnet hvis temperaturen ble tatt ned i forkant, med skjærslokker eller slokkespyd. IP fremholder viktigheten av å forstå brannen og brannutviklingen ved valg av slokkemiddel og slokketaktikk. Ofte blir kombinasjonen av flere slokkemiddel- og verktøy den beste taktikken, noe som også understrekes av Liebe's faglitteratur brukt i undervisning [19].

“Jeg mener at dette har motsatt effekt av det vi trodde og all den erfaringen vi har, tilsier. Men ved nærmere ettertanke er det jo ikke helt ulogisk at det skjer.... Når vi da bruker skummet mot de varme branngassene her, så trudde jo jeg, at vi ikke skulle klare å “stjele” like mye energi av branngassene, fordi vi får ikke dette finfordelte vannet men mye av skummet ble “spist” opp av temperaturen, og får ikke gjort virkningen sin som skum skal ha. Vi får ikke penslet veggene, vi hindrer ikke avdamping fra de varme flatene”

Her ville kanskje skum vært meget godt egnet hvis temperaturen ble tatt ned i forkant, med skjærslokker eller slokkespyd. IP fremholder viktigheten av å forstå brannen og brannutviklingen ved valg av slokkemiddel og slokketaktikk. For innsatsmannskapene teller sekundene ekstra mye i starten, siden brannen utvikler seg eksponentielt [14]. Da blir det er viktig å utnytte klargjøringstiden til brannvesenet med slangutlegg, påkledning og så videre. I løpet av denne

⁶ Kilde: Fagansvarlig ved Norges brannskole, som er medforfatter av denne rapporten.

tiden kan *umiddelbare tiltak* [15] settes inn for å ta ned temperatur fra brannrommet med skjærslukker.

“Men læringen er jo at vi må vite noe om energi og temperatur før vi går inn, og så må vi velge riktig slukkemiddel. Og så er det en ting til vi kan lære her. Vi må slutte å være cowboyer, og absolutt skal inn for å røykdykke. Vi må prøve å ta slokke brannen fra utsiden, og så må vi ta den til under tenn-temperaturnivå, og så må vi ventilere ut branngasser, og gå inn med friskluft i ryggen for å eksponere oss minst mulig for brannfarlige og giftige branngasser”

5.2.4 F6 – Slokkespyd og vann

5.2.4.1 F6 – Forsøksforløp

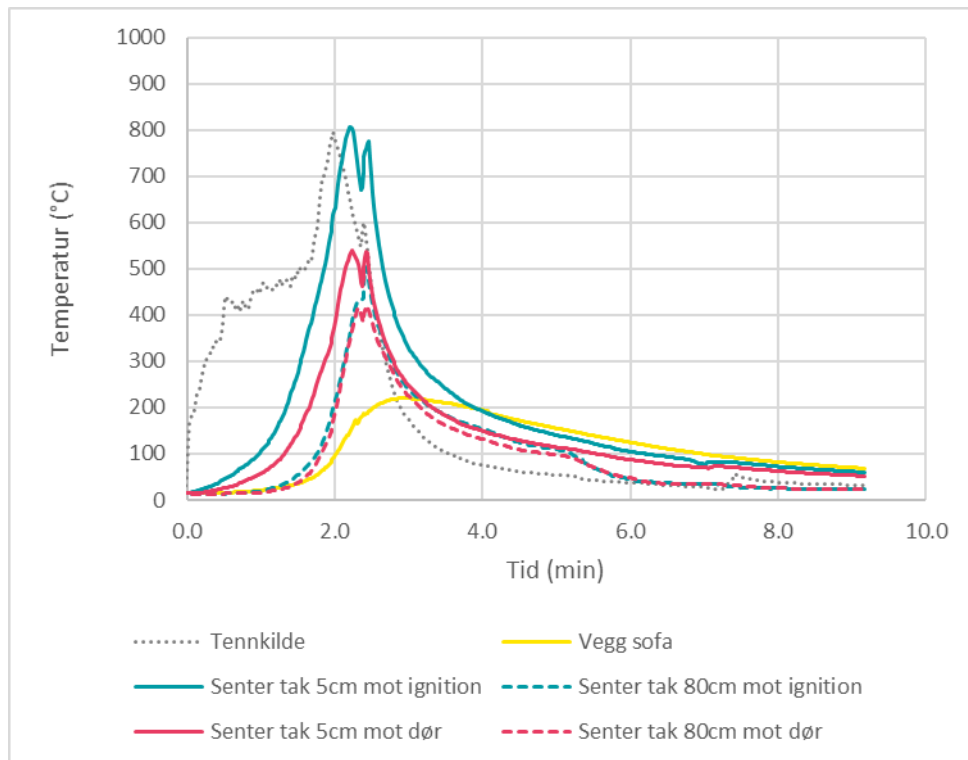
Tabell 5-9 viser forsøksloggen for forsøk F6. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til slokking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-25 og Figur 5-26. Videobilder (fra infrarødt og vanlig kamera) fra ulike tidspunkter av forsøket som for eksempel Figur 5-3 finnes i Vedlegg B. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/Kfredqebjdo>.

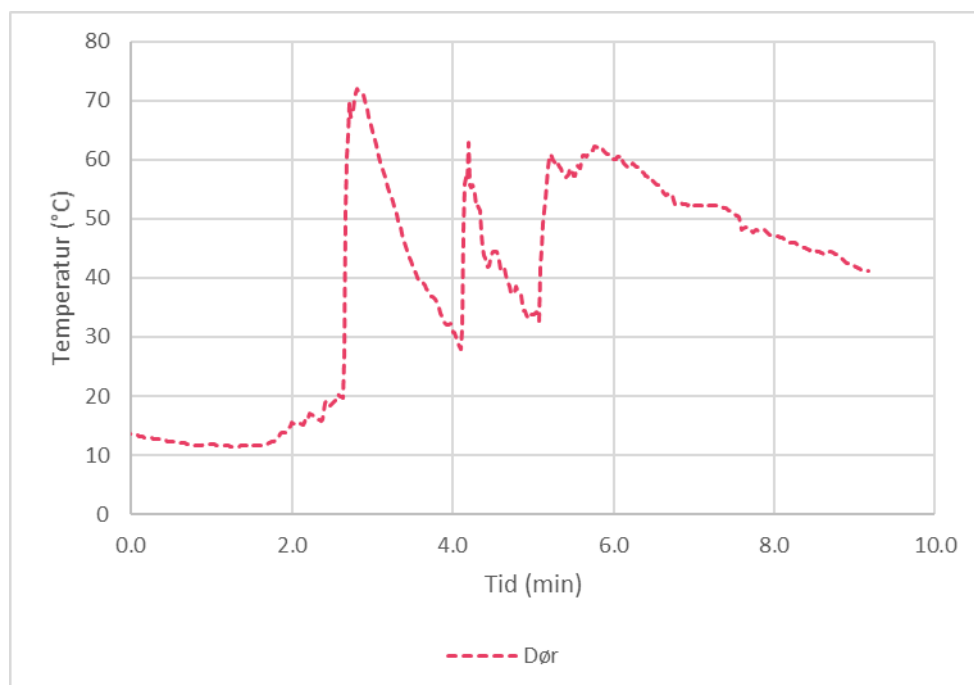
På dette forsøket ble ventilasjonsåpningen åpnet tidligere sammenlignet med forsøk F2 til F4.

Tabell 5-9 Forsøkslogg for F6.

Hendelse	Klokkeslett	Tid etter tenning (min:sek)
Antennelse.	13:42:07	0:00
2/3 av ventilasjonsåpningen lokkes	13:43:42	1:35
Start slokkespyd	13:44:28	2:21
(Synk.tid for målinger ref. kapittel 4.3)	13:24:29	2:22
Stopp slokkespyd	13:44:39	2:32
Ventilasjonsåpningen åpnes, og brannfolk går inn i rommet (døra lokkes igjen)	13:44:49	2:42
Dør åpnes helt og brannfolk kommer ut	13:46:17	4:10
Stopp PAH og VOC	13:46:35	4:28
Døren åpnes	13:47:13	5:06
Brannvesenet sparker mot middputen	13:47:54	5:47
Slokkespyd brukes utenfor rommet.	13:48:24	6:17
Middputen re-tenner.	13:48:36	6:29
Maks temperatur målt < 100°C	13:48:57	6:50
Brannen slokkes med strålerør.	13:49:10	7:03



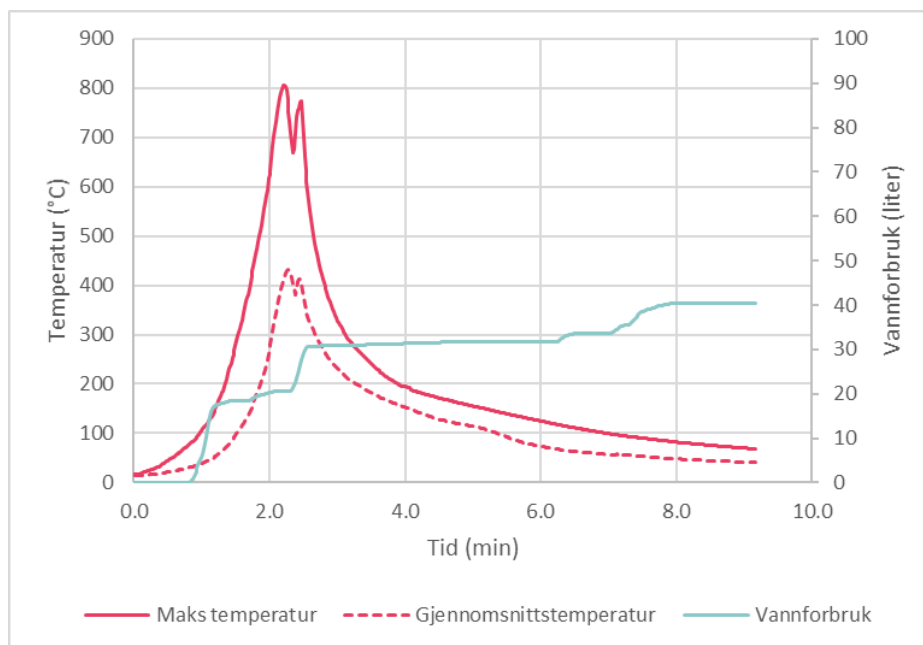
Figur 5-25 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.



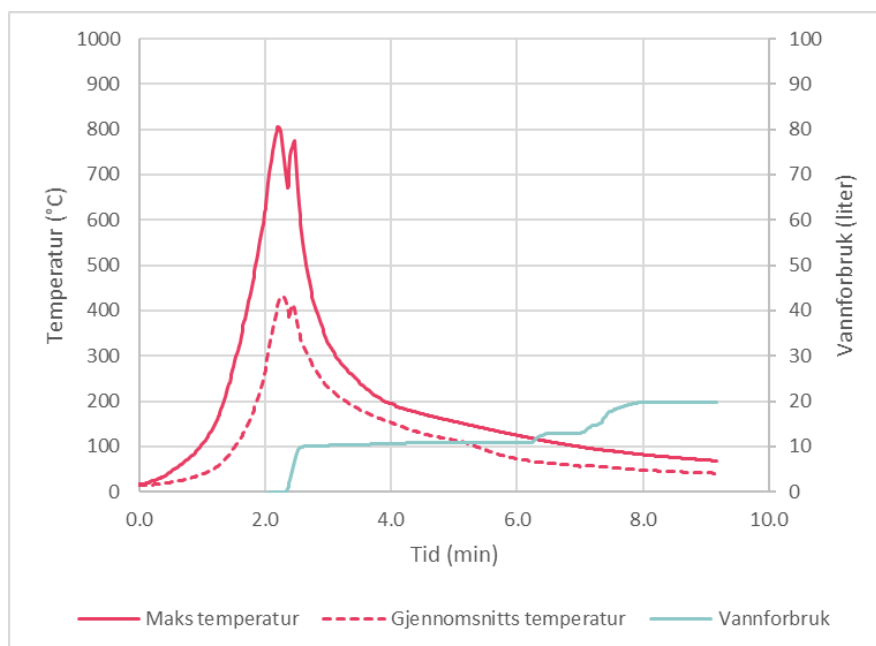
Figur 5-26 Temperaturmåling over døra på utsiden av brannrommet.

5.2.4.2 F6 – Vannforbruk

Figur 5-27 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk. Etter ca. ett minutt ble et strålerør brukt på utsiden av brannrommet. Siden strålerør var koblet opp til samme brannbil som slokkespyd ble vannforbruket registrert, selv om dette ikke var del av slokkingen. Dette ble korrigert i Figur 5-28.



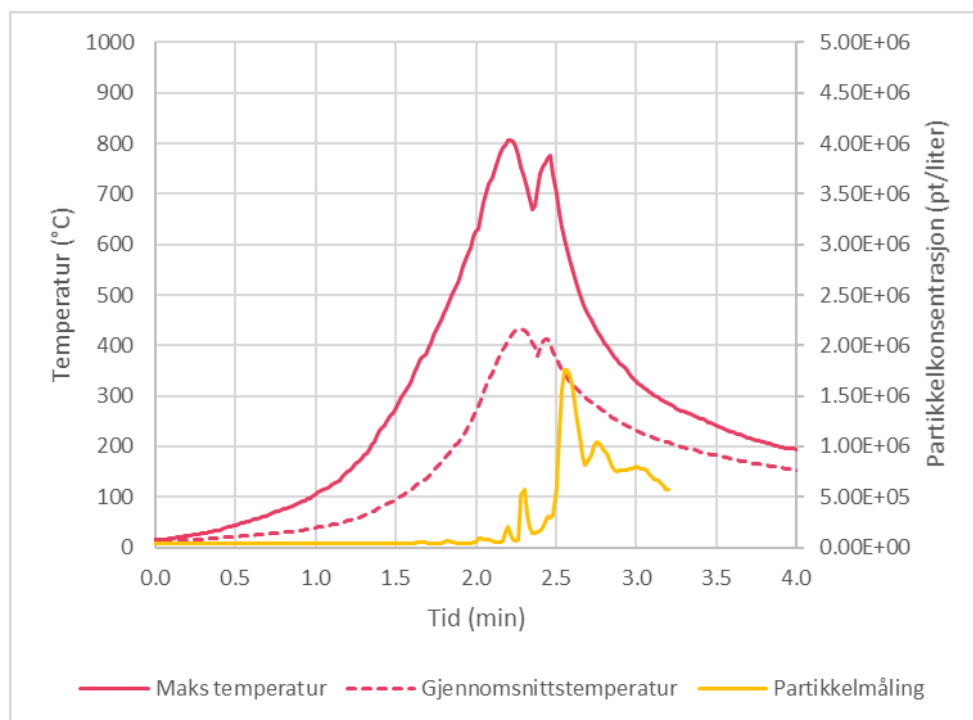
Figur 5-27 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksjiktet basert på målingene vist i Figur 5-25 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje).



Figur 5-28 Maksimal (solid rød linje) og gjennomsnittlig (stiplet rød linje) temperatur i røyksjiktet basert på målingene vist i Figur 5-25 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk korrigert for forbruket utenfor brannrommet før slokking startet (solid blå linje).

5.2.4.3 F6 – Røykgasseksponering

Figur 5-29 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F6. Den største toppen er på 1 760 000 partikler per kubikkcentimeter som er nesten likt med forsøk F3 med kun bruk av strålerør. Resultatene indikerer økning i partikkelkonsentrasjon etter innsats fra slokking.



Figur 5-29 Nivåer med partikler i røykgassen sammen med maks og gjennomsnittstemperatur i forsøk F6.

Total mengde PAH (sum av akkumulert mengde for 20 vanlige PAH forbindelser) målt under hele prøvetakingstiden (05:31 min:sek, eller 331 sek), er gitt i Tabell 5-10. VOCmålinger fra forsøk F6 er imidlertid ikke tilgjengelige på grunn av instrumenteringfeil. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (01:28 min:sek, eller 88 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker. Forsøk F6 gav det høyeste innholdet av PAH.

Tabell 5-10 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slokkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

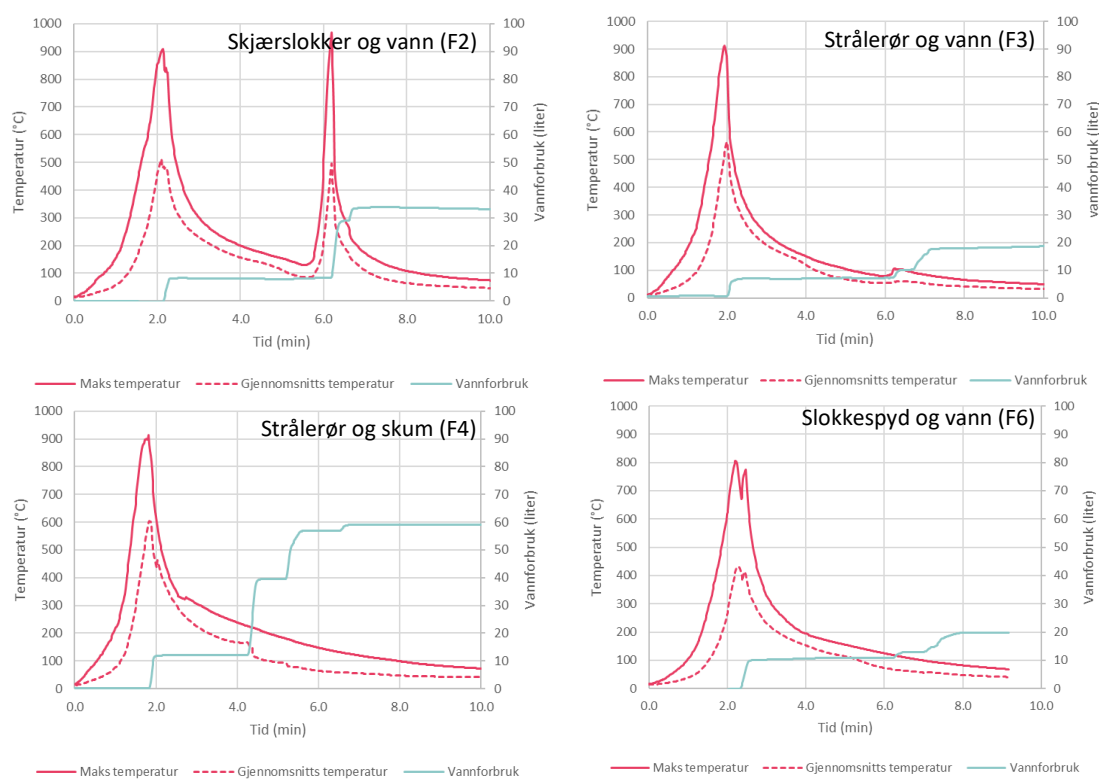
Forsøk F6	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	4274	5:31/331	12,9
Reell eksponering	4274	1:28/88	48,6
	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
Totalt	-	-	-
Reell eksponering	-	-	-

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.2.5 Vurdering av slokkeeffektiviteten

Effektiviteten vurderes med tanke på gjenvenning, avkjølingsrate og vannforbruk.

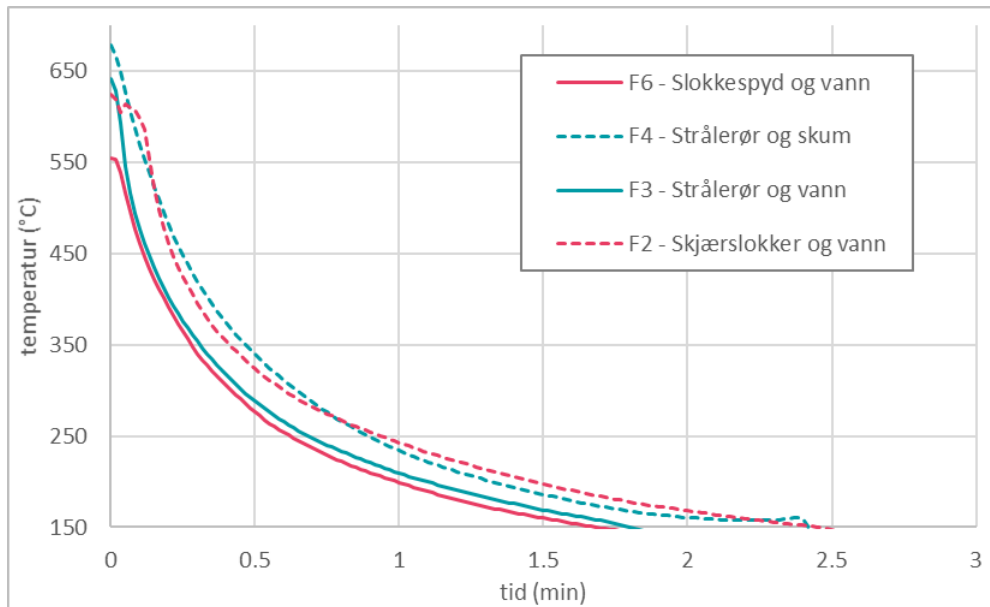
I alle forsøk førte den indirekte slokkingen til at brannen ble slått ned etter kort tid (se Figur 5-30). Imidlertid ble det gjenvenning av brannen i alle forsøkene ca. 6 minutter etter forsøkstart, med unntak av forsøk F4, slokking med skum, som hadde gjenvenning etter ca. 4 minutter. Gjenvenningen i forsøk F6 vises ikke i temperaturmålingene, siden etterslokkingen ble startet før temperaturen under takket kunne stige tilstrekkelig. I forsøket med skum ble det gjenvenning av brannen foran puten i midten av sofaen, mens det ble gjenvenning av brannen bak puten i midten av sofaen etter slokking med strålerør og slokking med slokkespyd, som kan forklares med at brannen bak puten er mest beskyttet for vannet. I forsøk F2, slokking med skjærslokker, ble det gjenvenning av brannen ovenfor tennkilden, som tyder på at slokkingen foregikk så raskt at heptanet fra tennkilden var ikke fullstendig oppbrent på dette tidspunktet. Forsøk viser den største temperaturøkningen var etter gjenvenning. Dette er ikke relatert til slokkesmetoden, men fordi det da ble brukt lengst tid før etterslokking ble igangsatt.



Figur 5-30 Sammenligning av temperaturutvikling (gjennomsnittlig og maksimal) og vannforbruk i hovedforsøksserien.

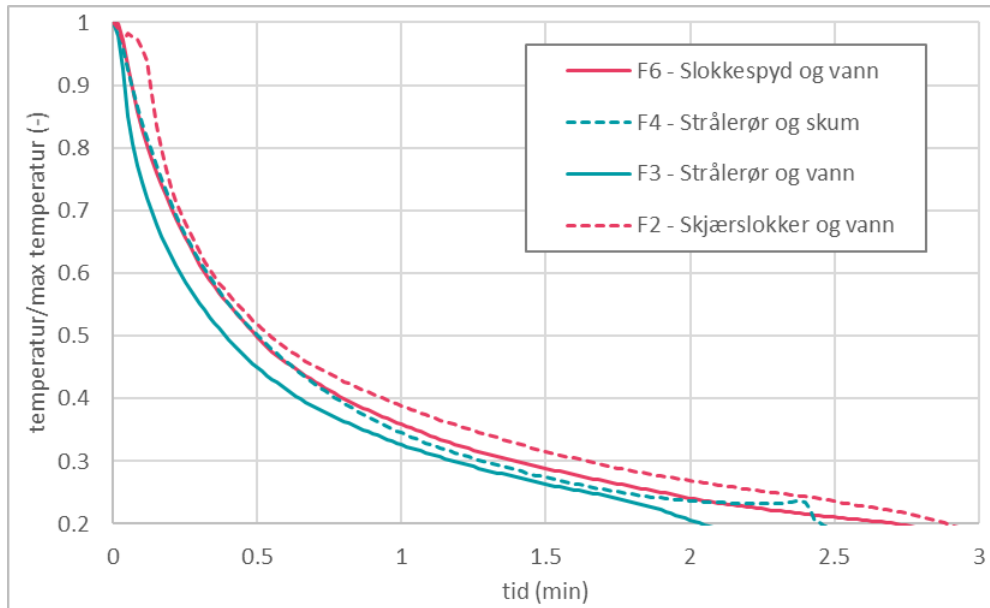
Figur 5-31 avkjølingen av gjennomsnittstemperaturen i røyksjiktet ved forskjellige slokkesmetoder. Alle slokkesmetoder fører til at temperaturen synker under 150°C innen 2,5 minutter. Makstemperaturene som ble oppnådd er ulike. De høyeste gjennomsnittstemperaturene ble oppnådd i forsøkene uten utvendig slokking først (F3 og F4), siden det tar lengst tid før vannet blir tilført etter temperaturkriteriet av 350°C ble oppnådd. Grunnen til at temperaturen for skjærslokkeren er høyere enn for slokkespydet er at det tok lenger

tid før pumpene leverte full effekt (57 liter/minutt), selv om de ble forsøkt å holde pumpene i gang med å bruke skjærslokkeren utenfor brannrommet da temperaturen nærmet seg temperaturkriterium. Dette er antageligvis også grunnen for at avkjølingsraten er lavere i starten av forsøk F2 før den øker betydelig.



Figur 5-31 Avkjøling i røyksjiktet ved slokking, angitt ved gjennomsnittstemperatur. X-aksen viser tid etter maks gjennomsnittstemperatur ble oppnådd. Blå linjer viser interne slokkemetoder (slokking med strålerør med og uten skum), mens røde linjer viser utvendige slokkemetoder (slokkespyd og skjærslokke).

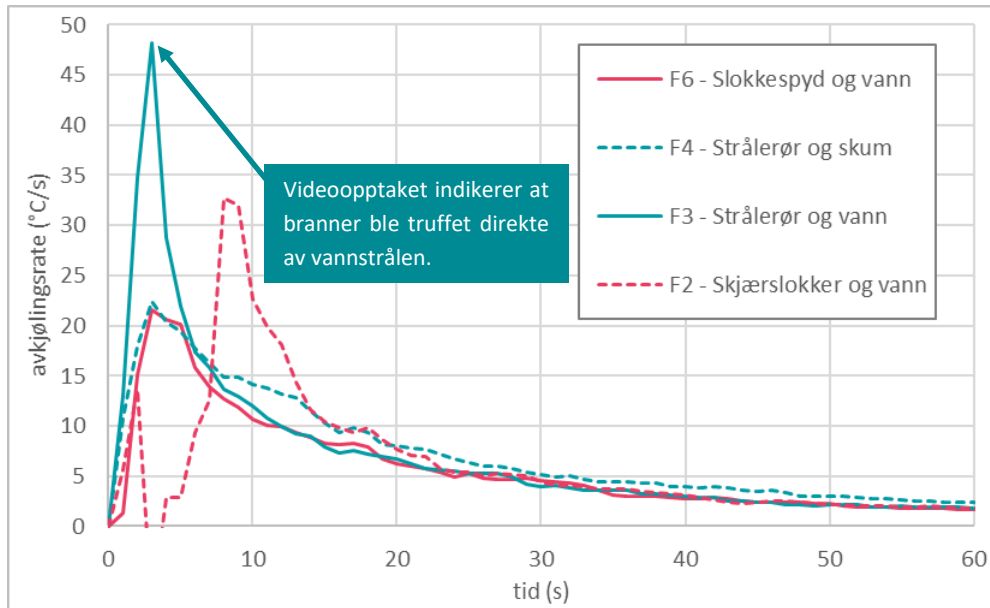
For å ta hensyn til at slokking startet på ulike temperaturer i røyksjiktet viser Figur 5-32 temperaturforløpet for avkjølingen normalisert med maks gjennomsnittstemperatur i røyksjiktet.



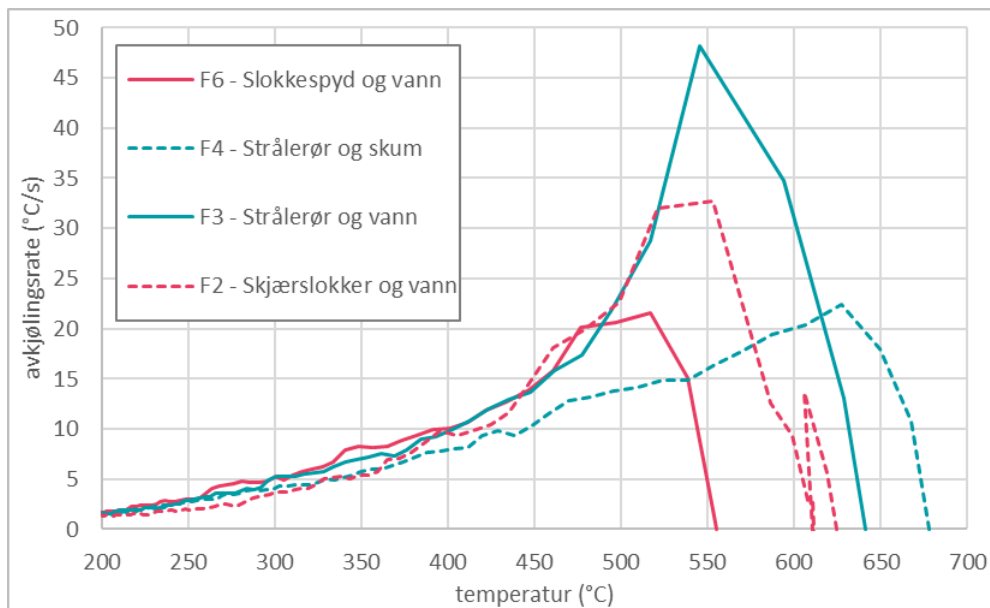
Figur 5-32 Avkjøling i røyksjiktet, angitt som gjennomsnittstemperatur normalisert med maks gjennomsnittstemperatur for hvert forsøk. X-aksen viser tid etter maks gjennomsnittstemperaturen ble oppnådd. Blå linjer viser interne slökkemetoder (slokking med strålerør med og uten skum), mens røde linjer viser utvendige slökkemetoder (slokkespyd og skjærslokker).

Figur 5-33 viser avkjølingsraten i røyksjiktet ved bruk av forskjellige slökkemetoder. Den høyeste raten ble oppnådd med strålerøret, men videoopptaket viser at brannen ble truffet direkte av vannstrålen. Slokking var derfor ikke indirekte slokking som planlagt. Hvis man ser bort fra slokking med strålerør og vann er det skjærslokkeren som oppnår den høyeste avkjølingsraten. Men igjen ser man at det tar noen sekunder før full effekt av skjærslokkeren blir oppnådd. Imidlertid vil denne forsinkelsen ikke ha stor betydning for en reell slökkeinnsats hvor slokkingen ikke er begrenset til et veldig kort tidsintervall.

Ved å sammenligne avkjølingsraten direkte virker det som at slokking med strålerør og skum har like stor effekt enn slokkespyd. Dette kan være misvisende siden slokkingen med strålerør og skum startet senere og dermed på en høyere temperatur, som fører til mer effektiv fordamping av slökkevannet. Tar man hensyn til temperaturforskjellen når man sammenligner avkjølingsraten (se Figur 5-34) vises det at slokking med skum fører til den laveste avkjølingsraten sammenlignet med de andre slökkemetodene på samme temperatur.



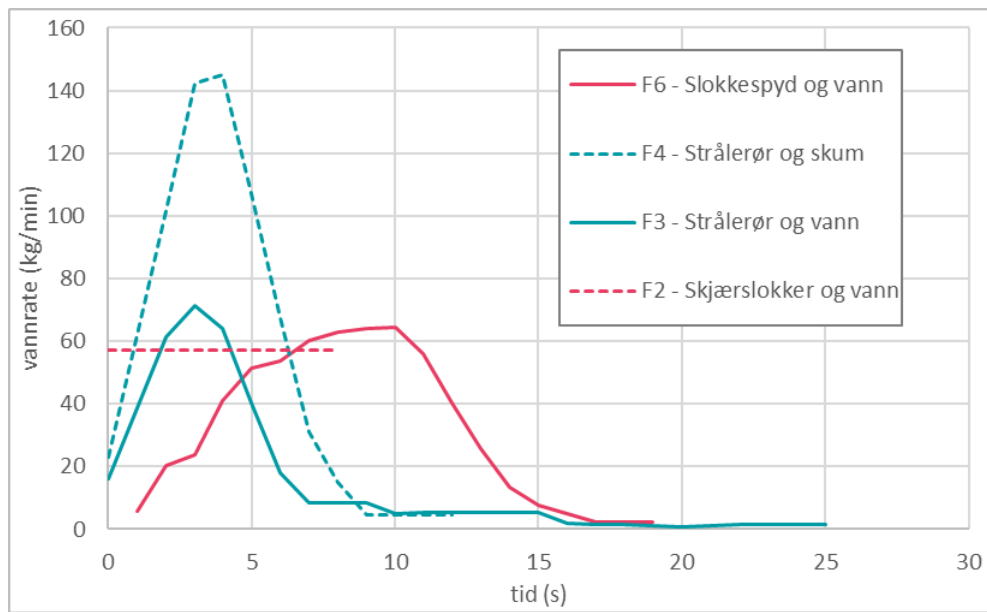
Figur 5-33 Gjennomsnittlig avkjølingsrate i røyksjiktet over tid.



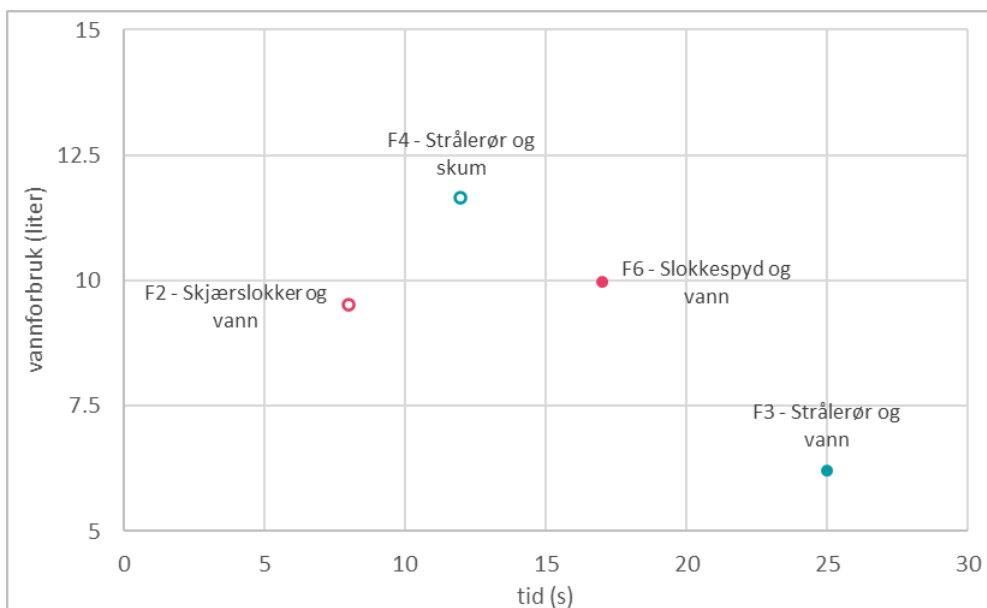
Figur 5-34 Gjennomsnittlig avkjølingsrate i røyksjiktet som funksjon av gjennomsnittstemperaturen i hvert forsøk.

Slokking med skum viste dårligst kjøleeffekt i forsøkene som underbygger funn i andre studier av van den Dikkenberg [10]. Imidlertid må det tas hensyn til at forsøkene fokuserte på indirekte slokking og avkjøling av røyksjiktet. I et scenario hvor avgassing fra ikke-antent brensel er en viktig faktor, kan det antas at skum hadde hatt noen fordeler i å begrense avgassingene, siden den kan danne et skum/vann sjikt som kan begrense avgassingene. Innsatspersonellet rapporterte at skummet brant opp siden temperaturene i brannrommet var høye. Det antas at skum ville hatt bedre effekt (ikke brenne opp) hvis temperaturen i brannrommet først hadde blitt senket ved å bruke en utvendig slukkemethode. Det ble imidlertid ikke gjennomført slukkforsøk med en kombinasjon av utvendig slukkemethode og skum.

Resultatene fra analysen av avkjølingsraten gjenspeiles i vannforbruket for de ulike slökkemetodene (se Figur 5-35 og Figur 5-36). Det ble brukt veldig lite vann i alle forsøkene, som var forventet med tanke på rom- og brannstørrelsen. Det ble brukt minst vann for slukking med strålerør, som begrunnes med at slukkingen ikke var indirekte som planlagt, og dermed hadde for stor effekt for å gjøre en god vurdering. De to utvendige slökkemetodene, slokkespyd og skjærslokker, brukte ca. like mye vann og det ble brukt mest vann for slukking med strålerør og skum.



Figur 5-35 Vannforbruk ved indirekte slukking med forskjellige slökkemetoder. Vannforbruket for etterslukking er ikke inkludert. Vannraten for skjærslokkeren er estimert basert på den nominelle raten av 57 liter/minutt.



Figur 5-36 Vannforbruk ved indirekte slukking med forskjellige slökkemetoder. Vannforbruket for etterslukking er ikke inkludert. Vannforbruk for skjærslokkeren er estimert basert på den nominelle raten av 57 liter/minutt.

På grunn av lite vannbruk (se Figur 5-37) og slokking etter re-antennning var det ikke mulig å vurdere mengde avrenning av slokkevann.



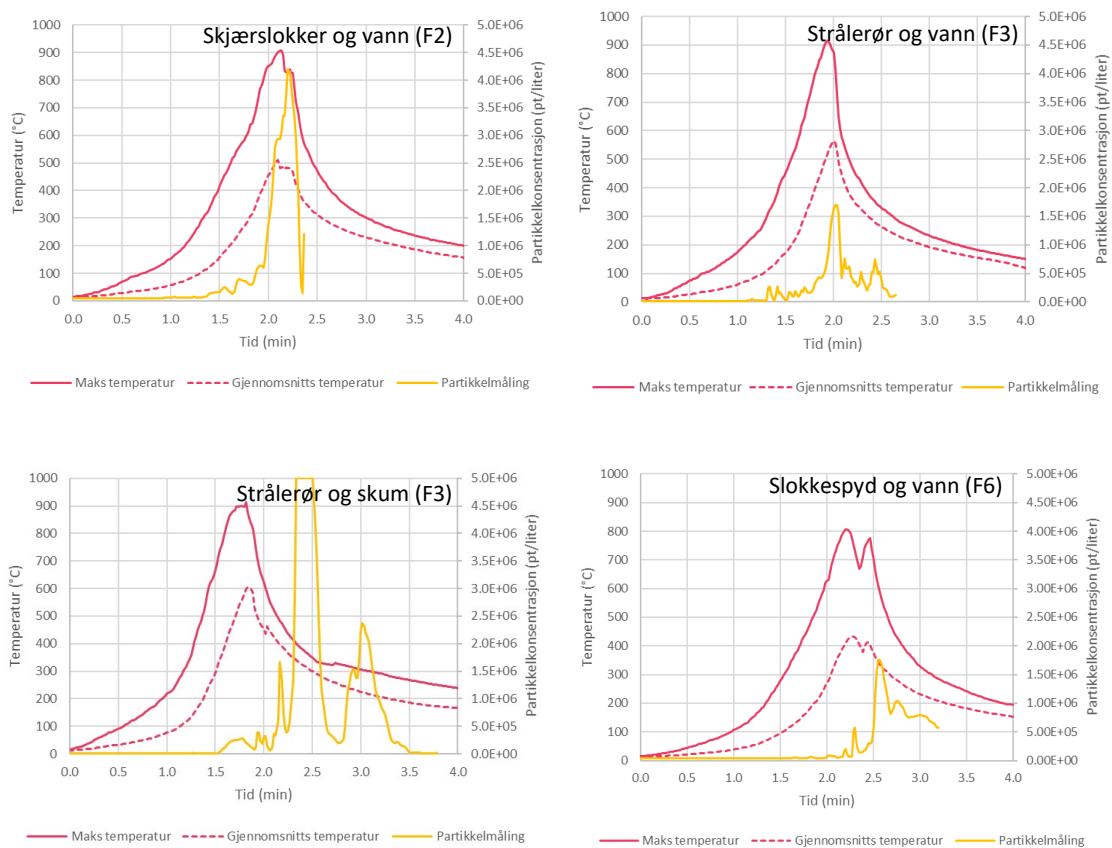
Figur 5-37 Slokkevannrester etter forsøk F3, slokking med strålerør og vann.

5.2.6 Vurdering av eksponering for brannvesenet

Figur 5-38 viser temperaturutviklingen i røyksjiktet sammenlignet med partikkelkonsentrasjon på en høyde av 1,3 m. I alle fire forsøkene ser man at partikkelkonsentrasjonen øker etter temperaturen begynner å falle, altså etter slokkingen har begynt. Ut fra målingene (kun en punktmåling per forsøk) er det vanskelig å dra konklusjoner relatert til maksimal partikkelkonsentrasjon oppnådd i de enkle forsøkene. Imidlertid indikerer målingene i kombinasjon med observasjonene fra videoopptakene at partikkelkonsentrasjonen øker når slokkeinnsats starter, noe som kan forklares med at slokking fører til nedbryting av røyksjiktet, altså blanding av røyk fra under taket med luft lenger ned i rommet.

Dette har en viktig betydning for brannvesenet som holder seg lavt i rommet. Når brannvesenet starter kjøling av røyksjiktet blir sjiktet brutt ned og partikkelkonsentrasjon i kroppshøyde, og dermed eksponering, øker. Nedbryting av røyksjiktet er blant annet avhengig av størrelsen av brannen, stadium i brannforløpet og romkonfigurasjon.

Ved bruk av utvendige slökkemetoder som skjærsløkker eller sløkkespjyd befinner ikke brannvesenet seg i rommet når røyksjiktet brytes ned. Hvis disse slökkemetoder kombineres med strategisk ventilering av rommet, kan brannvesenet unngå å bli eksponert for de høyeste partikkelkonsentrasjonene.



Figur 5-38 Sammenligning av temperaturutviklingen (gjennomsnittlig og maksimal) og partikkelkonsentrasjon i hovedforsøksserien.

At arbeidsbetingelser for brannvesenet i rommet er bedre hvis det brukes utvendige slukkemetoder før slukkingen fortsetter inne i rommet reflekteres også i intervjuet med brannvesenet som rapporterer bedre sikt og mindre «badstueffekt»:

«Denne gangen (F3) var det mye svartere røyk når vi gikk inn, og vi føler mer den badstueffekten, i motsetning til forsøket der vi kjørte skjærslokke først (F2)».

Utvendig slukking kan hjelpe å redusere temperaturen brannvesenet er eksponert for i rommet (se Tabell 5-11). Den laveste maksimale eksponeringstemperaturen, altså temperaturen målt på utsiden av brannvesenets jakke, ble målt i forsøk F6 – slokkespyd med vann. Temperaturmåling under forsøk F2 – skjærslokke og vann, er ikke rapportert på grunn av utstyrsfeil, men det antas at temperaturen vil være sammenlignbar med forsøk F6. Under forsøkene som startet med intern slukking ble brannvesenet eksponert for høyere temperaturer. Den høyeste temperatur på 231°C ble målt i forsøk F4 – Strålerør og skum.

Tabell 5-11 Maksimal temperatur målt på utsiden av brannvesenets jakke under slukkeinnsatsen.

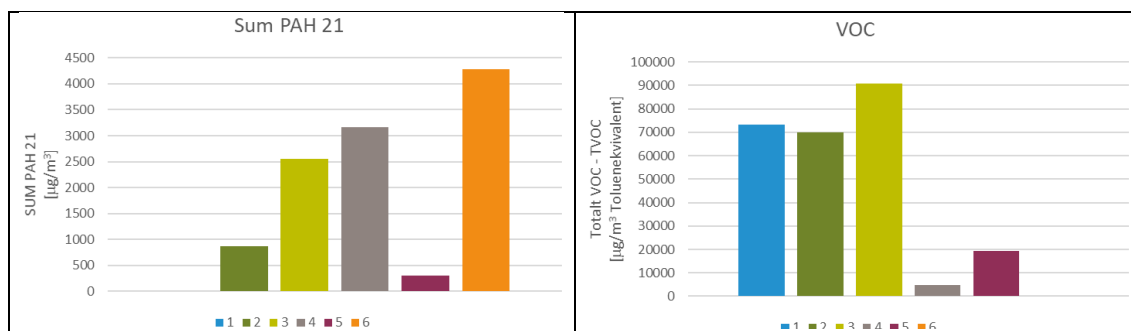
Forsøk	Maks temperatur
F2 – Skjærslokke og vann	-
F3 – Strålerør og vann	114°C
F4 – Strålerør og skum	231°C
F6 – Slokkespyd og vann	79°C

I tillegg til temperaturen ble også brannvesenets eksponering for kreftfremkallende stoffer, PAH og VOC, målt. Tabell 5-12 viser en sammenligning av disse målingene for forsøk F1 til forsøk F6. Figur 5-39 viser en grafisk sammenligning. Det ble målt PAH of VOC for alle forsøk, med unntak av to tilfeller hvor målingen mislyktes.

Tabell 5-12 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slukkeinnsats.

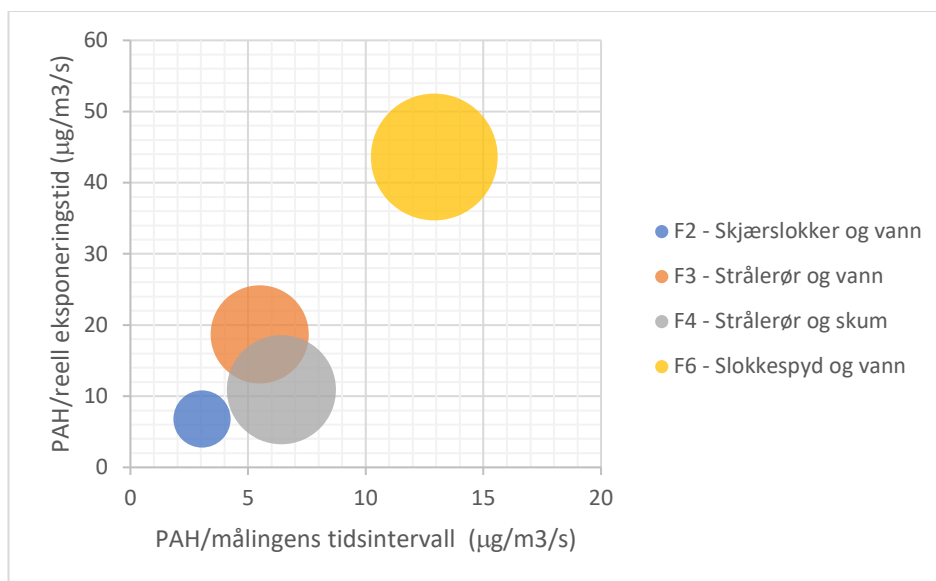
	PAH		VOC	
Forsøk	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingsvarighet (PAH) (min:sek)	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingsvarighet (min:sek)
F1	Ingen data tilgjengelig		73402	6:48
F2	870	4:46	69943	6:54
F3	2560	7:46	90674	7:45
F4	3163	8:13	4741	8:06
F5	309	11:49	19370	13:12
F6	4274	5:31	Ingen data tilgjengelig	

1) Til referanse partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$



Figur 5-39 Analyseresultater for Sum PAH 21, alle forsøk.

I motsetning til temperaturmålingene viser disse målingene derimot ingen klar trend, selv om forskjellene er vesentlige. Det kan blant annet skyldes at tidsintervallet for målingene varierte mellom de forskjellige forsøkene. Imidlertid er målingene nok også påvirket av andre faktorer, siden det heller ikke er mulig å forklare forskjellen mellom forsøkene ved å vekte målingene med oppholdstid, altså effektiv eksponeringstid, eller tidsintervallet for målingen (se Figur 5-40 for PAH). Blant annet var det ikke mulig å forklare forskjellen av PAH målingene for forsøket med skjærslokker og forsøket med slokkespyd. Vi forventede at disse ville være relativt like.

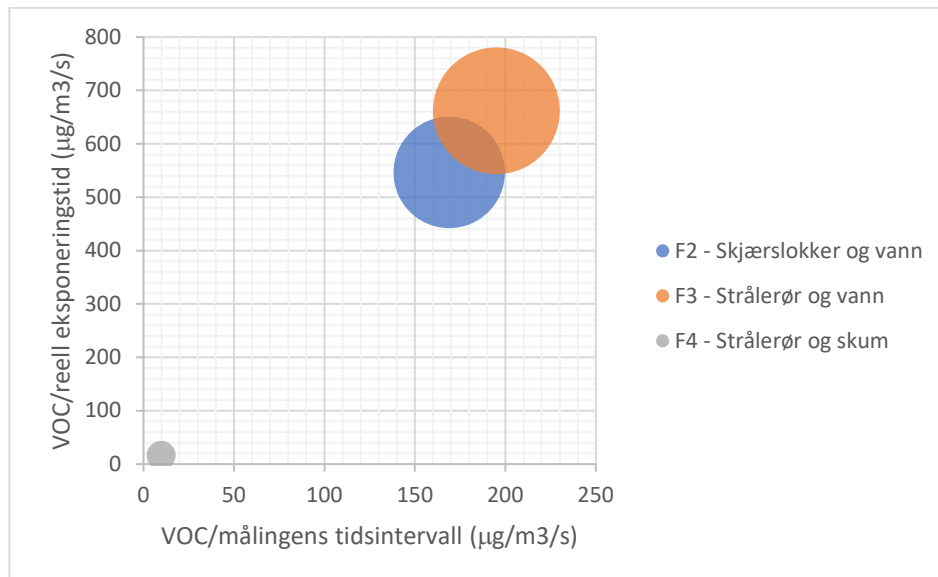


Figur 5-40 PAH måling for hovedforsøksserien, normalisert for reell eksponerings og målingens tidsintervall. Størrelsen av sirklene er proporsjonal til total PAH måling, det vil si store sirkler betyr høy PAH måling.

PAH målinger fra forsøkene ligger mellom $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ og $4274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i løpet av noen få minutter. Dette er flere størrelsesorden over Arbeidstilsynets grenseverdi av $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [22], som gjelder for en eksponeringstid på 8 timer. Imidlertid vil innsattpersonellens brannbekledning og røykdykkerutstyr redusere mengden PAH kroppen eksponeres for. Hvor mye beskyttelse brannbekledning og røykdykkerutstyret gir ble ikke evaluert i denne studien. Tidligere studier har sett på PAH eksponering ved hjelp av urinprøver før og etter eksponering [23,24] og ved hjelp av prøver tatt fra huden med servietter. Det er uklart hvor nøyaktig sistnevnte metode er [25]. Det forskes fortsatt med utviklingen av bedre metoder for måling av eksponering [4], noe som det også jobbes med i FRIC forskningssenteret og HERO⁷ prosjektet.

⁷ <https://www.sintef.no/prosjekter/2019/helserisiko-og-helseeffekter-ved-brannslukking/>

Også for VOC målingene er det vanskelig å dra generelle konklusjoner siden det er så få målepunkter tilgjengelig. Imidlertid indikerer forsøkene at skum fører til lave VOC målingene (se Figur 5-41) siden avgassingene fra eksponerte overflater minimeres når skummet klarer å danne et beskyttende skum/vann sjikt på overflater.



Figur 5-41 VOC måling for hovedforsøksserien, normalisert for reell eksponerings og målingens tidsintervall. Størrelsen av sirklene er proporsjonal til total VOC måling, det vil si store sirkler betyr høy VOC måling.

Selv om det kunne ha vært forventet at det ville være mulig å se en viss forskjell mellom de to utvendige slukkemetodene og de to innvendige slukkemetodene med tanke på eksponering for kreftfremkallende stoffer, var det altså ikke det, som vist i Figur 5-40.

5.3 Ekte møbler

For dette forsøket var det planlagt å bruke et annet startkriterie for slokking sammenlignet med hovedforsøksserien. Det ble brukt utvendig slukkeinnsats (slokkespyd), etterfulgt av innvendig slukkeinnsats. Brannvesenet skulle selv vurdere når rommet overtenner og så starte slokking. Temperaturmålingene viser at brannvesenet vurderte brannforløpet feil, med tanke på at brannen ikke hadde spredt seg så mye som brannvesenet hadde trodd.

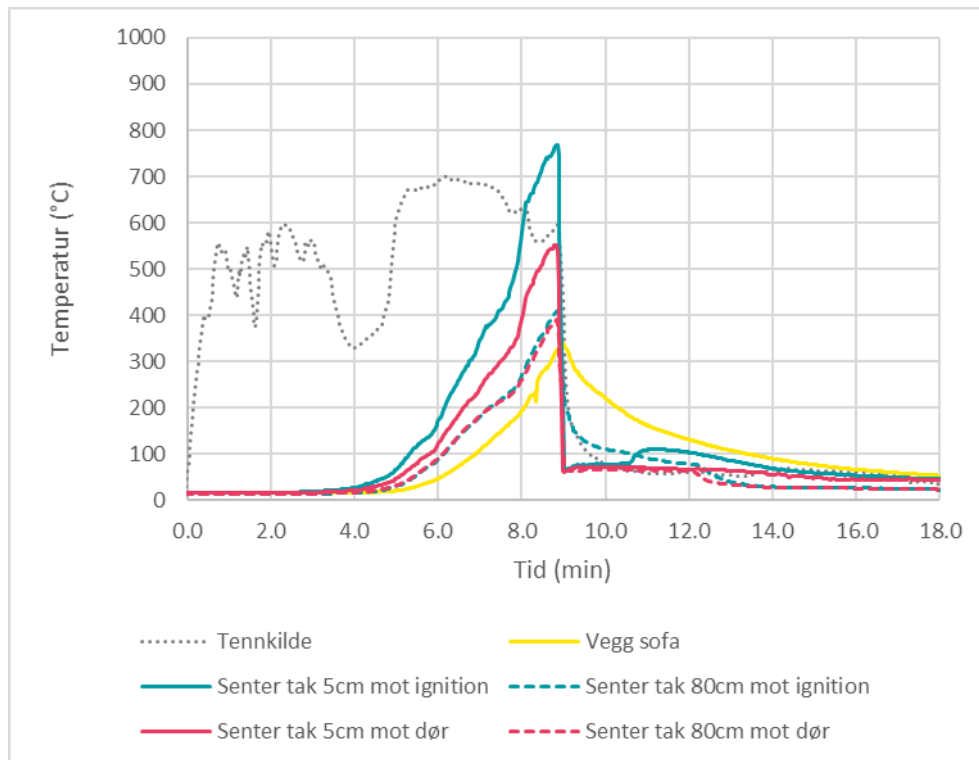
5.3.1.1 F5 – Forsøksforløp

Tabell 5-13 viser forsøksloggen for forsøk F5. Hendelser som er registrert i forsøksloggen er hendelser knyttet til slokking, hendelser som fører til endringer i ventilasjonsforholdene (åpning og lukking av ventilasjonsåpningen eller dør) og hendelser som påvirker eksponeringsmålingene.

Temperaturmålingene fra forsøket vises i Figur 5-42. Videoopptaket fra forsøket er tilgjengelig på: <https://youtu.be/Yvm9xIYIbPE>.

Tabell 5-13 Forsøkslogg for F5.

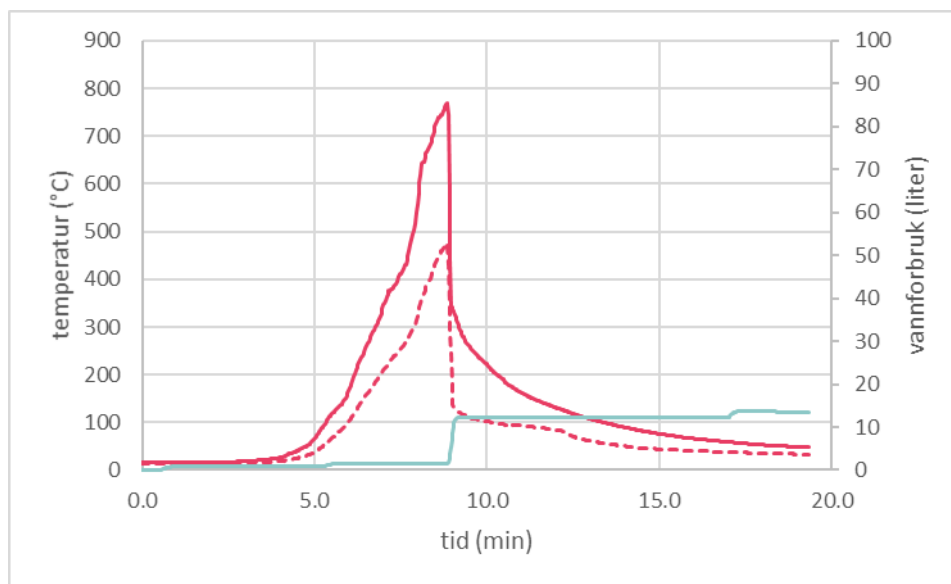
Hendelse	Klokkeslett	Tid etter tenning (min:sek)
Start antenningsforsøk	09:59:49	0:00
Antennelse.	10:01:45	1:56
2/3 av ventilasjonsåpningen lokkes	10:04:25	4:36
Start slokkespyd	10:08:40	8:51
Stopp slokkespyd	10:08:50	9:01
Ventilasjonsåpningen åpnes, og brannfolk går inn i rommet (døra lokkes igjen)	10:09:01	9:12
Dør åpnes, og brannfolk kommer ut	10:10:25	10:45



Figur 5-42 Temperaturmålinger ved tennkilden og i røyksjiktet. Målepunktene tilsvarer TC1 (senter tak 5 cm mot ignition), TC2 (senter tak 5 cm mot dør), TC3 (senter tak 80 cm mot ignition) og TC4 (senter tak 80 cm mot dør) i Figur 3-2.

5.3.1.2 F5 – Vannforbruk

Figur 5-43 viser maksimal- og gjennomsnittstemperatur i røyksiktet og sammenligner temperaturforløpet med målt vannforbruk. Vannforbruk ble ikke sammenlignet med andre forsøker, siden slokkingen startet for tidlig.

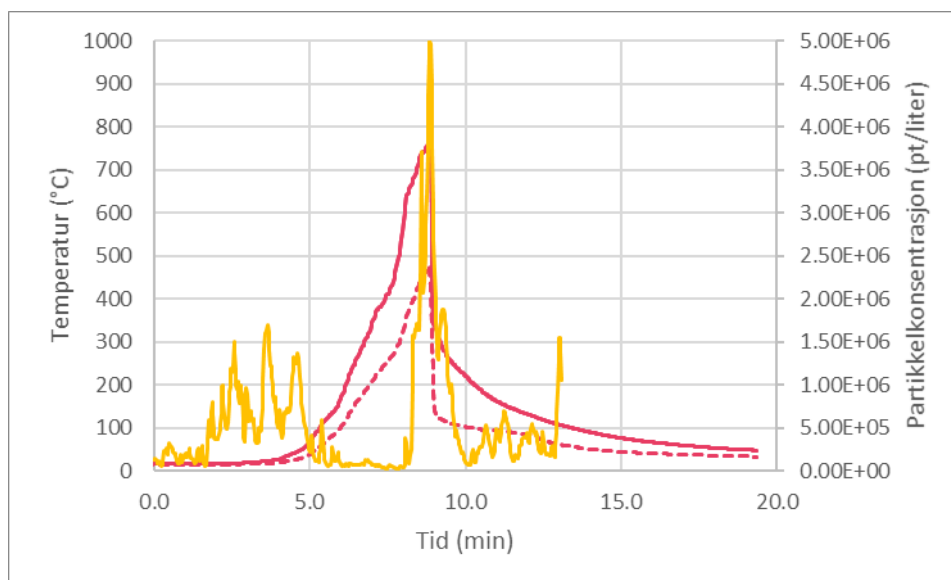


Figur 5-43 Maksimal- (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksiktet basert på målingene vist i Figur 5-42. Figur 5-42 (måling ved tennkilden er ekskludert). Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje).

5.3.1.3 F5 – Røykgasseksponering

Møblene i forsøk F5 ble behandlet med flammehemmende stoffer før forsøket. Det standardiserte brenselet («møblene») brukt i de andre forsøkene inneholder ikke flammehemmende stoffer. Både innhold av flammehemmer, materialsammensetning, mengde materialer og oppbygging av møblene kan antas å påvirke brannforløpet i dette forsøket, sammenlignet med de andre forsøkene i denne studien. Her tok det lengre tid for at brannen utviklet seg, som kan ha sammenheng med anteneligheten fra de ekte møblene med flammehemmer, og/eller de andre nevnte faktorene. Dataene fra forsøket viser at det tok lengre tid å utvikle temperaturer, partikler og gasser, men det ble målt betydelig mer partikler og gasser enn ved de andre forsøkene med standardisert brensel, helt opp mot fire ganger høyere CO nivå og dobbelt så høyt CO₂ nivå (se Vedlegg C).

Figur 5-44 viser partikkelkonsentrasjonen i røyken ved forsøk F5. Slik som for gasskonsentrasjonen beskrevet ovenfor, tok det lengre tid for partikkelmålingen viste maks antall partikler i røyken. Også her kan dette dels forklares av at de ekte møblene er behandlet med flammehemmende stoffer.



Figur 5-44: Nivåer med partikler i røykgassen sammen med maks og gjennomsnittstemperatur i forsøk F5.

Total mengde PAH (sum av akkumulert mengde for 20 vanlige PAH forbindelser) målt under hele prøvetakingstiden (13:12 min:sek, eller 798 sek), og VOC (sum av akkumulert mengde for 35 vanlige VOC forbindelser) målt under hele prøvetakingen (11:50 min:sek, eller 710 sek), er gitt i Tabell 5-14. Målt total eksponering er deretter normalisert til å vise eksponering kun i tidsrommet hvor røykdykker var inne i brannrommet (01:33 min:sek, eller 99 sek), angitt som reell eksponering. Total og reell eksponering er også angitt per tidsenhet, for enklere sammenligning mellom forsøker. Forsøk F5 gav lavest innhold av PAH og det nest laveste innholdet av VOC av forsøkene.

Tabell 5-14 Analyseresultater for Sum PAH 21 og Totalt VOC, eksponering røykdykker under slokkeinnsats, både total måletid og reel innvendig eksponeringstid.

Forsøk F5	PAH og VOC		
	Sum PAH 21 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ¹⁾	Prøvetakingstid (PAH) (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{s}$)
Totalt	309	13:12/798	0,4
Reell eksponering	309	1:33/99	3,1
	Totalt VOC - TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)	Prøvetakingstid (min:sek)/(s)	Eksponering per tidsenhet ($(\mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluenekvivalent)/s)
	19370	11:50/710	27,3
Reell eksponering		1:33/99	195,7

¹⁾ Partikulært PAH, Arbeidstilsynets grenseverdi (8h): $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

5.4 Overtenning

Dette forsøket ble gjennomført for å utnytte testfasiliteten før demonteringen og gi brannvesenet en mulighet for å gjennomføre ekstra øvinger under realistiske forhold, inkludert overttenning i rommet (se Figur 5-45 og Figur 5-46). Brannen ble flere ganger nesten helt slokket før slokking ble stoppet for å gi brannen muligheten å ta seg opp. I tillegg ble en vifte brukt for å tilføre ekstra luft og dermed hjelpe brannen å øke i intensitet igjen (se Figur 5-47).



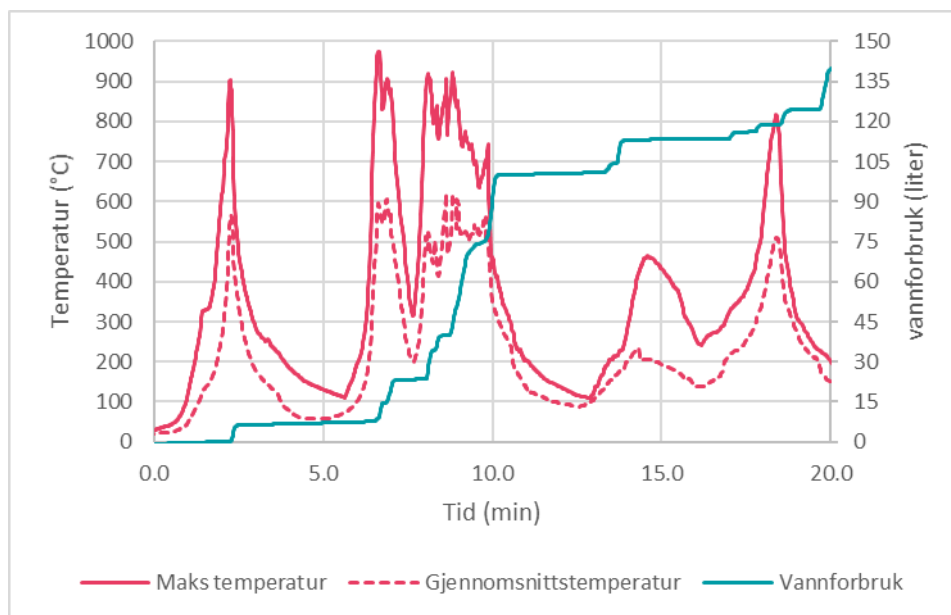
Figur 5-45 Utvendig slokking med strålerør under forsøk F7.



Figur 5-46 Overttenning under forsøk F7.



Figur 5-47 Lufttilførsel med vifte etter slokking for å hjelpe brannen til å ta seg opp igjen.



Figur 5-48 Maksimal (solid rød linje) og gjennomsnittstemperatur (stiplet rød linje) i røyksjiktet. Sekundæraksen viser målt vannforbruk (solid blå linje).

6 Konklusjoner

Totalt syv forsøk (F1 – F7) ble gjennomført. Konklusjonene er basert på de fire forsøkene fra hovedforsøksserien (F2, F3, F4 og F6). De taktiske vurderingene av innsatspersonell er basert på forsøk F1 til F4.

6.1 Effektivitet og vannforbruk

Alle slökkemetoder førte til at temperaturen i røyksjiktet sank under 150°C innen 2,5 minutter og brannen ble slått ned. Imidlertid ble det observert gjentenning av brannen i alle forsøkene ca. 6 minutter etter forsøkstart, med unntak av forsøk F4, sløkking med skum, hvor gjentenning skjedde etter ca. 4 minutter. Gjentenning skjedde oftest ved puten i midten av sofaen hvor brannen hadde en viss beskyttelse og kunne ulme videre etter den første sløkkingen.

Både skjærsløkker og sløkkespyd viste god effekt, selv under «kunstige» begrensninger (begrenset tid og ikke optimal stråleretning). I forsøkene gikk det mer tid før skjærsløkkeren oppnådde full effekt sammenlignet med sløkkespyd. Imidlertid vil denne tidsforskjellen ikke være like relevant i en ekte sløkkeinnsats, hvor flere faktorer (tid for å forberede utstyret og penetrere vegger) spiller en rolle og hvor den totale sløkketiden vil være lengre. Begge disse slökkemetodene brukte ca. like mye vann. Ettersom innkjøpskostnader for sløkkespyd er betydelig mindre enn for en skjærsløkker, er dermed sløkkespydet funnet å være ikke bare et effektivt sløkkeverktøy, men også gunstig fra et kost/nytte perspektiv. Innkjøpskostnader er viktig med tanke på tilgjengelighet for brannvesener, spesielt for mindre brannvesen. Skum hadde dårligst kjøleeffekt i forsøkene og førte til raskest re-antenning. Det konkluderes derfor at skum er uegnet som slökkemiddel for å redusere temperaturen i brannrommet ved høye temperaturer.

Sløkking med skum viste dårligst kjøleeffekt i forsøkene og til størst vannforbruk. I tillegg førte sløkking til raskest gjentenning. Effektiviteten av sløkking med skum vil være svært avhengig av skumtypen, samt av andre faktorer som type brann og størrelse på brannen. Det er derfor ikke mulig å gi en generell konklusjon for skum, men i brannscenarioet som ble undersøkt i denne studien var sløkking med skum den minst effektive metoden og kan derfor ikke anbefales for kjøling av røyksiktet. Imidlertid ble det ikke undersøkt om effektiviteten av skum kan økes ved å benytte en utvendig slökkemethode før innvendig sløkkeinnsats med skum. Utvendig slökkemetoder senker temperaturen i brannrommet og vil forhindre at skummet brenner opp. Det anbefales derfor å undersøke denne kombinasjonen i fremtiden.

Analysen av forsøk F4 – Strålerør og vann, tyder på at brannen ble sløkket direkte som førte at forsøket ikke er direkte sammenlignbart med de andre forsøkene.

6.2 Eksponering og gassmålinger

Det ble målt partikkelkonsentrasjonen i rommet i 1,3 m høyde på et fast definert punkt, i tillegg til temperatur, polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH) i partikulær fase og flyktige organiske forbindelser (VOC) på overkroppen til brannvesenet.

Det ble registrert PAH og VOC i alle målingene. Imidlertid var det ikke mulig å se en klar trend i forsøkene mellom de ulike slökkemetodene. Forsøkene viser lavest VOC måling ved bruk av skum. PAH viste større variasjon enn VOC-målingene. Både partikkel- og temperaturmålingene viser derimot at utvendige slökkemetoder (skjærslokker eller sløkkespyd) potensielt kan redusere eksponeringen for brannvesenet med tanke på varme og kontakt med partikler. Når vann, eller annet slökkemiddel, påføres til røyksjiktet blir den varme røyken med økt partikkelkonsentrasjon blandet med lavere, kaldere sjikt i rommet. Når røyksjiktet brytes ned, øker antall partikler i kroppshøyde vesentlig, som altså vil gi en vesentlig eksponering dersom brannvesenet befinner seg inne i rommet når dette skjer.

Å bruke skjærslokker eller sløkkespyd kan redusere eksponering for brannvesenet med tanke på varme og kontakt med partikler. Dette gjelder spesielt når ventilasjon av rommet kan brukes aktivt for å luften røykgasser ut i kombinasjon med utvendig slokking.

6.3 Taktiske vurderinger fra innsattpersonell

Det dras tre hovedkonklusjoner ut fra taktiske vurderinger gjort av innsattpersonellet i studien.

Konklusjon 1: Innsattpersonellets taktiske vurderinger:

- Sammenligningsforsøk viser at skjærslokker i forkant av røykdykkerinnsats, gir mindre sot og eksplosjonsfarlige/giftige branngasser i brannrommet, sammenlignet med direkte innvendig slokkeinnsats.
- Sammenligningsforsøk viser at skjærslokker som umiddelbart tiltak, gir bedre virkning av det sekundære, innvendige slökkemiddelet.
- Kombinasjonen av skjærslokker og konvensjonelt slökkemiddel, reduserer temperatur og energi i brannrommet raskere, med påfølgende økt mulighet for å redde liv.

Innsattpersonellet erkjenner at de ikke er bevisste nok på hvor stor effekt det er, å benytte skjærslokker i forkant av innsats med røykdykking. Det ble ikke gjennomført intervju etter forsøket med sløkkespyd, men det antas at det samme gjelder for den slökkemetoden. Det er spesielt to viktige faktorer som utgjør en betydelig forskjell uten bruk av utvendig slokkeinnsats (skjærslokker eller sløkkespyd):

- Brannrøyken fremstår som sortere og tettere – altså mer eksplosjonsfarlig og giftig, når utvendig slökkemetode ikke brukes først.
- Badstueeffekten er høyere når utvendig slökkemetode ikke brukes først. Høy luftfuktighet kan gi varmegjennomsling i klærne til innsattpersonellet, som igjen kan føre til skader, og at innsattpersonellet må trekke ut.

Konklusjon 2: Innsattpersonellets taktiske vurderinger:

- Sammenligningsforsøk viser at innsattpersonell undervurderer den negative ejektoreffekten lufteåpninger har inn til brannrommet.

Ejektoreffekten som oppstår når innsattpersonell bruker spredt stråle, med liten dråpestørrelse og stort vannvolum er undervurdert. Denne effekten er uheldig, i situasjoner når brannen skal slukkes raskt og effektivt. Det viser seg at innsattpersonellet har undervurdert hvor mye oksygen som

tilføres brannen når det blir brukt spredt stråle ved siden av et åpent vindu, eller gjennom en åpen dør. Grunnen til dette er at innsattpersonell vanligvis bruker ejektoreffekten til utlufting av røyk, ut av for eksempel et vindu eller dør. Tankesettet med at denne effekten også gjør seg like gjeldende med luft inn, er ikke tilstede.

Konklusjon 3: Innsattpersonellets taktiske vurderinger:

- Sammenligningsforsøk viser at skum er uegnet som slökkemiddel, ved høye temperaturer, eller før temperaturen i brannrommet er redusert

Effekten av å bruke skum som slökkemiddel er overvurdert, ved høye temperaturer. Innsattpersonellet ble overrasket over at skum som slökkemiddel fungerte mye dårligere enn rent vann ved like forutsetninger. Innsattpersonellet trodde at bruk av skum ville ha stor effekt mot avdamping av brennbare gasser fra brennbart materiale. Derimot viste forsøkene at skummet raskt ble ødelagt av de høye temperaturene, og dermed førte til raskere gjentenning enn ved bruk av vann som slökkemiddel. Merk at denne konklusjonen gjelder for brannscenario i denne studien, men kan antas å ha en viss overføringsverdi også til andre branner.

7 Referanser

- [1] A. K. Storesund, K. Hox, A. G. Bøe, og R. Wighus, «NBL A13126 Slokkevannsmengder», SINTEF NBL as, Trondheim, ISBN: 978-82-14-00123-5, okt. 2013.
- [2] K. Hox og A. S. Bøe, «Slokkemetoder med lite vann», SP Fire Research, Trondheim, Norway, A17 20099-01:1, 2017.
- [3] K. Storesund, K. Hox, A. Steen-Hansen, C. Sesseng, og H. Ishol, «Utredning i forbindelse med brannvesenets dimensjonering», RISE Fire Research, Trondheim, A17 20323:2, mai. 2017.
- [4] K. Storesund og R. F. Mikalsen, «Evaluating particle and gas transmission through firefighters' clothing», presentert på 15th international conference, Interflam 2019, London, UK, 1-3th July 2019, Windsor, UK, 2019, s. 12.
- [5] M. Sandsund, K. Storesund, T. C. Storholmen, og R. F. Mikalsen, «Particle penetration in firefighter clothing – a pilot study (submitted)», presentert på ECPC 9th European Conference on Protective Clothing, Stuttgart, 2020.
- [6] René Hagen, Annemieke Hendriks, og Jaap Molenaar, «Quadrant Model for Fighting Structure Fires», Version 2.0, nov. 2014.
- [7] E. Aamodt, C. Meraner, og A. W. Brandt, «Review of efficient manual fire extinguishing methods and equipment for the fire service», RISE Fire Research, D4.1-2020.05, 2020.
- [8] Rijk van den Dikkenberg og Karin Groenewegen, «Techniques for the offensive exterior attack in fighting ventilation controlled structure fires», i *Fourteenth International Interflam Conference*, London, UK, 2016, bd. 1, s. 329–340.
- [9] R. Fallberg, K. Palmkvist, H. Ingason, T. Hertzberg, og K. Wahlbeck, «Cutting extinguishing concept - practical and operational use», Swedish Civil Contingencies Agency, MSB0167, jan. 2010.
- [10] R. Van den Dikkenberg, «Cooling Experiments with Water and Foam», 421N1206, sep. 2013.
- [11] T. Rinne, «Apartment fire fighting using alternative extinguishing methods», VTT Tiedotteita.
- [12] «IMO 2010 FTPC Part 8 - Test for upholstered furniture». International Maritime Organization, 2012.
- [13] «EN 1021-2:2014 Furniture - Assessment of the ignitability of upholstered furniture - Part 2: Ignition source match flame equivalent». CEN-CENELEC, Brussels, 2014.
- [14] G. Liebe, *Brannfysikk - fra teori til praksis*. Norges brannskole, Norsk brannvernforening, 1995.
- [15] M. Mattsson og L. Eriksson, *Taktikkboken - en håndbok i systematisk ledelse av slokkeinnsatser mot bygningsbranner*. Norges brannskole, Norsk brannvernforening, 2017.
- [16] R. Svensson, J. Lindström, R. Ochoterena, og M. Försth, «CFD simulations of the Cutting extinguisher», s. 113.
- [17] G. P. Horn *mfl.*, «Firefighter and fire instructor's physiological responses and safety in various training fire environments», *Safety Science*, bd. 116, s. 287–294, jul. 2019.
- [18] K. Storesund, C. Sesseng, R. F. Mikalsen, O. A. Holmvaag, og A. Steen-Hansen, «Evaluerer av brann i parkeringshus på Stavanger lufthavn Sola 7. januar 2020», RISE Fire Research, Trondheim, Norway, RISE-rapport 2020:43, sep. 2020.
- [19] Liebe, Guttorm, *Brann i bygg: Konstruksjoner, sikkerhet og taktiske vurderinger*. Norges brannskole, Norsk brannvernforening.
- [20] «Fire Fighting Foams». [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.chemguard.com/about-us/documents-library/foam-info/general.htm>. [Åpnet: 08 sep. 2020].
- [21] J. Rakowska, «Best practices for selection and application of firefighting foam», *MATEC Web of Conferences*, bd. 247, s. 00014, jan. 2018.
- [22] «Grunnlag for fastsettelse av administrativ norm for polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH)». Arbeidstilsynet.

- [23] K. W. Fent *mfl.*, «Firefighters' absorption of PAHs and VOCs during controlled residential fires by job assignment and fire attack tactic», *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, bd. 30, nr. 2, s. 338–349, mar. 2020.
- [24] K. W. Fent *mfl.*, «Firefighters' and instructors' absorption of PAHs and benzene during training exercises», *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, bd. 222, nr. 7, s. 991–1000, aug. 2019.
- [25] A. A. Stec *mfl.*, «Occupational Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Elevated Cancer Incidence in Firefighters», *Scientific Reports*, bd. 8, nr. 1, s. 2476, feb. 2018.
- [26] «IMO Res. MSC.265(84) Annex 14 Amendments to the revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in SOLAS regulation II-2/12 (Resolution A.800(19))». International Maritime Organization, 2008.

Vedlegg A: Forsøksoppsett og -prosedyre

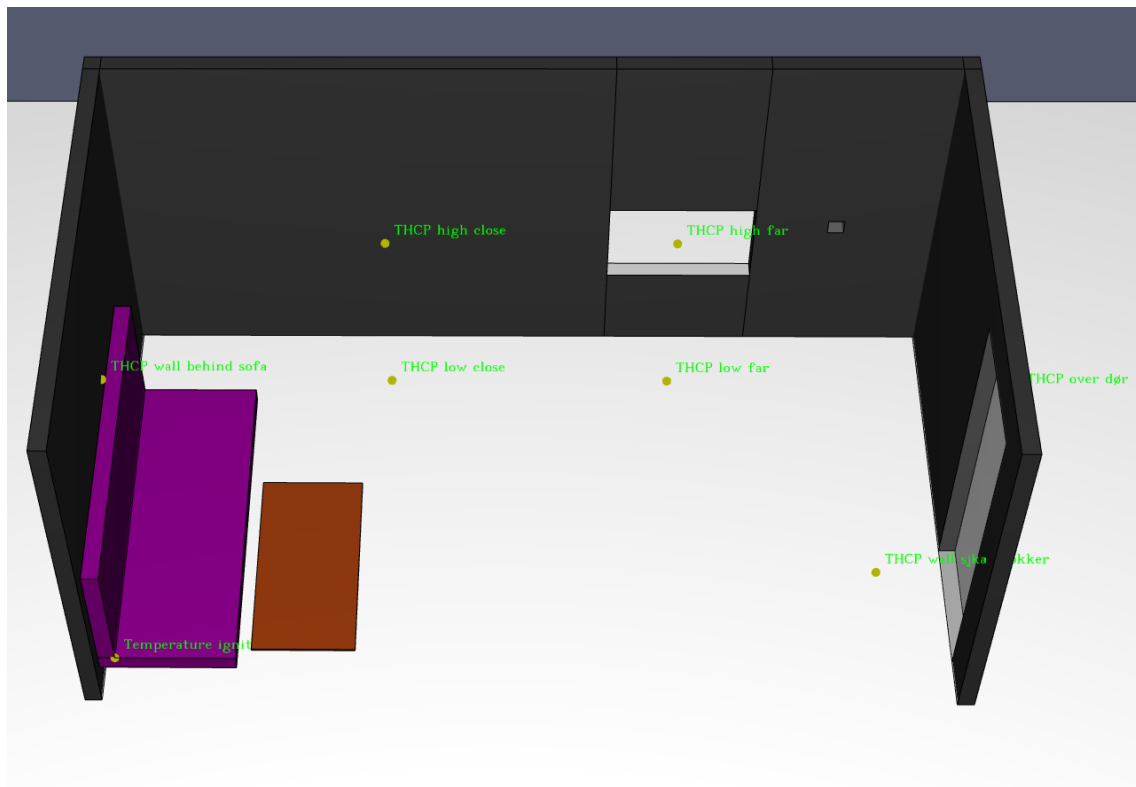
I dette vedlegget er forsøksoppsett og forsøksprosedyre beskrevet.

A1 Forsøksoppsett

A1.1 Brannrommet

Det er tatt utgangspunkt i forsøksoppsett som beskrevet i IMO Resolution 265(84) «*Amendments to the revised guidelines for approval of sprinkler systems (...)*»[26]. Det ble bygget et brannrom med korridor/ytterrom utenfor.

Størrelsen på brannrommet var 2,5 m x 5 m x 2,4 m (B x L x H), hvorpå korridoren/ytterrommet var 2,7 m bredt og 2,7 m langt. Rommet var utstyrt med ei dør på kortveggen mot korridoren og en ventilasjonsåpning på langveggen lengst vekk fra sofaen. Figur A - 1 viser utformingen av rommet.



Figur A - 1 Illustrasjon av rommet. Hull i vegg hvor skjærslokker var satt inn (grå firkant), samt retningen av vannstrålen fra skjærslokkeren (blå pil) er indikert. Posisjonen av åtte termoelement (gule sirkler) er indikert.

Brannrommet var bygd opp av veggmoduler bestående av ett lag 13 mm OSB-plater utenpå et rammeverk med 48 mm x 96 mm trebjelker isolert med 100 mm steinull. Innerveggen bestod av ett lag 13 mm OSB plate etterfulgt av to lag 13 mm gipsplater og deretter ett lag 13 mm OSB-plate. Se Figur A - 2 for oppbygging av vegg.



Figur A - 2 Oppbygging av vegg. Bildet tatt fra utsiden av brannrommet ved ventilasjonsåpningen.

En 90 cm x 210 cm (B x H) dør ble installert i kortveggen på siden som vendte mot korridoren. Døra var plassert 70 cm fra langveggen uten åpning, med dørstokk som bygde 9 cm opp fra gulvet. Se Figur A - 1 og Figur A - 3 for plasseringen av døråpningen.

Taket var bygd tilsvarende veggene, med ett lag 13 mm OSB-plater ytterst, etterfulgt av 48 mm x 96 mm trebjelker isolert med 100 mm steinull, ett lag 13 mm OSB-plater og to lag med 13 mm gipsplater. Takplater av typen 14 mm Rockfon ble festet til gipsen på undersiden. Korrugerte stålplater ble montert på ytterst, på toppen av testtriggen.

Alle skjøtene ble fuget med brannskum.



Figur A - 3 Testtrigg sett fra utsiden. Bildet viser korridor og døråpning inn til brannrommet. Oppbyggingen av taket er synlig øverst til høyre i bildet.

En ventilasjonsåpning i langveggen på 90 cm x 56 cm (B x H), 60 cm over gulvnivå ble satt inn på motsatt side av sofaen. Ventilasjonsåpningen hadde en luke på utsiden som regulerte luftinnsippet ved å dekke ventilasjonsåpningen delvis eller fullt. Figur A - 4 viser plasseringen av ventilasjonsåpningen, sett utenfra.



Figur A - 4 Brannrommet med korridor sett utenfra. Ventilasjonsåpning vises midt i bildet, her uten luke.

A1.2 Innredning og brensel

En sofa med madrasser etter spesifikasjoner gitt i «open space» testen angitt i IMO Resolution 265(84) [1] ble brukt. Sofaens dimensjoner var 0,8 m x 2 m x 1 m (B x L x H) med en høyde fra gulv til underside av sofa på 0,5 m. Sofaen ble plassert i hjørnet mellom kortveggen og langveggen på motsatt side av ventilasjonsåpningen i veggen. Sofaen bestod av en stålramme, en

horizontal madrass som ble plassert i bunn av sofaen og en vertikal madrass som ble plassert oppå den horisontale som rygg i sofaen, i henhold til standarden. Se Figur A - 5 for oppsettet.

En madrass ble delt opp i mindre deler med dimensjonene 0,8 m x 0,5 m (B x L), som simulerte puter i sofaen. En pute ble plassert i senter av sofaen og den andre mot armlenet lengst unna tennkilden, til sammen 0,5 hel madrass. Puten ved armlenet var vinklet, hvor bunnen av puten var ca. 7,5 cm fra kanten av sofaen. Puten i senter av sofaen var plassert slik at det ble et hulrom mellom pute og bakrygg i sofaen, dvs med bunnen ca. 20 cm fra den vertikale madrassen og toppen hvilende mot den vertikale madrassen, se Figur A - 5 og Figur A - 6. I ett av forsøkene (F1) ble det brukt 2 ekstra puter, til sammen 1 hel madrass.

Et bord med dimensjonene 41,5 cm x 120 cm x 40 cm (B x L x H) lagd av ei stållamme med ei 13 mm OSB plate som bordplate, ble plassert helt inntil langveggen og med en avstand på 24 cm fra sofaen.

For ett av forsøkene (F5) ble ekte møbler brukt som innredning, se Figur A - 7. De ekte møblene bestod av en kommode, en sofa, to sofaputer, to gardiner, et gulvteppe, tre aviser/magasiner og et bord (samme som ovenfor). Det foreligger ikke dokumentasjon på de branntekniske egenskapene til disse materialene eller produktene.

I tillegg til den løse innredningen fungerte OSB platene på innerveggene som tilgjengelig brensel. Disse ble erstattet mellom forsøkene.



Figur A - 5 Testoppsettet med sofa og bord inne i brannrommet. Til venstre i sofaen er tennkilden (indikert med pil), i senter av sofaen er den ene puten og helt til høyre i sofaen er den andre puten. Stipplet firkant angir bildeutsnitt som er vist i [crossref til neste bilde].



Figur A - 6 Avstand fra bakryggen (den vertikale madrassen) i sofaen og nedre del av madrassbiten som simulerte pute i forsøksoppsettet.



Figur A - 7 Testoppsettet med ekte møbler inne i brannrommet: en kommode, en sofa, to sofaputer, to gardiner, et gulvteppe, tre aviser/magasiner og et bord.

A1.3 Tennkilde

Tennkilden bestod av et porøst, brennbart materiale med størrelse 6 cm x 6 cm x 1 cm (B x L x H) som ble satt sammen til en kube og lagt i en plastpose. 240 ml heptan ble målt opp og helt i plastposen med det porøse materialet.

Tennkilden ble deretter plassert bakerst i sofaen i enden nærmest veggen, ca. 7 cm fra enden av sofaen. Se Figur A - 5 og Figur A - 8 for plassering.



Figur A - 8 Bilde av tennkilden og plassering av denne.

A1.6 Forsøksoppsett: avvik fra teststandard

Det ble gjort noen tilpasninger i prosjektet som ikke korresponderer direkte med forsøksoppsettet som beskrevet i IMO Resolution 265(84) «*Amendments to the revised guidelines for approval of sprinkler systems (...)*»[26]. De endringene som er gjort er holdt så tett på elementene i standarden som mulig. Avvik fra standard er som følger:

- Innerveggene var kledd med 13 mm OSB-plater, ikke 3 mm finerplater som beskrevet i standarden.
- Korridoren som er beskrevet i standardene er ikke tatt med. Dette grunnet forsøkets utforming og formålet med forsøket.
- Køyesengen som er beskrevet i «small cabin» testen i stanarden er byttet ut med sofaen i «open space» testen i samme standard.
- To puter fra samme type madrass brukt i IMO 265(84), ble lagt til som ekstra brannenergi i sofaen for å sikre rask nok eskalering av brannen.

A2 Instrumentering og måleutstyr

Alle forsøkene ble logget med en datalogger av typen Agilent, med en loggefrekvens på 1 sekund.

A2.1 Instrumentering

I forsøksoppsettet ble 1,5 mm termoelementer av type K benyttet.

Teststart ble registrert av et termoelementet plassert over tennkilden.

Et termoelement var plassert på kortveggen bak sofaen, 104 cm under taket og 135 cm fra veggen uten åpning.

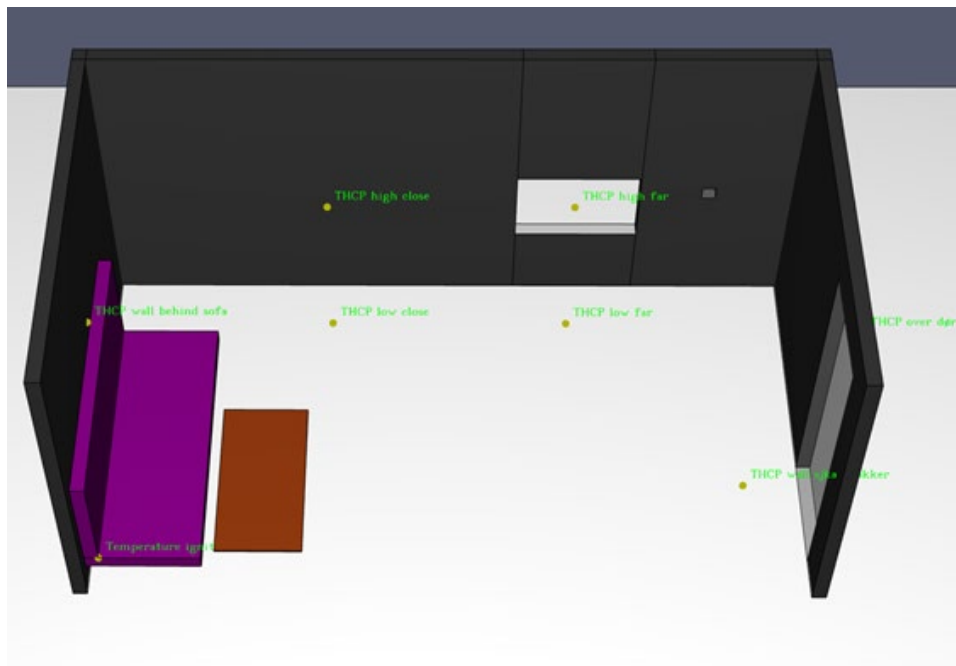
To termoelementer sentrert på bredden og 1/3 av lengden på rommet fra kortvegg ved sofa, ble plassert henholdsvis 5 cm og 80 cm ned under takplatene for å registrere lufttemperaturene ved de ulike høydene.

To termoelementer sentrert på bredden og 1/3 av lengden på rommet fra kortvegg med dør, ble plassert henholdsvis 5 cm og 80 cm ned under takplatene for å registrere lufttemperaturene ved de ulike høydene.

Et termoelement var plassert ved døren ca. 115 cm opp fra gulv og inntil dørkarmen.

Ett termoelement var plassert på langveggen ved døren, i samme høyden og avstand fra kortveggen som hull til skjærslokkeren.

For ett av forsøkene (F5) ble det i tillegg installert røykvarslere, som ikke ble brukt i denne studien.



Figur A - 9 Plassering av termoelementer i rommet, markert med grønne sirkler.

A3 Testprosedyre

Ulike metoder og utstyr for sløkking ble testet under forsøkene. De ulike forsøkene i forsøksserien er beskrevet i Tabell A - 1.

Tabell A - 1 Plan for forsøksgjennomføring, navn på forsøk og hvilket sløkkeutstyr, sløkkemedium og brensel som ble brukt.

Forsøk	Sløkkeutstyr	Sløkkemedium	Brensel
F1	Skjærslokke	Vann	3 madrasser og OSB-plater
F2	Skjærslokke	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F3	Strålerør	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F4	Strålerør	Skum	2,5 madrasser og OSB-plater
F5	Skjærslokke	Vann	Ekte møbler
F6	Sløkkespyd	Vann	2,5 madrasser og OSB-plater
F7	Strålerør	Vann	Udefinert

Testprosedyren for forsøkene tar utgangspunkt i antenning av tennkilden som start av forsøket, hvorpå temperaturene oppunder taket ble styrende for når sløkkeinnsatsen startet. Temperaturkriteriet satt for start av sløkkeinnsats var 350°C oppunder taket. Følgende steg var satt som rekkefølge for forsøksgjennomføringen, men avvik ble tatt høyde for og beskrevet i avsnitt 6 i hovedrapporten.

1. Antenning av tennkilde
2. Start sløkkeinnsats ved romtemperatur 350°C
3. Start utvendig sløkking (utgår for strålerør)
4. Stopp utvendig sløkking (utgår for strålerør)
5. Start VOC og PAH-målinger
6. Dør til rom åpnes helt og brannfolk går inn
7. Reantenning
8. Start av indirekte sløkking
9. Start direkte sløkking
10. Stopp sløkking når primærbrannen visuelt observeres til å være sløkket
11. Brannfolk går ut
12. Dør lukkes helt igjen
13. Stopp VOC og PAH målinger
14. Dør åpnes og ettersløkking av eventuell gjenantenning eller ulmebrann

Eventuelle avvik og tid for hvert punkt skal registreres.

Vedlegg B: Videobilder fra forsøkene

I dette vedlegget vises stillbilder fra video av forsøkene, full video er tilgjengelig her:

F1: <https://youtu.be/Wx9r0Y4sas0>

F2: <https://youtu.be/PtMKENZniR4>

F3: <https://youtu.be/1UwrOai95A8>

F4: <https://youtu.be/Y8ksjAV-VK4>

F5: <https://youtu.be/Yvm9xlYIbPE>

F6: <https://youtu.be/Kfredqebjdo>

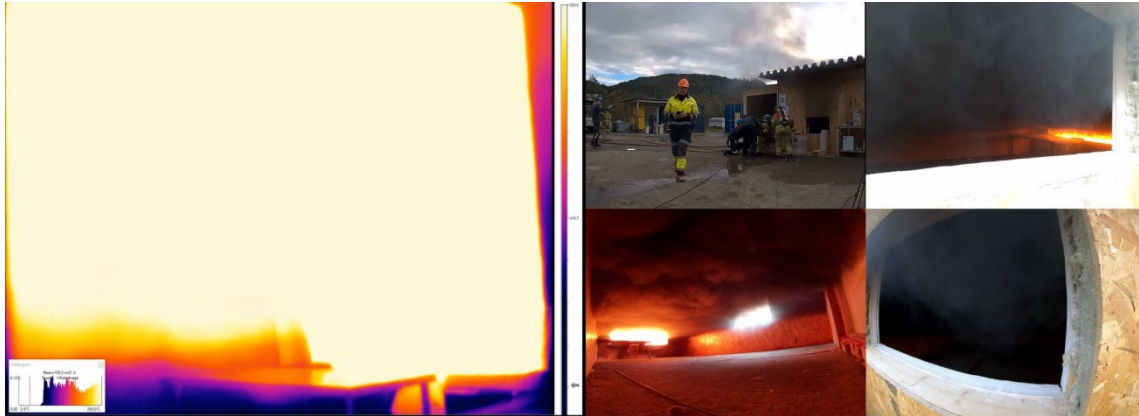
B1 Pretest (F1)



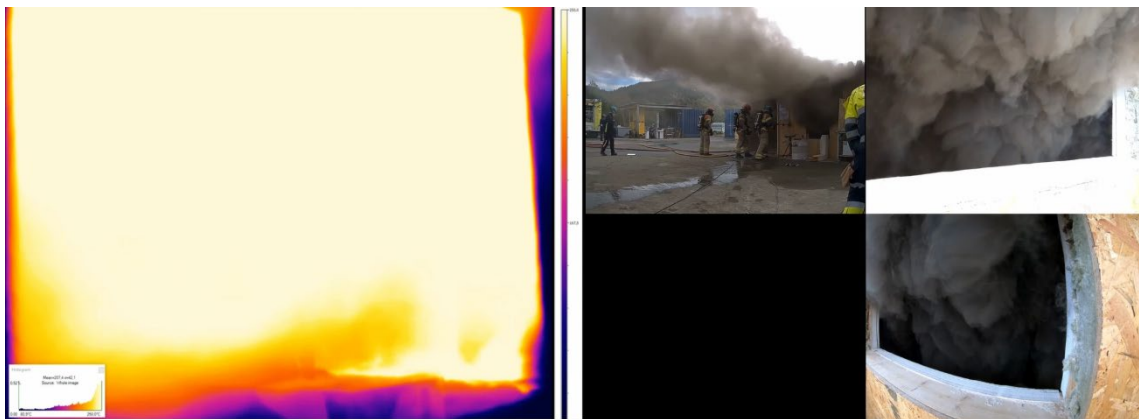
Figur B - 1 Videobilde ved forsøksstart.



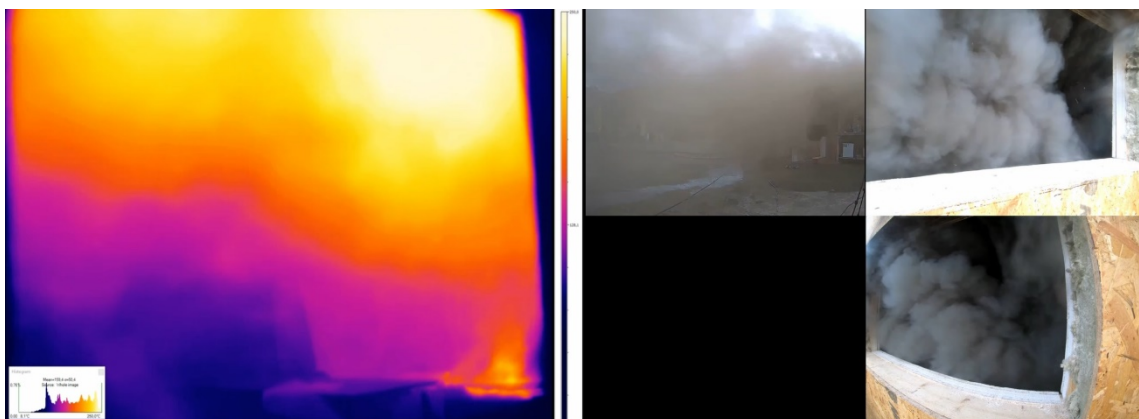
Figur B - 2 Videobilde 1 minutt etter tenning. Flammene når til taket og røksjikt når nesten dørhåndtaket.



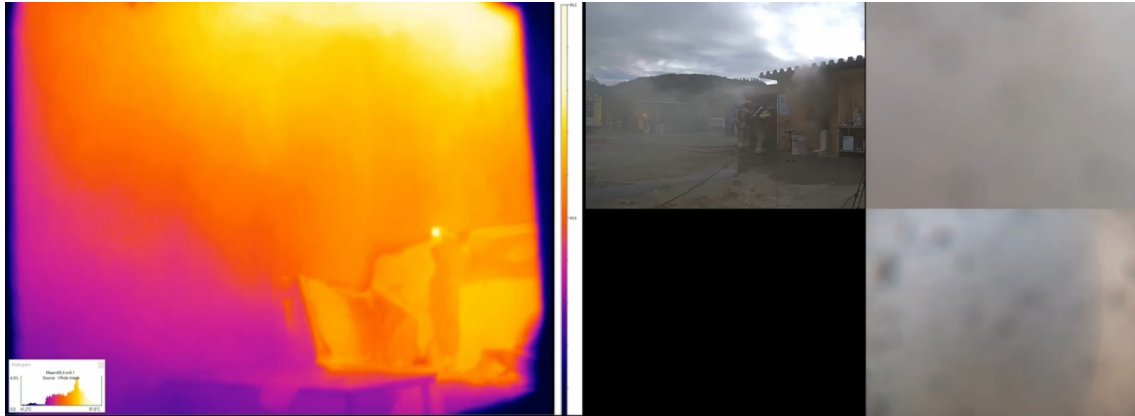
Figur B - 3 Videobilde 1,5 minutt etter tenning. Røysjikt er på samme høyde som ventilasjonsåpningen.



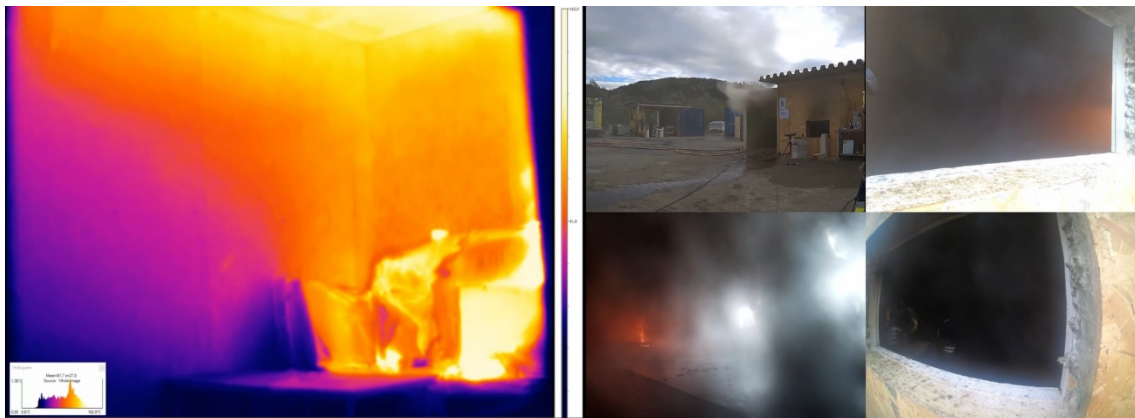
Figur B - 4 Videobilde 1 minutt og 49 sekunder etter tenning. Slokking med skjærslokker starter.



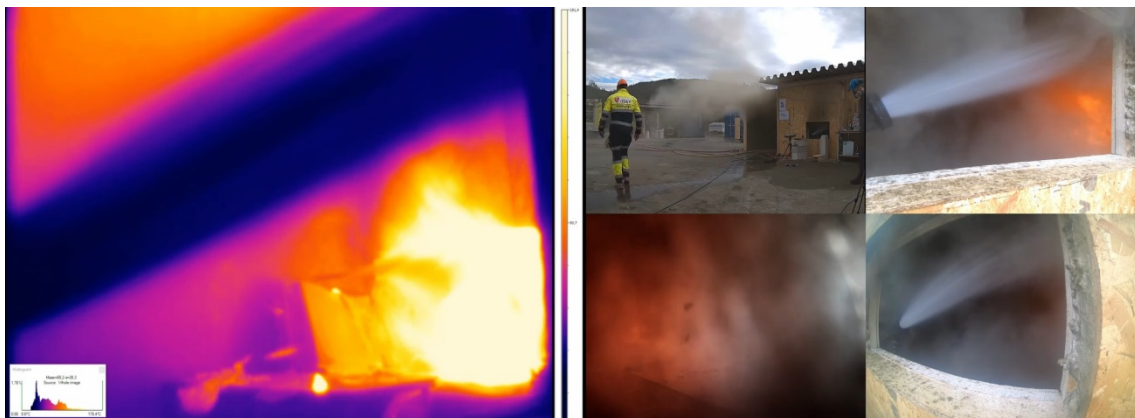
Figur B - 5 Videobilde 1 minutt og 58 sekunder etter tenning. Skjærslokkeren får fullt trykk og effekten av vanntåket vises i IR bildet.



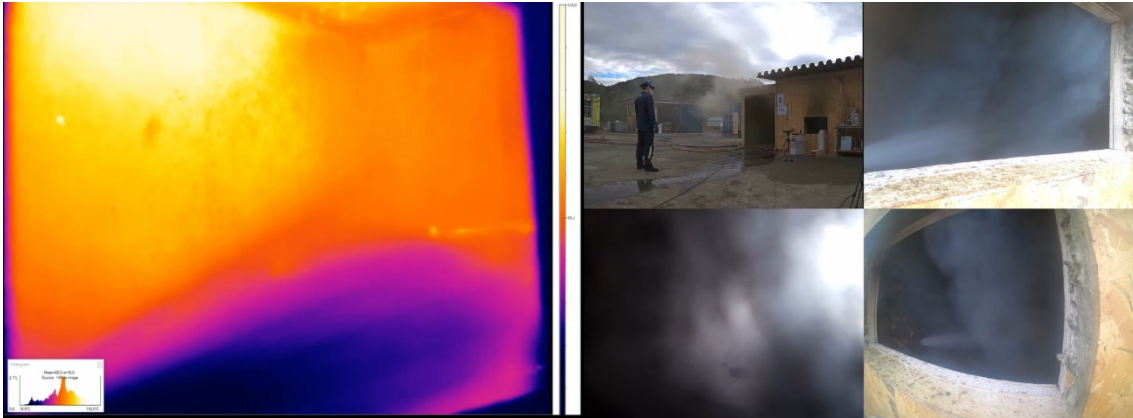
Figur B - 6 Videobilde 2 minutter og 22 sekunder etter tenning. Skjærslukkeren stoppes.



Figur B - 7 Videobilde 3 minutter og 44 sekunder etter tenning. Sofaen har re-antent bak puten som er plassert i midten av sofaen.



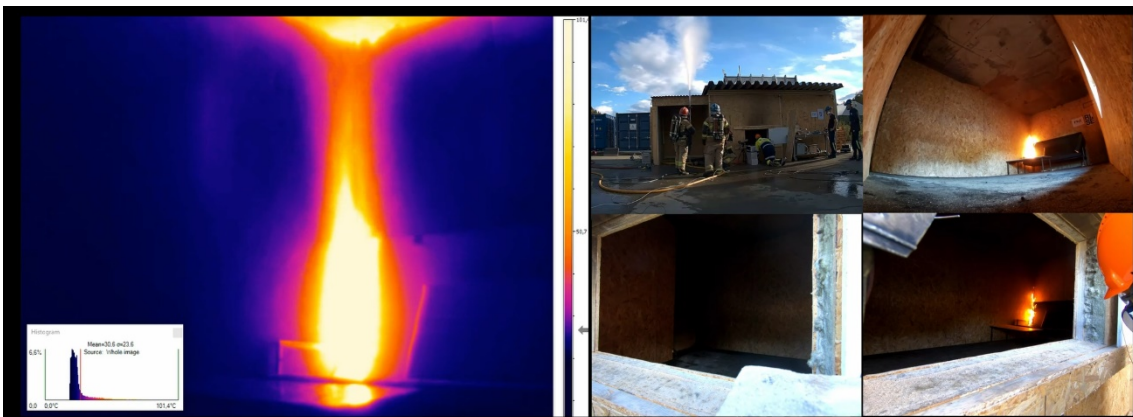
Figur B - 8 Videobilde 3 minutter og 50 sekunder etter tenning. Indirekte slokking med strålerør og vann pågår.



Figur B - 9 Videobilde 4 minutter etter tenning. Brannen slokkes direkte med strålerør og vann.

B2 Hovedforsøksserie

B2.1 F2 – Skjærslokker og vann



Figur B - 10 Videobilde 43 sekunder etter tenning. Skjærslokkeren startes 4 ganger for å opprettholde fylt trykk.



Figur B - 11 Videobilde 1 minutt og 21 sekunder etter tenning. 2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.



Figur B - 12 Videobilde 2 minutt og 8 sekunder etter tenning. Slokking med skjærslokker starter.



Figur B - 13 Videobilde 2 minutt og 18 sekunder etter tenning. Slokking med skjærslokker stopper.



Figur B - 14 Videobilde 2 minutt og 24 sekunder etter tenning. Ventilasjonsåpningen åpnes, samtidig som brannfolk går inn i rommet.

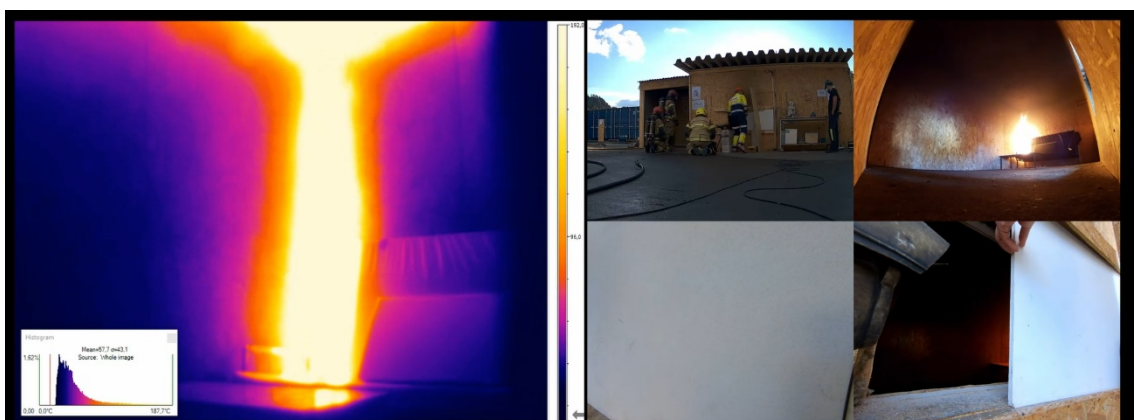


Figur B - 15 Videobilde 5 minutt og 9 sekunder etter tenning. Gjentenning av brannen i nærheten av tennkilden.

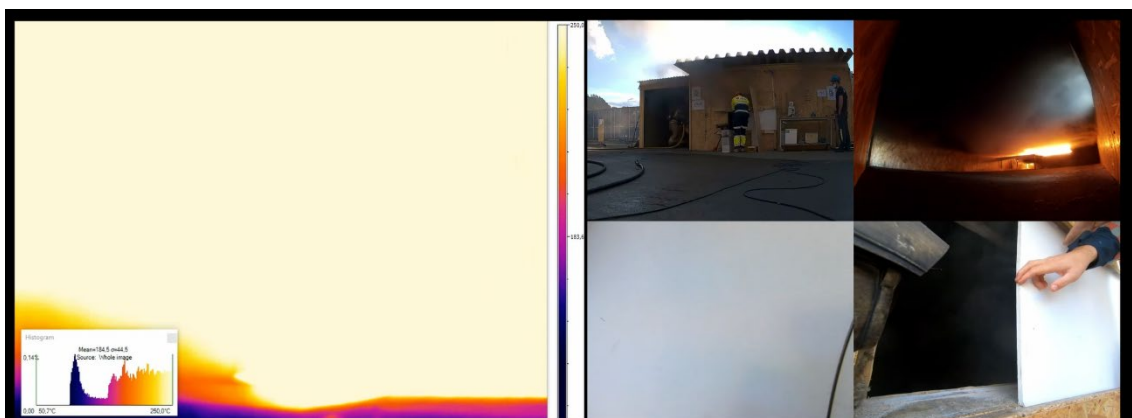


Figur B - 16 Videobilde 6 minutt og 9 sekunder etter tenning. Slik ser brannen ut kort før den blir slokket direkte med strålerør og vann.

B2.2 F3 – Strålerør og vann



Figur B - 17 Videobilde 1 minutt og 15 sekunder etter tenning. 2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.



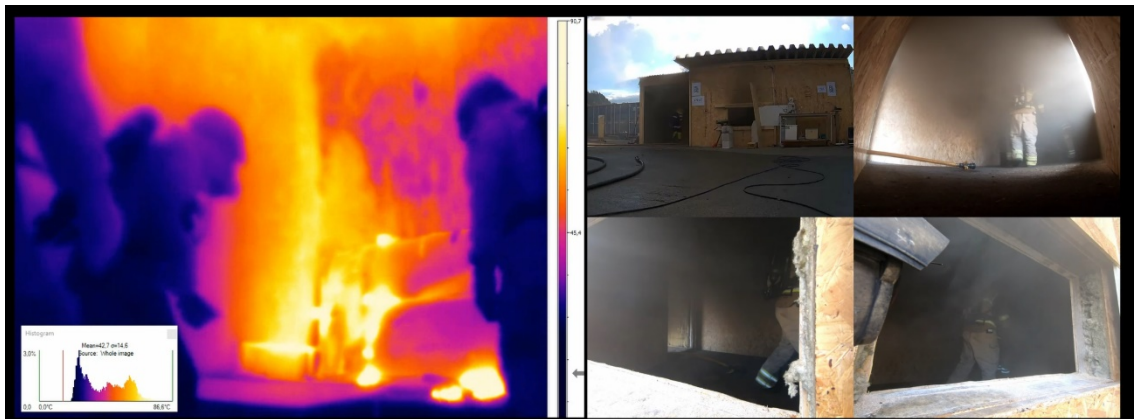
Figur B - 18 Videobilde 1 minutt og 51 sekunder etter tenning. Ventilasjonsåpningen åpnes fullt opp og brannfolk går inn i rommet.



Figur B - 19 Videobilde 2 minutt og 2 sekunder etter tenning. Brannen slokkes indirekte med strålerør og vann. Vannstråle vises i IR bildet.



Figur B - 20 Videobilde 2 minutt og 3 sekunder etter tenning. Brannen slokkes indirekte med strålerør og vann. Vannstråle vises i video bildet. Flammene er allerede sterk redusert.

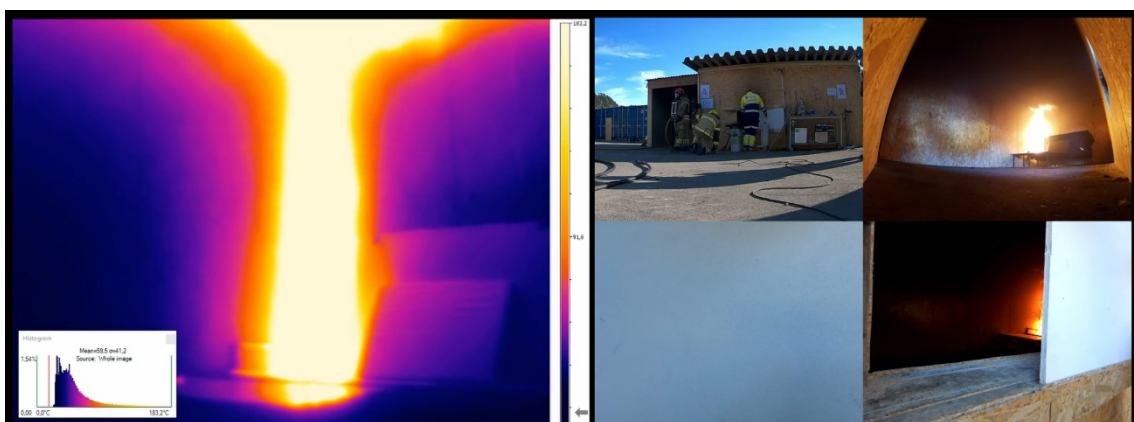


Figur B - 21 Videobilde 4 minutt og 55 sekunder etter tenning. Sofaen inspiseres. Brannfolk melder at det ulmer.

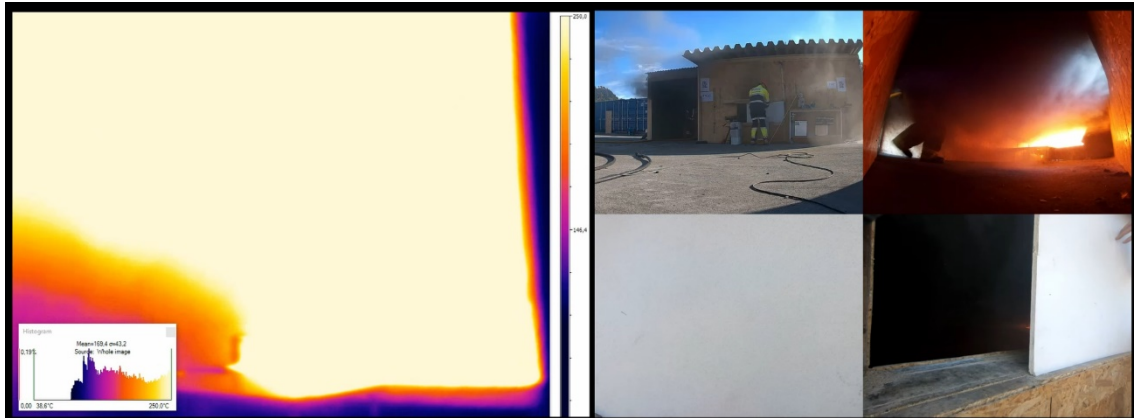


Figur B - 22 Videobilde 6 minutt og 2 sekunder etter tenning. Brannen har tatt seg opp igjen etter midd-puten ble satt på høykant nærmere tennkilden.

B2.3 F4 – Strålerør og skum



Figur B - 23 Videobilde 1 minutt og 13 sekunder etter tenning. 2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.



Figur B - 24 Videobilde 1 minutt og 51 sekunder etter tenning. Døren åpnes, og brannfolk går inn i rommet. Ventilasjonsåpningen åpnes. Platen foran åpningen setter seg fast. Noen få centimeter er derfor fortsatt lokket.



Figur B - 25 Videobilde 1 minutt og 54 sekunder etter tenning. Indirekte slokking med strålerør og skum starter.



Figur B - 26 Videobilde 1 minutt og 57 sekunder etter tenning. Indirekte slokking med strålerør og skum pågår. Skum/vann strålet vises i IR og video bildet.



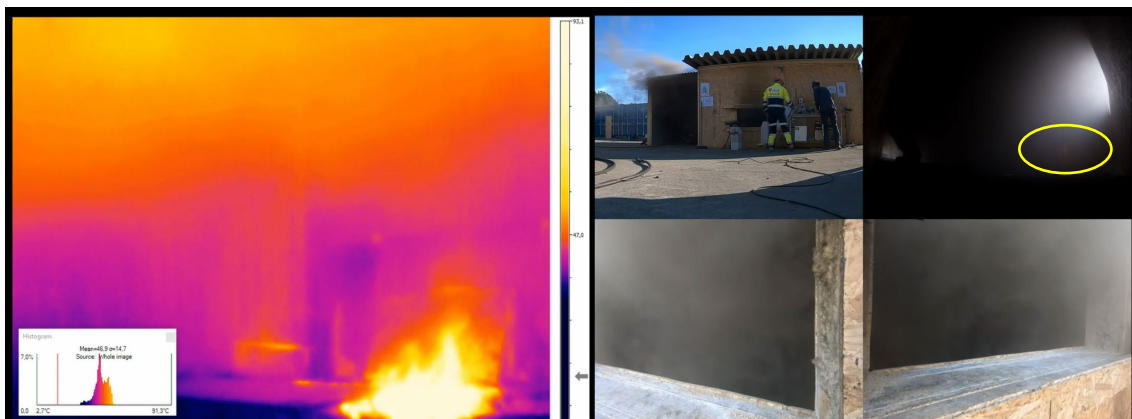
Figur B - 27 Videobilde 2 minutt og 08 sekunder etter tenning. IR bildet av den nedre madrassen viser på denne tidspunkt lokalt fortsatt temperaturer over 200°C etter slokkingen ble stoppet.



Figur B - 28 Videobilde 2 minutt og 53 sekunder etter tenning. Gjentenning blir observert.



Figur B - 29 Videobilde 3 minutt og 03 sekunder etter tenning. IR bildet viser at temperaturen begynner å stige lokalt igjen.



Figur B - 30 Videobilde 4 minutt og 43 sekunder etter tenning. Brannfolk går ut av rommet. Imidlertid viser video bildet fortsatt flammer (se gul markering). Flammen vises best i videofil.

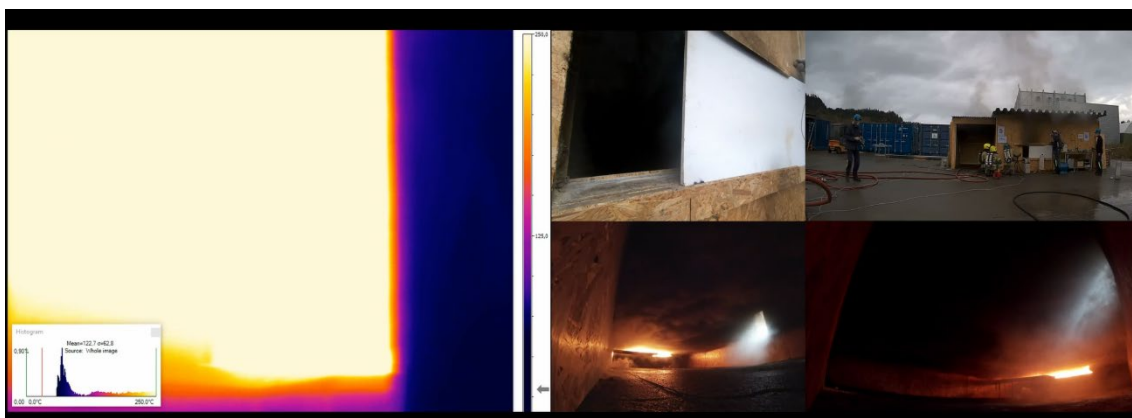
B2.4 F6 – Slokkespyd og vann



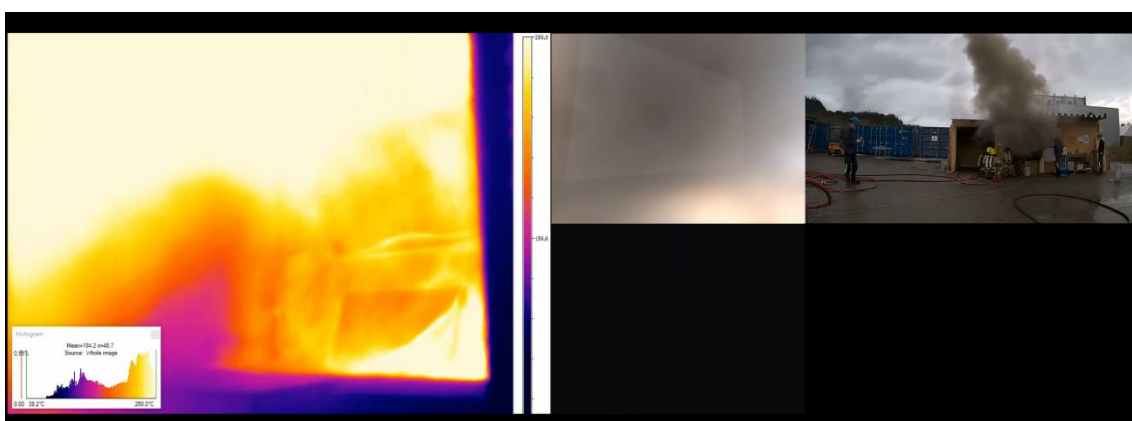
Figur B - 31 Videobilde 54 sekunder etter tenning. Strålerør brukes utenfor rommet.



Figur B - 32 Videobilde 1 minutt og 35 sekunder etter tenning. 2/3 av ventilasjonsåpningen lukkes.



Figur B - 33 Videobilde 2 minutt og 21 sekunder etter tenning, rett før slukkespydet aktiveres.



Figur B - 34 Videobilde 2 minutt og 26 sekunder etter tenning, mens slukking med slukkespydet pågår.



Figur B - 35 Videobilde 3 minutt og 42 sekunder etter tenning. Brannfolk oppholder seg i rommet. Døren er lokket. Brannfolk melder om glødebrann i sofaen; ingen flammer er synlige.



Figur B - 36 Videobilde 6 minutt og 29 sekunder etter tenning. Gjentenning av midtputen og flammebrann er synlig.

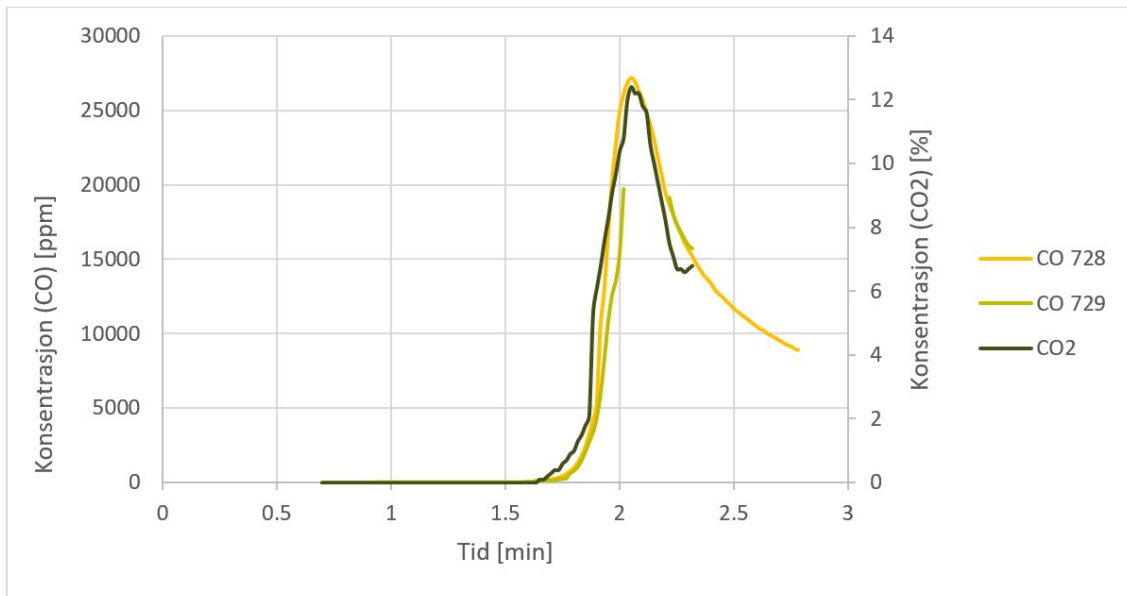


Figur B - 37 Videobilde 6 minutt og 59 sekunder etter tenning. Brannen har tatt seg opp og blir slokket direkte med strålerør.

Vedlegg C: Gassmålinger

Gassmålingene ble ikke korrekt synkronisert med loggesystemet. Tidsaksen av gassmålingene i dette kapittel er derfor basert på temperaturmålingene ved gassmålepunktet. Tiden for gassmålingene ble modifisert, slik at maks gasskonsentrasjon samsvarer med maks temperatur.

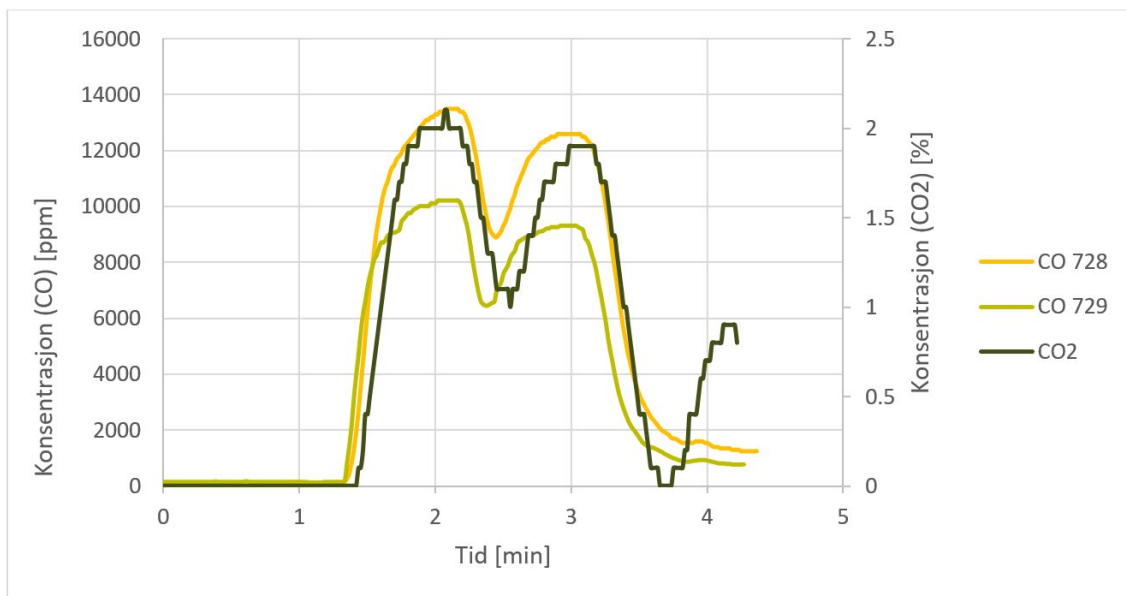
C1 Pretest (F1)



Figur C - 1 CO og CO₂ målinger for forsøk F1.

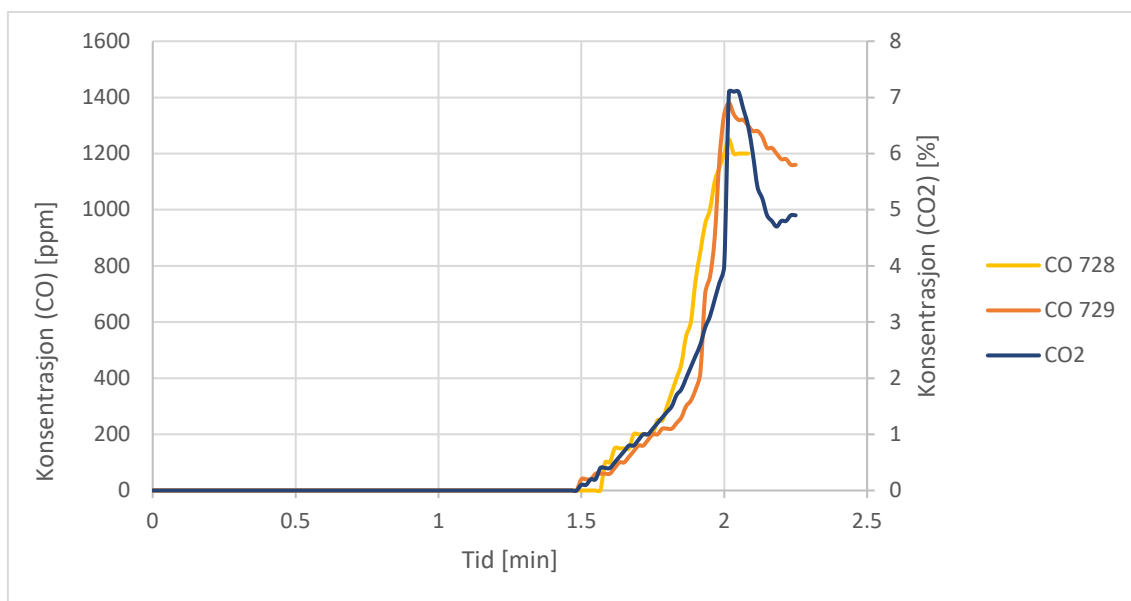
Måler 729 går i metning på 20000 ppm og mangler derfor data i 10 sekunder.

C2 Hovedforsøksserie

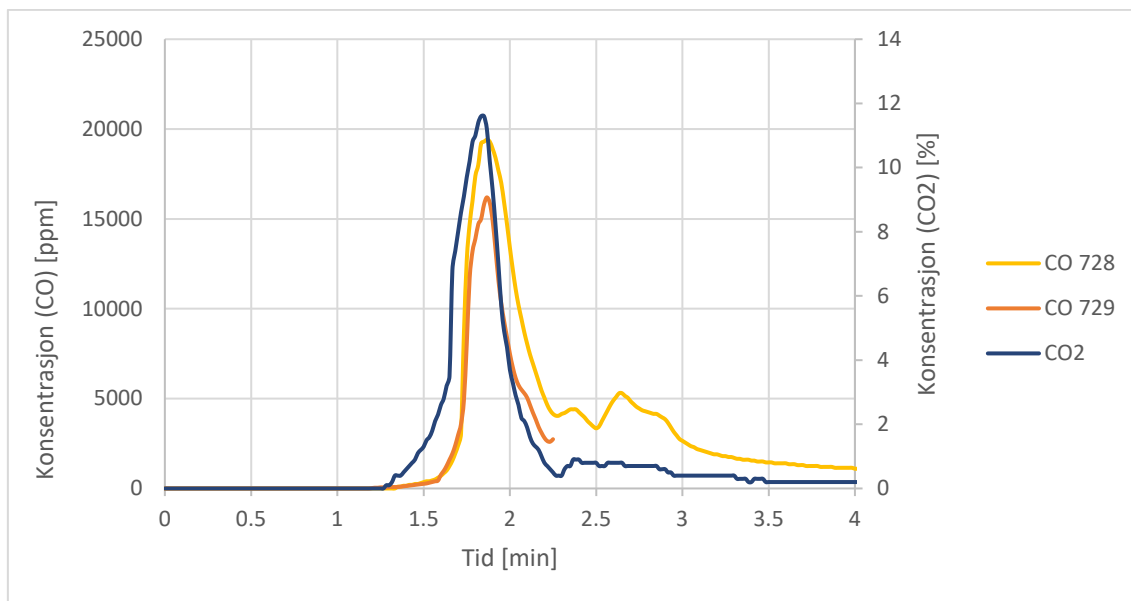


Figur C - 2 CO og CO₂ målinger for forsøk F2. F2 – Skjærslokker og vann

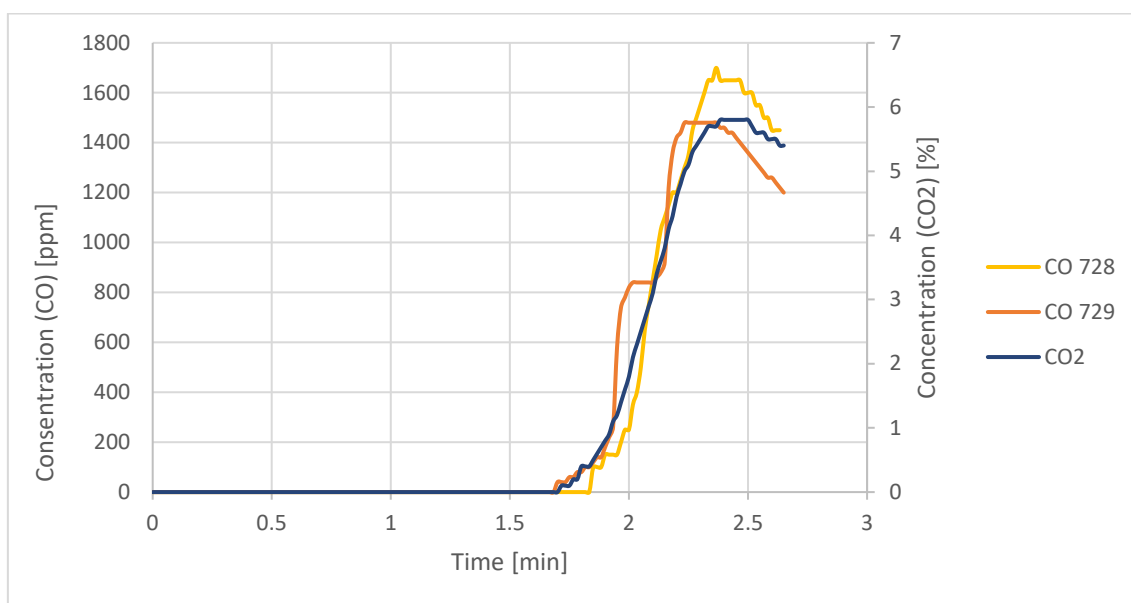
I forsøk F2 ble gassmåling ved en feil også gjennomført under slokking. Målingene i Figur C - 2., viser tydelig svingning i målte gassnivåer når utvendig slokkeinnsats settes inn. Dette kunne også bli brukt til å vurdere slokkeinnsatsene, men siden det bare er forsøk F2 og F5 som har målt gasskonsentrasjoner gjennom hele slokkeinnsatsen, er ikke grunnlaget for en slik vurdering godt nok.



Figur C - 3 CO og CO₂ målinger for F3 – Strålerør og vann.

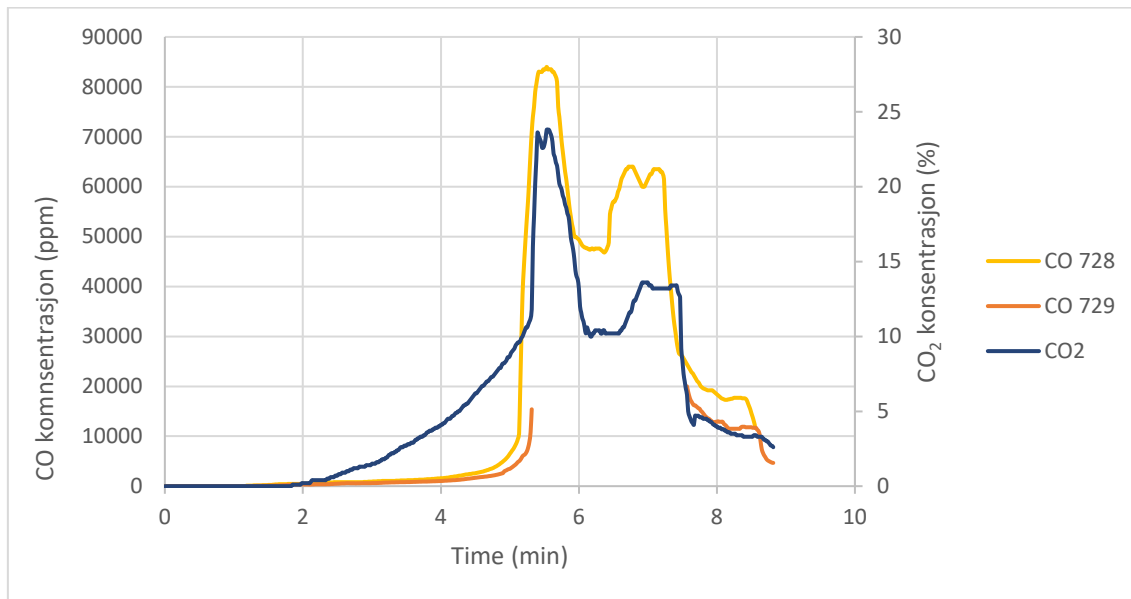


Figur C - 4 CO og CO₂ målinger for F4 - Strålerør og skum.



Figur C - 5 CO og CO₂ målinger for F6 - Sløkkespyd og vann.

C3 Ekte møbler



Figur C - 6 CO og CO₂ målinger for forsøk F5. Målingene er synkronisert med gassmålingspunktets temperatur.

Forsøk F5, Figur C - 6, med ekte møbler produserte den høyeste konsentrasjonen av CO og CO₂ av alle forsøk. Som i forsøk F2 er det her målt tilstrekkelig lenge slik at en økning i gasskonsentrasjon, etter utvendig slukkeinnsats, kan observeres. Instrument 729 går i metning på dette forsøket og mangler derfor datapunkter i 2 minutter og 14 sekunder. Møblene ble behandlet med flammehemmende stoffer før forsøket. Det standardiserte brenselet («møblene») brukt i de andre forsøkene inneholder ikke flammehemmende stoffer. Både innhold av flammehemmer, materialsammensetning, mengde materialer og oppbygging av møblene kan antas å påvirke brannforløpet i dette forsøket, sammenlignet med de andre forsøkene i denne studien. Her tok det lengre tid for at brannen utviklet seg, som kan ha sammenheng med anteneligheten fra de ekte møblene med flammehemmer, og/eller de andre nevnte faktorene. Dataene fra forsøket viser at det tok lengre tid å utvikle temperaturer, partikler og gasser, men det ble målt betydelig mer partikler og gasser enn ved de andre forsøkene med standardisert brensel, helt opp mot fire ganger høyere CO nivå og dobbelt så høyt CO₂ nivå.

RISE – Research Institutes of Sweden
ri.se / info@ri.se / risefr.no / post@risefr.no / (+47) 464 18 000
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM

RISE Fire Research AS
RISE Rapport: 2021:73
ISBN: 978-91-89385-63-4

