



**RISE**

**DEL 2: TEKNISK RAPPORT**

# **EBOB – Solcelleinstallasjoner på bygg**

**Eksperimentell studie av brannspreiing i holrom bak solcellemodular på skrå takflater**

RISE RAPPORT 2022:83

Reidar Stølen

Janne Siren Fjærestad

Ragni Fjellgaard Mikalsen

EBOB – Solcelleinstallasjonar på bygg.  
Eksperimentell studie av brannspreiing i  
holrom bak solcellemodular på skrå  
takflater.

Reidar Stølen, Janne Siren Fjærestad, Ragni Fjellgaard  
Mikalsen

## Abstract

### **EBOB - Solar cell installations on buildings. Experimental study of fire spread in cavity behind solar cell modules on pitched roof surfaces.**

This report describes a total of 29 experiments where the fire spread in the cavity behind solar cell modules on pitched roof surfaces were studied. The experiments were performed at RISE Fire Research's laboratory in Trondheim in 2021.

The series of experiments was carried out to investigate how a fire on a pitched roof surface will be affected by the presence of solar cell modules installed parallel to the roof surface. Simulated steel solar cell modules were used for all experiments. In a small-scale experimental setup, it was studied how different distances (6, 9, 12 and 15 cm) between the simulated solar cell module and the roof surface affect the fire spread at two different wind speeds (2 and 4 m/s). In a medium-scale experimental setup, it was studied how the fire spread was affected by the size of the initial fire. Finally, in a large-scale experimental setup, it was studied how the fire spread occurs on a roof surface with dimensions in the same order of magnitude as for a roof on a small house.

The results show that solar cell modules mounted parallel to the roof surface on pitched roofs can affect the fire dynamics of a fire on the roof surface.

The findings from the experiments indicate that there is a correlation between the distance from the roof surface to the solar cell module and how large initial fire is needed for the fire to spread. In the small-scale experiments with a small initial fire, it was not found that the simulated solar cell module affected the extent of damage when the distance between the module and the roof surface was greater than 9 cm. For experiments performed in an intermediate-scale setup, it was found that with a larger initial fire, the fire could spread even when there was 12 cm between the roof surface and the simulated solar cell module.

The two large-scale experiments also showed fire spread under the simulated solar cell modules with a UL crib (a standardized fire source) used as the initial fire. The extent of the damaged area on the roof surface was similar for the two experiments, even though the wind direction was different. In both experiments, the fire spread below two rows of simulated solar modules and all the way to the ridge.

The heat transfer inwards in the roof construction were greater in the experiments with a simulated solar cell module present than without. It increases with a reduced distance between the roof surface and the simulated solar cell module. Directly below the initial fire, no substantially increased thermal stress was observed on the underlying structure when a simulated solar cell module was installed. The thermal stress, on the other hand, increased to a greater extent because of the fire on the roof surface becoming more extensive when the simulated solar cell module was installed. There was a relatively low temperature increase measured under the chipboard behind the roof covering, which indicates that there was no immediate danger of fire spreading inwards into the roof structure directly through the 22 mm thick chipboard.

Key words: BAPV, PV, PV module, PV installation, PV panel, PV system, Photovoltaics

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2022:83

ISBN: 978-91-89711-23-5

Prosjektnummer: 20569-4

Kvalitetssikring: Anne Steen-Hansen

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

Forsidebilde: Brann under simulerte solcellemodular i mellomskala forsøk, foto: RISE Fire Research AS.

Trondheim 2022

# Innhold

<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Innhold</b> .....	<b>4</b>
<b>Forord</b> .....	<b>5</b>
<b>Samandrag</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>7</b>
1.1 Bakgrunn	7
1.2 Målsetjing og forskings spørsmål	8
1.3 Avgrensingar	8
<b>2 Material og metode</b> .....	<b>8</b>
2.1 Material	9
2.2 Småskala forsøk	9
2.3 Mellomskala forsøk	12
2.4 Storskala forsøk	15
<b>3 Resultat</b> .....	<b>18</b>
3.1 Småskala forsøk	18
3.2 Mellomskala forsøk	22
3.3 Storskala forsøk	25
3.3.1 Observasjonar	25
3.3.2 Temperaturmålingar	28
3.3.3 Skadeomfang	30
<b>4 Diskusjon</b> .....	<b>33</b>
4.1 Småskala forsøk	33
4.2 Mellomskala forsøk	35
4.3 Storskala forsøk	36
<b>5 Konklusjonar</b> .....	<b>37</b>
<b>6 Referansar</b> .....	<b>39</b>

## Forord

RISE Fire Research har dei siste åra gjennomført fleire studiar på energieffektive bygg og brannsikkerheit (kortform EBOB), her under brannsikkerheit i solcelleinstallasjonar. Dette prosjektet er finansiert av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Direktoratet for byggkvalitet (DiBK), og er utført som ein del av prosjektporteføljen under forskningsavtalen mellom DSB og RISE Fire Research. Prosjektet har også motteke finansiering frå prosjekt 4-4 i Fire Research and Innovation Centre (FRIC). FRIC er finansiert av alle partnarane samt Norges Forskningsråd (program BRANNSIKKERHET, prosjektnummer 294649).

Vi vil gjerne takka representantar frå solcellebransjen, brannvesen, myndigheter og forskningsinstitutt som har bidrege med viktige innspel til prosjektet. Ei særskilt takk til Peter Kovacs i RISE Samhøllsbyggnad og til prof. Grunde Jomaas og PhD-kandidat Jens Kristensen ved University of Edinburgh for god dialog og samarbeid undervegs i prosjektet. Takk til Vidar Stenstad for bidrag og innspill i slutføringen av prosjektet.

Takk til masterstudentane Tobias Rød og Joacim Skogseide som har vore tilknytt prosjektet frå Høgskulen på Vestlandet, fakultet for ingeniør- og naturvitenskap, institutt for sikkerheit, kjemi- og bioingeniørfag, master of science i brannsikkerheit.

Denne studien består av to delar. Denne tekniske rapporten (RISE rapport 2022:83) inneheld utfyllande detaljar frå dei utførde forsøka i små til stor skala. Heile studien er samanfatta i ein eigen hovudrapport (RISE rapport 2022:82).

Ragni Fjellgaard Mikalsen, prosjektleiar

Trondheim, mai 2022

## Samandrag

Denne rapporten beskriv til saman 29 forsøk med brannspreiing i holrommet bak solcellemodular på skrå takflater. Forsøka er utført ved RISE Fire Researchs laboratorium i Trondheim i løpet av 2021.

Forsøksserien vart utført for å undersøka korleis eit brannforløp på ei skrå takoverflate vil bli påverka av at det er montert solcellemodular parallelt med takoverflata. Det vart nytta simulerte solcellemodular av stål for alle forsøka. I eit småskala forsøksoppsett vart det studert korleis ulike avstandar (6, 9, 12 og 15 cm), mellom den simulerte solcellemodulen og takoverflata påverkar brannforløpet ved to ulike vindhastigheitar (2 og 4 m/s). I eit mellomskala forsøksoppsett vart det studert korleis brannspreiinga vert påverka av storleiken på startbrannen. Til slutt vart det i eit storskala forsøksoppsett studert korleis brannen spreier seg på ei takoverflate med dimensjonar i same storleiksorden som for eit hustak på eit småhus.

Resultata viser at solcellemodular montert parallelt med takoverflata på skråtak kan påverka brannodynamikken i ein brann på takoverflata.

Funna i dei utførte forsøka tyder på at det er ein samanheng mellom kor stor avstand det er mellom takoverflata og solcellemodulen og kor stor brann det trengs for at brannen skal spreie seg. I dei utførte småskala forsøka med liten startbrann vart det ikkje funne at den simulerte solcellemodulen påverka skadeomfanget når avstanden mellom denne og takoverflata var større enn 9 cm. For forsøka utførte i eit mellomskala oppsett vart det funne at med ein større startbrann kunne brannen spreie seg også når det var 12 cm mellom takoverflata og den simulerte solcellemodulen.

Dei to storskala forsøka viste også brannspreiing under dei simulerte solcellemodulane med UL-krybba (ei standardisert brannkjelde) som startbrann. Utstrekninga av skadane på takbelegget var i stor grad lik for dei to forsøka, sjølv om vindretninga var ulik. I begge forsøka spreidde brannen seg opp under to rader med simulerte solcellemodular og heilt til mønet.

Varmeoverføringa innover i takkonstruksjonen var større i forsøka med simulert solcellemodul enn utan. Denne auka med redusert avstand mellom takoverflata og den simulerte solcellemodulen. Direkte under startbrannen vart det ikkje observert nokon vesentleg større varmepåkjenning på den underliggjande konstruksjonen når det var montert ein simulert solcellemodul. Denne varmepåkjenninga fekk derimot større utstrekning som følgje av at brannen på takoverflata fekk større utstrekning når den simulerte solcellemodulen var montert. Det var ei forholdsvis låg temperaturauke målt under sponplata bak takbelegget, som tilseier at det ikkje var noko umiddelbar fare for brannspreiing innover i takkonstruksjonen direkte gjennom den 22 mm tjukke sponplata.

# 1 Introduksjon

Denne rapporten inneheld resultat og konklusjonar basert på tre forsøksseriar med brann i holrommet mellom eit skrått tak med takbelegg og stålplater som skal simulere utanpåmonterte solcellemodular.

## 1.1 Bakgrunn

Ein brann på ei takoverflate kan bli påverka av om det er montert solcellemodular over taket eller ikkje. Ein vesentleg del av dette skuldast at solcellemodulen held varmen frå flammen nærare takoverflata enn om flammen og varmen kunne stige uhindra til værs.

Desse effektane er studert i detalj av Kristensen et.al. for flate tak med flate og skråstilte solcellemodular. Her er det dokumentert at varmestrålinga mot takoverflata aukar, og flammespreiinga blir større utover takoverflata, når det blir montert solcellemodular eller andre plater over takoverflata [1–3].

Ju et.al. [4] og Tang et.al. [5] har også studert korleis varmestrålinga mot takoverflata på flate tak blir påverka av ein solcellemodul. Dei viste at varmestrålinga blir høgare mot overflata ved lågare avstand mellom takoverflata og solcellemodulen. Forsøka deira viste også at varmestrålinga blir størst på den sida av brannen der avstanden mellom solcellemodulen og taket er størst, på grunn av at flammen i størst grad blir leia i den retninga. Dette vil truleg også vera relevant for solceller montert parallelt med skrå takoverflater.

Det er ikkje funne publiserte studiar som har undersøkt dette fenomenet på skrå tak, utanom nokre forsøk som vart gjennomført i testoppsettet for flygebranntesting av takbelegg etter testmetode 2 i CEN/TS 1187:2012 i samband med ei masteroppgåve [6]. Det vart gjennomført forsøk med ei ubrennbar plate, som skulle simulere ein solcellemodul, montert 12,5 cm over takbelegget. Resultata frå forsøka indikerte at dette førte til større lengde på det brannskadde området enn med tilsvarende test gjennomført utan denne plata montert over takoverflata. Lengda på det skadde området i denne testen er utgangspunkt for klassifisering og preaksepterte ytingar for takteking i Noreg [7].

Det er interessant å undersøke i kor stor grad installering av solceller på skrå tak vil påverke kor stor utbreiing desse brannane får. Det er difor gjennomført ein meir utfyllande testserie basert på same prinsipp som vart brukt i den omtala masteroppgåva, for å få undersøkt kva for parametrar som påverkar flammespreiinga på takoverflater under solcellemodular. Prøvestykka i desse forsøka måler 400 mm x 1000 mm, og er relativt små samanlikna med ein typisk solcelleinstallasjon på eit hustak. Det er difor også gjennomført ein serie med storskala forsøk, der det vart bygd opp eit tak i stor skala basert på dei same materiala som vart brukt i forsøka i liten skala. Målet var å undersøke korleis ein brann kan utvikle og spreie seg på eit realistisk norsk skrått hustak med utanpåmonterte solcellemodular.



## 1.2 Målsetjing og forskingsspørsmål

Målsetjinga med desse to forsøksseriane er å undersøke korleis utanpåmonterte solcellemodular kan påverka brannutviklinga på eit typisk norsk skrått hustak. Dette er formulert i forskingsspørsmål 1 og 2 under.

### Forskingsspørsmål 1:

Korleis påverkar vindhastigheit og spaltestorleikar brannutviklinga i holrommet mellom solcellemodul og underliggjande takkonstruksjon, og korleis påverkar dette skadeomfanget på underliggjande takkonstruksjon.

- **Delspørsmål 1-1:** Finns det ei kritisk nedre grense for luftspaltestorleik og ei kritisk øvre grense for vindhastigheit, der skadeomfanget blir uproporsjonalt større?

### Forskingsspørsmål 2:

Korleis påverkar solcellemodular brann på eit realistisk, norsk, skråstilt hustak?

- **Delspørsmål 2-1:** Blir brannspreiinga langs taket raskare, og vil brannen ha høgare temperaturar?
- **Delspørsmål 2-2:** Blir brannpåkjenninga på taket og underliggjande konstruksjon verre?

## 1.3 Avgrensingar

Det er stor variasjon i korleis ulike takkonstruksjonar er bygd opp og kor brennbare desse er. Av dei vanlege typane takteking i Noreg er bitumenbasert takteking i form av shingel eller på rull vurdert til å vera mest brennbart. Teglstein, betongtakstein, skifertak og metallplater kan utan vidare testing vurderast til å tilfredsstillere krav for preakseptert yting i Noreg etter VTEK [7], medan andre takbelegg må testast for å kunne dokumentere dette kravet. I alle forsøka i denne testserien er det difor brukt ein type bitumenbasert takbelegg som er testa og klassifisert til å tilfredsstillere  $B_{ROOF}(t_2)$ . Dette takbelegget er testa og godkjent med sponplate som underlag, og dette er også brukt som underlag i våre forsøk.

Solcellemodular har ofte ein brennbar plastfilm på baksida. Denne vil kunne bidra til brannen i holrommet i tillegg til brannen i takoverflata. Kristensen et.al. brukte ei stålplate i staden for ein solcellemodul i forsøka [3]. For å isolere effekten av brannen i takbelegget, vart det også i våre forsøk brukt stålplater i staden for reelle solcellemodular.

## 2 Material og metode

For å undersøke korleis ein brann kan utvikle seg på eit skrått hustak med utanpåmonterte solceller, er det gjennomført småskala, mellomskala og storskala brannforsøk. Småskala forsøka vart utført med utgangspunkt i testoppsettet som blir brukt til å teste og godkjenne takoverflater for bruk i Noreg, CEN/TS 1187 [8], i mellomskala forsøka vart det brukt ein enkel simulert solcellemodul, og i storskala forsøka vart det brukt dimensjonar som er i same storleiksordning som taket på ein einestad og totalt 6 simulerte solcellemodular.

## 2.1 Material

Dei same materiala er brukt i takkonstruksjonen til alle forsøka i dette prosjektet. Valet av takoverflate fall på ein type takbelegg som er brennbart, og som har vore testa og godkjent med klassifiseringa  $B_{ROOF}(t2)$  gjennom fleire år. Dette er eit takbelegg med stamme av polyester som er impregnert og påført SBS-asfalt på begge sider. Belegget er testa og godkjent for bruk direkte på underlag av sponplater. Under takbelegget er det brukt 22 mm tjukke sponplater med ein massetettleik på  $670 \text{ kg/m}^3$ .

Dei simulerte solcellemodulane som er brukt i forsøka er laga av stålplater utan noko brennbart materiale. Reelle solcellemodular har ein polymerbasert membran på baksida. Forsøk med reelle solcellemodular har vist at denne membranen ikkje i vesentleg grad bidreg til auka brannspreiing. [9]. Fråvær av brennbart materiale på baksida av stålplatene er difor ikkje venta å påverka forsøka. I småskalaforsøka var stålplata som vart brukt 3 mm tjukk, medan i mellom- og storskalaforsøka var stålplata 2 mm tjukk.

## 2.2 Småskala forsøk

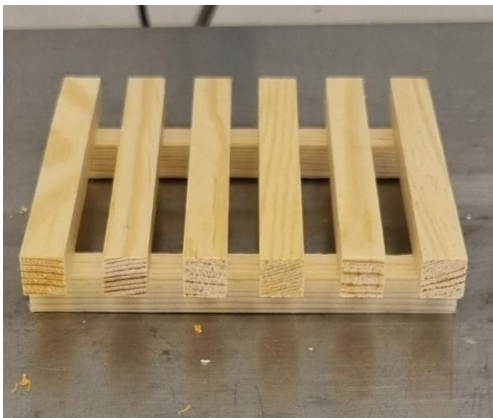
Småskala forsøka er gjort i testutrustninga for testing etter CEN/TS 1187, testmetode 2 [8]. Denne testutrustninga blir brukt til å teste ulike former for taktekking for å kvalifisere til klassifiseringa  $B_{ROOF}(t2)$  etter EN 13501-5 [10]. I dette testoppsettet blir ei brennande trekrybbe plassert på prøvestykket av takoverflata. Testar vert utførde med ein vindstyrke på 2 eller 4 m/s oppover langs taket. Vinkelen på taket er  $30^\circ$  og prøvestykket måler 400 mm x 1000 mm.

Forsøksoppsettet er vist i Figur 2-1, der ein kan sjå brannen i trekrybba som strekkjer seg oppover i mellomrommet mellom takoverflata og den simulerte solcellemodulen (3 mm stålplate). Til desse forsøka er sideveggen i luftekanalane skifta ut med glas for å kunne observere flammespreiinga undervegs i forsøket.

Trekrybba som er plassert på takoverflata er laga etter testmetode 2 i CEN/TS [8]. Den er sett saman av 8 pinnar av furu med dimensjonar 10 mm x 10 mm x 100 mm. 6 av desse er plassert liggande på tvers over dei 2 siste pinnane. Dette blir ei trekrybbe som måler 100 mm x 100 mm x 20 mm, sjå Figur 2-2. Krybbene blir tørka i varmeskap ved  $105^\circ\text{C}$  før forsøka, og veg omkring 40 g totalt. Krybbene blir tent over ein propanflamme før dei blir plassert på takbeleggoverflata i det forsøket startar. Vidare i denne rapporten vil desse krybbene bli referert til som EN-krybbe.



Figur 2-1: Forsøksoppsettet som er brukt til forsøka i liten skala. Dette er basert på utstyret som er skildra i CEN/TS 1187, testmetode 2 [8], med tillegg av ei stålplate som skal simulere ein solcellemodul plassert over takoverflata . Biletet er tatt under forsøk T1 med solcellemodulen plassert 12 cm over takoverflata, og med ein vindstyrke på 2 m/s.

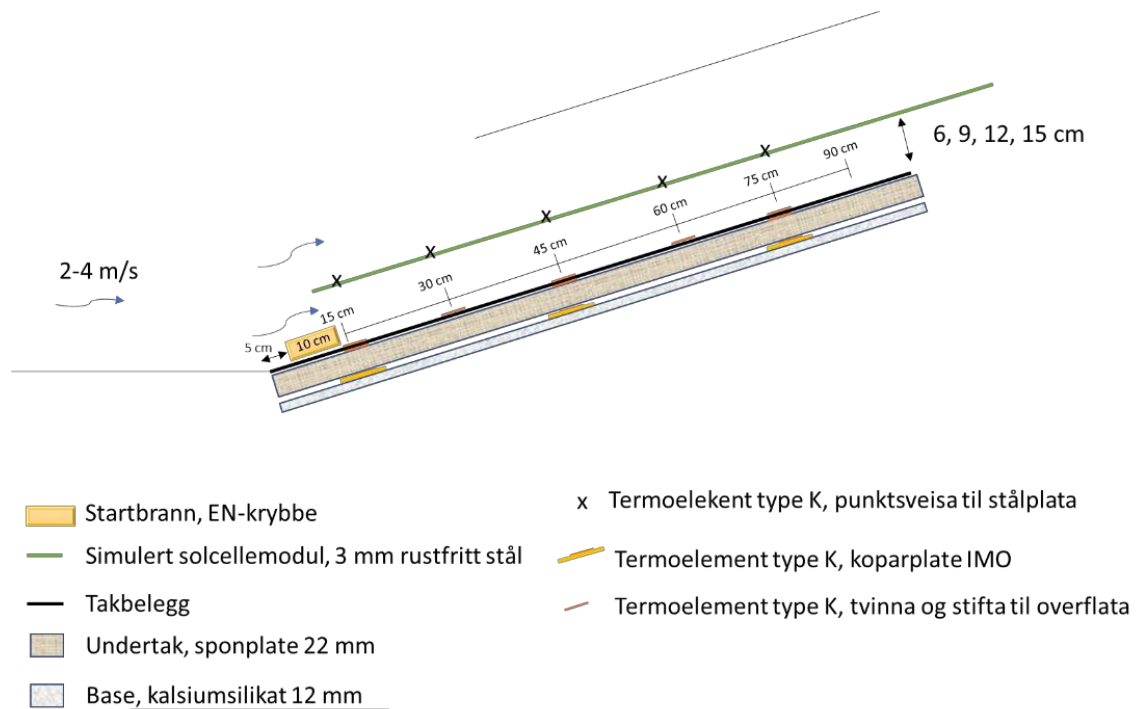


Figur 2-2: Viser EN-krybba nytta i småskalaforsøka.

Forsøksutrustninga vart instrumentert med termoelement for å kunne undersøke korleis varmen frå brannen spreidde seg oppover langs taket og innover i takkonstruksjonen. Det vart brukt termoelement type K som vart plassert i ulike posisjonar langs senterlinja av den simulerte solcellemodulen. Temperaturen vart målt i fleire sjikt i konstruksjonen ved kvar posisjon. I tillegg vart også termoelement punktsveisa til sjølve stålplata (solcellemodulen) i dei same posisjonane. Forsøksutrustninga er vist i Figur 2-3 (a) og ei skisse av instrumenteringa er vist i Figur 3-2 (b).



(a)



(b)

Figur 2-3 (a) Bilde av den simulerte solcellemodulen nytta i småskala forsøksoppsettet. Festebrakettane og termoelementa er montert på oversida av plata. (b) Instrumentering av forsøksoppsettet. Temperaturen vart målt med termoelement i fleire posisjonar langs senterlina av den simulerte solcellemodulen, på overflata av takbelegget, over sponplata og under sponplata.

Forsøka er gjennomført med solcellemodulen plassert 6 cm, 9 cm, 12 cm og 15 cm over takbelegget, i tillegg til to forsøk som er gjennomført utan solcellemodulen montert. Forsøka er gjennomført med både 2 m/s og 4 m/s vindshastigheit oppover langs takoverflata. Alt i alt er det gjennomført 21 forsøk i dette forsøksoppsettet med 2 eller 3 enkeltforsøk av kvart oppsett som vist i Tabell 2-1. For samanlikning er også testresultat frå til saman 12 tidlegare testar av det same takbelegget utan den simulerte solcellemodulen inkludert. Dette er testar utførde hjå RISE Fire Research AS for den aktuelle leverandøren.

Tabell 2-1: Det vart gjennomført 2 eller 3 enkeltforsøk av kvart oppsett med ulik avstand frå takoverflata til solcellemodulen, og med 2 og 4 m/s vindstyrke. Totalt er det gjennomført 21 forsøk.

Avstand frå takoverflate til solcellemodul	Vindstyrke 2 m/s	Vindstyrke 4 m/s
6 cm	2 forsøk	2 forsøk
9 cm	2 forsøk	2 forsøk
12 cm	2 forsøk	3 forsøk
15 cm	3 forsøk	3 forsøk
Utan solcellemodul	1 forsøk	1 forsøk

## 2.3 Mellomskala forsøk

Som innleiing til storskalaforsøka vart det gjennomført til saman 6 forsøk i mellomskala for å undersøke effekten av ulike storleikar av startbrann. I desse forsøka vart det undersøkt om brannens evne til å spreie seg vidare til og etablere seg i takbelegget var avhengig av størrelsen på startbrannen.

Takdimensjonen nytta i desse forsøka var 1,2 m x 2,4 m. Type takbelegg, underlag og takvinkel var likt som for småskala og storskala forsøka. Figur 2-4 viser forsøksoppsettet utan simulert solcellemodul, men med brannkrybbe i (a) og forsøksoppsettet med simulert solcellemodul i (b).

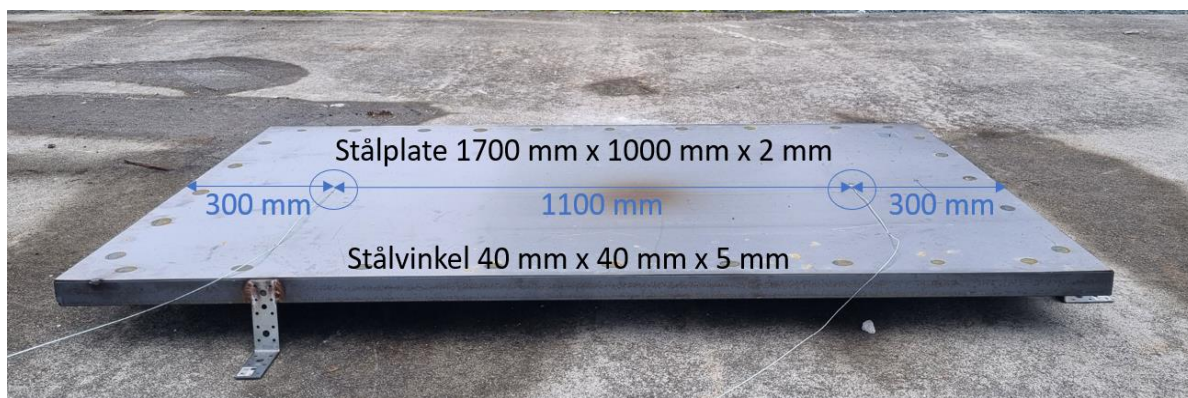
Den simulerte solcellemodulen vart laga av ei stålplate med dimensjonane 1700 mm x 1000 mm x 2 mm. For å stive av stålplata vart det sveisa på stålvinklar som ei ramme på undersida. Dimensjonane på desse var 40 mm x 40 mm x 5 mm. På desse stålvinklarna var det sveisa på 4 stk. 120 mm høge vinkelbrakettar i stål som vart brukt til å montere den simulerte solcellemodulen på takoverflata. Kvar simulert solcellemodul var instrumentert med 2 termoelement type K som var punktveisa på toppen av stålplata i senterlinja 300 mm frå kvar kortende av den simulerte solcellemodulen. Før forsøka vart dei simulerte solcellemodulane sota på baksida ved å plassere dei over eit tent dieselkar. Dette vart gjort for å auke emissiviteten og for at denne skulle vera mest mogeleg lik gjennom heile forsøket. Det vart totalt laga 6 slike simulerte solcellemodular til forsøka i mellomstor og stor skala. Ein av dei simulerte solcellemodulane er vist i Figur 2-5.



(a)

(b)

Figur 2-4 Mellomskalaforsøk vart utført for å undersøke effekten av ulike storleikar av startbrannar. Bilete (a) viser forsøk M3 med ei UL-krybbe som vart testa på takoverflata utan solcellemodul og bilete (b) viser forsøk M4 med solcellemodulen montert.

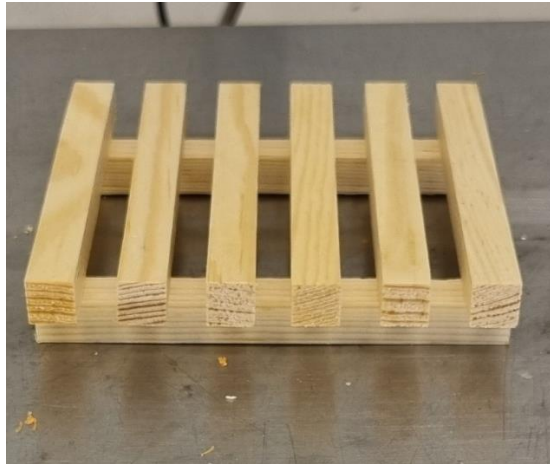


Figur 2-5: Dei simulerte solcellemodulane var laga av ei stålplate med mål 1700 mm x 1000 mm x 2 mm. Det var påmonterte vinkelprofilar rundt kanten med dimensjonar 40 mm x 40 mm x 5 mm. 300 mm frå kvar kortende vart det montert eit termoelement på overflata av stålplata. Modulane vart montert på takoverflata slik at avstanden mellom takoverflata og modulane var 12 cm.

Det vart gjennomført forsøk med fire ulike storleikar av startbrannen. Dei tre minste av desse startbrannane bestod av anten ei EN-krybbe, eller to og tre EN-krybber stabla oppå kvarandre. Til den største startbrannen vart det nytta ei større trekrybbe. Denne vart laga etter spesifikasjonane for den såkalla «Class B brand» i den amerikanske teststandarden for takbelegg UL 790 [11], og består av 18 bitar gran med dimensjonar 19,1 mm x 19,1 mm x 150

mm som er lagt på kvarandre i tre lag med det midtre laget vinkelrett på dei to andre. Denne krybba veg omkring 500 g. Vidare i rapporten vert denne omtala som UL-krybbe.

Krybbene vart tent med ein gassbrennar før dei vart plassert på takoverflata. Dei fire ulike storleikane av startbrannar er vist i Figur 2-6. Forsøksmatrisa med kombinasjonane av startbrannar, med og utan solcellemodul er vist i Tabell 2-2, og forsøksoppsettet som vart brukt i forsøk M3 med ei UL-krybbe utan solcellemodul er vist i Figur 2-4.



(a)



(b)



(c)



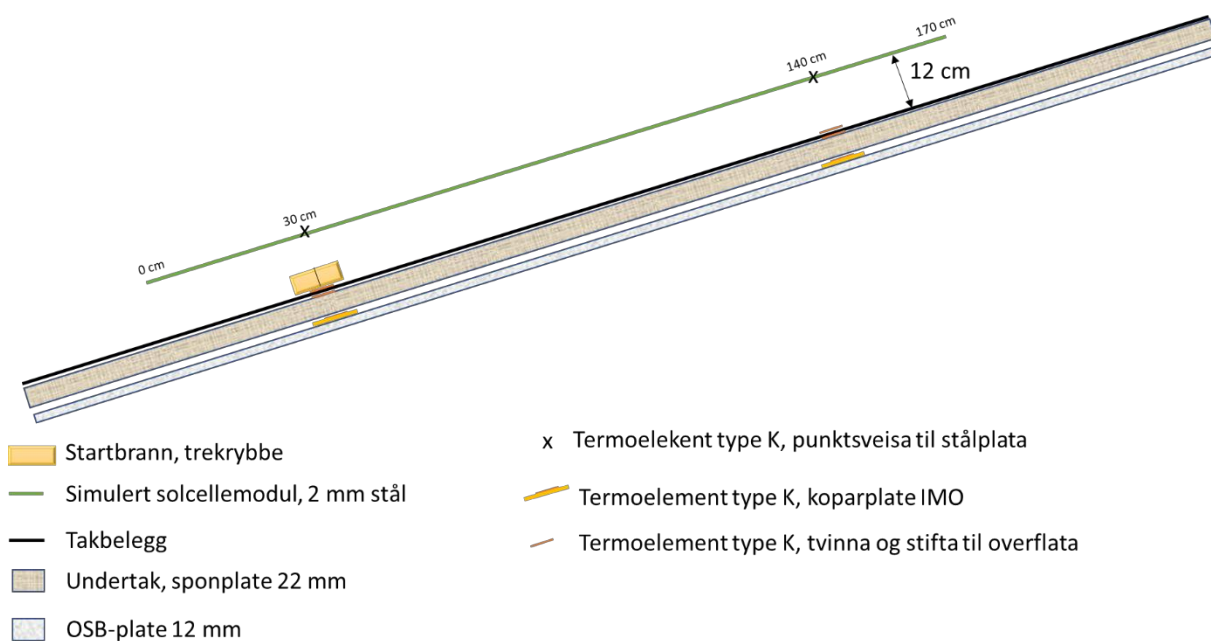
(d)

Figur 2-6 Dei fire ulike storleikane av startbrannar som vart brukt i mellomskalaforsøka. (a) ei EN-krybbe (frå test 2 i CEN/TS 1187), (b) to EN-krybber plassert oppå kvarandre, (c) tre EN-krybber plassert oppå kvarandre og (d) ei UL-krybbe (Class B brand frå UL 790).

Tabell 2-2 Forsøksmatrise for dei innleiande mellomskalaforsøka med ulike storleikar av startbrannar, med og utan simulert solcellemodul montert over takbelegget.

Forsøk ID	Startbrann	Simulert solcellemodul
M1	1 x EN-krybbe	Nei
M2	2 x EN-krybbe	Nei
M3	1 x UL-krybbe	Nei
M4	1 x UL-krybbe	Ja
M5	1 x EN-krybbe	Ja
M6	3 x EN-krybbe	Ja

Forsøksoppsettet i mellomskalaforsøka er vist i skissa i Figur 2-7. Termoelement vart plassert under sponplata, over sponplata og over takbelegget på to ulike posisjonar, i alt 6 termoelement.



Figur 2-7 Instrumentering av mellomskala forsøksoppsett. Temperaturen vart målt med i alt 6 termoelement. Det var plassert termoelement i to posisjonar langs senterlina av den simulerte solcellemodulen. I kvar posisjon var det plassert tre termoelement, eitt på overflata av takbelegget, eitt over sponplata og eitt under sponplata.

## 2.4 Storskala forsøk

For å undersøke om resultatata frå forsøka i småskala og mellomskala oppsetta var gyldige for reelle solcelleinstallasjonar på skråtak, vart det gjennomført ein serie med forsøk i eit



forsøksoppsett med dimensjonar i same storleiksorden som for eit hustak på eit småhus. Dette forsøksoppsettet vart laga for å undersøke korleis ein brann vil spreie seg i mellomrommet under fleire solcellemodular, og korleis den vil spreie seg vidare på takoverflata utanfor området som er dekkja av modular.

I desse forsøka vart det brukt dei same materiala som i småskalaforsøka med takbelegg over sponplate og simulerte solcellemodular av stål. Takoverflata var 4,2 m brei og 5,4 m lang og hadde ein takvinkel på 30°.

Det var montert 6 simulerte solcellemodular på taket 12 cm over takoverflata med 4 cm mellomrom mellom kvar solcellemodul. Forsøksoppsettet er vist i Figur 2-8.



Figur 2-8: Storskala forsøksoppsett med takflate 4,2 m bredde x 5,4 m lengde og 30° takvinkel. 6 simulerte solcellemodular i stål er montert 12 cm over takoverflata. Startbrannen var plassert 0,3 m inn under midten av solcellemodulen nedst i midten, som markert på bildet.

Det vart gjennomført to enkeltforsøk med dette oppsettet, som vidare blir kalla F1 og F2. For begge forsøka vart det nytta ei UL-krybbe som startbrann- I forsøk F2 vart det gjort to endringar på forsøksoppsettet med utgangspunkt i observasjonar frå forsøk F1:

1. Det vart montert takrenne i nedkant av takflata for å samle opp smelta takbelegg.
2. Takoverflata vart utvida 1 m oppover i eit 1,3 m breitt felt på midten for å observere kor langt oppover frå toppen av solcellemodulane brannen spreidde seg.

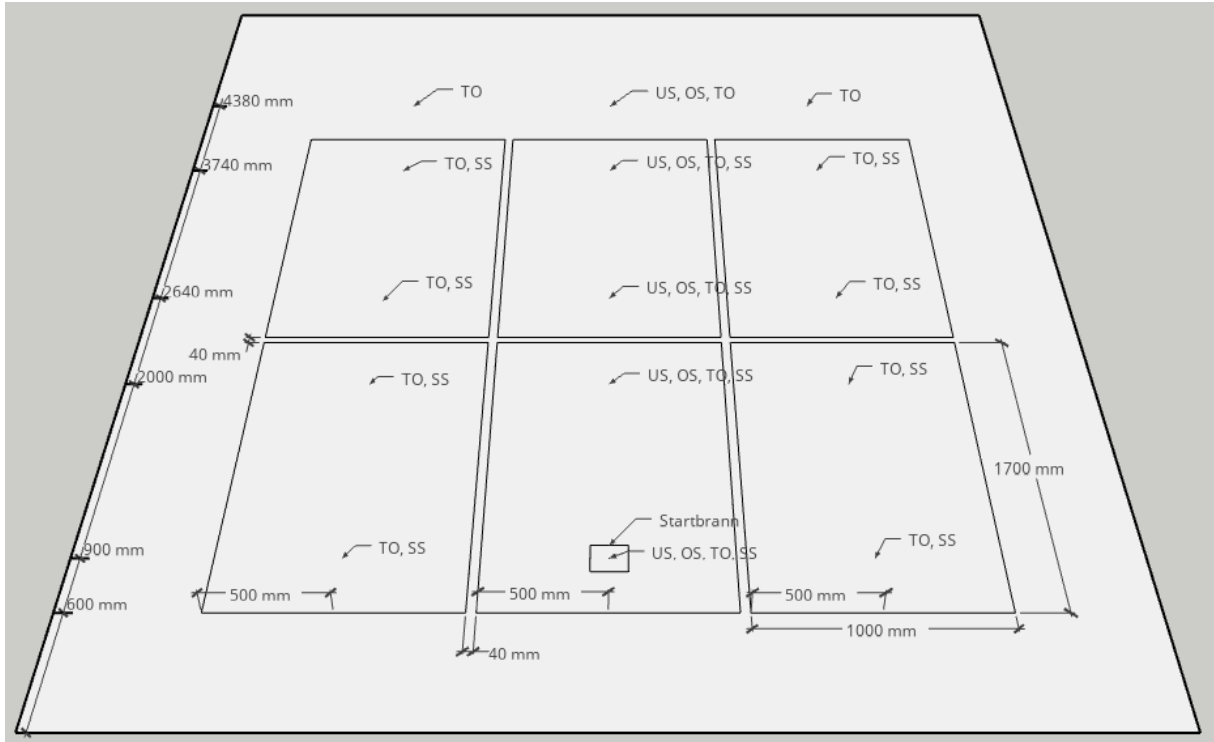
Desse to endringane er merka med raude firkantar i Figur 2-9.



Figur 2-9 To endringar vart gjort i oppsettet av forsøket F2 i stor skala i forhold til forsøk F1. Taket vart utvida 1 m oppover i ei breidde på 1,3 m på midten av taket, og det vart montert ei takrenne under nedre kant av taket for å samle opp smelta takbelegg. Desse endringane er markert med raude firkantar på bildet.

Forsøksoppsettet for forsøk i stor skala vart instrumentert med termoelement type K i tre aksar oppover taket langs senterlina av dei simulerte solcellemodulane. I dei ulike posisjonane vart det montert målepunkt under sponplata, over sponplata, på overflata av takbelegget og på overflata av dei simulerte solcellemodulane i stål. Plassering av dei ulike målepunkta og kva for nivå som var inkludert i kvart punkt er vist i Figur 2-10. Startbrannen vart plassert på overflata av takbelegget under solcellemodulen nedst i midten, og er illustrert med ein firkant i Figur 2-10.

Vindmåling vart gjort med ein ultralydmålar frå Netatmo som var plassert 0,6 m over bakken 5 m framfor nedre kant av taket.



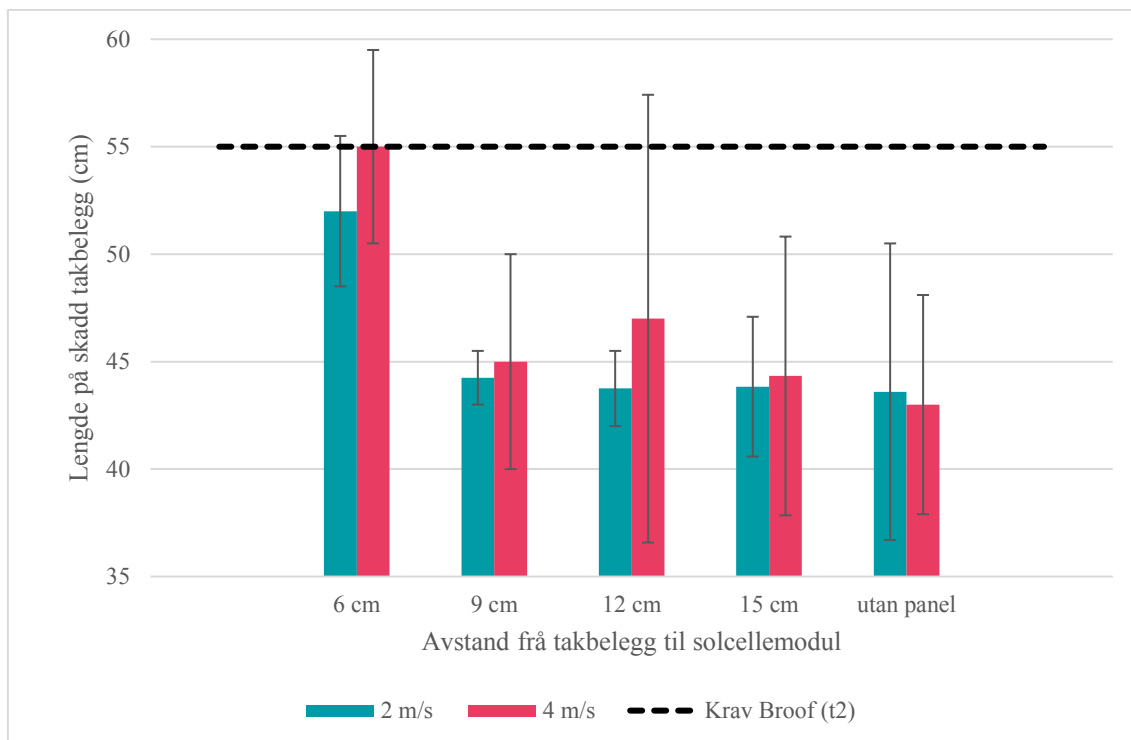
Figur 2-10 Instrumentering av storkalaforsøk. Posisjonane på figuren er merka med bokstavkodar for kva for nivå det er montert termoelement. US – under sponplate, OS – over sponplate, TO – takoverflate, SS – solcellemodul i stål.

## 3 Resultat

### 3.1 Småskala forsøk

Lengda av det skada området på takbelegget vart registrert etter forsøka. Gjennomsnittleg skadelengd for dei ulike oppsetta er saman med standardavviket vist i Figur 3-1. Utan simulert solcellemodul er det i denne forsøksserien berre utført eitt forsøk med kvar vindhastigheit. Data frå 12 tilsvarende testar utan simulert solcellemodul som tidlegare er utførde hjå RISE Fire Research med same type takbelegg og underlag er inkluderte i figuren.

Den svarte stipla linja viser kravet til klassifisering for  $B_{ROOF}(t_2)$ , som er skadelengd  $\leq 55,0$  cm for gjennomsnittet av tre testar. Det er også krav om at ingen av testane skal ha skadelengd  $> 80,0$  cm [10].



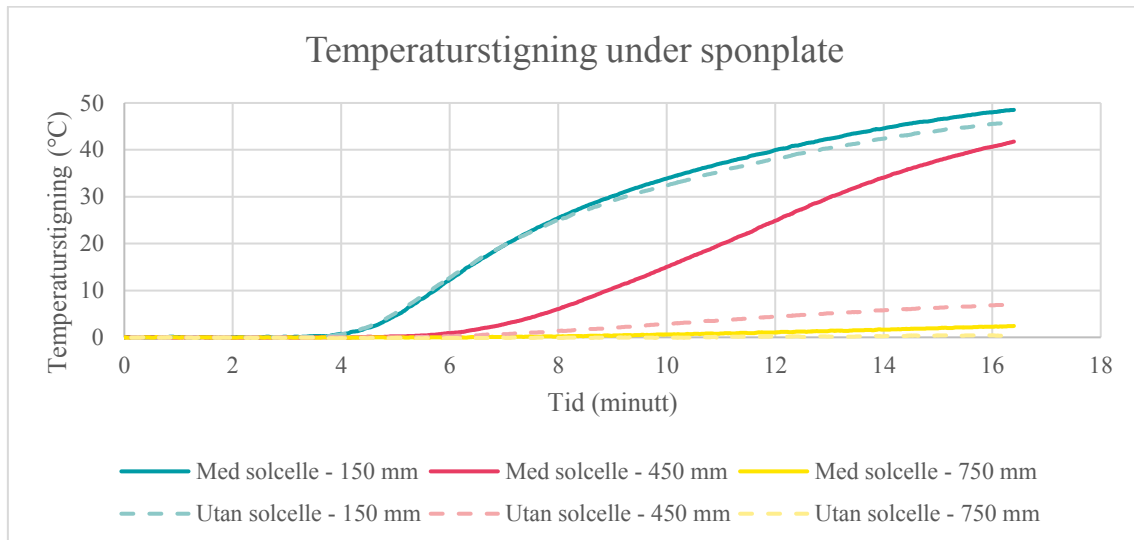
Figur 3-1 Lengde på det skadde området av takbelegget etter forsøka for ulike avstandar mellom takbelegg og solcellemodul ved to ulike vindstyrkar. Den svarte stipla linja viser kravet til klassifisering for  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$ , som er  $\leq 55,0$  cm for gjennomsnittet av [10].

Frå Figur 3-1 ser ein at forsøka der den simulerte solcellemodulen var montert 6 cm over takoverflata skil seg ut frå dei andre forsøka med der det var større avstand mellom simulert solcellemodul og tak eller ingen simulerte solcellemodul i det heile. Lengda på det skada takbelegget var lenger når solcellemodulen var montert så nærme som 6 cm i frå takoverflata enn for dei andre oppsetta.

For alle oppsetta er den gjennomsnittlege skadelengda  $\leq 55,0$  cm og den maksimale skadelengda  $\leq 80,0$  cm som er krava til  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$ . Her må ein likevel merke seg at det for oppsetta med avstand 6 cm og 9 cm berre er utført to repetisjonar ved kvar vindstyrke, mot tre i kravet til klassifiseringstesten. Dette gjeld også for 12 cm avstand med 2 m/s vindhastigheit.

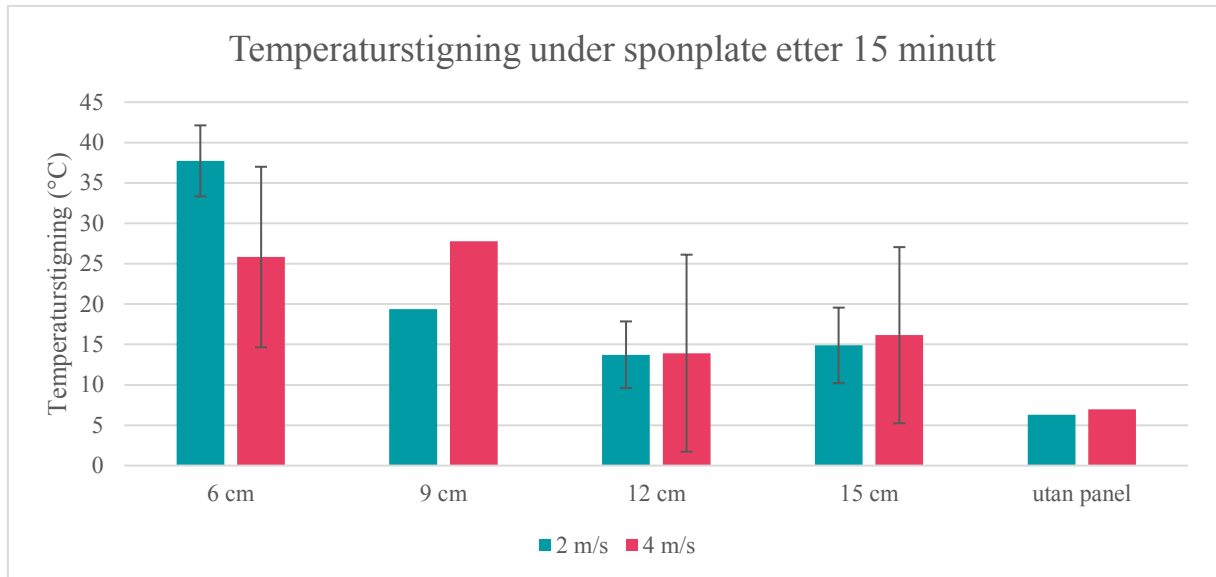
Temperaturen vart målt i fleire sjikt i konstruksjonen i ulike posisjonar oppover langs senterlinja av solcellemodulen undervegs i forsøka. Figur 3-2 viser korleis temperaturen utvikla seg over tid under sponplata for forsøka med 6 cm mellom solcellemodulen og takoverflata og ei vindhastigheit på 2 m/s. Det var utført to forsøk med dette oppsettet og dei heiltrekte linjene viser gjennomsnittleg temperaturauke for desse to forsøka i ulike posisjonar. Grøn, raud og gul linjer viser temperaturutviklinga høvesvis 15 cm, 45 cm og 75 cm frå den nedre kanten av taket. Dei stipla linjene viser temperaturutviklinga for eit forsøk med same vindhastigheit men utan solcellemodul. Ein ser ein at temperaturstigninga 15 cm frå kanten av taket er omtrent lik i forsøka med og utan solcellemodulen montert. Dette punktet er rett i overkant av trekrybba som vist i Figur 2-7. 45 cm frå kanten av taket ser ein derimot ei betydeleg større temperaturstigning i forsøka med solcellemodul enn i forsøket utan. Temperaturstigninga var her over 40 °C med

solcellemodulen montert medan den var under 10 °C utan solcellemodul. 75 cm frå kanten av taket er det svært liten temperaturstigning både med og utan solcellemodul.



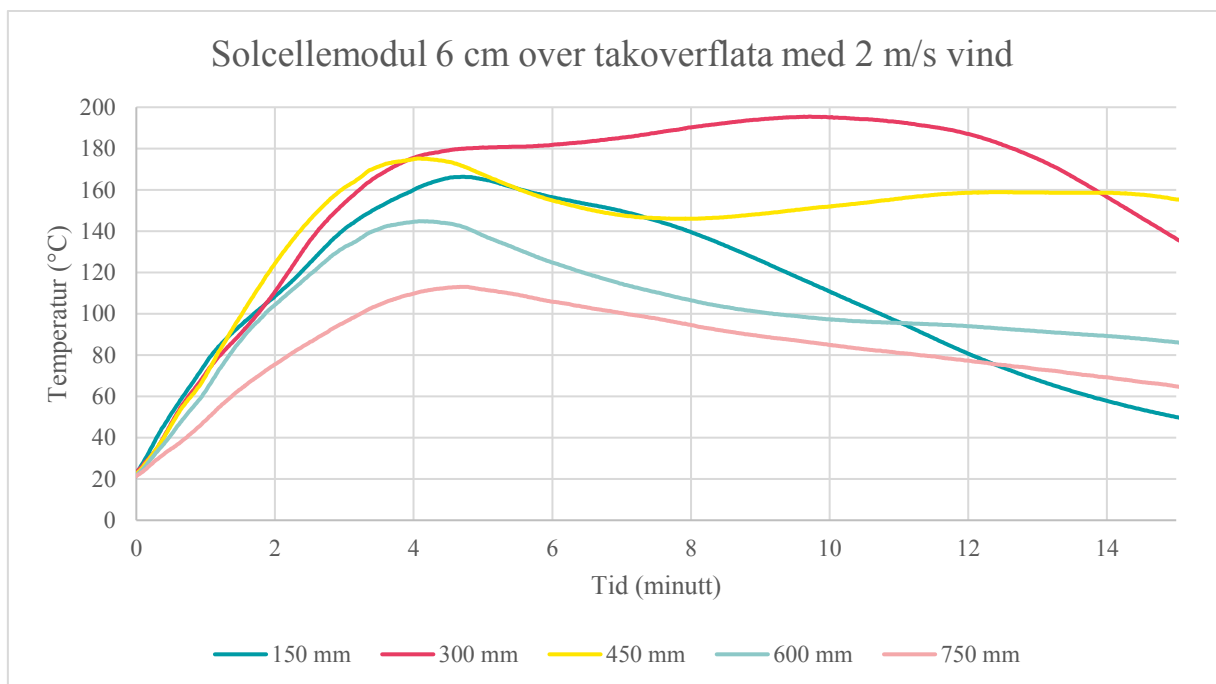
Figur 3-2 Temperaturstigninga målt under sponplata for eit forsøk gjennomført utan montert solcellemodul (stipla linjer) og to forsøk med ein simulert solcellemodul montert 6 cm over takoverflata heiltrekte linjer). Temperaturstigninga som er vist med solcellemodul montert er eit gjennomsnitt av to forsøk.

I dei andre forsøka var det også ved 45 cm det var størst skilnad på temperaturstigninga under sponplata med og utan simulerte solcellemodular. Denne temperaturstigninga er vist for alle forsøk som varte i minst 15 minutt i Figur 3-3. Ein ser at når det er montert solcellemodul på taket stig temperaturen innover i takkonstruksjonen i eit område over brannen, og at temperaturen stig meir når avstanden mellom takoverflata og den simulerte solcellemodulen vert redusert. For ein avstand på 6 cm mellom simulert solcellemodul og tak var temperaturauka størst med 2 m/s vind, og med ein avstand på 9 cm var temperaturauka størst med 4 m/s vind. For større avstandar og utan simulert solcellemodul påverka ikkje vindhastigheita temperaturauka under sponplata.



Figur 3-3 Temperaturstigninga under sponplata 45 cm frå kanten av takoverflata etter 15 minutt. Standardavvik er inkludert for dei seriane der det er fleire enn eitt forsøk. Forsøk som vart avslutta før 15 minutt er ikkje med i datasettet.

Temperaturen vart også målt i stålet på den simulerte solcellemodulen. Der var temperaturen høgast i forsøka der modulen var montert 6 cm over takoverflata og det var 2 m/s vind. Gjennomsnittleg temperatur for dei to forsøka som vart gjennomført med denne kombinasjonen er vist i Figur 3-4. Den høgaste temperaturen som vart oppnådd var like under 200 °C.



Figur 3-4 Temperatur i den simulerte solcellemodulen som var montert 6 cm over takoverflata. Temperaturane er gjennomsnitt av to forsøk med 2 m/s vind.

## 3.2 Mellomskala forsøk

Det vart utført i alt 6 forsøk med mellomskala oppsettet. Den simulerte solcellemodulen var montert 12 cm over takoverflata i alle desse forsøka. Lengde og breidde på det skada området av takbelegget er vist i Tabell 3-1. Av desse forsøka var det berre i forsøk M4 med UL-krybbe og simulert solcellemodul brannen spreidde seg til den øvre kanten av taket.

Tabell 3-1 Lengda av det skadde området frå forsøka i mellomskala. Lengda er målt frå midten av trekrybba. Breidda av det skadde området er målt der skadeområdet var breiast.

Forsøk nummer	Startbrann	Solcellemodul	Lengde skadd område	Breidde skadd område
M1	1 x EN-krybbe	Nei	12 cm	12 cm
M2	2 x EN-krybbe	Nei	12 cm	16 cm
M3	1 x UL-krybbe	Nei	38 cm	26 cm
M4	1 x UL-krybbe	Ja	>140 cm <sup>1)</sup>	Ca 80 cm <sup>1)</sup>
M5	1 x EN-krybbe	Ja	15 cm	12 cm
M6	3 x EN-krybbe	Ja	70 cm	17 cm

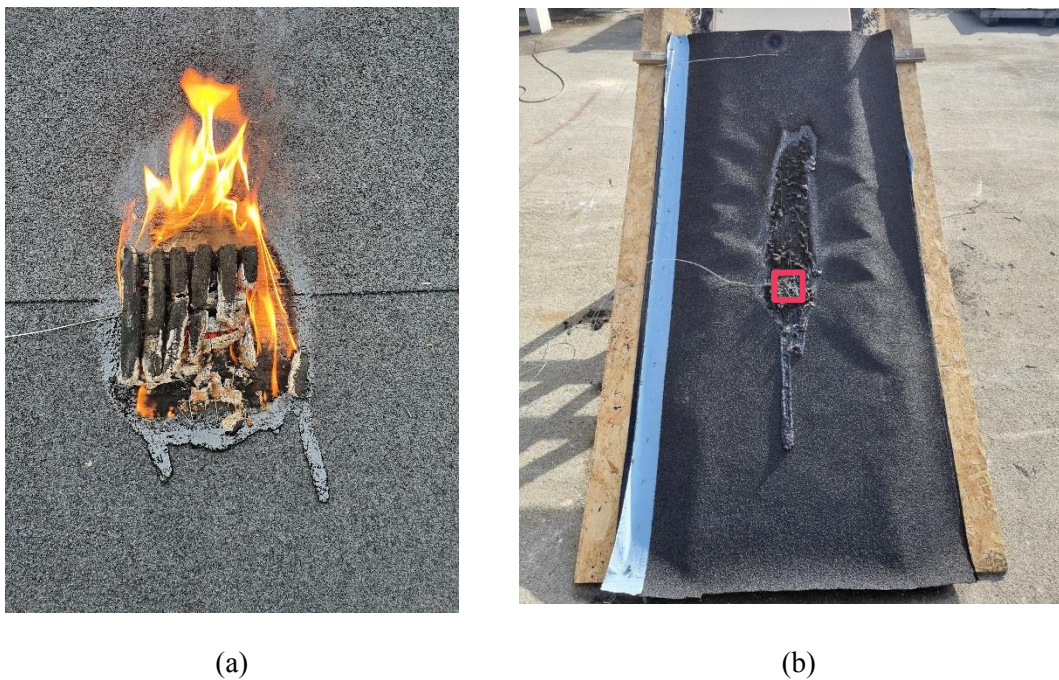
1) Brannen spreidde seg heilt ut til enden av takoverflata.

Figur 3-5 viser forsøk M4 etter 4 minutt i (a) og etter 16 minutt i (b). I Figur 3-5 (b) ser ein altså at brannen har spreidd seg til den øvre kanten av taket. I alle dei andre forsøka slokna brannen av seg sjølv. Dette inkluderer også forsøk M3 med den same storleiken på startbrannen som M4, men utan den simulerte solcellemodulen over, som vist i Figur 3-6 (a).

I forsøka med ei eller fleire EN-krybber ser ein ikkje at brannen har spreidd seg meir enn maksimalt 15 cm frå midten av krybba. Med tre EN-krybber og simulert solcellemodul (forsøk M6) vart det observert ein liten brann som krabba seg 70 cm oppover langs takoverflata før den slokna av seg sjølv. Figur 3-6 (b) viser skadene på takbelegget etter forsøk M6



Figur 3-5 Brannen i forsøk M4 med UL-krybbe og solcellemodul. Bilde (a) er teke omkring 4 minutt etter forsøkstart og viser brannen i trekrybba før den har spreidd seg oppover takoverflata. Bilde (b) er teke omkring 16 minutt etter forsøkstart, og viser brannen då den hadde spreidd seg oppover heile lengda av takoverflata.



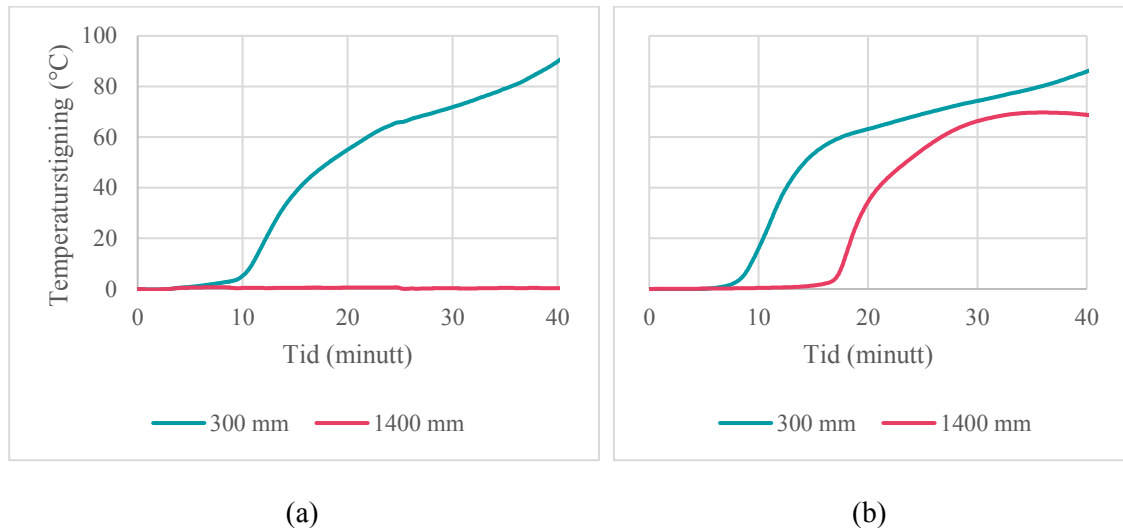
Figur 3-6 Bilete (a) viser brann i UL-krybba utan simulert solcellemodul i forsøk M3. Bilete (b) viser skade på takbelegg etter forsøk M6 med 3 EN-krybber og solcellemodul. Brannen har spreidd seg oppover langs taket til 70 cm ovanfor midten av trekrybba, men i veldig liten grad sidelengs. Merk også at det har runne smelta takbelegg nedover frå posisjonen der trekrybba stod (markert med raud firkant).

Figur 3-7 viser temperaturutviklinga under sponplata for forsøk M3 utan simulert solcellemodul i (a) og forsøk M4 med simulert solcellemodul i (b). Begge desse forsøka hadde ei UL-krybbe. Grøn linje viser temperaturen 30 cm frå den nedre kanten av taket og raud linje viser temperaturen 140 cm frå den nedre kanten av taket. Frå figuren ser ein at for målepunktet 30 m frå kanten er temperaturutviklinga omtrent lik i dei to forsøka. Dette målepunktet er i same



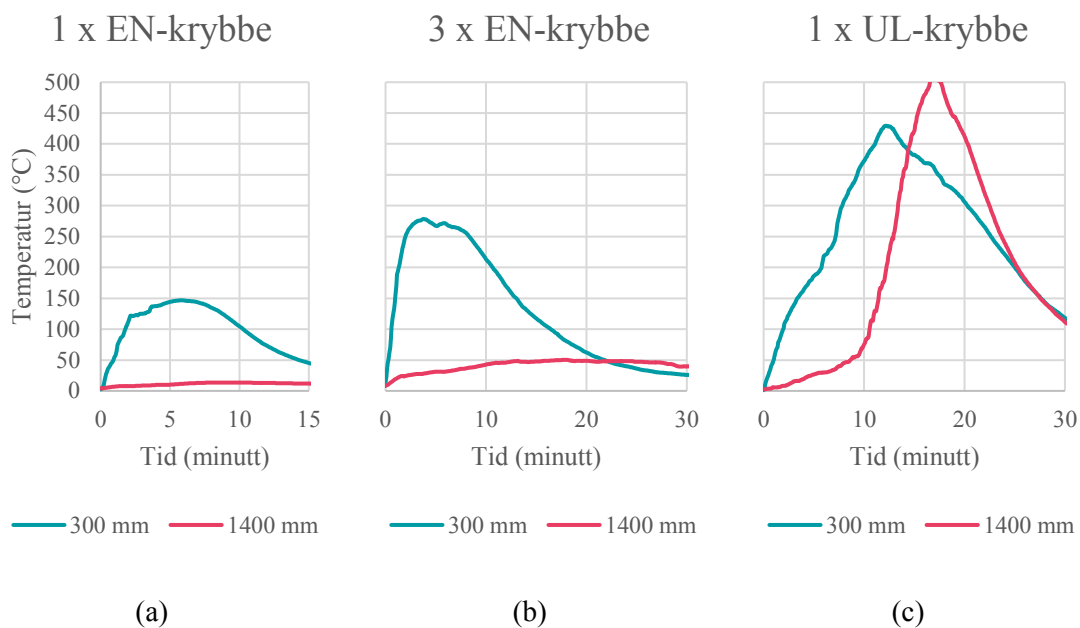
posisjon som startbrannen, og her vart temperaturauka altså ikkje påverka av om det var montert simulert solcellemodul eller ei.

Derimot ser ein at for målepunktet 140 cm frå kanten er det stor skilnad på forsøka med og utan simulert solcellemodul. Der temperaturstigninga utan simulert solcellemodul er nær null, har ein med simulert solcellemodul nesten like stor temperaturauke i dette punktet som ein hadde 30 cm frå kanten.



Figur 3-7 Viser temperaturutviklinga under sponplata i forsøk M3 utan solcellemodul i (a) og M4 med simulert solcellemodul i (b). Begge hadde UL-krybba som startbrann. Temperaturane er målt direkte under startbrannen, 30 cm og 140 cm frå nedre kant av den simulerte solcellemodulen. Temperaturskalaen på Y-aksen er felles for begge figurane.

Temperaturen i den simulerte solcellemodulen vart målt i forsøk M4, M5 og M6. Temperaturen vart også her målt i to punkt, 30 cm og 140 cm frå nedre kant av taket. Desse temperaturane er vist i Figur 3-8 for M5 i (a), M6 i (b) og M4 i (c). Ein kan sjå at temperaturen i punktet 30 cm over nedre kant blir høgare med større startbrann. Dette punktet var direkte over startbrannen. Temperaturen ved 140 cm aukar lite med den minste startbrannen med ei EN-krybbe, noko meir med tre EN-krybber og betydeleg meir i forsøket med UL-krybba. I forsøket med UL-krybba tok takbelegget fyr oppunder heile den simulerte solcellemodulen.



Figur 3-8 Temperaturen målt i den simulerte solcellemodulen som vart brukt i forsøka M5 (a), M6 (b) og M4 (c) der det vart brukt høvesvis ei EN-krybbe, tre EN-krybber og ei UL-krybbe som startbrann. Temperaturskalaen på Y-aksen er felles for alle tre figurane.

### 3.3 Storskala forsøk

Basert på erfaringane frå forsøk F1 vart det gjort to justeringar på oppsettet før forsøk F2. Den midtre delen av taket vart forlenga oppover for å kunne studere vidare flammespreiing oppover og det vart montert takrenne for å samle opp smelta takbelegg.

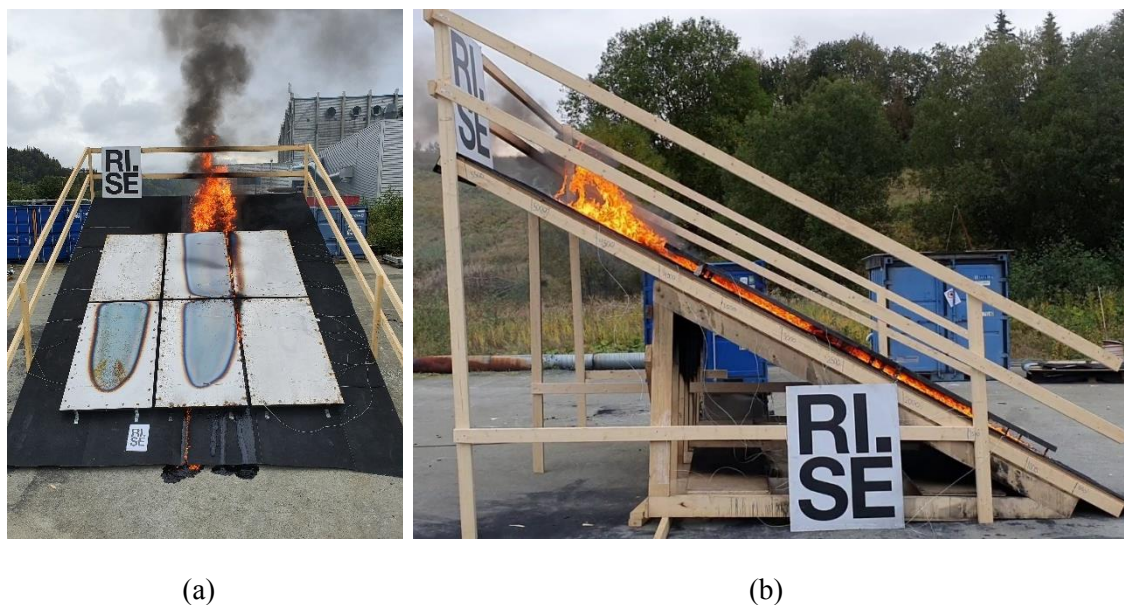
På grunn av naturleg variasjon var det i det fyrste forsøket (F1) var det nesten vindstille med 0,6 – 0,8 m/s trekk og vindkast opptil 1,7 m/s skrått inn frå nordaust, medan det i det andre forsøket (F2) var 1,7 – 1,9 m/s vind med vindkast opp til 5,6 m/s frå sør. Takflata var vendt mot nord, slik at vinden i det fyrste forsøket gjekk på skrått oppover takflata, medan den gjekk nedover takflata på det andre forsøket.

#### 3.3.1 Observasjonar

Etter at den brennande trekrybba vart plassert på takoverflata under den simulerte solcellemodulen, spreidde brannen seg oppover i holrommet mellom takoverflata og dei simulerte solcellemodulane. Flammen frå UL-krybba vart leia oppover i holrommet som vist frå forsøk F2 i Figur 3-9. Etter kvart spreidde brannen seg i takbelegget oppover langs taket til øvre kant av dei simulerte solcellene og vidare oppover takoverflata som vist frå forsøk F1 i Figur 3-10.



Figur 3-9 Brannen i trekrybba i mellomrommet mellom takoverflata og dei simulerte solcellemodulane omkring 10 minutt etter starten av forsøk F2. Posisjonen til trekrybba er vist med ein blå firkant. Flammene strekkjer seg omkring 1 m oppover mot venstre i holrommet på dette tidspunktet.



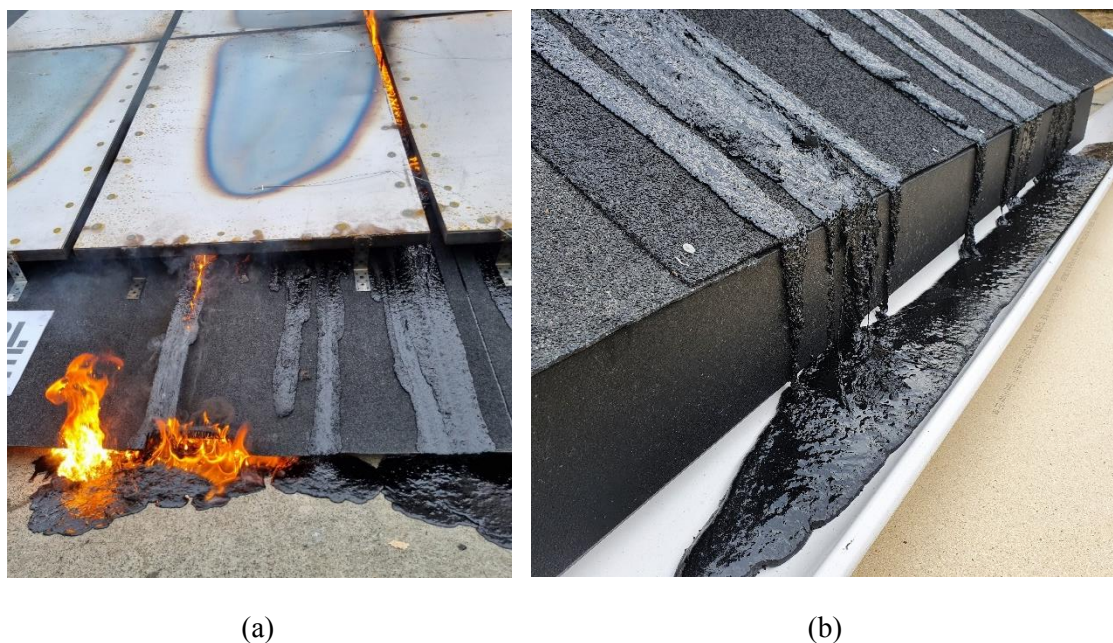
(a)

(b)

Figur 3-10 Brannen spreidde seg oppover taket forbi øvre kant av solcellemodulane. Bilete (a) og (b) viser brannspreiinga omkring 20 minutt ut i forsøk F1.

Det vart også observert smelta takbelegg som rann nedover taket. Dette førte til at brannen spreidde seg til bakken nedanfor taket i forsøk F1 (vist i Figur 3-11 (a)). I forsøk F2 samla det seg smelta takbelegg i takrenna over ei lengde på 1,7 m utan at dette tok fyr (vist i Figur 3-11 (b)).

I forsøk F1 vart brannen på bakken sløkt manuelt med vatn fleire gonger gjennom forsøket for å hindre at den spreidde seg inn under takkonstruksjonen. Ulike steg i brannspreiinga for dei to forsøka er lista opp i Tabell 3-2.



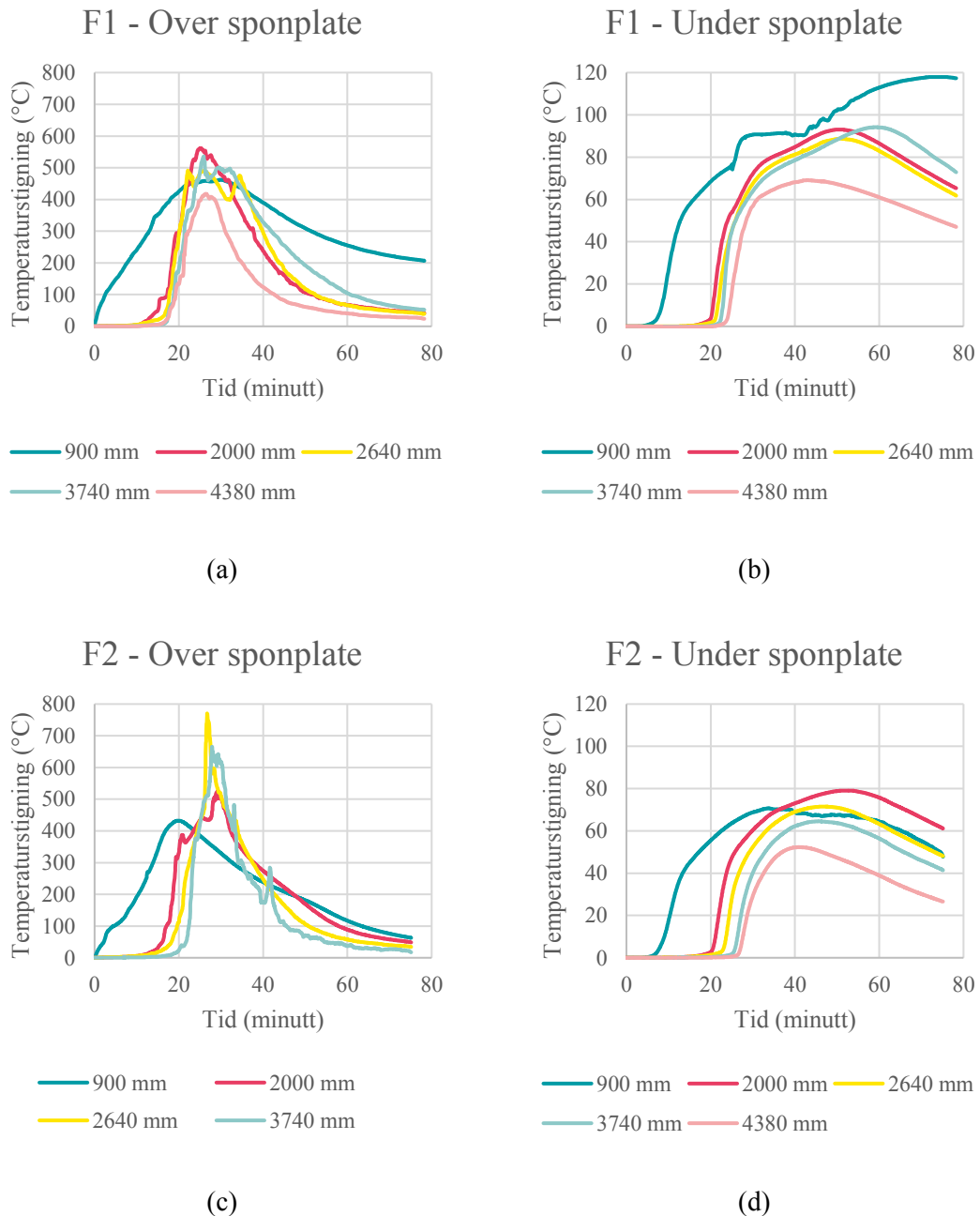
Figur 3-11 Takbelegget smelta og rann nedover taket under begge forsøka. I forsøk F1 brann dette på bakken nedanfor taket som vist i (a). I forsøk F2 vart dette samla opp i ei takrenne som vist i (b). Brannen spreidde seg ikkje nedover i det smelta takbelegget i dette forsøket.

Tabell 3-2 Observasjonslogg frå dei to forsøka F1 og F2 i stor skala.

Observasjon	Tid frå start av forsøk (mm:ss)	
	F1	F2
Tent UL-krybbe plassert på takoverflata	0:00	0:00
Flammer til øvre kant av dei nedre modulane	11:11	13:00
Flammer til øvre kant av dei øvre modulane	16:30	19:30
Smelta takbelegg renn ned frå taket	14:54	12:00
Brann i smelta takbelegg nedanfor taket	18:58	Ikkje observert
Brann i rekkverk over toppen av prøveobjektet	21:20	26:30
Brann slokna av seg sjølv	75:13	59:24

### 3.3.2 Temperaturmålinger

Temperaturutviklinga over og under sponplata viser korleis varmen vert leia nedover i takkonstruksjonen. Ein kan også følge varmen oppover langs takoverflata i dei ulike punkta der dette er målt. Temperaturutviklinga langs senterlinja av midtarste modul over og under sponplata er vist i Figur 3-12 for F1 og F2. Avstandane er gjevne frå nedre kant av taket.



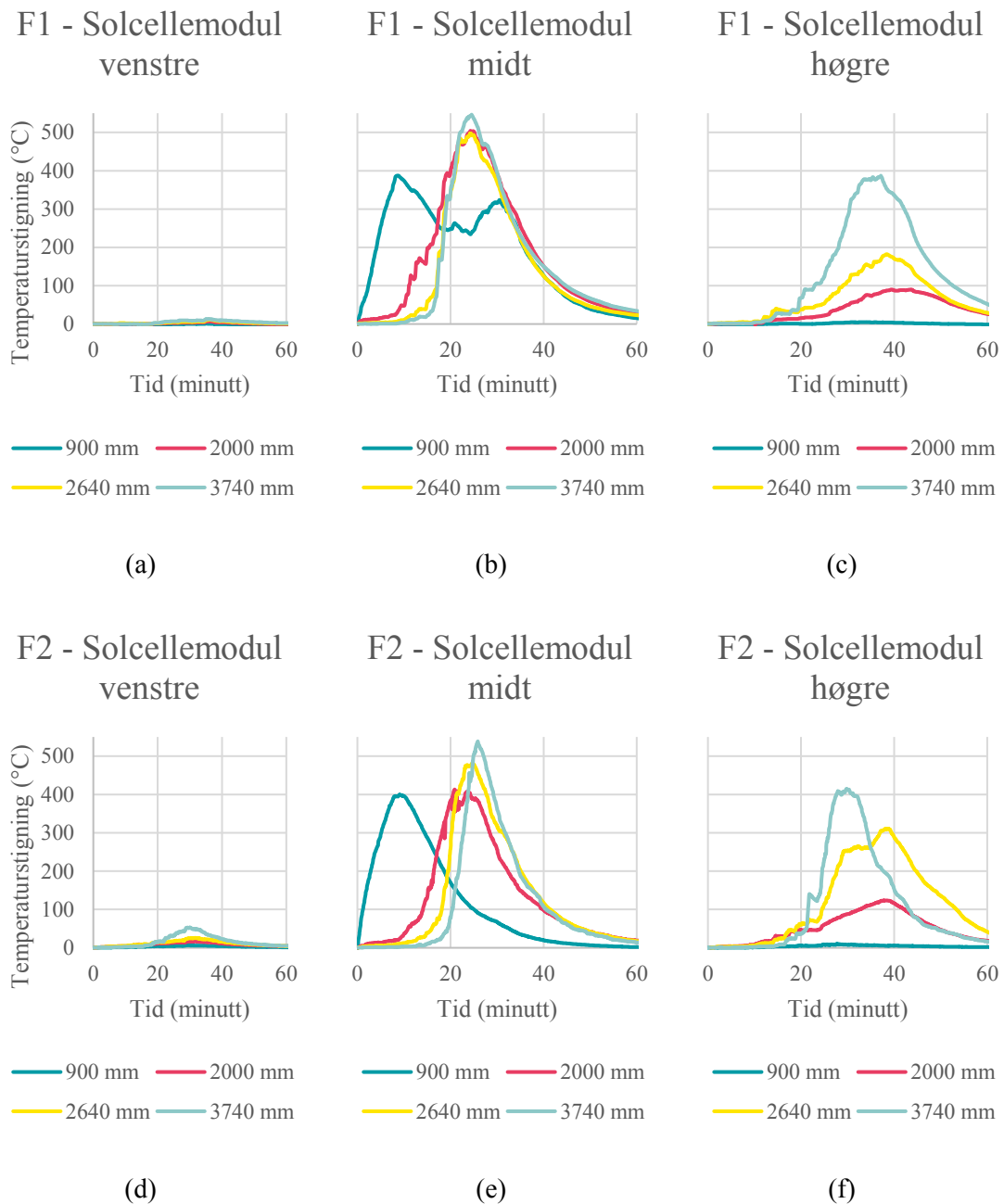
Figur 3-12 Temperaturstigning over og under sponplatene langs senterlina av taket i dei to forsøka i stor skala. Startbrannen var plassert 90 cm frå nedre kant av taket. Målepunktet over sponplata ved 438 cm i forsøk F2 var øydelagt og er fjerna frå figur (c).

Frå figuren ser ein at over sponplata stig temperaturen umiddelbart i punktet der startbrannen vart plassert (90 cm frå nedre kant av taket). Vidare stig temperaturen i punkta oppover etter kvart som flammene spreier seg. For begge forsøka når temperaturen i dei ulike punkta over sponplata ein topp etter omlag 30 minutt før dei byrjar falla. Under sponplata ser ein at temperaturstiginga i dei ulike punkta har ein forseinking på ca. 5 minutt samanlikna med målepunkta over sponplata.

Maksimumstemperaturane under sponplata var omtrent like for punkta 90 cm og 200 cm frå nedre takkant i dei to forsøka. For punkta 264 cm og 374 cm frå kanten var maksimumstemperaturen høvesvis omlag 100 °C og 250 °C høgare i F2 enn i F1. Under sponplata var det motsett, der var det maksimumstemperaturane i dei ulike punkta 15-20 °C høgare i F1 enn i F2.

Temperaturstigninga i sjølve solcellemodulane er vist i Figur 3-13 for dei to forsøka. Det var montert tre modular i bredda og temperaturane er målt langs senterlinja av kvar av modulane. Også her ser ein at temperaturen stig brått i punktet med same plassering som startbrannen og når ein maksimumstemperatur på 400 °C etter om lag 10 minutt. Temperaturen oppover langs senterlinja av den midtarste modulen er i starten omtrent stabil før dei startar å stige brått etter mellom 10 og 20 minuttar. Temperaturen i øvste målepunkt i solcellemodulane når i begge forsøka ein maksimumstemperatur på litt over 500 °C etter om lag 25 minutt.

Temperaturane i solcellemodulane til venstre endrar seg i veldig liten grad i begge forsøka. For forsøk F2 er den maksimale temperaturen i det øvste målepunktet 50 °C. For målepunkta i solcellemodulane til høgre er temperaturauke størst i dei øvste målepunkta. Maksimumstemperaturen å lågare for kvart målepunkt nedover heilt ned til punktet i same høgd som startbrannen. Her er det ikkje registrert noko temperaturauke.



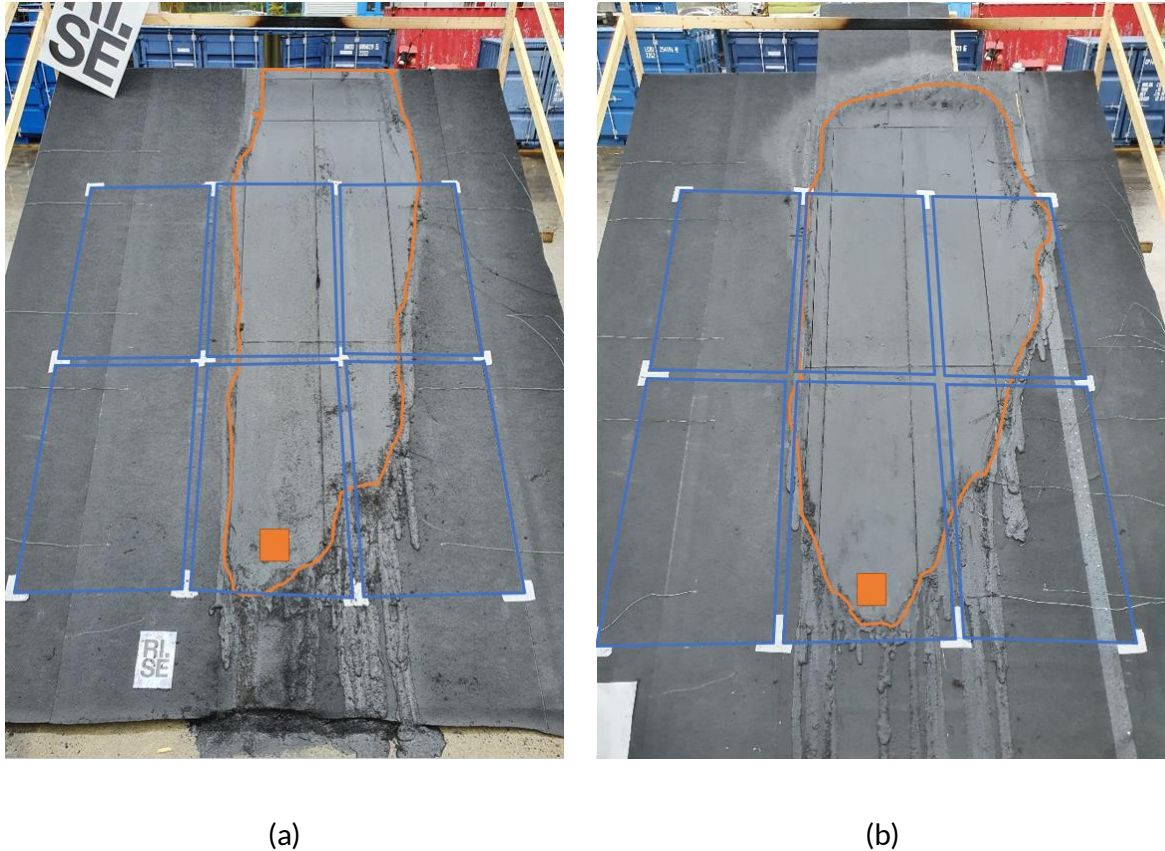
Figur 3-13 Temperaturstigninga målt på solcellemodulane i stål i dei to forsøka i stor skala F1 (a), (b) og (c) og F2 (d), (e) og (f). Målepunkt ved 90 cm og 200 cm er på dei nedre solcellemodulane og målepunkta ved 264 cm og 374 cm er på dei øvre solcellemodulane.

### 3.3.3 Skadeomfang

Etter at forsøka var avslutta vart dei simulerte solcellemodulane fjerna og skadeomfanget på takoverflata vart registrert. Lause bitar av takbeleggrestar vart kosta vekk, og avdekte området der takbelegget var brent opp og sponplatene var eksponert. Dette er vist i Figur 3-14 (a) og (b) for høvesvis F1 og F2. Området der dei simulerte solcellemodulane var plassert er markerte med

blå rektangel og det oransje omrisset viser området der takbelegget var brent opp. Den oransje firkanten markerer posisjonen for startbrannen.

Ein kan sjå at takbelegget er brent opp heilt til toppen av taket i forsøk F1, medan brannen har stoppa litt nedanfor dette i forsøk F2. Skadeområdet er derimot litt breiare i utstrekning i F2 enn i F1.



Figur 3-14 Takoverflatene etter at dei simulerte solcellemodulane er fjerna etter forsøk F1 i (a) og F2 i (b). Plasseringa av solcellemodulane er illustrert med blå firkantar, plasseringa av startbrannen er vist med ein oransje firkant, og omrisset av området der takbelegget var brent opp er vist med oransje strek. Merk at i det forsøk F1 spreidde brannen seg heilt opp til øvre kant av takoverflata medan den stoppa så vidt nedanfor dette i forsøk F2.

Sponplatene langs senterlina av taket under takbelegget vart demontert og kappet ved dei avstandane frå kanten på taket der det var gjort temperaturmålingar. Djupna på forkolinga frå oppsida av sponplata vart målt i desse snitta, og er lista opp for dei to forsøka i Tabell 3-3.



Tabell 3-3 Djupn på forkolninga i sponplata under takbelegget langs senterlina av taket for dei to forsøka F1 og F2 i stor skala.

Avstand frå nedre kant av taket (mm)	Djupn på forkolning (mm)	
	F1	F2
4380	4	3
3740	7	6
2640	9	7
2000	11	6
900	14	10

Eit bilete av snitta gjennom sponplatene i dei ulike høgdene frå forsøk F1 er vist i Figur 3-15.



Figur 3-15 Djupn av forkolning av sponplatene er målt langs senterlina av taket ved dei same punkta som temperaturmålingane er gjort, 90 cm, 200 cm, 264 cm, 374 cm og 438 cm. Biletet viser snitta av sponplatene i forsøk F1.

Under skøyten av sponplatene til høgre for senterlina var det svimerke i OSB-platene, som vist i Figur 3-16 for forsøk F1. Det var ikkje teikn til svimerke i OSB-platene under midten av sponplatene der temperaturen vart målt. Dei same sponplatene var nytta også for forsøk F2, det vart ikkje observert vesentleg auke i omfanget av desse svimerka etter forsøk F2.



Figur 3-16 Svimerker på OSB-plate etter forsøk F1. Svimerket er lokalisert under skøyten av sponplatene omkring 30 cm til høyre for senter av forsøksoppsettet (markert med blå firkant). Målepunkta under sponplata langs senterlina er vist med raude sirklar.

## 4 Diskusjon

Forsøka i dei tre ulike skalaene viser ein studie av eit utval av ulike parametrar som er med på å avgjere korleis ein brann i holrommet mellom ei takoverflate og solcellemodular vil spreie seg. Ein kan sjå ein markant skilnad mellom forsøka der brannen sløkkte av seg sjølv etter at startbrannen hadde brent ut, og dei forsøka der brannen spreidde seg vidare oppover taket. Varmeleiinga innover i taket auka også i forsøka der det var montert simulerte solcellemodular, samanlikna med forsøka der det ikkje var montert noko oppå taket.

### 4.1 Småskala forsøk

For oppsettet med den simulerte solcellemodulen montert 15 cm over takoverflata vart det utført tre forsøk med både 2 m/s og 4 m/s vindhastigheit slik klassifiseringa  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$  krev. Både gjennomsnittleg og maksimal skadelengd på takbelegg var innafør krava til  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$ . Med 12 cm avstand og 4 m/s vind viser det store standardavviket stor spreiring i resultata i dei tre utførte forsøka. Den maksimale skadelengda på 61,5 cm er likevel godt innafør maksimumskravet til  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$  på 80,0 cm. For den lågaste vindhastigheita med 12 cm avstand samt for begge vindhastigheitane med 9 cm avstand er det kun utført to forsøk. Forsøksserien er altså ikkje komplett etter prosedyren for klassifisering til  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$ , men både gjennomsnittleg og maksimal skadelengde på belegg i dei utførte forsøka var innanfor kriteriet til  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$  med god margin. Det er difor truleg at belegget ville vorte godkjent som  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$  også med solcellemodul montert ned til 9 cm over takoverflata.

I oppsettet med den simulerte solcellemodulen montert 6 cm over takoverflata var det utført berre to forsøk for kvar av vindhastigheitane. Ettersom skadelengdene i gjennomsnitt av dei to

forsøka ved 4 m/s var akkurat på grenseverdien for  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$ , kan ein ikkje basert på dei utførte forsøka konkludere om belegget kan klassifiserast som  $B_{\text{ROOF}}(t_2)$  eller ikkje med solcellemodul montert 6 cm over taket.

Temperaturmålingane ulike stader i takkonstruksjonen viste at når det var montert ein simulert solcellemodul på taket vart også varmeoverføringa innover i takkonstruksjonen større. Den største temperaturstigninga på undersida av den 22 mm tjukke sponplata vart målt i punktet rett under startbrannen, 15 cm ovanfor den nedre kanten av taket. Her var temperaturauka i liten grad påverka av om det var montert solcellemodul eller ikkje.

Ved punktet 45 cm frå kanten av taket var det stor skilnad på temperaturstigninga på undersida av sponplata i forsøka med og utan simulert solcellemodul montert. Temperaturstigninga var størst når den simulerte solcellemodulen var montert nærast takoverflata, og den avtok med aukande avstand mellom modul og tak. For ein avstand på 6 cm mellom solcellemodul og tak og 2 m/s vind var temperaturauka her i overkant av 40 °C. Utan solcellemodul var temperaturauka under 10 °C. I praksis vil varmeoverføring innover i takkonstruksjonen kunne påverke brannspreiing i konstruksjonen. Skilnaden med og utan modul er vesentleg, men likevel ikkje så stor at den vurderast til å kunne ha ein vesentleg påvirkning på brannspreiinga i tidleg fase av ein brann. Det er ikkje grunnlag for å seie noko om påvirkning seinare i brannforløpet ut frå desse forsøka.

Med ein avstand på 6 cm mellom solcellemodul og tak var temperaturauka 45 cm frå nedre kant av taket større med 2 m/s vind enn med 4 m/s vind. Med ein avstand på 9 cm var det motsett og temperaturauka var større med 4 m/s vind enn med 2 m/s vind. For større avstandar og utan simulert solcellemodul temperaturauka under sponplata i dei utførte forsøka ulik for dei to vindhastigheitane.

Ved punktet 75 cm frå nedre kant av taket, vart det målt svært liten temperaturstigning på undersida av sponplata. Det er vanskeleg å sjå om det at det var solcellemodul montert eller ikkje hadde nokon tydeleg innverknad på brannen.

Temperaturen i den simulerte solcellemodulen har betydning for kor mykje varme som strålar tilbake mot takoverflata. I forsøka i liten skala var det kombinasjonen liten avstand mellom solcellemodul og tak og låg vindhastigheit som førte til dei høgaste temperaturane i den simulerte modulen. I dei andre forsøka var den simulerte solcellemodulen plassert lenger unna flammen og vart då i mindre grad varma opp av denne. I praksis viser dette at storleiken på luftspalta mellom modul og underlag kan være med på å påverke brannforløpet, ikkje bere ved sjølve flammene i luftspalta, men også ved å påverke temperaturen på modulane.

I forsøka med sterkare vind kan ein rekne med at ein større del av varmen frå brannen vart leia vidare oppover i kanalen med vinden, og i mindre grad gjekk til å varme opp den simulerte solcellemodulen. Dei høgaste temperaturane vart målt til like oppunder 200 °C i punktet 30 cm frå nedre kant av takbelegget. Ved å anta ein emissivitet på 0,85 for undersida av stålplata tilsvarar dette omkring 2,4 kW/m<sup>2</sup> varmestråling. Backstrom og Sloan har gjennomført testing av kritisk fluks for ei rekkje ulike takbelegg som var i klasse A etter UL 790, og funne at dette ligg i området mellom 14 – 26 kW/m<sup>2</sup> [12]. Samanlikna med dette utgjer strålingsbidraget på 2,4 kW/m<sup>2</sup> eit relativt lite bidrag.

Det er rimeleg å anta at for ein reell solcellemodul som består av fleire lag av ulike materiale som plast, silisium og glas i større grad vil isolere mot varmetap på oversida av modulen. Difor

vert temperaturen i ein reell modul truleg noko høgare enn i dei simulerte modulane brukt i desse forsøka som bestod av eitt lag stål, noko som vil medføre større varmestråling mot takoverflata. Det vil igjen kunne påverke brannen og gi større brannspeiing.

## 4.2 Mellomskala forsøk

I mellomskalaforsøka vart effekten av ulike storleikar på startbrannen studert med og utan den simulerte solcellemodulen over taket. Den simulerte solcellemodulen var i desse forsøka montert 12 cm over takoverflata.

Som vist i Tabell 3-1 er det berre i forsøk M4 med UL-krybbe og simulert solcellemodul brannen etablerte seg i holrommet og spreidde seg heilt til øvre kant på takoverflata. Forsøket med den same startbrann, men utan simulert solcellemodulen førte ikkje til brannskadar utover området nærast startbrannen. UL krybba bestod av 0,5 kg tre. Ved fullstendig forbrenning kan treverk avgi ei energimengd på 15-20 MJ/kg, dvs. at energimengda i startbrannen som medførte brannspreiing i holrommet i dette forsøket maksimalt var på 7-10 MJ. I forsøk M3 brann denne krybba fritt i om lag 25 minutt. Dette gir ei gjennomsnittleg varmeavgiving i området 5 – 7 kW.

Av forsøka med dei mindre EN-krybbene som startbrann var det berre i forsøk M6, med tre EN-krybber og simulert solcellemodul montert, at brannen spreidde seg meir enn 10 cm frå utkanten av startbrannen. I dette forsøket var også brannspreiinga svært moderat, og gav berre skader i eit smalt felt 70 cm oppover takoverflata før brannen slokna av seg sjølv.

Forsøka viser altså at for at ein solcellemodul skal føre til større brannspreiing i takoverflata er det nødvendig med ein viss storleik på startbrannen. Med den simulerte solcellemodulen montert 12 cm over takoverflata tydar det på at ein brann i den vesle EN-krybba i liten grad fører til auka skadeomfang på takoverflata. Dette er også underbygd av resultatata frå forsøka i liten skala, der den skadde lengda av takbelegget ikkje var vesentleg lenger med simulert solcellemodul montert 12 cm over takoverflata enn den var utan simulert solcellemodul som vist i Figur 3-1. For forsøka i småskala oppsettet fekk ein likevel brannspreiing med den mindre startbrannen frå EN krybba når avstanden mellom takoverflata og solcellemodulen var 6 cm. Saman med resultatata frå mellomskala forsøka tyder dette på at det er ein samanheng mellom kva som er kritisk størrelse på startbrannen og kva som er kritisk avstand mellom takoverflata og solcellemodulen, der større avstand krev større startbrann for at brannen skal spreie seg.

Varmeleiinga innover i takkonstruksjonen følgjer også utstrekninga av skadane på takbelegget. Som vist i Figur 3-7 er det liten skilnad i varmen som blir leia innover i takkonstruksjonen direkte under startbrannen med og utan simulert solcellemodul montert. Som følgje av at brannen spreidde seg til eit større område i forsøket med simulert solcellemodul, auka derimot temperaturen i ein større del av taket med den simulerte solcellemodulen montert. Temperaturauka på undersida av sponplata var størst rett under startbrannen, men også her var den i underkant av 100 °C. Det var med andre ord liten umiddelbar fare for brannspreiing nedover i takkonstruksjonen med desse brannane.

Ein større startbrann gir høgare temperatur i den simulerte solcellemodulen som vist i Figur 3-8. Her vart det registrert temperaturar opp til 150 °C i forsøket med ei EN-krybbe, 275 °C med tre EN-krybber og 425 °C i forsøket med ei UL-krybbe direkte over startbrannen. Ved å anta ein emissivitet på 0,85 på undersida av stålplata, tilsvarar dette varmestråling på høvesvis 1,5 kW/m<sup>2</sup>, 4,3 kW/m<sup>2</sup> og 11,4 kW/m<sup>2</sup>. Sidan varmestrålinga aukar med temperaturen (i Kelvin)

oppøgd i fjerde, utgjør denne auken i temperatur ein betydeleg større auke i varmestråling. Sjølv om denne varmestrålinga er lågare enn området for kritisk fluks for takbelegg som rapportert av Backstrom og Sloan frå 14 – 26 kW/m<sup>2</sup> [12], kjem dette som eit tillegg til varmestrålinga frå sjølve flammen og den konvektive varmeoverføringa frå dei varme gassane som trekkjer oppover takoverflata.

## 4.3 Storskala forsøk

Dei to forsøka som er gjort i stor skala er i store trekk gjennomført med det same oppsettet for å få eit bilete av kor repeterbart dette brannforløpet er. Vindforholda varierte likevel mellom forsøka. I F1 var det ein svak trekk frå nord-aust, det vil sei i retning på skrått oppover mot høgre i Figur 3-10 (a). I forsøk F2 var vinden i underkant av 2 m/s frå sør, det vil sei rett mot baksida av taket. Då dei simulerte solcellemodulane startar over 1 m under øvre kant av taket er det likevel truleg at taket i stor grad har skjerma for denne vinden, slik at den ikkje kom ned i mellom takoverflata og dei simulerte solcellemodulane. Forma på det skada området på takoverflata i dei to forsøka (i Figur 3-14) er også veldig lik, noko som underbyggjer at variasjonane i vinden har hatt liten innverknad på brannforløpet under dei simulerte solcellemodulane.

Variasjonen i vindforholda kan derimot ha påverka brannspreiinga i det øvste området av taket. I forsøk F1 spreidde brannen seg heilt opp øvre kant av takoverflata, og kunne truleg ha spreidd seg lenger dersom takoverflata hadde vore lenger. I forsøk F2 spreidde brannen seg likevel ikkje lenger enn dette, trass i at takoverflata i midtre del var forlenga med 1 meter oppover. Dette kan ha skuldast at vinden i F2 bles rett inn mot baksida av takkonstruksjonen og dermed dempa spreinga i øvre del av takoverflata. Det er grunn til å tru at vinden i større grad påverkar brannen i det øvre området utanfor dei simulerte solcellemodulane enn i holrommet under dei simulerte solcellemodulane der brannen er meir skjerma for vinden.

Begge brannane i stor skala spreidde seg oppover langs takoverflata i mellomrommet under dei simulerte solcellemodulane. Temperaturauka målt over sponplata var i stor grad lik for begge forsøka for dei to nedste målepunkta 90 cm og 200 cm frå nedre kant av taket. For målepunkta lenger oppe var temperaturauka større for F2 enn F1. Temperaturauka målt under sponplata viste i stor grad også same trend for dei to forsøka, mens her vart den største temperaturauka målt i F1. Det vart altså ikkje funne noko systematisk skilnad i temperaturauke nedover i takkonstruksjonen for dei to forsøka.

Temperaturauka i dei simulerte solcellemodulane viste heller ingen tydeleg skilnad mellom dei to forsøka. For begge forsøka vart den største temperaturauka målt i dei øvste målepunkta i dei midtre modulane. Begge forsøka viste også stigande grad av temperaturauke oppover under modulane til høgre. Under modulane til venstre vart det knapt registrert temperaturauke. Dette samsvarar altså godt med forma på brannskadene i takbelegget som utvida seg litt mot høgre oppover takoverflata.

Temperaturstigninga på undersida av sponplata er forseinka med omkring 5 minutt samanlikna med temperaturmålingane i same posisjon på oversida av sponplata. Dette viser at varmetransporten innover i materialet brukar litt tid. Temperaturauka målt under sponplata var i begge forsøka mindre enn 120 °C, noko som ikkje er kritisk med tanke på vidare brannspreiing nedover i takkonstruksjonen. Ein kan likevel sjå av svimerka på OSB-plata under sponplata som

vist i Figur 3-16 at det har vore høgare temperaturar under skøytane av sponplatene enn det som er målt lang senterlina under midten av sponplatene. Dette kan medføre risiko for at brannen kan spreie seg innover i taket i tilsvarande svake punkt som desse skøytane. Høg temperatur innover taket i slike svake punkt vil også kunne medføre risiko for at ulmebrann oppstår etter at den opprinnelege brannen er sløkt.

Det er ikkje klart kvifor brannen spreidde seg nedover i det smelta, rennande takbelegget i forsøk F1, men ikkje i forsøk F2. Dersom brannen hadde spreidd seg ned til takrenna er det mogeleg at brannen ville spreidd seg sidelengs i takrenna og tilbake opp på takoverflata att. Dette kunne ført til at brannen ville fått større utstrekning sidelengs enn den fekk i desse forsøka. Om ein slik brann også kunne spreidd seg inn under takkonstruksjonen vil vera avhengig av konstruksjonsdetaljar omkring takrenna og takfoten. Kor kritisk dette er for brannspreiinga i ein reell brann vil også henge saman med kor fort det tek fyr i takrenna. For F1 tok det 19 minutt før det smelta takbelegget på bakken tok fyr.

I forsøka F1 og F2 tok det høvesvis omtrent 11 og 13 minutt før brannen hadde spreidd seg til øvre kant av den nedste rekkja med modular. Vidare derfrå tok det høvesvis omtrent 5 og 6,5 minuttar før flammene hadde nådd øvre kant på den øvste rekkja med modular. Det er ikkje undersøkt korleis sterk sidevegs vind innunder modulane vil verke inn på den horisontale brannspreiinga. Horisontal brannspreiing vil kunne medføre brannspreiing mellom ulike bueiningar i til dømes rekkjehus.

Alle oppsetta brukt i denne forsøksserien hadde ein takvinkel på 30°. Dette er som beskrive i testmetode 2 i CEN/TS 1187 [8], og er også ein vanleg takvinkel for skrå hustak i Norge. Det er rimeleg å anta at ein større takvinkel vil gi raskare brannspreiing og at ein mindre takvinkel vil gi langsamare brannspreiing, og at skadeomfanget også vert påverka av takvinkelen.

## 5 Konklusjonar

Basert på funna i denne forsøksserien kan forskingsspørsmåla svarast ut slik:

### Forskingsspørsmål 1:

*Korleis påverkar vindhastigheit og spaltestorleikar brannutviklinga i holrommet mellom solcellemodul og underliggjande takkonstruksjon, og korleis påverkar dette skadeomfanget på underliggjande takkonstruksjon.*

- **Delspørsmål 1-1:** *Finns det ei kritisk nedre grense for luftspaltestorleik og ei kritisk øvre grense for vindhastigheit, der skadeomfanget blir uproporsjonalt større?*

Dei utførte forsøka har vist at solcellemodular montert parallelt med takoverflata på skråtak kan påverke brannodynamikken i ein brann på takoverflata.

I småskala forsøk vart det for dei undersøkte avstandane funne at både lengda på det skadde området og temperaturstigninga under sponplata auka når avstanden mellom den simulerte solcellemodulen og takoverflata avtok. Vidare tyder funna på at det er ein samanheng mellom kor stor avstand det er mellom takoverflata og solcellemodulen og kor stor brann det trengs for at brannen skal spreie seg, og at ein større avstand mellom takoverflata og solcellemodulen krev større startbrann for at brannen skal spreie seg.

Det vart i småskalaforsøka ikkje funne samanheng mellom dei to ulike vindhastigheitane som vart undersøkt og temperaturauka under sponplata. Dei to storskala forsøka viste heller ingen tydeleg skilnad på skadeomfang på takbelegget, til tross for stor skilnad i vindstyrke og vindretning. Det er altså ikkje funne samanheng mellom vindhastigheit og brannspreiing i dei utførte forsøka.

### **Forskingsspørsmål 2:**

*Korleis påverkar solcellemodular brann på eit realistisk, norsk, skråstilt hustak?*

- **Delspørsmål 2-1:** *Bli brannspreiinga langs taket raskare, og vil brannen ha høgare temperaturar?*
- **Delspørsmål 2-2:** *Bli brannpåkjenninga på taket og underliggende konstruksjon verre?*

Med UL-krybba som startbrann spreidde brannen under solcellemodulane heilt opp til øvre kant på taket når modulen var montert 12 cm over overtakoverflata. Det vart ikkje funne noko brannspreiing på takoverflata med UL-krybba som startbrann utan simulert solcellemodul montert.

Temperaturauka innover i takkonstruksjonen var lite påverka av solcellemodulane i området rett under startbrannen. I områda ovanfor startbrannen var varmpåkjenninga likevel større med solcellemodular montert. Temperaturauka innover i takkonstruksjonen var imidlertid ikkje stor nok til at det var fare for umiddelbar brannspreiing innover i konstruksjonen.

## 6 Referansar

- [1] J. S. Kristensen og G. Jomaas, «Experimental study of the fire behaviour on flat roof constructions with multiple photovoltaic (PV) panels», *Fire Techn*, bd. 54, nr. 6, s. 1807–1828, 2018.
- [2] J. S. Kristensen, B. Merci, og G. Jomaas, «Fire-induced reradiation underneath photovoltaic arrays on flat roofs», *Fire and Materials*, bd. 42, nr. 3, s. 316–323, apr. 2018.
- [3] J. S. Kristensen, F. B. M. Faudzi, og G. Jomaas, «Experimental study of flame spread underneath photovoltaic (PV) modules», *Fire Safety Journal*, s. 103027, mai. 2020.
- [4] X. Ju *mfl.*, «Impact of flat roof–integrated solar photovoltaic installation mode on building fire safety», *Fire and Materials*, 2019.
- [5] F. Tang *mfl.*, «Experimental study and analysis of radiation heat fluxes received by a floor beneath an inclined ceiling», *Fire and Materials*, bd. 45, nr. 2, s. 205–214, mar. 2021.
- [6] E. F. Smeplass, «Brannsikkerhet i bygg med solcelleanlegg», Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2016.
- [7] Direktoratet for byggkvalitet, *Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK)*. 2017.
- [8] «CEN/TS 1187:2012. Prøvmingsmetoder for utvendig branneksponeering av tak». European Committee for Standardization, 2012.
- [9] J. S. Kristensen, B. Jacobs, og G. Jomaas, «Experimental Study of the Fire Dynamics in a Semi-enclosure Formed by Photovoltaic (PV) Installations on Flat Roof Constructions», *Fire Technol*, mar. 2022.
- [10] «NS-EN 13501-5:2005 Brannklassifisering av byggevarer og bygningsdeler - Del 5: Klassifisering ved bruk av resultater fra prøving av tak utsatt for utvendig branneksponeering». Standard Norge, 2005.
- [11] «UL790, Standard Test Methods for Fire Tests of Roof Coverings». Underwriters Laboratories, 22 apr. 2004.
- [12] B. Backstrom og D. Sloan, «Characterization of Photovoltaic Materials – Critical Flux for Ignition / Propagation Phase 3», Underwriters Laboratories Inc., SV19060, jan. 2012.





**RISE – Research Institutes of Sweden**  
ri.se / info@ri.se / (+47) 464 18 000  
Postboks 4767 Torgarden, 7465 Trondheim

E-post: [post@risefr.no](mailto:post@risefr.no), Internett: [www.risefr.no](http://www.risefr.no)  
RISE Rapport: 2022:83  
ISBN: 978-91-89711-23-5

