



Høgskulen på Vestlandet

Bacheloroppgave

Brannteknikk

ING3037

Predefinert informasjon

Startdato:	31-03-2020 09:00	Termin:	2020 VÅR
Slutt dato:	07-05-2020 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave med muntlig presentasjon/eksaminasjon		
SIS-kode:	203 ING3037 1 PRO-1 2020 VÅR HAUGESUND		
Intern sensor:	Jan Torgil Josefsen		

Deltaker

Kandidatnr.: 317

Informasjon fra deltaker

Tittel *: Branntesting av utendørs bygningsplater som flammeskjerm

Engelsk tittel *: Fire testing of outdoor building boards as flame screens

Navn på veileder *: Jan Torgil Josefsen

Sett hake dersom ja
besvarelsen kan brukes
som eksempel i
undervisning?:

Egenerklæring *: Ja
Inneholder besvarelsen Nei
konfedensielt
materiale?:

Jeg bekrefter at jeg har ja
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:

Gruppe

Gruppenavn: (Anonymisert)

Gruppenummer: 7

Andre medlemmer i
gruppen: 309, 314

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, Q Rådgivning



Høgskulen på Vestlandet

Branntesting av utendørs bygningsplater som flammeskjerm



Bachelorprosjekt utført ved
Høgskulen på Vestlandet – Studie for ingeniørfag

Brannteknikk

Av: Anne Louise Gilling

Kand.nr. 309

Lars Almklov Justad

Kand.nr. 314

Martin Dragland Granum

Kand.nr. 317

BACHELORPROSJEKT

Studentenes navn: Anne Louise Gilling
Martin Dragland Granum
Lars Almklov Justad

Linje & studieretning: Bachelor i ingeniørfag, Brannsikkerhet

Oppgavens tittel: Branntesting av utendørs bygningsplater som flammeskjerm

Oppgavetekst:

I sentrale bystrøk har boligbebyggelse vært preget av flere boligtyper som har fokus på arealoptimalisering. Horizontaldelte boliger er en av disse typene. Personer i øvre etasjer må ofte rømme via svalgang og trapp for å komme seg til sikkerhet. Slike bygg er svært utbredt, og det er vanlig å bruke denne slags rute som hovedrømningsvei.

Veiledning til byggt teknisk forskrift (VTEK17) spesifiserer i § 11-14-01 at, dersom avstanden mellom trappen og bygget er for liten, skal trappen være beskyttet mot strålevarme fra bygget i form av branncellebegrensende skille. Oppdragsgiver er interessert i å finne ut om sementbaserte fasadeplater kan fungere som et slikt skille. Det er så langt ikke funnet eksempler på fasadeplater som alene har brannteknisk klassifisering for integritet og isolasjon, og i tillegg er tåledyktige mot direkte værpåkjenning. Det skal derfor utføres testing av to type fasadeplater, men hensyn til en case tildelt av oppdragsgiver. Begge platene er brannklassifisert med A2-s1,d0.

Bacheloroppgaven går ut på å teste egenskapene til platene med hensyn til isolasjon (I) og integritet (E), og om de kan benyttes mot strålevarme. Det er spesielt interessant for oppdragsgiver å finne ut om platene kan tilfredsstillende en brannmotstand på EI 15, og gi skjerming av strålingsvarme under denne tiden. Testing av platene foregår ved hjelp av forsøk utført på ResQ, Haugesund.

Endelig oppgave gitt: 28.februar 2020
Innleveringsfrist: Torsdag 7.mai 2020 kl. 12.00

Intern veileder: Jan Torgil Josefsen
Ekstern veileder: Lars Ove Østrem
emailadresse ekstern veileder: lars.ove.ostrem@q-rad.no
Godkjent av studieansvarlig: 
Dato: 16.04.2020



Høgskulen
på Vestlandet

Høgskulen på Vestlandet
Studie for ingeniørfag
Bjørnsonsgate 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 55 58 58 00

Oppgavens tittel Branntesting av utendørs bygningsplater som flammeskjerm		Rapportnummer (Fylles ikke ut)
Utført av Lars A. Justad, Anne Louise Gilling og Martin D. Granum		
Linje Brannteknikk		Studieretning Bachelor i ingeniørfag, Brannsikkerhet
Gradering Åpen	Innlevert dato 21.05.2020	Veiledere Høyskolelektor Jan Torgil Josefsen (HVL) Branningeniør Lars Ove Østrem (Q Rådgivning) Branningeniør Thor Inge Lie (Q Rådgivning)

Ekstrakt

Oppgavens hovedformål har vært å undersøke om sementbaserte bygningsplater kan brukes som flammeskjerm. De ble testet i et konservativt forsøk basert på et case tildelt av oppdragsgiver. Platenes ytelse innen isolasjon og integritet ble undersøkt, samt innfallende stråling dersom de ikke implementeres.

Ut ifra resultatene fra forsøket, vil bygningsplatene ivareta ytelsene i minimum 26 minutter ved en konstant brannpåkjenning. Evakuerende vil ikke bli truffet av en betydelig mengde stråling i denne tiden. Det vil være nødvendig å utføre ytterligere analyse for å vurdere om platene gir en tilfredsstillende sikkerhet.

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet våren 2020, som en avslutning på et treårig ingeniørstudium innen brannsikkerhet. Oppgaven består av denne rapporten, samt et produkt, en presentasjon og en plakat.

Valget av oppgaven stammer fra ønsket om å kunne samkjøre teori med hva som vil skje i et virkelig scenario. Arbeidet rundt oppgaven har vært tidkrevende, men også interessant og lærerikt. Den kunnskapen vi har opparbeidet anser vi som nyttig informasjon, som vi kan ta med videre i våre karrierer.

Vi vil gjerne takke vår interne veileder Jan Torgil Josefsen, og våre eksterne veiledere Lars Ove Østrem og Thor Inge Lie, for gode innspill og konstruktive tilbakemeldinger under oppgaven. I tillegg ønsker vi å takke Arjen Kraaijeveld ved HVL, og andre ansatte på ResQ for assistanse rundt byggeprosessen og forsøket, samt at vi fikk låne forsøksanlegget og bruke nødvendig utstyr. For hjelp ved rettskriving, retter vi en takk til Britt Justad.

Grunnet COVID-19 har Norge innført nasjonale restriksjoner, deriblant nedstenging og overføring til digital hverdag av skoler og bedrifter. Dette medførte at noen planlagte aktiviteter tilknyttet bachelorprosjektet ikke har vært mulig å gjennomføre.

Anne Louise Gilling

.....
Anne Louise Gilling

Lars A. Justad

.....
Lars A. Justad

Martin D. Granum

.....
Martin D. Granum

Innhold

1	Innledning.....	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Problemstilling	1
1.3	Begrensninger.....	2
2	Svalgang.....	3
2.1	Hva er en svalgang?	3
2.2	Historisk utvikling.....	3
2.3	Branner tilknyttet svalgang	4
2.4	Regelverk	8
2.5	Utvikling av regelverk.....	11
3	Caset.....	12
3.1	Bygningsplater som fraviksløsning.....	13
3.2	Berørte funksjonskrav	14
3.3	Brannscenario – Verst tenkelig	14
4	Platene.....	15
4.1	Cembrit AS.....	15
4.2	Cetris – 12 mm	15
4.3	Cembrit Construction (Frontex) – 10 mm.....	16
4.4	Teknisk godkjenning	17
5	Standarder.....	18
5.1	ISO-834 Standardbrann.....	18
5.2	ISO 9705 Brannrom	19
5.3	Akseptkriterier.....	19
5.4	Brannmotstand i bygningsdeler.....	20
6	Teori.....	22
6.1	Varmetransport.....	22
6.2	Brann i rom.....	25
6.3	Rømningstid	27
7	Metode	30
7.1	Forsøket.....	30
7.2	ResQ.....	30
7.3	Forsøksrommet.....	30
7.4	Forberedende arbeid.....	32
7.5	Utstyr tilknyttet forsøket	36
7.6	Forsøksforberedelse	37

7.7	Test av isolasjon og integritet.....	45
7.8	Gjennomførelse av forsøk	46
8	Resultat	48
8.1	Værforhold 11. mars 2020	48
8.2	Hendelsesforløp.....	48
8.3	Observasjoner.....	51
8.4	Cetris etter forsøket	52
8.5	Construction etter forsøket.....	53
8.6	Måling fra forsøket.....	54
9	Diskusjon	58
9.1	Brannforløp	58
9.2	Brensel.....	58
9.3	Stråling	59
9.4	Cetris og Construction – Isolasjon	60
9.5	Cetris og Construction – Integritet.....	61
9.6	Værpåvirkning.....	61
9.7	Berørte funksjonskrav	62
9.8	Usikkerhet og feilkilder.....	63
9.9	Videre arbeid	64
10	Konklusjon	65
11	Referanser	66
	Vedlegg A – Håndberegninger av forventet stråling.....	69
	Vedlegg B – Håndberegninger for brenselstyrt brann	71
	Vedlegg C – Håndberegninger for ventilasjonsstyrt brann.....	73
	Vedlegg D – Målt stråling under forsøket	74
	Vedlegg E – Forventet stråling fra dør + målt stråling fra vindu	75
	Vedlegg F – Beregning av eksponering for stråling.....	77
	Vedlegg G – Målte temperaturer.....	79
	Vedlegg H – Sikker jobbanalyse (SJA)	80

Figurliste

Figur 3.1 – Bygningsplatenes plassering	13
Figur 4.1 – Skrueplassering Cetris.....	16
Figur 4.2 – Skrueplassering Construction.....	17
Figur 5.1 – Standardbrann fra ISO-834 med starttemperatur 20 °C.....	18
Figur 5.2 – Brannrom fra ISO-standard 9705.....	19
Figur 5.3 – Plassering av måleelementer	20
Figur 6.1 – Faser i brannforløp [25].....	25
Figur 6.2 – Beskrivelse av ASET, RSET og sikkerhetsmargin [30]	27
Figur 6.3 – Sammenhengen mellom persontetthet og ganghastighet	28
Figur 6.4 – Påvirkning av varmeflukt over tid [32].....	29
Figur 7.1 – Forsøksrommet illustrert med innvendige mål.....	31
Figur 7.2 – Trekonstruksjonen plassert på forsøksrommet.....	33
Figur 7.3 – Plassering av gipstak og treskjerm	33
Figur 7.4 – Plassering av gipsplater under platene	34
Figur 7.5 – Ramme til testplatene med tilhørende mål	35
Figur 7.6 – Testplate montert på ramme med skrueplassering	35
Figur 7.7 – Henholdsvis termoelement over brenselskar og i vindu	41
Figur 7.8 – Termoelementene på ueksponert side av Cetris.....	42
Figur 7.9 – Termoelementene på ueksponert side av Construction.....	43
Figur 7.10 – Plassering av termoelementer på ueksponert side av testplatene.....	46
Figur 8.1 – Oversikt over kanalnummerering av termoelement	54
Figur 8.2 – Temperaturmålinger over brenselskar og i vindu	54
Figur 8.3 – Temperaturmålinger under forsøk på Cetris 12 mm forsøksplate.....	55
Figur 8.4 – Temperaturmålinger under forsøk på Construction 10 mm forsøksplate	55
Figur 8.5 – Gj.temp. på ueksponert side og temperatur målt øverst i vindu.....	56
Figur 8.6 – Varmestråling som funksjon av tid	57
Figur 8.7 – Samlet stråling som funksjon av tid	57

Bildeliste

Bilde 2.1 – Høyblokkene i Haugesund, 15.05.20	3
Bilde 2.2 – Elverumsstuen på Glomdalsmuseet [4].....	4
Bilde 2.3 – (Foto: Recto Correa (venstre) og Thor Kr. Adolfsen (høyre)) [6]	6
Bilde 2.4 – Resultat av brann i Kvinesdal omsorgssenter (Foto Thor Kr. Adolfsen) [7]	7
Bilde 3.1 – Fasadeutforming til byggverk fra caset.....	12
Bilde 4.1 – Cetris (12 mm) [14].....	15
Bilde 4.2 – Construction (10 mm) [16].....	16
Bilde 7.1 – Satellittbilde over forsøksområdet [35].....	31
Bilde 7.2 – Konstruksjonen ferdigstilt til testbrann	32
Bilde 7.3 – Festemetode for ramme i konstruksjonen	36
Bilde 7.4 – Henholdsvis brensel under forsøksbrannen og under testbrann.....	38
Bilde 7.5 – Brenselskaret plassert i ISO-rommet.....	39
Bilde 7.6 – Termoelement igjennom gipsvegg på den branneksponte siden.....	41
Bilde 7.7 – Planker holder fast termoelementene på platen ved hjelp av treklemmer.....	42
Bilde 7.8 – Platetermometerets plassering.....	43
Bilde 7.9 – Oversiktsbilde av kameraplasseringene	44
Bilde 7.10 – Oppsett av datalogger og PC	44
Bilde 7.11 – Observatør beskyttes mot røyk av vernemaske og tar notater	45

Bilde 7.12 – Bomullstesten	45
Bilde 8.1 – Eksponert side og deler av ueksponert side til Cetriss.....	52
Bilde 8.2 – Tverrsnitt og biter av eksponert side av Cetriss.....	52
Bilde 8.3 – Eksponert og ueksponert side til Construction etter forsøk	53
Bilde 8.4 – Tverrsnitt og eksponert side til Construction etter forsøk.....	53

Tabelliste

Tabell 2.1 – Veiledninger som skal sammenlignes	8
Tabell 2.2 – Sammenligning av veiledninger til byggteknisk forskrift	9
Tabell 4.1 – Teknisk data for Cetriss (12 mm).....	15
Tabell 4.2 – Teknisk data for Construction (10 mm).....	17
Tabell 6.1 – Eksempler på virkning av forskjellig mengde varmestråling [20]	29
Tabell 7.1 – Forsøksrommet og ISO-rommets dimensjoner.....	30
Tabell 7.2 – Brensel utnyttet ved forsøksbrann og testbrann.....	38
Tabell 7.3 – Oversikt over utstyr brukt ved forsøk og antall	39
Tabell 7.4 – Plassering av termoelement og tilhørende kanalnummer	40
Tabell 8.1 – Observasjoner under forsøket	51

Sammendrag

Hovedformålet med denne oppgaven var å undersøke om sementbaserte bygningsplater kunne brukes som flammeskjermer i et case mottatt fra ekstern veileder. I caset er det beskrevet en svalgangsløsning som har mangelfull beskyttelse fra strålevarme for evakuerende. Langs trappen fra svalgangen er det planlagt å montere to type plater, *Cetris* og *Cembrit Construction (Frontex)*. For å teste om disse platene kan brukes som flammeskjermer, ble det utført et forsøk på ResQ sikkerhetssenter i Haugesund. I dette forsøket ble platenes evne til å ivareta ytelsene integritet og isolasjon undersøkt. I tillegg ble det målt varmestråling, for å finne innfallende strålingen platene potensielt vil skjerme.

Caset har bakgrunn fra et funksjonskrav § 11-14-01, som blant annet angår rømning via svalganger. I veiledningen til dette kravet oppgis det en preakseptert ytelse, som skal beskytte evakuerende fra strålevarme. Denne går ut på at dersom avstanden mellom trappen, og ytterveggen er mindre enn 5 meter, skal det utføres branncellebegrensende skille, enten på veggen eller et trapperom. Siden denne ytelsen ikke blir tatt i bruk ved svalgangsløsningen fra caset, var det av interesse å teste om bygningsplatene kunne brukes som et kompenserende tiltak.

Under forsøket ble både *Cetris* og *Construction* festet utenfor et vindu til et tilnærmet ISO-rom. Brannen var plassert midt i rommet, men gikk ut den eneste åpningen (vinduet). Plasseringen av platene ble valgt på bakgrunn av en konservativ utforming av byggverket fra caset. Det ble plassert ulike målelementer i rommet og vinduet, samt foran og bak platene. Målingene fra disse ble brukt for drøfting rundt brannen, og for å avgjøre isolasjonsevnen til platene. For å undersøke integriteten til platene, ble det gjennomført observasjoner under og etter forsøket, samt bomullstest. Samtidig ble det gjort strålingsmålinger fra vinduet og tatt videoopptak.

Forsøket viser at hvis det blir høye nok temperaturer, vil strålingen fra brannen kunne forårsake skade på personer som evakuerer ned trappen. Så lenge platene tåler brannpåkjenningen, vil varmestråling ikke kunne passere, og de vil derfor gi en beskyttelse mot innfallende stråling.

Ytelsene integritet og isolasjon vises å være forskjellig mellom *Cetris* og *Construction*. Integriteten til *Construction* ble ivaretatt lengre, og *Cetris* viste seg å ha bedre isolasjonsevne. Ved en konstant brannpåkjenning i likhet med den fra forsøket, vil platene kunne ivareta ytelsene i minst 26 minutter. Etter denne tiden blir det første kriteriet overskredet, og da også den første ytelsen ble svekket. Dette var isolasjonsevnen til *Construction*.

I tillegg til funksjonskravet § 11-14-01, ble det funnet at § 11-11-05 også er berørt av mangel på beskyttelse fra stråling. Siden begge kravene omhandler skjerming fra stråling, kan bygningsplatene brukes som en alternativ løsning. Hvorvidt platene alene kan tilfredsstillere funksjonskravene, eller om de må kombineres med andre, må bli undersøkt i ytterligere analyse.

Summary

The main objective of this thesis was to explore the possibility of using cement building boards as flame screens in a case given from external supervisor. This case is described with an exterior gallery design with missing protection from heat radiation for people evacuating the building. Along the stairs from the exterior gallery, plans have been made to install two types of building boards, *Cetris* and *Cembrit Construction (Frontex)*. To test if these boards can be used as flame screens, a fire experiment was conducted at ResQ safety center in Haugesund. The focus of the fire experiment was to test the structural integrity and heat insulation under strenuous conditions.

The regulations as of *Teknisk forskrift § 11- 14- 01* states the proper ways to use exterior gallery as an escape route. The regulations require that the evacuation route should be protected from heat radiation. The requirements specify that if the distance between the stairs and outer wall is less than 5 meters, the stairs must be protected by fire-resistant building element, either at the wall or stairwell. Since this requirement hasn't been fulfilled, alternative solutions should be put in place without compromising the performance. Therefore, it was of interest to see if the building boards can be used in compensation.

During the experiment both boards were mounted outside a window to a room which was an approximate replication of an ISO-room. The fire was placed in the middle of the room with all openings closed except the window. The placement of the boards was chosen to adhere to the conservative design of the building given in the case. Thermocouples were situated in the room and window, as well as the front and backside of the building boards, to measure temperatures during the experiment. These measurements were then used to assess the test fire, and to evaluate the board's insulating capabilities. To examine the integrity of the boards, observations were undertaken during and after the experiment, including a cotton fibre test. Simultaneously, heat radiation was measured and the experiment was recorded.

The experiment shows that at high enough temperatures, the heat radiation from the fire may harm people using the staircase at the time of an evacuation. As long as the boards can withstand the open flame, the heat radiation cannot pass through, and the escape route is secured.

The integrity and insulation between *Cetris* and *Construction* are noticeably different. *Construction's* integrity proved better than *Cetris's*, although *Cetris* had notably better insulation. During the fire strain test the boards lasted for 26 minutes before any acceptance criterium failed. The first to fail was *Construction*, by breaking the insulation criterium.

In addition to the regulation as of § 11-14-01, it was found that regulation § 11-11-05 was also affected by missing protection from heat radiation. Both, however, insure protection from heat radiation. The boards can be used as a dual alternative solution to meet both demands. Whether or not the board can fulfil said requirements on their own, or must be combined with other solutions, further study will need to be carried out.

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

I etterkrigstiden var Skandinavias boligbebyggelse i sentrale bystrøk preget av flere boligtyper som hadde hovedfokus på arealoptimalisering. Horisontaldelte boliger er en av disse typene [1]. Personer i andreetasjen som ønsker å komme seg til bakkenivå, må som oftest benytte en svalgang og en tilhørende trapp. Ved en slik løsning vil det si at svalgang blir benyttet som rømningsvei. Dette vil kunne skape problemer i sammenheng med brannsikkerhet, og vil derfor være et sentralt punkt i denne oppgaven.

En svalgang utført som en rømningsvei vil ha mange ulikheter fra en avlukket rømningsvei, men det skal fortsatt kunne gi den samme tryggheten under rømning. Det at svalgangen er åpen vil ha en betydelig innvirkning på ulike faktorer. Eksempelvis vil horisontal brannspredning forekomme lettere, men det vil oppstå en tydelig mindre samling av røyk og giftige gasser. En markant ulempe ved åpenheten, er at dersom avstanden mellom trappen og vinduet i underetasjen er for kort, vil personer som bruker trappen til evakuering bli truffet av stråling fra vinduet.

1.2 Problemstilling

Denne oppgaven vil fokusere på innfallende stråling på trapper ved svalgangsløsninger dersom det brenner i underetasjen. I veiledningen til dagens byggt teknisk forskrift (VTEK17) står det at evakuerende skal beskyttes fra strålevarme, enten med en 5 meters avstand, eller et branncellebegrensende skille mellom trapp og byggverk [2]. Dersom disse løsningene fravikes, må en alternativ løsning vises å være likeverdig. På vegne av oppdragsgiver skal det derfor undersøkes om sementbaserte bygningsplater kan gi denne kompensierende sikkerheten. Oppgaven vil derfor dreie seg om et case, hvor verken avstanden eller brannskille er tilfredsstillende. Strålevarmen skal undersøkes, samt effekten dersom bygningsplatene implementeres, hvor egenskapene isolasjon og integritet er i fokus.

For å kunne svare på problemstillingen i denne oppgaven, utføres ett forsøk. Forsøket er en konservativ tilnærming av et scenario for et horisontaldelt bygg med svalgang. Resultatene fra forsøket vil bli analysert for videre vurdering i rapporten. Deretter blir det gjort en endelig konklusjon basert på resultatene og vurderingen for å si noe om hvordan platene fungerer som flammeskjerm innenfor den gitte tiden.

1.3 Begrensninger

- Det forutsettes at bygget kun er for beboende som kan rømme uten hjelp, og at bygget er i risikoklasse 4. Faktorer som rømningshastighet vil derfor vurderes opp mot denne risikoklassen.
- Oppgaven tar kun for seg innfallende stråling dersom et automatisk slokkesystem ikke aktiveres. Hvis et slikt system brukes, vil utfallet bli annerledes.
- Oppgaven begrenser sitt omfang til den gitte bygningsutformingen, ved brannscenarioet beskrevet i kapittel 3.3. Den kan dermed ikke si noe om hvordan platene vil virke i andre branntilfeller eller bygningskomplekser.
- Forsøket ble utført på et område med skiftende værforhold og et forsøksrom som da hadde varierende fuktighetsnivå.
- Under forsøket får platene kun brannpåkjenning fra en A¹ og B² brann, hvor brenselet også ble plassert langt unna. Resultatene vil derfor være ulike fra hva en får ved standardiserte tester, som bruker en direkte brannpåkjenning fra gassbrann.
- Det skal kun utføres forsøk for stråling fra vinduet. Stråling fra døren blir funnet ved håndberegninger.
- Ved håndberegninger knyttet til innfallende stråling, utføres det noen forenklinger. Disse vil gi et mindre virkelighetsnært, men konservativt resultat.
- Når temperatur fra platetermometere blir omgjort til innfallende stråling, vil flere parametere bli ekskludert. Ytterligere forklaring blir presentert i vedlegg D.

¹ Brann i fast organisk materiale

² Væskebrann

2 Svalgang

2.1 Hva er en svalgang?

Svalgang kan defineres som en åpen, men overbygd adkomstvei til byggverk, minst en etasje over bakkeplan. Det er en arealeffektiv måte for personer å kunne bevege seg over flere plan siden det da ikke er nødvendig med trapper eller trapperom inne i selve bruksenheten. [3]

Som nevnt i innledning er svalgang vanlig i horisontaldelte boliger, men det forekommer også i større leilighetskomplekser, som for eksempel vist på Bilde 2.1. Dette medfører vanligvis at svalgang vil være en del av en rømningsvei, eller utgjøre hele rømningsveien. På grunn av dette er det svært viktig at svalgangsløsninger utføres i henhold til branntekniske krav. Adkomst til svalgang skjer via utvendig trapperom eller utvendig åpen trapp. [3]



Bilde 2.1 – Høyblokkene i Haugesund, 15.05.20

2.2 Historisk utvikling

Sval kommer fra det norrøne ordet «svalr» som betyr kjølig, da svalgangen er ute og ikke oppvarmet. I eldre norsk bygningskunst har svalgang blitt brukt som forbindelsesgang, spesielt på loft eller i bygårder. Som vist på Bilde 2.2 kan en se et eksempel på hvordan svalgang har blitt utført tidligere. Den er utformet slik at det er mulighet for å tre inn i rommene fra første og andre etasje. [4]



Bilde 2.2 – Elverumsstuen på Glomdalsmuseet [4].

Fra 1600-tallet ble det vanlig med svalgang i bolighus i Norge. Dette gjaldt både for bygninger på landet og i byer. Det ble populært å utforme boliger med svalgang fordi hus ofte ble bygget med to etasjer. Dette fordi peis og skorstein ble vanlig i norske hus. Den overbygde svalgangen ble lagt utpå den faktiske bygningskonstruksjonen, med tilgang til hvert rom via dører. [4]

2.3 Branner tilknyttet svalgang

Delkapitlet beskriver tidligere brann i boliger med svalgang og det skal bli belyst hvilke momenter som har sviktet under brannen.

2.3.1 Solplassen bo- og servicesenter – Bergen, 2000

Skadeomfang:

- 2 personer lettere røyk- og brannskadet
- 5 boliger røyk- og vannskadet
- 5 boliger totalskadet

Kvelden 22. november 2000 brant det i Kjøkkelvikkbrekkene 22 i Bergen. Rekkehuset besto av flere boliger, der den ene delen var tildelt Solplassen bo- og servicesenter. Det var totalt 10 boliger over to plan for eldre personer som Solplassen bo- og servicesenter disponerte.

Årsaken til brannen ble konstatert til å være et elektrisk varmeteppe fra den ene leiligheten. Til tross for at Bergen brannvesen var på stedet ca. syv minutter etter varsling, rakk brannen å spre seg over hele østre fasade.

Bergen Brannvesen, Statens bygningstekniske etat og byggesaksavdelingen i Bergen kommune kom frem til at disse årsakene var de medvirkende til brannspredningen [5]:

Rask spredning fra start- brannrom og start-branncelle

Dører ble ikke lukket og mistet derfor sin funksjon som branncellebegrensende bygningsdel. Dette fører til spredning igjennom svalgang.

Avvik fra byggetillatelse og byggeforskrift

Funn av avvik i detaljutførelser fra byggetillatelse og krav i gjeldende forskrifter. Det nevnes svalgang som avviker med tanke på krav om rømningsveier og luftspalte i takutstikk på tvers av brannceller og inngangsparti.

Svalgang/takutstikk – «liggende skorstein»

Når brannen var ute av leiligheten bidro utformingen av bygningen til eksplosjonsartet spredning. Vinden har bidratt til branngasser forflyttet seg raskt langs takutstikket.

Husrekkene sto i et værutsatt område, noe kommisjonen mente hadde betydelig påvirkning for brannens utvikling. Det ble til slutt vurdert at byggeforskrift av 1987 som var gjeldende for denne bygningen, kombinert med preaksepererte løsninger som hjemlet i perioden brannen skjedde, ikke har vist hensyn til det samspillet som var mellom byggets utforming og de topografiske- og metrologiske forholdene for det geografiske området. [5]

2.3.2 Prestmosvegen 15 – Nannestad, 2008

Skadeomfang:

- 2 personer lettere skadd
- 14 av 16 boliger totalskadd
- 2 av 16 boliger omfattende skade

Natten 28. september 2008 brant det i boligbygningen i Prestmosvegen 15 i Nannestad. Husrekkene besto av en boligbygning på to etasjer fordelt på 16 leiligheter. Til høyre i Bilde 2.3 er utformingen av nabobygningen vist, som tilsvarende den som brant. Brannen var ifølge politiet påsatt, og det er usikkert hvor lenge brannen pågikk før det ble varslet. Vegger og etasjeskiller var oppført med EI 30, og under befaring så en at det ikke var her brannspredning hadde skjedd. Den ble påsatt på utvendig terrasse ved balkongfasaden og brannspredningen har foregått utvendig. I tillegg til at bygget var utformet med svalgang og balkonger i brennbart materiale, var vind også en vesentlig faktor for den raske spredningen. Til venstre i Bilde 2.3 kan en se utviklingen av brannen. [6]



Bilde 2.3 – (Foto: Recto Correa (venstre) og Thor Kr. Adolfsen (høyre)) [6]

I evalueringsrapporten ble det stilt spørsmål om kravene til svalgang er tilstrekkelige med tanke på overflater/materialer og rekkverk. Det kom frem at golvbelegg klasse G³ bidrar til brannutviklingen når brannen når en avgjørende størrelse. Det ble likevel konkludert med at det ikke var svalgangen i seg selv som var skylden til brannspredningen. Med riktig utførelse skal svalgang gi like trygg rømning som med korridor. Det hadde ikke vært tilstrekkelig branndokumentasjon for bygget og utførelsen av bygningen samsvarte ikke med den branndokumentasjonen som var tilgjengelig. [6]

³ Tidligere klassifisering av brannpåvirkning for gulvbelegg

2.3.3 Kvinesdal omsorgssenter – Kvinesdal, 2019

Skadeomfang:

- 7 av 7 boliger totalskadd

Ettermiddagen 28.juli 2018 fikk Brannvesenet Sør IKS varsel om automatisk brannalarm fra Kvinesdal omsorgssenter som består av omsorgsboliger, sykehjemsdel og bosted for asylsøkere.



Bilde 2.4 – Resultat av brann i Kvinesdal omsorgssenter (Foto Thor Kr. Adolfsen) [7]

På grunn av at store deler av innkallingsmannskapet ikke hadde kommet hjem fra et tidligere oppdrag, var det kun to personer tilgjengelig i Kvinesdal brannvesen til å rykke ut til omsorgsboligene. Da brannvesenet ankom åstedet var boligen hvor brannen oppsto overtent. På grunn av dårlige brannskiller har brannen spredd seg til omliggende leiligheter. Denne spredningen forekom via gesimskassene ifra svalgangen og opp til loftene. Dette medførte til at syv leiligheter ble totalskadet. Bilde 2.4 viser hvordan det så ut etterpå. I etterkant av brannen uttalte brannsjef Jon Inge Aasen dette om hendelsen [7]:

Gipsplatene på loftet var ikke montert på stendere slik det skal gjøres. Dette medførte at lange strekk langs gipsplatenes skjøter ikke var skikkelig festet. Konsekvensen blir at veggen tåler lite mekanisk belastning. Den tåler heller ikke store trykkvariasjoner som ofte oppstår under en brann. Dessuten var ikke brannskillet tett ved takfoten under svalgangsløsningen. Svalgangsløsninger er tillatt, men er uheldig i forhold til røyk- og brannspredning, sier Aasen.

Alle slokkeledere leter etter brannskillende konstruksjoner. Det er disse konstruksjonene brannvesenet benytter som hjelpemiddel for å unngå brannspredning, forklarer han.

Artikkelen viser også til at det i bygningsprosessen ble slurvet med byggemetodene, noe som gikk utover brannskillene som kan ha medført til at de mistet sin funksjon. [7]

2.4 Regelverk

2.4.1 Plan- og bygningsloven

Lov om planlegging og byggesaksbehandling, også omtalt som Plan- og bygningsloven (PBL), er en lov som bestemmer hvordan landets arealer skal brukes og reguleres. Den består av regelverk knyttet til arealplanlegging, byggesaker, samt ulike materielle krav til byggverk. [8]

2.4.2 TEK17

Byggteknisk forskrift (TEK) har hjemmel i PBL, og er skrevet av Direktoratet for byggkvalitet (DiBK). For å kunne oppføre et byggverk i Norge skal minimumsegenskapene presentert i forskriften oppfylles. Egenskapene presenteres i form av funksjonskrav. Disse kan være fortolket og blir dermed oppgitt som ytelseskrav. Veiledningen til forskriften (VTEK) gir ytterligere fortolkning av funksjonskravene, ved å oppgi beskrivelse og preaksepterte ytelser som vil hjelpe med å tilfredsstille kravene. Dersom en velger å fravike de preaksepterte ytelsene, må det gjøres en analyse hvor det dokumenteres at de alternative ytelsene gir samme kvalitet og sikkerhet, som de preaksepterte. [2]

2.4.3 Sammenligning av veiledninger til teknisk forskrift

Det eksisterer ingen direkte funksjonskrav som nevner svalgang i byggteknisk forskrift. Første gang svalgang blir nevnt i regelverket, er i 1. utgave av REN veiledning til teknisk forskrift fra 1997 (VTEK97). Kravene til svalgang blir først relevante dersom svalgangen er blitt gitt en funksjon. Dette gjelder for eksempel om svalgang skal bli brukt som rømningsvei, og da er det § 11-14 Rømningsvei som gjelder per dags dato. [9]

Kapittelet skal se nærmere på den utvikling som har skjedd i veiledninger til teknisk forskrift med hensyn til brannsikkerhet i byggverk med svalgangutforming. Veiledninger fra TEK97, TEK10 og TEK17 sammenlignes i Tabell 2.2. I kapittel 2.5 vil utviklingen kommenteres.

Under i Tabell 2.1 er de veiledningene som skal sammenlignes listet.

Tabell 2.1 – Veiledninger som skal sammenlignes

Forskrift	Veiledning til forskrift	Årstall	Utgave
Forskrift om krav til byggverk (TEK97)	REN veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven (VTEK97)	1997	1. utgave
Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10)	Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK10)	2010	1. utgave
Forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK17)	Veiledning om tekniske krav til byggverk (VTEK17)	2017	2. utgave (siste utgave d.d.)

Tabell 2.2 – Sammenligning av veiledninger til byggt teknisk forskrift

Krav til	VTEK97 [10]	VTEK10 [11]	VTEK17 [2]
Antall trapper	Svalgangen må ha minst to trapper til terreng, en i hver ende. Avstanden mellom trappene må ikke være over 60 m.	Svalgangen må (...) ha minst to trapper til terreng, en i hver ende. Avstanden mellom trappene må ikke være over 60 m, (...)	Svalgang og altangang må derfor ha minst to trapper til terreng, en i hver ende. Avstanden mellom trappene må ikke være over 60 meter.
Rømningsvei	Svalgang kan være rømningsvei eller del av rømningsvei. Med mindre branncellene også har direkte utgang til sikkert sted, må svalgangen utføres slik at den tilfredsstillende forutsetningene om to uavhengige rømningsveier (...) og krav om omsluttende branncellebegrensede bygningsdeler. I ytterveggen mot svalgangen vil det som regel være vinduer som kan åpnes og som ikke har den nødvendige brann tekniske klassifisering. En brann i branncellen bak vinduet vil på kort tid kunne hindre eventuell rømning, og alternative rømningsveier må derfor etableres	Med mindre branncellene også har direkte utgang til sikkert sted, må svalgangen utføres slik at den tilfredsstillende forutsetningene om to uavhengige rømningsveier.	Svalgang og altangang kan være rømningsvei eller del av rømningsvei (...)
Oppdeling av svalgang	(Ikke nevnt)	Svalganger som er lengre enn 30 m må oppdeles med branncellebegrensede bygningsdeler med innbyrdes avstand på maksimum 30 m for å begrense den horisontale brannspredningen.	Svalgang som er lengre enn 30 meter må oppdeles med branncellebegrensede bygningsdeler med innbyrdes avstand på maksimum 30 meter for å begrense den horisontale brannspredningen, (...)
Antall trapper i lave bygg	I bygninger oppført i brannklasse 1 hvor det er tilrettelagt for bruk av vindu som rømningsvei, er det tilstrekkelig med én trapp under forutsetning av at avstanden fra dørene i branncellene til trappen ikke er over 15,0 m.	I byggverk i brannklasse 1 hvor det er tilrettelagt for bruk av vindu som rømningsvei, er det tilstrekkelig med en trapp, under forutsetning av at avstanden fra dørene i branncellene til trappen ikke er over 15 m og at rømning ikke forutsettes forbi uklassifisert vindu i annen branncelle.	I byggverk i brannklasse 1 hvor det er tilrettelagt for bruk av vindu som rømningsvei, er det tilstrekkelig med én trapp. Dette gjelder under forutsetning av at avstanden fra dør i branncelle til trappen er maksimalt 15 meter, og at det ikke må rømmes forbi uklassifisert vindu i annen branncelle.
Åpen svalgang	Svalgangen må være mest mulig åpen, slik at røyk- og branngasser kan unnslippe. Om den åpne delen er 1/3-del av den totale «veggflaten», vil dette være tilfredsstillende.	Svalgangen må være mest mulig åpen, slik at røyk- og branngasser kan unnslippe. Om den åpne delen er 50 % av den totale «veggflaten», antas dette å være tilfredsstillende. Det er den øverste delen av veggflatene som må være åpen. Åpning i rekkverk er ikke å anse som åpent areal.	Svalgangen må være mest mulig åpen slik at røyk- og branngasser kan unnslippe. Om den åpne delen er 50 prosent av den totale «veggflaten», antas dette å være tilfredsstillende. Det er den øverste delen av veggflatene som må være åpen. Åpning i rekkverk er ikke å anse som åpent areal.
Beskyttelse av trapp	Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i bygget. Derfor	Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i byggverket.	Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i byggverket.

	<i>må enten de veggene som vender mot bygget utføres som branncellebegrensende konstruksjon eller byggets yttervegg mot trappen og 5,0 m til hver side for denne, være utført i branncellebegrensende konstruksjon med tilsvarende krav til bygningsdelene (...)</i>	<i>Derfor må enten de veggene som vender mot bygget utføres som branncellebegrensende konstruksjon eller byggets yttervegg mot trappen og 5 m til hver side for denne være utført i branncellebegrensende konstruksjon med tilsvarende krav til bygningsdelene, (...)</i>	<i>Derfor må enten de trapperomsveggene som vender mot byggverket eller byggverkets yttervegg mot trappen og 5,0 meter til hver side for denne, være utført som branncellebegrensende konstruksjon, (...)</i>
Bredde til svalgang	<i>Svalgangen bør være minst 1,20 meter bred for at den skal fungere som flammeskjerm.</i>	<i>Svalgangen må være minimum 1,2 m bred for at den skal fungere som flammeskjerm. I bygning med boenhet med krav om heis, flerbolighus med tilgjengelig boenhet og byggverk med krav om universell utforming skal likevel svalgang (...) ha fri bredde på minimum 1,5 m. På lange svalganger må det avsettes tilstrekkelig areal til at to rullestoler kan passere hverandre. Dette tilsvarer bredde på 1,8 m. Korte strekninger under 5,0 m, der det ikke er dør, kan ha fri bredde på minimum 1,2 m.</i>	<i>Svalgang og altangang må være minimum 1,20 meter bred for at den skal fungere som flammeskjerm.</i>
Begrenset brennbart materiale	<i>Rekkverk og øvrige konstruksjoner bør bestå av minst mulig brennbare materialer. Gulv i svalgang må være utført som branncellebegrensende konstruksjon.</i>	<i>Gulv i svalgang må være utført som branncellebegrensende konstruksjon med overflate Dfl-s1 (G. Kledning på vegg og tak må være som for rømningsvei). Overflaten kan være B-s3,d0 (Ut 1). I byggverk med mer enn to etasjer må rekkverk og øvrige konstruksjoner bestå av ubrennbare eller begrenset brennbare materialer, dvs. klasse A2-s1,d0.</i>	<i>Gulvet i svalgang og altangang må være utført som branncellebegrensende konstruksjon med overflate Dfl-s1 (G). Kledning på vegg og tak må være som for rømningsvei. Overflaten kan være B-s3,d0 (Ut 1). I byggverk med mer enn to etasjer må rekkverk og øvrige konstruksjoner bestå av ubrennbare eller begrenset brennbare materialer, det vil si klasse A2-s1,d0.</i>
Tak over svalgang	(Ikke nevnt)	<i>Tak over svalgang er svært uheldig og må unngås med mindre overflater på vegger og tak har gode branntekniske egenskaper. Takutstikk må utføres horisontalt og tett (mot for eksempel oppforet tak/kaldt loft) slik at røyk og branngasser kan slippe uhindret ut til det fri.</i>	<i>Dekke og takutstikk over svalgang må utføres horisontalt og tett (mot for eksempel oppforet tak eller kaldt loft) slik at røyk- og branngasser kan slippe uhindret ut til det fri.</i>

2.5 Utvikling av regelverk

Det er blitt gjort flere endringer i veiledningen fra den første utgaven av VTEK97 til VTEK10. Det har vært fire utgaver av VTEK97 og utviklingen har ikke vært så forhastet som Tabell 2.2 kan antyde.

Det er blitt strengere og mer spesifiserte krav fra VTEK97 til VTEK10. Dette gjelder blant annet for krav om gulvoverflate. VTEK10 og -17 har definerte brannklassifikasjoner til gulvets overflate, men VTEK97 har kun krav til at gulvet skal være utført som branncellebegrensende konstruksjon. Et annet eksempel på en innstramning, er i krav om fri bredde i svalgang. Fra VTEK97 til VTEK10 er kravet endret fra at «svalgangen bør være minst 1,20 meter bred» til «svalgangen må være minst 1,20 meter bred». Krav til takutformingen over svalgang blir ikke beskrevet i VTEK97, men har fått krav om å «utføres horisontalt og tett» i VTEK10 og -17. Det samme gjelder kravet om at svalganger lenger enn 30 m skal «oppdeles med branncellebegrensende bygningsdeler».

Brannene som er nevnt har hatt betydning for den endring som har skjedd i veiledningene. Dette kommer blant annet frem ved at den nevnte brannen i Nannestad ble bemerket i avropsbestillingen fra DiBK. Der legges det til grunn at evalueringsrapporten fra brannen var et av grunnlagene for at de ønsker en utredning som skal behandle de preaksepterte ytelsene for svalgang. [12]

Et gjentakende problem for de tidligere nevnte brannene i oppgaven er at bygningsutformingen ikke har stått i stil med det gjeldende regelverket. Dette er også noe som blir presisert i SINTEF sin rapport fra 2003 «Utførelse av svalgang som rømningsvei». Den kom frem til at ca. 56 % av de undersøkte omsorgsboligene med svalgang, ikke hadde tilfredsstillende kravene til svalgang som rømningsvei [13]. Siden regelverket for svalgang har blitt mer konkretisert kan dette ha bidratt til å gi mindre rom for «egne» løsninger. Dette kan føre til mindre feil under utførelser av svalgang og at svalgang opprettholder sin funksjon i en eventuell brann.

Vind var en pådriver for brannspredning under alle tre brannene. Selv om brannene er blitt tatt i betraktning ved utbedring av veiledningene, finnes det ikke per dags dato noen ytelser som har som funksjon å beskytte mot vær og vind når det brenner i en svalgang.

3 Caset

Bygget som blir undersøkt er et horisontaldelt rekkehus, oppført i treverk med inngangsparti for både leiligheter i første og andre etasje på samme side. Byggverket det er tatt utgangspunkt i er avbildet i Bilde 3.1. Geometrien fra dette bygget er blitt brukt som referanse for forsøket, og de relevante målene er listet under bildet. Trappeoppgangen går over inngangspartiet i første etasje. Inngangspartiet består av soveromsvindu og inngangsdør. Trappen kommer ned fra en svalgang og er eneste tilgjengelige rømningsvei for beboere i andre etasje som ikke involverer klatring på tak eller ut vindu.



Bilde 3.1 – Fasadeutforming til byggverk fra caset

Relevante mål fra caset:

Areal til vinduet:	1,00 m ²
Areal til døren:	1,80 m ²
Avstand fra vindu til trapperekkverk	0,44 m
Avstand fra vindu til under trappen	0,31 m
Avstand fra dør til trapperekkverk	2,87 m
Avstand fra dør til undertrappen	2,74 m
Avstand fra vindu til tak	0,42 m

3.1 Bygningsplater som fraviksløsning

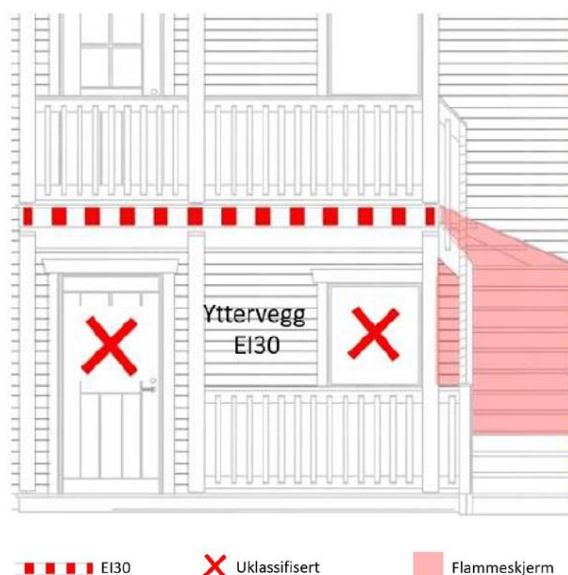
I VTEK17 § 11-14, første ledd heter det at [2]:

Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i byggverket. Derfor må enten de trapperomsveggene som vender mot byggverket eller byggverkets yttervegg mot trappen og 5,0 meter til hver side for denne, være utført som branncellebegrensende konstruksjon, (...)

En kan se i de relevante målene at avstanden fra trappen er under 5 meter, både fra døren og vinduet. Vanligvis har yttervegger brannmotstand på EI 30, eller høyere. Dette betyr at hvis dør og vindu også har brannklassifisering og døren er selvlukkende, er den preaksepterte ytelsen tilfredsstillt selv med en avstand på under 5 meter. Det blir tatt utgangspunkt i at ytterveggen fra caset er EI 30, men dør og vindu er uklassifisert.

I VTEK17 § 02-02, annet ledd nevnes det at dersom en preakseptert ytelse fravikes, må det dokumenteres at de alternative løsningene er likeverdig med de preaksepterte. Det finnes en rekke mulige fraviksløsninger som vil gjøre dette. Caset som denne oppgaven omhandler tar utgangspunkt i kun én av disse løsningene. Videre skal det undersøkes nærmere om denne vil kunne gi lik, eller bedre sikkerhet.

Fraviksløsningen innebærer at det tas i bruk de sementbaserte bygningsplatene nevnt i problemstillingen. Disse skal monteres langs rekkverket til trappen og under trappetrinnene. Dette illustrert i rødt i Figur 3.1. Platene vil fungere som flammeskjerner mot vinduet og døren, og skal sikre trygg rømming ned trappeløpet.



Figur 3.1 – Bygningsplatenes plassering

3.2 Berørte funksjonskrav

Det er to berørte funksjonskrav som vil avhenge av at platene fungerer som beskyttelse fra strålevarme. Disse oppgis i § 11-11 og § 11-14 i TEK17, og omhandler rømning.

I TEK17 § 11-14, første ledd heter det at [2]:

Rømningsvei skal på en oversiktlig og lettfattelig måte føre til et sikkert sted. Den skal ha tilstrekkelig bredde og høyde og være utført som egen branncelle tilrettelagt for rask og effektiv rømning.

Den preaksepterte ytelsen som fravikes hører til dette funksjonskravet. Selve funksjonskravet nevner ikke noe som direkte kan anvendes for caset, siden trappen er åpen og ikke kan utføres som en branncelle. Likevel kan elementer i svalgangsløsningen gi samme effekt. Blant annet vil en 5 meters avstand eller branncellebegrensende skille ha samme funksjon som en rømningsvei utført som en branncelle, i.e. beskytte evakuerende fra brann.

I TEK17 § 11-11, femte ledd heter det at [2]:

I den tiden en branncelle eller rømningsvei skal benyttes til rømning av personer, skal det ikke kunne forekomme temperaturer, røykgasskonsentrasjoner eller andre forhold som hindrer rømning.

Dersom platene ikke viser seg å være effektive flammeskjermer, vil dette tillate at varmestråling kan forhindre rømning. På grunn av dette vil funksjonskravet bli påvirket selv om det ikke er noen tilhørende preaksepterte ytelser som fravikes.

3.3 Brannscenario – Verst tenkelig

Det finnes mange scenarioer hvor en brann kan forårsake problematiske rømningsforhold. For å kunne sørge for at testplatene vil gi beskyttelse for alle disse, er det ønskelig å teste det verst tenkelige scenarioet. Flere løsninger i oppgaven vil derfor være konservative og kan være usannsynlige. Likevel vil dette gi en indikasjon på hvor god beskyttelse slike plater vil kunne gi.

Ved det verst tenkelige scenarioet vil vinduet være knust, og døren stå åpen. Begge rom har overtenning, flammen vil stå ut av åpningene, og dermed stråle vinkelrett på trappen. Dette vil avgi den sterkeste innfallende strålingen.

4 Platene

4.1 Cembrit AS

Platene som testes i denne oppgaven er to type bygningsplater, hvor Cembrit AS både er leverandør og produsent. Platene finnes i varierende tykkelser, og de kalles *Cetris* og *Cembrit Construction (Frontex)*. Videre i oppgaven vil de bli omtalt som *Cetris* og *Construction* eller med fellesbetegnelsen testplater. I tillegg til bygningsplater produserer Cembrit AS produkter innenfor tak, innvendige vegger og fasade. [14]

4.2 Cetris – 12 mm

Cetris er en sementsponplate som blir tatt i bruk innvendig og utvendig på byggverk. Den består av portlandsement, vann og trespon. Platen er sterk, hard, og godt egnet for nordiske vær- og vindforhold. Cetris brukes der det skal være brannbeskyttelse av undertak, underkledning for svalganger og balkonger, støyskjermer eller som utvendig og innvendig vegg- og takkledning med synlige fuger. Bruksområdene er passende med hvilke egenskaper produktet har, som fuktbestandig, styrke, skrue- og spikerfasthet og brannbeskyttelse. Overflaten og tverrsnittet av platen er vist i Bilde 4.1. [15]



Bilde 4.1 – Cetris (12 mm) [15]

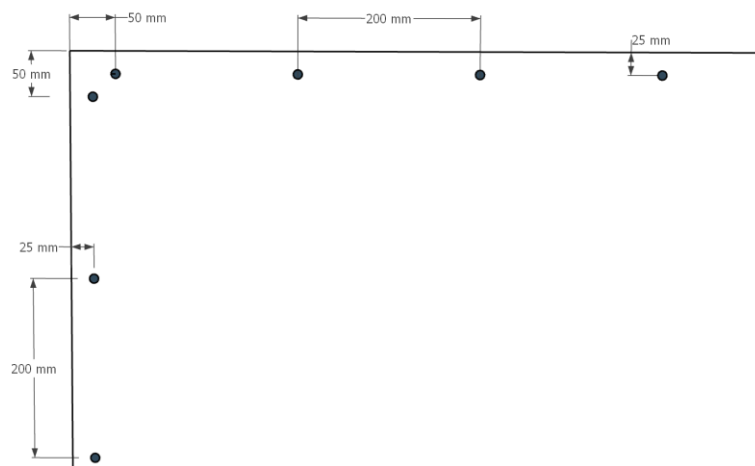
Under i Tabell 4.1 er en gjengivelse av platens tekniske data fra Cembrit sine datablad [16].

Tabell 4.1 – Teknisk data for Cetris (12 mm)

Egenskap	Verdi
Tykkelse	12 mm
Densitet	1350 kg/m ³
Elastisitetsmodul	6800 N/mm ²
Bruddfasthet	11,5 N/mm ²
Tverrstrekfasthet	0,5 N/mm ²
Tykkelsesvelling	<1,5 % etter 24 timer i vann
Utvidelse ved fuktighet i lengde- og bredderetning	For hver 1 % forandring i platens fuktinnhold: 0,03 % For hver 30 % forandringer i relativ fuktighet: 0,015 %

pH i platens overflate	12,5
Vanndampermeabilitet	14,81 [g/msPa]
Fuktinnhold ved levering	9,5 %
Lydisolasjon	Lydreduksjonsfaktor: 31 [dB] (A)
Brannklasse	A2-s1.d0

Cetris har egen monteringsanvisning utviklet av Cembrit AS. For utvendig bruk anbefales forboring på 1,2 x diameter, og rustfrie skruer med linsehode. Skruene skal bli skrudd inn med en lengde på minimum platetykkelsen + 30 mm. Skruel plasseringen er vist i Figur 4.1, og gjelder for platetykkelse mellom 8 – 14 mm. Skruene skal ha en 25 mm avstand fra platekanten. Avstand imellom skruene er 200 mm, og ved hjørnene skal avstanden være 50 mm. [16]



Figur 4.1 – Skruel plassering Cetris

4.3 Cembrit Construction (Frontex) – 10 mm

Construction er en ubehandlet fasadeplate. Den består av Portland-sement, uorganisk fillermateriale med armering av cellulosefibre, vannavstøtende midler og PVA. Som vist ved Bilde 4.2 er platen grå i fargen, og har en hard og sterk overflate. Platen er frostsikker, diffusjonsåpen, fuktbestandig og tåler aggressive miljøer. Construction blir ikke påvirket av mugg, sopp eller råte. Det vil si at i likhet med Cetris er den godt egnet for plassering ute i et nordisk klima. Med tanke på at fasadeplaten også er lydisolerende og vedlikeholdsfri er den tatt i bruk på idrettshaller, kontorer, bolighus eller som støyskjermer. Det er også muligheter for å kunne male platen slik at den passer inn i omgivelsene. [17]

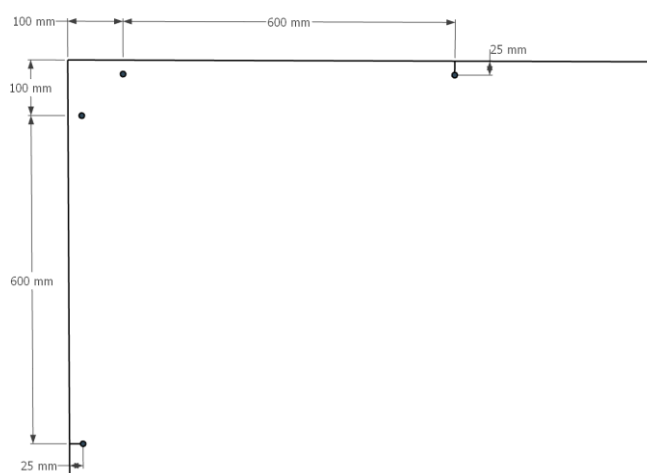


Bilde 4.2 – Construction (10 mm) [17]

Under i Tabell 4.2 er en gjengivelse av platens tekniske data fra Cembrit sine datablad [18].
 Tabell 4.2 – Teknisk data for Construction (10 mm)

Egenskap	Verdi
Tykkelse	10 mm
Flatevekt	18,9 kg/m ²
Densitet	>1550 kg/m ³
Elastisitetsmodul	≥8000 N/mm ²
Bruddfasthet	≥13 N/mm ²
Tverrstrekfasthet	Min. 0,5 MPa
Tykkelsesvelling	12 % etter nedsunken i vann
pH i platens overflate	11
Vanndampmotstand	3,15 GPa m ² s/kg
Brannklasse	A2-s1.d0

Cembrit AS har utviklet en egen anvisning for montering av Construction. Anvisningen anbefaler å bruke selvbordende skruer ved montering. Med disse er det ikke nødvendig å forbore. Skruene skal bli plassert 25 mm fra platekanten og 100 mm fra hjørnet. Lekteavstanden er på 600 mm. Se Figur 4.2 for illustrert plassering av skruene. [19]



Figur 4.2 – Skruelassering Construction

4.4 Teknisk godkjenning

Både Cetrus og Construction er testet i henhold til standarden NS-EN 13501-1: 2018, og har blitt klassifisert med brannpåvirkning A2-s1.d0⁴. Brannmotstanden til platene er ikke testet. Dette kommer av at det i hovedsak er bygningsdeler som klassifiseres med brannmotstand, og plateprodukter som Cetrus og Construction får heller kun en klassifisering innen brannpåvirkning. De er også mye brukt som fasadeplater, så det anses derfor ikke som nødvendig å ha brannmotstand. [2]

⁴ Brannklassifisering tilsvarende ubrennbar

5 Standarder

Dette kapitlet tar for seg standarder som ble brukt i før og under forsøket.

5.1 ISO-834 Standardbrann

Det å forutsi hvordan en brann kommer til å oppføre seg er komplisert. Selv om en kan beregne de fysiske og kjemiske fenomenene som inngår i brann, har det vist seg vanskelig å reprodusere like branner. Tidligere eksperimenter viser at selv med like parametere lagt til rette for en brann, er det mye usikkerhet knyttet til hvilke verdier man sitter igjen med i ettertid. På grunn av disse usikkerhetene benyttes standardbranner. [20]

En standardbrann er uttrykt som en tid-/temperaturkurve. Slike branner er kun en konservativ tilnærming under testing av bygningsmaterialer- og konstruksjoner, og er ikke representativt for en virkelig brann. I Norge benyttes standardbrannen beskrevet i standarden ISO-834 somer gitt ved Ligning 5.1 og illustrert i Figur 5.1. [21]

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + T_0$$

Ligning 5.1

Hvor:

T Temperaturen ved tiden t [°C]

T_0 Starttemperaturen ved tiden lik null [°C]

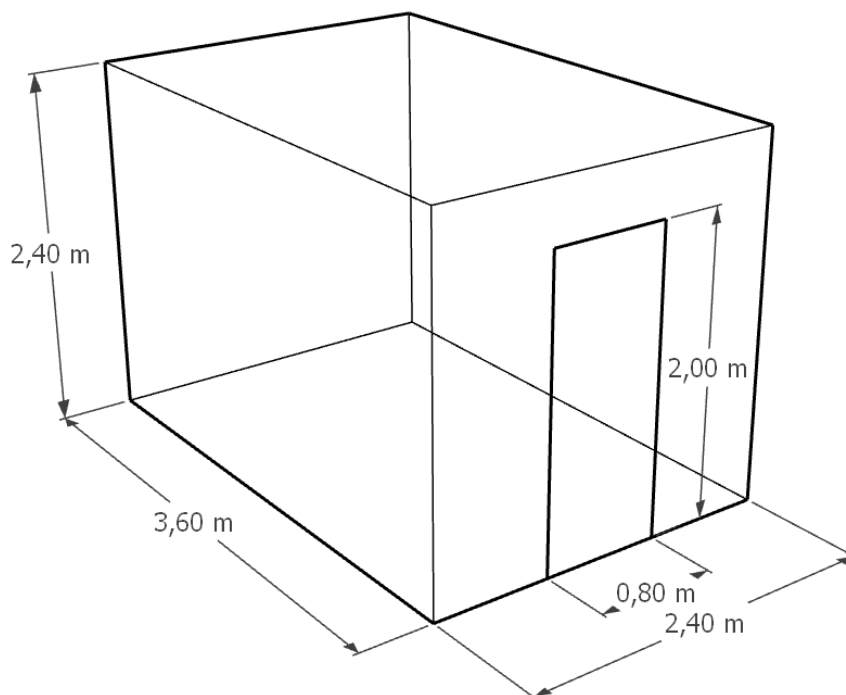
t Tid [min]



Figur 5.1 – Standardbrann fra ISO-834 med starttemperatur 20 °C

5.2 ISO 9705 Brannrom

I standarden ISO 9705 *Fire tests – Full-scale room test for surface products*, benyttes det et rom med bestemte mål for branntesting. Rommet skal bestå av fire vegger med rette vinkler, et tak og et gulv som illustrert i Figur 5.2. Det skal ha innvendig lengde 3,6 m, bredde 2,4 m og høyde 2,4 m med $\pm 0,05$ m tillatt variasjon. Inngangen skal plasseres i sentrum av en av veggene med målene på 2,4 m x 2,4 m. Åpningen skal være 0,8 m x 2,0 m med $\pm 0,01$ m tillatt variasjon. Rommet må også bestå av ubrennbart materiale med tetthet mellom 500 kg/m^3 og 800 kg/m^3 . Rommets minimum tykkelse skal være 0,02 m. [22]



Figur 5.2 – Brannrom fra ISO-standard 9705

5.3 Akseptkriterier

Akseptkriterier er et sentralt tema innen rømningssikkerhet. Standarden SN-INSTA/TS 950 beskriver ulike kriterier innen sikt, varmestråling, temperatur og konsentrasjoner av farlige gasser. I standarden oppgis det tre akseptkriterier relatert til varmestråling, og disse er [23]:

Maksgrense for kontinuerlig eksponering	$\leq 2,5 \text{ kW/m}^2$
Maksgrense for momentan eksponering	$\leq 10 \text{ kW/m}^2$
Maksgrense for samlet stråling ved eksponering	$\leq 60 \text{ kJ/m}^2$

5.4 Brannmotstand i bygningsdeler

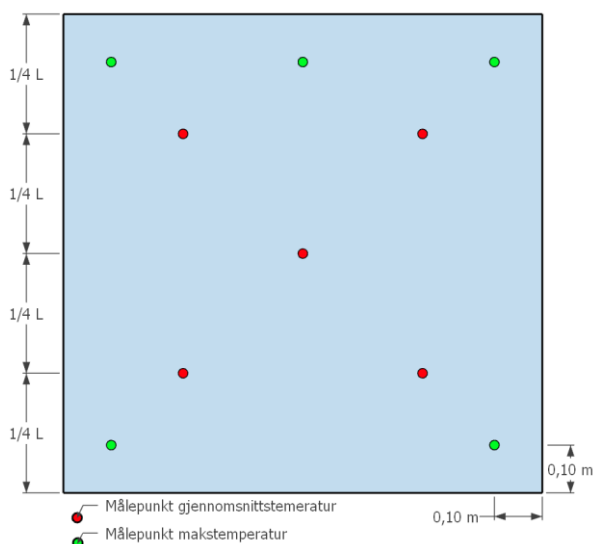
Bygningsdelers brannmotstand defineres av hvor lang tid den kan opprettholde forskjellige ytelser ved brannpåkjenning. Disse ytelsene kan eksempelvis være bæreevne (R), isolasjon (I) og integritet (E). Brannmotstand blir klassifisert ved hjelp av en ovnstest hvor temperaturen baseres på en standard tid-temperaturkurve. Bygningsdelers brannmotstand kan ha stor innvirkning på personsikkerheten i bygget. I tillegg vil det også kunne påvirke det materielle skadeomfanget. [2]

Standarden NS-EN 1363-1:2012 *Prøving av brannmotstand - Del 1: Generelle krav* inneholder metoder for å teste brannmotstanden i deler av en konstruksjon, ved eksponering av en standardbrann. [24]

5.4.1 Isolasjon

Isolasjon defineres av evnen en skillende bygningsdel har til å motstå brannpåkjenning på eksponert siden, uten en høy nok varmeoverføring til at brannen spres til den ueksponerte siden. Derfor er isolasjonsevne avhengig av varmeledningen til bygningsdelen, og om den er lav vil gjerne isolasjonen være høy. Metode for å teste isolasjon går ut på å se på tiden det tar å få en gitt temperaturøkning på ueksponert side. Ytelsen er ikke ivaretatt, dersom gjennomsnittstemperaturen overstiger 140 °C, eller et punkt på flaten har nådd over 180 °C. [25]

Standarden nevnt i forrige delkapittel beskriver hvordan isolasjonsevne skal testes. Det står blant annet hvordan måleelementene som skal bak bygningsdelen bør festes. Vanligvis festes de slik som vist i Figur 5.3, hvor de grønne punktene brukes for å måle maksimal temperatur, og de røde brukes for den gjennomsnittlige. [24]



Figur 5.3 – Plassering av måleelementer

5.4.2 Integritet

Integritet defineres av evnen en skillende bygningsdel har til å motstå brannpåkjenning på den eksponerte siden, uten at gjennomtrenging av flammer og varme gasser forårsaker brannspredning på den ueksponerte siden. For å vurdere integritet er det vanlig å ta i bruk tre kriterier [25]:

- Gjennomgående sprekker eller åpninger ut over gitte mål
- Antenning av bomullsdott
- Kontinuerlig flammer på den ueksponerte siden

NS-EN1363-1:2012 beskriver hvordan en skal teste integritet. Der står det blant annet hvordan bomullstestmetoden skal utføres. Testen fungerer ved å holde en skal være 100 mm x 100 mm x 20 mm bomullsbit bak en bygningsdel etter en gitt tid. Dersom den ikke antennes av røyk eller branngasser som har sluppet igjennom sprekker, anses integriteten som ivaretatt. Eksempelvis om den holdes bak en bygningsdel som har hatt en brannpåkjenning i 15 minutter, og bomullen ikke antennes, anses delen å være E15. Bomullsbiten skal holdes i 30 sekunder, med en avstand på 30 mm fra bygningsdelen. Før testen skal bomullen forvarmes for å fjerne fuktighet som ellers kunne påvirket resultatet. [24]

6 Teori

6.1 Varmetransport

Det finnes tre typer varmetransport; varmeledning, konveksjon og varmestråling. De har alle til felles at det er energioverføring, fra noe med høy temperatur, til noe med lavere temperatur. Hvor fremtredende transportmetodene er vil avhenge av faktorer som materialet, aggregattilstand og temperatur. På grunn av dette vil også rollen til metodene variere under et brannforløp.

Konveksjon blir ikke beskrevet ytterligere, siden det ikke er spesielt relevant for problemstillingen.

6.1.1 Varmeledning

Varmeledning er når energi går fra noe med høy temperatur, til noe med lavere temperatur, via et medium. Dette kan skje i gass, væske og fast stoff. Varmeledning er den mest dominerende varmetransportmetoden blant fast stoff grunnet høyere molekyltetthet. Stoffets termiske konduktivitet er proporsjonalt med varmeledningen, og vil dermed direkte påvirke mengde varme overført. Et eksempel på stoff med høy konduktivitet, er metaller, hvor det da er løse elektroner. Stoffer med lav konduktivitet kan bl.a. være gasser, væske eller porøse stoffer med mye luftlommer, som snø og treverk. Varmeledning er også viktig i forhold til brannmostand til materiale. Varmeledning er også viktig i forhold til brannmostand til materiale, spesielt isolasjonsevne. [21]

Ligning 6.1 beskriver raten av varmeledning igjennom et fast materiale ved stasjonære⁵ forhold. [26]

$$\dot{q}'' = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad \text{Ligning 6.1}$$

Hvor:

k Termisk konduktivitet [$W/m \cdot K$]

ΔT Temperaturendring [K]

Δx Posisjonsendring [m]

⁵ Når varmeledningsraten er proporsjonal med ΔT

6.1.2 Varmestråling

Forskjellen mellom varmemestråling, og de to andre varmetransportmetodene, er at ved varmemestråling vil energien overføres, selv uten et medium. Dette skjer på grunn av at varmen heller transporteres ved elektromagnetisk stråling fra et punkt, til et annet. Alle objekter stråler ut varme, men de med høyere temperatur vil ha betydelig høyere utstråling. Dette er fordi strålingsintensiteten er proporsjonal med temperaturen til objektet, opphøyd i fjerde. Derfor er termisk stråling som oftest den mest dominerende transportmetoden ved høyere temperaturer, gjerne over 400 °C. Et objekts strålingsintensitet kan beregnes med Ligning 6.2. [10]

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \text{Ligning 6.2}$$

Hvor:

E Strålingsintensitet [W/m^2]

ε Emissivitet [-]

σ Stefan-Boltzmanns konstant [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$]

T Temperatur [K]

Et objekt vil ha tre egenskaper i forbindelse med varmemestråling; absorpsjon, refleksjon og transmisjon. Disse tre beskriver objektets strålingsevne, også omtalt som emissivitet. Absorpsjon og refleksjon er henholdsvis hvor mye av strålingen som absorberes og reflekteres. Transmisjon beskriver mengden stråling som passerer objektet, uten å påvirke det. Vanligvis vil faste stoffer ha transmisjon tilnærmet null, med unntak materialer som glass. Emissiviteten går mellom 0 og 1, hvor den blir nærmere 1 når objektet er mørkere. [21]

Hvor mye varmemestråling som blir utvekslet mellom to objekt, varierer med strålingsintensitetene og synsfaktoren mellom objektene. I henhold til varmemestråling fra en brann, er det ofte kun relevant med strålingen fra røyken/flammen til et objekt. For å finne denne brukes synsfaktoren mellom objektene, samt strålingsintensiteten til flammen/røyken. Varmestråling kan finnes ved hjelp av Ligning 6.3. [26]

$$\dot{q}'' = \varphi \cdot E \quad \text{Ligning 6.3}$$

Mengden stråling fra et objekt til et annet bestemmes av synsfaktoren ($0 \leq \varphi \leq 1$). Dersom den er 0 treffer ingenting, og om den er 1 vil alt treffe. Verdier for synsfaktoren kommer vanligvis fra tabeller eller grafer, men dersom det er nødvendig kan Ligning 6.4 brukes. [26]

$$\varphi = \int_0^A \frac{\cos\theta_a \cos\theta_b}{\pi r^2} dA \quad \text{Ligning 6.4}$$

Hvor:

- φ Synsfaktoren [-]
- θ_a Vinkelen til den utgående strålingen fra flammen/røyken [-]
- θ_b Vinkelen til den innkommende strålingen på objektet [-]
- r Avstand mellom flammen/røyken til objektet [m]
- A Arealet til flammen/røyken [m²]

6.1.3 PTFHM (Standard platetermometer)

Det finnes ulike metoder for å måle varmestråling fra en brann. En vanlig metode er å først måle temperaturen ved hjelp av et standard platetermometer, som PTFHM (plate thermometer heat flux meter). Deretter kan en finne innfallende stråling ved en forenklet varmeoverføringsmodell hvor varmeoverføringskonstanter, emissiviteter og omliggende gasstemperaturer er parametere. Varmeoverføringsmodellen vil variere med den målte temperaturen. [27]

I artikkelen [28] presenterer Wickström et al. en fremgangsmåte for metoden nevnt ovenfor. Ligning 6.5 og Ligning 6.6 blir henholdsvis brukt for å finne innfallende stråling \dot{q}_{inc}'' og konveksjonskoeffisienten h_{pt} . De relevante symbolene er tatt ut ifra artikkelen og listes. En annen metode vil være å bruke et Excel-ark med disse ligningene allerede forhåndsinnstilt. [29]

Symboler:

- T_{pt} Temperaturen til platetermometeret [°C eller K]
- T_g Omliggende temperatur [°C eller K]
- \dot{q}_{inc}'' Varmeflukt som treffer platetermometeret [$W/(m^2)$]
- C Varmekapasitet til platetermometeret [$J/(m^2K^4)$]
- K Proporsjonalitetskonstant for konduksjonstap [$W/(m^2K^4)$]
- σ Stefan-Boltzmann's konstant ($5,67 \cdot 10^{-8}$) [W/m^2K^4]
- ε_{pt} Emissivitet av platetermometerets eksponerte side [-]
- h_{pt} Varmeoverføringskoeffisient for konveksjon [$W/(m^2)$]

Subscripts:

- pt Plate thermometre
- g Gas i.e. luft
- inc Incident radiation

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma \cdot T_{pt}^4 - \frac{1}{\varepsilon_{pt}} \left[(h_{pt} + K) \cdot (T_g - T_{pt}) - C \cdot \frac{dT_{pt}}{dt} \right] \quad \text{Ligning 6.5}$$

$$h_{pt} = 76 \cdot \left(\frac{T_{pt} + T_g + 273 \cdot 2}{2} \right)^{-0,66} \cdot |T_{pt} - T_g|^{1/3} \quad \text{Ligning 6.6}$$

6.2 Brann i rom

6.2.1 Brannforløp – Fire faser

Et brannforløp i et rom er karakterisert med fire forskjellige faser. Det er antennelsesfase, vekstfase, fullt utviklet brann og utbrenningsfase. Fasene har egne kjennetegn som skiller dem ifra hverandre som temperatur, hvor mye av brenselet som brenner, om brannen er brenselskontrollert eller ventilasjonskontrollert og hvilken form for varmetransport som er dominerende. [21]

Figur 6.1 viser temperaturutviklingen i et typisk brannforløp, samt de ulike fasene. I figuren nevnes det også flashover/overtenning, som blir beskrevet i neste delkapittel. [30]



Figur 6.1 – Faser i brannforløp [26]

6.2.2 Røykproduksjon og overtenning

En av hovedforskjellene mellom en rombrann og en brann i det fri, er at i en rombrann dannes det et røyklag. Flammen og røyken vil avgi en betydelig mengde stråling, som varmer opp brenselet og vil øke størrelsen av brannen. Dette vil øke røykproduksjonen, og dersom den er større enn massestrømningen av røyk ut fra rommet, vil røyklaget fortsette å vokse. Strålingen vil da øke ytterligere. Brannen vil fortsette å eskalere slik, med mindre brenselet blir oppbrukt, og det er slik overtenning oppstår. [30]

Overtenning er et fenomen som skjer når det oppstår en rask overgang fra vekstfasen til en fullt utviklet brann. Overtenning marker ofte skifte mellom en brenselsstyrt brann til en ventilasjonsstyrt. Selv om forholdene ved en overtenning fortsatt er under diskusjon, er det tre kriterier som blir lagt til grunn for å bestemme om overtenning pågår. Disse tre kriteriene er [21]:

- Temperatur i røyklag overstiger 600 °C.
- Røyklags varmestråling på gulvflate overstiger 20 kW/m².
- Flammer kan bli observert utenfor brannrom.

6.2.3 Brenselsstyrt brann – Tid til overtenning

I *Enclosure fire dynamics* 3.6.3 oppgis Ligning 6.7 for å finne temperaturendring ved en gitt varmeproduksjon \dot{Q} . Vanligvis vil overtenning inntreffe etter en temperaturøkning på rundt 600 °C. Ved å bruke denne verdien for ΔT i ligningen, kan Ligning 6.8 utledes. Både h_k og \dot{Q}_{FO} er ukjente, hvor h_k bestemmes av en tid som må defineres. For å kunne bruke denne ligningen må derfor en av disse parameterne oppgis, ellers må den løses ved iterasjoner. Ligning 6.9 beskriver hvordan h_k kan finnes, når veggene er for tykke til at $t \geq t_p$. H_0 og A_0 er høyden og arealet av åpningen. [30]

$$\Delta T = 6,85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 \sqrt{H_0} h_k A_T} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ligning 6.7}$$

$$\dot{Q}_{FO} = 820 \cdot (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ligning 6.8}$$

$$h_k = \sqrt{\frac{k\rho c}{t}} \quad \text{Ligning 6.9}$$

6.2.4 Ventilasjonsstyrt brann – Etter overtenning

Når overtenning inntreffer, vil alt brennbart stå i flammer. På grunn av dette vil oksygentilførselen være en begrensende faktor for brannen. Varmefrigjøringen \dot{Q} av en ventilasjonsstyrt brann kan finnes med maksimal luftgjennomstrømming (\dot{m}_{luft}) og forbrenningsvarmen ($\Delta H_{C,luft}$). I kapittel 6.4.2 fra *Enclosure Fire Dynamics* står det oppgitt at forbrenningsvarmen til oksygen $\Delta H_{C,O_2}$ kan multipliseres med andelen oksygen i luft for å $\Delta H_{C,luft}$ (se Ligning 6.12). Ligning 6.10 og Ligning 6.11 viser henholdsvis hvordan \dot{m}_{luft} og $\Delta H_{C,luft}$ kan finnes. [30]

$$\dot{m}_{luft} = 0,5 A_0 \sqrt{H_0} \quad \text{Ligning 6.10}$$

$$\Delta H_{C,luft} = \Delta H_{C,O_2} \cdot kg_{O_2} / kg_{luft} \quad \text{Ligning 6.11}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{luft} \cdot \Delta H_{C,luft} \quad \text{Ligning 6.12}$$

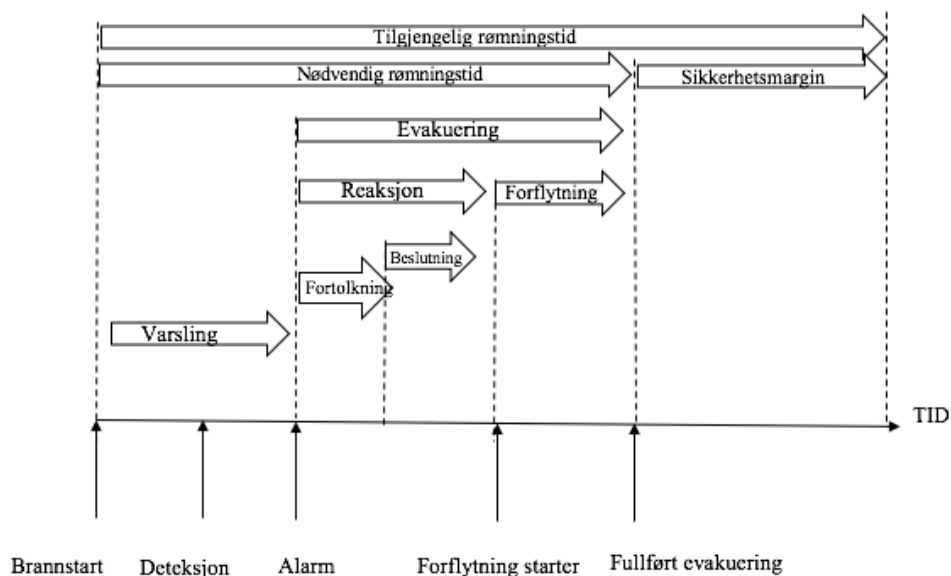
6.3 Rømningstid

6.3.1 ASET, RSET, sikkerhetsmargin og forflytning under rømning

Tilgjengelig rømningstid (ASET⁶) er den tiden det tar fra brannstart til situasjonen når kritiske forhold. Nødvendig rømningstid (RSET⁷) er den tiden det tar fra brannstart til evakueringen av alle personer er gjennomført. Sikkerhetsmarginen er da differansen mellom tilgjengelig og nødvendig rømningstid. Figur 6.2 illustrerer hvilke faser som inngår i rømning. Tidene kan påvirkes ved innføring av tiltak. Dette kan for eksempel være inndeling av brannceller som vil forsinke spredning av brann og dermed øke tid til kritiske forhold. Det kan også bli gjort tiltak for å redusere nødvendig rømningstid. Man kan for eksempel ha flere utganger som vil medføre til en raskere forflytning. [31]

Forflytning er den delen av rømningstiden hvor personer beveger seg til sikkert sted. Den kan deles inn i tre faser [32]:

1. Forflytning innenfor branncelle til enten utgang, rømningsvei eller sikkert område. Strekningen i denne delen kalles fluktvei.
2. Forflytning i rømningsvei. Da foregår rømning enten til trapperom eller direkte til sikkert område.
3. Forflytning i trapperom. Ved denne fasen foregår rømning til utgang eller sikkert sted.



Figur 6.2 – Beskrivelse av ASET, RSET og sikkerhetsmargin [31]

Analyse av RSET og ASET blir vanligvis gjennomført ved mer kompliserte bygg. Dersom bygg har fravik fra preaksepterte ytelser, skal analyse bli anvendt. Sikkerhetsmargin skal vurderes av fagkyndige i hvert tilfelle da det ikke finnes noe minimumskrav. Marginen må være høy nok til å dekke usikkerhetene i analysen av nødvendig- og tilgjengelig rømningstid. Sett at marginen er for lav skal det gjøres inngrep som reduserer den nødvendige rømningstiden eller øker den tilgjengelige rømningstiden. [32]

⁶ Available Safe Egress Time

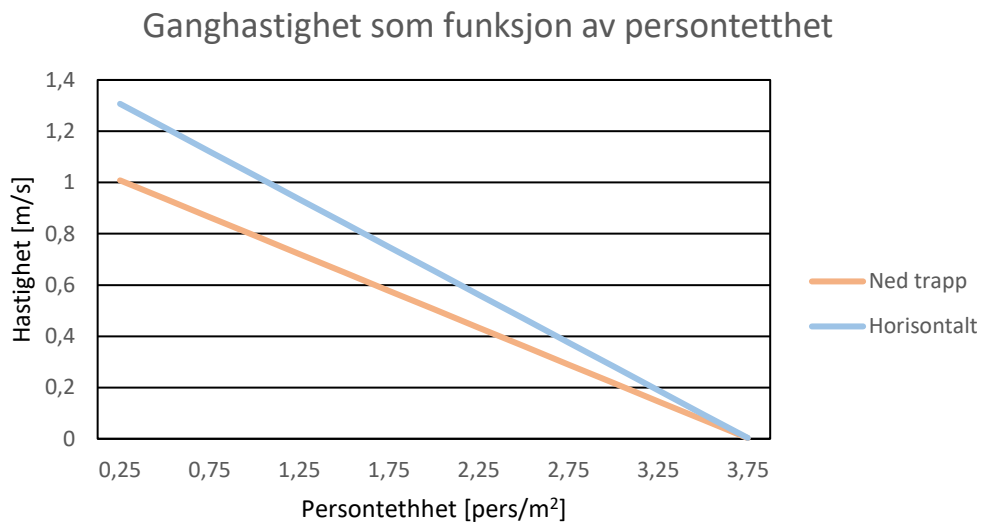
⁷ Required Safe Egress Time

6.3.2 Ganghastighet

Under forlytningsfasen i RSET, er det viktig å definere ganghastighet. Dette er hastigheten til en person eller en gruppe personer gjennom en rømningsvei eller fluktvei under rømning. Hastigheten til en enkeltperson er avhengig av mange faktorer, men de avgjørende faktorene for en gruppe er [32]:

- Persontetthet
- Om det rømmes i trapp
- Om det rømmes på flatt gulv

Persontetthet og ganghastighet reduseres tilnærmet lineært med persontetthet som illustreres i Figur 6.3. Figurens grafer er utarbeidet fra Ligning 6.13. [32]



Figur 6.3 – Sammenhengen mellom persontetthet og ganghastighet

Ganghastigheten kan beregnes ved hjelp av Ligning 6.13.

Ligning 6.13

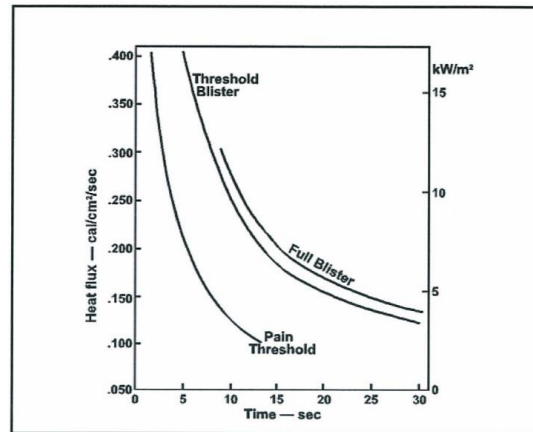
$$v = (1 - a \cdot D) \cdot k$$

Hvor:

- v Ganghastighet [m/s]
- D Persontetthet [pers. /m²]
- a Konstant på 0,266 [m²/ pers.]
- k Konstant på 1,4 horisontalt eller 1,08 nedover i trapp [m/s]

6.3.3 Tid til smerte

Det er tidligere gjennomført undersøkelser på virkning av eksponering for varmekraft og temperatur på objekter og mennesker over tid. Figur 6.4 under viser ved hvordan forskjellig grad av varmekraft over tid påvirker mennesket. Den viser for eksempel at menneskets smerteterskel ved 5 kW/m² overstiges ved omtrent 7 - 8 sekunder minutter [33].



Figur 6.4 – Påvirkning av varmekraft over tid [33]

Tabell 6.1 under gir eksempler og et inntrykk av hvilken effekt forskjellig mengde varmestråling har på objekter og mennesket.

Tabell 6.1 – Eksempler på virkning av forskjellig mengde varmestråling [21]

Mengde varmekraft (kW/m ²)	Virkning av mengde varmekraft
0,67	Eksponering av varmestråling fra solen om sommeren.
1	Den høyeste varmestrålingen for menneskets tålegrense ved uendelig lang eksponering.
6,4	Smerte inntreffer etter 8 sekunder ved eksponering på hud.
10,4	Smerte inntreffer etter 3 sekunder ved eksponering på hud.
12,5	Etter lang eksponeringstid på treverk kan gassene fra treverket antenne med tennkilde.
16	Huden påføres blommer etter 5 sekunders eksponering.
29	Spontanantennelse av treverk etter lang tids eksponering.
52	Fiberplater vil antenne etter 5 sekunder med eksponering.

Med bakgrunn i slik data er det blitt utarbeidet følgende ligninger for å beregne tid til smerte Ligning 6.14 og tid til andregrads forbrenning Ligning 6.15. Tidene har enhet s og varmestrålingen (\dot{q}'') har enhet kW/m² [34].

$$t_p = 125 \cdot (\dot{q}'')^{-1,9} \quad \text{Ligning 6.14}$$

$$t_{2nd} = 260 \cdot (\dot{q}'')^{-1,56} \quad \text{Ligning 6.15}$$

7 Metode

I metodekapittelet blir det gitt en beskrivelse av hvor og hvordan forsøket ble utført. I tillegg presenteres forarbeidet til forsøket, samt utstyret som ble brukt. Skissene som illustrerer forsøksrommet og konstruksjonen er produsert med programvaren SketchUp med studentlisens. Fotografiene av konstruksjonen og forsøksrommet er hentet fra eget galleri.

7.1 Forsøket

For å svare på problemstillingen ble det utført ett forsøk 11.mars 2020 kl. 11:05. Resultatene fra forsøket ble kombinert med håndberegninger gjort på forhånd av forsøket. På grunn av avstandsforskjellen mellom døren og trappeløpet, vil strålingen fra døren være marginal i forhold til strålingen fra vinduet. Det ble derfor bestemt at forsøket kun skulle utføres med brann ut fra vindu. Innfallende stråling fra døren ble funnet ved hjelp håndberegninger og supplert i resultatet.

Forsøkskonstruksjonen er en forenklet og konservativ tilnærming til caset som er presentert kapittel 3.

7.2 ResQ

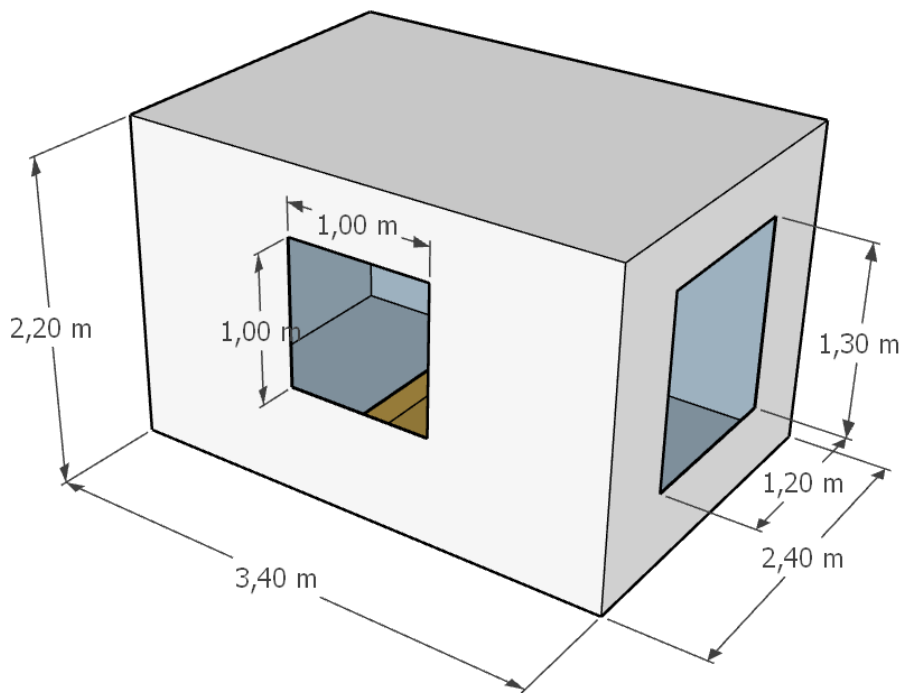
Forsøket utføres på ResQ Sikkerhetssenter sin avdeling på Bleivik utenfor Haugesund. Senteret tilbyr sikkerhet og beredskapsopplæring til olje- og gassnæringen, shipping, landbasert industri og maritim industri. Utføring av forsøk på ResQ gir trygge rammer og nødvendig sikkerhetsutstyr. [35]

7.3 Forsøksrommet

Rommet som ble benyttet under forsøket er tilnærmet et ISO 9705 forsøksrom. Målene er ikke identiske med et standard ISO-rom, men har likhetstrekk i hvilket materiale som er benyttet og totalt volum. Tabell 7.1 viser innvendige mål til forsøksrommet og til et standard ISO-rom. Figur 7.1 er en skisse av forsøksrommet med de innvendige målene. Rommet har to åpninger, hvor den minste ble brukt som vinduet under forsøket. Forsøksrommet er i hovedsak oppført av lettbetong med en vegg rundt inngangspartiet (den største åpningen) laget av Leca blokker.

Tabell 7.1 – Forsøksrommet og ISO-rommets dimensjoner

	Forsøksrom	ISO 9705
Bredde (m)	2,40	2,40
Lengde (m)	3,40	3,60
Høyde (m)	2,20	2,40
Åpningsareal (m²)	2,56	1,60



Figur 7.1 – Forsøksrommet illustrert med innvendige mål

Rommet står plassert midt i ResQ sikkerhetssenter med grad av ly for vær og vind. Det er en oljestasjon med tilgang på diesel ved siden av rommet som tillater enkel etterfylling av brensel under forsøk. Det er også tilgang til vann for slokking, samt strøm til måleinstrumenter og elektriske verktøy i et nærliggende bygg. Bilde 7.1 er et satellittbilde som beskriver området ovenfra.



Bilde 7.1 – Satellittbilde over forsøksområdet [36]

7.4 Forberedende arbeid

Forsøksområdet måtte tilrettelegges før forsøket kunne gjennomføres. Det forberedende arbeidet startet 22. januar og var ferdig den 11. mars. Arbeidet besto av planlegging, muring igjen av en tredje åpning, oppføring av konstruksjonen samt opprydning. Konstruksjonen består av planker på 50 mm x 150 mm og 40 mm x 100 mm. I tillegg til dette ble rammen som platene ble festet på lagd av 50 mm x 50 mm impregnerte lekter. Alt ble i hovedsak festet med 60 eller 100 mm treskruer skrudd med 25 mm Torxbit. Det ferdige oppsettet til testbrannen er vist under i Bilde 7.2.

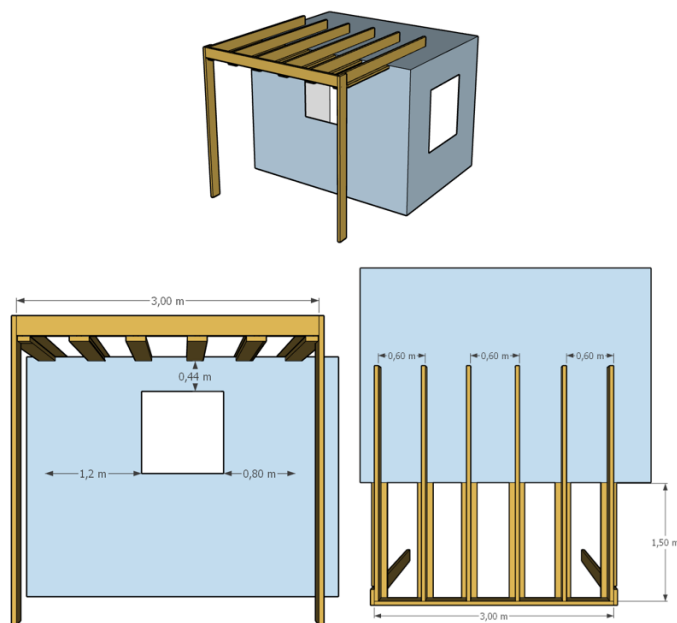


Bilde 7.2 – Konstruksjonen ferdigstilt til testbrann

7.4.1 Oppføring av bærende konstruksjon

For å gjenskape bygningssituasjonen og kunne feste ulike elementer, var det nødvendig å oppføre en bærende konstruksjon. Denne ble plassert utenfor vinduet med to bjelker ned i bakken og horisontale stendere hvor takplatene senere ble festet. Konstruksjonen består av 50 mm x 150 mm bjelker og søyler. Det er valgt å ikke beskrive avstivningen, siden det ikke påvirker forsøkets reproduserbarhet. Forsøksrommet og konstruksjonen er ikke montert sammen, for å kunne justere avstanden mellom bjelkene og rommet.

For at avstanden fra taket til vinduet skulle være likt som i caset måtte taket senkes med 7,4 cm. Dette ble gjort ved å feste horisontalt liggende planker under stenderne som illustreres i Figur 7.2.

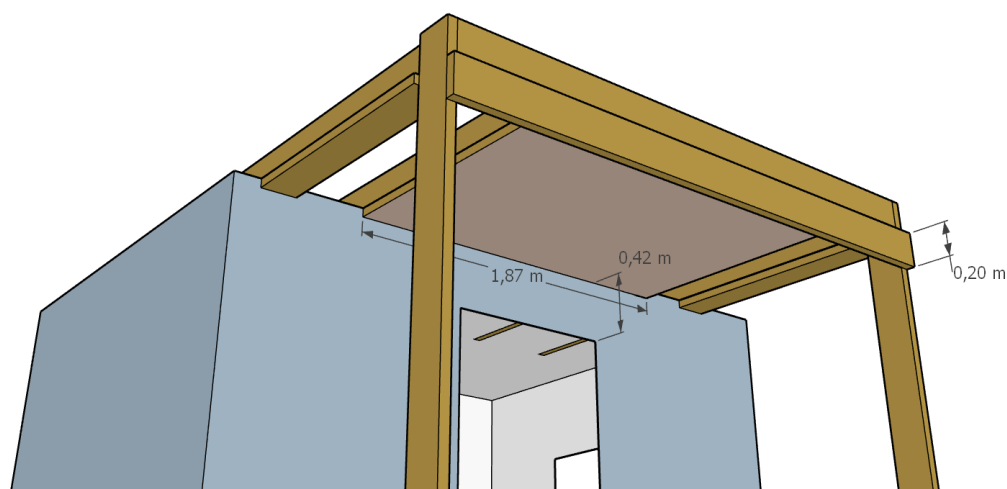


Figur 7.2 – Trekonstruksjonen plassert på forsøksrommet

7.4.2 Utførelse av tak

Taket besto av to lag med 12 mm tykke gipsplater, med treverk bak skjøtene. Platene ble festet ved hjelp av gipsskiver, som skulle hindre at de falt ned etter en viss brannpåkjenning. Materialene og tykkelsen på materialene ble valgt for å ta mest mulig vare på konstruksjonen, siden det var kun skaden på testplatene som var av interesse. Gipsplatene ble montert under plankene som var festet på de horisontale stenderne, og ble da 42 cm over vinduet. Taket hadde et totalt areal på 150 cm x 187 cm. Se Figur 7.3 for mål og plassering.

For at det skulle dannes et røyklag likt som hva det samles under svalgangsløsning i caset, ble det montert en skjerm av tre langs fremsiden av konstruksjonen. Skjermen var 20 cm høy og skrudd horisontalt ned fra taket.

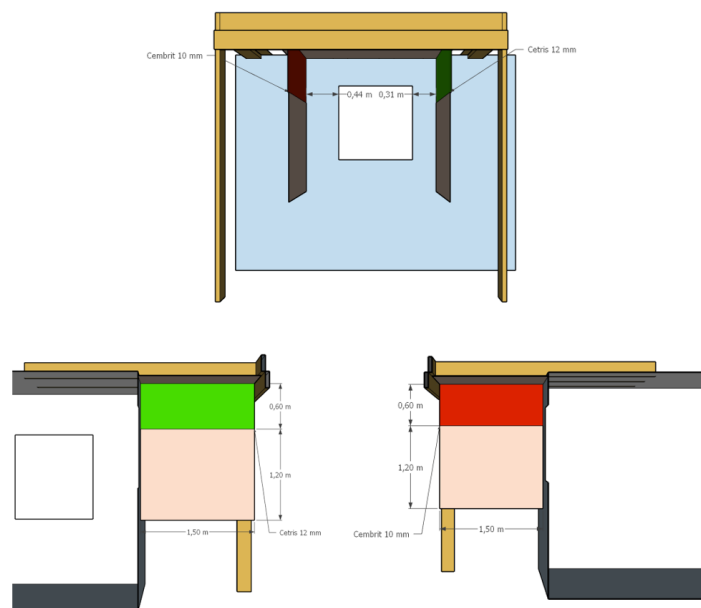


Figur 7.3 – Plassering av gipstak og treskjerm

7.4.3 Plassering av testplater

I samarbeid med oppdragsgiver, ble det bestemt hvordan platene skulle festes. Platene ble kuttet opp med vinkelsliper slik at de fikk dimensjonene 150 cm x 60 cm. Lengden (150 cm) ble valgt ut ifra trappeoppgangen i caset, og høyden (60 cm) kommer av ønske om å få et tilstrekkelig areal å evaluere. Platene ble hengt på hver sin side av vinduet, med avstander lik som i caset. Dersom en står utenfor rommet og ser mot vinduet, var Construction hengt opp på venstre side med 44 cm avstand fra vinduet. Cetrus ble hengt opp på høyre siden, 31 cm fra vinduet. Figur 7.4 beskriver plasseringene ytterligere, hvor Construction er rød og Cetrus er grønn.

Under platene var det festet ekstra gipsplater, vist som rosa/hvit i Figur 7.4. Hensikten med disse var å redusere mengden røyk som kunne sige under testplatene, og da forstyrre vurderingen av platenes integritet.

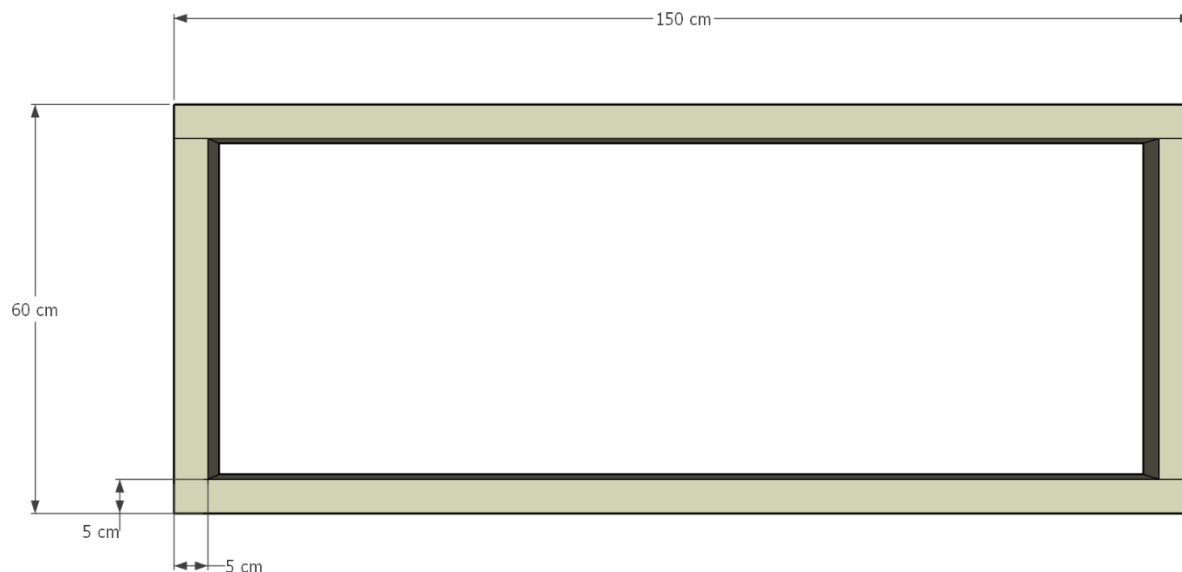


Figur 7.4 – Plassering av gipsplater under platene

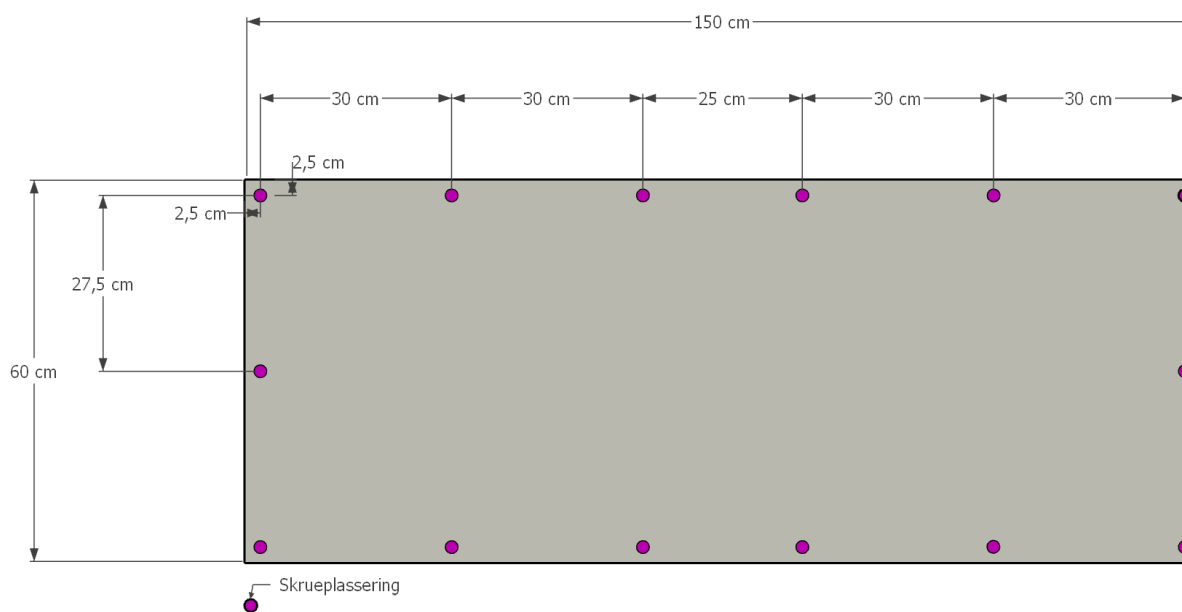
7.4.4 Rammefeste

Cembrit AS sin anbefalte monteringsmetode av testplatene er beskrevet i kapittel 4.2 og 4.3. Den ble brukt som utgangspunkt for montering av platene. Metoden ble derimot gjort med annerledes skrueløsning enn fra anbefalingene. Dette med bakgrunn fra samtaler med eksternt veileder.

For å kunne feste testplatene til konstruksjonen, ble det lagd trerammer av impregnerte 50 mm x 50 mm lekter. Disse hadde samme dimensjoner som platene, 150 cm x 60 cm. Rammene illustreres i Figur 7.5. De besto av to deler med en lengde på 50 cm og to deler med lengde på 150 cm som ble skrudd sammen med 100 mm skruer. Platene ble deretter festet på rammene som illustrert i Figur 7.6.



Figur 7.5 – Ramme til testplatene med tilhørende mål



Figur 7.6 – Testplate montert på ramme med skruemplassering

Etter at platene ble festet på rammene ble de hengt opp på konstruksjonen. På forsøksrommet ble det festet to 50 mm x 150 mm planke på hver side av vinduet, for å kunne montere rammene som vist i Bilde 7.3. For å feste den andre siden av rammene, ble det satt opp to 50 mm x 150 mm planker montert med spikerslag som også vist i Bilde 7.3.



Bilde 7.3 – Festemetode for ramme i konstruksjonen

7.5 Utstyr tilknyttet forsøket

I dette delkapittelet beskrives utstyr som ble benyttet under forsøket.

7.5.1 Termoelement

Termoelement er en temperaturmåler bestående av to metalltråder av ulikt materiale og sammenkoblet i et målepunkt. Målepunktet er der hvor en ønsker å måle temperaturen. Den andre enden av lederne er koblet mot en omformer eller transmitter. Når lederne opplever forskjellig temperatur i målepunktet og ved transmitteren oppstår det spenningsforskjell. Denne spenningsforskjellen brukes til å beregne temperaturen som er i målepunktet. [37]

7.5.2 Platetermometeret

For å måle varmestråling under forsøket, ble det brukt et PTFHM platetermometer. Et slikt termometer brukes vanligvis til å måle adiabatisk overflatetemperatur i brannmotstandtesting. Denne testingen utføres i henhold til standardene ISO 834-1 og EN 1363-1, hvor det både kan utføres målinger ved omliggende og høy temperatur. Platetermometeret kan også brukes for å regne ut innfallende stråling, som et billigere og mer robust alternativ til vannkjølte fluksmålere, og det er slik strålingen blir funnet i denne oppgaven. Måten dette fungerer på er at den adiabatisk overflatetemperatur blir omgjort til innfallende stråling. Denne metoden beskrives i kapittel 6.1.3, og utregningen er presentert i vedlegg D.

7.5.3 Loggfører og programvare

For å innhente data under forsøket ble det benyttet en loggfører av typen Keysight 34970A Data Acquisition. Den mottar inngangsdata fra termoelementene og platetermometeret. Loggføreren sender utgangsdataen videre til en PC som leser av dataen ved bruk av programvaren BrannDatalog6 v6.3. Programvaren er utviklet ved HVL Haugesund.

7.5.4 Kamera

Det ble gjort videoopptak med fire HD-actionkameraer under forsøket. Kameraene var innkapslet i plastikkdeksel for beskyttelse mot fall og støt. Kameraopptakene lagres på kameraets eget SD lagringsminne, og kan overføres over til PC og mobil ved bruk av micro-USB kabel.

7.5.5 Brannslange og vernemaske

Røykgasser fra brann kan skade både lunger og andre vitale organer og bidra til utvikling av andre helseplager. En må dermed ta i bruk anderettsvern i form av helmaske for å beskytte seg ved forsøk som innebærer mye røykproduksjon. Disse er motorisert med vifte, og luften passerer gjennom filter som begrenser luftforurensing før inhalering. Siden forsøket ble gjort ute i det fri, var det ikke nødvendig med ekstra oksygentilførsel. [38]

Forsøksbranner kan bli voldsomme og kan utgjøre skade på både utstyr og personer som befinner seg i nærheten. For å sikre området under forsøket ble det benyttet en brannslange koblet opp mot vanntilførsel. Dette tillatte å kontrollere brannens intensitet og forskynde utbrenningsfasen.

7.6 Forsøksforberedelse

I forkant av forsøket ble det utført en testbrann. Hensikten med denne var å få et inntrykk av brannstørrelsen, samt å fjerne fukt fra forsøksrommet. Det ble også montert termoelementer bak testplatene og inne i forsøksrommet for å bekrefte at de fungerte som de skulle og ga akseptable avlesninger. Testbrannen ble utført 4. mars kl. 12, som var en uke før den faktiske forsøksdagen. For å holde fuktnivået nede ble det lagt presenninger over hele forsøksrommet frem til forsøksdagen.

7.6.1 Brensel

For å skape ønsket brann til forsøket ble det i hovedsak tatt i bruk diesel og trepaller i ulike størrelser. Det ble også benyttet vann i brenselskaret slik at vannet ville frese når dieselen var brent opp, og dermed ga det muligheten til å etterfylle ved behov. Tabell 7.2 gir en oversikt over mengde brensel benyttet under testbrannen og forsøksbrannen. Det ble også brukt én madrass til begge brannene. Hensikten med pallene og madrassen, var å få en A-brann i likhet med hva som oppstår i en vanlig rombrann. Det ble på forhånd gjennomført beregninger tilknyttet mengde og type brensel for å produsere den ønskede brannen. Beregningene er vist i vedlegg B og C. Ifølge utregningene ville dieselen alene gi overtenning, men trepallene ble likevel brukt for å forsikre en overtenning med ekstra brannenergi.

Tabell 7.2 – Brensel utnyttet ved forsøksbrann og testbrann

	Testbrann	Forsøksbrann
Diesel	100 l	60 l
Paller	5 stk.	10 stk.
Sponplate	0 stk.	1 stk.
Madrass	1 stk.	1 stk.
Dør	0 stk.	1 stk.

Under testbrannen ble pallene plassert på betongblokker 0,25 (m) over brenselskaret som vist under i Bilde 7.4. Pallene under forsøksbrannen var plassert direkte oppå brenselskaret og rundt i rommet. viser også madrassen som ble tatt i bruk under forsøket samt en dør på 2,00 m x 0,80 m.



Bilde 7.4 – Henholdsvis brensel under forsøksbrannen og under testbrann

Grunnen til at det ble benyttet flere paller og mindre diesel ved forsøksbrannen var på bakgrunn av testbrannens data. Temperaturstigningen som var ønsket i starten av testbrannen ble raskt oppnådd. Under forsøket ble det derfor ikke sett på som nødvendig å ta i bruk like mye diesel da det var brukt mer enn nok under testbrannen. Temperaturen under testbrannen falt fort, noe som kan skyldes både for få paller og at pallene var til dels fuktige. Det ble derfor sett som nødvendig å ta i bruk flere paller under forsøket som var mindre fuktige for å ha en vedvarende temperatur i rommet.

7.6.2 Plassering av utstyr

Dataen fra forsøket ble registrert med forskjellige måleinstrumenter. I tillegg til måling av data ble det utført flere observasjonsmetoder. For å kunne få en tilnærmet standardbrann, var det nødvendig å måle temperaturen i forsøksrommet. Samtidig var det av interesse å se på den strålingen fra vinduet. Tabell 7.3 gir en oversikt over utstyr som ble benyttet under forsøket.

Tabell 7.3 – Oversikt over utstyr brukt ved forsøk og antall

Utstyr	Antall
Termoelement	18 stk.
Platetermoelement	1 stk.
Kamera	4 stk.
PC	1 stk.
Loggfører	1 stk.
«Tripod»-stativ	2 stk.
Brenselskar	1 stk.
Påfyllingsrør	1 stk.
Betongblokk 0,25 m x 0,5 m	2 stk.

Brenselskar

Under forsøket ble det brukt et kar med areal på 1 m x 1 m og på dybde på 0,20 m, for dieselen. Karet var av metall og plassert i midten av rommet. For å etterfylle karet ble det brukt et hult metallrør som ble ført igjennom veggen på ISO-rommet og ned i brenselskaret. Det ble plassert to betongklosser med overflateareal på 0,25 m x 0,5 m i hver sin ende av karet for å begrense arealet som kunne brenne samtidig. viser plasseringen av karet med lettbetongblokkene oppi og metallrøret inne i ISO-rommet.



Bilde 7.5 – Brenselskaret plassert i ISO-rommet

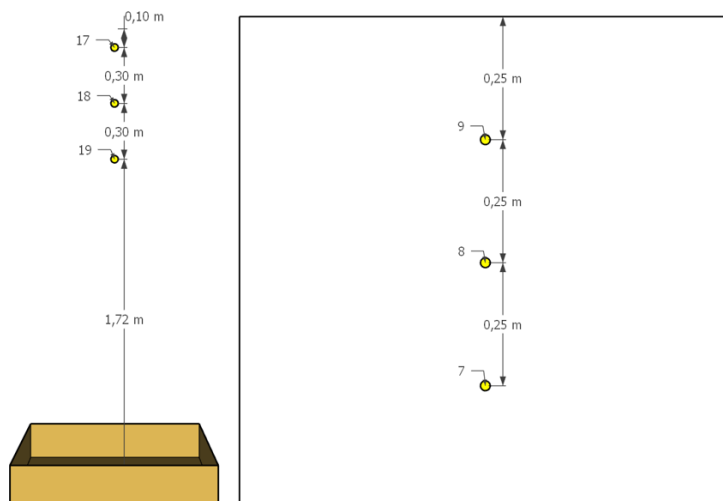
Termoelementer

Til sammen ble det tatt i bruk 18 termoelementer for å måle temperaturen på forskjellige steder i rommet og på testplatene. For å kunne vite hvilket termoelement som viste hvilken temperatur ble elementene nummerert i kanaler fra 1 til 9 og 11 til 19. Total oversikt over plasseringen av termoelement er listet i Tabell 7.4.

Tabell 7.4 – Plassering av termoelement og tilhørende kanalnummer

Plassering termoelement	Kanalnummer
<i>Over brenselskar</i>	
0,10 m ned fra taket	17
0,40 m ned fra taket	18
0,70 m ned fra taket	19
<i>Midten av vinduet</i>	
0,25 m ned fra toppen av vinduet	9
0,50 m ned fra toppen av vinduet	8
0,75 m ned fra toppen av vinduet	7
<i>Cetris</i>	
Oppe venstre	1
Oppe høyre	2
Midten	3
Nede venstre	4
Nede høyre	5
Eksponert side	6
<i>Construction</i>	
Oppe venstre	11
Oppe høyre	12
Midten	13
Nede venstre	14
Nede høyre	15
Eksponert side	16

I forsøksrommet ble det plassert 6 termoelementer. I vinduet var tre elementer plassert med 25 cm mellomrom, og startet 25 cm nedenfor øverste vinduskant. De tre andre termoelementene i forsøksrommet var plassert over brenselskaret. Disse hadde 30 cm mellomrom og begynte 10 cm ned fra taket. Alle termoelementene i rommet ble tredd igjennom et hull i taket. Figur 7.7 nedenfor viser plasseringen av termoelementene over brenselskaret og i vinduet med tilhørende avstander og kanalnummerering.



Figur 7.7 – Henholdsvis termoelement over brenselsskar og i vindu

For å måle temperaturer på den eksponerte siden av hver testplate ble det boret hull igjennom gipsveggene under platene. Termoelementene ble tredd igjennom hullet og vinklet slik at de var plassert nederst, 30 cm inn på hver plate. Bilde 7.6 viser termoelementenes plassering. Disse ville vise temperaturer i det nedre sjiktet av temperatur, som platene ville bli påført under forsøket, med tanke på at mye av varmen ligger øverst i taket på konstruksjonen. Termoelementene foran Cetris og Construction hadde henholdsvis kanalnummer 6 og 16.



Bilde 7.6 – Termoelement igjennom gipsvegg på den branneksponte siden

Til slutt ble fem elementer montert bak hver testplate. Disse ble festet ved hjelp av to planker lagt inntil hverandre og holdt sammen av to treklemmer, med elementene tredd mellom plankene. Bilde 7.7 viser elementene holdt inn mot platene med bruk av denne løsningen.



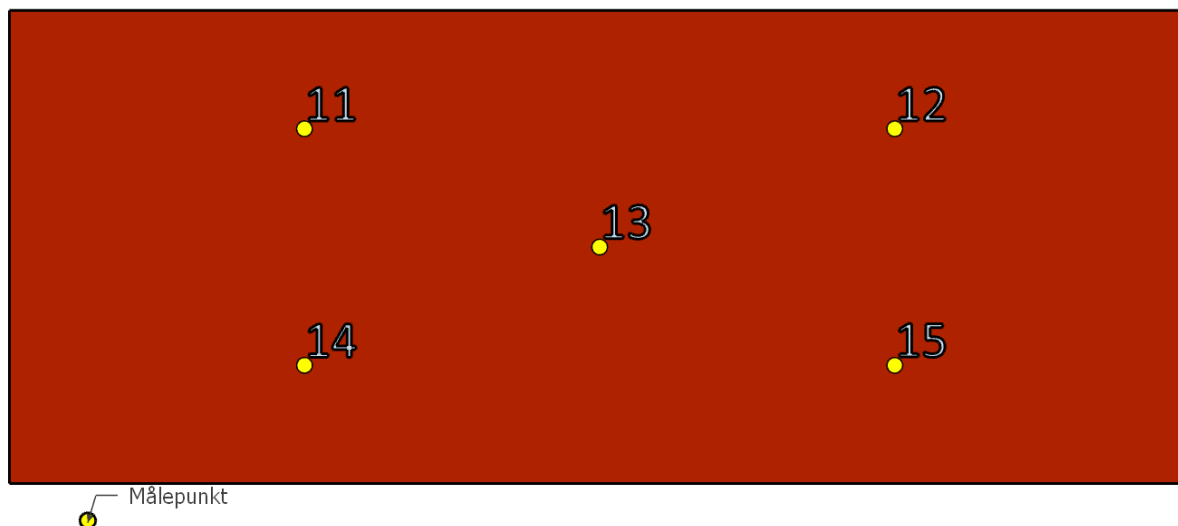
Bilde 7.7 – Planker holder fast termoelementene på platen ved hjelp av treklemmer

For å kunne finne gjennomsnitts- og makstemperaturen bak platene ble de montert i et kryss, med ett element i midten av platen. De eksakte målene vises i Figur 7.10 kapittel 7.7. Under i Figur 7.8 og Figur 7.9 illustreres plasseringen av termoelementene på baksiden av testplatene. Nummereringen av termoelementene kommer fra kanalnummerene, slik loggføreren lister dem.



Målepunkt

Figur 7.8 – Termoelementene på ueksponert side av Cetris



Figur 7.9 – Termoelementene på ueksponert side av Construction

Platetermometer

For å undersøke strålingen ut vinduet ble det tatt i bruk ett platetermometer. Platetermometeret ble plassert med bakgrunn i fra bygningssituasjonen. Det var ønskelig å vite hvilken stråling en kunne forvente ut vinduet, siden kan treffe personer som evakuerer ned trappen. Platetermometeret ble plassert med en avstand på 1,5 m fra ISO-rommet, foran vinduet rettet rett mot åpningen. Det ble ikke plassert med samme avstand som trappeløpet har til vinduet, slik som i caset. Dette var fordi det var usikkert om utstyret ville tåle brannpåkjenningen, og målingene kunne blitt påvirket. Platetermometeret ble holdt oppe av et «tripod»-stativ av metall. Stativet og plassering vises i Bilde 7.8.



Bilde 7.8 – Platetermometerets plassering

Kamera

For å observere hele forsøket var det nødvendig med videopptak. I alt ble det tatt i bruk fire kameraer til videotakning under forsøket. Disse gir gode innblikk i hendelsesforløpet og forsikrer at detaljer ikke blir utelatt. Kameraene ble plassert med forskjellige vinkler til interesseområdet av forsøket. Kamera nr. 1 ble plassert i høyden nord for interesseobjektet. Kamera nr. 2 var plassert på bakken og filmet opp i forsøket fra vest. Kamera nr. 3 var montert i synshøyde lenger unna fra vest for å gi et mer oversiktlig bilde. Kamera nr. 4 var montert i synshøyde med en vinkel i fra sør mot forsøket. Bilde 7.9 gir et oversiktsbilde av kameraenes plassering.



Bilde 7.9 – Oversiktsbilde av kameraplasseringene

Datalogger og pc

For å loggføre dataen registrert av termoelementene og platetermometeret ble transmitterene koblet opp mot en datalogger som så ble koblet opp mot en PC. Loggføreren og PC-en ble plassert utenfor bygget med tilgang til strøm. Med en avstand fra forsøket slik at PC-en ikke fikk noen påkjenning av røyk eller varmestråling. Bilde 7.10 viser oppsettet av loggfører og PC.



Bilde 7.10 – Oppsett av datalogger og PC

7.7 Test av isolasjon og integritet

Integritet

For å se om integriteten til testplatene holdt under forsøket ble det utført observasjoner og to bomullstester. Testene som ble utført tok utgangspunkt i standarden NS-EN1363-1:2012 beskrevet i kapittel 5.4.

Observasjonene ble utført av observatør som noterte tid og hendelse i en notatblokk. Det som skulle observeres var om det hadde oppstått tegn til sprekker eller deformasjoner i platene, og i tillegg om det var tegn til gjennomtrengende flammer eller røyk. Tidspunktet for observasjonene var nødvendig for å kunne si noe om hvor lenge ytelsen var ivarettatt. De ble undersøkt hvert fjerde minutt med forbehold om at forholdene var trygge nok til å nærme seg. Det var nødvendig med bruk av vernemaske som vist i Bilde 7.11.



Bilde 7.11 – Observatør beskyttes mot røyk av vernemaske og tar notater

For å gjennomføre bomullstest ble en bomullsbit festet med spiker på en treplanke vist i Bilde 7.12. Bomullsbiten var plassert slik at det ble 30 mm fra bomullen til enden av planken. Dermed ble den plassert i riktig avstand fra testplatene, i likhet med hva som står i standarden. En av gruppemedlemmene holdt planken opp slik at den hvilte på spikerslagene som holdt termoelementene på plass, og at den var vinkelrett på testplatene. Planken ble holdt der i 30 sekunder hvor tiden ble tatt med stoppeklokke.

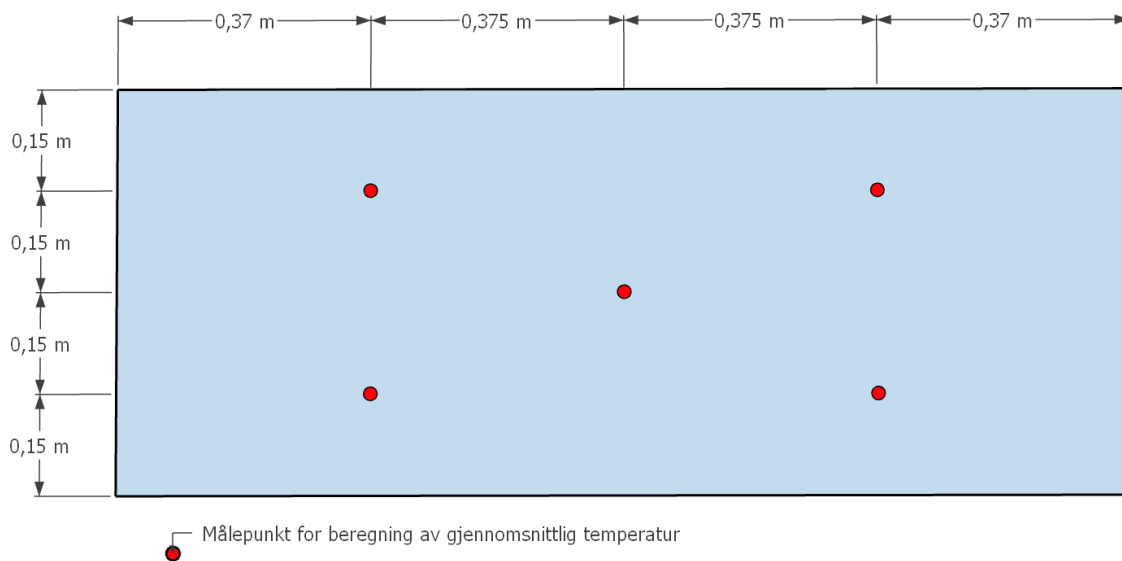


Bilde 7.12 – Bomullstesten

Isolasjon

Likt som prøving av integritet ble isolasjon også undersøkt med utgangspunkt i standarden NS-EN1363-1:2012.

Som beskrevet i kapittel 7.6.2 ble termoelementer plassert på testplatenes ueksponeerte side. Dette for å måle temperaturøkningen som oppsto bak på platene. Målingene ble kontrollerte på PC-en jevnlig for å bekrefte at alle elementer virket som de skulle. På grunn av mangel på termoelementer ble det valgt å plassere 5 stykker som illustrert i Figur 7.10. Disse elementene ble brukt for å både måle makstemperatur, og gjennomsnittstemperatur.



Figur 7.10 – Plassering av termoelementer på ueksponert side av testplatene

7.8 Gjennomførelse av forsøk

Forsøket ble gjennomført onsdag 11. mars 2020 og brannen startet kl. 11:05. Utførelsen ble gjort med følgende gjøremål i rekkefølge:

1. Kle av forsøksrommets presenning
2. Rydding og sikring av forsøksområdet
3. Montere termoelementene, først inne i forsøksrommet, deretter bak på testplatene
4. Sette opp platetermometeret
5. Koble elementene opp mot loggfører og PC
6. Bære inn brensel i form av paller, sponplate, madrass og dør inn i forsøksrommet
7. Stenge av inngangen med gipsplate
8. Redegjørelse og testing av brannslange
9. Sette på plass kameraer
10. Fylle diesel i brenselskar
11. Fylle bensin i brenselskar (til forvarming)
12. Påkledning av vernemasker og brannjakker
13. Antenne brenselet i brenselskaret med fakkel
14. Notere testplatenes tilstand hvert fjerde minutt
15. Etterfylle dieselkaret fire ganger
16. La alt brensel brenne opp

17. Avslutting av forsøk
18. Slokke brann i trekonstruksjon
19. Sikre dataen fra PC
20. Rydde opp utstyr og rester fra brannen

8 Resultat

I dette kapitlet blir resultatene fra forsøket oppsummert. Dette gjøres ved å innledningsvis beskrive værforholdene på forsøksdagen. Videre vil hendelsesforløpet beskrives ved hjelp av hendelsesbilder. Observasjonene gjennomført av observatør er gjengitt i tabellform, og platenes tilstand etter forsøket er avbildet med beskrivelse. Til slutt blir temperatur- og stålingsmålingene presentert i grafer.

8.1 Værforhold 11. mars 2020

For å gjennomføre forsøket var det bestemt at det ikke var ønskelig med nedbør eller sterk vind. Været i perioden hvor forsøket skulle utføres var skiftende og lite forutsigbart. På forsøksdagen ca. klokken ni ble siste rigging av forsøket gjort før forsøkstart. På dette tidspunktet vekslet været mellom sol og skybyger.

Da forsøket ble startet kl. 11:05 var det opplett, men tungt overskyet. Temperaturen på starttidspunktet for forsøket var på 5 °C. Ut fra Yr sine hjemmesider var vinden ved Bleivik mellom 6,5 og 8,8 m/s i tidsrommet forsøket ble utført [39]. Rommet er til dels plassert i en grad av ly, men vinden var merkbar fra sør/sør-vest denne dagen. Ca. 40 minutter etter brannstart økte vindstyrken, noe som en kan se på stigningen av temperaturen i Figur 8.2.

Det ble lagt presenninger over forsøksrommet etter testbrannen. Dette for å holde fuktnivået så lavt som mulig før forsøket. På forsøksdagen var det derimot tydelig tegn til fukt i rommet, og det var åpenbart at presenningene ikke hadde holdt alt regnet ute. Det ble ikke utført noen målinger med fuktmåler, men overflatene i rommet hadde en mørkere farge enn den hvite/lysegrå fargen som kunne bli observert etter testbrannen. Samtidig kjentes også veggene våte ut.

8.2 Hendelsesforløp

I dette delkapitlet presenteres en bildeserie av forsøket, med en kort beskrivelse av hva som skjer på bildene. Målinger fra forsøket presenteres i kapittel 8.6.



Forsøket starter (11:05:44)

Antennelse av brannen. Rask, mørk røykutvikling som kommer ut av vinduet. Små flammer begynner å bli synlig.



6 minutter etter brannstart (11:11:24)

Mye røyk ut av vinduet. Flammene holder seg inne i forsøksrommet.



8 minutter etter brannstart (11:13:30)

Størrelsen av brannen reduseres. Det oppsto problemer med etterfylling pga. dieselen brant fortere enn hva som ble tilført. Dette hørte en da vannet i bunnen av karet freste.



15 minutter etter brannstart (11:20:52)

Liten størrelse på brannen pga. at mange av pallene ikke får brenn. Pallene blir flyttet nærmere karet slik at de er i kontakt med brannen. Bomullstest nr.1 ble utført rett før bilde ble tatt.



20 minutter etter brannstart (11:25:00)

Etter at brenselet ble omplassert, tar brannen seg opp.



24 minutter etter brannstart (11:29:00)

Det er laget et hull i gipsen, for å øke luftgjennomstrømning.



25 minutter etter brannstart (11:30:00)
Ikke store endringer etter åpning i gipsen.



30 minutter etter brannstart (11:35:11)
Røyk på bakken, som følge av brann i bensinsøl. Dette ble slokkt. Det utføres bomullstest nr.2. Ikke store endringer i størrelse av brannen.



35 minutter etter brannstart (11:40:42)
Større flammer og disse begynner å trekke ut av forsøksrommet. Testplatene får nå en større påkjenning.



40 minutter etter brannstart (11:45:35)
Brannens størrelse øker ytterligere, som følge av økt vindstyrke. Røyken kommer ut helt fra nedre del av vinduskarmen.



44 minutter etter brannstart (11:49:31)

Det ble observert størst brann gjennom hele brannforløpet på dette tidspunktet. På høyre side (sett forfra) brenner det i konstruksjonen. Flammene har trengt igjennom og antent rammene, og gir da testplatene brannpåkjenning på begge sider. Påbegynnes kontrollert slokkearbeid.



51 minutter etter brannstart (11:56:30)

Forsøket er avsluttet. Deler av konstruksjonen er forkullet, og gips har falt av. Mye av gipsen falt av som følge av slokking.

8.3 Observasjoner

Tabell 8.1 viser notatene fra observatøren som ble gjort under forsøket. Det skulle utføres sjekk av platene hvert fjerde minutt, men utviklingen av brannforløpet gjorde at det ble uforsvarlig å gå nærme brannen, og det var derfor ikke mulig å utføre observasjoner hvert 4 minutt.

Tabell 8.1 – Observasjoner under forsøket

Klokkeslett	Minutter siden brannstart	Cetris 12 mm	Construction 10 mm
11:10	5 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker
11:14	9 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker
11:18	13 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker
11:22	17 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker (noe sort oppe i øverst ved rammen)
11:26	21 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker
11:30	25 min	Ingen sprekker	Ingen sprekker
11:35	30 min	Slitasje oppe ved rammen Ingen sprekker	Rammen er sort på vestre side Ingen sprekker
11:46	41 min	Ramme brenner Ingen sprekker	Sotet langs sidene Ingen sprekker
11:55	50 min	Større sprekker	Sprekker

8.4 Cetriss etter forsøket



Bilde 8.1 – Eksponert side og deler av ueksponert side til Cetriss

Bilde 8.1 viser Cetriss-platen etter forsøket. Under sløkking falt en bit i hjørnet av. Markert sprekk midtre del av platen i horisontal og vertikal retning. På grunn av sløkking har platen en mørkere farge. Det var vanskelig å ta ned platen da deler allerede var ødelagt, og svært porøs. Dette skjedde ikke under brannen, men etter at forsøket var avsluttet og sløkkearbeid igangsatt.



Bilde 8.2 – Tverrsnitt og biter av eksponert side av Cetriss

Helt til venstre er det mulig å se før-bilde av Cetriss for å lettere kunne sammenligne før og etter. Tverrsnitt av Cetriss-platen er vist til venstre i Bilde 8.2. Her kan man se tydelige gjennomtrengende skade fra eksponert side til ueksponert side. Til høyre på bildet vises biter avrevet fra den eksponerte siden av Cetriss-platen. Som bildet illustrerer kan man se småsprekninger i platen.

8.5 Construction etter forsøket



Bilde 8.3 – Eksponert og ueksponert side til Construction etter forsøk

Bilde 8.3 viser fremside og bakside av Construction etter forsøket. På fremsiden i venstre hjørne brenner det kontrollert i konstruksjonen. Det er fire vertikale sprekker langs platen som har oppstått på fremsiden. I sprekken og i nedre del av platen er det mørkere felt som følge av vann fra brannsløkking. Baksiden av platen har en tydelig sprekke, mens rammen er forkullet på sidene og i øvre del.

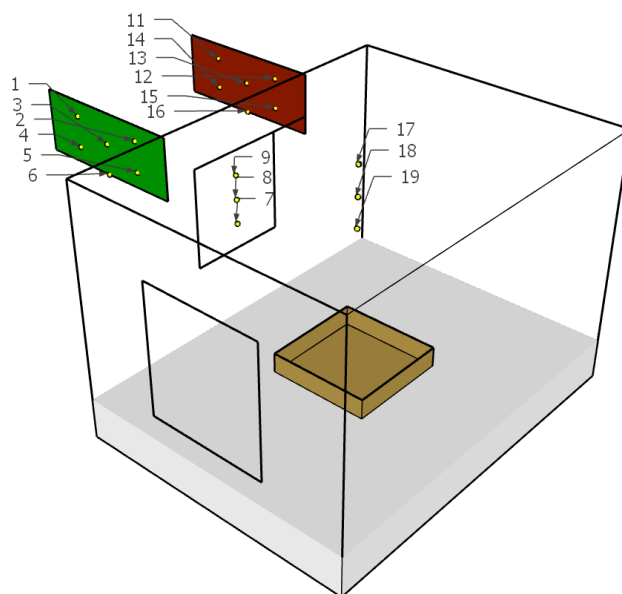


Bilde 8.4 – Tverrsnitt og eksponert side til Construction etter forsøk

Helt til venstre er det mulig å se før-bilde av Construction for å lettere kunne sammenligne før og etter. Til venstre på Bilde 8.4 vises et tverrsnitt av platen. Det er lite synlige gjennomtrengende skader fra eksponert side til ueksponert side. Til høyre er platen tatt ned fra konstruksjonen. Construction var ettergivende og porøs ved berøring, noe som medførte at det var mulig å knekke platen.

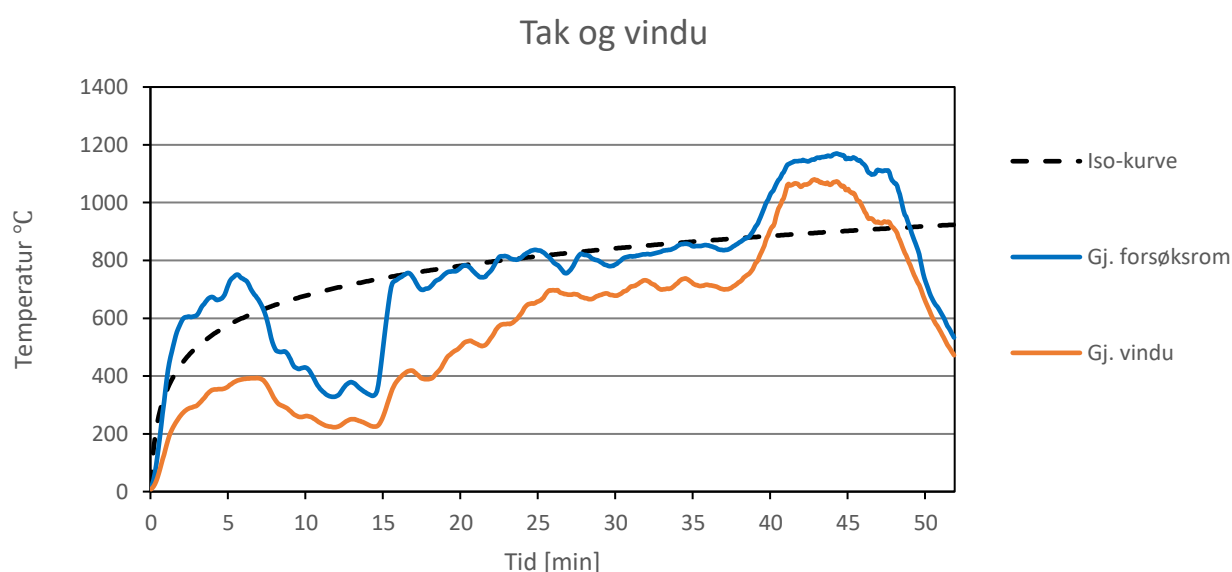
8.6 Måling fra forsøket

I dette underkapittelet presenteres måling som ble gjort under forsøket. Plasseringen og nummereringene av alle termoelementene illustreres i Figur 8.1. Platetermometeret er ikke vist i denne figuren, se kapittel 7.6.2 for dens plassering.



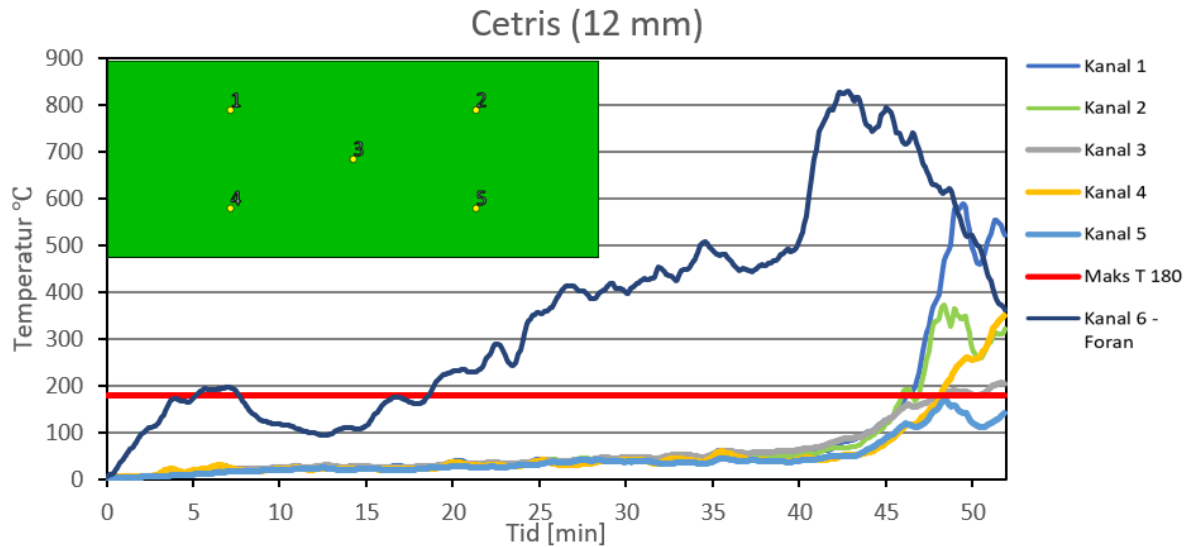
Figur 8.1 – Oversikt over kanalnummerering av termoelement

Figur 8.2 representerer termoelementene som ble plassert i brannen. Kanal 7, 8 og 9 var i vinduet, og kanal 17, 18 og 19 var over brenselet, hvor alle har forskjellige høyder. Disse grafene sammenlignes med en ISO-kurve, som er den stiplede.



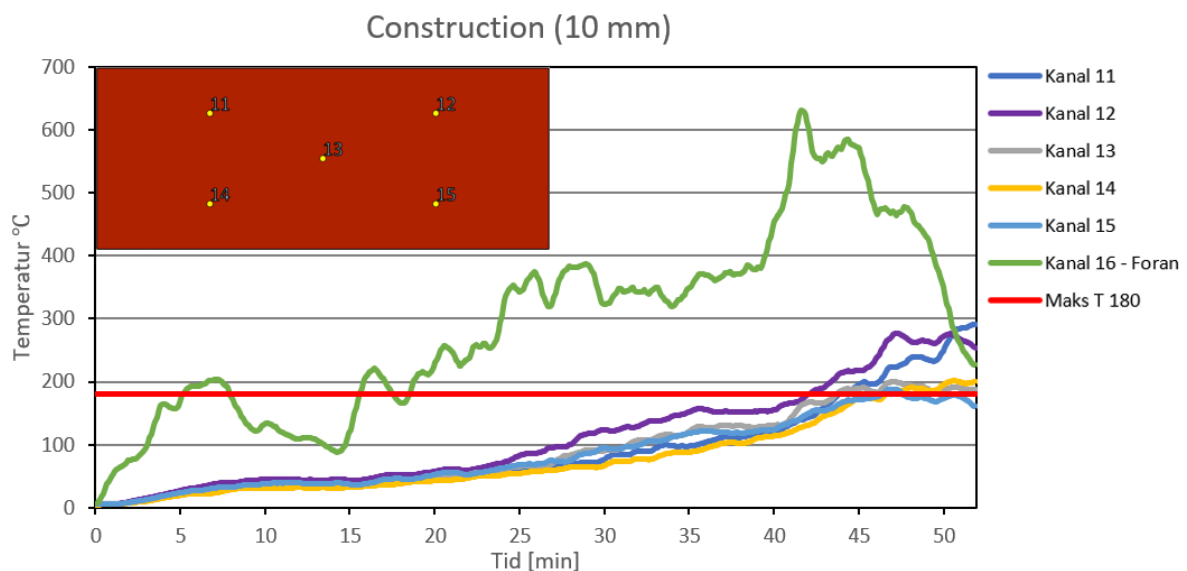
Figur 8.2 – Temperaturmålinger over brenselkar og i vindu

I Figur 8.3 er temperaturene målt rundt Cetris. Den røde linjen er den maksimale temperaturen i et enkelt punkt som kan oppstå på baksiden av platen i henhold til isolasjon. Det tok 47 minutter før den første kanalen registrerte en temperatur på 180 °C bak platen.



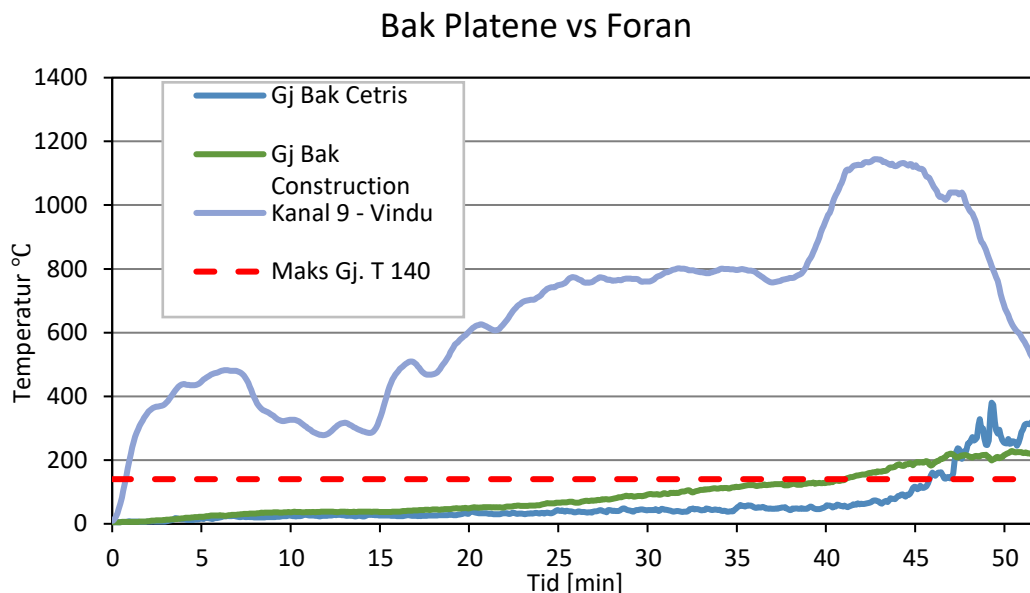
Figur 8.3 – Temperaturmålinger under forsøk på Cetris 12 mm forsøksplate

Temperaturene målt rundt Construction vises i Figur 8.4. Den røde linjen er den maksimale temperaturen i et enkelt punkt som kan oppstå på baksiden av platen i henhold til isolasjon. Det tok 42 minutter før den første kanalen registrerte en temperatur på 180 °C bak platen.



Figur 8.4 – Temperaturmålinger under forsøk på Construction 10 mm forsøksplate

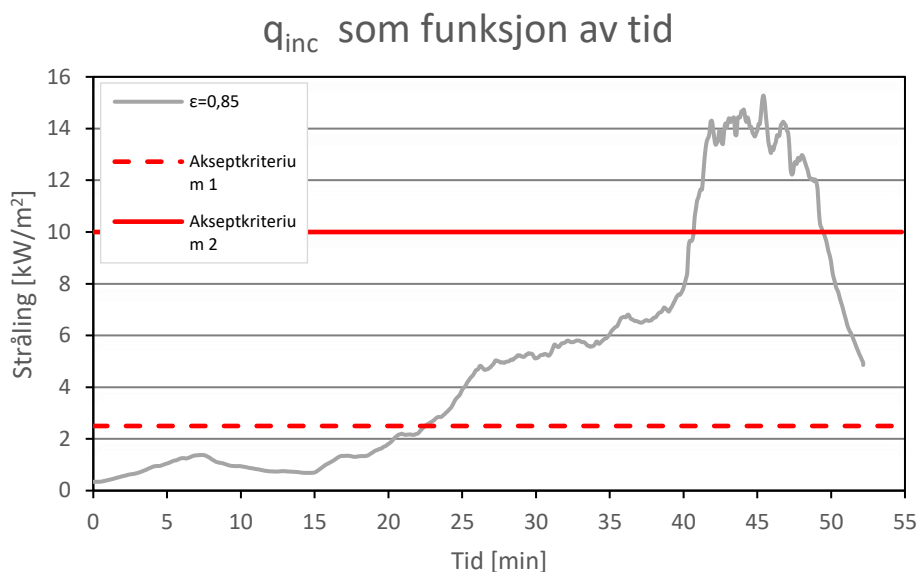
Figur 8.5 viser en sammenligning mellom gjennomsnittstemperaturen bak platene. I tillegg viser kanal 9 den høyeste temperaturpåkjenningen platene vil få på forsiden i.e. kanalen i vinduet som målte høyest temperatur. Den stiplede, røde linjen er maksimal gjennomsnittlig temperatur som kan forekomme i henhold til isolasjon. Gjennomsnittstemperaturen bak Cetris og Construction overskred 140 °C henholdsvis 41 og 46 minutter etter brannstart.



Figur 8.5 – Gj.temp. på ueksponert side og temperatur målt øverst i vindu

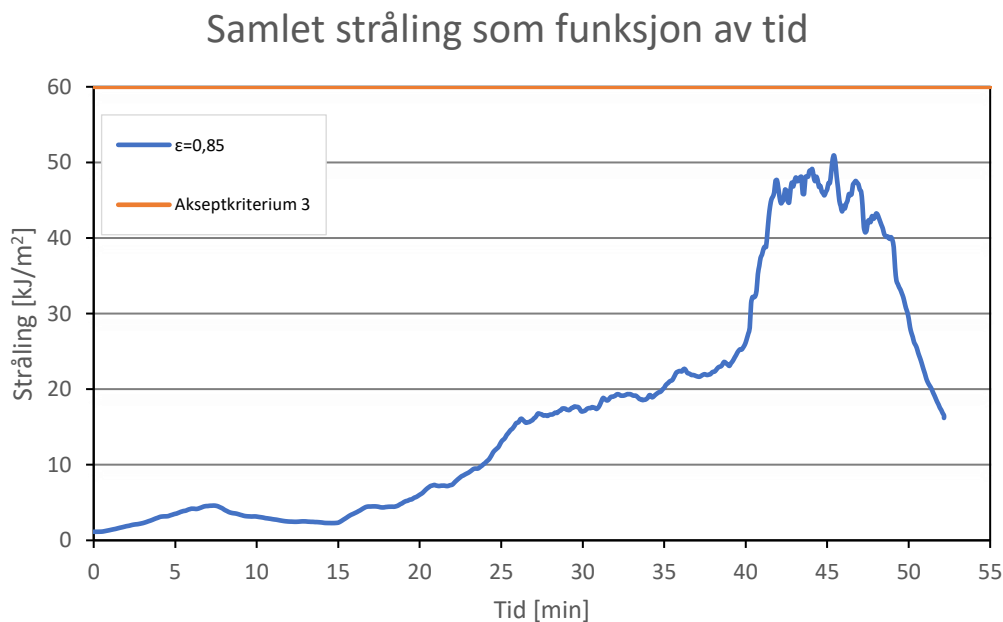
Figur 8.6 viser innfallende varmestråling som funksjon av tid. Den stiplede røde linjen er akseptkriteriet for konstant stråling $2,5 \text{ kW/m}^2$. Den andre røde linjen representerer akseptkriteriet for maksimal strålingen en kan utsettes for, 10 kW/m^2 .

Emissiviteten til platetermometeret ble definert som $\varepsilon = 0,85$. Etter 22 min og 30 s ble den stiplede linjen passert, og etter 41 min og 45 s var strålingen høyere enn den røde linjen.



Figur 8.6 – Varmestråling som funksjon av tid

Figur 8.7 er funnet ved å multiplisere forflytningstiden 3,33 sekunder funnet i vedlegg F med innfallende stråling til enhver tid. Denne representerer mengden stråling evakuerende vil bli truffet av ned trappen. Den evakuerende vil aldri kunne blir truffet mer stråling enn hva som er akseptabelt, i henhold til akseptkriteriet.



Figur 8.7 – Samlet stråling som funksjon av tid

9 Diskusjon

Ut ifra en rekke beregninger presentert i vedleggene, er det dannet et grunnlag for et forsøk, hvor resultatene gjør det mulig å kunne svare på problemstillingen. Det var av interesse å se om testplatene kunne brukes som flammeskjerm ved svalgangsløsninger i likhet med den fra caset. Resultatene gir indikasjoner i den retning, og disse skal diskuteres videre i dette kapittelet. Det skal drøftes hvor lenge platenes ytelse, innenfor integritet og isolasjon, kan anses å være ivaretatt. I tillegg skal det gjøres en vurdering av den målte strålingen.

9.1 Brannforløp

Figur 8.2 gir en oversiktlig beskrivelse av temperaturene ved forsøksbrannen, både i vinduet og rommet. Mange av de omtalte tidspunktene vises i hendelsesforløpet i kapittel 8.2. Hensikten med å justere mengden brensel under forsøket, var å få en tid-temperaturkurve lik som i en ISO-834 brann, noe som gikk til en viss grad.

En kan se at 7 minutter etter brannstart, ble størrelsen av brannen redusert. Dette kommer trolig av at etterfyllingen av diesel ikke fungerte slik det skulle, og det resterende brenselet besto kun av fuktig treverk. I tillegg var det noe fukt i omhyllingsflaten av rommet og brenselet var plassert med en avstand fra brannen. Dette forårsaket vanskelighetene med å ha en vedvarende brann. I et forsøk på å øke størrelsen av brannen igjen, ble treballene omplassert slik at de var nærmere brannen. Dette ble gjort rundt 15 minutter etter brannstart. En kan se på temperaturene i rommet at dette hjalp, noe som viser at plasseringen av brenselet er en betydelig faktor.

Som det illustreres i Figur 8.2, økte størrelsen av brannen relativt konstant mellom 15 – 40 minutter etter brannstart. Grunnen til den bråe økningen etter 40 minutter, kommer fra en økt vindstyrke. Hullet i åpningen som ble lagd tidligere tillot en større luftgjennomstrømning når vindstyrken økte, og dette ga en høyere varmeproduksjon. Dette viser at brannen var ventilasjonsstyrt.

I henhold til målt stråling som vises i Figur 8.6, kan en se at denne ikke følger samme mønster som temperaturen i forsøksrommet. Grafen ligner mer på målt temperatur i vinduet, siden platetermometeret er plassert ved vinduet. Det er ikke overraskende at grafene ved stråling har høyere stigningstall, enn hva temperaturene har. Dette på grunn av at varmestrålingen er proporsjonal med temperaturen opphøyd i fjerde.

9.2 Brensel

I vedlegg B blir det funnet ut at nødvendig varmeproduksjon for å få overtenning i forsøksrommet var 1,1 MW. Selv om dieselen alene ville gitt 1,5 MW, ble treballene brukt for å få en vedvarende brann, og for å forsikre en overtenning med ekstra brannenergi. Det ble funnet at en brann på 1,1 MW, skal få overtenning etter 35 sekunder. En brann med en varmeproduksjon større enn dette, vil teoretisk sett få overtenning før 35 sekunder. Det er vanskelig å si når overtenningen inntraff, men det var mye senere i brannforløpet enn 35 sekunder. Selv om temperaturen lå på over 600 °C store deler av brannforløpet, var størrelsen på brannen relativt liten. Senere utover forsøket var det klart at det var overtenning, spesielt etter 40 minutter. En rimelig antagelse er at den trege overtenningen stammer fra en kombinasjon av fukt og plasseringen av brenselet. Senere under forsøket ga brannen også en indikasjon på at størrelsen var begrenset pga. mangel på oksygen.

9.3 Stråling

Forutsatt at platene forbeholder sin funksjon som flammeskjerm under hele forsøket, vil evakuerende ikke bli truffet av en betydelig mengde stråling. Dette kommer av at platene har transmisjon på tilnærmet 0. I dette delkapittelet drøftes det derfor rundt; dersom platene ikke er montert langs rekkverket, vil strålingsmengden som de evakuerende blir truffet av være uakseptabel?

Ut ifra beregningene er forventet stråling etter 15 minutter $19,8 \text{ kW/m}^2$. Denne baserer seg på at temperaturen er 1012 K (739 °C), som blir funnet ved hjelp av ISO-843 kurven. Forventet stråling settes opp mot total stråling ved forskjellige tidspunkter, som er funnet i vedlegg D. Total stråling er en kombinasjon av målt stråling fra vinduet, og stråling fra dør funnet ved håndberegninger. Når temperaturen i vinduet lå på rundt 1012 K var total stråling kun $5,7 \text{ kW/m}^2$. Metoden for å finne forventet stråling er konservativ, men differansen var fortsatt overraskende. En kan se at den sterkeste totale strålingen (etter rundt 45 min.) var $17,8 \text{ kW/m}^2$, noe som er mer likt den forventede strålingen. Ved denne tiden lå temperaturen i vinduet på ca. 1323 K (1050 °C). Det er usikkert hva den store forskjellen kommer av, men det spekuleres at metoden for å finne forventet stråling utelater faktorer som kan senke utfallet. Bl.a. brukes arealet til døren og vinduet for å finne forventet stråling, noe som kan anses som svært konservativt. I tillegg var avstanden som ble brukt for å finne forventet stråling fra vinduet kun $0,44 \text{ m}$. Platetermometeret som målte innfallende stråling ble plassert $1,5 \text{ m}$ fra vinduet, og selv om flammene stakk litt ut vinduet ble den aldri under $0,44 \text{ m}$.

For å danne et inntrykk av hvor sterk varmestråling som kan treffe evakuerende, blir det i vedlegg F funnet tid til smerte og annengradsforbrenning med total stråling som parameter. Med en 50 % sikkerhetsmargin er det gjort beregninger i samme vedlegg på at det tar $3,33$ sekunder å komme seg forbi det eksponerte området. I henhold til ISO-843 kurven vil temperaturen være 1012 K etter 15 minutter. Når målt temperatur i vinduet ligger på 1012 K , er den totale strålingen ca. $5,7 \text{ kW/m}^2$. Dette vil gi en tid til smerte på $4,6$ sekunder og tid til annengradsforbrenning $17,4$ sekunder. Ved en $3,33$ sekunders forflytningstid vil en da ikke kjenne noe smerte. En mer konservativ metode vil være å se på maksimal målt stråling, som da vil gi høyest mulig total stråling. Ved samme ganghastighet vil annengradsforbrenning forekomme så fort som $2,9$ sekunder og tid til smerte er øyeblikkelig ($0,5$ sekunder). Med en $3,33$ sekunders forflytningstid vil en få annengradsforbrenning.

I kapittel 5.3 nevnes det tre akseptkriterier i henhold til stråling. Disse er:

1. Maksgrense for kontinuerlig eksponering: $2,5 \text{ kW/m}^2$
2. Maksgrense for momentan eksponering: 10 kW/m^2
3. Maksgrense for samlet stråling ved eksponering: 60 kJ/m^2

Etter 22 minutter fra brannstart er strålingen $2,5 \text{ kW/m}^2$. Akseptkriterium 1 anses å ikke være spesielt relevant, da det er usannsynlig at en som evakuerer vil påkjennes en kontinuerlig eksponering.

Etter 40 minutter når strålingsintensiteten maksgrensen for momentan eksponering. Dette er mer enn nok tid for en sikker rømning. Selv om målt stråling kombineres med forventet stråling fra døren, vil akseptkriteriet 2 kun overskride 1 minutt tidligere.

Det tar 3,33 sekunder å passere det eksponerte område. Som en kan se i Figur 8.7 vil en aldri, under hele brannforløpet kunne bli eksponert for en total stråling på 60 kJ/m^2 ved denne forflytningstiden.

Hvorvidt innfallende stråling er sterk nok til å kunne skade evakuerende er diskutabelt. Det er mange faktorer som kan ha påvirket utfallet av forsøket, og ved en ekte situasjon vil strålingen kunne være høyere. Faktorer som arealet av vinduet har mye å si på styrken, og i tillegg er døren relativt langt unna. Denne avstanden gir bl.a. en lav synsfaktor, som en kan se i vedlegg A. I tillegg tar ikke forsøket til rette for horisontal brannspredning langs fasaden. Som en kan se fra brannene nevnt i kapittel 2.3 er svalgangsløsninger utsatt for dette, spesielt ved sterk vind. En slik brannspredning fører til en høyere stråling, siden avstanden mellom flammen og trappen blir mindre.

9.4 Cetriss og Construction – Isolasjon

En kunne under forsøket observere mye røyk og flammer som slikket rundt rammene/konstruksjonen, spesielt etter at treverket startet å forkulle. Dersom disse var ubrennbare, med høy brannmotstand, ville platene trolig vart lengre med henhold til testing av isolasjon. Dette er et godt argument for en ovnstest.

Temperaturene bak Cetriss økte sakte inntil rundt 40 minutter etter brannstart, da akselererte den gradvis mer, og etter ca. 45 minutter startet temperaturen å stige drastisk. Bak Construction var det en mer konstant, men høyere økning gjennom hele brannforløpet. Den bråe økningen som kun oppsto bak Cetriss stammer trolig fra en mer fremtredende forkulling av rammen, og konstruksjonen siden Cetriss var 13 cm nærmere vinduet. Denne forkullingen tillot mer røyk å passere på siden av platen.

I kapittel 5.4.1 defineres det to kriterier i henhold til isolasjonsevne:

1. Gjennomsnittstemperatur på ueksponert side skal ikke overstige $140 \text{ }^\circ\text{C}$
2. Ingen punkter på ueksponert side skal overstige en temperatur på $180 \text{ }^\circ\text{C}$

Som det illustreres i Figur 8.5 og Figur 8.3 kan en se at kriterium 1 overskrides etter 46 minutter og kriterium 2 overskrides etter 42 minutter for Cetriss. For Construction skjedde dette 5 minutter tidligere for begge krav, som da er 41 og 42 minutter etter brannstart (se Figur 8.5 og Figur 8.4). Det at Cetriss hadde en tregere temperaturøkning enn Construction, sett bort ifra slutten av forsøket, indikerer en bedre isolasjonsevne. Det er mange faktorer som kan forårsake denne forskjellen, som for eksempel tykkelse og materialsammensetning. Cetriss er 2 mm tykkere, og består av en blanding av trespon og sement. Trevirke har lavere varmeledningsevne enn betong [26]. På grunn av dette er ikke usannsynlig at Cetriss har lavere varmeledningsevne enn Construction, som bare består av sement. I tillegg ble det observert under forsøket at vindretningen gjorde at mer røyk ble blåst mot Construction, som trolig påvirket utfallet.

Det vil være vanskelig å fastsette hvor lenge platene vil holde i henhold til isolasjon. Selv om tidene nevnt ovenfor vil gi en pekepinne, er det usikkert når kriteriene ville blitt overskredet ved en konstant påkjenning. Ved å se på brannen etter den økte i størrelse (15 minutter etter brannstart), ser en at platene fikk en relativt konstant brannpåkjenning ut brannforløpet. Fra dette tidspunktet tok det 26 minutter (Construction) og 31 minutter (Cetriss) før det første kriteriet ble overskredet (gjennomsnittstemperaturen bak passerte $140 \text{ }^\circ\text{C}$). Dette gir en god indikator på hvor lenge platene vil kunne ivareta isolasjonsevnen ved en konstant brannpåkjenning.

9.5 Cetriss og Construction – Integritet

For å sjekke hvor lenge integriteten til platene holdt, ble to metoder tatt i bruk. Disse var observasjoner under forsøket og bomullstester. Fremgangsmåten for bomullstestene beskrives i kapittel 7.7, og ble utført 14 og 29 minutter etter brannstart. Observasjonene presenteres i Tabell 8.1.

Under bomullstest nr.1 ble bomullsbiten ikke påvirket, noe som ikke var overaskende da det ikke var noen sprekker i platene, samtidig som at brannen var liten på dette tidspunktet. 29 minutter etter brannstart var brannen større, men det var fortsatt ikke registrert sprekker i platene. Dette medførte at også bomullsbiten fra bomullstest nr.2 var upåvirket. Ettersom temperaturen foran begge platene lå på rundt 350-400 grader under testen, ville bomullen antent dersom det hadde vært sprekker i platene. I standardiserte tester, vil det at bomullen ikke ble antent, tilsi at integriteten ikke ble svekket innen den tiden. I forsøket som ble utført i denne oppgaven, med bl.a. mangel på konstant brannpåkjenning, vil fraværet av antennelse derfor ikke kunne brukes som en pålitelig indikasjon på ytelsen. Bomullstestene var derfor ikke til stor hjelp for å avgjøre integriteten, men dette kommer fra utførelsen fremfor metoden.

Observasjonene under forsøket ga en bedre indikasjon på hvordan platenes integritet ble påvirket. Da det var mulig å nærme seg platene igjen kunne en se at sprekkdannelse i begge platene hadde skjedd et sted mellom 41 og 50 minutter etter brannstart. Selv om økningen av temperaturen var raskere på Construction, ble Cetriss mer "ødelagt" (se etterbildene i kapittel 8.4. og 8.5). Dette kunne en også se i observasjonene gjort 50 minutter etter brannstart, hvor det var større sprekker i Cetriss, selv med vindretning rettet mot Construction. Dette antyder at integriteten til Construction er bedre enn Cetriss'. Det er rimelig å anta at den gode integriteten til Construction kommer av at den kun består av sement, og ikke noe trebasert. Dette vil kunne være nødvendig å teste ytterligere i videre studier.

I likhet med isolasjonsevne, er det vanskelig å fastsette hvor lenge platenes integritet holdt. En mangel på konstant brannpåkjenning påvirker validiteten av resultatet. Dersom en igjen velger å se på brannen etter den økte i størrelse (15 minutter etter brannstart), kan en se at sprekkdannelsene inntraff en tid mellom 26 og 35 minutter etter dette tidspunktet.

9.6 Værpåvirkning

I VTEK17 er det ingen preaksepterte ytelser som direkte angår værpåvirkning i svalganger. Siden en svalgang er en åpen utvendig løsning, vil dette blant annet tiltatte vind å påvirke brannspredningen. Ved brannene i Nannestad og Solplassen bo- og servicesenter er det registrert at vinden bidro til en større brannspredning.

Fra forsøket kan det antydes at vind påvirket resultatene. Vinden under forsøket blåste mot Construction sin eksponerte side. Som nevnt hadde Construction en brattere temperaturstigning på sin ueksponerte side enn hva Cetriss hadde. Det antas derfor at vinden kan ha bidratt til denne forskjellen. Flamme og røyk kan ha blitt blåst i retning mot Construction som vil ha forårsaket en raskere temperaturstigning på ueksponert side. Dersom dette skulle være tilfelle, viser det at været kan ha en betydelig innvirkning på et brannforløp, noe som kan være aktuelt å vise mer hensyn til ved utforming av svalgang enn det har blitt gjort frem til nå.

9.7 Berørte funksjonskrav

I det følgende skal resultatene diskuteres opp mot de berørte funksjonskravene. Disse kravene er introdusert i kapittel 3.2.

I TEK17 § 11-14, første ledd heter det at [2]:

Rømningsvei skal på en oversiktlig og lettfattelig måte føre til et sikkert sted. Den skal ha tilstrekkelig bredde og høyde og være utført som egen branncelle tilrettelagt for rask og effektiv rømning.

Tilhørende, preakseptert ytelse som fravikes [2]:

Trappene må være beskyttet mot strålevarme fra en eventuell brann i byggverket. Derfor må enten de trapperomsveggene som vender mot byggverket eller byggverkets yttervegg mot trappen og 5,0 meter til hver side for denne, være utført som branncellebegrensende konstruksjon, (...)

Trappen fra caset er åpen, og kan derfor ikke utføres som en branncelle. På grunn av dette vil det være vanskelig å sette resultatene opp mot selve funksjonskravet. Likevel kan en si at kravet ikke avvikes dersom platene fungerer som en alternativ ytelse til den preaksepterte. For å avgjøre om platene vil kunne gi en lik, eller bedre sikkerhet enn den preaksepterte ytelsen kreves det en mer omfattende analyse, fordi resultatene fra denne oppgaven gir kun en indikasjon.

Dersom en svalgangsløsning er utført med en 5 meters avstand mellom trapp og byggverk, vil dette gi en pålitelig beskyttelse fra strålevarme i form av lav synsfaktor. For bygget i caset er det mer relevant å installere dør og vindu med brannmotstand, da bygget allerede er oppført med mangelfull avstand. Dersom bygget i caset skulle bli løst med preaksepterte ytelser ville det være mer hensiktsmessig å installere dør og vindu med brannmotstand siden det allerede er oppført med mangelfull avstand. Hvis dette gjøres vil ytterveggen anses som et branncellebegrensende skille, siden yttervegger vanligvis allerede ligger på EI 30 eller høyere.

Siden løsningene nevnt ovenfor er preakseptert ytelser er det forutsatt at det vil gi en tilfredsstillende beskyttelse. Det virker ikke som at platene er en like pålitelig løsning, som hva 5 meters avstand vil gi. Avstanden er en bestemt faktor, i motsetning til platene som kan påvirkes av ting som værpåkjønning og montering. Dersom en sammenligner platene med en yttervegg på EI 30, vil de tilsynelatende ivareta ytelsene lengre. Dette er kun om en ser på hele brannforløpet, hvor da det første kriteriet som blir overskredet er at gjennomsnittstemperaturen bak Construction passerer 140 °C etter 41 minutter. Dette tar ikke hensyn til mangel på konstant brannpåkjønning da brannens størrelse avtok mellom 7 og 15 minutter etter brannstart (se Figur 8.2). Om en heller ser på den konstante brannpåkjønningen fra 15 minutter og ut, blir kriteriet overskredet etter 26 minutter.

I TEK17 § 11-11, femte ledd heter det at [2]:

I den tiden en branncelle eller rømningsvei skal benyttes til rømning av personer, skal det ikke kunne forekomme temperaturer, røykgasskonsentrasjoner eller andre forhold som hindrer rømning.

Dette funksjonskravet stiller krav til at det ikke skal forekomme forhold som hindrer rømning. I denne oppgaven er det fokusert på stråling siden trappen i caset er åpen, og det er urealistisk at forhold som røykgasskonsentrasjoner vil kunne hindre rømning. I delkapittelet hvor stråling diskuteres, viser det seg at etter 40 minutter (41 med døren) inn i brannforløpet vil stråling kunne "hindre" rømning ved at akseptkriterium 2 blir overskredet. Det er sannsynlig at alle vil ha evakuert innen dette, og derfor er det en mulighet for at platene ikke er nødvendig for å få funksjonskravet godkjent. Likevel gir platene en større ASET, og da også en bedre sikkerhetsmargin, noe som alltid er positivt.

9.8 Usikkerhet og feilkilder

Etter gjennomførelse av forsøk ser man at det er en rekke ting som må tas med i betraktning med tanke på resultatene. Under lists feilkilder som kan ha påvirket usikkerheten rundt forsøket.

- **Forsøket ble kun utført én gang.** Resultatene har dermed ingen sammenligningsgrunnlag. Dette gjør resultatene og dataen mindre troverdige enn om en hadde utført forsøket flere ganger og dermed hatt mer data å støtte opp konklusjonen med.
- **Det oppsto brann på ueksponert side,** som har påvirket temperaturmålingene. Det er en betydelig usikkerhet i hvordan målingene ville utartet seg dersom brannen ikke hadde oppstått.
- **Platene fikk ikke konstant brannpåkjenning** under hele forsøket. Det var omtrent 35 minutter etter brannstart flammer startet å slikke på platene. Dette gjør det usikkert i hvor lang tid platene vil kunne opprettholde sin integritet- og isolasjonsfunksjon.
- **Vind som blåste på forsøkskonstruksjonen,** kan ha hatt påvirkning på den registrerte dataen målt. Det er usikkert hvor stor betydning dette hadde for resultatet.
- **Forsøksrommet var fuktig ved brannstart.** Dette gjorde brannforløpet tregere enn planlagt og det er usikkert hvordan dette slo ut på resultatene til platene.
- **Forsøksrommet var preget av mye slitasje** fra tidligere forsøk. Det var blant annet ikke tett da røyk kunne bli observert sivende ut fra tak og vegger. Det blir antatt å ha hatt lite betydning under forsøket.
- **Vinden kan ha kjølt ned platetermometeret og termoelementene** som følge av konveksjon som ville gjøre målingene mer usikre. Platene bør dermed testes også i et miljø hvor vær og vind ikke har en påvirkning slik det hadde i forsøket. Dette vil klargjøre om vær og vind hadde en påvirkning slik som antydnet. En metode å teste platene på uten påvirkning fra vær er en ovnstest.
- **Avstanden til platene var forskjellig.** Dersom de hadde hatt samme avstand ville kanskje forskjellen i integritet og isolasjon vært annerledes.

9.9 Videre arbeid

For å argumentere for at platene kan bli brukt på en slik måte beskrevet i caset, anbefales det å utføre videre undersøkelser av platene. Det anbefales blant annet å:

- Teste platene med standardiserte teste for integritet og isolasjon i henhold til NS-EN 1363.
- Utføre simulering av brann med bygningens fasade. Se på tid til kritisk forhold i trapp med og uten plater.
- Utføre et fullskala brannforsøk med bygningsfasadens nøyaktige mål, hvor det brenner ut fra både dør og vindu.
- Utføre flere forsøk likt som i denne oppgaven for å samle mer data.

10 Konklusjon

Ved hjelp av ett forsøk basert på et case tildelt av oppdragsgiver, er det blitt sett på innfallende stråling på trapper ved svalgangsløsninger. Dette var av interesse for å kunne avgjøre om sementbaserte bygningsplater langs rekkverket kan brukes som beskyttelse fra strålevarme, og dermed også en fraviksløsning hvis det verken er tilfredsstillende avstand, eller branncellebegrensende skille. Målingene under forsøket besto i hovedsak av å teste platenes ytelse innen isolasjon og integritet, samt å få et inntrykk av den innfallende stråling dersom de ikke tas i bruk.

Det er brukt tre anerkjente akseptkriterier innenfor varmestråling for å avgjøre alvorlighetsgraden av eksponering under forflytning. Akseptkriteriet for maksimal momentan eksponering er det eneste som blir overskredet, men dette skjer ikke før langt ut i brannforløpet. På grunn av dette er tid til smerte og annengradsforbrenning beregnet, og disse gir et bedre inntrykk av nødvendigheten for skjerming. Ved den sterkeste strålingen tar det kun et halvt sekund før smerte, og en vil få annengradsforbrenning etter 2,9 sekunder. Det er ikke usannsynlig at en kan få annengradsforbrenning, siden det er beregnet en forflytningstid på 3,33 sekunder. Varmestrålingen vil ikke kunne passere platene, og de vil derfor gi en beskyttelse fra innfallende stråling.

Ytelsene integritet og isolasjon vises å være forskjellig mellom bygningsplatene Cetris og Construction.

Resultatene tilsier at isolasjonsevnen til Cetris er bedre enn Constructions. Dette ble funnet ved å måle temperaturen på ueksponert side av platene. Både maksimal og gjennomsnittlig temperatur bak Construction passerte gitte maksgrenser 5 minutter tidligere. Det konkluderes med at dette stammer fra Cetris' materialsammensetning og ekstra tykkelse. Det er flere usikkerhetsmomenter som kan ha påvirket dette utfallet, som blant annet røyk som kom på ueksponert side og vindretning. Ved en ovnstest vil disse faktorene ikke være til stede.

Det ble utført bomullstest og observasjonsrunder for å prøve integriteten til platene. Bomullstesten var ikke til stor hjelp for å avgjøre denne ytelsen. Observasjonene under forsøket viste at Cetris' integritet ble svekket i en større grad enn Constructions. Grunnen til dette er at verken Cetris eller Construction hadde sprekker da testene ble utført. Etter 50 minutter ble det observert sprekker, hvor det var tydelig at Cetris var mest påvirket. Det konkluderes med at forskjellen i integritet, igjen stammer fra materialsammensetningen.

I oppgaven er det presentert to berørte funksjonskrav.

Den preaksepterte ytelsen som fravikes i caset, tilhører § 11-14-01. Selv om bygningsplatene vil gi en skjerming fra stråling, konkluderes det med at de alene ikke vil gi en lik eller bedre ytelse enn hva de preaksepterte vil. Likevel kan de brukes i kombinasjon med andre løsninger, og da er det mer sannsynlig at de kan oppfylle funksjonskravet. Det vil kreve en mer utdypende analyse for å bevise at platene alene, eller med flere løsninger vil kunne gi en alternativ, men tilfredsstillende ytelse.

I § 11-11-05 heter det at "I den tiden en branncelle eller rømningsvei skal benyttes til rømning av personer, skal det ikke kunne forekomme (...) forhold som hindrer rømning." [2]. Som det nevnes tidligere, vil en kunne få annengradsforbrenning ved verst tenkelig scenario dersom det ikke er implementert en beskyttelse fra strålevarme. I den tiden platene tåler brannpåkjenningen, vil de fungere som en beskyttelse fra strålevarme. Forsøket viser at platene ivaretar ytelsene isolasjon og integritet i minst 26 minutter med konstant brannpåkjenning, men en må utføre ytterligere analyse for å teste om dette gir en tilfredsstillende sikkerhet.

11 Referanser

- [1] O. Brochmann og O. Storsletten, «bolig - historikk,» Store norske leksikon, 2016. [Internett]. Available: https://snl.no/bolig_-_historikk. [Funnet 20 februar 2020].
- [2] Direktoratet for byggkvalitet, «Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning,» 2017. [Internett]. Available: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/>.
- [3] SINTEF, «323.111: Svalganger i boligbygninger,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/>. [Funnet 5 april 2020].
- [4] Norsk lokalhistorisk institutt, «Svalgang,» Nasjonalbiblioteket, 2019. [Internett]. Available: <https://lokalhistoriewiki.no/wiki/Svalgang>. [Funnet 24 april 2020].
- [5] L. Brenden, «Brannen i Solplassen bo- og servicesenter – Bergen,» 2000. [Internett]. Available: <http://www.brannmannen.no/brann/brannen-solplassen-bo-servicesenter-bergen/>. [Funnet 24 april 2020].
- [6] Statens bygningstekniske etat (BE) og Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), «Evaluering av brannen i Prestemosvegen 15, Nannestad 28.09.2008,» BE/DSB, Oslo, Norge, 1 september 2009.
- [7] Norsk brannvernforening, «Slik kunne brannen i Kvinesdal vært unngått,» 2019. [Internett]. Available: https://brannvernforeningen.no/brann-og-sikkerhet/2019/11/slik-kunne-brannen-i-kvinesdal-vart-unngatt/?fbclid=IwAR11WhxLyMml3I16IShJob8iTcl7FMX2wnizPEg70so7oJgBV63SAQXB_9s. [Funnet 10 april 2020].
- [8] «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven),» 2013. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2008-06-27-71>.
- [9] M. Bergmål og S. E. Wang, «Hjelp, jeg bor ved en svalgang,» 2013. [Internett]. Available: <https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/handle/11250/152051>.
- [10] Statens Bygningstekniske etat (BE), «REN Veiledning til teknisk forskrift til plan- og bygningsloven (VTEK97), 1. utgave,» 1997. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veil_tek_forskr_220197_nr_33.pdf.
- [11] Statens bygningstekniske etat (BE), «Veiledning til byggteknisk forskrift (VTEK10), 1. utgave,» 2010. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/contentassets/20503ddfe0664fac9e2185c1a6c80716/veil_tek10_nov_2010.pdf.
- [12] Analyse&Strategi og Multiconsult, «Utredning av mulige endringer i veil. til TEK10 vedr. rømningsveier,» 2016. [Internett]. Available: https://dibk.no/globalassets/byggeregler/tek10-til-tek17/rapporter/utredning-1-av-3-av-mulige-enderinger-i-veiledningen-til-tek10-vedr.-romningsveier_multiconsult_feb-2016.pdf.
- [13] B. Kristoffersen, «Utførelse av svalgang som rømningsvei,» SINTEF, Trondheim, 2003.
- [14] Cembrit AS, «Om oss,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.cembrit.no/om-cembrit/>. [Funnet 6 april 2020].
- [15] Cembrit AS, «Cetris,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.cembrit.no/bygningsplater/cetris/>. [Funnet 16 mai 2020].

- [16] Cembrit AS, «Monteringsanvisning Cetris bygningsplate,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.cembrit.no/media/8630/2017-02-cetris-monteringsanvisning.pdf>. [Funnet 31 mars 2020].
- [17] Cembrit AS, «Cembrit Construction (Frontex),» 2018. [Internett]. Available: https://www.cembrit.no/media/2039182/2018_cembrit_construction_brosjyre_low.pdf. [Funnet 16 mai 2020].
- [18] Cembrit AS, «Cembrit Construction Datasheet,» 2018. [Internett]. Available: <https://www.cembrit.no/media/7819/cembrit-construction-datasheet.pdf>. [Funnet 3 april 2020].
- [19] Cembrit AS, «Cembrit Construction,» 2018. [Internett]. Available: https://www.cembrit.no/media/2039658/2020-04-cembrit-fasade-monteringsanvisning-tre_low.pdf. [Funnet 31 mars 2020].
- [20] T. Melcher, R. Zinke, M. Trott og U. Krause, «Experimental investigations on the repeatability of real scale fire tests,» *Fire Safety Journal*, vol. 82, s. 115-117, 2016. [Internett]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.03.009>.
- [21] B. C. Hagen, *Grunnleggende brannteknikk*, Haugesund: Hagens forlag, 2014.
- [22] *Fire tests : Full scale room test for surface products*, ISO 9705, 1996.
- [23] *Analytisk brannteknisk prosjektering - Komparativ metode for verifikasjon av brannsikkerhet i byggverk*, SN-INSTA/TS 950, 30 april 2014.
- [24] *Prøving av brannmotstand Del 1: Generelle krav*, NS-EN 1363-1, 2012.
- [25] SINTEF, «520.320: Brannteknisk klassifisering og dokumentasjon av bygningsdeler og byggeprodukter,» 2017. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/>. [Funnet 28 februar 2020].
- [26] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, 3. utgave, Edinburg: John Wiley & Sons Ltd. Publications, 2011.
- [27] A. Häggkvist, J. Sjöström og U. Wickström, «Using plate thermometer measurements to calculate incident heat radiation,» *Jornal of Fire Sciences*, vol. 31, 2. utgave, s. 166-177, 2013. [Internett]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734904112459264>.
- [28] U. Wickström, J. Sjostrom og J. Anderson, «Measuring Incident Heat Flux and Adiabatic Surface Temperature with Plate Thermometers in Ambient and High Temperatures,» 2017. [Internett]. Available: https://www.researchgate.net/publication/305380358_PTHFM_-_PT_Heat_Flux_Meter_for_measuring_radiant_heat_flux. [Funnet 16 mai 2020].
- [29] F. A. Kraaijeveld, *personlig kommunikasjon*, 23. mars 2020.
- [30] B. Karlsson og J. Quintiere, *Enclosure Fire Dynamics*, Florida: CRC Press, 1999.
- [31] SINTEF, «520.387: Tilgjengelig rømningstid ved brann,» 2016. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/>. [Funnet 1 april 2020].
- [32] SINTEF, «520.385: Nødvendig rømningstid ved brann,» SINTEF, 2016. [Internett]. Available: <https://www.byggforsk.no/>. [Funnet 30 mars 2020].
- [33] SINTEF og Scandpower, *Handbook for Fire Calculations and Fire Risk Assessment in the Process Industry*, Kjeller: Scandpower, 1997.
- [34] Morgan J. Hurley, red., *SFPE Handbook of Fire Protection*, 5. utgave, New York: Springer, 2016.

- [35] ResQ, «Sikkerhets og berednessopplæring: Side på ResQ sine hjemmesider,» [Internett]. Available: <https://www.resq.no/sikkerhetsopplæring>. [Funnet 19 april 2020].
- [36] Kartverket, NIBIO og Statens vegvesen, «Norge i bilder: Satelittbilder av Norge,» Kartverket, NIBIO og Statens vegvesen, 2017. [Internett]. Available: www.norgebilder.no. [Funnet 7 april 2020].
- [37] R. Mathisen, «Temperaturmålinger,» Nasjonal digital læringsarena (NDLA), 2018. [Internett]. Available: <https://ndla.no/subjects/subject:28/topic:1:105763/topic:1:54000/resource:1:117437>. [Funnet 2 april 2020].
- [38] Wenaas, «Ånderettsvern og vernemaske,» 2020. [Internett]. Available: <https://www.wenaas.com/nb-no/vernemaske-og-aandedrettsvern>. [Funnet 2 april 2020].
- [39] Meteorologisk institutt og nrk, «Bleivik, Haugesund (Rogaland), 28 moh. 11.mars 2020,» [Internett]. Available: <https://www.yr.no/nb/historikk/graf/1-35935/Norge/Rogaland/Haugesund/Bleivik?q=2020-03-11>. [Funnet 12 mars 2020].

Vedlegg A – Håndberegninger av forventet stråling

Oppsummering av beregningene

I vedlegg A presenteres utregningen av en konservativ metode for å finne forventet stråling under forsøket. Etter 15 minutter vil temperaturen ligge på $T_{15} = 1012 \text{ K}$. Ved det verst tenkelige scenarioet vil strålingen fra døren og vinduet være henholdsvis 2,52 og $17,29 \text{ kW/m}^2$, og totalt gi en innfallende stråling på $\dot{q}''_{tot} = 19,81 \text{ kW/m}^2$. Nedenfor vises utregningene.

Temperatur etter 15 minutter (se kapittel 5.1).

For å finne hva temperaturen ville vært i rommet etter 15 minutter, brukes standardbrannen ISO-834.

$$T_{15} = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) + T_0$$

$$T_{15} = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot 15 + 1) + 293 \text{ [K]}$$

$$T_{15} = 1012 \text{ K}$$

Total strålingsintensitet (se kapittel 6.1.2)

Temperaturen funnet ovenfor brukes for å finne total strålingsintensitet fra brannen. Emissiviteten settes til $\varepsilon = 0,8$. (ref. [33])

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$E = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \cdot 1012^4 \text{ K}^4$$

$$E = 48 \text{ kW/m}^2$$

Synsfaktor fra dør/vindu til rekkverk (se kapittel 6.1.2)

Synsfaktoren blir funnet for flammen fra både døren og vinduet, til rekkverket hvor Construction skal festes.

Ved valget av vinklene og avstandene er det tatt utgangspunkt i verst tenkelig scenario (se kapittel 3.3). Vinklene θ_a og θ_b er da 0, noe som gir synsfaktorene høyest mulig verdi. I dette tilfelle vil r_D og r_V være avstanden fra midten av flammen ut vinduet/døren, til rekkverket på trappen. Alle avstandene og arealene er presentert i kapittel 3, og de relevante er:

$$A_D = 1,80 \text{ m}^2$$

$$A_V = 1,00 \text{ m}^2$$

$$r_D = 2,87 \text{ m} + \frac{0,86}{0,5} \text{ m} = 3,30 \text{ m}$$

$$r_V = 0,44 \text{ m} + \frac{1}{0,5} \text{ m} = 0,94 \text{ m}$$

Flamme ut døren til rekkverket

$$\varphi_D = \int_0^{A_D} \frac{\cos\theta_a \cos\theta_b}{\pi r_D^2} dA_D = \int_0^{A_D} \frac{\cos 0 \cos 0}{\pi r_D^2} dA_D = \int_0^{A_D} \frac{1}{\pi \cdot 3,3^2} dA_D$$

$$\varphi_D = \left[\frac{A_D}{\pi \cdot 3,3^2} \right]_0^{1,8} = \frac{1,8}{\pi \cdot 3,3^2}$$

$$\varphi_D = 0,0526 [-]$$

Flamme ut vindu til rekkverket

$$\varphi_V = \int_0^{A_V} \frac{\cos\theta_a \cos\theta_b}{\pi r_V^2} dA_V = \int_0^{A_V} \frac{\cos 0 \cos 0}{\pi r_V^2} dA_V = \int_0^{A_V} \frac{1}{\pi \cdot 0,94^2} dA_V$$

$$\varphi_V = \left[\frac{A_V}{\pi \cdot 0,94^2} \right]_0^1 = \frac{1}{\pi \cdot 0,94^2}$$

$$\varphi_V = 0,3602 [-]$$

Innfallende stråling fra flamme ut vindu + dør (se kapittel 6.1.2)

Den innfallende strålingen som treffer rekkverket, er et produkt av synsfaktorene og total strålingsintensiteten funnet ovenfor. For å finne den totale forventede strålingen (\dot{q}''_{tot}), summeres strålingen fra døren (\dot{q}''_D) og vinduet (\dot{q}''_V).

$$\dot{q}'' = \varphi \cdot E$$

Døren:

$$\dot{q}''_D = \varphi_D \cdot E$$

$$\dot{q}''_D = 0,0526 \cdot 48 \text{ kW/m}^2$$

$$\dot{q}''_D = 2,5 \text{ kW/m}^2$$

Vinduet:

$$\dot{q}''_V = \varphi_V \cdot E$$

$$\dot{q}''_V = 0,3602 \cdot 48 \text{ kW/m}^2$$

$$\dot{q}''_V = 17,3 \text{ kW/m}^2$$

Totalt:

$$\dot{q}''_{tot} = \dot{q}''_D + \dot{q}''_V$$

$$\dot{q}''_{tot} = (2,5 + 17,3) \text{ kW/m}^2$$

$$\dot{q}''_{tot} = 19,8 \text{ kW/m}^2$$

Vedlegg B – Håndberegninger for brenselstyrt brann

(se kapittel 6.2.3 for teori)

Oppsummering av beregninger

Dette vedlegget presenterer metoden brukt for å finne varmeproduksjon som er nødvendig for å få overtenning, og tiden dette vil ta. I teorien vil det etter 35 sekunder være $\Delta T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ og overtenning vil inntreffe med en varmeproduksjon på $1,1 \text{ MW}$. Ved $A_f = 0,75 \text{ m}^2$ med diesel som brensel får en $1,5 \text{ MW}$ i varmeproduksjon, noe som er mer enn nødvendig for å få en overtenning i forsøksrommet.

Areal til brenselkaret

To Leca blokker ble plassert i karet for å redusere branneffekten. Karet hadde originalt et areal på 1 m^2 .

$$A_f = A_{kar} - 2 \cdot A_{leca}$$

$$A_f = 1 \text{ m}^2 - 2 \cdot (0,25 \cdot 0,50) \text{ m}^2$$

$$A_f = 0,75 \text{ m}^2$$

Diameter til karet

For å beregne effekt er det nødvendig med karets diameter. Siden karet er kvadratisk, kan den hypotetiske diameteren finnes slik:

$$A_f = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d^2}{4} \right) = d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_f}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,75 \text{ m}^2}{\pi}} = 0,9772 \dots \text{ m}$$

$$d \approx 1 \text{ m}$$

Omhyllingsflaten til forsøksrommet

$$A_T = 2(hb + hl + bl) - A_0$$

$$A_T = 2 \cdot (2,2 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m} + 2,2 \text{ m} \cdot 3,4 \text{ m} + 2,4 \text{ m} \cdot 3,4 \text{ m}) - 1 \text{ m}^2$$

$$A_T = 40,8 \text{ m}^2$$

Tid til $\Delta T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ved hjelp av iso 843-kurve (se kapittel 5.1)

$$T_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T = 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$e^{\frac{\Delta T}{345}} = 8t + 1$$

$$t = \frac{e^{\frac{\Delta T}{345}} - 1}{8} = \frac{e^{\frac{600}{345}} - 1}{8}$$

$$t = 35 \text{ s}$$

Effektiv varmeledningskoeffisient etter 35 sekunder

$k\rho c$ for lettbetong tatt ut ifra *Enclosure fire dynamics* tabell 6.1 [29]

$$k\rho c = 7,5 \cdot 10^4 \frac{W^2 s}{m^4 K^2}$$

$$h_k = \sqrt{\frac{7,5 \cdot 10^4 \frac{W^2 s}{m^4 K^2}}{35 s}} = 46 \frac{W}{m^2 K}$$

$$h_k = 0,046 \frac{kW}{m^2 K}$$

Varmeproduksjon ved $\Delta T = 600$ °C, etter 35 sekunder

For å finne nødvendig varmeproduksjon for å få overtenning i forsøksrommet etter 35 sekunder, brukes denne formelen:

$$\dot{Q}_{FO} = 820 \cdot (h_k A_T A_0 \sqrt{H_0})^{\frac{1}{2}}$$

$$\dot{Q}_{FO} = 820 \cdot \sqrt{0,046 \cdot 40,8 \cdot 1 \cdot \sqrt{1}} [MW]$$

$$\dot{Q}_{FO} = 1,1 MW$$

Varmeproduksjon ved $A_f = 0,75 m^2$

I tabell 3.6 fra *Enclosure fire dynamics* [29] står det oppgitt at $1 m^2$ med diesel har en varmeproduksjon på ca. 2 MW.

$$\dot{Q}_{0,75} = \dot{Q}_1 \cdot A_f / A$$

$$\dot{Q}_{0,75} = 2 MW \cdot 0,75 m^2 / 1 m^2$$

$$\dot{Q}_{0,75} = 1,5 MW^*$$

*Dette er kun et grovt estimat. Forholdet mellom varmeproduksjon og areal av brenselskar er ikke linjert, og det finnes mer nøyaktige måter å finne en mer virkelighetsnær $\dot{Q}_{0,75}$.

Vedlegg C – Håndberegninger for ventilasjonsstyrt brann

(se kapittel 6.2.4 for teori)

Oppsummering av beregninger

Vedlegg C presenterer utregningen av maksimal varmeproduksjon, etter at brannen er blitt ventilasjonsstyrt. Når brannen blir fullt utviklet er den maksimale varmeproduksjonen 1,5 MW.

Maksimal luftgjennomstrømning når brannen er fullt utviklet og ventilasjonsstyrt

$$\dot{m}_{luft} = 0,5A_0\sqrt{H_0}$$

$$\dot{m}_{luft} = 0,5 \cdot 1 \cdot \sqrt{1} \text{ [kg}_{luft}/s \text{]}$$

$$\dot{m}_{luft} = 0,5 \text{ kg}_{luft}/s$$

Forbrenningsvarme ($\Delta H_{C,luft}$)

$$\Delta H_{C,luft} = \Delta H_{C,O_2} \cdot kg_{O_2}/kg_{luft}$$

$$\Delta H_{C,luft} = 13,2 \text{ MJ/kg}_{oksygen} \cdot 0,23$$

$$\Delta H_{C,luft} = 3 \text{ MJ/kg}_{luft}$$

Varmeproduksjon ved maksimal luftgjennomstrømning

$$\dot{Q} = \dot{m}_{luft} \cdot \Delta H_{C,luft}$$

$$Q = 0,5 \text{ kg}_{luft}/s \cdot 3 \text{ MJ/kg}_{luft}$$

$$Q = 1,5 \text{ MW}$$

Vedlegg D – Målt stråling under forsøket

(se kapittel 6.1.3 for teori)

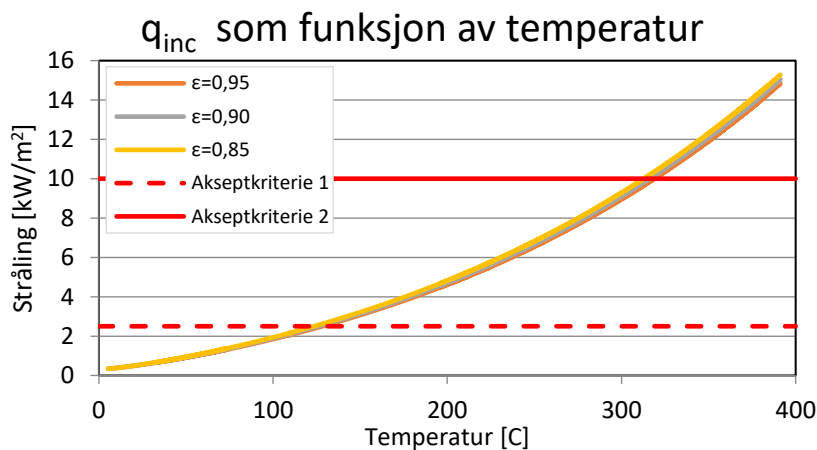
Oppsummering

Den målte adiabatisk overflatetemperatur (T_{pt}) ble gjort om ved hjelp av et Excel-arket med forhåndsinnstilte ligninger. Denne tar i bruk ligning (Y2) og en forenklet versjon av ligning (Y1), i.e. ligning (Y3). Symboler og subscripts forklares i kapittel 6.1.3. Emissiviteten varierer med platetermometeret, og er derfor oppgitt i tre forskjellige verdier. Ved plote inn T_{pt} i Excel-arket får en Figur D.1 og Figur D.2.

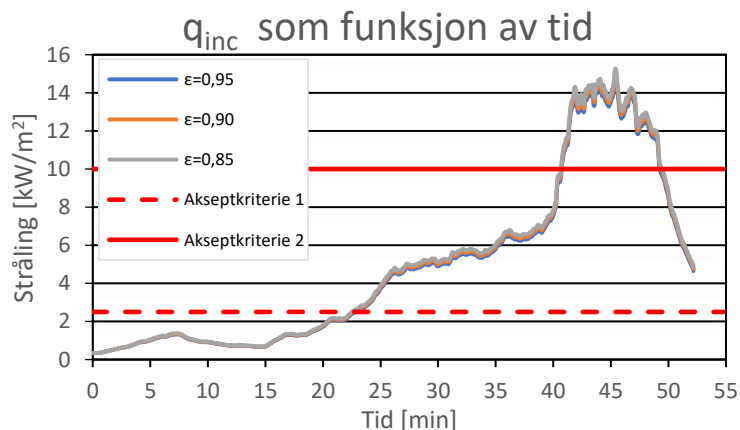
$$\dot{q}''_{inc} = \sigma \cdot T_{pt}^4 - \frac{1}{\epsilon_{pt}} (h_{pt} + K) \cdot (T_g - T_{pt}) - C \cdot dT_{pt}t \tag{Y1}$$

$$h_{pt} = 76 \cdot \left(\frac{T_{pt} + T_g + 273 \cdot 2}{2} \right)^{-0,66} \cdot |T_{pt} - T_g|^{1/3} \tag{Y2}$$

$$\dot{q}''_{inc} = \sigma \cdot T_{pt}^4 - \frac{h_{pt}}{\epsilon_{pt}} \cdot (T_g - T_{pt}) \tag{Y3}$$



Figur D.1 – Stråling som funksjon av temperatur



Figur D.2 – Stråling som funksjon av tid

Vedlegg E – Forventet stråling fra dør + målt stråling fra vindu

(se kapittel 6.3.3 for teori)

Oppsummering

I vedlegg A ble det utført håndkalkuleringer for å finne total forventet stråling fra døren og vinduet. I dette vedlegget summeres forventet stråling fra døren funnet i vedlegg A (\dot{q}_D''), med den innfallende stråling målt under forsøket presentert i vedlegg D (\dot{q}_{inc}'').

Innfallende stråling \dot{q}_{inc}'' ved forskjellige tider

Det er valgt å presentere flere verdier for \dot{q}_{inc}'' . Disse er blant annet 15, 30 og 45 minutter etter brannstart.

$$\dot{q}_{inc,15}''$$

$$\dot{q}_{inc,30}''$$

$$\dot{q}_{inc,45}''$$

I tillegg til disse tre, anses de som presenteres under som relevante:

$$\dot{q}_{inc,24}''$$

Som er innfallende stråling når temperaturen i vinduet ble $T_{15} = 1012 \text{ K}$. Dette er temperaturen fra når \dot{q}_D'' ble funnet.

(24 min 10 s etter brannstart)

$$\dot{q}_{inc,m}''$$

Som er maksimal innfallende stråling under forsøket.

(45 min 25 s etter brannstart)

Total innfallende stråling

For å finne den totale innfallende strålingen \dot{q}_{tot}'' summeres strålingen som ble målt under forsøket, med stråling fra døren funnet ved håndberegninger.

$$\dot{q}_D'' = 2,5 \text{ kW/m}^2$$

$$\dot{q}_{tot}'' = \dot{q}_D'' + \dot{q}_{inc}''$$

Oversikt over \dot{q}_{tot}'' ved de tidene som kan anses å være relevant presenteres i tabellene under:

Etter 15 minutter:

Tabell E.1 – Stråling etter 15 minutter

	$\dot{q}''_{15} [kW/m^2]$	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$
$\varepsilon = 0,85$	0,702	3,20
$\varepsilon = 0,90$	0,691	3,19
$\varepsilon = 0,95$	0,682	3,18

Etter 30 minutter:

Tabell E.2 – Stråling etter 30 minutter

	$\dot{q}''_{30} [kW/m^2]$	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$
$\varepsilon = 0,85$	5,118	7,618
$\varepsilon = 0,90$	5,002	7,502
$\varepsilon = 0,95$	4,899	7,399

Etter 45 minutter:

Tabell E.3 – Stråling etter 45 minutter

	$\dot{q}''_{45} [kW/m^2]$	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$
$\varepsilon = 0,85$	13,932	16,432
$\varepsilon = 0,90$	13,708	16,208
$\varepsilon = 0,95$	13,507	16,007

For \dot{q}''_{24}

Tabell E.4 – Stråling når brannen i vinduet har temperatur $T = 1012 K$

	$\dot{q}''_{24} [kW/m^2]$	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$
$\varepsilon = 0,85$	3,164	5,664*
$\varepsilon = 0,90$	3,087	5,587
$\varepsilon = 0,95$	3,019	5,519

For \dot{q}''_m

Tabell E.5 – Maksimal stråling under brannforløpet

	$\dot{q}''_m [kW/m^2]$	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$
$\varepsilon = 0,85$	15,280	17,780**
$\varepsilon = 0,90$	15,044	17,544
$\varepsilon = 0,95$	14,833	17,333

*Dette er strålingen ved 1012 K i vinduet, og er den samme temperaturen som brukes for å finne forventet stråling. Denne brukes i diskusjonsdelen.

**Dette er den sterkeste strålingen som ble målt, og vil derfor oppstå under verst tenkelig scenario. Denne brukes i diskusjonsdelen.

Vedlegg F – Beregning av eksponering for stråling

For å undersøke hvor mye stråling en person som evakuerer fra 2.etg blir utsatt for i trappeløpet må ganghastigheten beregnes. Ganghastigheten skal beregnes med Ligning 6.13 introdusert i kapittel 6.3.2. Deretter blir distansen i trappeløpet som er strålingseksponert delt på ganghastigheten for å finne tid person som evakuerer utsettes for stråling.

Ganghastighet

Siden det rømmes i nedover i trapp, blir $k = 1,08$ m/s. Persontettheten bestemmes til $D = 0,5$ med bakgrunn i tabell 64 i Byggforskseriens artikkel «520.385 Nødvendig rømningstid ved brann». Fra samme artikkel har en at $a = 0,266$ m²/pers. Da har man at ganghastigheten ned trappeløpet er

$$v = (1 - aD)k$$

$$v = (1 - 0,266 \cdot 0,5) \cdot 1,08$$

$$v \approx 0,9 \frac{m}{s}$$

Tid i strålingseksponert område

Den eksponerte distansen ned trappeløpet er målt til 2 m og kan bli sett i Figur 3.1. Den tiden evakuerende person fra 2. etasje vil oppholde seg i strålingseksponert område vil da være

$$t_{trapp} = \frac{\text{eksponert distanse } m}{\text{ganghastighet } m/s}$$

$$t_{trapp} = \frac{2 \text{ m}}{0,9 \text{ m/s}} = 2,22 \text{ s}$$

Tiden i eksponert område vil være 2,22 sekunder. På grunn av usikkerhet rundt antagelse av parametere for ganghastighet og den målte eksponerte distansen suppleres det videre med en sikkerhetsmargin på 50 % som vil si at den totale tiden da vil bli 3,33 sekunder.

Strålepåvirkning på mennesket

Strålingen som trappeløpet blir eksponert for er beregnet i vedlegg E. Kapittel 6.3.3 presenterer ligninger som beskriver tåleevnen til mennesket utsatt for varmestråling.

Den høyeste strålingen som ble registrert ut vinduet var 15,28 kW/m², hvis man legger til strålingen fra døren på (2,50 kW/m²) har man en total stråling på 17,78 kW/m². Strålingsmengden som kreves for å forårsake blemmer i et tidsvindu på 3,33 sekunder beregnes til:

$$\dot{q}'' = 56,7 t_e^{-0,71}$$

$$\dot{q}'' = 56,7 \cdot 3,33^{-0,71}$$

$$\dot{q}'' = 24,14 \text{ kW/m}^2 \quad > \text{maksimal stråling i trappeløp}$$

Strålingen nødvendig for å påføre blemmer er høyere enn den maksimale strålingen i trappeløpet og det vil derfor ikke utgjøre en risiko.

Følgende hendelser blir beregnet og listes i tabell under.

- Tid til smerte (t_p)
- Tid til andregrads forbrenning (t_{2nd})

Etter 15 minutter ved de ulike emissiviteten har man at:

Tabell F.1 – Eksponering av stråling etter 15 minutter

	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$	$t_{2nd} [s]$	$t_p [s]$
$\varepsilon = 0,85$	3,20	42,4	13,7
$\varepsilon = 0,90$	3,19	42,6	13,8
$\varepsilon = 0,95$	3,18	42,8	13,9

Etter 30 minutter:

Tabell F.2 – Eksponering av stråling etter 30 minutter

	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$	$t_{2nd} [s]$	$t_p [s]$
$\varepsilon = 0,85$	7,62	10,9	2,6
$\varepsilon = 0,90$	7,50	11,2	2,7
$\varepsilon = 0,95$	7,40	11,5	2,8

Etter 45 minutter:

Tabell F.3 – Eksponering av stråling etter 45 minutter

	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$	$t_{2nd} [s]$	$t_p [s]$
$\varepsilon = 0,85$	16,43	3,3	0,6
$\varepsilon = 0,90$	16,21	3,4	0,6
$\varepsilon = 0,95$	16,00	3,4	0,6

For \dot{q}''_{24}

Tabell F.4 – Eksponering for \dot{q}''_{24}

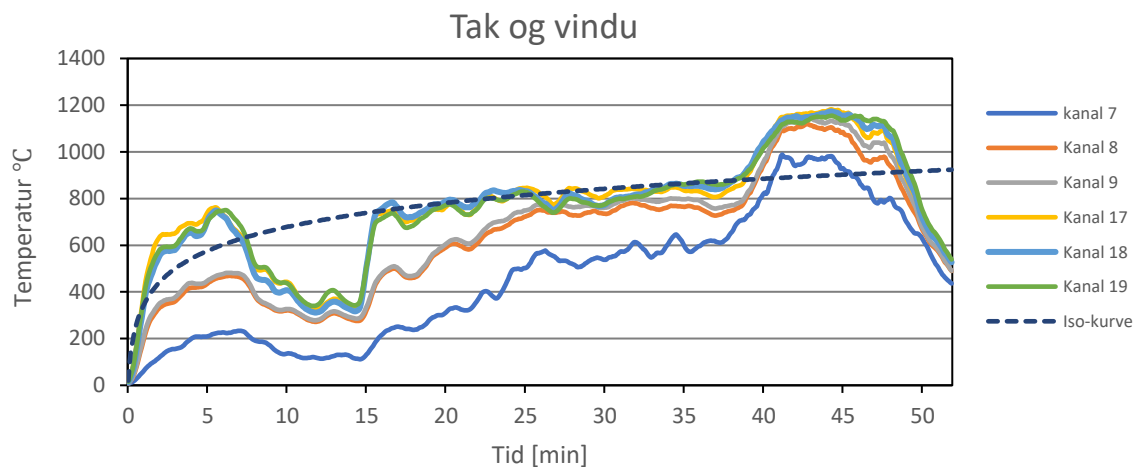
	$\dot{q}''_{tot} [kW/m^2]$	$t_{2nd} [s]$	$t_p [s]$
$\varepsilon = 0,85$	5,664	17,4	4,6
$\varepsilon = 0,90$	5,587	17,8	4,8
$\varepsilon = 0,95$	5,519	18,1	4,9

For den høyeste strålingen beregnet:

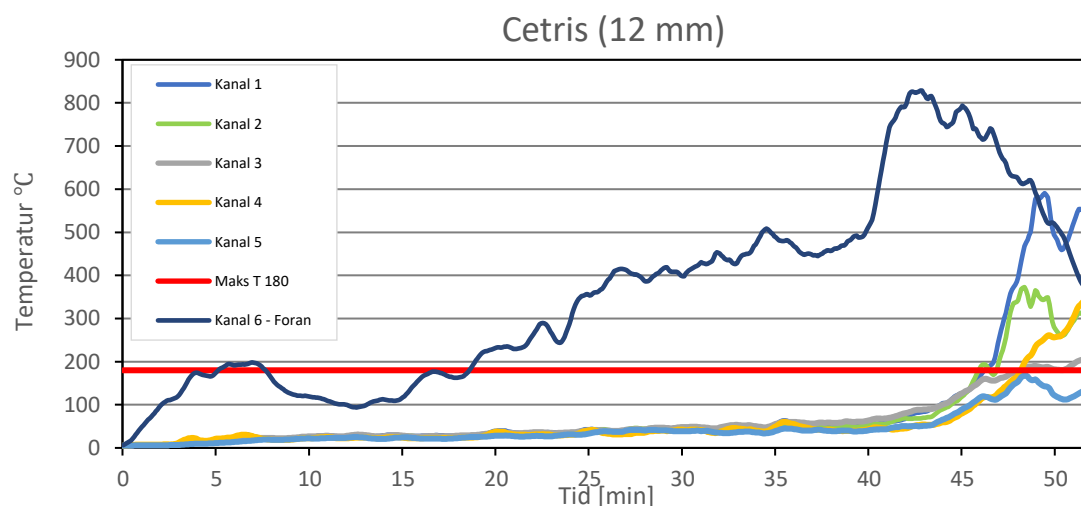
Tabell F.5 – Eksponering for høyeste stråling beregnet

	$\dot{q}''_{maks} [kW/m^2]$	$t_{2nd} [s]$	$t_p [s]$
$\varepsilon = 0,85$	17,78	2,9	0,5

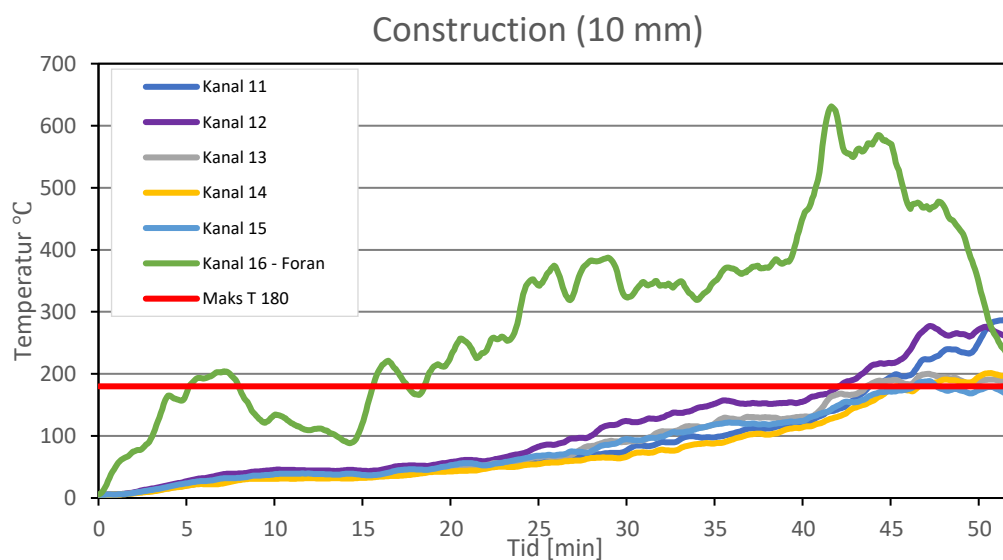
Vedlegg G – Målte temperaturer



Figur G.1 – Temperaturmålinger fra tak og vindu i forsøksrommet



Figur G.2 – Temperaturmålinger på ueksponert side av Cetris



Figur G.3 – Temperaturmålinger på ueksponert side av Construction

Vedlegg H – Sikker jobbanalyse (SJA)

Tittel: Brannforsøk med sementbaserte bygningsplater utført i forsøksrom på ResQ Sikkerhetssenter i Haugesund.

Avd./Disiplin

Forsøket utføres av studenter ved studieretning branningeniør på HVL Haugesund:

Anne Louise Gilling, Lars Justad og Martin Granum

Kontrollør: Arjen Kraaijeveld

Kontaktperson ved ResQ: Jan Egil Brevik

Observatør: Lars Justad og Martin Granum

SJA-ansvarlig

Arjen Kraaijeveld

Beskrivelse av arbeidet

Det skal gjennomføres et forsøk for å evaluere egenskapene til sementbaserte bygningsplater i et tiltenkt brannscenario. For at brannforløpet lettere kunne bli planlagt ble det gjort en testbrann i forkant av forsøket. Dette for å senke fuktighetsnivået i forsøksrommet. Etter testbrannen blir forsøksrommet dekket med presenning for å forhindre fukttilførsel.

Innretning

Brannforløpet vil foregå i et allerede oppsatt forsøksrom bestående av lettbetong og lett, ekspandert leire illustrert i Figur 0.1.

Forsøksrommets dimensjoner

Tabell H.1 – Temperaturmålinger på ueksponert side av Cetris

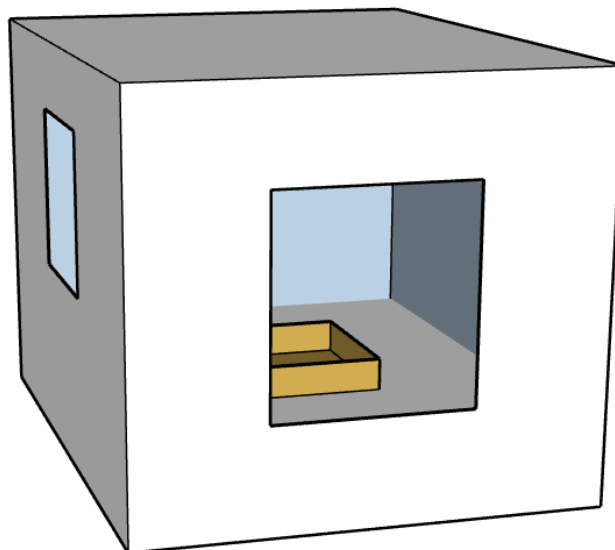
	Innvendig	Utvendig
Bredde	2,40 m	2,82 m
Lengde	3,40 m	3,67 m
Høyde	2,15 m	2,56 m
Åpning høyde	1,31 m	1,31 m
Åpning bredde	1,21 m	1,21 m
Vindu høyde	1,00 m	1,00 m
Vindu bredde	1,00 m	1,00 m

Veskebrannen brennes i et brenselskar av metall plassert i midten av forsøksrommet. Karetts brenselareal ble gjort mindre ved bruk 2 stk. Leca blokker.

Brenselskarets dimensjoner

Tabell H.2 – Temperaturmålinger på ueksponert side av Cetris

Bredde	1,00 m
Lengde	1,00 m
Høyde	0,15 m
Begrenset areal	0,76 m ²



Figur H.1 – Forsøksrommet

Område

Forsøket blir gjennomført på ResQ Sikkerhetssenter og forsøksrommets plassering vises med rød sirkel i Bilde 0.1. Nord for rommet er det ut til det fri, fra vestlige og sørlige side er det åpent landskap uten fare for antenning av annen bebyggelse og øst for rommet, 1,5 (m) unna er et bygg av bølgeblikk.



Bilde H.1 – Satellittbilde over forsøksområdet (forsøksrom ringet rundt)

Utstyrliste

Tabell H.3 – Utstyrliste

Utstyr	Antall
2" x 5" planke	Ca. 20
2" x 2" planke	Ca. 8
Bølgeblikk	2
Gipsplate	11
100 mm T25 skrue	Ca. 150

Sementpose	2
Elektrisk skruetrekker	1
Sirkelsag	1
Sag	1
Stige	2
Brenselskar	1
Metallrør (for etterfylling)	1
Antennelsesfakkell	1
Platetermoelement	1
HD videokamera	4
Termoelement	18
Transmitter	2
Skjøteledning til termoelement	9
Tripod-stativ	2
PC	1
Termometer	1
Brannslange	1
Strålepistol (til brannslange)	1
Vernemaske	2
Brannjakke	2
Bensin	1 l
Diesel	60 l
Lecablokk 0,25 m x 0,5 m (minske forbrenningsareal)	2
Treklemmer	8
Dieselkran	1
Skjøtekabel	1
Loggfører	1
Arbeidshjelm	3

Forutsetninger

- Kontrollør må være til stede under forsøket fra antennelse til utbrenningsfasen.
- Studentene skal ha kjentskap til de kjemikalske egenskaper og farer rundt brenselstoffet.
- Forsøket skal foregå på en dag uten nedbør og med mindre vind.
- Forsøket skal foregå på dagtid innenfor ResQ sine åpningstider.
- Studentene skal ha kjentskap til ResQ sine sikkerhetsrutiner og nødvendig sikkerhetsutstyr.

Fremgangsmåte

Enkel beskrivelse av gjennomføring av forsøket i bestemt rekkefølge.

- Ta ned presenning som dekker forsøksrommet/-konstruksjonen.
- Plassere 18 termoelement på sine respektive plasser.
- Plassere 1 platetermoelement på respektiv plass.
- Plassere 4 HD videokamera på sine respektive plasser.
- Bære inn paller, OSB-plater, dør og madrass inn i forsøksrommet.

- Spikre igjen gipsplate over åpningen til forsøksrommet.
- Koble skjøtekablene til termoelementene/platetermoelement opp mot transmitter.
- Koble transmittere opp til loggfører.
- Koble loggfører opp til PC.
- Måle temperatur.
- Tilgjengeliggjøre slukkeutstyr.
- Godkjenne at måleutstyr fungerer korrekt.
- Fotograferer forsøksområde/-oppsett.
- Tilføre diesel i brenselskar.
- Tilføre bensin i brenselskar for forvarming.
- Klarere området for uvedkommende.
- Antenne brensel med antennelsesfakkell.
- Etterfylle diesel ved behov.
- Inspisere testplatene hvert fjerde minutt for sprekker.

Faremomenter

- Inhalering av røykgasser/brenselsdamp
- Avstand fra personer til brann
- Spredning av brann
- Tennkilder
- Brenselsøl

Mulig konsekvens

- Uønsket antennelse/spredning av brann
- Personskader/dødsfall som følge av giftig gass og brann
- Materielle skader

Tiltak

- Planlegging av forsøk på detaljnivå
- Kunnskap og forståelse for sikkerhetsrutiner
- Bruk av verneutstyr
- Tilgjengelig slukkeutstyr
- Klargjøring av område for uvedkommende
- Varsling
- Fornuft

Slokkemetode

Det er planlagt at brenselet skal få brenne ut i forsøksrommet. Dersom konstruksjonen utvendig tar fyr vil en benytte slukkeutstyret på områdene som er antent etter brannen er utbrent i forsøksrommet. Vann vil også bli brukt for å kontrollere området etter forsøket.

Vurdering av størrelse på brannen

Maksimal luftgjennomstrømning når brannen er fullt utviklet og ventilasjonsstyrt

$$\dot{m}_{luft} = 0,5A_0\sqrt{H_0}$$

$$\dot{m}_{luft} = 0,5 \cdot 1 \cdot \sqrt{1} \left[\frac{kg_{luft}}{s} \right]$$

$$\dot{m}_{luft} = 0,5 \frac{kg_{luft}}{s}$$

Forbrenningsvarme ($\Delta H_{C,luft}$)

$$\Delta H_{C,luft} = \Delta H_{C,O_2} \cdot kg_{O_2} / kg_{luft}$$

$$\Delta H_{C,luft} = 0,23 \cdot 13,2 \text{ MJ}/kg_{oksygen}$$

$$\Delta H_{C,luft} = 3 \text{ MJ}/kg_{luft}$$

Varmeproduksjon ved maksimal luftgjennomstrømning

$$\dot{Q} = \dot{m}_{luft} \cdot \Delta H_{C,luft}$$

$$Q = 0,5 \text{ kg}_{luft}/s \cdot 3 \text{ MJ}/kg_{luft}$$

$$Q = 1,5 \text{ MW}$$

Oppsummering av beregninger

Etter 35 sekunder er $\Delta T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ og overtenning vil inntreffe. Da er varmeproduksjonen 1,1 MW. Deretter vil brannen starte å bli ventilasjonsstyrt. Når brannen blir fullt utviklet er den maksimale varmeproduksjonen 1,5 MW.

Konklusjon

Den samlede risikoen forbundet med forsøket blir vurdert til akseptabel.