



Høgskulen
på Vestlandet

BRUK AV GLASS I BRANNETTERFORSKNING

Masteroppgave i Brannsikkerhet

Forfatter: Kjartan Øvstedal

Forfatter sign.

Oppgaven uttatt:

Høst 2016

Åpen oppgave

Veileder: Stefan Andersson

Ekstern veileder: Reidar Skrunes

Stikkord:

Brann, brannetterforskning, glass, vindu

Antall sider: 71

+

Vedlegg: 30

Haugesund, 18. mai, 2017

Dette arbeidet er gjennomført som ledd i masterprogrammet i brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Studenten(e) står selv ansvarlig for metodene som er anvendt, resultatene som er fremkommet og konklusjoner og vurderinger i arbeidet.

Sammendrag

Denne rapporten er skrevet i forbindelse med arbeidet som er gjort som avslutning på mitt toårige masterstudie innen brannsikkerhet ved Høgskolen på Vestlandet.

En viktig del av arbeidet med brannsikkerhet er å øke kunnskapen rundt etterforskning av brann. Dette for å bedre kunne forstå hva som har foregått gjennom brannforløpet, og hvordan brannen har oppstått. Dagens brannetterforskere har et begrenset fokus på hvordan glass oppfører seg i brann, og begrenset erfaring på dette området.

Denne oppgaven har hovedfokus på å undersøke hvordan glass og vinduer oppfører seg i en brann. Hvordan påvirkes glasset av temperatur og varmpåkjening, og hvordan kan man ved å studere glasset etter en brann få svar på dette? Formålet med dette arbeidet er å gi fremtidige brannetterforskere en bredere basis for å gjøre korrekt etterforskning.

For å lære mer om glass og vinduer er det foretatt bedriftsbesøk til Saint Gobain – Böckmann og Nordan, som er produsenter av henholdsvis glass og vinduer. Dette var svært nyttige besøk for å lære mer om hvordan glass og vinduer fremstilles for å få en dypere forståelse av hvordan glass og vinduer påvirkes av brann.

Det er også gjennomført litteraturstudie av tidligere forsøk som er gjort med glass i brann. Det har historisk sett vært utført få forsøk med vanlig glass ved norske forskningsinstitutt. Det har gjort at det har vært vanskelig å finne relevante forsøk og rapporter nasjonalt. Internasjonalt er det hovedsakelig gjort forsøk på konstruksjoner med enkle glass, og ikke forsøk på vinduer med isolerglass (2- eller 3-lags vinduer). Det har i den senere tid vært gjort enkelte forsøk på dette i Nord-Irland og Kina, og disse har vært brukt for å finne referanseverdier for varme og stråling for sprekkdannelser og utfall av glass i vinduene.

For å vite mer om hvordan vinduer blir påvirket i en brann, er det gjennomført flere forsøk. Det har vært gjort forsøk med ulike brannutviklinger, og det har vært gjort forsøk for å se på forskjellen mellom glass som har blitt knust mekanisk før brannen, og glass som er knust som følge av termisk påkjening.

Etter hvert av forsøkene er det gjort en undersøkelse av vinduene i henhold til norske og skandinaviske retningslinjer for brannetterforskning. Dette for at undersøkelsene skal kunne brukes som referanse ved fremtidige etterforskninger. Det er tatt fotografier av de ulike vinduene, og glasset er undersøkt ved laben til KRIPOS for å undersøke endringer i glassets brytningsindeks.

Studiet viser at man ved å undersøke glass og vinduer kan få svar på hvordan utviklingen til brannen har vært. Hurtige temperaturstigninger i brannrommet gjør at glasset sprekker tidlig, og store deler av glasset blir knust, mens det med saktere temperaturstigninger blir mindre sprekkdannelse, og vinduene kan forbli hele. Branner med saktere brannutvikling produserer også mer sot, noe man kan se på glassene, og glassbitene som har falt ut av vinduet.

Forsøkene viser at det er ytterligere områder som bør undersøkes for å få enda bedre grunnlag for å vurdere branners utvikling ved å studere glass og vinduer. Spesielt er det to områder som bør vurderes nærmere. Det bør sees på temperaturutviklingen i glasset, og hvordan spenningene i glasset påvirkes av denne. Hva kan dette si om temperaturutviklingen i brannrommet? I tillegg er det i studiet påvist at glassets brytningsindeks endres som følge av varmpåvirkningen. Det har derimot ikke vært mulig å finne ut om endringen i brytningsindeks også kan si noe om hvor stor varmpåvirkningen har vært. Her bør det gjøres flere forsøk for å se om det er noe som kan benyttes i brannetterforskningen.

Summary in english

This report is submitted as part of completing the Master of Science program in fire safety at Western Norway University of Applied Sciences (HVL)

One of the most important objectives of the fire safety science activities, is to gain new and wider knowledge applicable to the investigations of fires. How does a fire initiate, and how does it propagate, are key processes to understand in the investigation of fires. An integral part of this, is the understanding of the properties of various materials with respect to fire.

This thesis focuses on glass material and window properties and behaviour in a fire safety context. How does the material change when exposed to heat and temperature changes? How can post-fire assessment of glass give investigators valuable information about fire characteristics? The objective of this thesis is to contribute to answering the above questions and to give a better knowledge-base for future fire investigations.

Producer of glass Saint Gobain-Böckmann and manufacturer of windows Nordan have been visited and consulted in order to gain deeper understanding in the glass production and treatment processes.

Furthermore, an extensive study is carried out of existing literature on glass in fires. In Norway, relatively few scientific experiments are performed with glass exposed to fire, while internationally, experiments are mostly performed with single glazed windows. More recently, British and Chinese studies are done, describing tests with multi-glazed windows, with the aim to get reference values for glass cracking and detachment as a function of heat and radiation.

This thesis describes physical tests designed to increase the knowledge of windows behaviour in fire. Various fire propagations have been set up, and glass broken before and after exposure to fire has been evaluated.

Following each test, the windows have been evaluated according to Scandinavian guidelines for fire investigations, in an attempt to establish reference values for future cases. Each window has been thoroughly photographed, and glass specimens have been taken to the laboratories of KRIPOS (The national criminal investigation service of the Norwegian police) for investigations of changes in refractive properties in the glass.

The present study indicates that a typical fire propagation may be classified by the evaluation of glass exposed in the fire. Rapid rise in temperature at the fire scene leads to early glass cracking, and that large portions of glass crack, while less cracking, and even intact windows may be found at lower rates of change in temperature. Fires with slower development also generate and deposit more soot on glass surfaces. This thesis also suggests that the refractive index of glass changes after being exposed to high temperatures.

This thesis indicate that further tests are recommended to gain more knowledge on how the investigation of glass can be used to determine fire propagation. Two focus areas are suggested: time domain studies of temperature in glass versus ambient temperature in fire, and internal stresses in typical window glass structures versus ambient temperature. Deeper knowledge on this may give good indicators for temperature history in a fire. Although changes in refractive properties in glass exposed to fire are found, further studies may reveal more absolute values of this, which may be qualified for use in the investigations on a fire scene.

Forord

Denne oppgaven er avslutningen på mitt toårige masterstudie i brannsikkerhet ved Høgskolen på Vestlandet.

Etter over ti års arbeid med brannsikkerhet som brannrådgiver, særlig mot byggebransjen, hadde jeg lyst å se på andre sider av fagfeltet i arbeidet med denne oppgaven. Da Reidar Skrunes var på Høgskolen og informerte om denne oppgaven innenfor brannetterforskning var dette noe jeg hadde lyst å jobbe mer med.

Arbeidet med oppgaven har lært meg at brannetterforskning er et komplekst fagfelt. Man må ta hensyn til både taktiske og tekniske forhold, og svar som kan virke åpenbare viser seg å ikke stemme med virkeligheten. Det har derfor vært et ønske å kunne komme med noen svar i denne oppgaven, slik at de som til daglig jobber med etterforskning har noen flere knagger å bruke i sitt arbeid. Forhåpentligvis har jeg lyktes med det.

Jeg sitter igjen med mye god læring, både om brann og brannetterforskning, men også undersøkelser som er gjort av andre studier og forsøk, og å være etterrettelig i hvilke kilder man velger å benytte.

Studiet har vært gjennomført på siden av full jobb hos Firesafe AS, og det er mange jeg er nødt til å takke etter gjennomføringen av masterstudiet, og spesielt arbeidet med masteroppgaven.

Først og fremst, min veileder hos If skadeforsikring, Reidar Skrunes, for stor hjelp med oppgaven. Uten din idé og oppfølging hadde jeg aldri kommet i gang, og heller ikke videre de gangene jeg stod fast. En takk også til min veileder ved Høgskolen på Vestlandet, Stefan Andersson, som med sin erfaring og kjennskap til arbeidet med brannsikkerhet i Norge har satt meg i kontakt med flere nyttige kilder, samt skaffet til veie fagstoff som har vært nyttig.

Mamma og pappa, Yngve og Ingebjørg, samt mine brødre Ole og Jon, som nok ikke har kunnet gi meg så mange faglige råd, men som har orket å høre på hjertesukk og frustrasjonsutbrudd, men også motivert meg til å stå på, og jobbe meg gjennom oppgaven.

Min arbeidsgiver, Firesafe AS, som har gjort det mulig for meg å gjennomføre studiet i kombinasjon med full jobb, og da spesielt mine kollegaer på kontoret i Haugesund, Geir Sandal, Jostein Breivik, Sten Stava og Ken T. Nilsen.

Mine medstudenter Vivi Helgesen Røe, Nichlas Lyche, Ruben Dobler Strand og Ingvar Gjerland, som selv om dere har vært i samme båt, har tatt dere tid til å diskutere fag, rapporter og andre spørsmål som dukket opp underveis. Vi utgjorde et godt team!

Forelesere og andre ansatte ved Høgskolen på Vestlandet, avd. Haugesund, Arjen Kraijeveld, Bjarne Christian Hagen, Fredrik Hemmingsson, Svein Jakob Nesheim, Hans Jørgen Dahl og Torodd Lokna.

KRIPOS v/Knut Endre Sjøstad og Håvard Arntzen for gode innspill til hvordan jeg burde angripe temaet, og for å ta godt imot meg på laben i forbindelse med undersøkelsene av brytningsindeks.

NorDan, v/Svein Jarle Haukland, som tok imot meg på bedriftsbesøk, og lærte meg masse om vinduer som har vært veldig nyttig i arbeidene, samt sponset vinduene jeg benyttet meg av i forsøkene.

Saint-Gobain Böckmann AS, v/Lars Sigve Søndena, som lærte meg det jeg trengte å vite om glass av forskjellige typer, og som sponset sikkerhetsglass på meg som jeg også benyttet meg av i forsøkene.

Og til slutt, Norsk brannvernforening v/Thor K. Adolfsen, for faglig og økonomisk støtte!

Definisjoner

Definisjonene er hentet fra Kollegiet for brannfaglig terminologi [1], der ikke annet er angitt.

Brannforløp - Brannens utvikling fra antennelse til den har sloknet eller er blitt slokket.

Brannenergi - Summen av varmemengde som frigis ved forbrenning av alle faste og mobile brennbare materialer i et område.

Brannetterforskning - Undersøkelse av brannsted, undersøkelse av sikret materiale og vurderinger som ved hjelp av tekniske og vitenskapelige metoder kan lede fram til en bestemmelse av arnested og brannårsak.

Brannvekst - Brannens økning i avgitt effekt i forhold til tiden

Brenselstyrt forbrenning - godt ventilert brann, der brensel/luft-blandingen er brenselfattig, og fullstendig forbrenning kan forekomme.

Brytningsindeks - Brytningsindeks er et mål på et materials evne til å lede lys. Den uttrykker på hvor mye hastigheten til lys blir redusert gjennom materialet målt i forhold til lyshastigheten i vakuum og er derfor en benevnelsesløs verdi. Glass (som man regner for ganske gjennomsiktig) har en brytningsindeks på ca. 1,5.

Designbrann – Et verktøy for å illustrere energifrigjøringen i et brannforløp

Forbrenning - Eksoterm reaksjon mellom brennbart stoff og en oksidant, vanligvis ledsaget av flammer, gløding eller røykutvikling.

Fullt utviklet brann - Tilstand der alle brennbare materialer bidrar i en brann.

Massetapsrate - Massetap fra et prøvestykke per tidsenhet ved spesifiserte betingelser.

Overtenning - Overgang til en tilstand der alle overflater på brennbare materialer i et rom deltar i en brann

Pyrolyse - Irreversibel kjemisk spalting av et stoff under påvirkning av varme.

Rombrann - Fullt utviklet brann i et rom.

To-sone modell – Teoretisk modell for å beskrive et brannforløp med to soner. Et varmt røyklag, og en kald sone under røyklaget.

Varmeavgivelse - Varmemengde et materiale avgir under forbrenning

Varmeavgivelsehastighet - Varmemengde som avgis per tidsenhet ved forbrenning av et materiale under angitte prøvebetingelser.

Ventilasjonsstyrt brann - Brann hvor tilgangen på luft er bestemmende for brannens videre utvikling.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	i
Summary in english	ii
Forord	iii
Definisjoner	iv
Innholdsfortegnelse	v
Figurliste	vii
Tabelliste	viii
Biddeleiste	ix
Innledning.....	1
Bakgrunn	1
Mål for oppgaven	1
Metodevalg	1
Begrensninger	1
Brannteori	3
Brann	3
Forbrenning.....	3
Rombrann.....	3
Varmeavgivelse	5
Temperatur.....	8
Glass	10
Vindu og isolerglass	14
Glass i brann	16
Varmepåvirkning	16
Studier gjort på doble glass / vinduer i hus.....	17
Sikkerhetsglass i brann	24
Forsikring og brann.....	25
Brannetterforskning	26
Måling av brytningsindeks.....	27
Gjennomføring av forsøk.....	28
Formål.....	28
Testoppsett.....	28
Teori.....	30
Forsøk – observasjoner	34
Forsøk 1 – rask brannvekst.....	34
Forsøk 2 – rask brannvekst.....	37

Forsøk 3 – ultra-rask brannvekst.....	41
Forsøk 4 – middels brannvekst.....	45
Forsøk – funn.....	47
Oppsummering funn	47
Sprekkdannelse og brudd i glass	49
Endring i brytningsindeks	50
Sot.....	51
Mekanisk og termisk påvirket glass.....	52
Andre observasjoner	53
Sikkerhetsglass	55
Diskusjon	56
Verifikasjon av funn i forsøk mot tidligere utførte forsøk.....	56
Brytningsindeks	56
Glass og vinduer	57
Brannrommet	57
Type brensel	57
Avstand fra brannen til vinduene.....	57
Temperatur i glasset.....	57
Overtenning og fullt utviklet brann.....	58
Observasjoner og funn	58
Konklusjon	59
Forslag til videre studier.....	59
Referanser	60
Vedlegg.....	62
Vedlegg 1 – E-post Vyto Babrauskas	62
Vedlegg 2 – E-post Peter Mansi	63
Vedlegg 3 – Forsøksmanual.....	65
Vedlegg 4 – Beregning forsøk 1 og 2	82
Vedlegg 5 – Beregning forsøk 3.....	83
Vedlegg 6 – Beregning forsøk 4.....	84
Vedlegg 7 – Data fra forsøk	85
Vedlegg 8 – T-test av brytningsindeks.....	91

Figurliste

Figur 1: Romeffekt på massetapsrate [3]	6
Figur 2: Energiproduksjon for ulike typer brannvekst [6]	7
Figur 3: Typisk designbrann [3]	7
Figur 4: Snitt av 3-lags vindu	15
Figur 5: Plassering og størrelse på vinduer, samt plassering av termoelementer	19
Figur 6: Plassering av vinduer i ISO-rommet [27].....	20
Figur 7: Illustrasjon av testoppsettet [31]	22
Figur 8: Testrommet og vindusåpninger	28
Figur 9: Forsøk 1 og 2 - rask brannvekst.....	30
Figur 10: Forsøk 1 og 2 - Beregnet temperatur i brannrommet	31
Figur 11: Forsøk 3 - ultra-rask brannvekst.....	31
Figur 12: Forsøk 3 - Beregnet temperatur i brannrommet.	32
Figur 13: Forsøk 4 - middels brannvekst	33
Figur 14: Forsøk 4 - Beregnet temperatur i brannrommet	33
Figur 15: Forsøk 1 - Beregnet vs. målt temperatur	34
Figur 16: Forsøk 2 - Beregnet vs. målt temperatur	37
Figur 17: Forsøk 3 - Beregnet vs. målt temperatur	41
Figur 18: Forsøk 4 - Beregnet vs. målt temperatur	45
<i>Figur 19: Forsøk 1 - Temperatur ved vindu 1.....</i>	<i>85</i>
<i>Figur 20: Forsøk 1 - Temperatur midt i rommet</i>	<i>85</i>
<i>Figur 21: Forsøk 1 - Temperatur ved vindu 2.....</i>	<i>86</i>
<i>Figur 22: Forsøk 2 - Temperatur ved vindu 1.....</i>	<i>86</i>
<i>Figur 23: Forsøk 2 - Temperatur midt i rommet</i>	<i>87</i>
<i>Figur 24: Forsøk 2 - Temperatur ved vindu 2.....</i>	<i>87</i>
<i>Figur 25: Forsøk 3 - Temperatur ved vindu 1.....</i>	<i>88</i>
<i>Figur 26: Forsøk 3 - Temperatur midt i rommet</i>	<i>88</i>
<i>Figur 27: Forsøk 3 - Temperatur ved vindu 2.....</i>	<i>89</i>
<i>Figur 28: Forsøk 4 - Temperatur ved vindu 1.....</i>	<i>89</i>
<i>Figur 29: Forsøk 4 - Temperatur midt i rommet</i>	<i>90</i>
<i>Figur 30: Forsøk 4 - Temperatur ved vindu 2.....</i>	<i>90</i>

Tabelliste

Tabell 1: Typiske verdier for varmeavgivelse fra ulike kilder [3].....	5
Tabell 2: Ulike verdier for brannvekst [5].....	6
Tabell 3: Forslag til brannvekst for ulike bygningstyper.....	8
Tabell 4: Resultater fra forsøkene med glass med beskyttet kant.....	18
Tabell 5: Tid til brudd i innerste og ytterste glass for 2 vinduer i de tre forsøkene	19
Tabell 6: Størrelse på forsøksrom.....	28
Tabell 7: Forsøk 1- Observasjoner	35
Tabell 8: Forsøk 2 - Observasjoner	38
Tabell 9: Forsøk 3 – Observasjoner	42
Tabell 10: Forsøk 4 – Observasjoner	45
Tabell 11: Oppsummering funn, forsøk 2-4	47
Tabell 12: Endring i brytningsindeks	50

Bildeliste

Bilde 1: Eksempel på ferdig montert vindu (Forsøk 2)	29
Bilde 2: Forsøk 1 - Vindu 1 - PBV-folie smelter	35
Bilde 3: Forsøk 1 - Vindu 1 – Første sprekkdannelse, indre glass	35
Bilde 4: Forsøk 1 - Vindu 1 – Indre glass knuses	36
Bilde 5: Forsøk 1 - Vindu 1 - ytre glass knuses	36
Bilde 6: Forsøk 2 - Vindu 1 – første sprekkdannelse indre glass	38
Bilde 7: Forsøk 2 - Vindu 2 – første sprekkdannelse indre glass	39
Bilde 8: Forsøk 2 - Vindu 2 - indre glass knuses.....	39
Bilde 9: Forsøk 2 – Vindu 2 – første sprekkdannelse ytre glass	40
Bilde 10: Forsøk 2 – Vindu 2 – ytre glass knuses	40
Bilde 11: Forsøk 3 - Vindu 1 – indre glass knuses.....	42
Bilde 12: Forsøk 3 - vindu 2 - indre glass knuses	43
Bilde 13: Forsøk 3 – vindu 1 – indre glass knuses	43
Bilde 14: Forsøk 3 - vindu 1 – første sprekkdannelse ytre glass.....	44
Bilde 15: Forsøk 3 - vindu 1 – Overtenning i brannrommet. Ytre glass knust.....	44
Bilde 16: Forsøk 4 - vindu 1 - Før forsøk.....	46
Bilde 17: Forsøk 4 - vindu 1 – deler av glasset har knust	46
Bilde 18: Forskjell i mengde sot på vindu i forsøk 2 og 3	51
Bilde 19: Mekanisk knust vindu før og etter brannpåvirkning.....	52
Bilde 20: Forskjell i størrelse på glass som falt ut i forsøk 2 og 3	53
Bilde 21: Forsøk 3 - Kraftig brent og deformert karm	54
Bilde 22: Forsøk 1 - Vindu 1 - Smeltet PVB-folie etter brann	55

Innledning

Bakgrunn

Norske forsikringselskap betaler årlig ut mellom 4 og 5 milliarder kroner i forsikringspremie knyttet til oppgjør etter brann og brannskader [2].

De siste årene har ca. 100 millioner kroner blitt betalt ut i saker hvor brannen er antatt påsatt. Dette inkluderer overlagte og uaktsomme handlinger.

Et viktig verktøy for å kunne avsløre denne typen forsikringssvindel er brannetterforskning. Denne etterforskningen gjennomføres hovedsakelig av politiet, men også forsikringsselskapene og andre interessenter i saken kan gjennomføre etterforskninger.

I den tradisjonelle brannetterforskningen i dag gjøres det liten nytte av glass i etterforskningen, og det finnes relativt lite kunnskap om påvirkningen brann har på glass, i et etterforskningsperspektiv.

Vinduer er en bygningsdel som i en brann kan fylle flere funksjoner. Så lenge vinduet beholder sin integritet, vil den fungere som en del av veggen. Ved tilstrekkelig temperaturforskjell i glasset, vil glasset miste sin integritet, og etter hvert falle ut. Vindusåpningen vil da fungere som en ventilasjonsåpning, og brannen vil i mange tilfeller endre karakter.

Glass er et materiale som endrer egenskaper når det blir utsatt for varme. Utsatt for varme vil glasset etter hvert begynne å sprekke, og dersom temperaturpåvirkningen er høy nok vil glasset falle ut. Andre av glassets egenskaper endres også. Dette kan ikke sees med det blotte øye, og må måles i laboratorium.

Mål for oppgaven

Målet for oppgaven har vært å studere hvordan glass og vinduer påvirkes under ulike brannforløp, og om det i brannetterforskningen kan være mulig å få svar på hvordan brannutviklingen og temperaturen har vært ved å studere brannpåvirkningen på glasset og vinduskonstruksjonen.

Dagens brannetterforskning benytter i liten grad glass og vinduer for å avdekke brannutviklingen, og studien vil prøve å finne metoder som kan benyttes i fremtidig brannetterforskning.

Metodevalg

Arbeidet ble delt i tre. Det er gjort et litteraturstudie for å undersøke hvilke tidligere studier som er gjort med glass og vinduer.

Del to bestod av å gjøre forsøk for å se hvordan glass og vinduer påvirkes av brann. Forsøkene er gjort i ISO-rommet på ResQ i Haugesund.

I tredje del ble glasset og vinduene fra forsøkene undersøkt for å se på forskjeller på glasset og vinduene etter hvordan dette ble påvirket av de ulike brannpåvirkningene i forsøkene. Deler av dette arbeidet ble gjort ved KRIPOS sitt laboratorium.

Begrensninger

Ved gjennomføring av forsøkene ble det målt temperatur i luft/røyklag i fem høyder på tre plasser i brannrommene (totalt 15 målinger). Målingene gir svar på hva temperaturen er på det aktuelle punktet, og forteller dermed noe om temperaturen i brannrommet. Det ble ikke målt eksakt temperatur i glasset under testing, eller hvilken varmpåvirkning (stråling og konveksjon) som glassene er utsatt for.

Det er kun gjennomført ett forsøk med lik brannutvikling for to og to vinduer. Selv om man definerer lik brannutvikling, vil brannen kunne utvikle seg forskjellig og påvirkningen på vinduene vil kunne forandre seg. Etterretteligheten til forsøkene kunne dermed vært høyere om det hadde vært gjort flere forsøk med lik brannutvikling.

I forsøkene ble det fyrte med parafinolje, med forskjellig areal for å få varierende brannutvikling. I en brann i en vanlig bolig vil det være mye tre- og plastprodukter, som kan omdannes til andre produkter ved forbrenning. Dette kan påvirke sotproduksjonen i brannen, og kan gi andre resultater enn det som har fremkommet i forsøkene som er gjort i dette studiet.

I etterarbeidene er det gjort målinger av endring i glassets brytningsindeks. Dette er gjort med ett prøvestykke fra hvert av vinduene i forsøk 2 og 3, samt fra ett prøvestykke fra det ikke knuste vinduet i forsøk 4. Dette må sees i sammenheng med antall forsøk som er gjennomført. Målingene gir en indikasjon om brytningsindeksen er endret signifikant av varmepåvirkningen, men det bør gjøres flere målinger og forsøk for å kunne si noe om i hvor stor grad glassets brytningsindeks endres som følge av varmepåvirkningen.

Brannteori

For å kunne tolke et åsted etter en brann må man ha forståelse for prosessene som foregår i brannrommet. Det er sett på designbranner for rombrann, og hvordan man kan definere og beregne varmeavgivelse og temperatur i brannrommet.

Dette kapittelet baserer seg på kapittel 2 og 3 i Enclosure fire dynamics [3], der ikke andre kilder er oppgitt.

Brann

En brann defineres som en ikke-eksplosiv, varmeutviklende kjemisk reaksjon mellom oksygen og brennbart materiale, normalt under dannelse av flammer og/eller glør, med eller uten røyk. Forutsetningene for en brann er brennbart materiale, tilgang på oksygen og energi i form av varme [4].

For aktuelle scenarier i denne oppgaven er det sett på flammebranner. En ulmebrann vil i de fleste tilfeller ikke avgi nok energi til at vinduene vil sprekke / knuses. En flammebrann er en brann som forbrenner gasser som avgis fra faste materialer. For å få brann i faste materialer må disse oppvarmes tilstrekkelig til at de pyrolyserer. Pyrolyse defineres som «irreversibel kjemisk spalting av et stoff under påvirkning av varme» [1].

Forbrenning

En forutsetning for at det skal kunne foregå en forbrenning er brennbart materiale. Brennbart materiale finnes i stor grad i omgivelsene rundt oss. En brann som blir etterforsket, vil i de aller fleste tilfeller inntreffe i et offentlig tilgjengelig bygg eller en bolig. Der vil det finnes store mengder brennbart materiale, både i form av interiør, men også bygningskonstruksjoner.

Det er i det videre sett på forbrenning i lukkede rom, rombrann, da det er denne typen brannpåvirkning som vil være karakteristisk for glass og vinduer utsatt for brann.

Rombrann

En rombrann kan utvikle seg på flere forskjellige måter, avhengig av rommets geometri, ventilasjonsåpninger, type og mengde brensel, omliggende konstruksjoners egenskaper mm.

Etter antennelsen vokser flammen, og dette bidrar til å produsere en økende mengde energi. På dette stadiet i brannforløpet har det ingen betydning at brannen befinner seg i et lukket rom. Brannen er brenselskontrollert, og det er tilstrekkelig med oksygen i rommet. Brannen vil, i tillegg til energiproduksjonen avgi giftige og mindre giftige gasser.

Den oppvarmede, lettere luften i flammen vil trekke mot taket, hovedsakelig på grunn av oppdriftskrefter, men tettheten i luften reduseres på grunn av oppvarmingen, noe som også bidrar til at den varme luften trekker oppover mot taket.

Når de varme branngassene treffer taket, vil disse spre seg utover takflaten til de når veggene i rommet. Her vil de bli presset ned langs veggen, men oppdriftskrefter sørger for at de trekker seg opp mot taket igjen, og det vil dannes et røyklag i rommet.

På dette stadiet av brannen vil rommet deles i to lag. Et varmt øvre lag, og et kaldt nedre lag. Brannen vil forbruke oksygen fra det nedre laget, som medfører oppvarming av luften, og varme røyk- og branngasser tilføres det øvre laget.

Røyklaget vil øke i størrelse, og temperaturen vil stige underveis i denne prosessen. Økning i temperatur medfører økt varmeoverføring fra brannen. Gulv, tak og vegger påvirkes av stråling og

konveksjon fra det varme røyklaget. Denne oppvarmingen av omgivelsene medfører en økning i forbrenningsraten i brenselet i rommet, og brannutviklingen akselererer som følge av dette.

Stråling og konveksjon fra brannen vil også medføre oppvarming og temperaturstigning i glass og vinduer i brannrommet. Dersom temperaturen er høy nok vil glasset i vinduene starte å sprekke, og dersom påvirkningen er stor nok vil glasset falle ut av vinduet.

Dersom det er tilstrekkelig oksygen og brensel i rommet, vil brannen på et stadium gå over i en fullt utviklet brann. Dette punktet i brannutviklingen kalles overtenning. I en fullt utviklet brann er alle brennbare overflater i rommet i brann, og flammer vil kunne slå ut av ventilasjonsåpninger i rommet.

Er det for lite oksygen tilgjengelig for brannen, vil veksten etter hvert avta, og flammen vil reduseres. Dette vil igjen medføre at temperaturen i brannrommet synker og energiproduksjonen reduseres. Bli tilgangen på oksygen for lav, vil brannen til slutt dø ut.

Selv om energiproduksjonen til brannen synker, vil brennbart materiale fortsatt pyrolysere. Dersom tilgangen på oksygen igjen øker, vil man kunne få en brann med en veldig rask brannutvikling, ofte omtalt som en eksplosjonsartet brann.

Faser i brannen

Dette kapitlet gir en kort oppsummering av hvilke faser en rombrann kan deles inn i. De senere kapitlene vil utdype om varmeavgivelse og temperatur for rombranner med ulik brannutvikling. Det vil også bli vist til beregningsmetodikk for å kunne beregne varmeavgivelse og temperatur i en rombrann.

Antennelse

Antennelse, definert som starten av en forbrenning [1], er en eksotermisk reaksjon, som bidrar til en hurtig temperaturøkning. Man har to typer antennelse, pilotantennelse er ved åpen ild, gnister eller lignende, og spontanantennelse, som oppstår som følge av en kjemisk reaksjon og magasinering av varme, som til slutt fører til antennelse. Den videre forbrenningen vil foregå enten som en flammebrann, eller en ulmebrann.

Vekstfase

Brannens vekstrate vil avhenge av flere forhold, som type forbrenning, type brensel og tilgang på oksygen. Utformingen av brannrommet vil også påvirke brannveksten. En ulmebrann vil kunne ha lav energiproduksjon, men likevel produsere store mengder giftige branngasser. Denne typen branner vil kunne dø ut før de utvikler seg mer.

En flammebrann kan ha en rask vekstfase, avhengig av tilstrekkelig tilgang på brennbart materiale, oksygen mv. Dersom brannen har tilgang på nok oksygen vil den være brenselskontrollert, dvs. det er tilgangen på brensel som regulerer brannveksten.

Overtening

Overtening defineres som en hurtig «overgang til en tilstand der alle overflater på brennbare materialer i et rom deltar i en brann» [1].

Klassiske tegn på overtenning er at temperaturen i brannrommet er ca. 500° – 600° celsius, stråling mot gulvet i brannrommet er 15 – 20 kw/m², og at flammer slår ut av åpninger i brannrommet.

Fullt utviklet brann

Etter at en brann har nådd overtenning vil den gå over i fasen som kalles fullt utviklet brann. Brannen er her på sitt kraftigste, og energien som frigjøres er på det høyeste. Brannen vil i hovedsak være begrenset av tilgangen på oksygen, ventilasjonskontrollert. Mangelen på oksygen i brannrommet

medfører at røyk- og branngasser antenner når de forlater brannrommet gjennom vinduer og andre ventilasjonspåninger.

Temperaturen i brannrommet vil ved en fullt utviklet brann ligge i området mellom 700° – 1200° C.

Avkjølingsfase

I avkjølingsfasen vil tilgangen på brensel i brannrommet reduseres, og brannen vil igjen bli brenselskontrollert. Temperaturen og mengden energi som frigis, vil reduseres i brannrommet.

Varmeavgivelse

Varmeavgivelsen til en rombrann er i betydelig grad med og kontrollerer konsekvensene av brannen; herunder temperatur og oppbygging av røyklag i brannrommet.

Brannutvikling er ofte karakterisert som varmeavgivelse over et gitt tidsrom. Dette forholdet er definert som en designbrann. Typiske designbranner finnes i størrelsen 100 kW – 50 MW.

Gjenstand	Varmeavgivelse
Sigaret	5 W
Typisk lyspære	60 W
Menneske (normal aktivitet)	100 W
Brennende søppelbøtte	100 kW
Bensinbrann (1 m ²)	2,5 MW
Trepaller (3 m høyde)	7 MW
Produksjon fra atomreaktor i kjernekraftverk	500 – 1000 MW

Tabell 1: Typiske verdier for varmeavgivelse fra ulike kilder [3]

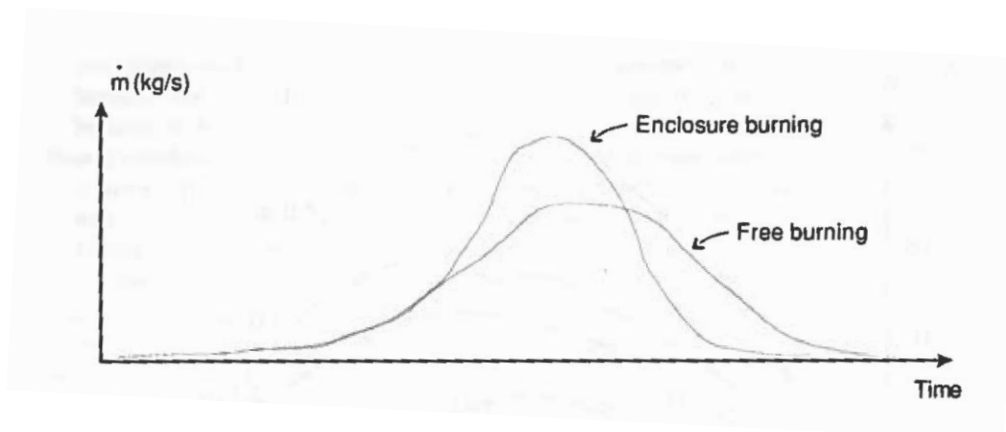
Det finnes to tilnærminger når man skal bestemme en designbrann. Den ene tar utgangspunkt i at man kjenner til mengde og type brennbart materiale i brannrommet, den andre tar utgangspunkt i statistiske verdier for ulike typer bruk av rommet.

Den siste tilnærmingen er mest brukt, da man i mange tilfeller ikke vil kjenne til den eksakte brannenergien i et brannrom. Det er dette som vil være mest relevant i forbindelse med en brannetterforskning. Dette kapitlet vil se på hvordan man kan definere varmeavgivelsen i et brannrom.

«Romeffekt»

Ved en rombrann er det to faktorer som påvirker varmeavgivelsen. Varme gasser (røyk- og andre branngasser) vil stige mot taket, og samle seg der. Røyklaget vil avgi varme til tak- og veggkonstruksjonene. Stråling fra røyklaget, samt de oppvarmede konstruksjonene sørger for oppvarming av det brennbare materialet i brannrommet, og dette medfører hurtigere brannutvikling.

En annen faktor ved rombrann er tilgangen på oksygen. Dersom det er få og små åpninger til brannrommet (dører, vinduer, utettheter i konstruksjonene), vil brannen gradvis begrenses. Mangelen på oksygen medfører en reduksjon i mengden forbrent materiale, som igjen medfører en reduksjon i varmeavgivelsen.



Figur 1: Rømeffekt på massetapsrate [3]

Figuren over viser to kurver. En brann i det fri, samt en brann i et rom (med ventilasjonsåpninger). På grunn av stråling fra røyklaget får man raskere forbrenning i rombrannen. Dersom åpningene i rommet er små, vil brannen etter hvert reduseres som følge av mangel på oksygen i brannrommet. Brannen i det fri vil vare lengre, og etter hvert dø ut som følge av mangel på brensel.

Dersom vinduer, dører og lignende ødelegges, og mister integriteten i løpet av brannforløpet, vil man øke tilgangen på oksygen i brannen. I tillegg vil ubrente røyk- og branngasser trenge ut av brannrommet, og antenne på utsiden når de kommer i kontakt med oksygen.

t²-brann

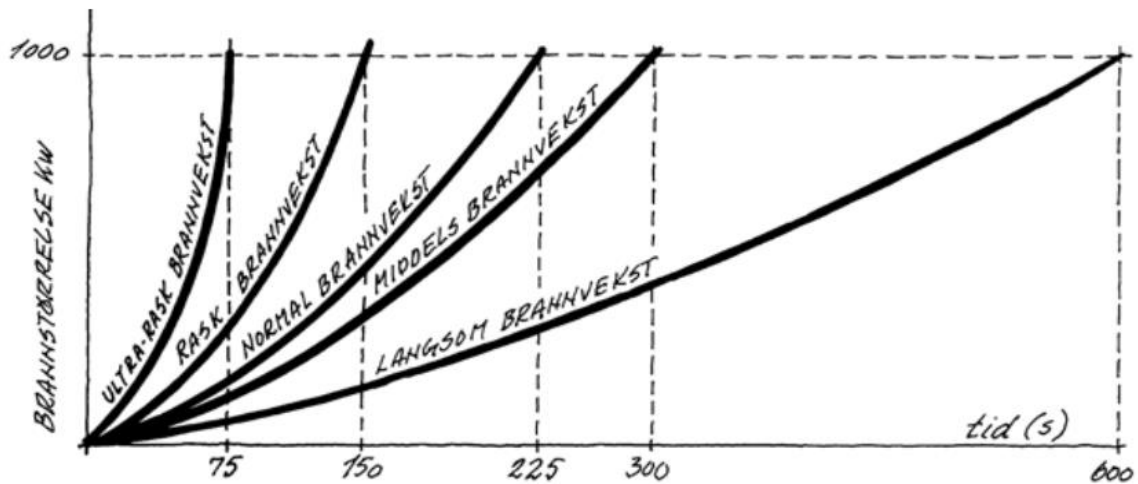
I virkelige branner vil brannveksten nesten alltid være akselererende. En enkel måte å beskrive dette på, er å angi at brannveksten øker som kvadratet av tiden. Ved å multiplisere kvadratet av tiden med en faktor α , kan varierende brannvekster beregnes. Varmeavgivelsen kan da beskrives som en funksjon over tid: $\dot{Q} = \alpha * t^2$

α er vekstfaktoren (kW/s²) og t er tiden etter antennelse, i sekunder.

Brannvekst	Vekstfaktor ($\alpha = \text{kW/s}^2$)	Tid til 1055 kW (angitt i sekund)
Ultra rask	0,19	75
Rask	0,047	150
Middels	0,012	300
Langsom	0,003	600

Tabell 2: Ulike verdier for brannvekst [5]

Verdier for α for ulike brannvekst finnes i NFPA 204M [5]. Det er definert ulike verdier for branner som er slow, medium, fast og ultra fast. Verdiene er definert i sammenheng med hvor lang tid det tar for en brann å nå 1055 kW. I HO-melding 3/2000 Røykventilasjon [6] er det gjort en sammenstilling av brannvekst for ulike typer innredning / brannenergi. En vanlig bolig vil normalt ha middels eller rask brannvekst. I den følgende figuren vises brannveksten som en funksjon av tiden. Det er her lagt inn en kurve for normal brannvekst. Den er særegen for det norske regelverket, og er ikke omtalt videre i disse kapitlene.



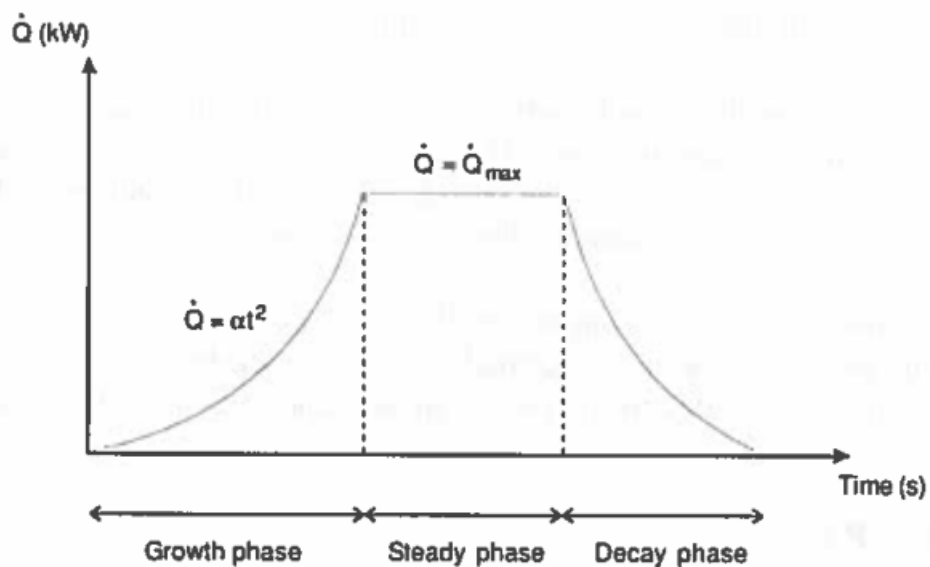
Figur 2: Energiproduksjon for ulike typer brannvekst [6]

Designbrann

For å kunne gjenskape brannforløpet, vil man ofte bruke en designbrann. I forbindelse med en brannetterforskning vil man dra nytte av dette for å kunne si noe om hvilke temperaturer som har vært i brannrommet. For denne oppgaven vil det bli definert ulike brannutvikling for de ulike testoppsettene før testene gjennomføres.

Designbrannen baserer seg på bruk av statistiske og beregnede verdier, og vil aldri kunne gi et eksakt svar på hvordan en brann har utviklet seg. Man tar utgangspunkt i et anslag av brennbart materiale i brannrommet, hvilke bygningsdeler bygget er utført i mv., og ved hjelp av en sensitivitetsanalyse finner man påliteligheten til den valgte modellen.

En designbrann deles inn i tre faser, vekstfase, fullt utviklet brann og avkjølingsfase. De følgende fasene er ytterligere beskrevet senere i dette kapittelet.



Figur 3: Typisk designbrann [3]

Vekstfase

Som beskrevet tidligere vil brannveksten være svært akselererende, og en passende måte å uttrykke dette på i en designbrann er å bruke t^2 -brann i vekstfasen. Brannveksten vil avhenge av hvilken type bygning, og forventet brannenergi i denne typen bygning. Dette baserer seg ofte på statistiske data. Det svenske Boverket [7] angir følgende dimensjonerende data for brannvekst for ulike typer bygninger:

Bygningstype	Brannvekst
Kontor og skole	Middels
Bolig, hotell, sykehjem, sykehus	Rask
Forsamlingslokale	Rask
Kjøpesenter [3]	Ultra-rask

Tabell 3: Forslag til brannvekst for ulike bygningstyper

Dette er data som er basert på statistikk, og det vil være nødvendig å vurdere om dataene er gyldige i den type bygg som skal undersøkes.

I denne oppgaven er det hovedsakelig vekstfasen som er studert i forsøkene. Forsøkene har tatt utgangspunkt i langsom, middels og rask brannutvikling, og det er prøvd å gjenskape en brannutvikling som samsvarer med den teoretiske utviklingen for disse vekstfasene.

Fullt utviklet brann (steady phase)

Etter vekstfasen vil brannen utvikle seg til en fullt utviklet brann dersom det er tilstrekkelig tilgang på oksygen i brannrommet. Det må gjøres betraktninger rundt omfanget av brannen, og brannens varighet. Dette gjøres med bakgrunn i innholdet / mengden brensel i brannrommet.

Avkjølingsfase

Det er vanskelig å gjøre betraktninger rundt avkjølingsfasen i en brann. Man må ha konkret kunnskap om mengden brensel i brannrommet for å kunne si noe om varigheten til fullt utviklede branner. I de fleste designbranner vil man anta at den fullt utviklede brannen fortsetter, og at ingen avkjølingsfase er vurdert.

Temperatur

For å kunne vurdere forholdene i brannrommet, må man kunne mene noe om hvilke temperaturer som har vært i brannrommet. For forsøkene i denne oppgaven vil det være viktigst å se på påvirkningen før overtenning, det er derfor sett på temperaturutvikling i brannrommet før overtenning.

Vurderingen av temperaturen i brannrommet må gjøres på bakgrunn av energi- og massebalanser. Ved å forenkle disse kan man få enkle analytiske ligninger, som kan benyttes til å forutse temperaturen i brannrommet ved forskjellige scenarier.

McCaffrey, Quintere og Harkleroad kom i 1981 med en formel for å beregne temperatur i et rom med ventilasjonsåpninger før overtenning. Formelen baserer seg på en forenklet energibalanse der mengden produsert energi i brannrommet er lik mengden energi som forlater brannrommet via ventilasjonsåpninger, samt varmetapet fra røyklaget til omliggende konstruksjoner (vegg og tak). For å komme frem til formelen ble det undersøkt over 100 datasett fra gjennomførte eksperimenter, hvor alle variablene var kjent. Ved hjelp av disse datasettene ble følgende formel utarbeidet:

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 \sqrt{H_0} h_k A_T} \right)^{1/3}$$

Q er effekten til brannen i kW.

A_0 og H_0 er hhv. arealet og høyden til ventilasjonsåpningen i m^2 og m.

h_k er brannrommets effektive varmegjennomgangskoeffisient. Da røyklagets høyde er ukjent, er det valgt å benytte hele brannrommets areal, A_T , ved beregning av varmetap i rommet.

Modellen har enkelte begrensninger. Den er gyldig med en temperaturstigning på mellom 20° og 600° celsius. Brannen er antatt å være ventilasjonskontrollert, og brannen kan ikke være plassert i nærheten av veggene i rommet.

Glass

Beskrivelsene av de forskjellige typene glass i dette kapitlet er hovedsakelig hentet fra følgende Byggforsk-blad, samt etter beskrivelser fra Saint-Gobain Bøckmann i forbindelse med bedriftsbesøk [8], der ikke andre kilder er oppgitt.

571.951 Bygningsglass [9].

571.953 Isolerruter. Typer og konstruksjoner [10].

571.956 Sikkerhetsruter [11].

571.957 Vinduer og glassvegger med brannmotstand [12].

Glassenes termiske egenskaper er omtalt i kapitlet glass og brann.

Historie

Fremstillingen av glass startet i Mesopotamia i bronsealderen, for snart 5000 år siden. Industriell produksjon av glass startet i England på slutten av 1600-tallet. Automatisk glassproduksjon startet på midten av 1800-tallet, og de neste hundre årene ble det brukt flere ulike teknikker for automatisk produksjon av glass.

På 1950-tallet utviklet Pilkington float-glasset, som er det vanligste glasset som benyttes i dagens glass og vindusproduksjon.

Fremstilling

Glass er et uorganisk materiale som fremstilles ved å smelte en blanding av sand, soda og kalk. Dette gjøres ved ca. 1600° C [9]. Denne blandingen størkner uten at krystallisering inntreffer. Glass er en underkjølt væske som er så tregtflytende at den oppfattes som et fast stoff. Ved kjøling til romtemperatur blir glasset hardt og sprøtt.

Sand, soda og kalkstein er de viktigste råvarene til fremstilling av bygningsglass. De grunnleggende kjemiske komponentene i fremstilling av glass kan deles inn i fire hovedgrupper [9].

Glassdanneren: Stoff som har evne til å danne en underkjølt smelte som ikke krystalliseres ved størkning. Den viktigste glassdanneren er silisiumoksid (SiO_2)

Flussmiddelet: Brukes til å kontrollere viskositeten og smeltetemperaturen. Flussmiddelet gir glasset dårligere evne til å tåle raske temperaturendringer. Glass sin evne til å tåle temperaturendringer er ytterligere diskutert under punktet glass i brann. Det mest brukte flussmiddelet er Natriumoksid (Na_2O).

Stabilisatoren: Har som hovedoppgave å motvirke den uheldige virkningen av flussmiddelet. Kalsiumoksid (CaO) er mest brukt

Tilfeldige bestanddeler: Ved produksjon av glass kan det forekomme små mengder forurensninger, hovedsakelig i form av jernoksider og kromoksid, som er med på å gi glasset en svak grønn farge.

Brytningsindeks

Brytningsindeks er et mål på et materials evne til å lede lys, mer spesifikt et mål på hvor mye hastigheten til lys blir redusert gjennom materialet, i forhold til vakuum. Brytningsindeks er en benevnelsesløs verdi. Glass har en brytningsindeks på ca. 1,5. Det vil si at lysets hastighet blir dividert med 1,5 gjennom glass.

Glass er en ikke-homogen masse, og små, men signifikante forskjeller kan oppstå i produksjonen av glasset. Dette kan påvirke de fysiske egenskapene til glasset, og blant annet brytningsindeksen kan endres.

Floatglass

Stort sett alt industrielt bygningsglass produseres i dag som floatglass, som i mange tilfeller vil være omtalt som ubehandlet glass [13].

Floatglass produseres ved å mate inn råmaterialene soda, sand og kalkstein mv. inn i et smeltekar med en temperatur på ca. 1600° C. Den smeltede glassmassen flyter så frem til et bad med flytende tinn. Glassmassen blir avkjølt til en temperatur på 950 °C, og strekkes så til floatglass. Glasset produseres i store flak, som skjæres til og brukes som basismateriale for herdete, laminerte og varmførsterkede glass. Floatglass brukes også for å produsere isolerglass, som er glassene som benyttes i vanlige vinduer.

Isolerglass

Isolerglass er en samlebetegnelse på 2- eller 3-lags ruter som benyttes i vinduer. Rutene består av to eller tre floatglass, som er limt sammen med en kantforsegling. Glassene holdes fra hverandre med en avstandsprofil. Det innerste glasset er belagt med et metallbelegg for å bedre glassets isolerende egenskaper. Hulrommet mellom glassene kan også fylles med argon eller annen gass for å bedre de isolerende egenskapene (U-verdien) til glassene.

For å gi glasset ytterligere egenskaper kan det benyttes folie som gir glasset bedre egenskaper til f. eks solskjerming, lydisolasjon, lysrefleksjon, farge osv. Det kan også benyttes glass med brannmotstand, sikkerhetsglass eller andre typer glass som ett av glassene i isolerglasset.

Sikkerhetsglass

Teknisk forskrift stiller krav til sikring av vinduer og glassruter som kan medføre skader på person eller husdyr ved knusing. I boenheter skal det benyttes sikkerhetsglass i rekkverk på terrasser og balkonger, og vinduer fra og med tredje etasje skal være sikret. Dette gjelder også i barnehager og skoler, hvor områder hvor barn oppholder seg skal være sikret.

Hensikten med bruk av sikkerhetsglass er å redusere risikoen for at noen skjærer seg på glassets bruddflater. Større eller mindre glassbiter som faller ned, kan treffe personer eller husdyr. Mindre glassbiter som dannes når glasset knuses mot underlaget, kan også føre til skader. [10].

Bruk av sikkerhetsglass reguleres av NS3510 Sikkerhetsglass i bygg [13]. Denne gir grunnleggende prosjekteringsprinsipper, som må følges for at de enkelte bygningsdelene skal få et tilfredsstillende sikkerhetsnivå.

Sikkerhetsglass er herdete glass og/eller laminerte glass i ulike kombinasjoner, avhengig av bruksområde. Vanlig bruksområder for sikkerhetsglass er balkong- og trapperekker, dusjkabinett, speilvegger, innredninger til kjøkken og bad og lignende.

Sikkerhetsglass deles inn i to kategorier, personsikkerhetsrute og trygghetsrute.

Personsikkerhetsruter er utviklet for å forhindre eller minske risikoen for personskade ved sammenstøt med glass. Trygghetsruter er utviklet for å ha motstand mot hærverk og innbrudd eller for å sikre mot skudd og eksplosjoner. For at et glass skal kunne karakteriseres som sikkerhetsglass må det tilfredsstillende enten bruddtype B eller C, som angitt i det følgende.

NS 3510 gir følgende beskrivelser av bruddtyper for glass.

Bruddtype A, ubehandlet glass. Mange sprekker oppstår, og det dannes separate deler med skarpe kanter, og noen kan være store.

Bruddtype B, laminert glass. Mange sprekker oppstår, men de enkelte bruddelene holder sammen og faller ikke fra hverandre.

Bruddtype C, herdet glass. Prøveruta går i oppløsning, og det dannes et stort antall små deler som er relativt harmløse.

Herdet glass

Ubehandlet glass har et stort og varierende antall små, usynlige mikrosprekker i overflaten. Sprekkene fungerer som bruddanvisere. For å øke bøyefastheten til glasset må man redusere effekten av disse spenningene. Dette gjøres ved å innføre kontrollerte spenninger i glasset, slik at overflaten settes under trykk.

Herdet glass fremstilles med at en plate av floatglass varmes opp til ca. 630 – 650 °C [11], og kjøles hurtig ned. Under avkjøling kjøles glasset i ytterkantene først, med langsommere avkjøling av midtsjiktet. Dette medfører at trykkspenningen i overflaten øker, med en tilsvarende strekkspenning i kjernen av glasset. Glasset må ferdigstilles før det varmebehandles, dvs. det må kuttes nøyaktig slik det skal være i bruk, alle utsparinger må tas før varmebehandling osv.

Ved belastning som fører til brudd granulerer et sikkerhetsglass i mange små biter, noe som gir liten risiko for skjærskader. Ved brudd vil glasset ekspandere, og falle ut av ramme eller innfestning. Dersom herdet glass benyttes i tak, vil glasset kunne falle ned mer samlet, og med en tyngde som kan forårsake skader på personer og gjenstander. Herdet glass skal derfor ikke brukes som innerste glass i takkonstruksjoner, iht. NS3510.

Varmeforsterkede ruter fremstilles på samme måte som herdete ruter, men med en langsommere avkjøling. Disse glassene har et bruddmønster som for et ubehandlet glass, noe som gir farlige brudd. Disse glassene er ikke videre omtalt i denne rapporten.

Laminert glass

Laminert glass konstrueres med at to eller flere glassplater lamineres med Polyvinylbutyral (PVB)-folie mellom glassene. Glassets styrke avhenger av tykkelsen på glassplatene som limes sammen.

Det finnes mange forskjellige sammensetninger av laminerte glass. Det kan benyttes både ubehandlet glass, varmførsterket glass og herdet glass som en eller begge (alle) platene som limes sammen.

Sammenbindingen mellom glassene og PVB-folien skjer ved ca. 130-140 °C. Det er bra vedheft mellom glass og folie, og glasset oppnår sin funksjon ved at folien holder glassbitene samlet dersom det knuses. Dette reduserer risikoen for skader.

På grunn av foliens styrke, i kombinasjon med glassets egenskaper, vil det ta lang tid å forsere en rute som er laminert. Med bakgrunn i dette brukes laminerte glass ofte som beskyttelse mot innbrudd.

Laminerte glass har dårlig bestandhet mot fukt og temperatur. Dersom det trekker fukt inn mellom glassene, kan man oppleve at folien mister vedheften. Ved temperaturer over 70 °C vil PVB-folien begynne å mykne, og glasset egenskaper reduseres.

Et herdet og laminert glass vil ved brudd i et av glassene kunne beholde integriteten på grunn av reststyrken i det gjenværende glasset. Dersom begge glassene knuses, blir det laminerte glasset mykt, og vil kunne falle ut av innfestningen.

Det sterkeste laminerte glasset vil bestå av en kombinasjon av herdet og varmemforsterket glass. Dette på grunn av ulike bruddmønstre og økt materialstyrke.

Brannglass

Brannglass er en type laminert glass som er utført med et lag ekspanderende skum mellom de ulike glassene. Ved temperaturpåkjenning ekspanderer skummet, noe som gir glasset en isolerende effekt, samt at glasset beholder sin integritet. Brannglass finnes i forskjellige klassifikasjoner fra E30 (røyktett i 30 minutter) til EI 120 (røyktett, samt at temperaturen på ikke-eksponert side ikke overstiger 120° C i 120 minutter). Det finnes også ruter med klassifisering EW, som gir delvis beskyttelse mot varmestråling.

Denne oppgaven fokuserer på hvordan glass uten brannmotstand påvirkes av en brann, og brannglass er ikke ytterligere omtalt.

Vindu og isolerglass

Beskrivelsene av de forskjellige typene vindu i dette kapittelet er hovedsakelig hentet fra følgende Byggforsk-blad, samt etter beskrivelser fra NorDan i forbindelse med bedriftsbesøk [14].

533.102 Vinduer. Typer og funksjoner [15]

533.132 Vinduer av tre [16]

571.953 Isolerruter. Typer og konstruksjoner [10]

Historie

Vinduer i bolighus ble vanlig fra slutten av 1700-tallet. I starten ble det brukt sprosser av bly, satt inn i rammer av metall eller hardt treverk (einer var mye brukt). Glasset var håndlagd, og det var ujevnt i tykkelse og overflate. Blyglassruter ble brukt til et stykke ut på 1800-tallet.

Glasset som ble brukt i vinduene ble fabrikkert ved glassblåsing, og produksjonsmåten begrenset størrelsen til glassene.

Etter blyglassrutene ble det vanligere å bruke sprosser av tre. Man benyttet fortsatt håndlagde ruter, så vinduer fra denne perioden har mange små ruter, delt inn med sprosser.

I løpet av 1800-tallet ble arealet til glassene større, og man kunne dermed øke størrelsen på vinduene. Frem til starten av 1900-tallet utformes vinduer i mange forskjellige stiler, men det er hovedsakelig håndlagde ruter som blir benyttet.

Fra starten av 1900-tallet ble det vanlig å benytte maskintrukket glass, som ble fremstilt ved at glassmassen trekkes gjennom flere valser. Denne metoden muliggjorde fremstilling av større glassflater enn tidligere.

Rundt 1950 begynte man å produsere floatglass, og dette muliggjorde produksjonen av isolerglass. Siden da har man benyttet isolerglass i forskjellige varianter, og det er fortsatt isolerglass med 2 eller 3 ruter som benyttes i vanlige vinduer i dag. I tillegg til de tradisjonelle vinduene med rammer og karm i tre, er det i dag også vanlig å benytte andre materialer, som plast og aluminium.

Funksjon

Et vindu skal fylle flere funksjoner i et bygg. Det skal sørge for å slippe inn dagslys og gi utsyn fra bygget, det skal kunne benyttes til ventilering, det skal være tilpasset byggets arkitektoniske uttrykk og det skal være sikkert i bruk.

Vinduer deles inn i to hovedkategorier, enten med fast karm, eller åpningsbare vinduer. Åpningsbare vinduer kan utføres etter flere prinsipper, sidehengslet, topphengslet, toppsving osv.

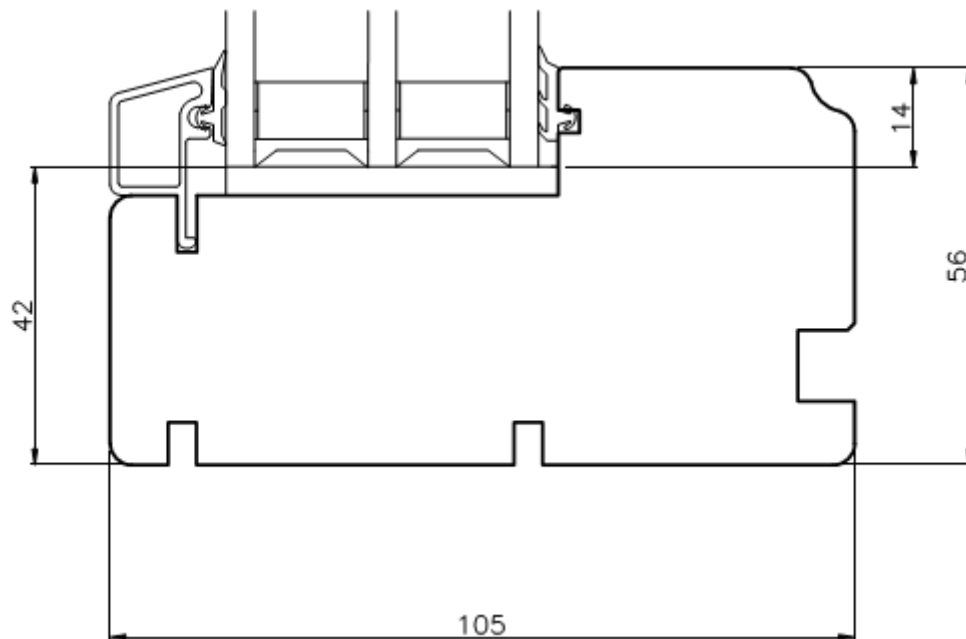
Typer vindu

Vindu av tre

De fleste vinduer som benyttes i dag har karm og rammer av tre. Gran og furu benyttes hovedsakelig i karmene. Det benyttes laminerte profiler, da disse er mer stabile enn profiler av heltre.

Tre har gode styrkeegenskaper i forhold til massen, og har lav varmeledningsevne, noe som bidrar til vinduets isolerende egenskaper.

En av utfordringene ved bruk av trevirke til vinduer er fuktskader og behovet for vedlikehold.



Figur 4: Snitt av 3-lags vindu

Andre typer vindu

Det finnes hovedsakelig to andre typer vinduskarmer i tillegg til karmer av tre, PVC og aluminium. I tillegg finnes det vindu som kombinerer tre-vindu med andre materialer for å nytte seg av egenskapene til disse materialene. Eksempel på dette kan være å kle en karm av tre med profiler i PVC eller aluminium for å bruke dette materialet som en klimaskjerm for trekarmen. Tre har en god varmeisolasjonsevne, og profilene utføres i et materiale som har begrenset behov for vedlikehold.

Profilene er montert utvendig, og erfaringene til NorDan [14] er at disse profilene har liten betydning i en brannsituasjon. Ved brannpåkjenning utenfra vil profilene løsne tidlig i brannforløpet, og ha liten påvirkning på vinduet og omliggende konstruksjoner.

Vindu i PVC og aluminium er kort omtalt her.

PVC- vindu

Vinduene produseres i polyvinylklorid, med karmer i ekstruderte profiler. Disse profilene kuttes og sveises sammen i hjørnene. Karmene har ikke tilfredsstillende bøyestivhet, og må forsterkes med profil i metal, ev. komposittmateriale. Karmene har lav varmeledningsevne, tilsvarende som for karmer av tre.

PVC-vindu krever relativt lite vedlikehold, og markedsføres ofte som vedlikeholdsfrie vinduer.

Aluminiumsvindu

Vinduene produseres i aluminium, med profillengder som kuttes og sammenføres i hjørner til rammer og karmer. Karmene har god bøyestivhet. Aluminium har høy varmeledningsevne, så vinduene må derfor utføres med kuldebrytere i profilene for å oppnå tilfredsstillende U-verdi.

Aluminiumsvinduer trenger lite vedlikehold, men må rengjøres jevnlig for å hindre korrosjon.

Glass i brann

Det er gjort et begrenset antall studier på hvordan glass oppfører seg i brann. Dr. Ing. Vytenis Babrauskas har gått gjennom [17] hvilke forsøk og undersøkelser som er gjort. Dette kapittelet baseres mye på hans oppsummeringer, samt enkelte nye studier som er gjort.

Det ble også tatt kontakt med Dr. Ing. Vytenis Babrauskas [18], Dr. Peter Mansi [19], samt forskningsleder ved SP Fire Research, Anne Steen-Hansen [20] for å avklare om det finnes andre studier som kunne være nyttige for denne oppgaven. De kunne ikke henviser til annen litteratur enn det som allerede var kjent.

Litteraturstudiet som er gjort viser at mesteparten av forsøkene / studiene som er gjennomført er gjort på enkle glass. Felles for de fleste studiene som er gjort, er at de har hatt fokus på tiden det tar før glasset sprekker / faller ut. Dette fokuset skyldes hovedsakelig at et vindu har to «funksjoner» i en brann. Dersom vinduet beholder integriteten, vil det fungere som en vegg, og redusere oksygentilførselen til en brann, som igjen kan medføre at den dør ut av seg selv. Dersom vinduet sprekker / faller ut vil dette medføre at vinduet blir en ventilasjonsåpning, og brannen får tilført oksygen. Dette vil øke risikoen for at brannen går til overtenning, noe som vil kunne medføre større ødeleggelser.

Flertallet av forsøkene som er gjort, er studier som omhandler varmepåvirkning på enkle glass, ikke nødvendigvis som en del av en vinduskonstruksjon

Varmepåvirkning

Glass som utsettes for varmepåvirkning, vil endre sine egenskaper, avhengig av tiden og intensiteten i den påvirkningen glasset blir utsatt for. Det er undersøkt tid til sprekkdannelse, og kollaps i glasset, samt kritisk temperatur og stråling mot glasset.

Sprekkdannelse (Krakelering)

Keski-Rahkonen [21] har gjennom teoretiske studier utført på slutten av 1980-tallet funnet ut at sprekkdannelse i glasset i hovedsak skjer i randsonen mellom glasset som blir eksponert for varmestråling, og det glasset som blir skjermet av karmen til vinduet.

Sprekkdannelse oppstår fordi varmepåvirkningen medfører økning i spenningene i glasset dersom glasset blir ujevnt oppvarmet. Etter tilstrekkelig oppvarming av glasset når de kritiske strekkspenningene, og det vil dannes sprekker i glasset. Ved stor sprekkdannelse i glasset vil disse samles, og glasset vil deles i flere deler. Etter hvert vil disse delene av glasset falle ut. Spenningene bygger seg opp i de kaldeste delene av glasset, og typisk der det allerede finnes bruddanvisninger i glasset. De delene av glasset som er skjermet av karmen til vinduet, vil bli utsatt for mindre varmepåvirkning fra brannen, og man vil få sprekkdannelse fra ytterkant av glasset og inn mot midten.

Flere av forsøkene som er gjort [22] [23] viser at glass med uniform oppvarming beholder integriteten mye lengre, og det kreves mye høyere temperatur for at det skal bli sprekkdannelse i glasset. I studiet til Skelly et al. [22] er det gjort forsøk med forskjellige brannstørrelser som skal simulere rombrann. Disse forsøkene viser at for branner med langsom brannutvikling vil også det beskyttede glasset (som i vinduer) langsomt varmes opp, og tiden før det oppstår sprekkdannelse, vil øke.

Forsøk gjort i Japan [24] viser at 3mm float glass vil begynne å sprekke ved en varmefluks på ca. 5,0 kW/m². Disse forsøkene viser også at ved denne varmepåvirkningen vil mindre biter av glasset falle ut. Ved høyere varmefluks (ca. 9,0 kW/m²) vil man oppleve at større biter av glasset faller ut.

Tykkelsen på glasset har betydning for tiden det tar før glasset sprekker. Forsøk gjort i Kina [25] konkluderer med at tykkere glass bruker lengre tid på varmegjennomgang fra eksponert side til kald side. Dette medfører at tiden for sprekke dannelse øker for tykke glass, da de termiske spenningene i glasset begrenses av den kalde delen, og det kreves økte strekkspenninger for at det skal dannes sprekker i glasset.

De ulike studiene konkluderer med at det kreves en temperaturforskjell på mellom 60° C og 80° C [21] [17] [22] for at det skal oppstå sprekke dannelse i et enkelt glass. Norsk glass og fasadeforening oppgir [26] at en temperaturforskjell på 40° C vil være tilstrekkelig for at det skal oppstå sprekke dannelse. Disse temperaturforskjellene stemmer overens med resultatet i [24] som angir at det kreves ca. 5 kW/m² varme fluks for at glasset sprekker.

Utfall av glass

Det er i mindre grad studert hvilken termisk påkjenning som må til for at glass skal falle ut av vinduer / åpninger.

Babrauskas har undersøkt flere studier, og konkluderer med at man vil få utfall av glass ved en temperatur på rundt 450° C. Dette er studier som er gjort på enkle glass. For vinduer med 2- eller 3-lags isolerglass vil man kunne forvente lengre tid før utfall av glass, spesielt for de ytre glassene.

Forsøkene som er gjort i Double glazing in enclosure fires [27] får kun minimalt (2 %) utfall i ett av de ytterste glassene (2 vinduer i 3 forsøk).

The loss prevention council of the UK [28] gjorde et studie på vinduer med doble glass for å undersøke hvilken temperaturpåvirkning et vindu må utsettes for, for å endre ventilasjonsforholdene i brannrommet. Der ble det konkludert med at vinduene mister integriteten ved en temperatur på ca. 600° C, over en tid på 8-10 minutter. I et påfølgende forsøk med høyere brannenergi i rommet, falt glasset ut på ca. samme temperatur, men på et tidligere stadiet i brannen.

Forsøk som ble gjort i forbindelse med en bacheloroppgave ved HSH [29], som undersøkte 2- og 3-lags vinduer viser utfall av glass for alle glassene i både 2- og 3-lagsvinduene, ved lavere temperaturer, og etter kortere tid enn hva studiene over viser.

Studier gjort på doble glass / vinduer i hus

For denne oppgaven vil det være mest relevant å se på studier hvor det er studert doble glass / isolerglass. Det er dette man vil finne i vanlige vinduer i boliger. Det er gjort studier ved universitetet i Ulster, som har undersøkt på doble vinduers oppførsel i forskjellige branner [27] [30], samt ved kinesiske universitet som har studert kritiske forhold for å få brudd i doble glass [31]. Det er også sett grundigere på en studie av enkle glass, fra Virginia Polytechnic institute and state university [22], som har sett på hvordan enkel glass påvirkes i en rombrann.

Studiene er i det følgende gjennomgått, med hensyn på bakgrunn for forsøkene som er gjennomført, testoppsettet som er brukt og resultatene som er fremkommet. Hensikten med denne gjennomgangen er å kunne sammenligne likheter og ulikheter mot testingen som er gjennomført i arbeidet med denne oppgaven.

An experimental investigation of glass breakage in compartment fires

Denne studien er gjennomført av Michael J. Skelly og Richard J. Roby ved Virginia Polytechnic institute and state university, og er publisert i 1991 [22]. Studien har fokus på glass som sprekker som følge av påvirkning av brann. Eksperimentene i studien ble gjort i et rom som var designet for å oppnå en to-sone deling. Det ble gjort forsøk på to typer glass, glass med beskyttet kant (som for vinduer), og glass som ikke har beskyttet kant, hvor det kan forventes en uniform oppvarming av glasset.

Forsøk

Det ble gjennomført 11 forsøk på glass med beskyttet kant, og 6 forsøk på glass uten beskyttet kant. Forsøkene ble gjennomført med brannforløp som ligner på det man vil få i en rombrann. Rommet som forsøkene ble gjennomført i, hadde målene 1,5 * 1,2 * 1 m, og var konstruert i isolerende materiale. Rommet var utført med en ventilasjonsåpning på ca. 0,3 m², plassert midt i en av veggene tilstøtende til vinduene.

Det ble brukt hexan som brensel i forsøkene, og det ble brukt brenselkar i forskjellig størrelse for de ulike forsøkene, dette for å simulere varierende brannutvikling.

Det ble målt temperatur i røyklaget, samt temperatur på beskyttet og ubeskyttet glass.

Resultater/funn

I ti av elleve tester med glass med beskyttet kant ble det så stor sprekkdannelse i vinduene at glass falt ut. I den ellefte testen, som ble gjennomført med det minste brenselkaret, oppstod det ikke sprekkdannelse i glasset.

Gjennomsnittlig målt temperaturforskjell mellom beskyttet del av glasset og ubeskyttet del er 90° celsius. Som man ser i tabellen under stiger temperaturen i den beskyttede delen av glasset for de forsøkene der det har gått lengst tid til første sprekkdannelse. Dette skyldes varmeledning, fra beskyttet del til ubeskyttet del av glasset.

Studien viser også at tiden til brudd i glassene er lavest for brannen med raskest brannutvikling (størst brannareal).

Test No.	Fire Size (cm)	Temperature at Glass Breakage			Time of Crack Initiation (sec)
		Edge, T_e (°C)	Center, T_c (°C)	$T_c - T_e$ (°C)	
1	20 x 30	22	117	95	55
2	20 x 30	27	159	132	56
3	20 x 30	32	116	84	48
4	20 x 20	27	110	83	100
5	20 x 20	35	135	100	112
6	20 x 20	35	115	80	109
7	20 round	29	110	81	127
8	20 round	35	132	97	132
9	10 x 20	40	101	61	350
10	10 x 20	50	137	87	330
11	10 x 20	37*	118*	81	No Cracks
AVG. (SD)		33(8)	123(16)	90(18)	

* At Maximum Temperature Difference

Tabell 4: Resultater fra forsøkene med glass med beskyttet kant

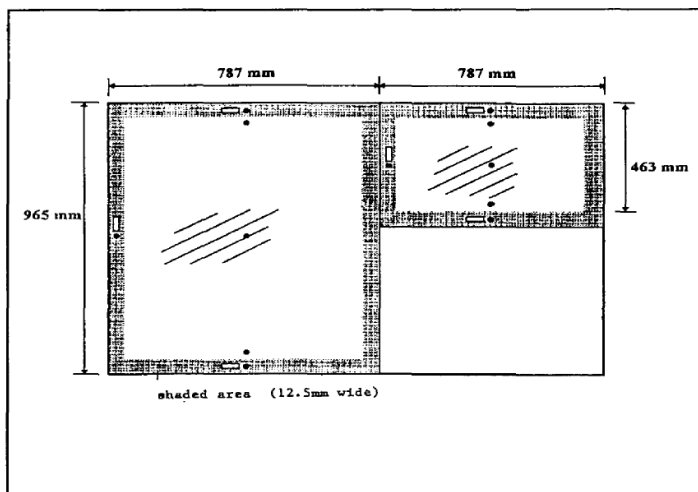
Behaviour of double glazing in enclosure fires

Denne studien er gjennomført av Shields, Silcock og Hassani ved University of Ulster i Nord-Irland, og er publisert i 1998 [27]. Studiet er gjort med grunnlag i at tidligere studier innen glass har hatt fokus på enkle glass, og har fokus på hvordan vanlige doble glass oppfører seg hvis de blir utsatt for reell brannpåvirkning, med hensyn til brannens plassering, hvor glasset er plassert på veggen, og påvirkningen fra røyklaget.

Forsøk

Det ble gjennomført tre forsøk i et rom med følgende mål, høyde 1,7 m, bredde 1,5 m, og lengde 1,6 m. Forsøksrommet var konstruert i 100 mm betongblokker. Det ble brukt ca. 19 kg trekrybber som brensel i hvert av forsøkene. Brenselet ble plassert midt i forsøksrommet i to av forsøkene, og i et hjørne av forsøksrommet i det siste forsøket.

Det var montert to vinduer i rommet, et stort og et lite.



Figur 5: Plassering og størrelse på vinduer, samt plassering av termoelementer

Resultater/funn

Experiment No.	Time to 1st Crack (min)				Measured Edge Strain at Cracking (μs)				Time to Loss of Integrity Outer Panes (mins)		% Glass Fall Out Outer Panes	
	Large Pane		Small Pane		Large Pane		Small Pane		Large Pane	Small Pane	Large Pane	Small Pane
	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Outer	Outer	Outer	Outer
1	5.1	12.7	5.3	14.6	475	340	450	430	—	—	—	—
2	4.9	13.2	4.1	14.0	—	—	—	—	21.0	—	2	—
3	5.2	19.8	5.1	18.8	530	530	—	—	—	—	—	—

Tabell 5. Tid til brudd i innerste og ytterste glass for 2 vinduer i de tre forsøkene

Forsøkene viser ganske entydig at sprekkdannelsen starter i det innerste glasset etter ca. 5 minutter. For de ytterste glassene varierer tid for første sprekkdannelse fra ca. 13 minutter til ca. 20 minutter.

Etter ca. 5 minutter er det for alle forsøkene temperaturer på ca. 400 °C i området nærmest vinduet ved tidspunktet for første sprekkdannelse.

Studien konkluderer med at doble glass beholder integriteten lengre enn enkle glass, selv om også de ytterste glassene ble svekket som følge av temperaturpåvirkning og sprekkdannelser i glasset.

Behaviour of double glazing in corner fires

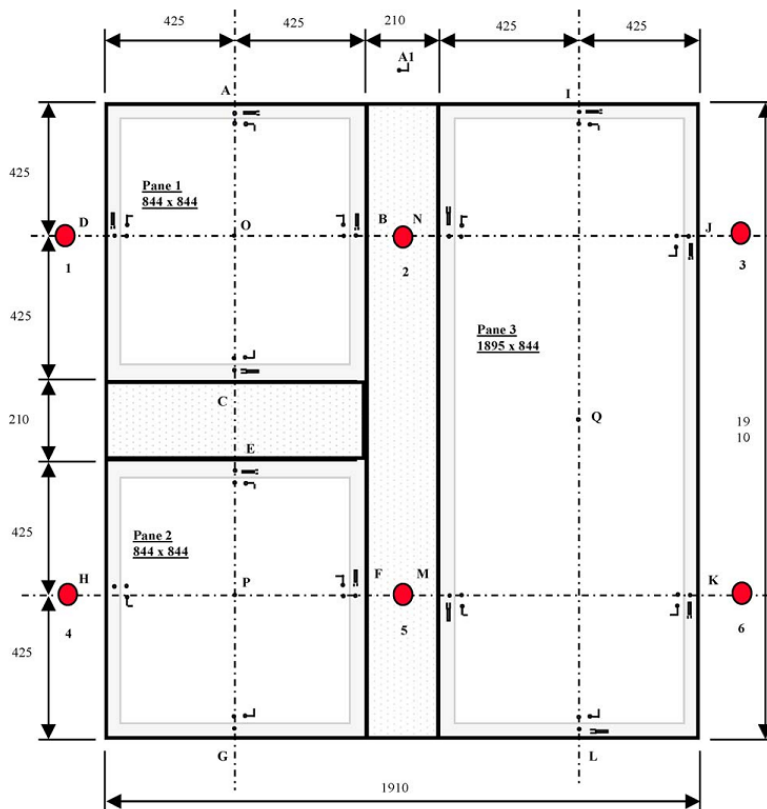
Denne studien er gjennomført av Shields, Silcock og Flood ved University of Ulster i Nord-Irland, og er publisert i 2005 [30]. Bakgrunnen for studien er å se på hvordan vinduer med doble glass påvirkes av hjørnebranner av ulik intensitet. Forsøkene ble gjennomført i et ISO-rom, der det blant annet ble sett på temperaturer i røyklaget, temperaturer i beskyttede og ubeskyttede deler av glasset, tid til første sprekkdannelse og utfall av glass.

Forsøk

Det ble gjennomført 15 tester på dobbelt glass med økende intensitet. Vinduene ble utsatt for typisk to-soner påvirkning i ISO-rommet, og testene ble repetert med tre forsøk for hvert av testoppsettene.

ISO-rommet ble bygget opp av 100 mm betongblokker, dekket med isolerende matter og gipsplater. I den ene veggen var det en ventilasjonsåpning på 40 * 200 cm.

I forsøkene ble det ble brukt tre vinduer i ISO-rommet. To av vinduene var på ca. 85 * 85 cm, og ett var plassert i røyklaget, mens det andre var plassert i kald sone. Det var også ett vindu på 85 * 190, som var plassert delvis i kald, delvis i varm sone.



Figur 6: Plassering av vinduer i ISO-rommet [27]

Det ble brukt brenselkar i størrelse 60 * 60 cm til 100 * 100 cm, og varmeavgivelsen ble beregnet ved hjelp av vektmålinger. Brenselkaret var plassert i motsatt hjørne av brannrommet, med en avstand fra vinduene på mellom ca. 1,5 og 2 meter, avhengig av størrelsen på karet.

Resultater/funn

For forsøkene med minst brannareal ble det observert en høyeste gasstemperatur i underkant av 500 °C, mens det i forsøkene med det største brannarealet (1 m²) ble observert temperaturer i underkant av 1000 °C. Målingene viser at man fikk bekreftet etableringen av to-soner i brannrommet.

Forsøkene viser at tiden til første sprekkdannelse var mye kortere for forsøkene med den høyeste intensiteten. I både forsøkene med lavest intensitet, og forsøkene med høyest intensitet oppstod den første sprekkdannelsen i toppen av vinduet som var plassert i både kald og varm sone. For de andre vinduene var det mer vilkårlig hvor første sprekkdannelse oppstod.

Mengden glass som falt ut av vinduene økte også signifikant i forsøkene med den høyeste intensiteten. I forsøkene med høy intensitet falt den største delen av det indre glasset ut for vindu 1 og 3, mens det i forsøkene med lavere intensitet var svært begrenset utfall av glass. I vindu 1 var i praksis alt glass borte etter ca. 3.30 minutter, mens det for vindu 3 tok ca. 9 minutter før alt glass var borte.

For de ytre glassene ble det observert begrenset sprekkdannelse i forsøkene med lav intensitet. I forsøkene med 1 m² brannflate ble det observert stort utfall av glass fra både vindu 1 og 3.

For vindu 2, som i sin helhet var plassert under røyklaget, ble det observert begrenset med sprekkdannelser i indre glass i forsøkene med høy intensitet. I forsøkene med lav intensitet og for det ytre glasset ble det ikke observert sprekkdannelse for noen av forsøkene.

Studien konkluderer med at det krever en større varmepåkjening for å få utfall av glass fra begge glassene.

Determination of critical breakage conditions for double glazing in fire

Denne studien er gjennomført av Wang, Li, Su, Lu, Wang et.al ved University of science and technology of China, og er publisert i 2016 [31]. Bakgrunnen for studien er at det er gjennomført få studier på vinduer / doble glass, og at man ønsket å se nærmere på hvordan doble glass oppfører seg i en brann. Som for de fleste andre studiene som omtaler glass, er også formålet med denne å se på hvor lang tid det tar før glasset mister integriteten og går fra å være en tett bygningsdel til å bli en ventilasjonsåpning i brannrommet.

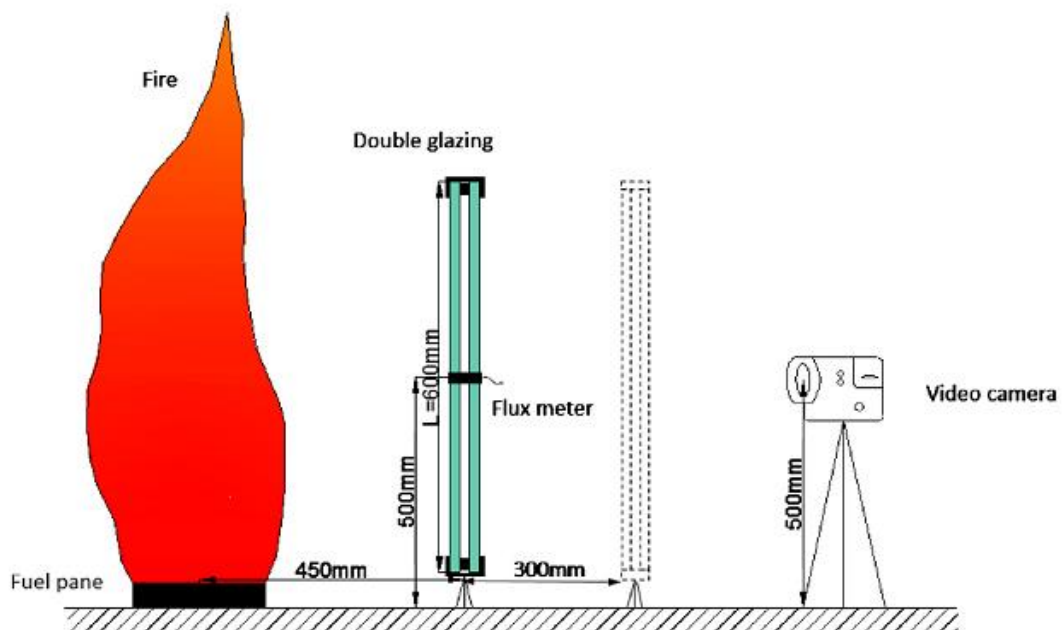
Forsøkene ble gjort ved å redusere avstanden fra brannen til glassene, og på denne måten studere hvordan glasset påvirkes ved å bli utsatt for varme av økende intensitet.

Forsøk

Det ble gjennomført ni forsøk, der doble glass ble utsatt for varmegåkjening fra en 50 * 50 cm pølbrann. Brenselkaret var plassert i en avstand fra 75 cm til 45 cm fra glasskonstruksjonen. Det ble målt varmekraft, overflatetemperatur, tid til sprekkdannelse og hvor sprekkdannelsen oppstod i glassene.

Det ble brukt en økende mengde brensel i forsøkene, og for forsøkene med kortest avstand (45 cm) mellom brann og glass, var branntiden ca. 12 minutt.

Det ble brukt glass på 60 * 60 cm, med en ramme på 2 cm for at glassene best mulig skulle tilsvare en vinduskonstruksjon.



Figur 7: Illustrasjon av testoppsettet [31]

Resultater/funn

For det første forsøket, hvor avstanden mellom brann og glass var 75 cm, oppstod det ikke sprekkdannelse i glassene. Dette skyldes en jevnere oppvarming av glasset, og at temperaturforskjellen i glasset ikke var stor nok til at det oppstod sprekker.

For de øvrige forsøkene oppstod det sprekkdannelse i indre glass etter mellom 2 og 4 minutter. Forsøkene viser imidlertid ikke at tiden til sprekkdannelse går ned når avstanden mellom brann og glass reduseres.

Det er kun i forsøk 9, med en avstand på 45 centimeter mellom flamme og glass, at indre glass faller ut tilstrekkelig til at ytre glass blir eksponert tilstrekkelig til at sprekkdannelse oppstår.

Testene gir heller ingen signifikant indikasjon på hvor i glassene sprekkdannelse oppstår. Første sprekkdannelse ble observert i begge sider, samt i øvre kant av glassene.

Det konkluderes med at det ytre glasset vil kunne motstå en brann tre til fire ganger lengre enn det indre glasset. Det indre glasset vil begynne å sprekke ved en temperaturforskjell på ca. 60 °C, ved en varmekraft på ca. 6 kW/m². Det ytre glasset må påvirkes av en adskillig høyere temperatur, og en strålefluks på ca. 25 kW/m² før det begynner å sprekke.

Oppsummering av funn fra studier av doble glass

Sprekkdannelse i glassene starter ved en temperaturforskjell i glasset på ca. 70 – 90 °C. For ytre glass kreves det en adskillig høyere temperatur i brannrommet, da dette glasset beskyttes av det indre glasset.

For forsøkene med en langsom oppvarming av glasset er det observert mindre sprekkdannelse, og i noen tilfeller ingen. Dette skyldes at den delen av glasset som er dekket av karmen også blir varmet opp, og at temperaturforskjellen i glasset ikke blir stor nok til at sprekker oppstår.

Ved brann av høy intensitet vil sprekkdannelsen oppstå tidligere, og det vil bli mye større sprekkdannelse i glasset. Dette vil igjen medføre at mer av glasset faller ut. For doble vinduer vil dette medføre en tidligere eksponering av det ytre glasset, med påfølgende utfall.

Studiene gir ingen klar indikasjon på hvor første sprekkdannelse oppstår. Der dette er oppgitt er det angitt første sprekkdannelse i øvre kant, og i begge sidene av glassene.

Felles for alle forsøkene er at det kun er sett på påvirkningen på selve glassflaten, og om denne beholder integriteten. Formålet med studiene er hovedsakelig å undersøke hvordan brudd i glass vil kunne påvirke ventilasjonsforholdene i brannrommet.

Sikkerhetsglass i brann

Det er gjort begrenset med studier på hvordan sikkerhetsglass påvirkes av brann. Dette kapitlet baserer seg i hovedsak på en studie gjort ved SINTEF, publisert i 1989 [32], som ser på hvordan overbygde glassgårder påvirkes av brann. For denne typen konstruksjoner vil det være viktig å ha glass som tåler påvirkning av varme fra røyklaget, da det i en brannsituasjon vil samle seg varme røyk- og branngasser under taket i glassgården.

Forsøk

Forskjellige typer sikkerhetsglass ble utsatt for en eksponering på 300 °C. Temperaturen ble valgt som et anslag for røykgasstemperaturen i en overbygd glassgård, ref. BE-melding H-1/88 (senere erstattet av HO 3/2000 [6]). Temperaturen ble holdt på denne temperaturen i 30 eller 60 minutter, før den fulgte den videre stigningen gitt i NS 3904 (utgått teststandard).

Det ble gjort undersøkelser på forskjellige typer glass; floatglass, trådglass, herdet glass, laminert glass og brannglass. Det ble videre sett på floatglass av type 2*4 mm med 0,76 mm PVB-laminat, og 4 mm herdet glass.

Resultater/funn

Forsøkene viser at det laminerte glasset tålte en belastning på 300 °C i 24 minutter før det faller ned. Når temperaturen når ca. 450 °C antenner PVB-folien.

Det herdete glasset tålte en belastning på 300 °C gjennom hele testperioden.

Forsikring og brann

Utbetalinger og antall branner

I henhold til statistikk fra Finans Norge [2] ble det i 2015 utbetalt i overkant av 110 millioner kroner i 225 saker hvor årsaken er antatt påsatt brann. Antatt påsatt brann dekker tilfeller hvor både handlingen er villet, og uaktsomme handlinger. Dette utgjør ca. 2 % av verdien av alle forsikringsutbetalinger etter brann i 2015 (Totalt ca. 5 milliarder kroner utbetalt), mens det kun utgjør 0,8 % av antallet branntilfeller (225 av totalt 27 065 meldte branner). Det må presiseres at villet påsatte branner ikke nødvendigvis er svik mot forsikringsselskapet (som omtalt under), men også kan skyldes kriminelle handlinger mot andre, for å skjule andre kriminelle handlinger osv.

Statistikken gir et noe uklart bilde av brannårsaker, da hele 40 % av brannene oppgis med annen eller ukjent årsak. Det vil være rimelig å tro at branner som er registrert i denne kolonnen kan være påsatte. Disse brannene er også forholdsmessig store i forhold til utbetalinger, da ca. 2/3 av forsikringsutbetalingene i 2015 gikk til branner som har «annen» eller «ukjent» brannårsak.

Svik

Svik er forsikringsselskapenes definisjon på at den forsikrede forsøker å oppnå, eller oppnår erstatningsutbetaling fra et forsikringsselskap som vedkommende ikke har rettmessig krav på. I Finans Norges svikrapport behandles kun saker som er avdekket som svik i henhold til Forsikringsavtaleloven.

Norske forsikringsselskaper avdekket i 2015 i overkant av 633 sviksaker innen privatforsikring, med en total kroneverdi på ca. 120 millioner norske kroner. De fleste sakene som er avdekket gjelder tilfeller der kunden melder inn fiktive skader, eller overdriver skader som har skjedd i et eksisterende skadetilfelle.

De største utbetalingene er knyttet til de arrangerte skadene. Ca. 7 % av de avdekkede sakene gjelder bygningsforsikring, hvor de beløpsmessig største sakene finnes, da dette ofte dreier seg om påsatte branner. [33].

Innen næringsliv og landbruk ble det i 2015 avdekket 33 sviksaker, med en total verdi på ca 50 millioner kroner. Også her gjelder de største skadene arrangerte skader. 5 av de avdekkete sakene gjaldt påstand om brann.

Rapporten angir ingen total oversikt over beløp som er knyttet til brannsakene. Om man regner rent prosentmessig er det årlige beløpet på ca. 15 millioner kroner, men som det fremgår av rapporten, har brannsaker forholdsmessig høyere utbetaling, og beløpet kan nok anses som betraktelig høyere.

Brannetterforskning

Dette kapitlet tar for seg de grunnleggende prinsippene ved den tekniske delen av en brannetterforskning, for å kartlegge i hvilken grad analysering av glass og vinduer benyttes. En brannetterforskning vil også inneholde en taktisk del (avhør, kartlegging av observasjoner mm), men den delen er ikke undersøkt her. Det er heller ikke vurdert tiltak rundt sporsikring, da det ikke er relevant for oppgaven.

Prinsipper for brannetterforskning

Prinsippene for brannetterforskning som er omtalt i dette kapitlet er basert på Håndbok i brannetterforskning [34], samt Nordisk manual for brannetterforskning [35]. Det vil være fokus på hvordan man sikrer spor og tolker et brannbilde, da spesielt påvirkning på vinduer. Innsamling av glass og tolking av brannbildet i etterkant av forsøkene vil gjøres iht. prosedyrer beskrevet i den omtalte litteraturen.

Sikring av branntomten

Åstedsundersøkelser skal ikke forekomme før branntomten er sikret. Det er viktig å sikre branntomten for å hindre helseskader. Viktige momenter vil være å etablere ventilasjon, rive bygningsdeler som kan falle ned, avstive bygget dersom kritiske konstruksjoner har mistet bæreevne i brannen og sikre mot nedfall av bygningsdeler.

Åstedsundersøkelse – orienterings og planleggingsfasen

I en normal brannetterforskning vil man her også ha fokus på hvor arnestedet til brannen har vært, og hvordan brannen har spredd seg i brannrommet / bygningen.

I denne fasen av etterforskningen er det viktig å danne seg et totalbilde av åstedet, og få en oversikt over brannskadebildet. Brannrommet må dokumenteres med bilder, både utvendig og innvendig.

I denne fasen vil man prøve å finne ut om glasset er knust før brannen, eller om glasset er knust som følge av termisk påvirkning fra brannen. Vesentlige mengder glass på utsiden, langt fra vinduet kan tyde på at vinduet er knust som følge av mekanisk påvirkning.

Detaljert åstedsundersøkelse

Den kanskje viktigste delen av en brannetterforskning er å kartlegge brannårsaken. Dette kan ikke fastslås om man ikke kan bestemme arnestedet til brannen. For å kunne bestemme arnestedet til brannen må man dokumentere brannutviklingen og brannspredningen i brannrommet. For å gjøre dette må man studere brannskadebildet detaljert, og vurdere de tekniske sporene. I denne oppgaven vil det være fokus på tolking av tekniske spor på glass og vinduer i brannrommet.

Dagens bruk av glass i brannetterforskning

Kripos har Norges fremste fagmiljø innen brannetterforskning. De bistår de ulike politidistriktene i Norge både med etterforskning, og med analyser ved eget laboratorium.

Årlig gjennomføres det ca. 700 tester for å avdekke bruk av brannfarlig væske ved Kripos sitt laboratorium. Det gjøres også tester for å avdekke brytningsindeksen i glass.

Erfaringene til Kripos med bruk av glass for å se på brannutvikling er svært få. De har ikke erfaring med at glass brukes i særlig grad som spor i brannetterforskning i Norge. Hovedsakelig undersøkes glasset for å se om det er knust som følge av mekanisk påvirkning, eller av termisk påvirkning, for å kunne vurdere om en brann er påsatt.

Måling av brytningsindeks

Måling av brytningsindeks er en kjent teknikk som benyttes av kriminaltekniske laboratorier verden over. Glass har en brytningsindeks på ca. 1,5 (relativt til vakum), men siden glass er en ikke-homogen masse, vil det være mulig å måle forskjell i brytningsindeks fra et glass til et annet.

Med bakgrunn i dette kan målinger benyttes for å se om glass som er funnet på klær hos en mistenkt, er det samme som finnes på et åsted.

For å måle brytningsindeksen i glassfragmenter benytter KRIPOS en metode hvor fragmentene legges i en silikonbasert olje. Brytningsindeksen måles ved å benytte GRIM (Glass Refractive Index Measurement). GRIM er et måleapparat som er utviklet av Foster&Freeman i England. Måling av brytningsindeks med denne metodikken er internasjonalt anerkjent [36].

Oljen endrer brytningsindeks når den varmes opp. Forholdet temperatur / brytningsindeks i oljen er kjent. Ved å varme opp oljen til den når samme brytningsindeks som glasset, finner man brytningsindeksen til det aktuelle glasset.

Det gjøres undersøkelser på flere fragmenter av det samme glasset, og brytningsindeksen angis som et gjennomsnitt av alle fragmentene som blir målt.

Gjennomføring av forsøk

Forsøkene ble gjennomført på ResQ sikkerhetssenter i Haugesund i perioden 25.01 – 3.02.2017.

For å sikre en trygg og etterprøvbar gjennomføring av forsøkene, ble det utarbeidet en forsøksmanual i forkant, som beskriver alle forsøkene i detalj, samt inneholder sjekklister for gjennomføring av forsøkene og en Sikker jobb-analyse (SJA). Forsøksmanualen ligger vedlagt som vedlegg 3.

Formål

Formålet med forsøkene var å undersøke hvordan vinduer og glass påvirkes av ulike brannforløp, med forskjellig brannvekst.

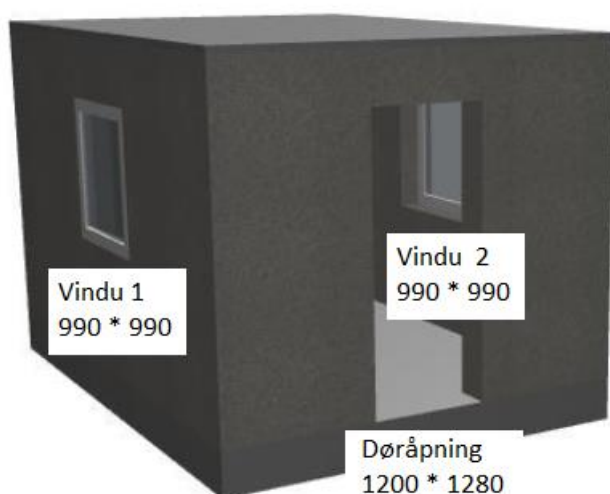
Det ble undersøkt tid og temperatur ved sprekkdannelser i glassene (indre og ytre glass i vinduene), utfall av glass etter brann, sotdannelse på vinduene (dokumentert etter forsøkene), samt at endring i brytningsindeks i vinduene ble undersøkt.

Testoppsett

Forsøksrommet som ble benyttet hadde følgende mål.

	Mål
Lengde	3,40 m
Bredde	2,40 m
Høyde	2,15 m
Høyde vindusåpninger	1 m
Bredde vindusåpninger	1 m
Høyde døråpning (ventilasjonsåpning)	1,28 m
Bredde døråpning (ventilasjonsåpning)	1,20 m
Brenselskar (reduisert etter ulik brannvekst)	1 m * 1 m

Tabell 6: Størrelse på forsøksrom



Figur 8: Testrommet og vindusåpninger

Det ble gjennomført fem forsøk i perioden. Forsøkene er ytterligere beskrevet i forsøksmanualen.

I de ulike forsøkene ble størrelsen på brenselskaret redusert for å oppnå ulik brannvekst.

Testforsøk – Rask brannvekst uten glass / vindu i åpningene. Test av måleutstyr og apparater. Dette forsøket ble også gjennomført for å tørke brannrommet, da dette står utendørs og blir utsatt for vær og vind.

Forsøk 1 – Rask brannvekst med sikkerhetsglass.

Forsøk 2 – Rask brannvekst med to vindu

Forsøk 3 – Ultra-rask brannvekst med to vindu

Forsøk 4 – Middels brannvekst med ett knust vindu og ett helt vindu

Glass og vinduer benyttet i forsøkene

I forsøk 1 ble det benyttet 44,2 laminert glass (4mm glass + 0,76 mm pvb + 4mm glass) og 4 mm herdet glass, levert av Saint Gobain Böckmann AS i Sauda. Glassene ble holdt fast i vindusåpningene ved hjelp av aluminiumprofiler.

I forsøk 2 – 4 ble det benyttet 2-lags vinduer, levert av NorDan AS. Vinduene var fastkarmvinduer, av type NTech, med 24 mm energiglass og 92 mm karm. Størrelsen på vinduene var 990 mm * 990 mm. Vinduene har en U-verdi på 1,2 W/m²K.

Montering av vinduene ble utført etter bransjestandard, og det ble tettet rundt vinduene med mineralull.

Vinduene / sikkerhetsglassene ble plassert i to åpninger på 1 m * 1 m i hver langvegg på testrommet. Vindusåpningene var likt plassert i de to veggene.



Bilde 1: Eksempel på ferdig montert vindu (Forsøk 2)

Teori

Formålet med forsøkene var å undersøke hvordan vinduer påvirkes av branner med ulik brannvekst.

Brannveksten i et rom vil variere med brannenergien som finnes i rommet, og hvor lett antenkelig innholdet i rommet er.

Iht. Tabell 3: Forslag til brannvekst for ulike bygningstyper, vil de fleste branner i vanlig bebyggelse, dvs. bolig, kontor, sykehus, næring og forsamlingslokaler være enten middels, rask eller ultra-rask. Med bakgrunn i dette ble det gjennomført to forsøk med rask brannvekst, ett forsøk med middels brannvekst og ett forsøk med ultra-rask brannvekst.

Vurderingen av brannvekst for hvert av forsøkene tar utgangspunkt i tabell 3.6 i Enclosure fire dynamics [3], samt formler for brannvekst og temperatur før overtenning som beskrevet i kapittelet om brannteori.

For de ulike brannvekstene, er energiproduksjonen beregnet ved bruk av t^2 -brann med følgende formel:

$$\dot{Q} = \alpha * t^2$$

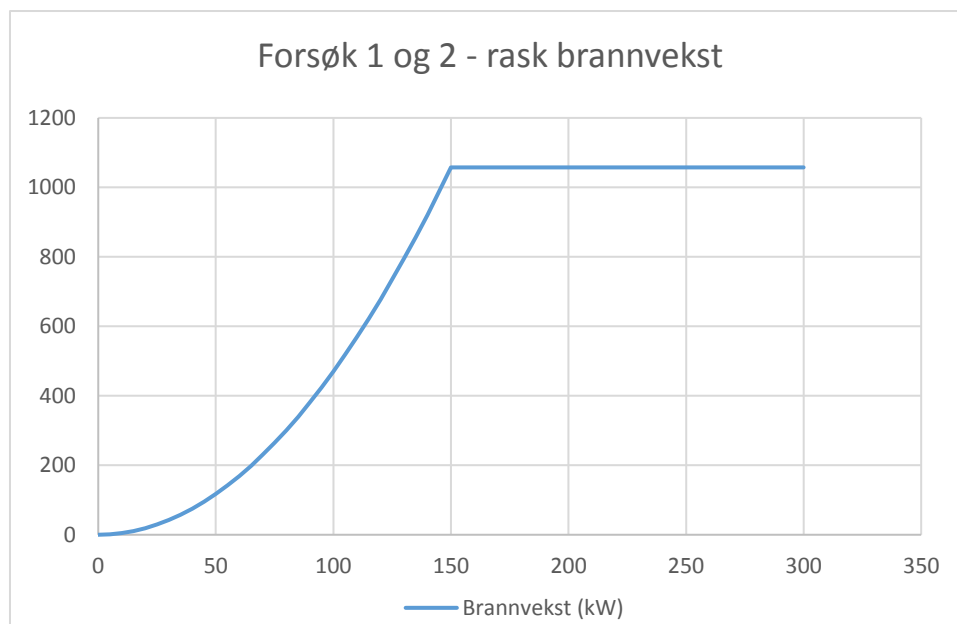
Forventet temperatur i brannen er beregnet ved hjelp av McCaffrey, Quintere og Harkleroad sin formel for temperatur i røyklaget før overtenning:

$$\Delta T = 6.85 \left(\frac{\dot{Q}^2}{A_0 \sqrt{H_0} h_k A_T} \right)^{1/3}$$

Forsøk 1 og 2 – rask brannvekst

Bolig, hotell, sykehus og forsamlingslokaler er en type bygg som typisk har rask brannvekst [7].

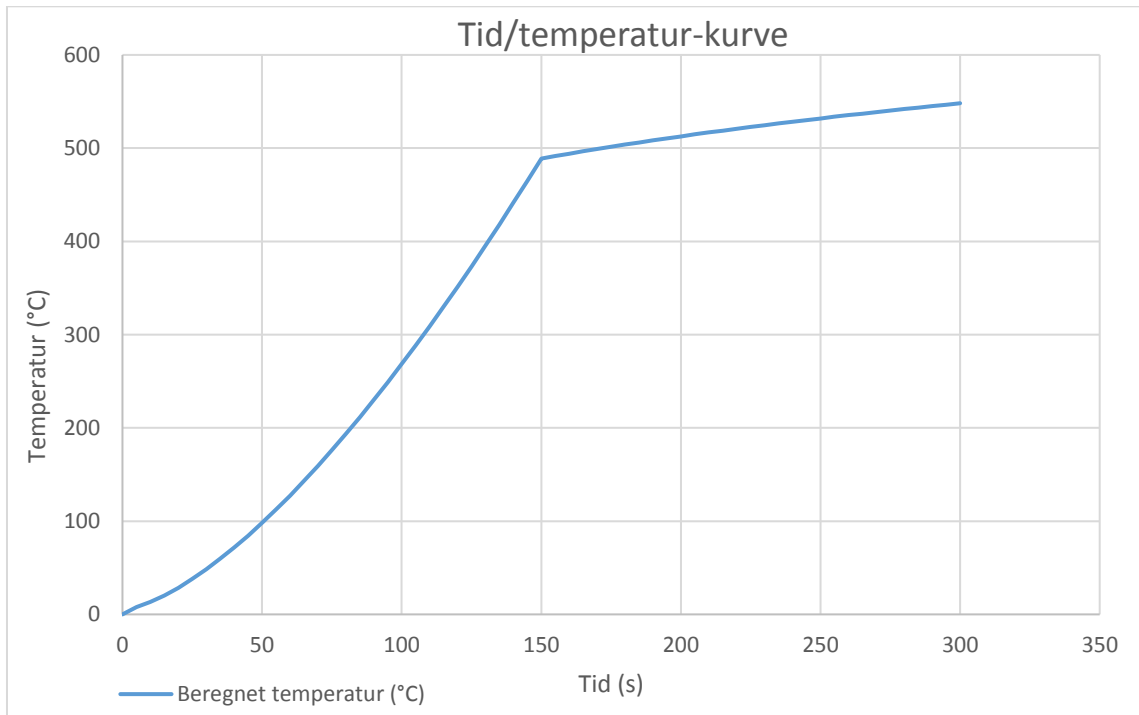
For denne typen brannvekst er α definert til 0,047 kW/s² [5].



Figur 9: Forsøk 1 og 2 - rask brannvekst

For denne brannveksten er det valgt at brannen stabiliserer seg ved ca. 1055 kW, etter 150 sekunder.

Følgende temperaturutvikling forventes å være i brannrommet ved denne brannutviklingen. Det er gjort beregning med hensyn til omsluttende konstruksjoner i brannrommet, samt ventilasjonsåpninger i rommet.



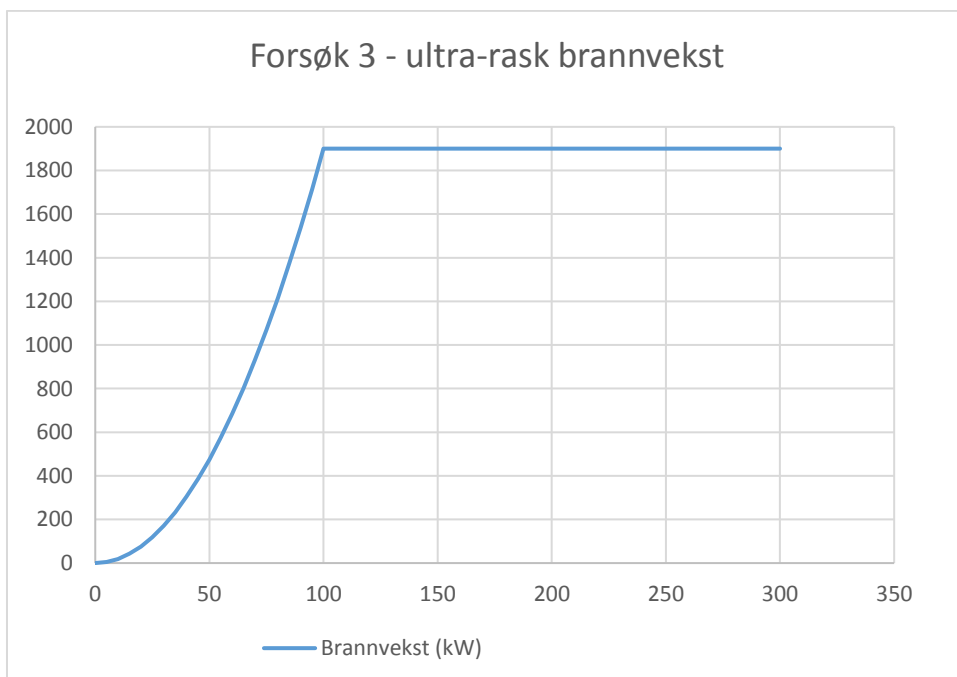
Figur 10: Forsøk 1 og 2 - Beregnet temperatur i brannrommet

For fullstendige beregninger, se vedlegg 4.

Forsøk 3 – ultra-rask brannvekst

Kjøpesentre er definert som type bygg hvor det kan forekomme ultra-rask brannvekst [7].

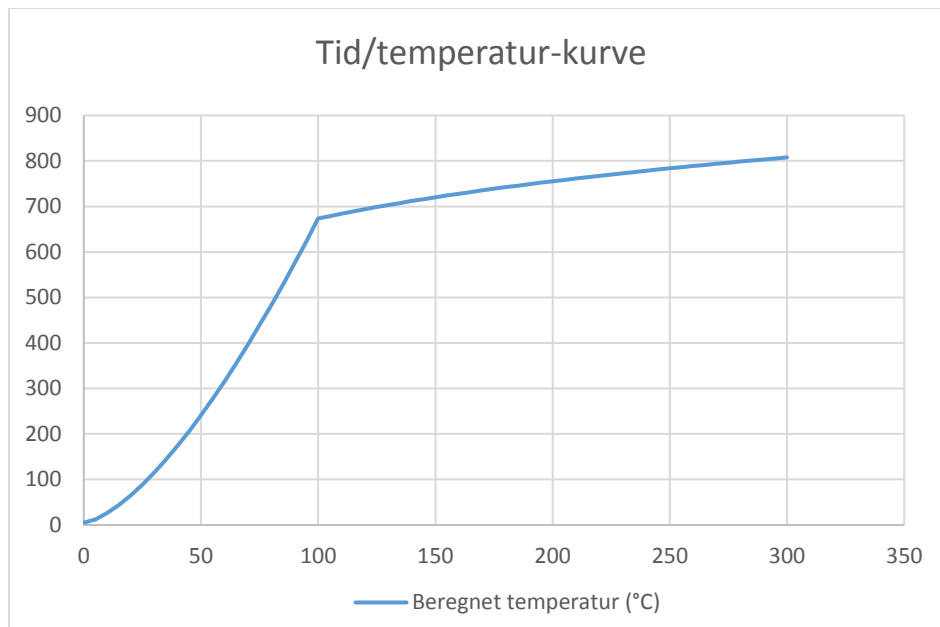
For denne type brannvekst er α definert til 0,19 kW/s² [5].



Figur 11: Forsøk 3 - ultra-rask brannvekst

For denne brannveksten er det definert at brannen går over til fullt utviklet brann ved ca. 1900 kW, etter ca. 100 sekund.

Følgende temperaturutvikling forventes å være i brannrommet ved denne brannutviklingen. Det er gjort beregning med hensyn til omsluttende konstruksjoner i brannrommet, samt ventilasjonsåpninger i rommet.



Figur 12: Forsøk 3 - Beregnet temperatur i brannrommet.

Den beregnede temperaturstigningen her er over 600 °C, som er angitt som en av begrensningene til modellen. Modellen tar utgangspunkt i at brannen er brenselskontrollert. Dersom den blir ventilasjonskontrollert, vil noe av forbrenningen foregå utendørs, og energien som frigis i brannrommet reduseres. Dette gjør at modellen vil gi et høyere anslag på forventet temperatur i brannrommet.

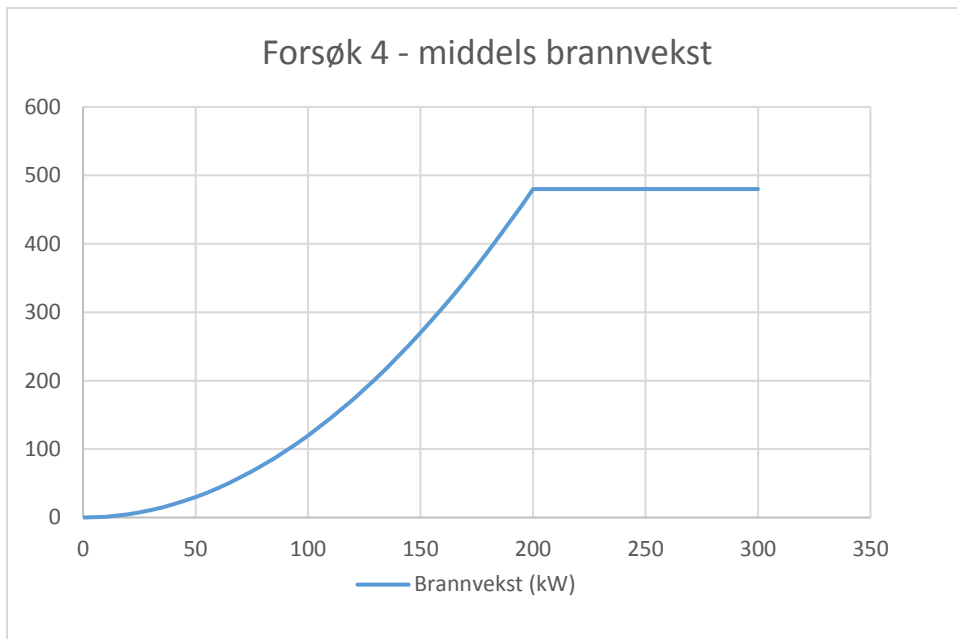
For fullstendige beregninger, se vedlegg 5.

Forsøk 4 – middels brannvekst

Kontor og skole er definert som typiske bygg hvor det kan forekomme middels brannvekst [7].

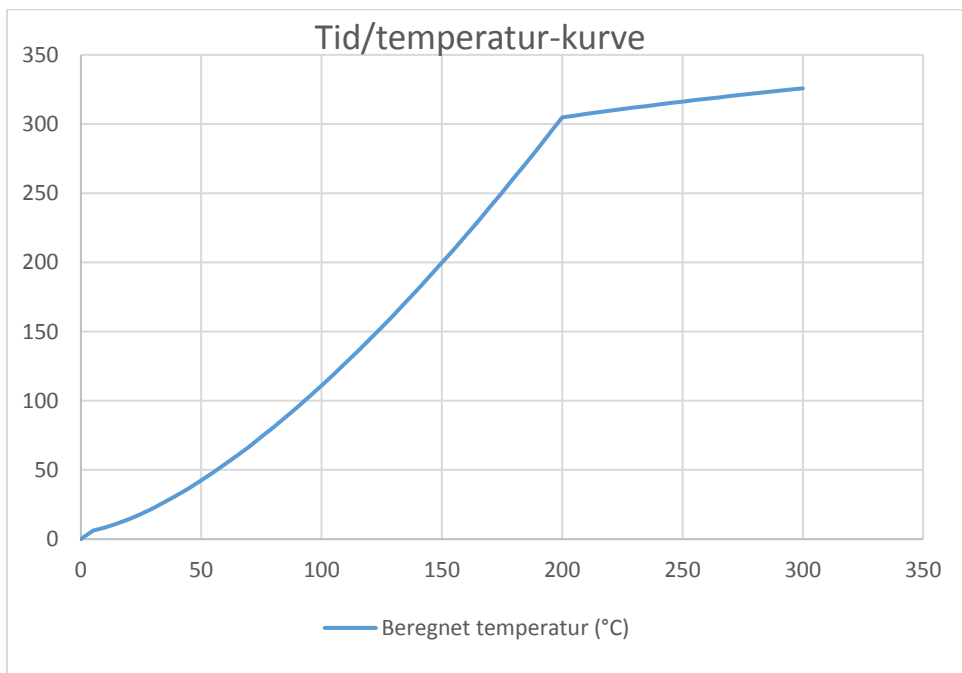
For denne type brannvekst er α definert til 0,012 kW/s² [5].

Dette forsøket ble gjennomført med et helt vindu, og et vindu som ble knust mekanisk før forsøket. Dette for å se om disse vinduene påvirkes ulikt av brannen.



Figur 13: Forsøk 4 - middels brannvekst

For denne brannveksten er det valgt at brannen stabiliserer seg ved ca. 500 kW, etter ca. 200 sekund.



Figur 14: Forsøk 4 - Beregnet temperatur i brannrommet

Følgende temperaturutvikling forventes å være i brannrommet ved denne brannutviklingen. Det er gjort beregning med hensyn til omsluttende konstruksjoner i brannrommet, samt ventilasjonsåpninger i rommet.

For fullstendige beregninger, se vedlegg 6.

Forsøk – observasjoner

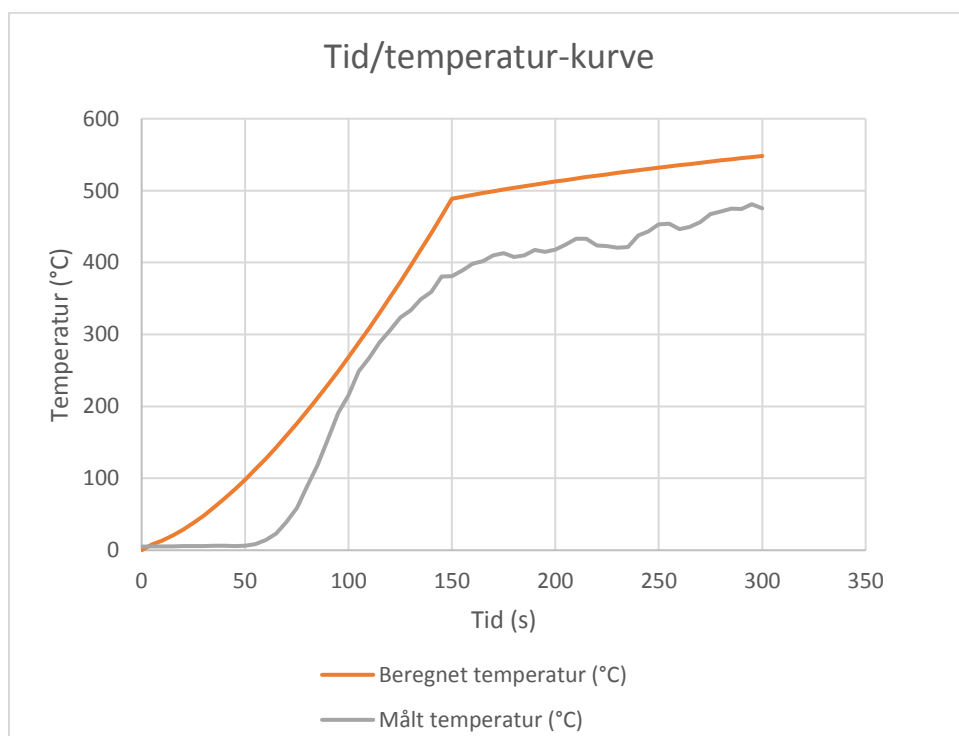
Dette kapitlet oppsummerer de ulike observasjonene som ble gjort i løpet av forsøkene. Det ble benyttet diktafon for å lese inn når de ulike hendelsene inntraff. I tillegg ble forsøkene filmet, og filmene er gjennomgått i etterkant for å verifisere hendelser og tidspunkt i etterkant.

For forsøk 2 – 4 er det også gjort en sammenligning mellom målte temperaturer i røyklaget med temperaturene som var beregnet for forsøkene. Dette for å verifisere at brannutviklingen i forsøkene er i tråd med den definerte brannutviklingen.

Forsøk 1 – rask brannvekst

Forsøk 1 ble gjennomført med rask brannvekst. Det ble målt temperatur på 15 steder i brannrommet. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet. Målepunktene var jevnt fordelt i øverste del av rommet. For fullstendig målinger av temperatur i brannrommet, se vedlegg 7.

Det er gjort en sammenligning av den teoretiske beregnede temperaturen i rommet, og den faktisk målte temperaturen. Det er valgt målepunkt 1 ved sammenstillingen av temperaturene. Dette er det øverste målepunktet ved vindu 1.



Figur 15: Forsøk 1 - Beregnet vs. målt temperatur

Den faktiske brannveksten er gjennom hele brannforløpet lavere enn den teoretisk beregnede. Etter ca. 5 minutter stabiliserer brannen seg rundt ca. 500 °C. Etter 10 minutter er temperaturen ca. 600 °C, og holder seg stabil på denne temperaturen til brannen gradvis blir mindre.

Observasjoner

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 04.30	Ca. 450° C i røyklaget	PVB-folie smelter
Ca. 07.00	Ca. 550° C i røyklaget	Første sprekkdannelse, indre glass vindu 1
Ca. 13.30	Ca. 600° C i røyklaget	Innerste glass sprekker og knuses.

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 15.30	Ca. 620° C i røyklaget.	Ytterste glass sprekker og knuses.

Tabell 7: Forsøk 1- Observasjoner

Bilder fra forsøket



PVB-folie smelter i vindu 1 etter ca. 04.30. Temperaturen i røyklaget er ca 450° C.

Bilde 2: Forsøk 1 - Vindu 1 - PBV-folie smelter



Første sprekkdannelse, indre glass, vindu 1, etter ca. 07.00. Temperaturen i røyklaget er ca 550° C.

Bilde 3: Forsøk 1 - Vindu 1 - Første sprekkdannelse, indre glass



Indre glass, vindu 1, knuses etter ca. 13.30. Temperaturen i røyklaget er ca 600° C.

Bilde 4: Forsøk 1 - Vindu 1 – Indre glass knuses



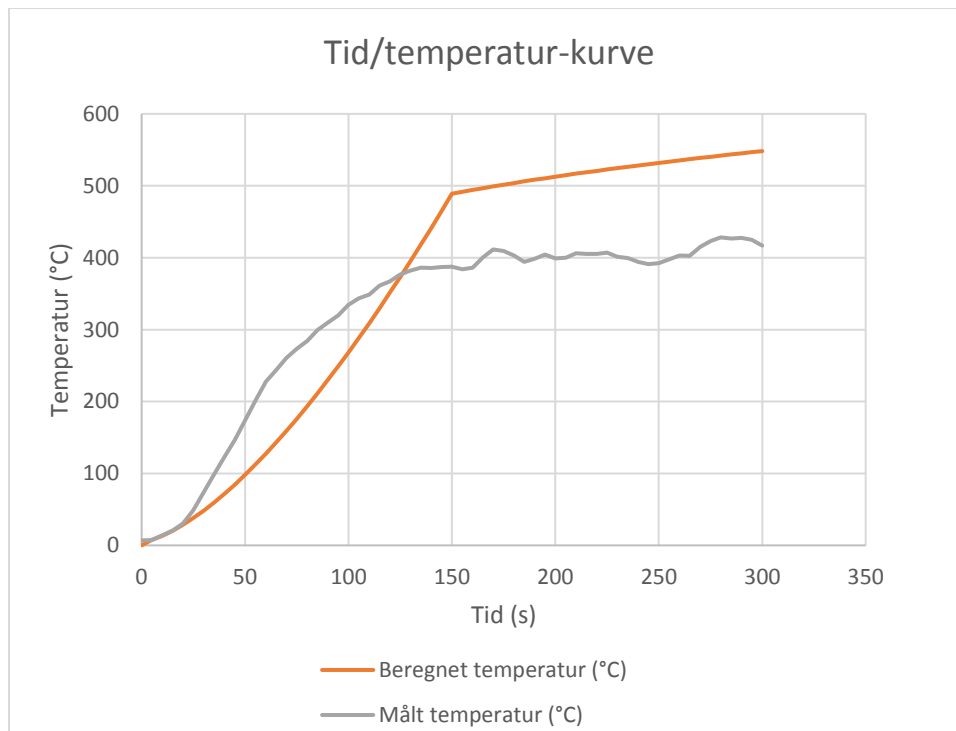
Ytre glass, vindu 1, sprekker og knuses etter ca. 15.30. Temperaturen i røyklaget er ca 620° C.

Bilde 5: Forsøk 1 - Vindu 1 - ytre glass knuses

Forsøk 2 – rask brannvekst

Forsøk 2 ble gjennomført med rask brannvekst. Det ble målt temperatur på 15 steder i brannrommet. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet. Målepunktene var jevnt fordelt i øverste del av rommet. For fullstendige målinger av temperatur i brannrommet, se vedlegg 7.

Det er gjort en sammenligning av den teoretiske beregnede temperaturen i rommet, og den faktisk målte temperaturen. Det er valgt målepunkt 1 ved sammenstillingen av temperaturene. Dette er det øverste målepunktet ved vindu 1.



Figur 16: Forsøk 2 - Beregnet vs. målt temperatur

Den faktiske brannveksten er i starten litt høyere enn den teoretisk beregnede. Etter ca. 2 minutter stabiliseres brannen, og den teoretiske brannen blir da kraftigere i intensitet. Temperaturen holder seg stabil rundt ca. 400° – 450° C i hele det videre brannforløpet.

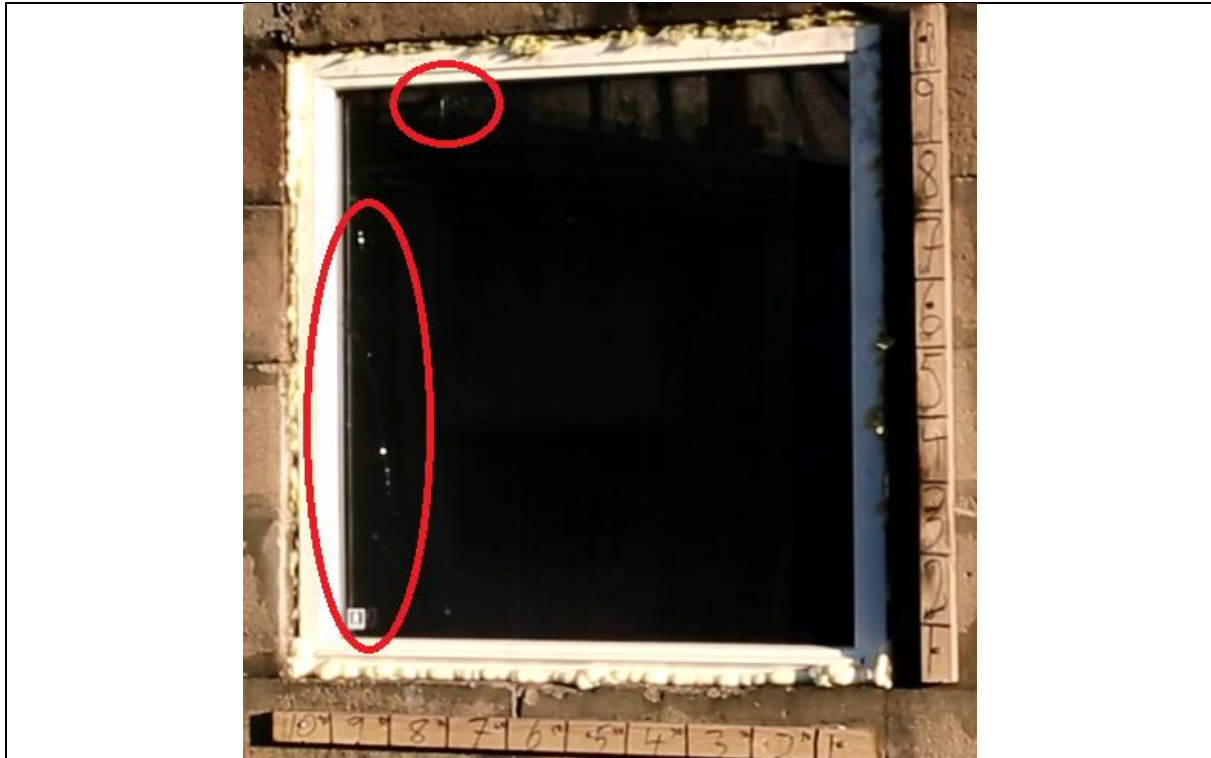
Observasjoner

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 01.30	Ca. 300° C i røyklaget Ca. 100° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse i innerste glass, vindu 1
Ca. 02.00	Ca. 350° C i røyklaget Ca. 150° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse i innerste glass, vindu 2. Jevn sprekkdannelse i innerste glass, begge vindu.
Ca. 04.35	Ca. 400° C i røyklaget Ca. 250° C ved underkant vindu	Innerste glass, vindu, 2 knuses.
Ca. 05.00	Ca. 420° C i røyklaget Ca. 250° C ved underkant vindu	Sprekkdannelse i ytterste glass, vindu 2.
Ca. 05.50	Ca. 430° C i røyklaget Ca. 260° C ved underkant vindu	Ytterste glass vindu 2 knuses.
Ca. 06.30	Ca. 450° C i røyklaget Ca. 220° C ved underkant vindu	Innerste glass vindu 1 knuses.

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 06.30	Ca. 450° C i røyklaget Ca. 220° C ved underkant vindu	Sprekkdannelse i ytterste glass, vindu 1.
Etter forsøket	Ikke målt	Ytterste glass vindu 1 knuste etter at brannen hadde roet seg, og forsøket var avsluttet.

Tabell 8: Forsøk 2 - Observasjoner

Bilder fra forsøket



Første sprekkdannelse i indre glass, vindu 1 etter ca. 01.30. Temperaturen i røyklaget er 300° C. Det oppstår en sprekk fra nedre kant og oppover i glasset (nederste ring), samt en liten sprekk i øvre kant av vinduet (øverste ring).

Bilde 6: Forsøk 2 - Vindu 1 – første sprekkdannelse indre glass



Første sprekkdannelse i indre glass, vindu 2 etter ca. 02.00. Temperaturen i røyklaget er 350° C. Sprekken oppstår i øvre kant av vinduet, og ned i glasset

Bilde 7: Forsøk 2 - Vindu 2 – første sprekkdannelse indre glass



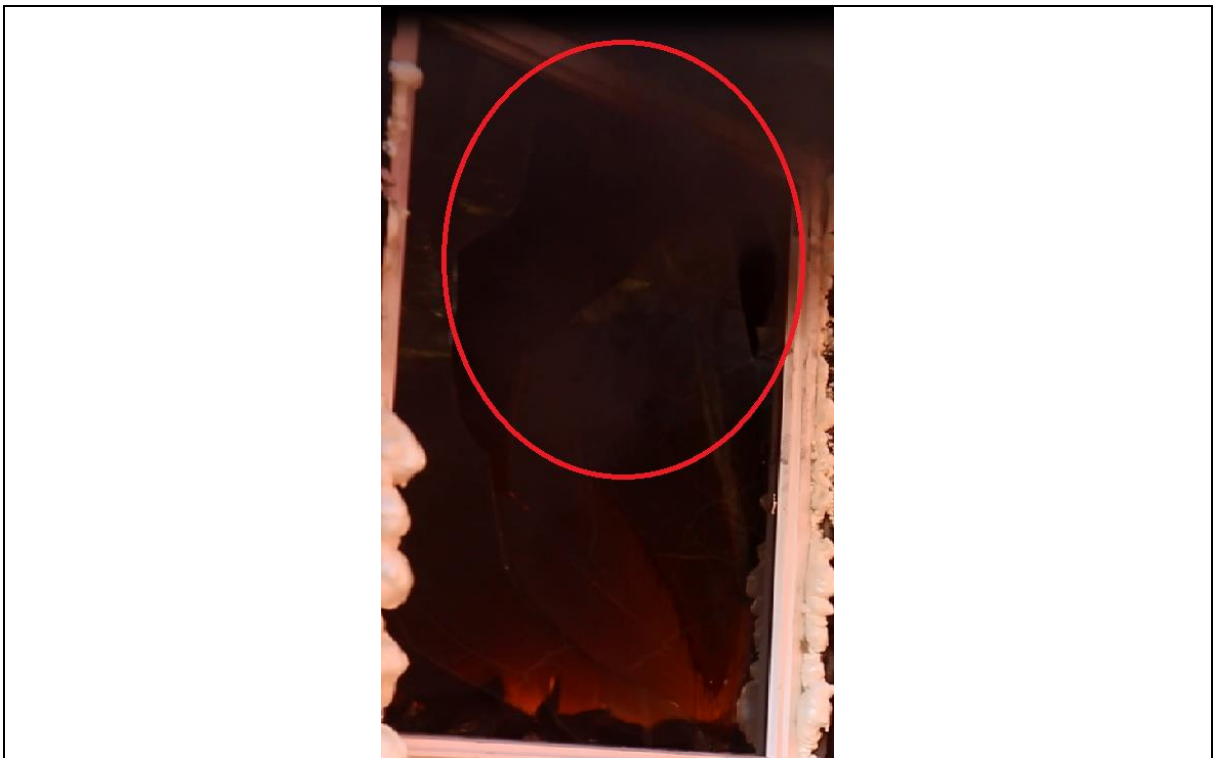
Indre glass i vindu 2 knuses etter ca. 04.35. Temperaturen i røyklaget er 400° C. Glassbiter kan observeres i vinduskarmen.

Bilde 8: Forsøk 2 - Vindu 2 - indre glass knuses



Første sprekkdannelse i ytre glass, vindu 2 etter ca. 05.00. Temperaturen i røyklaget er 420° C. Sprekkdannelsen skjer i øvre kant av glasset.

Bilde 9: Forsøk 2 – Vindu 2 – førset sprekkdannelse ytre glass



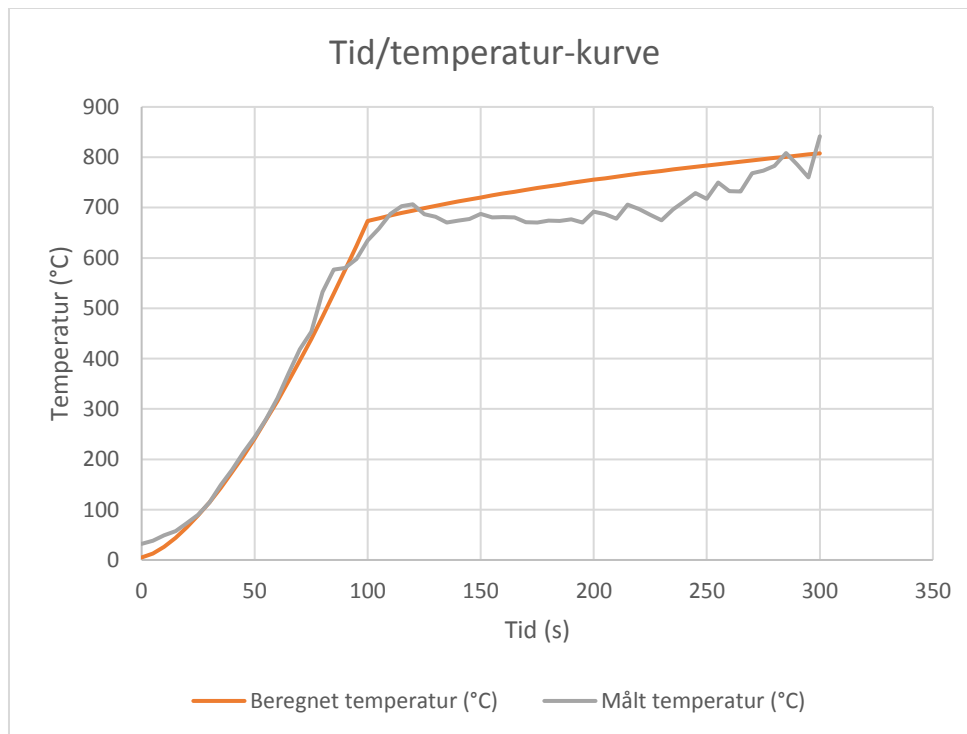
Ytre glass, vindu 2 knuses etter ca. 05.50. Temperaturen i røyklaget er 430° C. Vinduet har knust flere steder.

Bilde 10: Forsøk 2 – Vindu 2 – ytre glass knuses

Forsøk 3 – ultra-rask brannvekst

Forsøk 3 ble gjennomført med ultra-rask brannvekst. Det ble målt temperatur på 15 steder i brannrommet. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet. Målepunktene var jevnt fordelt i øverste del av rommet. For fullstendig målinger av temperatur i brannrommet, se vedlegg 7.

Det er gjort en sammenligning av den teoretiske beregnede temperaturen i rommet, og den faktisk målte temperaturen. Det er valgt målepunkt 1 ved sammenstillingen av temperaturene. Dette er det øverste målepunktet ved vindu 1.



Figur 17: Forsøk 3 - Beregnet vs. målt temperatur

Den faktisk målte temperaturen følger den beregnede temperaturen gjennom hele det målte brannforløpet.

Etter ca. 150 sekunder er temperaturen i brannrommet ca. 700° C, alle brennbare overflater (hovedsakelig vinduskarmer) i brannrommet er i fyr og det er synlige flammer utvendig, ut døråpning og knuste vindu. På dette stadiet ble målingene stoppet, da begge vinduene var knust av brannen.

Observasjoner

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 00.35	Ca. 150° C i røyklaget Ca. 40° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse i innerste glass, vindu 1.
Ca. 00.40	Ca. 190° C i røyklaget Ca. 50° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse i innerste glass, vindu 2.
Ca. 01.10	Ca. 320° C i røyklaget Ca. 100° C ved underkant vindu	Jevn sprekkdannelse i innerste glass, begge vindu. Glass knuser i begge vindu.
Ca. 01.40	Ca. 550° C i røyklaget Ca. 225° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse i ytre glass, begge vindu.
Ca. 02.00	Ca. 600° C i røyklaget Ca. 300° C ved underkant vindu	Første utfall av glass i ytre glass, vindu 1.

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 02.30	Ca. 700° C i røyklaget	Overtenning. Jevnt utfall av glass i begge vinduer, ytre glass.
Ca. 03.00	Ca. 740° C i røyklaget Ca. 400° C ved underkant vindu	Mesteparten av ytre glass i begge vinduene har falt ut.
Etter forsøket	Ikke målt	Karmene er nesten helt utbrent. Nesten ikke glass igjen.

Tabell 9: Forsøk 3 – Observasjoner

Bilder fra forsøket



Indre glass, vindu 1 sprekker etter ca. 00.35. Temperaturen i røyklaget er 150° C. Sprekkdannelsen skjer i siden av glasset.

Bilde 11: Forsøk 3 - Vindu 1 – indre glass knuses



Indre glass, vindu 2 sprekker etter ca. 00.40. Temperaturen i røyklaget er 190° C. Stor sprekkdannelse som starter i nedre kant av glasset.

Bilde 12: Forsøk 3 - vindu 2 - indre glass knuses



Indre glass, vindu 1 knuses etter ca. 01.10. Temperaturen i røyklaget er 320° C. Glass faller ut flere steder i glasset.

Bilde 13: Forsøk 3 – vindu 1 – indre glass knuses



Ytre glass, vindu 1 sprekker etter ca. 01.40. Temperaturen i røyklaget er 550° C.

Bilde 14: Forsøk 3 - vindu 1 – første sprekke dannelse ytre glass



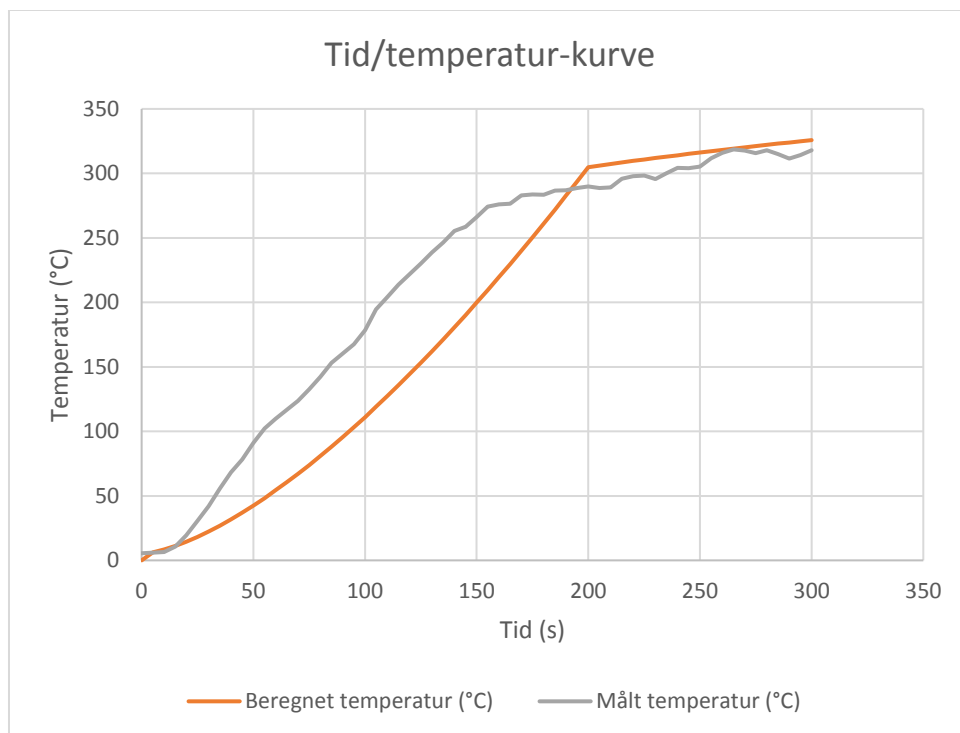
Overtenning i brannrommet. Ytre glass, vindu 1 er knust. Temperaturen i røyklaget er 700° C.

Bilde 15: Forsøk 3 - vindu 1 – Overtenning i brannrommet. Ytre glass knust.

Forsøk 4 – middels brannvekst

Forsøk 4 ble gjennomført med middels brannvekst. Det ble målt temperatur på 15 steder i brannrommet. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet. Målepunktene var jevnt fordelt i øverste del av rommet. For fullstendig målinger av temperatur i brannrommet, se vedlegg 7.

Det er gjort en sammenligning av den teoretiske beregnede temperaturen i rommet, og den faktisk målte temperaturen. Det er valgt målepunkt 1 ved sammenstillingen av temperaturene. Dette er det øverste målepunktet ved vindu 1.



Figur 18: Forsøk 4 - Beregnet vs. målt temperatur

Den observerte temperaturen ligger noe høyere enn den beregnede temperaturen i begynnelsen av brannforløpet. Etter ca. 3 minutter er den beregnede temperaturen høyere, og den ligger litt høyere gjennom hele det resterende brannforløpet.

Dette forsøket ble gjennomført med mekanisk knusing av vindu 1 før antennelse.

Observasjoner

Tid	Temperatur	Observasjon
Ca. 02.30	Ca. 240° C i røyklaget Ca. 100° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelser i indre glass, vindu 2
Ca. 03.30	Ca. 300° C i røyklaget Ca. 130° C ved underkant vindu	Første sprekkdannelse, ytre glass, vindu 2.
Ca. 08.30	Ca. 450° C i røyklaget Ca. 190° C ved underkant vindu	Glass detter fra vindu 1

Tabell 10: Forsøk 4 – Observasjoner

Bilder fra forsøket



Vindu 1 før antennelse. Glassene er knust med hammer.

Bilde 16: Forsøk 4 - vindu 1 - Før forsøk



Vindu 1 underveis i forsøket. Deler av glasset har knust, men man kan fortsatt kjenne igjen bruddmønsteret til det mekaniske bruddet.

Bilde 17: Forsøk 4 - vindu 1 – deler av glasset har knust

Forsøk – funn

For å kunne vurdere hvordan glasset påvirkes av ulik brannvekst og varmepåvirkning, er det i dette kapittelet gjort en sammenstilling av funnene som ble gjort.

Kapittelet ser hovedsakelig på forsøk 2 – 4, da disse er utført på samme type vindu, og det er her det er mulig å gjøre sammenligninger av funnene.

Oppsummering funn

I den følgende tabellen er det angitt når, og ved hvilken temperatur de ulike hendelsene inntraff ved de ulike brannutviklingene. Det er ikke tatt hensyn til hvilket av vinduene hendelsen inntraff i. Det er også sett på andre funn som kan si noe om brannutviklingen.

Observasjon	Forsøk 2	Forsøk 3	Forsøk 4
Første sprekkdannelse, indre glass	1 min 30 sekund. 300 °C i røyklaget	35 sekund. 150 °C i røyklaget	2 min 30 sekund 240 °C i røyklaget
Indre glass knuses	4 min.35 sekund 400 °C i røyklaget	1 min.10 sekund 320 °C i røyklaget	Indre glass knuste ikke. Høyeste temperatur ca. 450 °C
Første sprekkdannelse, ytre glass	5 min 420 °C i røyklaget	1 min 40 sekund 550 °C i røyklaget	3 min 30 sekund 300 °C i røyklaget
Ytre glass knuses	5 min 50 sekund. 430 °C i røyklaget	2 min 600 °C i røyklaget	Ytre glass knuste ikke.
Mengde glass som knuses	1 min.10 sekund 320 °C i røyklaget	Nesten alt glass falt ut.	Ingen utfall av glass.
Sotdannelse	Moderat sotdannelse på glassene.	Merkbart mindre sot på glassene.	Kraftig sotdannelse på glassene.
Endring i brytningsindeks	Signifikant endring i brytningsindeks.	Signifikant endring i brytningsindeks.	Signifikant endring i brytningsindeks.
Andre observasjoner	Vinduskarm brent	Vinduskarm deformert	Vinduskarm hel

Tabell 11: Oppsummering funn, forsøk 2-4

Forsøkene viser at den første sprekkdannelsen i vinduene vil inntreffe ved ca. 150 °C ved svært hurtig brannutvikling. Ved langsommere brannutvikling vil temperaturen være høyere før sprekkdannelsen inntreffer.

Ved middels brannutvikling, og langsommere temperaturstigning i rommet, knustes ikke innerste glass, selv om temperaturen i brannrommet var lik, eller høyere (ca. 400 °C) enn for de to forsøkene med raskere brannutvikling på tidspunktet da glassene knuste. Hele vindu i brannrommet kan være tegn på langsom brannutvikling.

Ser man disse to funnene i sammenheng vil hele glass i brannrommet kunne være en indikasjon på at det har vært middels eller langsom brannutvikling.

Mengden glass som knuses må sees i sammenheng med sprekkdannelsen i glasset. Der glasset blir hurtig varmet opp, vil det være stor sprekkdannelse, som igjen vil resultere i at mye glass faller ut. Dersom det er lite glass igjen i vinduene, vil dette være tegn på rask brannutvikling.

Her må det tas hensyn til at dersom en brann når overtenning, og går over i en fullt utviklet brann, vil dette bidra til å skape identiske brannrom. Temperaturen vil da være så høy, at det vil være vanskelig å kunne si noe om brann- og temperaturutviklingen tidligere i brannforløpet.

I tilfeller der glasset i større eller mindre grad er knust og falt ut av vinduet, kan mengden sot på glasset si noe om brannutviklingen. Dersom det er lite sot på vinduene, vil dette være en indikasjon på en hurtigere brannutvikling, med tilhørende knuste glass og bedre tilgang på oksygen.

Det ble også observert at glassbitene som knuste og falt ut i forsøket med ultra-rask brannutvikling, var mindre enn glassbitene som falt ut i forsøket med rask brannutvikling. Dette skyldes mer sprekkdannelse ved hurtigere temperaturøkning, med den følge at glasset knuses i mindre biter.

Etter undersøkelser på laben hos KRIPOS ble det påvist at glassets brytningsindeks endrer seg som følge av varmpåvirkningen, og det vil være mulig å måle dette ved å måle glass fra karmen som er mindre eksponert enn glass som ikke har vært beskyttet av karmen. Målingene gav ingen klar indikasjon på at endringen i brytningsindeks er større dersom varmpåvirkningen har vært høyere.

Sprekkdannelse og brudd i glass

I litteraturen som er studert, ser man at vinduene sprekker, og til slutt knuser på grunn av spenninger i glasset som følge av temperaturforskjell mellom eksponert og ueksponert glass. Ved langsom oppvarming av glasset, vil alle varmen bre seg i glasset, og det tar lengre tid før man når en kritisk temperaturforskjell. Av dette kan det trekkes slutningen at glasset vil sprekke tidligere ved hurtig brannutvikling og raskere temperaturøkning, som medfører at temperaturforskjellen i glasset blir større.

Alle vinduene var lagret tørt utendørs i flere dager før forsøkene. Temperaturen i perioden rundt forsøkene var ca. 5 °C, og det antas med stor sannsynlighet at temperatur i glass og karm var ca. 5 °C ved gjennomføring av forsøkene.

Innerste glass

Ved ultra-rask brannutvikling (forsøk 3) begynner sprekkdannelsene i innerste glass mye tidligere, og ved lavere temperatur enn ved langsommere brannutvikling (forsøk 2 og 4). Første sprekkdannelse i forsøk 3 observeres i nedre kant av vindu 1 med en temperatur på ca. 40 °C (150 °C i øvre kant vindu) etter ca. 35 sekund. Temperaturen i glasset ved antennele kan antas å være lik lufttemperatur = ca. 5 °C. Dette gir en temperaturforskjell mellom luft og vindu på ca. 35 °C. Temperaturen i glasset vil være høyere enn lufttemperaturen i samme område, grunnet stråling fra røyklaget, og magasinering av varme i glasset. Første sprekkdannelse i forsøk 2 ble observert etter ca. 01.30. Temperatur nedre kant vindu ca. 100 °C, og ca. 300 °C i røyklaget ved øvre kant vindu.

I forsøk 4 med middels brannutvikling tok det lengre tid før de første sprekkdannelsene oppstår. Første sprekkdannelse her observeres etter ca. 02.30.

Etter tilstrekkelig varmepåvirkning vil glasset etter hvert ha sprukket så mye at det begynner å knuse. Dette skjer etter ca. 1.10 og ved 320 °C for det hurtigste brannforløpet.

I forsøket med rask brannutvikling begynte indre glass å knuses etter ca. 4.35, ved ca. 400 °C. Ved middels brannutvikling ble det ikke tilstrekkelig sprekkdannelse i glasset til at det knuste. Dette selv om temperaturene var like eller høyere enn i de to foregående forsøkene. Dette skyldes den langsomme temperaturstigningen, og at glasset har blitt gradvis varmet opp.

Ytterste glass

I forsøk 3 oppstod det raskt sprekkdannelse i ytre glass i begge vinduer (ca. 01.40) etter at innerste glass knuste. Temperaturene er på dette stadiet høyere enn i maksimumstemperaturen i forsøk 2. Ytre glass begynte å knuse etter ca. 2 minutter. På dette stadiet nærmet brannen seg overtenning, og den inntraff rundt 02.30. 30 sekunder senere var mesteparten av ytre glass knust i begge vinduene.

Tilsvarende tok det ca. 5 minutter for sprekkdannelse i ytterste glass i forsøk 2. Dette finner sted ved en temperatur som er ca. 100 °C lavere enn forsøk 3.

I forsøk 4 sprakk det ytterste glasset et sted. Det var ingen ytterligere sprekkdannelse, og glasset knuste ikke. Dette skyldes blant annet at det ytre glasset blir beskyttet av det indre glasset som i forsøk 4 ikke ble knust.

Endring i brytningsindeks

For å se på endring i glassenes brytningsindeks ble det samlet inn eksponert og ueksponert glass fra hvert av glassene i vinduene som ble benyttet i forsøkene. Det ueksponerte glasset ble hentet fra karmen i vinduene. På grunn av varmeledning i glasset vil dette glasset også utsettes for varmpåkjenning, men i mindre grad enn glasset som blir direkte utsatt for stråling og konveksjon.

De ulike glassene ble undersøkt på laben til KRIPOS i Oslo, 13. og 14. mars, 2017. Det ble gjort undersøkelser på ett eksponert og ett ueksponert fra hvert av de 5 indre glassene som hadde vært brukt i forsøkene. Verdiene som er oppgitt i tabellen under er gjennomsnittet av 12 prøvestykker som ble undersøkt fra hvert glass.

Forsøk / vindu	Brytningsindeks ueksponert	Brytningsindeks eksponert
Forsøk 2 – vindu 1	1,51997	1,51990
Forsøk 2 – vindu 2	1,51992	1,51994
Forsøk 3 – vindu 1	1,52011	1,52018
Forsøk 3 – vindu 2	1,52018	1,52021
Forsøk 4 – vindu 2	1,51986	1,51992

Tabell 12: Endring i brytningsindeks

For fire av forsøkene kan det påvises signifikant endring i brytningsindeksen for glasset som var eksponert for varme, og glasset som er hentet fra karmen, og anses som ueksponert. Se vedlegg 8 for t-test som bekrefter hypotesen at endringen i brytningsindeks er signifikant innenfor et utvalg på 99 %.

Resultatene kan tyde på at glassene i forsøk 3 har en større økning i brytningsindeks, både for det eksponerte og det ueksponerte glasset. Når det eksponerte glasset blir utsatt for varme via stråling og konveksjon, vil varmen bre seg i glasset. Dette medfører at det ikke-eksponerte glasset i karmen også blir varmet opp. Denne oppvarmingen vil være langsommere enn oppvarmingen av det eksponerte glasset.

Glass er en ikke-homogen masse, og brytningsindeksen for disse vinduene kan ha vært forskjellig før de ble utsatt for varmpåvirkning. Da man ikke kjenner brytningsindeksen til dette glasset før forsøkene, kan man ikke konkludere med en større endring i brytningsindeksen ved høyere temperatur i brannrommet.

Det kan påvises endring i brytningsindeksen til glass som blir utsatt for varme, men endringen i brytningsindeks i disse tilfellene kan ikke benyttes til å si noe om hvordan brannutviklingen og temperaturen i rommet har vært. Det bør gjennomføres ytterligere forsøk for å se om man kan benytte endringen i brytningsindeks til å si noe om temperaturen i brannrommet.

Sot

Produksjonen av sot i brannrommet vil variere med tilgangen på oksygen i brannrommet, hva som brenner og intensiteten til brannen. Forsøkene viser at mengden sot på glassene er størst i forsøket med middels brannutvikling. Det er også en betydelig mengde sot på glassene i forsøket med rask brannutvikling. I forsøket med ultra-rask brannutvikling kan man observere betraktelig mindre sot, både på glasset som står igjen i karmen, og på glasset som knuste og falt ut i løpet av brannen.

Dette gir en indikasjon på at lite sot på glasset tyder på en hurtigere brannutvikling. Glasset knuser tidligere, og tilgangen på oksygen blir større. Dette sørger for renere forbrenning, og lavere produksjon av sot.

I forsøk 4, hvor det var middels brannutvikling var sotproduksjonen enda kraftigere. I dette forsøket knuste ikke vinduet (vindu 2) i løpet av forsøket.



Forskjell i mengde sot på glass som stod igjen i karm i forsøk 2 (venstre) og forsøk 3 (høyre).

Bilde 18: Forskjell i mengde sot på vindu i forsøk 2 og 3

Mekanisk og termisk påvirket glass

I en brannetterforskning vil det være viktig å kunne påvise om et glass er knust mekanisk før antennelse, eller om glasset er knust som følge av termisk påkjenning.

I forsøk 4 ble vindu 1 knust mekanisk ved hjelp av en hammer før antennelse. Dette ble gjort for å vise forskjellen på glass som er knust som følge av mekanisk påvirkning, og glass som er knust som følge av termisk påvirkning.

Forsøk 4 ble gjennomført med middels brannutvikling, og en høyeste temperatur i brannrommet på ca. 450 °C.



Mekanisk knust vindu før (venstre) og etter (høyre) brannpåvirkning.

Bilde 19: Mekanisk knust vindu før og etter brannpåvirkning

Som man ser av bruddmønsteret i glasset før og etter antennelse er det begrenset endring i glasset før og etter antennelse. Bruddflatene er mer avrundet enn de skarpe flatene som den mekaniske påvirkningen medfører.

Dersom glasset knuses som følge av termisk påkjenning, vil sprekkdannelsen oppstå i karmen i glasset, og brudd / knusing av glass vil forekomme i kantene i glasset. Ved denne brannutviklingen og temperaturpåkjenningen blir det kun begrenset endring i glassets bruddmønster.

Ved kraftigere varmpåkjenning vil sprekkdannelsen, med etterfølgende brudd i glasset, øke, og det vil kunne være vanskeligere å konkludere med at glasset er knust mekanisk før antennelse.

Andre observasjoner

Glassbiter på gulvet

I forsøk 2 og 3 der glassene ble knust, var det mulig å vurdere størrelsen på glassbitene som falt ut av vinduene i løpet av brannen. Som beskrevet tidligere var det større sprekkdannelse i vinduene i forsøket med ultra-rask brannutvikling. Dette medfører at mengden glass som falt ut, er større. Det kan også se ut som den større sprekkdannelsen fører til at størrelsen på glassbitene som falt ut er litt mindre.

Ut i fra forsøkene som ble gjort i dette studiet, er det vanskelig å trekke konklusjonen at man kan bruke størrelsen på glasset som falt ut av vinduene for å si noe om brannutviklingen.



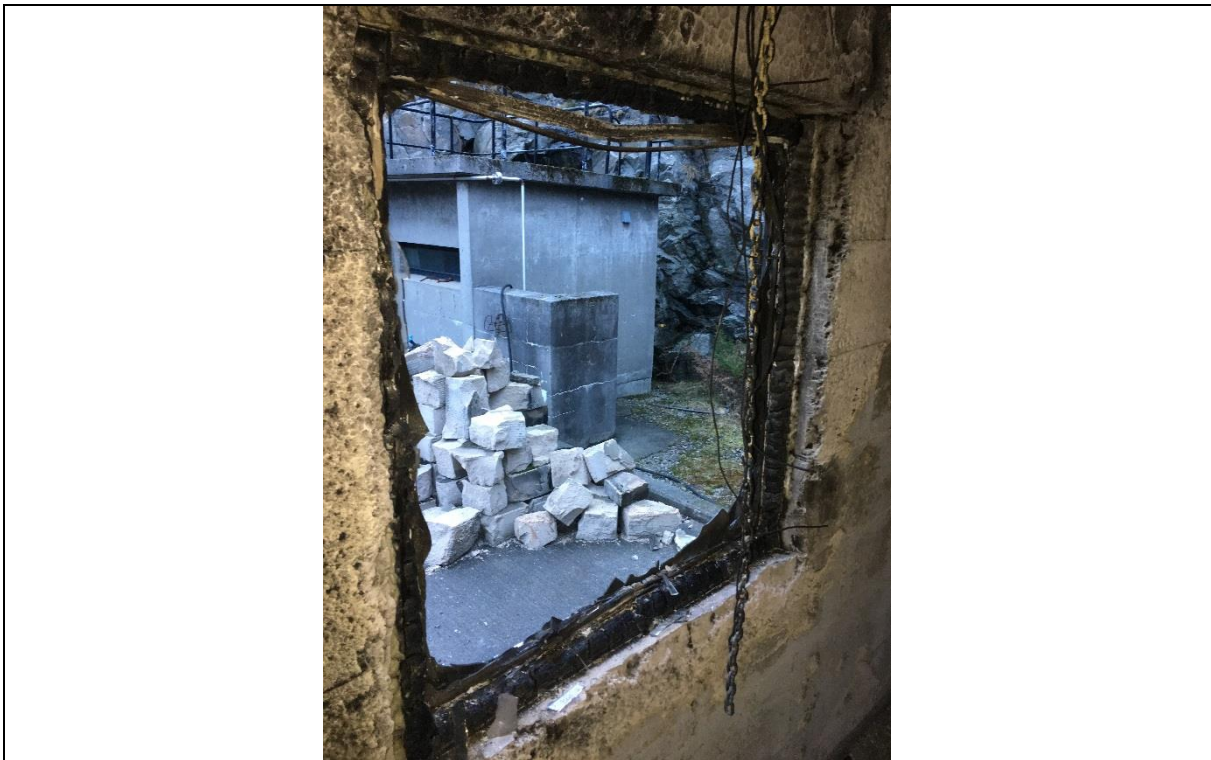
Forskjell i størrelse på glass som falt ut av vindu i forsøk 2 (venstre) og forsøk 3 (høyre).

Bilde 20: Forskjell i størrelse på glass som falt ut i forsøk 2 og 3

Karmer

Brannen i forsøk 3 nådde raskt overtenning, og karmene var i full fyr. Etter forsøket var karmen delvis deformert, og det var lite treverk igjen på karmene. Etter forsøk 2 var det tydelig å se at karmene var skadet av brann etter forsøket. I forsøk 4 var karmene dekket av sot, men det var lite skader å observere.

Dette er forventede observasjoner. En raskere brann, med høyere temperatur vil gi større skader på brennbart materiale. Brannen med hurtig brannutvikling var den eneste som utviklet seg til overtenning. Observasjonene på karmene, som var det eneste brennbare i forsøksrommene viser at lengre brannetid, og høyere temperatur, gjør at det vil være vanskeligere å finne spor som kan si noe om brannutviklingen i rommet. Dette samsvarer med observasjonene som er gjort på glasset.



Forsøk 3 – Vindu 1 - Kraftig brent og deformert karm.

Bilde 21: Forsøk 3 - Kraftig brent og deformert karm

Sikkerhetsglass

I forsøk 1 ble det benyttet sikkerhetsglass i vindusåpningene. Det herdede glasset beholdt integriteten gjennom hele brannforløpet, og motstod temperaturer på ca. 650 °C i brannrommet.

Det laminerte glasset sprakk etter ca. 7 minutter. Etter ca. 15 minutter mistet vinduet sin integritet da det ytterste laget også sprakk og falt ut.

Sikkerhetsglassene som ble brukt i forsøkene var montert uten karmen, og holdt på plass av 8 beslag på hver side av glasset. Dette medførte at oppvarmingen av glassene ble mer uniform, og dette kan ha hatt påvirkning på resultatene.

Det ble kun gjennomført ett forsøk med sikkerhetsglass, hvor det ble benyttet et laminert og et herdet glass. Det har dermed ikke vært mulig å sammenligne funn i dette forsøket med hensyn til brannutvikling og temperatur.

Smeltet PVB-folie

Ved ca. 450 °C begynte PVB-folien mellom de to glassene å smelte. Etter brannen kunne man observere smeltet PVB-folie i vinduskarmen. I forsøkene som er gjort av SINTEF på sikkerhetsglass [32], er det også observert at PVB-folien smelter ved denne temperaturen. Funn av smeltet PVB-folie i rom med laminerte glass vil da være en indikasjon på at temperaturen i brannrommet har vært minimum 450 °C.



Forsøk 1 – Vindu 1 – Smeltet PVB-folie etter brann

Bilde 22: Forsøk 1 - Vindu 1 - Smeltet PVB-folie etter brann

Diskusjon

Verifikasjon av funn i forsøk mot tidligere utførte forsøk

Forsøkene og etterarbeidet har vist at ved langsommere brannutvikling tar det lengre tid før glass sprekker. Dette stemmer bra med observasjonene gjort av Wang et.al. [31], samt forsøkene til Shields, Shilcock og Hasasni [27]. Her observeres det at glass med beskyttede kanter (som vinduene brukt i disse forsøkene) får en økning i kanttemperaturen dersom glasset blir utsatt for varmpåkjønning. En mindre brann gir en langsommere temperaturutvikling, og disse observasjonene stemmer med det som er observert her.

Litteraturen angir at sprekkdannelser oppstår i glass ved en temperaturforskjell på 60 – 80 °C [27], [30], [17] og [24]. Dette stemmer med observasjonene i forsøkene.

Det har ikke vært mulig å påvise et entydig svar på hvor sprekkdannelser oppstår i forsøkene. I forsøkene har første sprekkdannelse oppstått på ulike steder i glassene. For forsøkene gjort både av Wang et.al [31] og Shields, Shilcock og Hassani [27] er det en stor spredning i hvor sprekkdannelsene først oppstår. For forsøkene gjort av Wang er det hovedsakelig på sidene av glassene den første sprekkdannelsen oppstår. Forsøkene gjort i An experimental investigation of glass breakage in compartment fires [22] viser hovedsakelig at sprekkdannelsene oppstår i nedre eller øvre kant av vinduene.

Felles for forsøk 2 og 3 er at det etter hvert blir så store sprekkdannelser i glassene at det begynner å falle ut biter av de innerste glassene. Dette samsvarer tids-/temperaturmessig med observasjonene gjort i forsøkene med raskest brannutvikling i (forsøk 13, 14 og 15) [22]. I forsøkene til Wang et.al [31] er det kun i forsøket med høyest effekt at det ble observert glass som falt ut. Studien konkluderer med at man i en reell rombrann vil kunne forvente at mer glass faller ut.

I forsøk 4 faller ikke innerste glass ut. En langsom brannutvikling medfører sprekkdannelser i glasset, og det danner seg flere felter med glass som ikke henger fast i karmen lengre, men ingen utfall, likt de 8 første forsøkene til Wang et.al [31].

Observasjonene som er gjort i forsøkene i denne oppgaven, er ganske like forsøk gjort i det samme brannrommet i forbindelse med en bacheloroppgave på HSH våren 2016 [29]. Der har det også vært to ulike brannforløp, med test av 2- og 3-lags vindu. Ser man på 2-lags vinduene i disse forsøkene, har sprekkdannelser startet i indre og ytre glass ved noenlunde samme tid/temperatur.

Observasjoner og funn som er gjort i forsøkene samsvarer tilfredsstillende med andre forsøk som er gjort på glass og vinduer. Med bakgrunn i dette vurderes resultatene som gyldige for bruk i oppgaven.

Brytningsindeks

Målingene av brytningsindeks i glasset viste at det kan påvises endring i brytningsindeks mellom glasset som er helt eksponert av brannen, og det glasset som er beskyttet av karmen.

Forsøk gjort av Skelly, Roby et.al [22] viser at glasset varmes opp jevnt ved varmpåvirkning. For brannene med høyest temperatur vil dette medføre at glasset som er skjermet av karmen varmes opp til en høyere temperatur enn for forsøkene med lavere temperatur. Dette vil gjøre at brytningsindeksen endres tilsvarende for det ikke-eksponerte glasset.

Det ble målt høyere brytningsindeks for glassene som ble utsatt for den høyeste temperaturen. Da glassenes brytningsindeks ikke var kjent før forsøkene, er det ikke grunnlag å konkludere at det er en sammenheng her.

Glass og vinduer

Glass er et ikke-homogent materiale, og selv om glasset og vinduene er produsert ved samme fabrikk, vil det kunne være individuelle forskjeller som ikke er mulig å observere. Det kan være småskader i glasset, bruddanvisninger, som gjør at sprekkdannelser oppstår et bestemt sted, og som angitt over kan det være forskjell i brytningsindeks i glassene før forsøk.

Vinduene og sikkerhetsglassene som ble benyttet i forsøkene, ble visuelt undersøkt før forsøkene, og det ble ikke observert synlige skader eller andre faktorer som kan ha hatt påvirkning på resultatene.

Brannrommet

Testrommet står utendørs og er ikke beskyttet mot nedbør. Det var mye fukt i rommet og konstruksjonene da forsøkene begynte. Det ble gjennomført ett testforsøk som ikke er omtalt under forsøkene. Dette ble gjort for å teste at alt utstyr fungerte som forutsatt, og for å tørke rommet.

I perioden forsøkene ble gjennomført var det lite nedbør, og de registrerte dataene fra forsøkene viser at fuktighet i konstruksjonene ikke har hatt avgjørende betydning for brannforløpene som ble gjennomført.

Type brensel

Det ble brukt parafinolje som brensel i forsøkene. Dette gav en tilfredsstillende brannutvikling for de ulike forsøkene. For branner i en bolig med forskjellige typer brensel, møbler, innredning etc. kan brannen få en annen utvikling, og f.eks. kan sotproduksjonen være annerledes. Hovedfokus for denne oppgaven har vært å se på forholdet mellom tid/temperatur og påvirkning på glass og vinduer.

Avstand fra brannen til vinduene

Forsøkene ble gjort i et relativt lite rom. Avstanden fra brannen til vinduene var ca. en meter. I en reell brannsituasjon vil avstanden kunne være betraktelig større enn dette.

I et større rom vil det ta lengre tid før det danner seg et røyklag med tilsvarende temperatur som i disse forsøkene. Det vil igjen medføre lengre tid før påkjenningen på glassene er kraftig nok til at sprekkdannelsen oppstår.

Flammen kan også ha bidratt til å øke varmestrålingen mot vinduene.

Funnene som er gjort i forbindelse med forsøkene, er tolket etter det brannforløpet som er registrert, og anses som gyldige innenfor de begrensninger som ligger i testoppsettet.

Temperatur i glasset

Temperaturmålingene som ble gjort i brannrommet, ble gjort i røyklaget midt i rommet, samt ved hvert av vinduene. Det ble ikke målt temperatur i glasset, og det ble heller ikke målt innfallende stråling mot glasset. Det har dermed ikke vært mulig å si noe om hva den faktiske temperaturen i glassene var ved brudd.

Fokuset for oppgaven var å se på brannforløp og temperaturene i brannrommet, og hvordan glass og vinduer kan gi svar på hvordan utviklingen har vært. Som diskutert tidligere i dette kapittelet er det funnet samsvar med funn som er gjort i tidligere gjennomført forsøk og oppgavens funn når det gjelder temperaturene i brannrommet

Overtenning og fullt utviklet brann

Observasjonene som ble gjort etter forsøk 3 viser at en brann som når overtenning og går over til en fullt utviklet brann, vil gjøre brannrommet vanskeligere å etterforske. Glass vil gradvis falle ut av vinduene, karmene vil begynne å brenne, og det ueksponerte glasset i karmene vil også bli direkte eksponert for varme.

Overtenning og fullt utviklet brann vil også gjøre andre deler av den tekniske etterforskningen mer komplisert. Det vil være vanskeligere å kunne påvise arnested, spredningsmønster og lignende. For å sikre mulighetene til en etterrettelig etterforskning er det derfor viktig at branner blir slokket så hurtig som mulig, også i tilfeller der bygg/verdier anses som tapt.

Observasjoner og funn

Da det tidligere er gjennomført få forsøk på glass, og det er begrenset kunnskap rundt bruk av glass i brannetterforskning, har tilnærmingen til undersøkelsene vært å se på mange parametere som kan gi svar på brannutvikling og temperatur i brannrommet.

Dette har gjort at etterarbeidet har omfattet mange områder, og detaljgraden på enkeltundersøkelser har blitt mindre enn om fokus kun hadde vært på ett eller to områder.

Arbeidet har avdekket enkelte områder som bør studeres ytterligere, og i det følgende kapitlet blir det gitt anbefalinger for videre studier av bruk av glass innen brannetterforskning.

Konklusjon

Undersøkelsene har vist at man kan bruke glass og vinduer til å si noe om temperaturen i brannrommet, og til å si noe om hvordan veksten til brannen har vært. Det som gir klareste svar på temperatur og brannutvikling, er sprekkdannelser og brudd i glassene i vinduet, men også sot og størrelser på glasset som er knust i brannen, vil gi kunnskap om brannforløpet.

Det er også påvist at man kan måle endringer i glassets brytningsindeks ved å benytte glass fra vinduet, og glass som var mer skjermet fra brannpåvirkning i karmen i vinduet. Det har ikke vært mulig å påvise sammenheng mellom endring i brytningsindeks og forskjellig brannutvikling eller temperaturpåkjenning.

Forslag til videre studier

Arbeidet med denne oppgaven har avdekket følgende områder der det bør gjøres ytterligere undersøkelser:

- Endring i brytningsindeks. Det bør gjøres studier for å se nærmere på endringen i brytningsindeks i glasset. Studiet bør inneholde flere forsøk med ulik temperaturpåvirkning. Det bør også måles brytningsindeks i glasset før det utsettes for varme. Dette studiet bør gjennomføres i samarbeid med KRIPOS.
- Sprekkdannelser. Det bør sees nærmere på sammenhengen mellom oppvarming av glasset, og spenningsforskjeller i glasset. Kan dette benyttes for å vite mere om temperaturen i brannrommet?
- Forskjellen mellom mekaniske brudd og termiske brudd i glass bør undersøkes ytterligere. Hva skjer med mekanisk knuste glass i branner med høyere intensitet?

Referanser

- [1] Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, «Faguttrykk,» [Internett]. Available: www.kbt.no. [Funnet April 2017].
- [2] Finans Norge, «BRASK - Brannskadestatistikk 2015,» 2015. [Internett]. Available: <https://www.finansnorge.no/statistikk/skadeforsikring/Brannstatistikk/>. [Funnet Januar 2017].
- [3] B. Karlson og J. G. Quintere, Enclosure fire dynamics, CRC Press, 1999.
- [4] Foreningen Store Norske Leksikon, «Store Norske Leksikon,» [Internett]. Available: www.snl.no. [Funnet April 2017].
- [5] NFPA, Guide for smoke and heat venting, NFPA 204, Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2015.
- [6] Statens bygnings tekniske etat (BE), HO 3/2000 Røykventilasjon, 2000.
- [7] Boverket, Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd. BFS 2013:12 - BBRAD 3, Karlskrona, 2013.
- [8] L. S. Søndenå, Interviewee, *Bedriftsbesøk Saint-Gobain Bøckmann*. [Intervju]. 06 Oktober 2016.
- [9] SINTEF Byggforsk, 571.951 Bygningsglass, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [10] SINTEF Byggforsk, 571.953 Isolerruter. Typer og konstruksjoner, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [11] SINTEF Byggforsk, 571.956 Sikkerhetsruter, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [12] SINTEF Byggforsk, 571.957 Vinduer og glassvegger med brannmotstand, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [13] Standard Norge, NS3510:2015 Sikkerhetsruter i byggverk, 2015.
- [14] S. J. Haukland, Interviewee, *Bedriftsbesøk NorDan*. [Intervju]. 04 Oktober 2016.
- [15] SINTEF Byggforsk, 533.102 Vinduer. Typer og funksjoner, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [16] SINTEF Byggforsk, 533.132 Vinduer av tre, Oslo: SINTEF Byggforsk, 2016.
- [17] D. V. Babrauskas, «Fire science and technology inc,» [Internett]. Available: <https://www.doctorfire.com/GlassBreak.pdf>. [Funnet 04 2017].
- [18] D. V. Babrauskas, *E-post korrespondanse. Se vedlegg 1*, 2016.
- [19] D. P. Mansi, *E-post korrespondanse. Se vedlegg 2*, 2016.
- [20] A. Steen-Hansen, Interviewee, *Intervju om studier gjennomført ved SP Fire Research / SINTEF*. [Intervju]. 13 September 2016.

- [21] O. Keski-Rahkonen, «Breaking of window glass close to fire,» *Fire and materials* 12, pp. 61-69, 1988.
- [22] M. J. Skelly, R. J. Roby og C. L. Beyler, «An experimental investigation of glass breakage in compartment fires,» *J. Fire protection Engineering* 3, pp. 25-34, 1991.
- [23] S. Dembele, R. A. Rosario og J. X. Wen, «Thermal breakage of window glass in room fires conditions - Analysis of some important parameters,» *Building an environment* 54, pp. 61-70, 2012.
- [24] K. Harada, A. Enomoto, K. Uede og T. Wakamatsu, «An experimental study on glass cracking and fallout by radiant heat exposure,» *Fire safety science - Proceedings of the sixth international symposium*, pp. 1063 - 1074, 2000.
- [25] Y. Zhang, Q.-s. Wang, X.-b. Zhu, X.-j. Huang og J.-h. Sun, «Experimental study on crack of float glass with different thicknesses exposed to radiant heating,» *Procedia Engineering* 11, pp. 710 - 718, 2011.
- [26] Norsk glass- og fasadeforening, «Skader på glass,» [Internett]. Available: www.glassportal.no. [Funnøt Oktober 2016].
- [27] J. Shields, G. W. Silcock og S. Hassani, «The behaviour of double glazing in an enclosure fire,» *J. Applied fire science* 7, pp. 267 - 286, 1998.
- [28] Loss prevention council, «Fire Spread in Multi-storey buildings with glazed curtain wall facades (LPR 11:1999),» Loss prevention council, Borehamwood, England, 1999.
- [29] C. Rake, J. Skogseide og P. Ruud, Egenskaper til 3-lagsvinduer ved brannpåkjenning, Haugesund: Høgskolen Stord/Haugesund, 2016.
- [30] J. Shields, G. W. Silcock og F. Flood, «Behaviour of double glazing in corner fires,» *Fire technology* 41, pp. 37 - 65, 2005.
- [31] Y. Wang, K. Li, Y. Su, W. Lu, Q. Wang, J. Sun, L. He og K. Liew, «Determination of critical breakage conditions for double glazing in fire,» *Applied thermal engineering* 111, pp. 20 - 29, 2016.
- [32] P. A. Hansen, «Glasskonstruksjoners branntekniske egenskaper. Sluttrapport,» SINTEF - Norges branntekniske laboratorium, Trondheim, 1989.
- [33] Finans Norge, «Forsikringssvindel i Norge - svikstatistikk 2016 (Rapport for 2015-tall),» Finans Norge, Oslo, 2016.
- [34] K. S. Pedersen og T. K. Adolfsen, «Håndbok i brannetterforskning,» Norsk brannvernforening, Oslo, 2012.
- [35] KRIPOS, «Nordisk manual for brannetterforskning - norsk versjon,» KRIPOS, Oslo, 2010.
- [36] Foster & Freeman Ltd., GRIM - Operation manual.

Vedlegg

Vedlegg 1 – E-post Vyto Babrauskas

Re: Master thesis, use of glass in fire investigation

Vyto Babrauskas, Ph.D. [vytob@doctorfire.com]

Sendt: 30. september 2016 01:15

Til: [Kjartan Øvstedal](#)

Kopi: [Reidar Skrunes \[reidar.skrunes@if.no\]](#); [Stefan Owe Andersson](#)

Vedlegg: [Pages from ISFI 2016 Proce~1.pdf \(957 kB\)\[Åpne som webside\]](#);

Hi Kjartan,

I don't think there is much more recent to add to my review paper. The Chinese have produced a number of studies in recent years, but there is not much new in those, that I could see.

One comment about glass in investigation is actually a bit more general, but it would include glass. See the attached paper about smoldering vs. flaming soot deposition.

Best regards,

Vyto Babrauskas, Ph.D.

Fire Science and Technology Inc.

926 Hayes Avenue

San Diego, CA 92103

phone: (619) 501-7739

Vedlegg 2 – E-post Peter Mansi

Re: Master thesis, use of glass in fire investigation
Peter Mansi [peter.mansi@fireinvestigationsuk.com]

Sendt: 30. september 2016 08:51

Til: [Kjartan Øvstedal](#)

Kopi: [reidar.skrunes@if.no](#); [Stefan Owe Andersson](#)

Dear Kjartan

It sounds like a fascinating and very useful research study that you are doing. I am not aware of anyone who has done this type of study personally but I would recommend that you contact our friend who is a Professor at Dundee University, Professor Niamh Nic Daeid, who is the master of all knowledge on research! :)

Her email address is n.nicdaeid@dundee.ac.uk

We use analysis of glass damage in fire investigation, as you say, and more studies in any subject that can assist the fire investigation process is welcoming.

I will ask my contacts in the ATF in the USA if they know of any such research.

Please let me know how you get on.

Best wishes

Peter

Dr Peter Mansi FIFireE MCSFS MIAAI IAAI-CFI IAAI-ECT IAAI-CI
M: +44 (0)7973 628 411
T: 08444-747-007
E: peter.mansi@fireinvestigationsuk.com
W: www.fireinvestigationsuk.com
IAAI - Global Leaders in Fire Investigation

> On 29 Sep 2016, at 17:50, Kjartan Øvstedal <121387@hsh.no>
wrote:

>

> Dear Dr. Mansi

>

> I'm a student at the Haugesund/Stord University College, currently at the masterprogram in fire safety. The final part of my course is the master thesis, which I'm just started working on. My tutors for the thesis are Stefan Andersson, assistant professor at the University college, and Reidar Skrunes, working as an investigator at the norwegian insurance company If. Reidar gave me your name to contact you about this matter.

>

> The subject for the thesis is how to use glass in fire investigation, and the impact a fire will have on glass. First of all I will perform a literature study, to learn what have been discovered by others. I will also visit a local glass factory, and a factory that produces windows, to learn more about these things. Finally I will try to perform some studies at the fire lab at the HS University college, to try to discover what we can learn about the use of glass in fire investigation.

>

> Furthermore I will contact the norwegian police National Criminal Investigation Service, KRIPOS, to learn how they use glass in their investigations.

>

> Do you know of any other studies that have looked at glass and its behaviour when exposed for fire and radiation, or do you have any other tips for my literature study, then it will be greatly appreciated. It would be of great help for me if you could forward this request to other members of the IAAI internationally.

>

> Kind regards,

> Kjartan Øvstedal

Glass i brann



Forsøksmanual

ResQ

25.01 – 03.02.2017

Formål

Formålet med denne forsøksmanualen er å sikre at forsøkene som skal gjøres i forbindelse med masteroppgaven om glass i brann, skal gjennomføres sikkert og med god kvalitet.

Det er gjennomført en Sikker Jobb-Analyse (SJA) for å sikre at det ikke skal skje uhell under forsøkene.

Videre er alle forsøkene beskrevet i sin helhet, for å sikre at de gjøres med kvalitet, og at gjennomføringen av alle forsøkene er så lik som mulig.

ResQ sikkerhetscenter

Høgskolen Stord/Haugesund har et samarbeid med ResQ sikkerhetscenter, på Bleivik, ca. en mil nord for Haugesund sentrum.

Avtalen innebærer at Høgskolen og studenter kan bruke brannfeltet til ResQ til undervisning og forsøk. Her er det plassert flere brannrom som kan benyttes til dette formålet.

Bruk av brannfeltet til ResQ krever registrering av alle deltakere i ResQ sitt registreringssystem.

Telefonnummer til ResQ er 417 55 000.

Sikker Jobb Analyse (SJA)

Formål

I forbindelse med et mastergradsarbeide skal det gjennomføres fem brannforsøk på brannfeltet til ResQ. For å sikre at forsøkene utføres på en sikker måte, er det gjennomført en Sikker Jobb Analyse.

Deltagere

Følgende deltagere vil være tilstede ved forsøkene.

Forsøkene utføres av student ved HSH, Kjartan Øvstedal.

Kontrolleres av lab.ansavrlig: Arjen Kraaijeveld.

Observatør: Reidar Skrunes

Fotografgruppe:

Vilde Rolfsnes

Jørgen Bjørndal

Anna Fischer

Ivar Rasmussen

Studenter og ansatte fra HSH, andre besøkende (politi, brannvesen osv.) . Disse har ingen oppgaver ved gjennomføring av forsøkene.

SJA-gruppe

SJA er gjennomført av følgende personell:

SJA-Ansvarlig: Kjartan Øvstedal

Lab.ansvarlig: Arjen Kraaijeveld.

Beskrivelse av forsøkene

Det skal gjennomføres fem brannforsøk for å avdekke om man ved hjelp av varmepåvirkningen på glass kan tyde hvordan brannutviklingen i et rom har vært. Det gjøres 4 forsøke med ulike testoppsett, samt et testforsøk. Testforsøket vil også bidra til å tørke ut testrommet. Som utgangspunkt for SJA-en er testforsøket benyttet. Dette er forsøket som skal ha raskest brannutvikling og best ventilasjon, og her man kan forvente de høyeste temperaturene. Utover dette er alle forsøkene like.

Utstyr

Følgende utstyr skal benyttes til forsøkene:

Utstyr til antennelse

Verktøy

Fotoutstyr

Måleutstyr

Det er ingen kjente risikoer ved bruk av dette utstyret

Arbeidsoppgaver

Følgende arbeidsoppgaver skal utføres i forbindelse med forsøkene:

- Montere glass / vindu i forsøksrommet
- Antenne brenselkar i forsøksrommet
- Fotografere/dokumentere underveis i forsøket
- Etterforskning / dokumentasjon etter forsøket

De arbeidsoppgavene det knyttes særskilt risiko til er vurdert i neste kapittel.

Kjente risikoer

Antennelse

Ved antennelse av brensel før forsøkene kan man bli eksponert for åpen flamme. Følgende tiltak er vurdert som nødvendige for å ivareta sikkerheten under antennelse.

Tiltak

Rutiner for antennelse. Gjeldende rutiner hos ResQ skal følges ved antennelse av brensel før forsøkene.

Beskyttelsesutstyr. Det skal benyttes nødvendig beskyttelsesutstyr under antennelse av brensel før forsøkene.

Dokumentering / fotografering underveis i forsøkene

Arbeid ved og rundt brannrommet kan påvirkes av strålevarme og flammer fra brannen.

Tiltak

Avstand. For å hindre skader fra strålevarme og flammer er det viktig at det blir holdt god avstand til åpningene i brannrommet.

Beskyttelsesutstyr. Det skal benyttes nødvendig beskyttelsesutstyr under arbeid rundt brannrommet mens forsøkene pågår.

Refleksvester til besøkende / observatører. Besøkende og observatører skal være utstyrt med refleksvest under forsøkene.

Etterarbeid / etterforskning

Ved innsamling av glass og dokumentering av vinduer etter brann kan man bli utsatt for varme fra forsøksrommet, samt at det kan være forurenset luft i brannrommet.

Tiltak

Tid. Entring av brannrommet skal først gjøres dagen etter at forsøkene er gjennomført. Dette for å sikre at temperaturen i forsøksrommet er så lav at det ikke vil være risiko forbundet med entring.

Beskyttelsesutstyr. Det skal benyttes nødvendig beskyttelsesutstyr under etterarbeidet i og ved brannrommet. Det skal også benyttes ansiktsmaske for å hindre at man puster inn forurenset luft i brannrommet.

Dårlig vær

Tiltak

Forsøkene gjennomføres i slutten av januar / begynnelsen av februar, og det er meldt fuktig vær med temperatur på 5-6 grader.

Varme klær. Alle deltagere ved forsøkene må sørge for å kle seg varmt før forsøkene.

Konklusjon

Ved gjennomføring av de overnevnte tiltakene er det vurdert at gjennomføringen av testingen vil utføres sikkert for alt personell.

Tidsskjema

Følgende tidsskjema er planlagt for øvelsene. For hvert enkelt forsøk er det angitt mer detaljert tidsskjema under testoppsettet.

Dag	Klokkeslett	Aktivitet
Onsdag 25.1.17	09.00 – 16.00	Rigging, testforsøk, rigging forsøk 1
Torsdag 26.1.17	10.00 – 16.00	Forsøk 1
Fredag 27.1.17	08.00 – 16.00	Etterarbeid forsøk 1, rigging forsøk 2
Mandag 30.1.17	10.00 – 16.00	Forsøk 2
Tirsdag 31.1.17	08.00 – 16.00	Etterarbeid forsøk 2, rigging forsøk 3.
Onsdag 1.2.17	10.00 – 16.00	Forsøk 3, etterarbeid forsøk 3
Torsdag 2.2.17	08.00 – 16.00	Rigging forsøk 4, forsøk 4
Fredag 3.2.17	08.00 – 16.00	Etterarbeid forsøk 4. Rydding / nedrigging

Viktige telefonnummer

Dersom det skulle oppstå en kritisk situasjon i forbindelse med forsøkene har nød- og beredskapsstatene følgende telefonnummer:

Brann: 110 (Direktenummer til 110-sentral 52 74 47 00).

Ambulanse: 112

Politi: 113

ResQ: 417 55 000

Utstyr benyttet i forsøkene

Forsøksrom

Forsøkene er gjort i ett av forsøksrommene på ResQ.

Rommet har følgende mål:

	Mål
Lengde	3,40 m
Bredde	2,40 m
Høyde	2,15 m
Høyde vindusåpninger	1 m
Bredde vindusåpninger	1 m
Høyde døråpning (ventilasjonsåpning)	1,28 m
Bredde døråpning (ventilasjonsåpning)	1,20 m

Måleutstyr

Følgende måleutstyr skal benyttes under forsøkene.

Termoelement

Termoelementer brukes til temperaturmåling, og benyttes typisk til måling av høye temperaturer, for eksempel i forbindelse med en brann. Disse kan anvendes i temperaturområdet fra -200 til over 2000 °C. Termoelementer er i dag standardiserte slik at man ved å benytte termoelementer innen samme gruppe ikke skal trenge å gjøre store omkalibreringer.

Når to ulike metalltråder kobles sammen i begge ender og en ende blir varmet opp, vil det gå en strøm i kretsen. Forklart på en forenklet måte, vil temperaturen i enden av termoelementet bli målt som en følge av denne spenningen.

HSH bistår med termoelementene, samt datalogger som skal benyttes i forsøkene.

Plassering av termoelement

Det skal monteres 15 termoelement, type K for å måle temperatur i brannrommet, samt ved vinduene på eksponert side. Termoelement 1-5 er ved vindu 1, termoelement 6-10 er ved vindu 2, termoelement 11-15 er midt i brannrommet.

Termoelementene er koblet til en datalogger som sender registrerte verdier til programmet Brannlab som er installert på tilhørende pc.

Glass og vinduer benyttet i forsøkene

I forsøk 1 skal det benyttes 44,2 laminert glass (4mm glass + 0,76 mm pvb + 4mm glass) og 4 mm herdet glass, levert av Saint Gobain Böckmann AS i Sauda. Glassene er holdt fast i testrommet ved hjelp av trelekter, og aluminiumsprofiler.

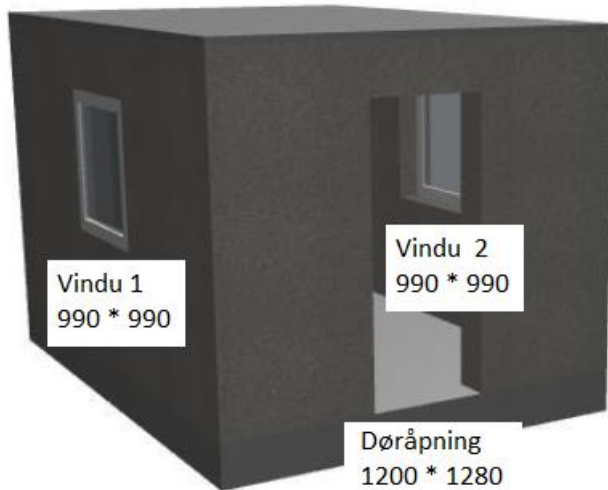
I forsøk 2 – 4 skal det benyttes 2-lags vinduer, levert av NorDan AS. Vinduene er fastkarmvinduer, av type NTech, med 24 mm energiglass og 92 mm karm. Vinduet har en U-verdi på 1,2 W/m²K.

Vinduene skal monteres etter bransjestandard, og det skal tettes rundt vinduene med mineralull. For å sikre at vinduene ikke faller ut under forsøkene skal innfestningen av vinduene forsterkes med aluminiumsprofiler.

Plassering av åpninger i testrommet

Forsøksrommet er utført med to vindusåpninger på 990 mm * 990 mm. Åpningene er likt plassert i de to langveggene i testrommet.

Forsøksrommet har i tillegg en døråpning på 1200 mm * 1280 mm som fungerer som ventilasjonsåpning i forsøkene.



Sikkerhetsutstyr

Verneutstyr til bruk under forsøkene lånes av ResQ Sikkerhetssenter. Det skal benyttes brannbekledning, hjelm, hansker og briller.

Det skal også legges ut slangeutlegg som er en del av ResQ sitt utstyr på brannfeltet.

Fotoutstyr

Fotodokumentasjonen utføres med hjelp av elever fra Vardafjell VGS.

Følgende utstyr er tenkt benyttet til filming og fotografering:

2 videokameraer på stativ plassert på hver sin side av forsøksrommet. Kameraene plasseres slik at de fotograferer hele vinduet, i tilfredsstillende avstand for ikke bli påvirket av flammer og stråling fra brannrommet.

1 videokamera på stativ, plassert foran forsøksrommet. Plasseres i tilfredsstillende avstand for å ikke bli påvirket av flammer og stråling fra brannrommet.

1 fotokamera til nærbilder osv.

Brensel

Det skal benyttes parafin, samt trepaller som brensel i forsøkene. Mengde brensel er ytterligere beskrevet under hvert forsøk. Det er benyttet et brenselkar på 1m * 1m. Størrelsen på brenselkaret er redusert for de ulike forsøkene for å endre brannutvikling. Størrelse på brenselkaret er definert iht. verdier i tabell 3.3 og 3.6 i Enclosure fire dynamics [1].

Annet utstyr

Målestav.

Spade.

Diverse verktøy.

Festemidler

Lynlåsposer og vaterte konvolutter til oppbevaring av glass etter forsøkene

Dokumentasjon / etterarbeid

Dette kapittelet oppsummerer hvilke momenter som skal undersøkes i forsøkene. Prioriteringen baserer seg på de erfaringene og funnene som er gjort i litteraturstudien til oppgaven. Noe dokumenteres underveis i forsøkene, mens noe gjøres som en del av etterarbeidet etter at brannen er sløkket.

Av sikkerhetsmessige årsaker skal det ikke gjøres undersøkelser inne i brannrommet før dagen etter forsøkene. Dersom det vurderes som sikkert, kan det fotograferes, og utvendige glassbiter kan plukkes opp samme dag. Det vil være mest hensiktsmessig å gjøre dette samme dag som forsøkene, da det er mindre mulighet for ytre påvirkning (vær, vind osv.).

Sprekkdannelse (krakelering)

Ved temperaturforskjell i glasset vil dette etter hvert sprekke, og ved stor nok temperaturpåkjenning vil glasset til slutt faller ut av vinduet. Tidligere forsøk på glass og vinduer i brann viser at glasset sprekker fra karmen og innover mot midten av vinduet.

Forsøkene vil se på om det er forskjell i sprekkdannelsene avhengig av temperaturutviklingen i brannen / rommet. Dette gjelder både «mønster» og antall, samt tidspunkt for sprekkdannelsen.

Teorien er at glass som er knust mekanisk får annerledes sprekkdannelse, og andre bruddflater. Dette verifiseres i forbindelse med forsøk 4.

Sprekkdannelser i vinduene dokumenteres ved bruk av fotokamera ved hvert av vinduene. Det monteres målestaver horisontalt og vertikalt på vinduene for å kunne måle avstander mellom sprekke.

Utfall av glass

Dersom varmepåvirkningen på vinduene er kraftig nok, vil sprekkdannelsen i glasset bli så stor at glasset etter hvert vil falle ut.

Forsøkene vil se på om det er ulikt utfall av glass i vinduene, avhengig av temperaturutviklingen i brannen / rommet.

Utfall av glass dokumenteres ved filming av forsøkene, samt at vinduene fotograferes i etterkant av forsøkene.

Sot på vinduer

Det vil dannes sot på vinduene underveis i brannforløpet. Teorien er at det i forsøkene med rask brannutvikling vil være mindre soddannelse på vinduene. Dette med bakgrunn i at vinduene vil sprekke tidligere, og at det da vil gis tilgang på oksygen til brannen. Dette vil redusere sotproduksjonen.

Mengden sot dokumenteres underveis ved fotografering av vinduene. Etter brannen vil mengden sot undersøkes nærmere, og det vil fotograferes ytterligere.

Innsamling av glass (Brytningsindeks)

Innsamling av glass skal gjøres iht. pkt. 2.14 i Veiledning i sikring, emballering, merking mv. av spor og gjenstander med henblikk på undersøkelser som bevismidler, Rundskriv nr. 2. fra Kriminalpolitisen (Vedlegg til Nordisk brannmanual [2]).

Større glassbiter embaleres i bobleplast og plasseres i bokser, merket for hvilket forsøk, hvilket vindu og hvilket glass (innerste eller ytterste glass). Det må også sikres uekspontert glass (glass fra karmen) for å vurdere endring i brytningsindeks. Dette legges i bobleplast som merkes særskilt (uekspontert).

Onsdag 25.01 - Testforsøk

Utforming av brannrommet

Brannrommet brukes uten glass eller vinduer i åpningene.

Brannutvikling

For dette forsøket er det planlagt å benytte rask brannutvikling.

Brensel

Brenselkar (0,85 m²) med 65 liter diesel.

Måleutstyr og målepunkter

Det skal benyttes femten termoelementer i dette forsøket.

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
09.00 – 12.00	Rigging, test av måleutstyr, kamera
12.00 – 13.00	Forsøk
13.00 – 14.00	Opprydding
14.00 – 16.00	Rigging forsøk 1

Torsdag 26.01 - Forsøk 1 – laminert og herdet glass

Utforming av brannrommet

Det benyttes enkle glass av herdet og laminert glass i åpningene. Glassene festes med aluminiumprofiler.

Brannutvikling

For dette forsøket er det planlagt å benytte rask brannutvikling.

Brensel

Brenselkar (0,85 m²) med 60 liter diesel.

Måleutstyr og målepunkter

Det skal benyttes 15 termoelementer i dette forsøket. 5 målepunkter ved hvert av glassene, samt 5 målepunkter midt i rommet.

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
10.00 – 12.00	Test av måleutstyr, rigging kamera
12.00 – 14.00	Forsøk
14.00 – 15.00	Dokumentering / «etterforskning»
15.00 – 16.00	Nedrigging utstyr

Fredag 27.01 – Etterarbeid forsøk 1 / Forberedelse forsøk 2

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
8.00 – 12.00	Innsamling glass, etterarbeid forsøk 1
12.00 – 15.00	Rigging forsøk 2

Mandag 30.01 Forsøk 2 – To vinduer og rask brannutvikling

Utforming av brannrommet

Det benyttes to-lags vinduer i åpningene. Vinduene festes iht. anerkjente løsninger.

Brannutvikling

For dette forsøket er det planlagt å benytte rask brannutvikling.

Brensel

Brenselkar (0,75 m²) med 30 liter parafin.

Måleutstyr og målepunkter

Det skal benyttes 15 termoelementer i dette forsøket. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet.

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
10.00 – 13.00	Gjennomgang testoppsett, test av måleutstyr.
13.00 – 14.00	Rigging kamera
14.00 – 16.00	Forsøk
16.00	Nedrigging utstyr

Tirsdag 31.01 – Etterarbeid forsøk 2 / Forberedelse forsøk 3

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
8.00 – 12.00	Innsamling glass, etterarbeid forsøk 2
12.00 – 15.00	Rigging forsøk 3

Onsdag 01.02 - Forsøk 3- To vinduer og ultra-rask brannutvikling

Utforming av brannrommet

Det benyttes to-lags vinduer i åpningene. Vinduene festes iht. anerkjente løsninger.

Brannutvikling

For dette forsøket er det planlagt å benytte ultra-rask brannutvikling.

Brensel

Brenselkar (0,85 m²) med 60 liter parafin, samt trepaller i 0,5 meters høyde

Måleutstyr og målepunkter

Det skal benyttes 15 termoelementer i dette forsøket. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet.

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
10.00 – 12.00	Test av måleutstyr, rigging kamera
12.00 – 14.00	Forsøk
14.00 – 15.00	Dokumentering / «etterforskning»
15.00 – 16.00	Nedrigging utstyr

Torsdag 02.02 Forsøk 4 – Ett knust og ett helt vindu. Middels brannutvikling

Utforming av brannrommet

Det benyttes to-lags vinduer i åpningene. Vinduene festes iht. anerkjente løsninger. Ett av vinduene knuses mekanisk før forsøket.

Brannutvikling

For dette forsøket er det planlagt å benytte middels brannutvikling.

Brensel

Brenselkar (0,65 m²) med 30 liter parafin.

Måleutstyr og målepunkter

Det skal benyttes 15 termoelementer i dette forsøket. 5 målepunkter ved hvert av vinduene, samt 5 målepunkter midt i rommet.

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
8.00 – 11.00	Innsamling glass, etterarbeid forsøk 3
11.00 – 13.00	Rigging forsøk 4, test av måleutstyr, kamera
13.00 – 15.00	Forsøk 4
15.00 – 16.00	Dokumentering / «etterforskning»

Fredag 03.02 – Etterarbeid forsøk 4 / opprydding

Kjøreplan

Klokke	Aktivitet
8.00 – 12.00	Innsamling glass, etterarbeid forsøk 4
12.00 – 15.00	Rydding, nedrigging av alt utstyr

Sjekkliste før forsøk

Forberedelse

1. Koble PC med logger.
2. Koble termoelement med logger.
3. Verifisere at alle termoelement fungerer.
4. Kontrollere at alle kamera har strøm og lagringskapasitet.
5. Fulle diesel i brenselkar. Verifisere mengde med forsøksoppsett.

Før antennelse

1. Starte logging i brannlab
2. Fotografer klar ved kamera.

Ved antennelse

1. Vise plakat med forsøksnr. foran kamera
2. Nedtelling 1-2-3 ved start filming.

Under forsøk

1. Kontrollere at kamera filmer og har tilstrekkelig strøm og lagringskapasitet.
2. Kontrollere at brannlab har fornuftige verdier.

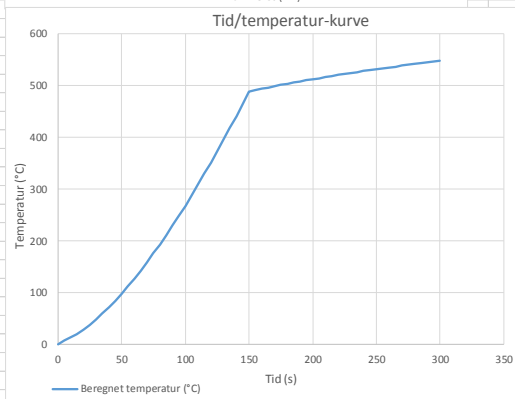
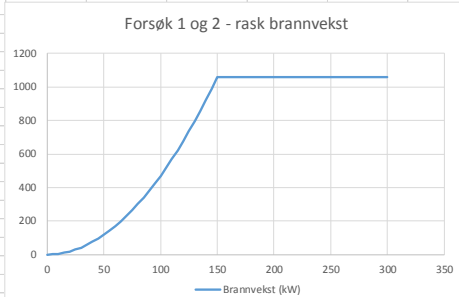
Referanser

[1] B. Karlson og J. G. Quintere, Enclosure fire dynamics, CRC Press, 1999.

[2] KRIPOS, «Nordisk manual for brannetterforskning - norsk versjon,» KRIPOS, Oslo, 2010.

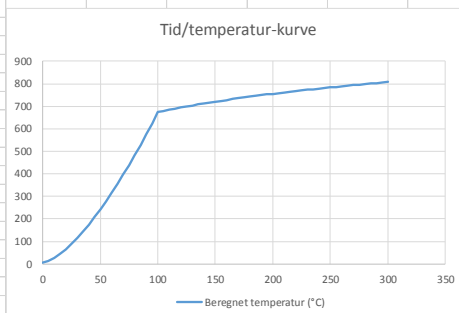
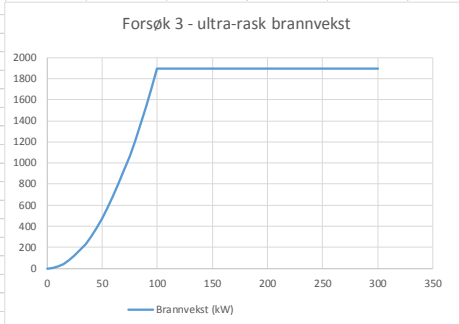
Vedlegg 4 – Beregning forsøk 1 og 2

Alpha	0,047	Beregning av temperatur		ta	5 c	Størrelse brannrom			
		Brannrommets egenskaper				Åpning		Rom	
k	0,12 W/mK	tp	33333,3333 s	Høyde	1,28 m	Høyde	2,15 m		
c	1004 J/kgK			Bredde	1,2 m	Lengde	3,4 m		
roh	550 kg/m ³	tp er større enn t -> hk = rot(k roh c / t)		Ao	3,536 m ²	Bredde	2,4 m		
alpha	0,0000003					At	37,724 m ²		
Tykkelse	0,2 m								
Tid [s]	Brannvekst (kW)	Beregnet temperatur (°C)							
0	0	0							
5	1,175	7,945006218							
10	4,7	13,32973547							
15	10,575	20,3027012							
20	18,8	28,56004975							
25	29,375	37,92617049							
30	42,3	48,28257514							
35	57,575	59,54227844							
40	75,2	71,63788376							
45	95,175	84,51516789							
50	117,5	98,12927373							
55	142,175	112,4422869							
60	169,2	127,4216096							
65	198,575	143,038822							
70	230,3	159,2688598							
75	264,375	176,0894006							
80	300,8	193,480398							
85	339,575	211,423719							
90	380,7	229,9028577							
95	424,175	248,9027054							
100	470	268,4093639							
105	518,175	288,4099923							
110	568,7	308,8926787							
115	621,575	329,8463341							
120	676,8	351,2606012							
125	734,375	373,1257773							
130	794,3	395,4327485							
135	856,575	418,1729323							
140	921,2	441,3382275							
145	988,175	464,9209715							
150	1057,5	488,9139013							
155	1057,5	491,5657159							
160	1057,5	494,1471778							
165	1057,5	496,6622667							
170	1057,5	499,1146251							
175	1057,5	501,5075953							
180	1057,5	503,8442522							
185	1057,5	506,1274314							
190	1057,5	508,3597538							
195	1057,5	510,5436468							
200	1057,5	512,6813633							
205	1057,5	514,7749983							
210	1057,5	516,8265034							
215	1057,5	518,8376999							
220	1057,5	520,8102901							
225	1057,5	522,7458677							
230	1057,5	524,6459271							
235	1057,5	526,5118712							
240	1057,5	528,3450193							
245	1057,5	530,1466133							
250	1057,5	531,9178242							
255	1057,5	533,6597567							
260	1057,5	535,373455							
265	1057,5	537,0599068							
270	1057,5	538,7200471							
275	1057,5	540,3547627							
280	1057,5	541,9648946							
285	1057,5	543,5512419							
290	1057,5	545,114564							
295	1057,5	546,6555836							
300	1057,5	548,1749889							



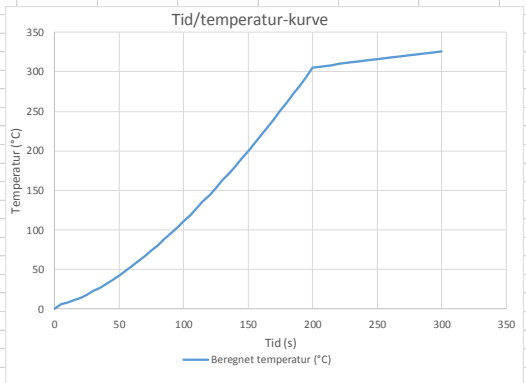
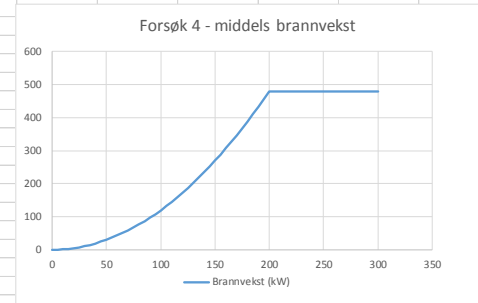
Vedlegg 5 – Beregning forsøk 3

Alpha	0,19	Beregning av temperatur		ta	5 c	Størrelse brannrom			
		Brannrommets egenskaper				Åpning		Rom	
k	0,12 W/mK	tp	33333,3333 s	Høyde	1,28 m	Høyde	2,15 m		
c	1004 J/kgK	tp er større enn t -> hk = rot(k roh c / t)		Bredde	1,2 m	Lengde	3,4 m		
roh	550 kg/m3			Ao	3,536 m2	Bredde	2,4 m		
alpha	0,0000003					At	37,724 m2		
Tykkelse	0,2 m								
Tid [s]	Brannvekst (kW)	Beregnet temperatur (°C)							
0	0	5							
5	4,75	12,47348863							
10	19	26,13821796							
15	42,75	43,83338605							
20	76	64,78790904							
25	118,75	88,55614303							
30	171	114,8374025							
35	232,75	143,4109464							
40	304	174,1057437							
45	384,75	206,784193							
50	475	241,3324614							
55	574,75	277,6543343							
60	684	315,6670884							
65	802,75	355,298604							
70	931	396,4852751							
75	1068,75	439,170455							
80	1216	483,3032723							
85	1372,75	528,8377112							
90	1539	575,7318848							
95	1714,75	623,9474522							
100	1900	673,4491442							
105	1900	678,9069286							
110	1900	684,1522635							
115	1900	689,2025341							
120	1900	694,0730202							
125	1900	698,7772275							
130	1900	703,3271551							
135	1900	707,7335147							
140	1900	712,0059101							
145	1900	716,1529872							
150	1900	720,1825589							
155	1900	724,1017097							
160	1900	727,9168852							
165	1900	731,6339674							
170	1900	735,2583393							
175	1900	738,7949406							
180	1900	742,2483159							
185	1900	745,6226557							
190	1900	748,9218335							
195	1900	752,149437							
200	1900	755,3087956							
205	1900	758,4030057							
210	1900	761,4349514							
215	1900	764,4073245							
220	1900	767,3226408							
225	1900	770,1832558							
230	1900	772,9913779							
235	1900	775,7490806							
240	1900	778,4583136							
245	1900	781,1209126							
250	1900	783,7386078							
255	1900	786,3130322							
260	1900	788,8457289							
265	1900	791,3381576							
270	1900	793,7917003							
275	1900	796,2076674							
280	1900	798,587302							
285	1900	800,931785							
290	1900	803,2422387							
295	1900	805,5197313							
300	1900	807,7652799							



Vedlegg 6 – Beregning forsøk 4

Alpha	0,012	Beregning av temperatur		ta	5 c	Størrelse brannrom			
		Brannrommets egenskaper				Åpning		Rom	
k	0,12 W/mK	tp	33333,3333 s	Høyde	1,28 m	Høyde	2,15 m		
c	1004 J/kgK	tp er større enn t -> hk = rot(k roh c / t)		Bredde	1,2 m	Lengde	3,4 m		
roh	550 kg/m3			Ao	3,536 m2	Bredde	2,4 m		
alpha	0,0000003					At	37,724 m2		
Tykkelse	0,2 m								
Tid [s]	Brannvekst (kW)	Beregnet temperatur (°C)							
0	0	0							
5	0,3	6,185245936							
10	1,2	8,352381755							
15	2,7	11,15871854							
20	4,8	14,48196749							
25	7,5	18,25145241							
30	10,8	22,41948658							
35	14,7	26,95106192							
40	19,2	31,81905404							
45	24,3	37,00164027							
50	30	42,48076745							
55	36,3	48,24117659							
60	43,2	54,26974833							
65	50,7	60,55504495							
70	58,8	67,08697896							
75	67,5	73,85656657							
80	76,8	80,8557399							
85	86,7	88,07720117							
90	97,2	95,51430738							
95	108,3	103,1609779							
100	120	111,0116193							
105	132,3	119,0610636							
110	145,2	127,3045168							
115	158,7	135,7375159							
120	172,8	144,3558926							
125	187,5	153,155742							
130	202,8	162,1333961							
135	218,7	171,2854006							
140	235,2	180,6084954							
145	252,3	190,0995964							
150	270	199,7557806							
155	288,3	209,5742726							
160	307,2	219,5524323							
165	326,7	229,6877445							
170	346,8	239,9778092							
175	367,5	250,4203332							
180	388,8	261,0131222							
185	410,7	271,754074							
190	433,2	282,6411725							
195	456,3	293,6724814							
200	480	304,8461396							
205	480	306,0826797							
210	480	307,2943372							
215	480	308,4821876							
220	480	309,6472363							
225	480	310,7904248							
230	480	311,9126355							
235	480	313,0146971							
240	480	314,0973888							
245	480	315,161444							
250	480	316,2075544							
255	480	317,2363724							
260	480	318,2485148							
265	480	319,2445648							
270	480	320,2250749							
275	480	321,1905686							
280	480	322,1415427							
285	480	323,0784692							
290	480	324,0017965							
295	480	324,9119516							
300	480	325,8093409							

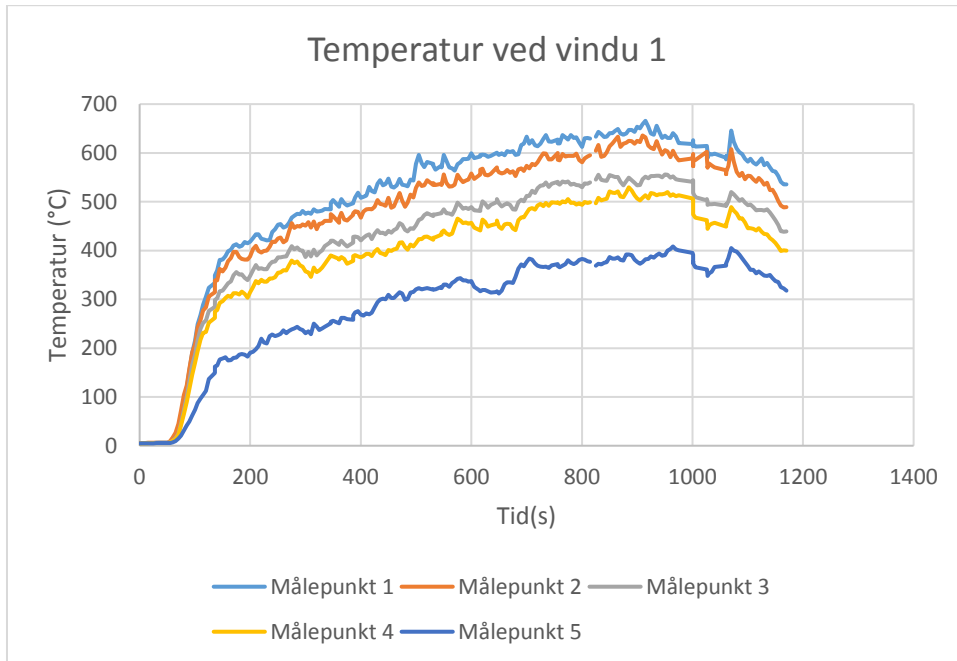


Vedlegg 7 – Data fra forsøk

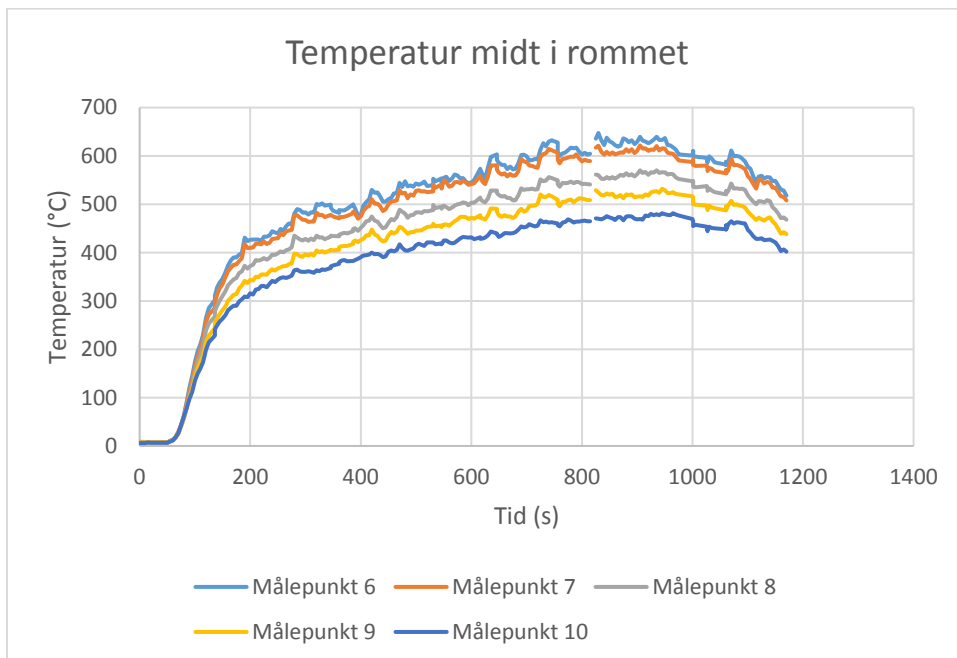
For hvert av forsøkene ble det logget temperatur på 15 ulike målepunkt. 5 ved hvert av vinduene, og 5 midt i rommet.

For noen av forsøkene var det problemer med termoelement 2 og 12, og disse viser ikke igjen i alle målingene.

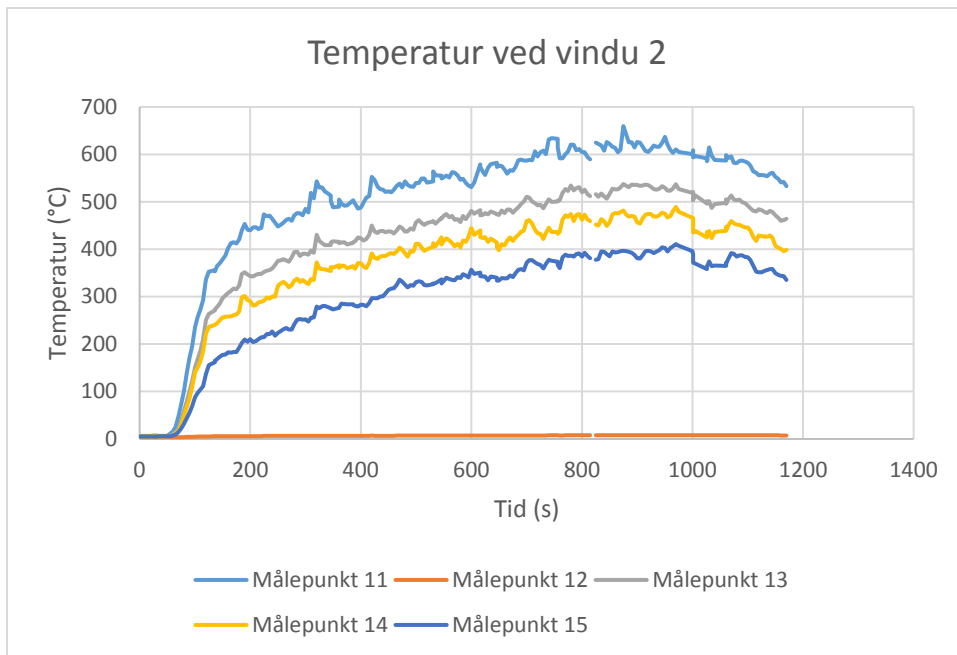
Forsøk 1



Figur 19: Forsøk 1 - Temperatur ved vindu 1

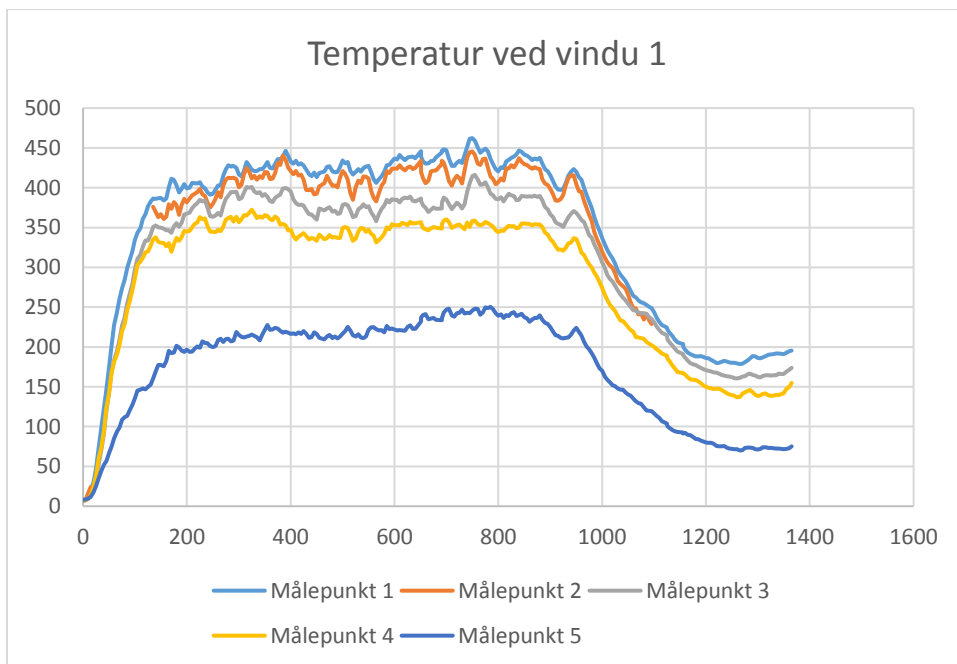


Figur 20: Forsøk 1 - Temperatur midt i rommet

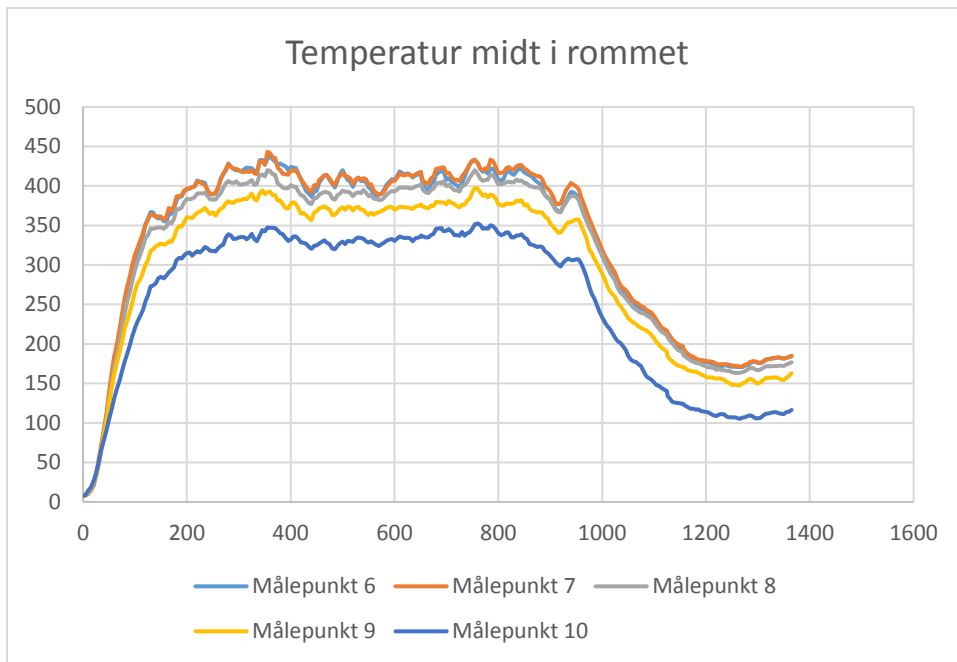


Figur 21: Forsøk 1 - Temperatur ved vindu 2

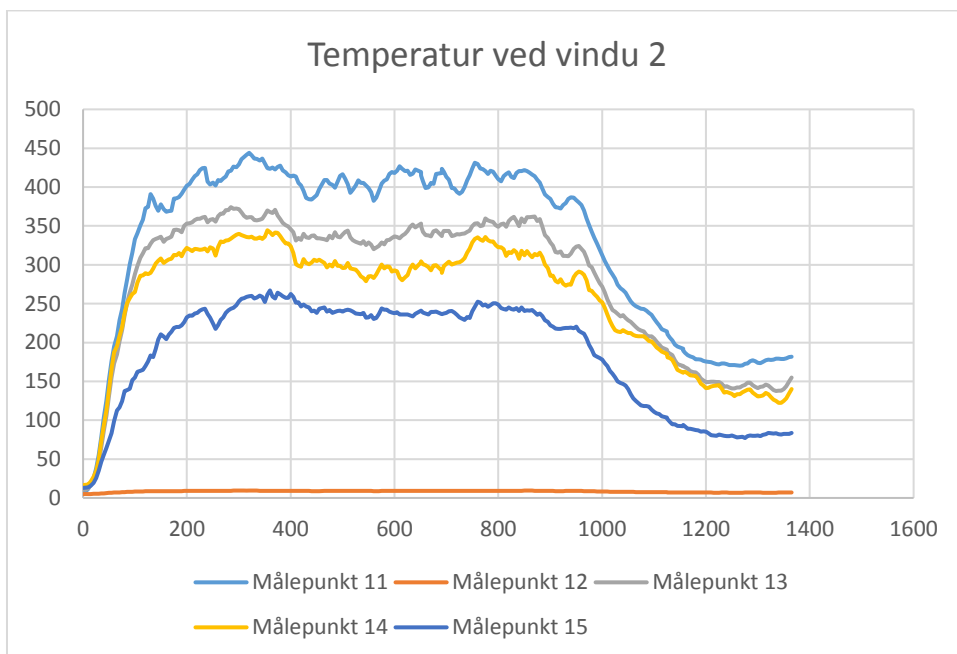
Forsøk 2



Figur 22: Forsøk 2 - Temperatur ved vindu 1

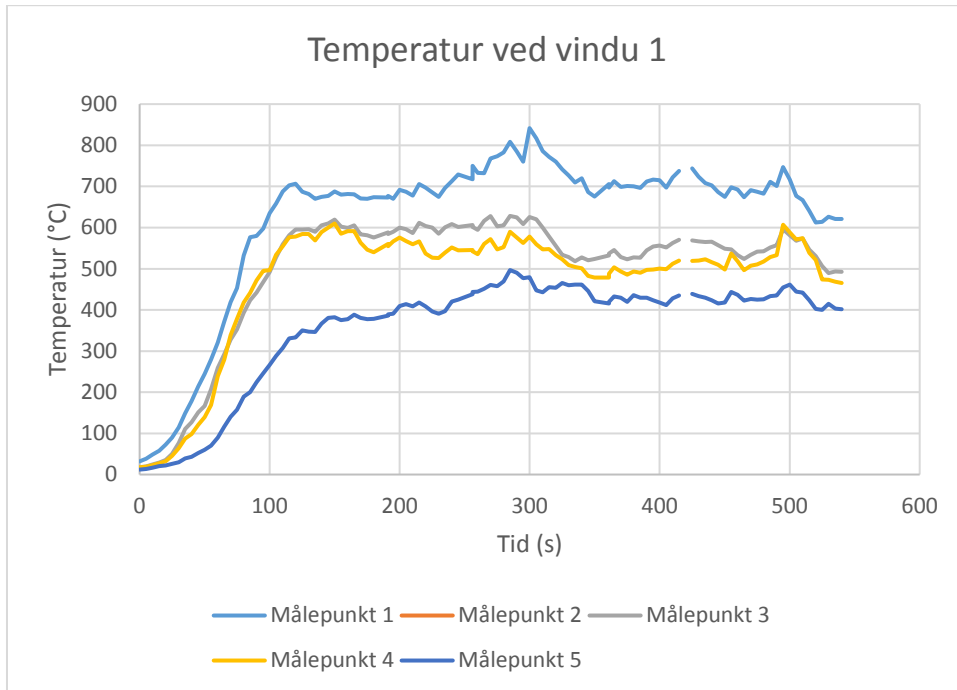


Figur 23: Forsøk 2 - Temperatur midt i rommet

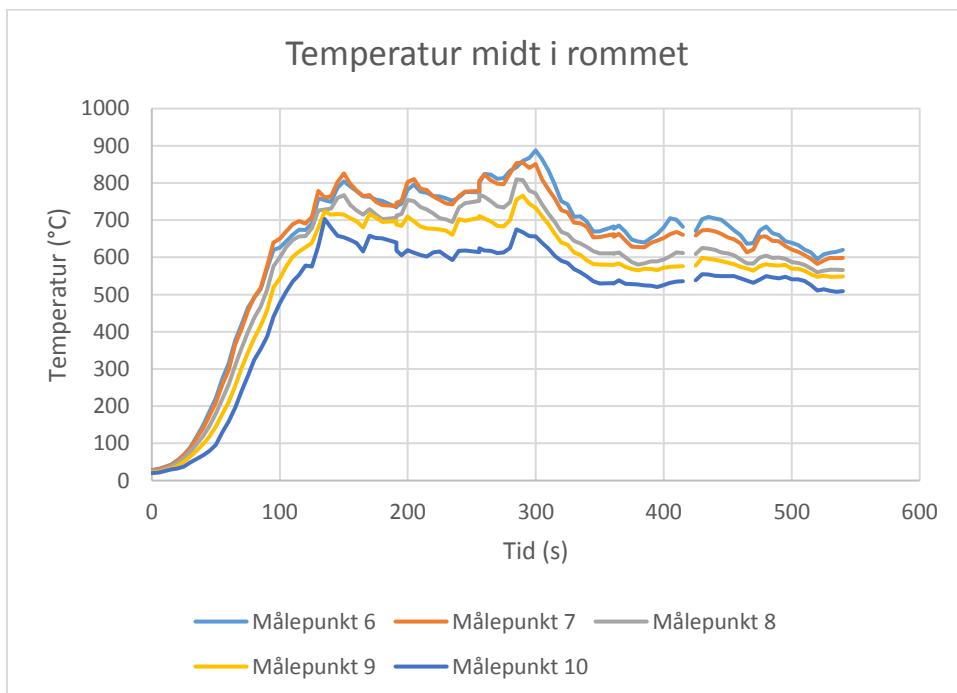


Figur 24: Forsøk 2 - Temperatur ved vindu 2

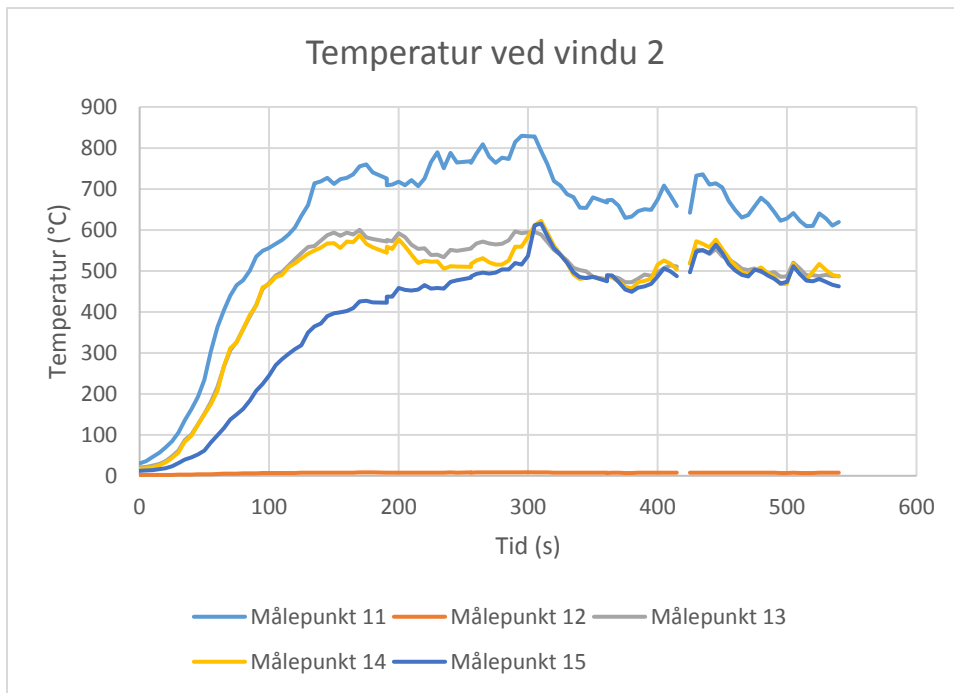
Forsøk 3



Figur 25: Forsøk 3 - Temperatur ved vindu 1

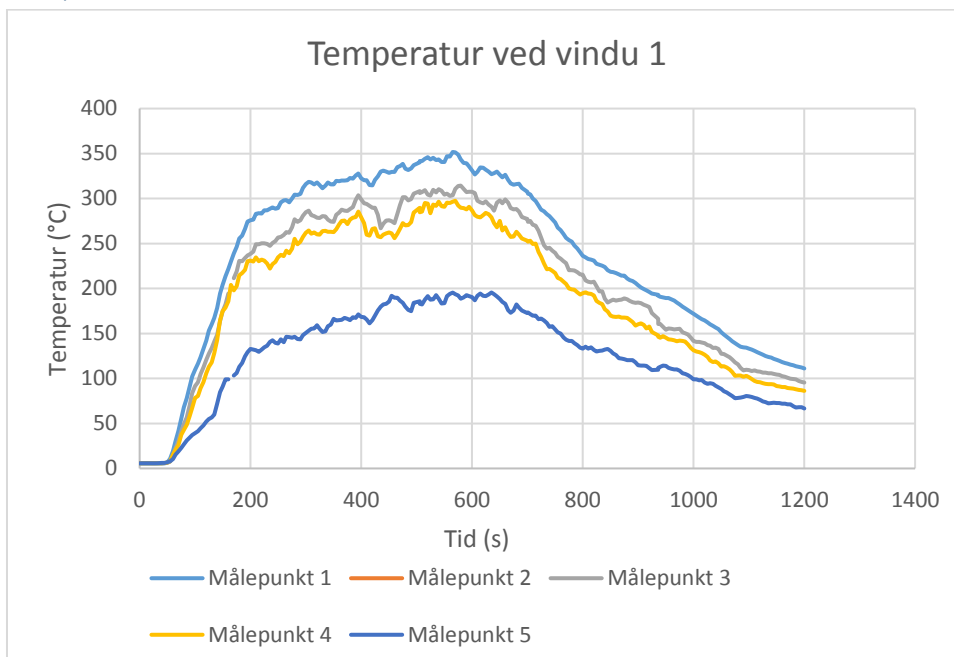


Figur 26: Forsøk 3 - Temperatur midt i rommet

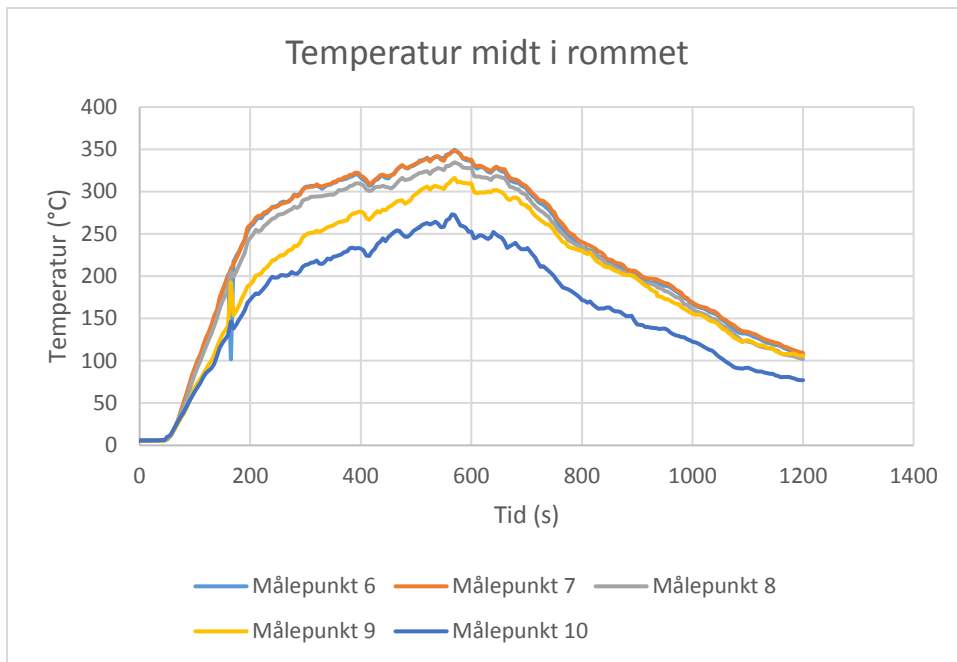


Figur 27: Forsøk 3 - Temperatur ved vindu 2

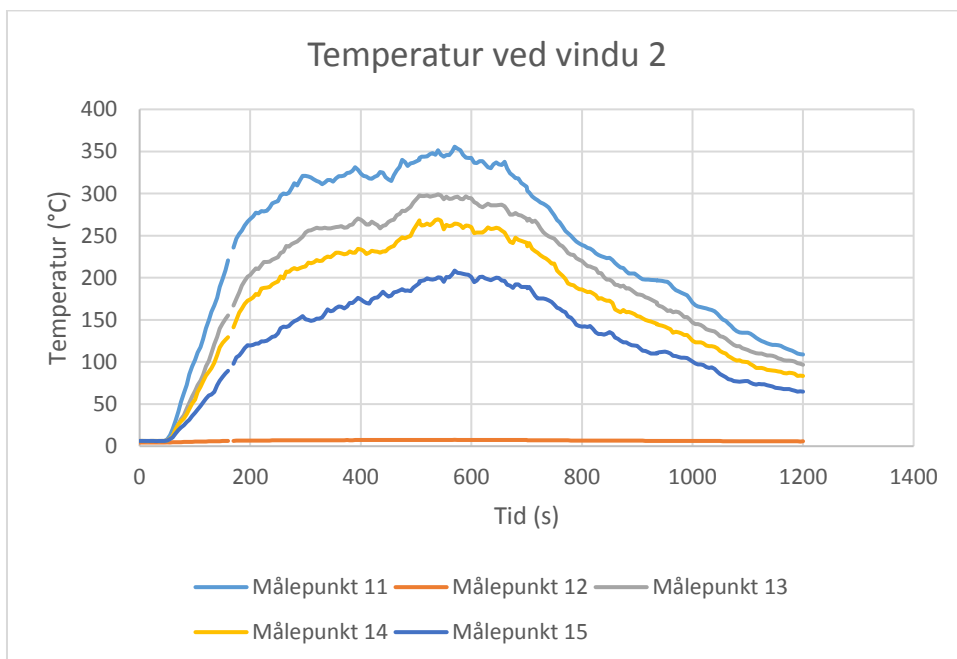
Forsøk 4



Figur 28: Forsøk 4 - Temperatur ved vindu 1



Figur 29: Forsøk 4 - Temperatur midt i rommet



Figur 30: Forsøk 4 - Temperatur ved vindu 2

Vedlegg 8 – T-test av brytningsindeks

Hypotese: Varmeeksponert glass har en høyere brytningsindeks enn ikke-eksponert glass ($m > m_0$), dvs. $T > t(a)$.

$T = 2,718$ (99 % av 11 (n-1) observasjoner)

T-test endring i brytningsindeks eksponert / ueksponert glass, forsøk 2			
Vindu 1	Gj. Snitt brytningsindeks	Standardavvik (S)	Antall observasjoner (n)
Indre glass eksponert	1,51997	0,0000588	12
Indre glass ueksponert	1,5199		
T	4,123930494		
Vindu 2	Gj. Snitt brytningsindeks	Standardavvik (S)	Antall observasjoner (n)
Indre glass eksponert	1,51992	0,0000209	12
Indre glass ueksponert	1,51994		
T	-3,314929775		

T-test endring i brytningsindeks eksponert / ueksponert glass, forsøk 3			
Vindu 1	Gj. Snitt brytningsindeks	Standardavvik (S)	Antall observasjoner (n)
Indre glass eksponert	1,52018	0,0000456	12
Indre glass ueksponert	1,52011		
T	5,317699848		
Vindu 2	Gj. Snitt brytningsindeks	Standardavvik (S)	Antall observasjoner (n)
Indre glass eksponert	1,52021	0,0000342	12
Indre glass ueksponert	1,52018		
T	3,038685627		

T-test endring i brytningsindeks eksponert / ueksponert glass, forsøk 4			
Vindu 1	Gj. Snitt brytningsindeks	Standardavvik (S)	Antall observasjoner (n)
Indre glass eksponert	1,51992	0,0000191	12
Indre glass ueksponert	1,51986		
T	10,8819946		