En undersökning om termisk strålningspåverkan och sprickbildning i floatglas

Oskar Karlberg
BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET

EXAMENSARBETE
Brandteknik

En undersökning om termisk strålningspåverkan och sprickbildning i floatglas

Oskar Karlberg

Lund 2025

Titel
En undersökning om termisk strålningspåverkan och sprickbildning i floatglas

Title
An investigation about thermal radiation and breakage in float glass

Författare/author
Oskar Karlberg

Report 5731
ISRN: LUTVDG/TVBB--5731--SE

Antal sidor/Number of pages: 47

Illustrationer/Illustrations: Oskar Karlberg

Sökord
Termisk sprickbildning i glas, värmeöverföring, floatglas, strålning, glastjocklek

Keywords
Thermal glass breakage, heat transfer, float glass, heat flux, glass thickness

Abstract
The objective of this work was to examine thermal radiation and breakage in float glass, and the properties of the glass that affect this. Both a literature review and small-scale experiments were used to examine this. The result was that several glass properties that are important to thermal glass breakage and transmission were presented, such as glass thickness, heat flux, shaded area, glass size, cutting technique and aspect ratio (the proportions between the width and height).

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2025
Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2025.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Under arbetets gång har jag fått hjälp och stöttning från flera personer som jag skulle vilja tacka.

Nils Johansson, programledare för Bradingenjörsprogrammet och min handledare, för bra vägledning och stöttning under arbetets gång.

Lunds glasmästeri, för donation av de glas som användes under försöken. Utan er hade detta arbete inte varit möjligt.

Martin Gunder, forskningsingenjör vid avdelningen för konstruktionsteknik, för värdefull hjälp med försöksuppställningen.

Konrad Wilkens, forskare vid avdelningen för brandteknik, för vägledning med konkalorimetern i labbet.

Sammanfattning

Glas är en viktig del av byggnader både med tanke på estetiska skäl och ljusinsläpp men också med hänseende på brand. Fönster är ofta en svag del i det byggnadstekniska brandskyddet och kan ofta gå sönder vid brandpåverkan vilket har betydelse för brandutvecklingen inom byggnaden, då syre tillförs branden, men också mellan byggnader då värmestrålningen från en byggnad mot en annan ökar. Anledningen till att glas spricker vid bränder är av den temperaturgradient som uppstår mellan dess mitt och den del som är ”skuggad” av ramen. Målet med detta arbete har varit att undersöka hur glas påverkas av värmestrålning och för kunna nå detta mål togs följande frågeställningar fram:

- Vilka faktorer påverkar hur och när glas spricker vid värmepåverkan?
- Hur stor inverkan har tjockleken på floatglas på tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning då de utsätts för värmestrålning?
- Påverkar den infallande strålningsnivån tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning för floatglas?
- Hur förändras den genomsläppta strålningen för floatglas vid olika tjocklekar och infallande strålningsnivåer?

För att svara på de delar som rapporten syftade att undersöka genomfördes en litteratursökning och experiment. I litteratursökningen användes ett antal sökord för att hitta information om glas uppbyggnad, dess påverkan vid brand, värmeöverföring och tidigare gjorda undersökningar på de variabler som påverkar sprickbildningen i glas. Resultatet av denna del presenterades som ett teori-kapitel i början av rapporten där flera olika faktorer som påverkar sprickbildningen av glas identifierades.

Vid experimenten utsattes ett antal 10 x 10 cm stora glasprov av tjocklekar mellan 2 och 8 mm för fem olika strålningsnivåer: 5, 10, 20, 30 and 40 kW/m^2. Försöken kan delas upp i två delar där olika saker undersöktes. I den första delen undersöktes hur olika glastjocklekar och infallande strålningsnivåer påverkar den genomsläppta strålningen. I den andra delen skuggades en del av glaskanterna för att undersöka hur temperaturgradienten och tiden till sprickbildning påverkades av de olika tjocklekarna och strålningsnivåerna.

Resultaten från både litteraturstudien och försöken visar på att det finns ett stort antal faktorer som påverkar hur och när glas spricker vid värmepåverkan. Tjockare glas ökar tiden till sprickbildning, minskar transmissionen och den uppmätta strålningen på baksidan av glaset vid termisk jämvikt. En högre infallande strålningsnivå ökar transmissionen, minskar sprickbildningstiden, genererar kraftigare och större sprickor och utifrån försöken verkar den kritiska temperaturgradienten öka. En ökad skuggningsbredd av glaset verkar endast marginellt höja den kritiska temperaturgradienten och tidigare undersökningar verkar peka på att det finns en ”kritisk” skuggningsbredd där sprickbildningstiden är som lägst. Dålig skärning av glaset påverkar den kritiska temperaturgradienten negativt och sänker därmed också sprickbildningstiden. Större glas har kortare sprickbildningstid på grund av ett större antal slumpmässiga fel jämfört med mindre. En större skillnad mellan glasets längd och bredd (mer avlångt) ökar sprickbildningstiden och minskar andelen glas som faller ut.

Summary

Glass is an important part of buildings both considering esthetical reasons and sunlight-intake but also regarding fire. Windows are often a weak part of the fire protection in a building and can usually break during a fire which plays an important role in the fire evolution within the building, when oxygen is supplied to the fire, but also in-between them because the heat flux from a building to another increases. The reason for glass breaking during fires is the temperature gradient that is created between its middle and the part that is shaded by the frame. The aim of this work has been to examine how glass is affected by thermal radiation and to reach this the following questions were made:

- What factors affect how and when glass breaks during thermal exposure?
- How big of an impact has the thickness of float glass on the time to breakage and the critical temperature gradient when exposed to thermal radiation?
- Does the heat flux affect the time to breakage and the critical temperature gradient for float glass?
- How does the transmission and the measured heat flux on the backside of glass with differ with different thicknesses and heat fluxes?

To answer the parts that the report aimed to examine a literature review, and several experiments were conducted. In the literature review several key words were used to find information about the structure of glass, it's affection during fire, heat transfer and previous research regarding the variables that affects glass breakage. The result of this part was presented as a theory chapter in the beginning of the report, where multiple factors that affect glass breakage were identified.

During the experiments several 10 x 10 cm big glass samples ranging between 2 and 8 mm thick were exposed to five different heat fluxes: 5, 10, 20, 30 and 40 kW/m^2. The tests can be split up into two parts where different aspects were examined. In the first part it was examined how the glass thickness and heat flux affected the measured radiation behind the glass sample. In the second part a section of the glass edge was covered to investigate how the critical temperature gradient and time to breakage were affected by different thicknesses and heat fluxes.

The results from both the literature review and the experiments shows that there are a big number of aspects that affect how and when glass crack during thermal exposure. Thicker glass increases the time to breakage, decreases the transmission and the measured heat flux on the backside of the glass at steady state conditions. A higher heat flux increases transmission, decreases breakage time, generates bigger and more powerful breakage and based on the experiments the critical temperature gradient seems to increase with increased heat flux. Increasing the shading width seems to only marginally increase the critical temperature gradient and previous research suggests that there is a "critical" shading width where the breakage time is the lowest. A poor cutting technique affects the critical temperature gradient of the glass negatively and lowers the breakage time. Bigger glass has shorter breakage time because of a larger number of random flaws compared to smaller ones. A bigger aspect ratio (the proportions between the width and height) increases the breakage time and decrease the fallout fraction.

Innehållsförteckning

1 Inledning 7
1.1 Bakgrund 7
1.2 Syfte 7
1.3 Mål 8
1.4 Frågeställningar 8
1.5 Avgränsningar och begränsningar 8
2 Tillvägagångssätt och metoder 9
2.1 Litteraturundersökning 9
2.2 Experiment 10
3 Resultat av litteraturundersökning 11
3.1 Glas 11
3.1.1 Hållfasthet 11
3.1.2 Termisk påverkan 11
3.2 Värmeöverföring 12
3.2.1 Konduktion 13
3.2.2 Konvektion 13
3.2.3 Strålning 13
3.2.4 Våglängd 14
3.2.5 Transmission, reflektion och absorption 14
3.2.6 Termisk jämvikt 14
3.3 Tidigare undersökningar om floatglas vid strålnings- och temperaturpåverkan 16
3.3.1 Glastjocklek och kritisk temperaturgradient 16
3.3.2 Glasstorlek och förhållande mellan längd och bredd 17
3.3.3 Skuggat område 17
3.3.4 Konstant eller ökande värmepåverkan 18
3.3.5 Olika strålningsnivåer 18
3.3.6 Transmission 19
3.3.7 Avslutande ord 19
4 Beskrivning av experiment 21
4.1 Försöksuppställning och material 21
4.2 Genomförande 24
5 Resultat av experiment 25
5.1 Genomsläppt strålning 25
5.2 Tid till sprickbildning 26
5.3 Kritisk temperaturgradient 27
6 Diskussion 29

6.1 Genomsläppt strålning 29
6.2 Tid till sprickbildning 29
6.3 Kritisk temperaturgradient 30
6.4 Skärning av glasen 32
6.5 Felkällor och förbättringar 33
6.6 Reliabilitet och validitet under försöken 34
7 Slutsats 35
8 Fortsatta studier 37
Litteraturförteckning 39
Bilaga 1 – Fullständigt resultat från experiment 41
Bilaga 2 – Bilder på sprickbildningsmönster 43
Bilaga 3 - Redovisning av användning av generativ AI 47

1 Inledning

I detta inledande avsnitt presenteras en bakgrund till arbetet, syfte, mål, frågeställningar och de begränsningar som finns i rapporten.

1.1 Bakgrund

Tillgång till syre är en begränsande faktor för bränder och i byggnader som ofta är stängda med små ventilationsöppningar spelar öppna dörrar och fönster en stor roll för att förse en brand med detta. Glas är ett skört material som ses som en svag punkt i byggnaden när det kommer till brandskydd då det lätt kan spricka vid brandpåverkan. När och hur detta sker påverkar hur en brand utvecklas, till exempel tiden till att övertändning (Babrauskas, 1997). Det finns två anledningar till att fönsterglas spricker vid brandpåverkan. Den första är att glaskanterna som är skyddad av ramen ofta har en lägre temperatur än resten av glaset och då uppstår det tillräckligt höga spänningar för att spräcka glaset. Den andra är att det skapas ett övertryck i brandrummet som spräcker glaset. Dock sker vanligen fönsterbrotten av temperaturgradient mycket tidigare än det för tryck då de flesta rum inte är tillräckligt täta för att det övertryck som krävs ska kunna uppstå (Larsson, 1999).

Beroende på om en glasruta utsätts för en brand utanför eller inuti en byggnad påverkar hur och när en glasruta spricker. När en brand bryter ut inuti en byggnad påverkas glaset av både värmestrålning och höga gastemperaturer som ofta inte är jämnt fördelade i glasrutans höjdled. Däremot när ett glas utsätts för en utomhusbrand är det främst värmestrålning som påverkar glaset likformigt över hela dess yta (Babrauskas, 1997).

Glas är en nödvändig del av byggnader för bland annat ljusinsläpp och estetiska skäl. Det finns flera olika typer av glas som har olika egenskaper baserat på tillverkningsprocessen. De glas som finns i de flesta ”vanliga” fönster kallas för floatglas som är döpt efter att de tillverkas genom floatprocessen. Utöver detta finns det flera olika typer av glas som till exempel härdade glas som har högre hållfasthet, laminerade glas där två eller fler glasskivor klistras ihop med en tunn plastfilm, isolerglas som består av ett antal ”vanliga” glas med luftspalter emellan och brandskyddsglas som ska kunna motstå brand under en bestämd tid (Carlson, Bygga med glas, 2005).

I Sveriges byggregler finns det bland annat krav gällande utformningen av fönster och avstånd mellan byggnader ur ett brandskyddsperspektiv. Krav angående detta återfinns i Boverkets byggregler (2020) medan det i Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering (2013) finns allmänna råd. I dessa beskrivs det antingen lämplig utformning av fönster och avstånd mellan byggnader eller hur analytisk dimensionering kan genomföras. Anledningen till detta är att en brand inte ska kunna spridas mellan byggnader genom fönstren som ofta är den svagaste punkten i en fasad. Med analytisk dimensionering kan brandskyddslösningar som är unika för en byggnad om det går att uppvisa att de funktionskrav som Boverkets byggregler (2020) föreskriver uppfylls. För att utföra detta kan det dock vara nödvändigt att veta mer om hur olika glas beter sig vid bränder och vilka faktorer som påverkar detta.

Eftersom fönster kan utformas med många olika storlekar och att glaset kan ha varierande tjocklek är det intressant att undersöka hur olika strålningsnivåer påverkar fönsterglas baserat på dess tjocklek och storlek. Tidigare genomförda arbeten inom området som till exempel Li et al. (2012) och Johansson & Steen (2017) tyder på att ett tjockare glas tål mer värmestrålning än tunnare glas. En annan relevant att undersöka är hur glas tjocklek och olika strålningsnivåer påverkar den genomsläppta strålning och tiden till sprickbildning. Det är också intressant att undersöka hur glastjockleken och olika strålningsnivåer påverkar den kritiska temperaturgradienten i ett glas då detta är en viktig parameter vid sprickbildning.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka hur glas påverkas av värmestrålning och vilka faktorer som påverkar sprickbildning av glas vid brand.

1.3 Mål

Målet med arbetet är att genom litteraturundersökning och laboratorieförsök undersöka hur tjockleken på floatglas och andra faktorer påverkar tiden till sprickbildning och den kritiska temperaturgradienten vid olika strålningsnivåer. Utöver detta ska också den infallande strålningens och glastjocklekens påverkan av transmissionen för glasproverna undersökas.

1.4 Frågeställningar

Följande frågeställningar ska besvaras i rapporten:

- Vilka faktorer påverkar hur och när glas spricker vid värmepåverkan?
- Hur stor inverkan har tjockleken på floatglas på tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning då de utsätts för värmestrålning?
- Påverkar den infallande strålningsnivån tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning för floatglas?
- Hur förändras den genomsläppta strålningen för floatglas vid olika tjocklekar och infallande strålningsnivåer?

1.5 Avgränsningar och begränsningar

Arbetet som helhet har begränsats till att endast undersöka vilka faktorer som påverkar termisk sprickbildning och genomsläppt strålning i enkelglas.

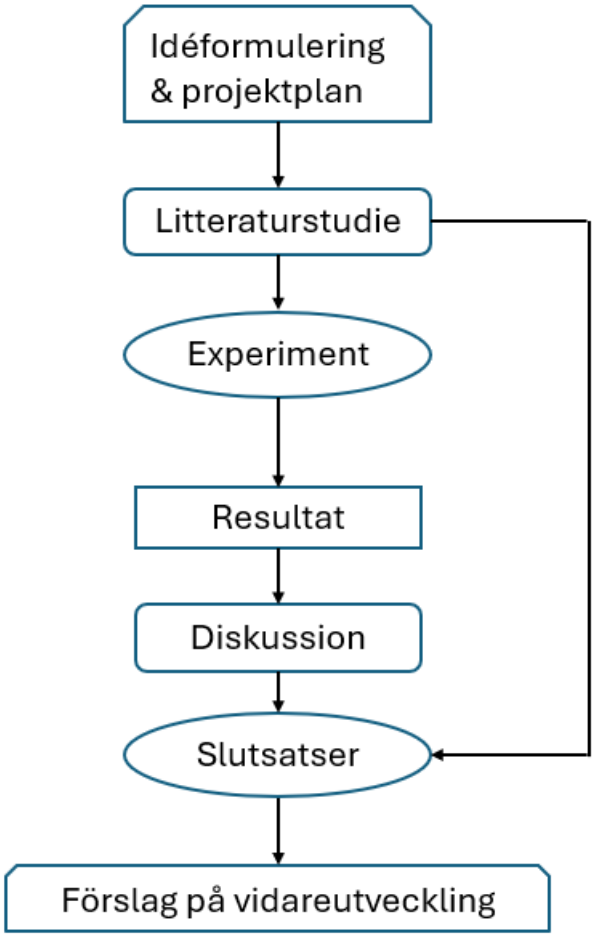
Litteraturstudien avgränsades till att endast pågå under cirka fyra veckor där de sökord som användes avgränsades till de som redovisas i tabell 1.

Försöken avgränsades till att endast omfatta hur värmestrålning påverkar små enkelglas av tjocklekar mellan 2 och 8 mm. Detta innebär att slutsatserna som dras från försöken främst är applicerbara för den undersökta storleken och tjocklekarna.

Försöken utfördes i en laboratoriemiljö som inte återspeglar verkliga bränder och strålningspåverkan från dessa. Detta innebar att det är svårt att dra slutsatser kring hur fönsterglas kommer att prestera vid värmepåverkan baserat på försöken då det är många faktorer som skiljer sig åt. Därför begränsas arbetet också till att endast undersöka de faktorer som påverkar termisk sprickbildning och genomsläppt strålning. Inga slutsatser dras kring hur dessa faktorer kan vara applicerbara för att förutspå hur fönster presterar vid verkliga bränder.

2 Tillvägagångssätt och metoder

Arbetet påbörjades genom att upprätta en idéformulering tillsammans med en projektplan för att redovisa vad som skulle undersökas och vilka resurser som krävdes. Därefter genomfördes en litteraturstudie där relevant litteratur inom området undersöktes för att ge fördjupad kunskap om hur experimenten skulle genomföras och för att svara på en del av frågeställningarna. Därefter genomfördes experiment som analyserades för att svara på de resterande frågeställningarna. Därefter diskuterades resultatet från försöken för att dra relevanta slutsatser. Efter detta redovisades de slutsatser som kunde dras från både litteratursökningen och de genomförda experimenten. Till sist togs några förslag upp på hur vidareutveckling av rapporten kan ske. Ett flödesschema av det beskrivna tillvägagångssättet visas i Figur 1. En mer ingående beskrivning av några av arbetets metoder presenteras under de nästkommande avsnitten.



Figur 1: Flödesschema för metoden som använts under arbetet

2.1 Litteraturundersökning

Den första delen av arbetet bestod av en litteraturundersökning med mål att få en fördjupad förståelse för glas, strålningspåverkan på glas och den forskning som tidigare utförts inom området. Den utfördes mellan september och oktober 2024. Resultatet av litteraturundersökningen presenteras i form av ett teoriavsnitt i nästa kapitel.

För att hitta litteraturen har sökmotorerna LUBSearch och Google Scholar använts. De olika sökord som har använts i olika kombinationer för att hitta litteraturen presenteras i tabell 1 nedan. Utöver dessa sökord användes också snöbollstekniken som finns beskriven i boken *Forskningsmetodik 2.0* (Säfsten & Gustavsson, 2019, s. 83). Metoden innebär att referenslistorna för de funna artiklarna studerads för att hitta fler relevanta artiklar att undersöka. Efter att ett stort antal källor hade hittats

gjordes ett urval av dessa där de som hade högst relevans för arbetet valdes ut för djupare undersökning.

Tabell 1: Sökord som användes i litteraturundersökningen

Svenska	**Engelska**
Glas	Glass
Strålning	Radiation
Brand	Fire
Floatglas	Float glass
Termisk sprickbildning	Thickness
	Transmission
	Glass breakage
	(Critical) heatflux
	Shading width

2.2 Experiment

Den andra delen av arbetet bestod av experimentella försök som utfördes i brandlabbet på LTH under två veckor i november 2024. Där utsattes 48 glasskivor av tjocklekar mellan 2 och 8 mm för värmestrålning mellan 5 och 40 kW/m^2. Detta gjordes i syfte för att undersöka hur de påverkas av strålningen och hur kritisk temperatur och tid till sprickbildning påverkas av detta. Utformningen av denna del av arbetet var inte exakt bestämt innan litteraturundersökningen utfördes då det behövdes mer kunskap för hur denna del skulle utföras, till exempel val av lämpliga strålningsnivåer och mått på glasskivor. En fördjupad beskrivning av uppställningen för de genomförda experimenten återfinns i kapitel 4.1.

3 Resultat av litteraturundersökning

I detta avsnitt redovisas resultatet av litteraturundersökningen som presenterades i avsnitt 2.1. Det som har undersökts är bland annat bakomliggande teori och undersökningar om glas uppbyggnad, strålningspåverkan och sprickbildningsegenskaper.

3.1 Glas

Glas är ett vanligt material som återfinns i de flesta byggnader och då olika byggnader ställer olika krav på bland annat brandspridning, säkerhet och utseende finns det flera olika typer av glas med olika egenskaper. Tillverkningen av ”vanliga” floatglas sker genom att sand, soda, kalksten och en del andra tillsatser smälts och blandas ihop. Detta är den typ av glas som vanligen används i fönster och har fått namnet från hur det produceras, genom floatprocessen. Denna process har använts sedan 1950-talet och var då revolutionerande för glastillverkningen för att den var så pass kostnadseffektiv. I den matas materialblandningen in i en smältugn där den flytande glasmassan ligger på en plan tennyta för att sedan stelna. Detta sker för att glas har en lägre densitet än tenn och kan därför flyta på dess yta. Då tenn har en lägre smältpunkt än glas är tennet i flytande form när glaset stelnar vilket leder till att glaset får en jämn tjocklek och minimalt med repor. Glasen i denna process kan ha tjocklekar från 0,4 till 25 mm (Carlson, Bygga med glas, 2005). Däremot är en vanlig tjocklek för floatglas som används i fönster är 4 mm, dock kan tjockare användas om till exempel glaset är utsatts för större påfrestningar eller krav på bättre bullerskydd (Fönsterexperter, u.å).

Glas är ett material som på grund av en oordnad molekylstruktur kan släppa igenom ljus och därför ses som genomskinligt (Carlson, Bygga med glas, 2005). Anledningen till att molekylstrukturen i glas släpper igenom synligt ljus är att fotonerna med den våglängden har för låg energi för att excitera elektronerna i glaset och passerar därmed rakt igenom. Däremot har fotonerna vid vissa andra våglängder tillräckligt med energi för att excitera elektronerna vilket är anledningen till att glaset värms upp av värmestrålning (Moriarty, 2011). Hur den termiska strålningens våglängder interagerar med floatglas tas upp i avsnitt 3.2.4.

3.1.1 Hållfasthet

När glas belastas sker en elastisk deformation som vid överbelastning leder till att glaset spricker, ett så kallat sprött brott, till skillnad från till exempel stål som kan deformeras plastiskt innan ett brott sker. För vanliga planglas är den praktiska draghållfastheten låg jämfört med den teoretiska. Detta beror bland annat på att glasytan och glaskanten kan ha ett stort antal mikrosprickor. Antalet mikrosprickor varierar mellan olika glas och beror både på tillverkningen och hur de skärs i mindre bitar, en dålig skärning av glas kan skapa brottanvisningar och ojämnheter i glaskanten som minskar hållfastheten. Detta beror på att spänningarna koncentreras vid dessa ojämnheter vilket leder till att brott kan uppstå vid en mycket lägre nivå än för andra fall (Carlson, 2005).

Joshi & Pagni (1994) gjorde försök där brottspänningen för glas undersöktes och resultatet kunde beskrivas med en sannolikhetsfördelning för vid vilken spänning glas spricker. Slutsatsen som drogs från denna sannolikhetsfördelning var att runt 40 MPa ligger den lägsta nivå som glasproven sprack på. Att bestämma den dimensionerade hållfastheten för glas görs vanligen med en sannolikhetsfördelning för att ta hänsyn till olikheter mellan olika glas (Carlson, 1992)

3.1.2 Termisk påverkan

Vid värmepåverkan utvidgas glas likt många andra material, som till exempel stål och trä. Vid brand är denna utvidgning stor, cirka 1 mm/m och 100 °C temperaturhöjning, och har en stor betydelse för glasets sprickbildning. Vid bostadsbränder spricker ofta fönsterglasen och detta beror på den termiska utvidgningen. Fönsterkanterna är ofta skyddade av ramen vilket innebär att den skuggade delen inte utsätts för direkt värmepåverkan. Då glas har en låg värmeledande förmåga leder det till att glasets mittparti expanderar medan kanterna inte gör det. Detta skapar tryckspänningar i mitten av glaset och

dragspänningar i kanten som vid en tillräckligt hög temperaturgradient skapar såpass höga spänningar i glaset att det spricker (Carlson, 2005).

Floatglas har risk att spricka vid en temperaturgradient på 40 °C vilket är lågt jämfört med värmeförstärkt- och härdat glas som inte riskerar att spricka förrän vid en temperaturgradient på 100 respektive 200 °C. Anledningen till att dessa typer tål värme bättre är att de har högre hållfasthet. Härdade glas värms upp till cirka 600 °C för att sedan snabbt kylas ned. Detta medför att det skapas tryckspänningar i ytskiktet och dragspänningar i mitten av glaset vilket ökar hållfastheten 4–5 gånger jämfört med floatglas. Vid tillverkningen av det värmeförstärkta glaset sker nedkylningen långsammare vilket innebär att hållfastheten inte ökar lika mycket som för härdat glas. Det värmeförstärkta glaset kan ses som en blandning mellan floatglas och härdat glas (Carlson, 2005).

Hur sprickbildningen i floatglas ser ut beror på vad som orsakat sprickan. Till exempel när något har kastats på ett fönsterglas bildas raka sprickor från där glaset träffats. Om glaset däremot spricker på grund av temperaturgradienter börjar sprickan i området med högst spänning, vilket ofta är i kanterna av glaset, och bildar böljande sprickor (Vitro Architectural Glass , 2020). Ett exempel på hur detta kan se ut visas Figur 2.

Figur 2: Sprickbildning i ett av de glas som användes under försöken

Andra typer av glas spricker på olika sätt, till exempel spricker härdat glas i väldigt små trubbiga bitar och för laminerat glas sitter det spruckna glaset kvar i lamineringsfolien så att inga bitar faller ut (Glasbranschföreningen, 2024).

3.2 Värmeöverföring

Konduktion, konvektion och strålning är de tre huvudsakliga sätten för transport av värme. Konduktiv värmeöverföring brukar också kallas för ledning och beskriver hur värme transporteras i fasta material. Konvektion beskriver värmeöverföringen som sker mellan gaser eller vätskor i rörelse och ett fast material, till exempel avkylning av varm mat genom att blåsa på den. Strålningens värmeöverföring sker genom elektromagnetiska vågor och kräver inget medium för att kunna transportera värmeenergin (Drysdale, 2011).

3.2.1 Konduktion

Konduktion beskriver värmeöverföringen i fasta material som uppkommer på grund av temperaturskillnader. Konduktivitet mäts med enheten W/mK där ett högre värde innebär att ett material leder värme bättre. I tabell 2 nedan redovisas konduktiviteten för ett antal olika material för att kunna jämföras med glas.

Tabell 2: Redovisar konduktiviteten för några vanliga byggmaterial (Karlsson & Quintiere, 2022)

Material	**λ (W/mK)**
Koppar	395
Aluminium	218
Betong	0,8–1,4
Glas	0,8
Gips	0,48
Mineralull	0,041

Utifrån tabell 2 framgår det att glas inte är en bra värmeledare men inte heller ett bra isolerande material.

3.2.2 Konvektion

Konvektion som sker genom strömningar av fluider kan antingen vara påtvingad eller naturlig. Påtvingad konvektion innebär att externa krafter som till exempel vind är involverade för att öka den konvektiva värmeöverföringen. Naturlig konvektion uppkommer naturligt på grund av temperatur- och därmed densitetskillnader i luften som skapar rörelse. Hur stor konvektionen är kan beräknas med hjälp av följande ekvation:

$$\dot{q}'' = h\Delta T \qquad \text{(Ekvation 1)}$$

där

$\dot{q}''$= Konvektiv värmeöverföring [W/m^2]

h = Konvektivt värmeövergångstal [W/m^2K]

ΔT = Temperaturskillnad mellan objekt och omgivande fluid [K]

Det konvektiva värmeövergångstalet varierar för naturlig respektive påtvingad konvektion och brukar ligga i spannen 5–50 W/m^2K och 25–250 W/m^2K (Drysdale, 2011). Detta innebär att varma ytor kyls ned mer om det blåser på dom, till exempel svalnar varm mat snabbare om man blåser på den. I de experiment som ska utföras kommer främst naturlig konvektion att dominera för att kyla ned provkropparna som kommer att värmas upp av den infallande strålningen.

3.2.3 Strålning

Strålning är det sista av de tre värmöverföringssätten och sker genom elektromagnetiska vågor främst i det synliga och infra röda spektrumet. Strålningen består av fotoner och när de stöter ihop med en atom tar denna upp dess energi och värms upp om fotonen har tillräckligt med energi. När glas och andra material värms upp förlorar de värme delvis på grund av konvektion i luften men även genom strålning. Konvektiv värmeöverföring dominerar främst vid lägre temperaturer, 150–200 °C, medan strålning är den huvudsakliga värmeöverföringen över 400 °C. Sambandet mellan temperaturen av ett objekt och hur mycket strålning som det avger visas i ekvation 2 (Drysdale, 2011).

$$E = \sigma\varepsilon T^4 \qquad \text{(Ekvation 2)}$$

där

E = Avgiven strålning [W/m^2]

σ = Stefan Boltzmanns konstant ($5{,}67 * 10^{-8}$) [W/m^2K^4]

ε = Emissionstal [-]

T = Temperatur på det avgivande objektet [K]

Emissionstalet, ε, beskriver hur bra ett objekt är på att stråla ut energi med ett tal mellan 0 och 1 där 1 beskriver en ideal svartkroppsstrålare (Drysdale, 2011). Glas emissionstal kan variera mycket beroende på om de har lågemissionsfilm eller ej. En lågemissionsfilm är en tunn beläggning som kan appliceras på ett glas för att öka energieffektiviteten och reflektera en större del av den infallande solstrålningen (Bülov-Hübe, u.å). Vanligt floatglas brukar ha ett emissionstal runt 0,8–0,9 medan de med emissionsfilm kan ha ett så lågt värde som 0,04 (Cuzzillo & Pagni, 1998).

3.2.4 Våglängd

Värmestrålning är som tidigare nämnt en del av det elektromagnetiska spektrumet där olika strålning med olika våglängder har olika egenskaper, såsom energimängd. Dessa våglängder brukar delas in i olika typer beroende på dess olika egenskaper, som till exempel infraröd strålning, gamma-strålning, mikrovågor, synligt ljus och UV-strålning. Värmestrålningen sker, som tidigare nämnts, främst i det synliga och infraröda spektrumet och i detta spektrum är glas genomskinligt för vissa våglängder men inte för andra. Enkelt förklarat är glas ogenomskinligt för våglängder över 4,5 μm och genomskinligt för våglängder under 2,75 μm. I mellan dessa våglängder är glaset semi-transparent och absorberar endast en del av strålningen (Rantala, 2015). Detta innebär att glasets transmission förändras beroende på den våglängd som det utsätts för.

3.2.5 Transmission, reflektion och absorption

Den strålning som träffar en glasyta kan delas upp i tre olika delar: transmission, reflektion och absorption. Transmissionen är den strålning som passerar igenom glaset utan att interagera med den, reflektion är den del som ”studsar” tillbaka och absorptionen är den del som glaset tar upp och värms upp av (Rantala, 2015). Andelen för reflektionen ändras inte mycket med temperaturen utan brukar ligga runt 10 % för värmestrålning. Däremot påverkar temperaturen andelen som transmitteras och därmed också absorptionen (Pagni, 2002).

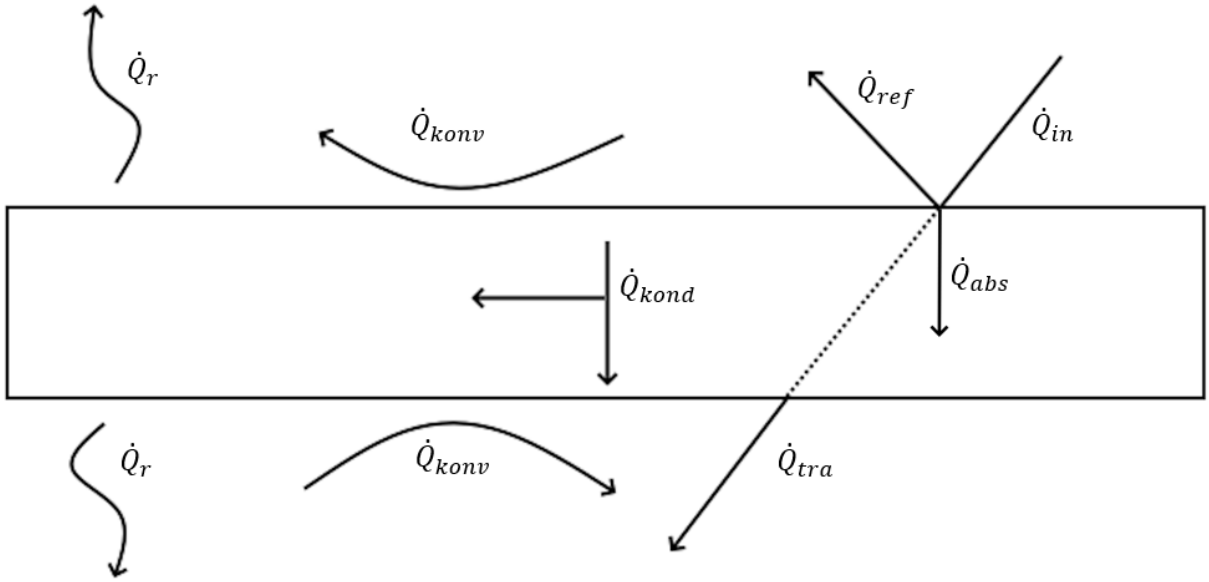
Enligt Kirchhoffs strålningslag är absorptionen och emissionen för ett material lika stora. Detta betyder att emissionstalet för glas är inte konstant utan beror temperaturen, där en högre temperatur innebär att emissionstalet minskar. Det beror på att vid högre temperaturer avges mer strålning med kortare våglängder, som glaset är genomskinligt för. Detta minskar absorptionen och därmed emissionen för glaset (Rantala, 2015).

Transmissionen påverkas av temperaturen på den avgivande strålningskällan, där en högre temperatur innebär att en större del av strålningen transmitteras. Detta beror på att vid högre temperaturer avger strålningskällan en större andel kortare våglängder (under 2,75 μm) som kan transmitteras genom glaset (Rantala, 2015). Teoretiskt ska det under 600 K transmitteras nästan ingen strålning medan cirka 25 % av strålningen transmitteras vid 1250 K (Pagni, 2002). Detta innebär att vid högre strålningsnivåer kommer en större del av strålningen att transmitteras genom glaset.

3.2.6 Termisk jämvikt

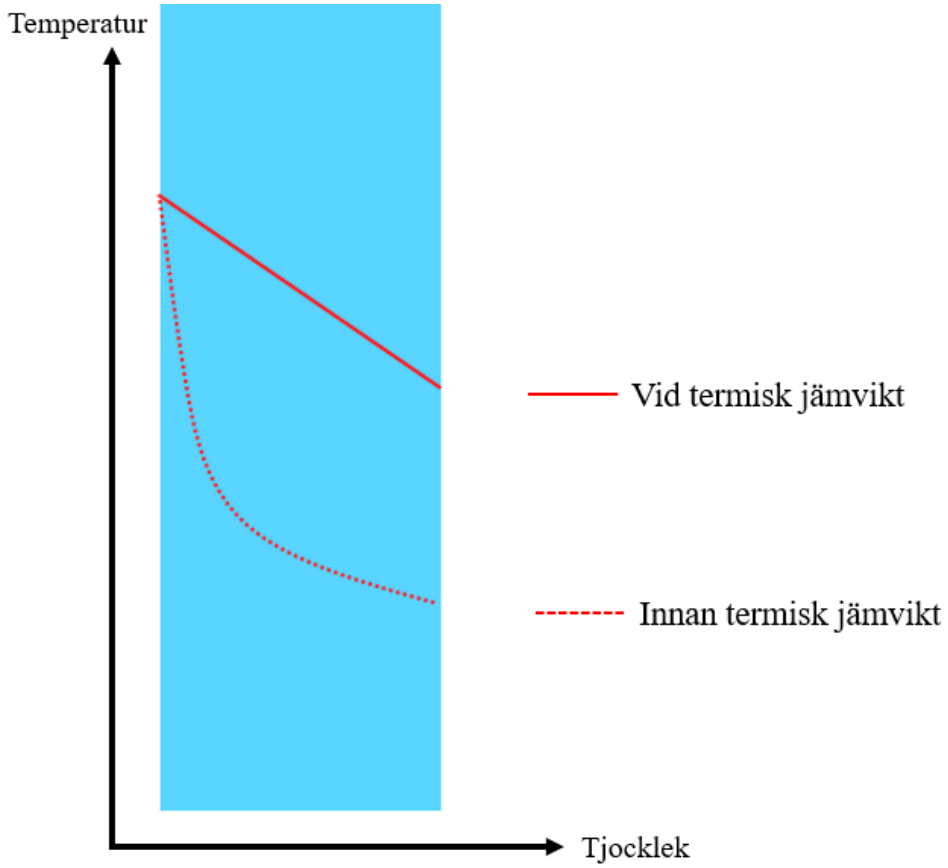
Då glas utsätts för en konstant infallande strålning kommer strålningen på andra sidan rutan att vara mindre i början än efter en stunds påfrestning. Detta beror på att glaset kommer att absorbera en del av strålningen som sedan värmer upp glaset. När glaset sedan blir varmare kommer den absorberade strålningen i glasskivan att avges vilket leder till att den uppmätta strålningen på baksidan av glaset är högre än i början. I Figur 3 nedan visas en schematisk bild över hur värmeöverföringen sker genom

och på en glasruta. Den infallande strålningen kan som tidigare nämnts delas upp i tre delar: transmission, reflektion och absorption.



Figur 3: Schematisk bild över hur värmeöverföring sker vid strålningspåverkan för en glasruta

När termisk jämvikt har uppnåtts ska ingen förändring av temperaturgradienten ske i Figur 4 visas en graf över hur temperaturgradienten i en glasskiva över dess tjocklek kommer att se ut beroende på om jämvikt har uppnåtts eller inte.



Figur 4: Visar hur temperaturprofilen ser ut i ett tvådimensionellt material beroende på om termisk jämvikt har uppnåtts eller ej

Hur snabbt den termiska jämvikten uppnås beror på värmediffusiviteten för materialet som i sin tur beror på konduktiviteten, densiteten och värmekapaciteten för ett material (Drysdale, 2011). Sambandet mellan dessa storheter beskrivs i ekvation 3 nedan.

$$\alpha = \frac{\lambda \rho}{c} \qquad \text{(Ekvation 3)}$$

där

α = Värmediffusivitet $[m^2/s]$

λ = Konduktivitet [W/mK]

ρ = Densitet $[\mathrm{kg/m^3}]$

c = Värmekapacitet [J/KgK]

Innan den termiska jämvikten uppnås kan material delas upp i två olika extremtyper med hänseende på konduktiv värmeöverföring. Dessa två typer är termiskt ”tunna” material och halvoändliga material. I de termiskt tunna materialen är temperaturgradienten över dess tjocklek nästan obefintlig och därför kan materialet antas ha en jämnt fördelad temperatur. Detta gäller för tunna material med hög värmeledande förmåga. I de halvoändliga materialen, som till exempel tjocka betongväggar, antas materialet vara så pass tjockt och termiskt trögt att avkylningen på materialets baksida i princip är obefintlig (Drysdale, 2011).

För att veta när termisk jämvikt uppnås under försöken ska den uppmätta strålningen på baksidan av rutan konvergera mot ett värde. Baserat på tidigare utförda försök av Johansson & Steen (2017) och Mowrer (1998) bör detta uppnås efter cirka 10 minuter för floatglas som är cirka 3 mm tjocka. För att alla tjocklekar som ska nå termisk jämvikt under försöken ska göra det kommer dessa att pågå i 20 minuter.

3.3 Tidigare undersökningar om floatglas vid strålnings- och temperaturpåverkan

I det här kapitlet presenteras en sammanställning av rapporter och undersökningar som har studerat hur olika variabler påverkar floatglas vid uppvärmning och strålningspåverkan. De variabler som har sammanställts här är:

- Glastjocklek
- Glasstorlek
- Förhållande mellan glasets längd och bredd
- Storleken av glasområdet som är skuggad från direkt värmepåverkan
- Konstant eller ökande värmepåverkan
- Olika strålningsnivåer
- Lägst infallande strålning för sprickbildning
- Transmission

3.3.1 Glastjocklek och kritisk temperaturgradient

För att fönsterglas ska spricka vid höga temperaturer krävs att en temperaturgradient över glaset uppnås. Li et al. (2012) undersökte hur floatglas tjocklek påverkar sprickbildning och genomförde försök med en ökande strålningspåverkan från en strålningspanel som skulle likna en verklig brand. De glas som undersöktes var 400 x 370 mm stora, hade tjocklekar mellan 3 och 10 mm och skuggades i de 15 yttersta millimetrarna av kanterna mot direkt strålningspåverkan. Resultaten av försöken visade att den kritiska temperaturgradienten varierade mellan ungefär 40 och 60 °C för de undersökta glasen. Dock kunde ingen tydlig trend utläsas vilket ledde till slutsatsen att den temperaturgradient som krävdes över glasets yta för att få det att spricka inte visade någon större skillnad mellan de olika tjocklekarna.

Wang et al. (2023) testade glasprover som var 100 x 100 mm stora, hade tjocklekar mellan 6–19 mm och var skuggade 10 mm i kanterna. Proverna utsattes för en konstant strålningspåverkan på 50 kW/m^2 i en konkalorimeter. Under försöken studerades också hur tjockleken påverkar temperaturgradienten vid sprickbildning och en liknande trend som det Li et al. (2012) uppmätte angående att den inte förändrades nämnvärt med ökande tjocklek visades även här. Dock blev resultatet i den här undersökningen att den kritiska temperaturgradienten varierade mellan 76 och 104 °C vilket är högre än det Li et al. (2012) noterade. Vad detta beror på är svårt att svara på exakt då många av de betydande faktorerna för sprickbildning skiljer sig åt mellan de olika försöken. Bland de övriga slutsatser som kunde dras från undersökningen av Wang et al. (2023) framkom det att för glasprover som är tunnare än 15 mm är temperaturgradienten över ytan den högsta medan för glas som är tjockare än detta verkar temperaturgradienten över tjockleken också ha en betydelse för sprickbildningen.

Li et al. (2012) och Wang et al. (2023) undersökte utöver den kritiska temperaturgradienten även hur tiden varierade till sprickbildning för olika tjocklekar. Trots att många variabler skiljde mellan undersökningarna fann båda att en ökad glastjocklek innebar att tiden tills glaset gick sönder ökade. Detta förklarades med att tjockare glas har högre värmekapacitet och därmed får en lägre temperatur vid samma strålningsnivå som tunnare glas.

3.3.2 Glasstorlek och förhållande mellan längd och bredd

Hur storleken av fönsterglas påverkar tiden till sprickbildning är något Wang et al. (2018) har undersökt genom numeriska beräkningsprogram. Vid försöken simulerades glas med storlekar från 10 x 10 cm till 100 x 100 cm med en 20 mm bred skuggning av kanten. Det framkom att desto större glaset är desto kortare tid tar det för sprickor att uppstå då det utsattes för värmepåverkan. Detta förklarades med att en ökning av glasets storlek ökar antalet mikrosprickor och slumpmässiga fel i glaset vilket leder till en minskad hållfasthet.

Wang et al. (2018) undersökte också hur förhållandet mellan glasets bredd och höjd på glasrutor påverkar tiden till sprickbildning genom numeriska beräkningsprogram. Vid försöken utfördes försök på glas med förhållanden från 25:16 till 400:1, där 400:1 är en väldigt utdragen rektangel medan 25:16 nästan ser ut som en kvadrat. Resultatet av detta var att vid en större skillnad mellan längden och bredden på glaset var tiden till sprickbildning längre och en mindre del av rutan verkade falla ur ramen vilket innebär att ventilationsöppningen för en potentiell brand blir mindre.

3.3.3 Skuggat område

En annan aspekt som påverkar hur glas spricker är storleken av det område som är skuggat från direkt värmepåverkan. Jørgensen et al. (2022) undersökte detta och upptäckte att bredden av det skuggade området påverkade både tiden till sprickbildning och den kritiska temperaturgradienten. Vid försöken utsattes glas som var 400 x 400 x 4 mm för strålningsnivåer på 5, 10 och 15 kW/m^2. Vid försöken värmdes glasen upp av en gasbrännare vilket innebar att den infallande strålningen fluktuerade lite under försöken. Bredden på det skuggade området, som var gjort av isolerande material, varierades mellan 10 och 25 mm under experimenten. För strålningsnivåer under 5 kW/m^2 innebar en ökad bredd att tiden till sprickbildning minskade medan det i försöken med 10 kW/m^2 eller mer inte verkade ha någon påverkan. Detta förklarades med att vid en låg infallande strålningsnivå (under 5 kW/m^2) är uppvärmningen av glaset långsammare och mer värme kan transporteras till den skuggade delen vilket fördröjer tiden till att en kritisk temperaturgradient uppnås. Angående den kritiska temperaturgradienten verkade en ökad bredd medföra en liten ökning av denna, men någon tydlig trend kunde inte urskiljas. En enligt, Jørgensen et al. (2022), var en rimlig förklaring till detta är att en större bredd på det skuggade området kan skapa högre spänningar och därmed spräcka glaset vid en lägre temperaturgradient.

Chen et al. (2017) undersökte också hur bredden av det skuggade området påverkar sprickbildning Försöken utfördes med glas som var 600 x 600 x 6 mm stora och den skuggade bredden, som var gjord

av en aluminium ram, varierades mellan 10 och 50 mm. Under försöken värmdes glasen upp men en strålningsplatta som ökade temperaturen med 15 °C/min. Dessa resulterade i att tiden till sprickbildning minskade fram till och med en skuggningsbredd på 20 mm för att sedan öka för 30, 40 och 50 mm. I rapporten diskuteras det kring att det enligt resultaten från försöken verkar finnas en ”kritisk” skuggningsbredd för glas som medför den kortaste tiden till sprickbildning. Varför det skulle vara så förklaras inte av Chen et al. (2017) men en rimlig förklaring skulle kunna vara att vid en stor skuggningsbredd (över 20–30 mm) kan inte termiska expansionskrafter skapas i glasets mitt lika snabbt vilket innebär att tiden till sprickbildning ökar.

De resultat Chen et al. (2017) fick liknar det Jørgensen et al. (2022) noterade angående sprickbildningtiden. I försöken av Chen et al. (2017) minskade sprickbildningtiden upp till och med 20 mm medan sprickbildningtiden under försöken utförda av Jørgensen et al. (2022) minskade upp till och med 25 mm skuggningsbredd. Dock undersökte Jørgensen et al. (2022) inte större skuggningsbredder än 25 mm vilket gör det svårt att jämföra med de resultat som Chen et al. (2017) fick. Det är också svårt att direkt jämföra resultaten då flera faktorer skiljer mellan försöken som till exempel glasens tjocklek och storlek som troligen påverkar vid vilken skuggningsbredd som detta ”kritiska” värde, som Chen et al. (2017) noterade, skulle uppstå vid.

Det noterades också under försöken utförda av Chen et al. (2017) , likt Jørgensen et al. (2022), att en ökad bredd på skuggningsområdet innebar att den kritiska temperaturgradienten ökade marginellt men inte heller här kunde någon tydlig trend urskiljas.

3.3.4 Konstant eller ökande värmepåverkan

En variabel som skiljer en del av de undersökningar som nämnts i det här avsnittet är om glasproverna utsatts för en konstant värmepåverkan eller en som ökar över tid. Till exempel utsatte Jørgensen et al. (2022) glasen för konstanta strålningsnivåer medan Chen et al. (2017) utsatte glasen för en ökande värmepåverkan med hastigheten 15 °C/min. Generellt bör en ökande värmepåverkan innebära att tiden till sprickbildning ökar för att den startar vid en nivå som är lägre en den konstanta strålningsnivån. När detta sker kan mer värme konduktivt kan ledas in i glasets skuggade område vilket innebär att en kritisk temperaturgradient tar längre tid att uppnå.

3.3.5 Olika strålningsnivåer

Många tidigare undersökningar visar på att en högre strålningsnivå innebär att tiden till sprickbildning minskar, vilket beror på att en kritisk temperaturgradient uppnås snabbare. Några exempel på dessa är bland annat Harada et al. (2000), Mowrer (1998) och Jørgensen et al. (2022). En aspekt som både Harada et al. (2000) och Jørgensen et al. (2022) noterade under försöken var att vid en högre strålningsnivå föll en större andel av glasrutan ur ramen.

Den lägsta infallande strålningsnivå som kan orsaka sprickbildning i glas beror på många faktorer men några undersökningar har studerat detta. Harada et al. (2000) undersökte hur olika strålningsnivåer påverkar 3 mm tjocka floatglas som var fritt stående och fasthållna. Glasen var 500 x 500 mm stora och 15 mm av kanten var skuggad från direkt strålningspåverkan. Vid försöken sprack aldrig glasen vid en infallande strålningsnivå som var lägre än 5 kW/m^2 och det verkade heller inte finnas någon väsentlig skillnad mellan om glasen var fritt stående eller fasthållna.

Mowrer (1998) utförde småskaliga experiment på floatglas med en ram gjord av trä. Glasen hade måtten 34 x 23 cm och i kanten skuggades 3 cm med ramen. Resultaten av dessa försök visade att det krävs en infallande strålning mellan 4–5 kW/m^2 för att glaset ska spricka vilket stämmer överens med det Harada et al. (2000) noterade. I samma rapport utfördes även storskaliga försök med glas som var 61 x 81 cm stora. Resultatet visade att dessa krävde en strålningsnivå mellan 7–10 kW/m^2 för att sprickbildning skulle ske. I Mowrers (1998) rapport kunde inte tjockleken av de undersökta glasen utläsas vilket gjorde det svårt att jämföra med Harada et al. (2000).

3.3.6 Transmission

Mowrer (1998) noterade också under experimenten att när en termisk jämvikt var nära att uppnås transmitterades ungefär en tredjedel av den infallande strålningen genom de 2,5 mm tjocka glasen. Detta skiljer sig från det Johansson & Steen (2017) uppmätte, där cirka två tredjedelar av den infallande strålningen transmitterades då jämvikt börjar uppnås både för floatglas och härdat glas. Anledningen till den högt uppmätta transmissionen av dem kan enligt Pagni (2002) förklaras med att de även uppmätte den strålning som glaset avger då det har värmts upp. Däremot är det intressant ur ett brandspridningsperspektiv att studera den totala strålningen på baksidan av glasen. Som nämnts i avsnitt 3.2.3 beror den del av strålningen som transmitteras genom glas på hur hög temperaturen som den avgivande strålningskällan är. Vid en temperatur på 600 K transmitteras endast 1 % av strålningen medan vid 1400 K transmitteras 31 %. Detta stämmer bra överens med det Mowrer (1998) uppmätte.

3.3.7 Avslutande ord

Det finns flera faktorer som påverkar sprickbildningen av glas vid värmepåverkan och många försök har tidigare utförts inom området. Då glas är ett material med varierande hållfasthet mellan olika provkroppar är det svårt att dra tydliga slutsatser kring hur mycket dessa olika faktorer påverkar individuellt. Många av försöken som har jämfört likande parametrar har gjort detta med olika storlekar, experimentella uppställningar, strålningsnivåer, tjocklekar och ramar vilket gör det svårt att jämföra olika försök med varandra då dessa också är faktorer som har stor påverkan på sprickbildningen i glaset.

4 Beskrivning av experiment

I detta avsnitt presenteras genomförandet av experimenten samt den försöksuppställning och de material som användes.

4.1 Försöksuppställning och material

Vid försöken användes en konkalorimeter som är gjord för att utföra försök enligt ISO 5660–1 (International Organization for Standardization, 2015). Vid provning enligt denna standard utsätts prover som är 10 x 10 cm för en förbestämd strålningsnivå till dess att de avger tillräckligt med pyrolysgaser för att antändas. Därefter antänds materialet och bland annat analyseras de avgivna rökgaserna och massförlusten för att beräkna effektutvecklingen (RISE, 2024). I Figur 5 visas konkalorimetern, dock utan våg då denna inte användes under försöken.

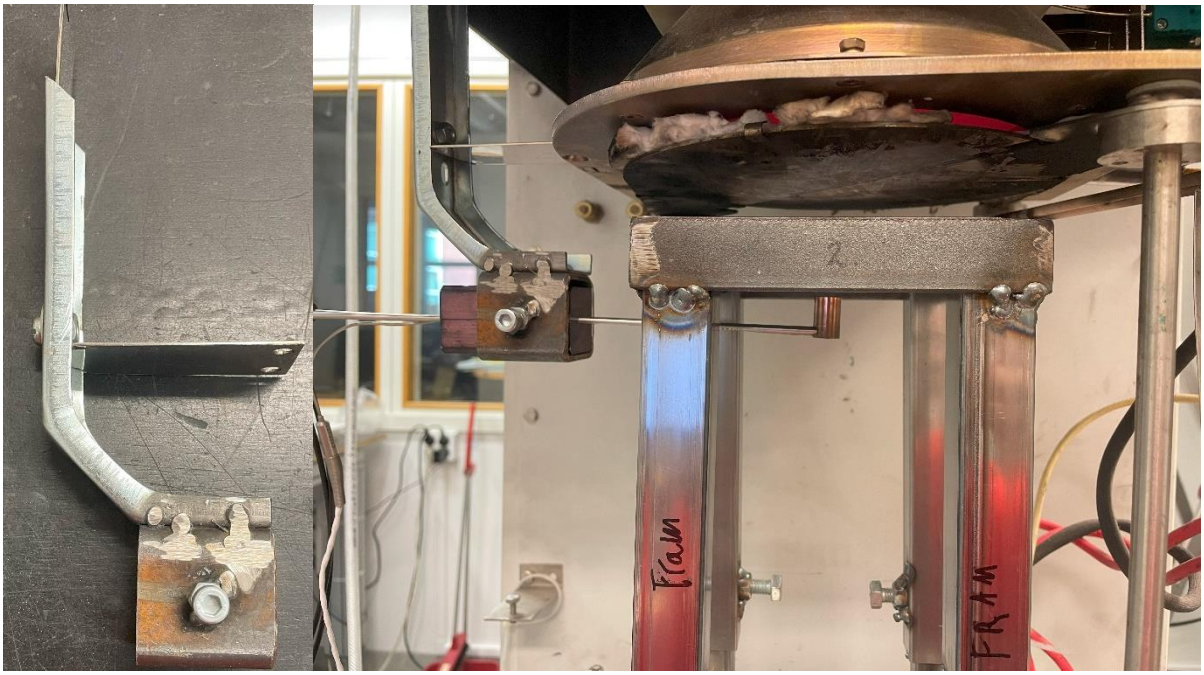
Figur 5: Kalibrering strålningsintensiteten av konkalorimetern genomförs innan försöken ska utföras

Vid försöken som utfördes användes konen endast för att uppnå en stabil strålningsnivå och inte till att analysera rökgaser och massförlust för att detta inte var relevant för arbetet. Strålningsnivåerna som användes under försöken var 5, 10, 20, 30 och 40 kW/m^2. Totalt genomfördes 54 olika försök där en del av dessa var repetitioner av tidigare genomförda försök. I bilaga 1 presenteras samtliga försök och resultaten för dessa. Strålningsmätaren som syns i figur 5 användes för att kalibrera och mäta strålningen på baksidan av glasproven. Den var under försöken vattenkyld för att kunna uppmäta en korrekt strålningsnivå.

Då vågen som finns i konkalorimetern inte var lämplig för att placera glasproverna på tillverkades en annan ställning som syns i Figur 6. För att metallställningens uppvärmning inte skulle påverka glaset placerades en 3 mm tjock bit isoleringsull (Kaowool 1260 Paper) mellan glasen och ställningen. Denna syns också i figur 6.

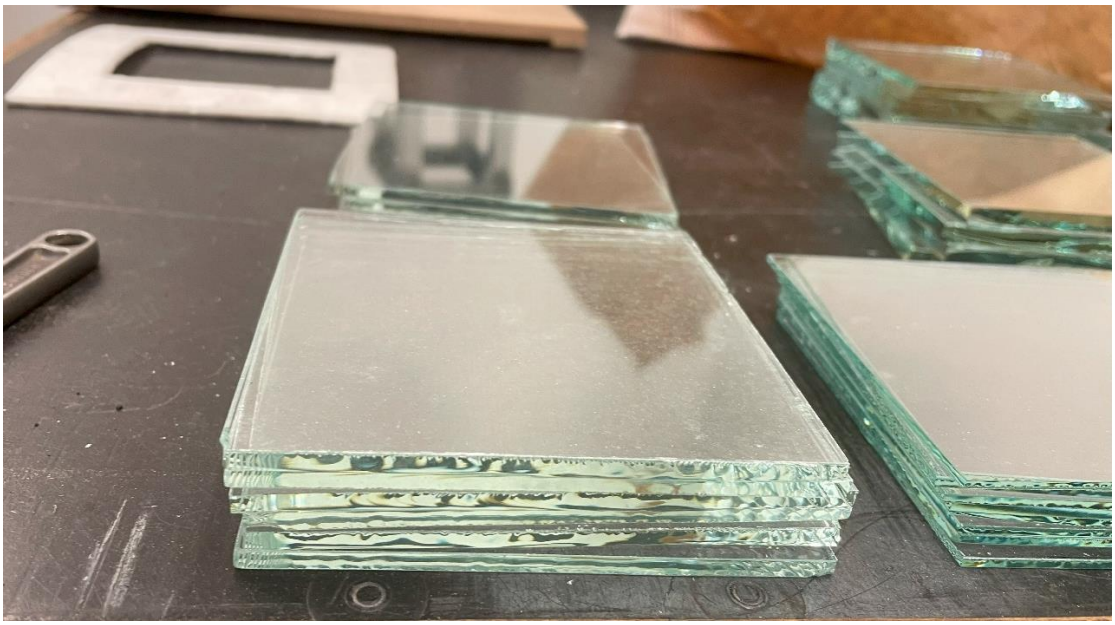
Figur 6: Till vänster: Den specialgjorda ställning som användes för att placera glasen på under försöken. Till höger: Den bit isoleringsull som placerades mellan glasproven och metallställningen under försöken

Till ställningen tillverkades också en hållare för en strålningsmätare för att kunna mäta strålningen på baksidan av glasproverna. Denna placerades så att strålningsmätaren alltid var placerad 6,7 cm från konens öppning. Hållaren för strålningsmätaren och dess placering i förhållande till konen visas i Figur 7.



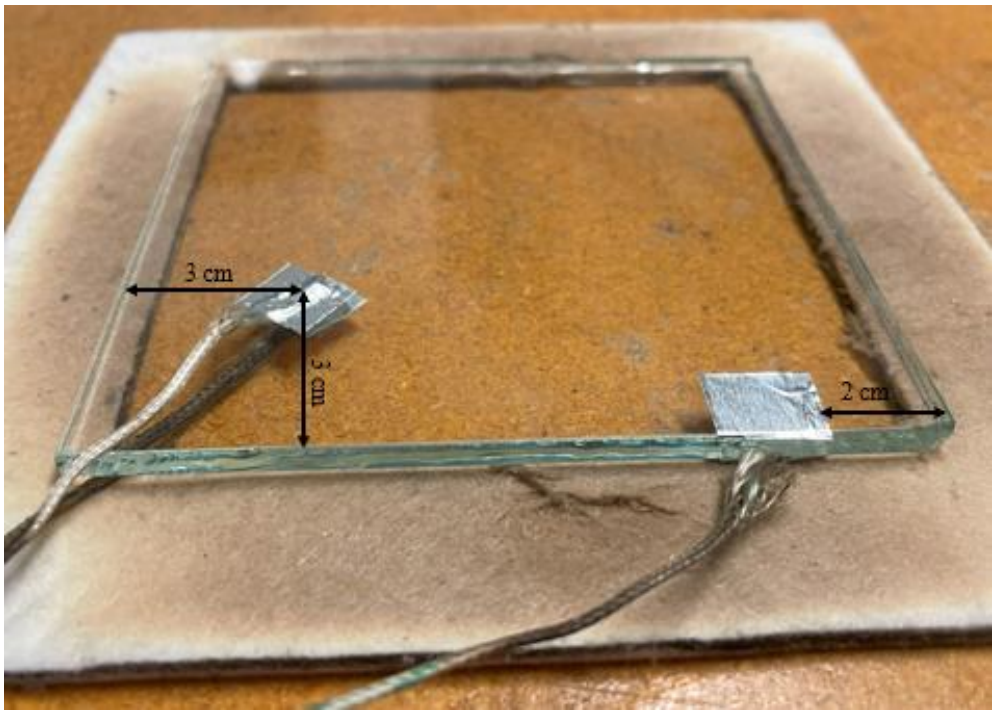
Figur 7: Till vänster: Hållare för strålningsmätare som användes under försöken. Till höger: Försöksuppställning som användes under experimenten

De försöksprover som användes vid försöken var donerade av Lunds Glasmästeri AB. Totalt skänktes 12 glas som var 20 x 20 cm stora med tjocklekarna 2, 4, 6, 8 mm. Dessa skars sedan för hand upp i provkroppar som var 10 x 10 cm. Detta innebar att vid försöken användes 12 glas av respektive tjocklek. I Figur 8 visas en bild på några av de glas som användes under försöken



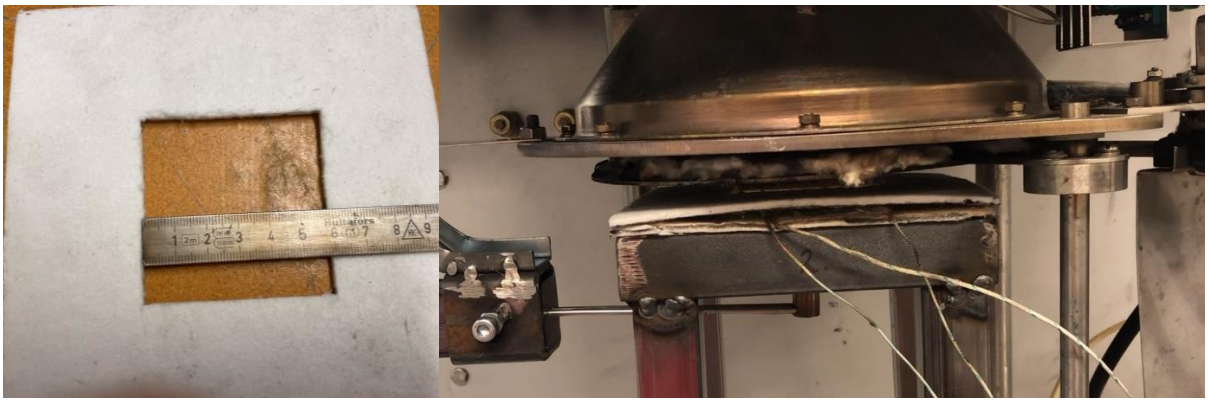
Figur 8: Längst fram till vänster: 4 mm tjocka glas. Längst fram till höger: 2 mm tjocka glas. I bakgrunden syns både 6 och 8 mm tjocka glas

Vid en del av försöken sattes termoelement fast på glasproverna med hjälp av aluminiumtejp. Anledningen var för att mäta upp den temperaturen på ett exponerat ställe och ett skuggat för att kunna se hur stor den kritiska temperaturgradienten var. Tejpen användes för att endast yttemperaturen på glaset skulle mätas och inte påverkas av den infallande strålningen. Termoelementen placerades på samma ställe i varje försök, se Figur 9. I en del av försöken användes tre termoelement medan i vissa användes endast två. Detta berodde på att vid försöken utan ram hade det termoelement som placerades på framsidan en tendens att lossna och påverka temperaturmätningen på termoelementet under. Därför gjordes beslutet att endast använda två termoelement placerade på baksidan av glaset vid de försök utan ram.



Figur 9: Placering av termoelement på glasproverna. Till vänster i bilden sitter även ett termoelement på baksidan av glaset.

Vid vissa försök placerades en till bit isoleringsull ovanpå glasytan för att skugga kanterna av glaset för att uppnå en temperaturgradient som var stor nog för att spräcka glasen. Denna gjorde att de två yttersta centimetrana av glaset skuggades från direkt strålningspåverkan, se Figur 10.



Figur 10: Till vänster: mått på den bit isoleringsull som användes för att skugga kanterna av glasproverna. Till höger: Bild på försöksupställningen med skuggande isoleringsbit

4.2 Genomförande

Vid genomförandet av försöken användes följande procedur**:**

- Konkalorimetern startades upp genom att följa instruktionerna i dess manual (Lund University, 2020). Strålningen ställdes in för att provkroppen skulle placeras 2,5 cm från konens öppning. De strålningsnivåer som konkalorimetern ställdes in på under försöken var 5, 10, 20, 30 och 40 kW/m^2.
- Strålningsmätarens nya hållare monterades i stället för den som användes vid kalibreringen.
- Metallställningen placerades mitt under konkalorimeterns huv. Vid det första försöket markerades ställningens placering så att den kunde ställas tillbaka på samma ställe vid de efterföljande testerna.
- Ställningens höjd ställdes in så att glasprovets yta var placerat 2,5 cm från konens öppning. För att enkelt kunna byta mellan olika höjder då olika glastjocklekar testades användes båtbrickor som var två millimeter tjocka.
- Glasproven och isoleringsullen som skulle placeras på ställningen förbereddes. Glasproven sattes inte fast utan låg fritt mellan de två isoleringsbitarna. Under de försök där termoelement användes tejpades dessa fast på proven på de positioner som syns i Figur 9.
- En kamera placerades och startades intill konen för att dokumentera experimentet.
- Därefter påbörjades försöket. Först öppnades luckan till konen under 2 minuter för att mäta den infallande strålningen. Därefter stängdes luckan. Glasprovet med tillhörande isoleringsull placerades på ställningen då cirka 4 minuter hade passerat. Luckan öppnades sedan igen då 5 minuter hade passerat.
- Försöket pågick till dess att glaset sprack eller att 20 minuter hade passerat.
- Glaset togs sedan bort från försöksställningen och placerades på en bänk för att svalna. Eventuellt glassplitter samlades upp från golv och försöksytan.
- Efter att alla försök var utförda placerades glasproven i ett säkert avfallskärl.

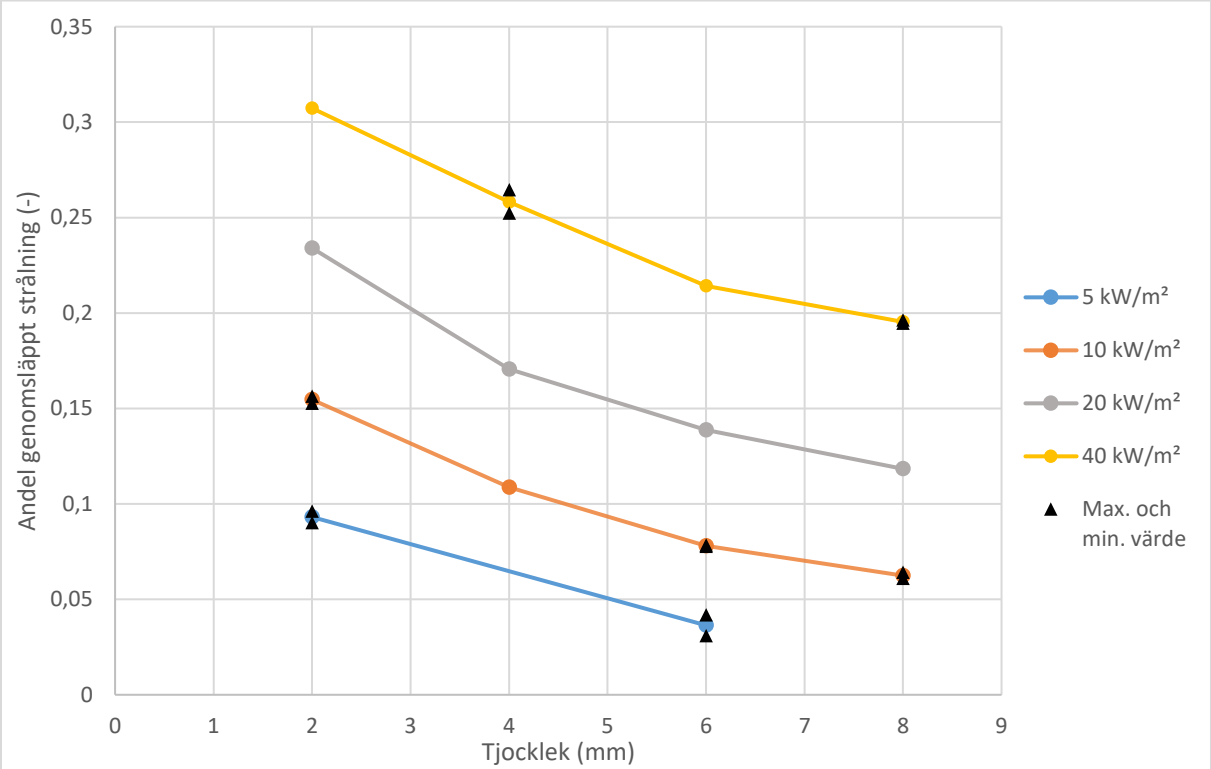
Mellan försöken tilläts försöksställningen att svalna en stund för att inte påverka nästkommande provkropp. Vid all hantering av glas och varma föremål användes skyddsoverall, skyddsglasögon, och handskar för att undvika eventuella bränn- och skärskador.

5 Resultat av experiment

I det här avsnittet presenteras resultatet från de utförda experimenten. All utdata som har använts för att skapa graferna som redovisas i det här kapitlet finns under Bilaga 1. En del utdata från vissa försök har inte använts vid framtagandet av detta kapitel för att den blev dålig av olika anledningar, vilket förklaras med kommentarerna från respektive försök i Bilaga 1.

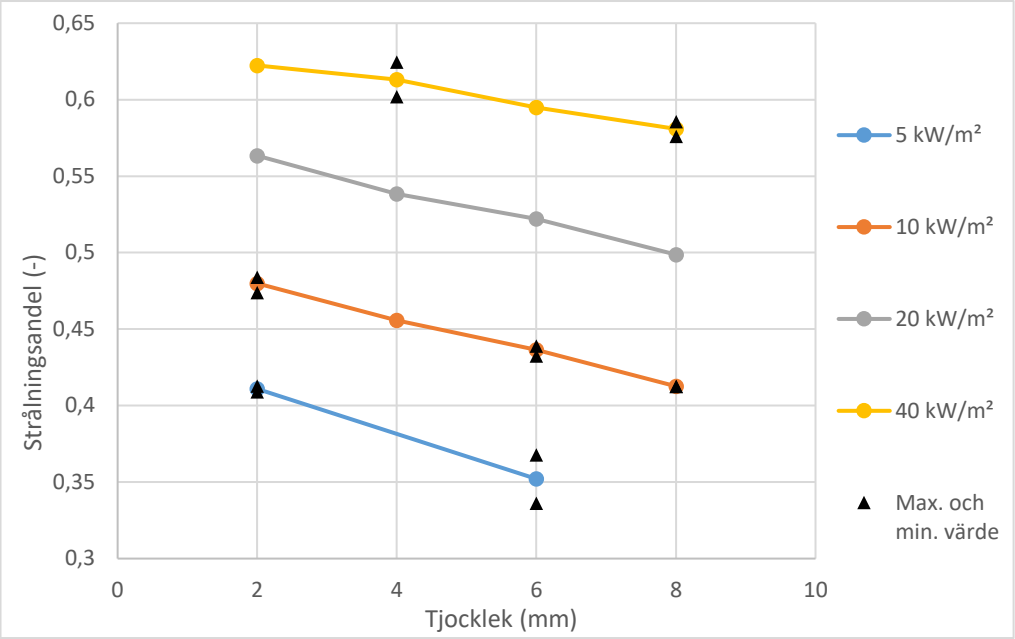
5.1 Genomsläppt strålning

Vid försöken uppmättes strålningsintensiteten på baksidan av glaset på ett konstant avstånd från framsidan av glasprovet. Grafen i Figur 11 jämför skillnaden mellan strålningsintensiteten bakom glaset direkt efter att luckan till konen öppnades och det som uppmättes utan att glaset var placerat där. I grafen jämförs hur både strålningsintensiteter och glastjocklek påverkar transmissionen för glasproverna. Då det med vissa kombinationer av glastjocklek och strålningsintensitet utfördes fler än ett försök representerar punkterna i grafen medelvärdet av de uppmätta värdena.



Figur 11: Grafen visar på hur strålningsintensitet och glastjocklek påverkar transmissionen hos de undersökta glasproverna direkt efter det att luckan till konkalorimetern öppnades. Under de försök där flera repetitioner genomfördes visas det högst uppmätta värdet och det lägsta.

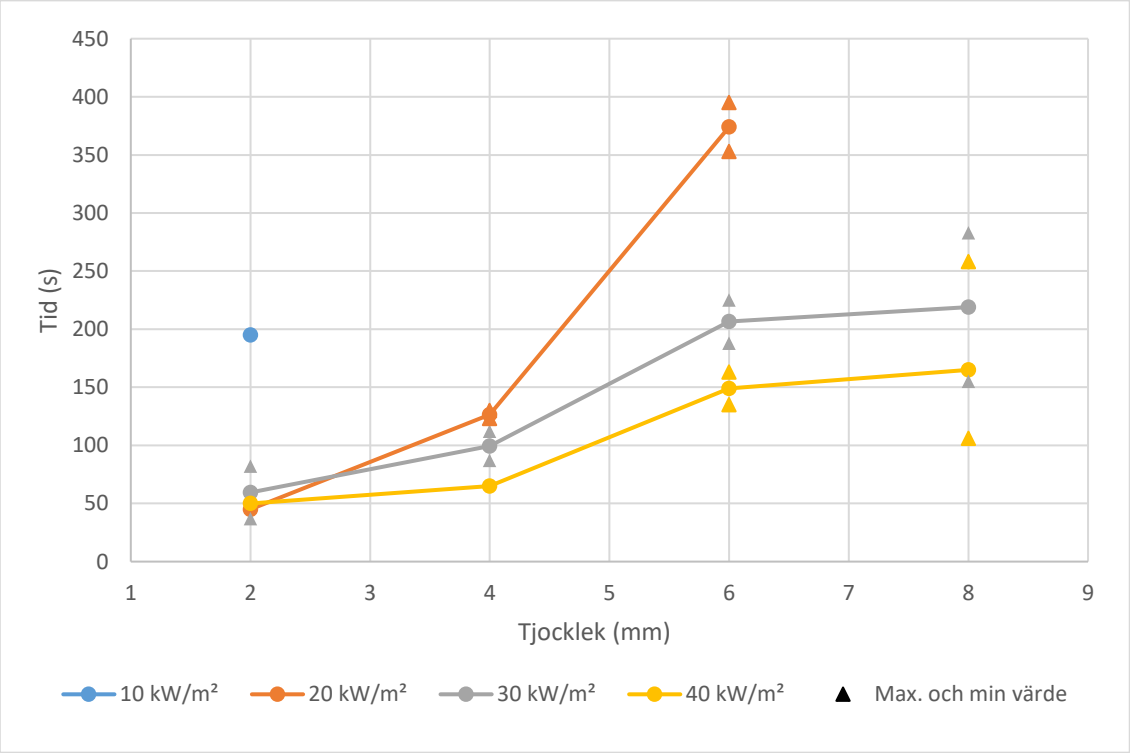
Försöken utan ram pågick i 20 minuter för att termisk jämvikt skulle uppnås hos provkropparna. I Figur 12 visas en graf som beskriver andelen uppmätt strålning på baksidan av glaset vid termisk jämvikt jämfört med utan glas. Även här representerar en punkt i grafen medelvärdet av ett antal försök.



Figur 12: Grafen visar på hur strålningsintensitet och glastjocklek påverkar transmissionen hos de undersökta glasproverna efter att glasen värmts upp, dvs. efter 20 minuter har passerat. Under de försök där flera repetitioner genomfördes visas det högst uppmätta värdet och det lägsta.

5.2 Tid till sprickbildning

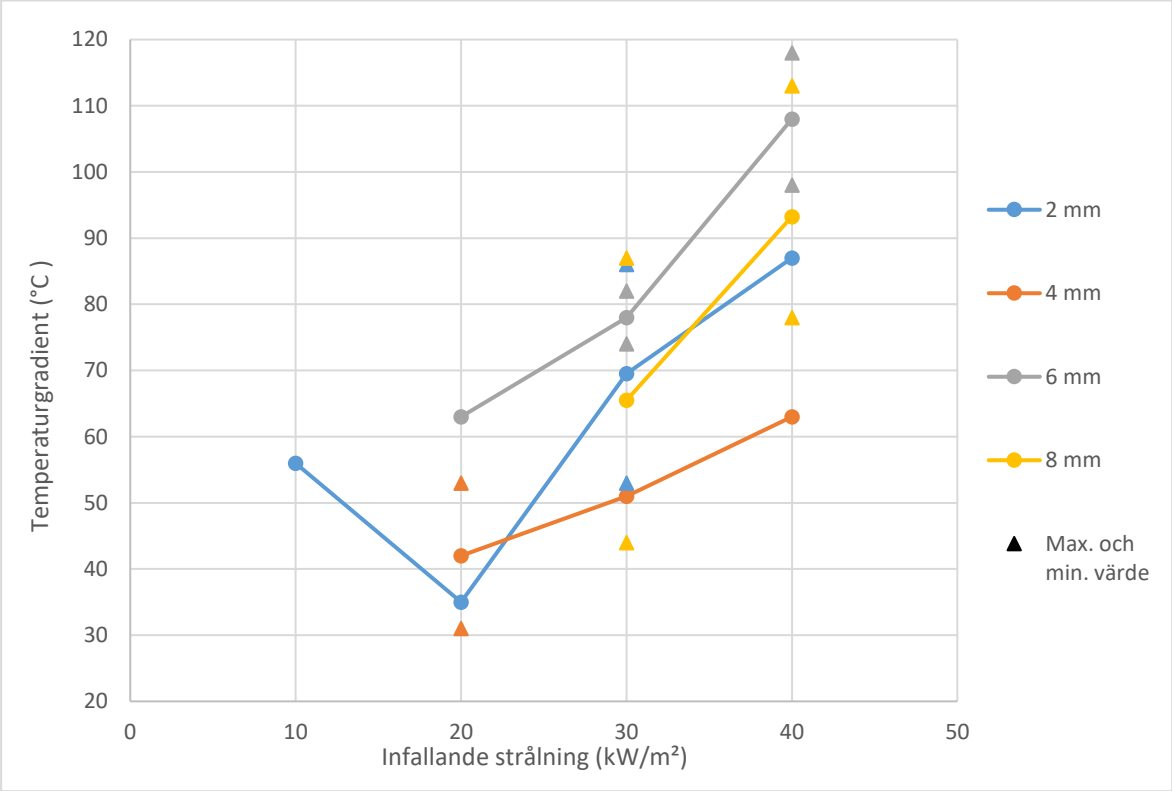
I de försök där glasen var skuggade 2 cm i kanten med isoleringsull enligt figur 10 uppmättes tiden tills glasen sprack. I Figur 13 visas medelvärdet för sprickbildningtiden för de olika glastjocklekarna vid olika strålningsnivåer.



Figur 13: Grafen visar medelvärdet för sprickbildningtiden för olika glastjocklekar och strålningsnivåer. Under de försök där flera repetitioner genomfördes visas det högst uppmätta värdet och det lägsta med trianglar som har samma färg som linjerna som representerar medelvärdet.

5.3 Kritisk temperaturgradient

Vid försöken med skuggning uppmättes temperaturen både på framsidan av glaset och i kanten på baksidan av glaset för att mäta vid vilken temperaturgradient som de olika glasen sprack, se figur 9. Figur 14 visar hur den kritiska temperaturgradienten under försöken varierade med den infallande strålningen och glastjockleken. Punkterna visar medelvärdet för den temperaturgradient som uppstod precis innan glaset sprack för de olika tjocklekarna.



Figur 14: Grafen visar hur den kritiskt uppmätta temperaturgradienten beror på den infallande strålningen och glastjocklek. Under de försök där flera repetitioner genomfördes visas det högst uppmätta värdet och det lägsta med trianglar som har samma färg som linjerna som representerar medelvärdet.

6 Diskussion

I detta avsnitt diskuteras och förklaras det framtagna resultatet från försöken. Även felkällor och osäkerheter kring mätningar och genomförandet tas upp.

6.1 Genomsläppt strålning

I Figur 11 visades en graf som beskrev att transmissionen för glas minskar med ökad tjocklek och ökar vid högre strålningsnivåer. Detta stämmer väl överens med teorin som presenterades i avsnitt 3.2.5. Anledningen till detta är att vid högre infallande strålningsnivåer är även temperaturen på det avgivande objektet högre. Detta leder till att våglängderna som utstrålas är kortare och kan inte absorberas av glaset utan transmitteras rakt igenom. Att tjockare glassprover dämpar en större del av strålningen kan rimligen förklaras med att i tjockare glas har fotonerna i strålningen större sannolikhet att stöta ihop med en elektron med rätt energinivå då de transporteras en längre sträcka.

Utifrån Figur 11 går det också att notera att lutningen på linjerna verkar avta då glastjockleken ökar. Detta innebär att tjockleken verkar ha mindre betydelse för transmissionen desto tjockare glaset är. Formen på linjerna ser ut att vara exponentiellt avtagande vilket innebär att transmissionen kommer att konvergera mot ett visst värde. Detta är rimligt då glaset vid en viss tjocklek kommer att ta upp nästan 100 % av den strålning som har rätt våglängd. Däremot kan denna avtagande trend delvis också förklaras med att temperaturen på baksidan av de tjockare glasen är lägre och därmed avger en lägre strålningsnivå än de tunnare.

I Figur 12 visas den uppmätta strålningen på baksidan av glasen då termisk jämvikt har uppnåtts. Även här visar strålningsmätaren ett lägre värde för tjockare glas och lägre strålningsnivåer. Anledningen till att den uppmätta strålningen är högre vid jämvikt är, som tidigare beskrevs i avsnitt 3.3.6, att den avgivna strålningen från glasytan också uppmäts. Detta kan vara intressant ur ett brandspridningsperspektiv för att uppskatta den maximala strålningen som kan uppnås på baksidan av ett vanligt fönsterglas baserat på den infallande strålningsnivån och glasets tjocklek.

I figur 12 verkar lutningen vara mindre vid högre strålningsnivåer, vilket innebär att tjockleken har mindre inverkan på den uppmätta strålningen på baksidan av glasen då. En anledning till detta är att det är en större procentuell skillnad mellan temperaturen på baksidan av glasen för de olika tjocklekarna vid lägre temperaturer.

I några av försöken utan skuggning utfördes tester på glas som redan varit exponerade för en testomgång. Vilka dessa var presenteras i tabell 5 i Bilaga 1. Slutsatsen som kan dras från detta är att den genomsläppta strålningen verkar inte påverkas av om glaset var använt eller ej.

6.2 Tid till sprickbildning

I Figur 13 redovisas hur tiden till sprickbildning varierade under försöken beroende på tjocklek och infallande strålningsnivå. Utifrån den går det att utläsa att tjockare glas tar längre tid att spricka vid samma infallande strålningsnivå. Detta är att förvänta med tanke på att tjockare glas har en högre hållfasthet och värmekapacitet än tunnare glas. Den högre värmekapaciteten innebär, som Li et al. (2012) förklarade, att det tar längre tid för en kritisk temperaturgradient att uppnås. Därmed bör det ta längre tid innan tillräckligt höga spänningar skapas för att glaset ska spricka.

När det finns en temperaturgradient över tjockleken är den termiska expansionen inte jämnstor över tjockleken heller vilket innebär att de spänningar som skapas i glasets längdriktning är högre i den övre delen jämfört med den lägre. Detta innebär det kommer ta längre tid för tillräckligt höga spänningar att uppnås som kan spräcka glaset.

I Figur 13 syns det att de 2 mm tjocka glasen har en lite avvikande trend jämfört med resten där de verkar spricka vid ungefär samma tidpunkt vid 20, 30 och 40 kW/m^2. Vad detta beror på är svårt att entydigt förklara men det skulle kunna bero på att det vid dessa strålningsintensiteter tar ungefär lika

lång tid att uppnå den kritiska temperaturgradient som krävs i glaset för att det är så pass tunt. Att det ses som samma tid i diagrammet skulle också kunna bero på att försökens felmarginal är för stor för att urskilja att vid en högre strålningsintensitet bör tiden till sprickbildning vara kortare.

Vid en infallande strålningsnivå på 10 kW/m^2 var det bara det 2 mm tjocka glaset som sprack och vid 20 kW/m^2 sprack alla förutom det 8 mm tjocka glaset. Anledningen till detta är att det inte uppstod tillräckligt höga temperaturgradienter och därmed spänningar för att glaset skulle spricka. Detta är högre än det Harada et al. (2000) uppmätte under sina försök men då tjocklek, storlek och skuggning är annorlunda i dessa försök är det förväntat att inte samma resultat erhålls. Storleken på glasen i de utförda försöken var betydligt mindre än de Harada et al. (2000) undersökte. Mindre glas har, enligt Wang et al. (2018), generellt bättre förmåga att inte spricka vid värmepåverkan på grund av färre mikrosprickor och ojämnheter.

Det gjordes inga försök med skuggning för 2 mm tjocka glas som utsattes för 5 kW/m^2 i denna undersökning men det är inte omöjligt att det 2 mm tjocka glaset hade spruckit vid 5 kW/m^2, likt det Harada et al. (2000) noterade, men det är svårt att förutspå. Å ena sidan var storleken på glasprovet mindre vilket borde innebära att förmågan att motstå sprickbildning borde vara högre. Å andra sidan är det svårt att veta hur mycket skärningen av glaset skiljer i de båda försöken och hur stor påverkan detta hade.

Wang et al. (2023) uppmätte sprickbildningstiden för glas som var 10 x 10 cm stora. Dock utsattes glasen under försöken för 50 kW/m^2 och skuggningsbredden var endast 10 mm i stället för 20 mm som i detta arbete. Den uppmätta sprickbildningstiden för Wang et al. (2023) verkade svagt öka med tjockleken, och låg mellan 40 och 70 sekunder för tjocklekar mellan 6 och 19 mm. I de försök som utfördes i denna rapport kunde, som tidigare nämnt, en trend urskiljas där tjockare glas tar längre tid att spricka vid samma infallande strålningsnivå. Vid en infallande strålningsnivå på 40 kW/m^2 varierade sprickbildningstiden mellan 50 och 150 sekunder för tjocklekar mellan 2 och 8 mm. Dock var skillnaderna generellt större vid lägre strålningsnivåer vilket kan förklara den lilla skillnad som Wang et al. (2023) uppmätte då glasen utsattes för 50 kW/m^2. Skuggningsbredden skiljer också mellan försöken vilket kan påverka den tid som krävs för att glasen ska spricka.

Men då tidigare undersökningar utförda av Chen et al. (2017) och Jørgensen et al. (2022) noterade olika slutsatser gällande skuggningsbredden. De två undersökningarna är också svåra att jämföra då många faktorer skiljer. Detta leder till att det är svårt att svara på om detta är en av anledningarna till den förlängda sprickbildningstiden jämfört med Wang et al. (2023) eller om det endast beror på den förhöjda strålningsnivån.

6.3 Kritisk temperaturgradient

I Figur 14 syns det en trend att vid ökad infallande strålning verkar den kritiska temperaturgradienten öka. Detta liknar de resultat som Wang et al. (2023) fick, dock var den ökande trenden i denna undersökning för svag för att dra några konkreta slutsatser. Harada et al. (2000) noterade att för högre strålningsnivåer var spänningarna i glaset vid sprickbildningen högre än för de lägre. Detta stämmer också överens med att temperaturgradienten borde vara högre vid högre strålningsnivåer. En rimlig förklaring till detta är att vid en högre strålningsnivå sker uppvärmningen snabbare och större spänningar hinner skapas innan glaset går sönder.

Det är också rimligt att det uppstod en högre temperaturgradient vid de högre strålningsnivåerna för att glasproven uppvisade kraftigare sprickbildning vid dessa. Detta innebär att spänningarna var högre i glaset vid sprickbildningen för de högre strålningsnivåerna vilket förklarar den kraftigare sprickan. Detta är något som också Harada et al. (2000) uppmätte under sina försök. I figur 15 nedan visas tre olika, 2 mm tjocka, glasprov som utsatts för 10, 20 och 40 kW/m^2 med skuggning. Samtliga glasprov som sprack under försöken visas i Bilaga 2.

Figur 15: Till vänster: Försök 1, 10 kW/m^2, sprack efter 3:15. I mitten: Försök 2, 20 kW/m^2, sprack efter 0:45. Till höger: Försök 6, 40 kW/m^2, sprack efter 0:50.

Utifrån de tre figurerna syns det en trend där glasprovet som utsattes för högre strålning uppvisar en kraftigare sprickbildning. Denna trend noterades också under försökens gång där de provkroppar som utsattes för högre strålningsnivåer uppvisade kraftigare och mer högljudda brott. Glasbitar flög ofta i väg vid dessa kraftiga brott till skillnad från de mindre kraftiga. Det kraftiga brottet bör tyda på att högre spänningar har uppstått i glaset innan det sprack vilket stödjer den trend som uppmättes under försöken.

Den kritiska temperaturgradienten som uppmättes i försök 1, 2 och 6 (se figur 18) var 56, 35 och 87 K. Detta innebär att i detta fall var den kritiska temperaturgradienten lägre för det prov som utsattes för 20 kW/m^2 jämfört med det som ut sattes för 10 kW/m^2. Trots detta verkar sprickan i försök 2 vara kraftigare än den i försök 1. Detta skulle kunna vara en felmätning av något av försöken då temperaturmätningen generellt har varit en stor osäkerhet. Det beror på att det termoelement som var placerat på ovansidan av glaset ofta lossnade under försöken och uppmätte därför en högre temperatur än det faktiska värdet på glasytan. Det var svårt att avgöra om termoelementet lossnade då den skuggande ramen blockerade den fria sikten till den. Under de försök där en skuggning inte användes försökte ett termoelement placeras på ovansidan av glaset men detta lossnade ofta fort, speciellt vid de högre strålningsnivåerna (> 20 kW/m^2).

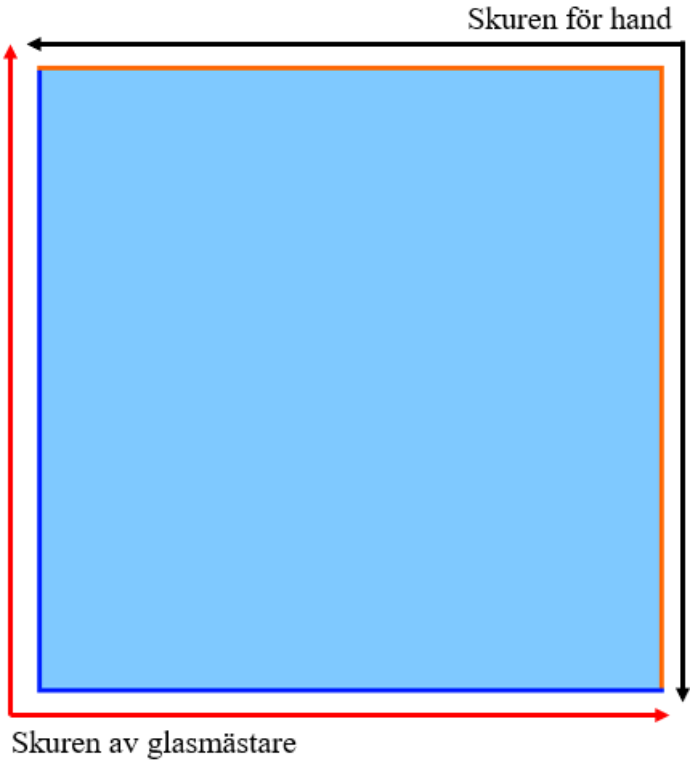
Den undersökning som mest liknar de experiment som har utförts i detta arbete är den av Wang et al. (2023), som också undersökte glas som var 10 x 10 cm stora. Dock utsattes försöken för 50 kW/m^2 och skuggningsbredden var endast 10 mm i stället för 20 mm som i detta arbete. Den kritiska temperaturgradient som uppmättes av Wang et al. (2023) för glas som var 6 mm tjocka var 76 °C. I detta arbete var den kritiskt uppmätta temperaturgradienten för samma glas vid 40 kW/m^2 108 °C. Vad denna skillnad beror på är svårt att exakt peka på, en förklaring kan vara att det är en felmätning i arbetet då detta är ett känt problem. Däremot tyder undersökningar gjorda av Chen et al. (2017) och Jørgensen et al. (2022) på att en ökad skuggningsbredd höjder den kritiska temperaturgradienten, dock var det endast en marginell ökning i deras försök. För att kunna dra bättre slutsatser om detta hade det varit bra att använda 10 mm skuggningsbredd i stället för 20 mm. Detta var något som översågs när valet av skuggningsbredd gjordes, då anledningen till att skuggningsbredden på 20 mm valdes var för att det var vid denna bredd som Chen et al. (2017) noterade den kortaste sprickbildningstiden för glasen.

Wang et al. (2023) visade också på att vid tjocklekar över 15 mm är temperaturgradienten över ytan inte den enda faktor som påverkar när sprickbildning sker utan också över dess djup. I de utförda försöken användes endast glastjocklekar upp till och med 8 mm vilket inte är tillräckligt stort för att denna temperaturgradient ska ha en stor påverkan. Det noterades under de utförda försöken att till skillnad från de 2 mm tjocka glasen, som nästan inte hade en temperaturgradient över tjockleken, hade de 8 mm en betydande sådan som runt sprickbildningstillfället kunde ligga runt 40 °C. Däremot var

denna temperaturskillnad mycket mindre än den som uppmättes gentemot den punkt som var skuggad på baksidan av glaset. Detta skulle kunna förklara en anledning till att de tjockare glasen Figur 14 (6 och 8 mm jämfört med 2 och 4 mm) sprack vid en högre uppmätt temperaturgradient. Temperaturskillnaden över glasens tjocklek och skuggad del presenteras i tabell 4 för de försök som sprack och hade bra mätvärden.

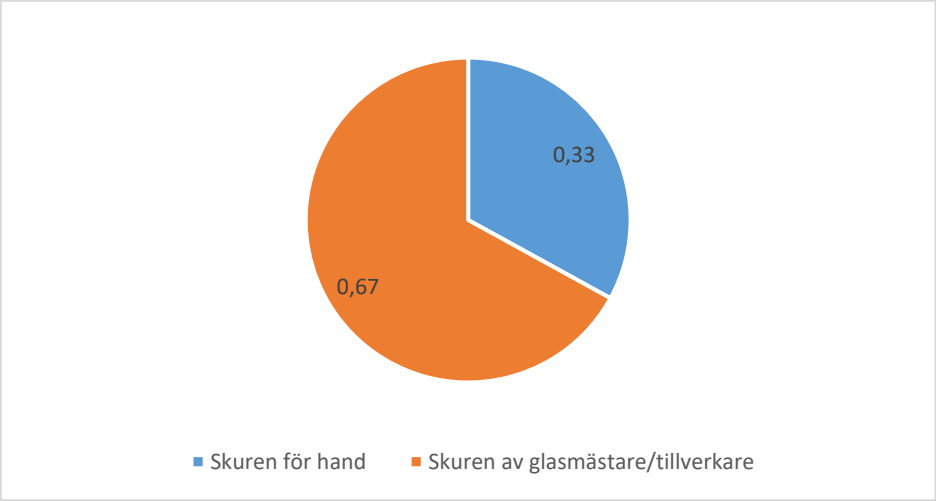
6.4 Skärning av glasen

Glasproverna som donerades till arbetet var 20 x 20 cm stora men skars för hand till prover som var 10 x 10 cm stora för att passa i försöksuppställningen. Detta innebar, som illustreras i figur 16, att hälften av sidorna var skurna för hand och den andra halvan av glasmästare.



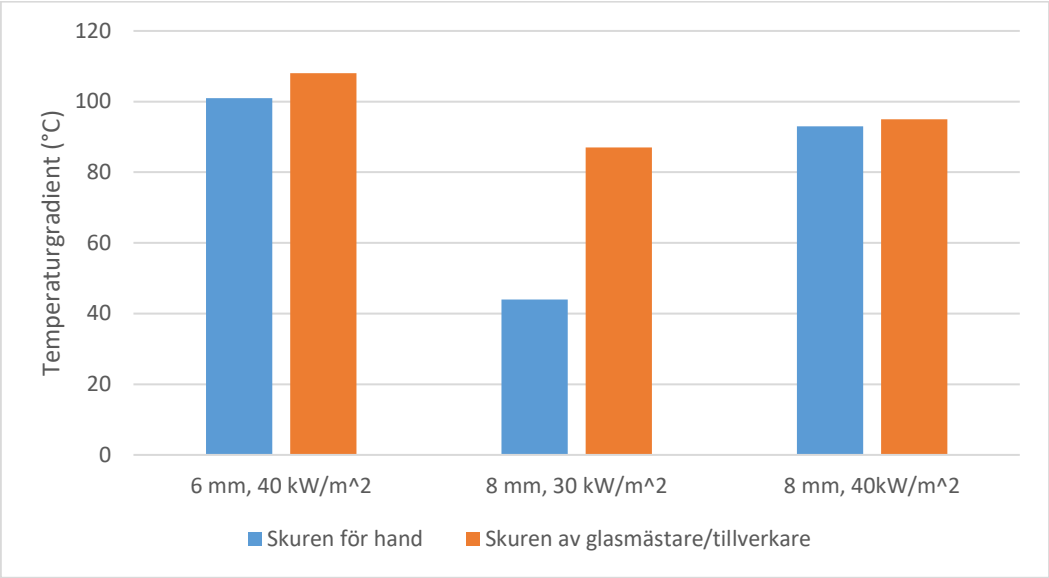
Figur 16: Illustrerar vilken av glasprovens sidor som var skuren på vilket sätt

Figur 17 nedan visar andelen av försöken som sprack på antingen de sida som var skuren för hand eller den som var skuren av glasmästare.



Figur 17: Visar andelen av försöken som sprack på respektive sida vid de 24 försök som utfördes med skuggning

Vid de försök där provkroppen sprack på olika sidor noterades det hur den kritiska temperaturgradienten skiljde mellan de olika skärningarna. Detta presenteras i stapeldiagrammet i figur 18 nedan.



Figur 18: Visar hur hög den kritiska temperaturgradienten var beroende på vilken sida som glasprovet sprack på

I figur 17 visas andelen av försöken som sprack på den sidan som var skuren för hand gentemot den som var skuren av glasmästare/tillverkare. Den visar att endast en tredjedel av glasen sprack på den sida som var skuren av glasmästare/tillverkare vilket tyder på att skärningen hade en påverkan på försöken. Då hälften av sidorna var skuren på vartdera sättet bör fördelningen legat närmare detta om det inte hade någon påverkan. Det skulle kunna vara möjligt att det endast är en slumpmässig fördelning som uppkommit, dock är sannolikheten för det endast 4,4 %. Detta beräknades med en binomialfördelning med antagandet att sannolikheten för att brottet sker på de olika sidorna var 50 % vardera.

En troligare förklaring är att skärningen har en påverkan på när sprickbildningen av glaset sker. I figur 18 visas hur den kritiska temperaturgradienten skiljer mellan försök beroende på vilken sida den sprack. I samtliga tre fall där direkt jämförbara data fanns sprack den sida som var handskuren vid en lägre gradient än de som inte var det. Dock var det en väldigt liten skillnad mellan två av fallen, vilket gör det svårt att dra några tydliga slutsatser kring detta. Däremot pekar detta på att en handskuren, och därmed sämre skärning, leder till sämre motstånd mot värmepåverkan. Detta är inte konstigt då det vid en dålig skärning av glas, som beskrivs i avsnitt 3.1.1, kan skapas ojämnheter och sprickor som försämrar hållfastheten och därmed den kritiska temperaturgradienten.

6.5 Felkällor och förbättringar

Den största osäkerheten kring genomförandet av försöken är temperaturmätningen. Detta beror på att tejpen som höll fast termoelementen vid en del av försöken lossnade. Detta skedde speciellt vid de försök som utsattes för en hög strålningsnivå och inte hade skuggning. Detta beror på att dessa försök utsattes för hög värmepåvekan under 20 minuter medan de som sprack hade betydligt kortare exponeringstid. Det var däremot svårt att se om tejpen lossnade på de försök med skuggning då ramen täckte sikten till termoelementen, vilket innebär att temperaturmätningen kan vara fel även här.

Som beskrivits i avsnittet innan hade skärningen av glasen en betydelse för hur och när sprickbildning sker. För att resultatet angående sprickbildningstid och kritisk temperaturgradient skulle blivit bättre borde glasmästare/tillverkare skurit alla sidor av glasproven för att minimera betydelsen av detta. Skärningen kommer aldrig att kunna bli perfekt för glas, och mikrosprickor och andra ojämnheter

kommer alltid att finnas. Däremot är det viktigt att tydligt analysera och undersöka påverkan av detta för att kunna dra bättre slutsatser om de fenomen som faktiskt undersöks i försöken.

För att minska påverkan av skärningen och mikrosprickor på olika glas borde ett större antal försök utförts för respektive tjocklek och strålningsnivå. Detta hade lett till att de ”dåliga” resultaten lättare hade kunnat sorteras bort genom att ett bättre medelvärde för de olika försökpunkterna i till exempel Figur 13 och Figur 14 hade kunnat tagits fram. Då få försök gjordes under samma strålningsnivå och tjocklek är det svårt att få fram något exakt samband för sprickbildningstiden och den kritiska temperaturgradientens beroende på glastjocklek och infallande strålningsnivå.

Vid försöken placerades ställningen och glasproven på plats för hand. Detta innebär att det finns risk för att placeringen och där med den infallande strålningen inte var lika under försöken. Däremot bör detta fel vara så pass litet att det inte ska ha någon betydelsefull inverkan på resultatet.

Under experimenten fälldes ett skyddsglas ned mellan provkropparna och författaren. Denna kom under vissa försök åt strålningsmätaren och flyttade den en liten bit. Detta påverkar dock inte nivån av den infallande strålningen och därmed sprickbildningen av glaset. Däremot hade det en betydelse för den uppmätta strålningen i de försök där detta var relevant. Trots detta är repeterbarheten för uppmätta nivåer med strålningsmätaren mycket god, vilket tyder på att denna faktor inte påverkat utfallet nämnvärt.

För att få en bättre mätning av temperaturgradienten över tjockleken hade det varit bra om ett termoelement också placerades på ovansidan av glaset i det skuggade området. Detta hade lett till att den temperaturgradient som uppstår på baksidan och framsidan av glaset hade kunnat jämföras för att se hur stor skillnad det finns mellan dessa.

För att öka kunskapen kring hur tjockleken påverkar den genomsläppta strålningen, sprickbildningstid och temperaturgradient på ett bättre sätt hade det varit intressant att undersöka större tjocklekar än de som användes under försöken. Då skillnaden i tjocklek mellan de glas som användes var relativt liten var skillnaderna i vissa fall inte särskilt stora. För att få en bättre förståelse och tydligare resultat skulle större tjocklekar använts, kanske upp till och med 20 mm. Dock är det inte många fönsterglas som är 20 mm i verkligheten men detta hade lett till en ökad förståelse kring hur glasets tjocklek påverkar brandegenskaperna.

6.6 Reliabilitet och validitet under försöken

Under de utförda försöken har försöksuppställningen inte förändrats vilket ökar reliabiliteten för försöken. Däremot skars glasen för hand vilket innebar att skärningen av glasen blev olika vilket minskade reliabiliteten mellan försöken. I stället borde glasen, som nämndes i tidigare avsnitt, skurits av tillverkare eller glasmästare med noggrannare instrument och bättre repeterbarhet för att öka reliabiliteten under försöken.

I försöken var också termoelementen en begränsande faktor gällande reliabiliteten av denna mätning då den tenderade att lätt lossna från glasen. För att öka reliabiliteten för detta borde termoelementen fästas på glaset med något som inte kommer att smälta under tiden som försöket fortgår.

Då försök med glas ofta ger olika resultat på grund av att hållfastheten skiljer mycket mellan olika prover är det svårt att få en hög repeterbarhet mellan försöken. För att få en bra validitet under försöken är det därför viktigt att utföra ett större antal försök för att få fram en fördelning för glasen då det inte går att dra för stora slutsatser på ett fåtal försök. De försök som utfördes var ganska få i förhållande till det som egentligen skulle behövas för att kunna dra väl underbyggda slutsatser om området. Detta innebär att ett större antal försök på med varje tjocklek och strålningsnivå borde ha genomförts för att ge arbetet en högre validitet. Detta hade troligen lett till att tydligare trender för tiden till sprickbildning och den kritiska temperaturgradienten.

7 Slutsats

Målet med arbetet var att undersöka hur värmestrålning påverkar floatglas med en litteraturstudie och småskaliga försök. För att kunna nå målet togs ett antal frågeställningar fram och dessa besvaras nedan.

- **Vilka faktorer påverkar hur och när glas spricker vid värmepåverkan?**
  De faktorer som tas upp i rapporten är glastjocklek, strålningsnivå, skuggningsområde, skärning, glasstorlek och förhållandet mellan längden och bredden. Hur de påverkar presenteras i tabell 3.

- **Hur stor inverkan har tjockleken på floatglas på tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning då de utsätts för värmestrålning?**
  Hur stor inverkan tjockleken har var utifrån litteraturstudien och försöken svår att bestämma. Det gick dock att bestämma att tiden till sprickbildning för tjockare glas längre och att den kritiska temperaturgradienten verkar påverkas lite av en ökad tjocklek.

- **Påverkar den infallande strålningsnivån tid till sprickbildning och temperaturgradient vid sprickbildning för floatglas?**
  Ja, ökad strålningsnivå leder till kortare sprickbildningstid och den kritiska temperaturgradienten verkar enligt försöken öka vid högre strålningsnivåer.

- **Hur förändras den genomsläppta strålningen för floatglas vid olika tjocklekar och infallande strålningsnivåer?**
  Tjockare glas minskar transmissionen, likaså gör högre strålningsnivåer.

I tabell 3 nedan presenteras svaren på frågeställningarna och de övriga slutsatser som kunnat dragits under arbetets gång.

Tabell 3: Visar olika glasegenskaper och hur dessa påverkar sprickbildning och genomsläppt strålning

Egenskap	**Hur det påverkar**
Glastjocklek	• Större tjocklek ökar tiden till sprickbildning • Det verkar ha liten påverkan på kritisk temperaturgradient • Tjockare glas har lägre transmission än tunnare • Uppmätt strålning på baksidan av glaset är lägre för tjockare prover då termisk jämvikt uppnåtts
Infallande strålningsnivå	• Högre strålningsnivå ökar transmissionen • Tiden till sprickbildning minskar vid högre strålningsnivå • Resultat från försöken tyder på att den kritiska temperaturgradienten är större vid högre strålningsnivåer • Högre strålningsnivåer genererar kraftigare och större sprickor
Skuggningsområde	• Tidigare försök tyder på att det kan finnas en ”kritisk” skuggningsbredd där sprickbildningstiden är som lägst. • Ökad bredd höjer den kritiska temperaturgradienten marginellt
Skärning	• Dålig skärning minskar den kritiska temperaturgradienten och bör därmed sänka sprickbildningtiden
Glasstorlek	• Större glas verkar minska tiden till sprickbildning på grund av fler slumpmässiga fel
Förhållande mellan glasets längd och höjd	• Större skillnad mellan längd och bredd ökar sprickbildningtiden och minskar andelen av glaset som faller ut

8 Fortsatta studier

I rapporten har flera olika aspekter som påverkar sprickbildning och genomsläppt strålning identifierats. Däremot har det under arbetets gång identifierats en del andra områden som hade varit intressanta att undersöka, några av dessa presenteras här.

- **Fler repetitioner av försöken**
  För att öka validiteten av resultaten som erhållits i denna rapport bör fler repetitioner göras för att ta hänsyn till den variabilitet som finns mellan olika glasprover. Detta hade lett till att tydligare trender för de olika tjocklekarna och strålningsnivåerna hade kunnat utläsas och bättre slutsatser hade kunnat dras.

- **Olika glasstorlekar**
  Olika glasstorlekar är något som undersökts i litteraturstudien i detta arbete. Däremot hade en intressant aspekt att undersöka vara hur småskaliga försök skiljer sig mot fullskaliga för att kunna se hur och om resultaten från de småskaliga försöken kan skalas upp för att också gälla för fullskaliga glas eller fönster.

- **Åldrat glas jämfört med nytt glas**
  En aspekt som inte har undersökts i denna rapport är hur ”åldrade” glas, som antingen varit utsatta för en hög temperatur eller använts i en byggnad under en längre tid, presterar vid termisk påverkan med skuggning jämfört med nya. Teoretiskt bör de prestera sämre då slitage under längre tid skapar fler mikrosprickor, men hur stor skillnaden är något som är intressant att undersöka ytterligare.

- **Skärningens betydelse för sprickbildning**
  Under arbetets gång har det framkommit att glasets skärning har stor betydelse för hållfastheten och sprickbildningen av glaset. En aspekt att undersöka mer noga är därför hur stor påverkan olika skärningstyper har på sprickbildningen vid värmepåverkan.

- **Jämföra floatglas med andra typer av glas**
  Det finns flera andra typer av glas än floatglas, som till exempel härdade glas och laminerade glas. Att jämföra hur de presterar då de variabler som utpekats som viktiga i denna rapport förändras är intressant för att utvärdera hur olika typer av glas bör vara utformade för att prestera bäst mot värmepåverkan.

- **Ramens inverkan på sprickbildning**
  Skuggningsområdet för glasproven påverkar hur och när sprickbildning sker. Det hade därför varit intressant att jämföra olika typer av fönsterramar som används kommersiellt för att se hur dessa påverkar glasets motståndskraft mot termiska sprickor.

Litteraturförteckning

Babrauskas, D. V. (1997). *Glass Breakage in Fires.* Fire Science and Technology Inc.

Boverket. (2013). *Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd, BBRAD.* Karlskrona: Boverket.

Boverket. (2020). *Boverkets byggregler, BBR, BFS 2011:6, med ändringar till och med BFS 2020:4.* Karlskrona: Boverket.

Bülov-Hübe, H. (u.å). *Fönsterfysik och energitransport genom förnster.* Lund: LTH.

Carlson, P.-O. (1992). *Glas-Möjligheternas byggmaterial.* Stockholm: Byggforskningsrådet.

Carlson, P.-O. (2005). *Bygga med glas.* Stockholm: Glasbranschföreningen.

Chen, H., Wang, Q., Wang, Y., Zhao, H., Sun, J., & He, L. (2017). Experimental and Numerical Study of Window Glass Breakage with Varying Shaded Widths under Thermal Loading. *Fire Technology 53*, 43-64.

Cuzzillo, B., & Pagni, P. (1998). Thermal Breakage of Double-Pane Glazing By Fire. *Journal of Fire Protection Engineering 9* , 1-11.

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics.* Edinburgh: John Wiley & Sons.

Fönsterexperter. (u.å). *Olika typer av glas*. Hämtat från Fönsterexperter: https://www.xn--fnsterexperter-vpb.se/fonster/olika-typer-av-glas (2024-11-25)

Glasbranschföreningen. (den 15 10 2024). *Krav på glas i fordon*. Hämtat från Glasbranschföreningen : https://gbf.se/anlita-foretag/bilglasarbete/krav-pa-glas-i-fordon

Harada, K., Enomoto, A., Uede, K., & Wakamatsu, T. (2000). An Experimental Study On Glass Cracking And Fallout By Radiant Heat Exposure. *Fire Saftey Science*, 1063-1074.

International Organization for Standardization. (2015). *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate.* International Organization for Standardization.

Johansson, N., & Steen, E. (2017). *Utvärdering av brandglas i fasad* . Lund: LTH.

Joshi, A., & Pagni, P. (1994). Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. II – Experiments. *Fire Safety Journal vol. 22*, 45-65.

Jørgensen, J. D., Nielsen, J. H., & Giuliani, L. (2022). Thermal resistance of framed windows: Experimental study on the influence of frame shading width. *Safety Science 149*, art. 105683.

Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2022). *Enclosure Fire Dynamics.* Florida, USA: CRC Press.

Larsson, R. (1999). *Fönsterglas under värmepåverkan - samt beskrivning och utvärdering av datorprogrammet Break 1*. Lund: Brandteknik LTH.

Li, L., Xie, Q., Cheng, X., & Zhang, H. (2012). Cracking behavior of glazings with different thicknesses by radiant exposure. *Fire and Materials 36*, 264-276.

Lund University. (2020). *Manual Cone Calorimeter (Cone Calorimeter Serial N 3022511, 230V, 30Hz).* Lund: Lund University.

Moriarty, P. (den 11 2 2011). *Why is glass transparent?* Hämtat från Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=Omr0JNyDBI0&t=1s

Mowrer, F. W. (1998). *Window Breakage Induced by Exterior Fires.* Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Pagni, P. J. (2002). Thermal Glass Breakage . *FIRE SAFETY SCIENCE-PROCEEDINGS OF THE SEVENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM*, 3-22.

Rantala, M. (2015). *Heat Transfer Phenomena in Float Glass Heat Treatment Processes.* Tampere: Tampere University of Technology.

RISE. (den 16 11 2024). *Brandprovning enligt ISO 5660-1*. Hämtat från RISE: https://www.ri.se/sv/vad-vi-gor/tjanster/brandprovning-enligt-iso-5660-1

Säfsten, K., & Gustavsson, M. (2019). *Forskningsmetodik 2.0 (andra upplagan).* Lund: Studentlitteratur AB.

Vitro Architectural Glass . (2020). *Glass Breakage – Failure Mode and Stress Estimation.* Vitro Architectural Glass .

Wang, Y., Li, X., & Bisby, L. (2023). Comparative study of thermal breakage of annealed and tempered glazing with different thicknesses under uniform radiation conditions. *Fire Safety Journal*, 103867.

Wang, Y., Zhang, Y., Wang, Q., Yang, Y., & Sun, J. (2018). The effect of glass panel dimension on the fire response of glass façades. *Contruction and Building Materials 181*, 588-597.

Zhang, Y., Wang, Q.-s., Zhu, X.-b., Huang, X.-j., & Sun, J.-h. (2011). Experimental Study on Crack of Float Glass with Different Thicnesses Exposed to Radiant Heating. *Procedia Engineering 11*, 710-718.

Bilaga 1 – Fullständigt resultat från experiment

Här presenteras den utdata från försöken som användes för att skapa graferna som redovisades i resultat-avsnittet.

I tabell 4 nedan presenteras utdata från de försök där provkropparna var skuggade.

Tabell 4: Redovisar tiden till sprickbildning, kritisk temperaturgradient (ΔT1) (eller den högsta som uppmättes under försöket om glaset inte sprack), temperaturgradient över tjockleken vid sprickbildning (ΔT2), iakttagelser som gjordes under försöket och på vilken sida av glasprovet som sprickan började i. G = den sida som var skuren av glasmästeri/tillverkare medan H = sidan som var skuren för hand innan försöken.

Test Nr	**δ (mm)**	**$\dot{q}''$ (kW/m^2)**	**Tid till sprickbildning (s)**	**ΔT1 (K)**	**ΔT2 (K)**	**Kommentarer**	**Sprack på sida X**
1	2	10	195	56	≈0	Ingen kraftig spricka, ramlade endast ned från ställningen.	G
2	2	20	45	35	7		H
3	2	20	20	17	2	Glasprovet hade en liten spricka sedan tidigare och sprack därför väldigt snabbt. Sprickbildningen skedde väldigt tyst och svagt.	H
4	2	30	37	53	19		H
5	2	30	82	86	26		H
6	2	40	50	87	13	Sprack kraftigt.	G
7	4	10	-	-			
8	4	20	130	31	9		H
9	4	20	123	53	3		H
10	4	30	87	51	10		G
11	4	30	112	-	-	Termoelement glappade och uppvisade dålig mätning.	G
12	4	40	65	63	17	Sprack kraftigt.	H
13	6	10	-	50			
14	6	20	395	54	38	Termoelement lossnade lite och uppmätte troligen en lägre temperatur än den verkliga.	H
15	6	20	353	63	15		H
16	6	30	225	82	42		H
17	6	30	188	74	19		H
18	6	40	163	98	63		G
19	6	40	135	118	32	Sprack kraftigt.	G
20	6	Se kommentar	165	101	32	Glaset placerade på fel höjd och utsattes för en högre strålningsnivå än 40 kW/m^2. Sprack kraftigt.	H
21	8	10	-	52			
22	8	20	-	55			
23	8	30	155	44	16		H
24	8	30	283	87	44		G
25	8	40	106	78	43		H
26	8	40	258	87	44		H
27	8	40	141	113	59		H
28	8	40	155	95	32		G

I tabell 5 visas utdata från de försök där glasproverna inte var skuggade. De glas som har en kommentar med ”tidigare använt” är ett glasprov som har utsatts för samma försök en andra gång. I de försök där det är noterat att tejpen för termoelementet lossnade mäts temperaturen inte längre på glasytan utan i luften en liten bit under där temperaturen är lägre.

Tabell 5: Visar det uppmätta medelvärdet för strålningsmätaren innan glaset placerades, direkt efter att glaset placerades och i slutet av försöken då termisk jämvikt hade uppnåtts. Utöver detta visas också den uppmätta temperaturen en bit in på baksidan av glaset vid slutet av försöket i de fall då bra data fanns

Test Nr	$\boldsymbol{\delta}$ **(mm)**	$\boldsymbol{\dot{q}''}$ **(kW/m^2)**	**Utan glas (kW/m^2)**	**Direkt efter lucköppning (kW/m^2)**	**Termisk jämvikt (kW/m^2)**	**Kommentarer**
29	2	5	3,95	0,53	1,62	
30	2	5	3,70	0,49	1,53	Tidigare använt under försök 29
31	2	10	7,34	1,32	3,48	
32	2	10	7,29	1,32	3,53	
33	2	10	7,36	1,35	3,55	Tidigare använt under försök 31
34	2	20	14,64	3,84	8,25	
35	2	40	27,42	9,36	17,07	
36	4	10	7,24	0,94	3,30	Tejp för termoelement lossnade lite.
37	4	20	14,67	2,86	7,90	
38	4	40	29,93	8,93	18,24	Tejp lossnade och termoelementet förflyttades lite.
39	4	40	29,65	8,82	18,27	Tidigare använt under försök 38. Tejp för termoelement lossnade lite.
40	4	40	29,39	8,69	18,36	Termoelement en bit in på glaset glappade och gav ingen bra data.
41	4	40	27,45	7,70	16,53	Sprack efter att försöket var slut.
42	4	Se kommentar	27,32	7,68	16,36	Glaset placerades på fel höjd och utsattes för en högre strålningsnivå än 40 kW/m^2.
43	6	5	3,94	0,31	1,45	
44	6	5	3,73	0,25	1,25	Tidigare använt under försök 43.
45	6	10	7,32	0,78	3,21	Tejpen för termoelement lossnade lite.
46	6	10	7,55	0,83	3,31	Tidigare använt under försök 45
47	6	10	7,20	0,76	3,11	Tidigare använt 45 och 46
48	6	20	14,58	2,45	7,61	
49	6	40	29,86	7,51	17,76	Tejp för termoelement lossnade lite.
50	8	10	7,23	0,66	2,98	Termoelement glappade och gav dåliga data.
51	8	10	7,24	0,53	2,99	
52	8	20	14,65	2,12	7,31	
53	8	40	30,05	6,92	17,60	Tidigare använt under försök 52. Tejpen för termoelement lossnade lite.
54	8	40	29,70	6,79	17,11	Sprack efter att försöket tog slut.

Anledningen till att försök 35, 41 och 42 har en lägre grundnivå än de andra försök som utsattes för 40 kW/m^2 är att skyddsglaset framför försöksuppställningen av misstag flyttade strålningsmätaren lite längre ifrån provkroppen.

Bilaga 2 – Bilder på sprickbildningsmönster

I detta avsnitt presenteras bilder på de glasprov som utsatts för strålningspåverkan med skuggad kant och spruckit. Bilderna är sorterade i samma ordning som i tabell 4. Anledningen till att det i vissa av försöken finns delar av glasen som har sprickor som skiljer från de andra, som försök 14 och 15, är att dessa bitar hamnade i en hink med vatten efter att de sprack och snabbt kyldes ned.

I Figur 15 och Figur 16 presenteras försök 1-6 där sprickbildningsmönstret för 2 mm tjocka glas visas.

Figur 15: Till vänster: Försök 1, 10 kW/m^2, sprack efter 3:15. I mitten: Försök 2, 20 kW/m^2, sprack efter 0:45. Till höger: Försök 3, 20 kW/m^2, sprack efter 3:15

Figur 16: Till vänster: Försök 4, 30 kW/m^2, sprack efter 0:37. I mitten: Försök 5, 30 kW/m^2, sprack efter 1:22. Till höger: Försök 6, 40 kW/m^2, sprack efter 0:50

I Figur 17 och Figur 18 presenteras försök 8-12 där sprickbildningsmönstret för 4 mm tjocka glas visas.

Figur 17: Till vänster: Försök 8, 20 kW/m^2, sprack efter 2:10. I mitten: Försök 9, 20 kW/m^2, sprack efter 2:03. Till höger: Försök 10, 30 kW/m^2, sprack efter 1:27

Figur 18: Till vänster: Försök 11, 30 kW/m^2, sprack efter 1:52. Till höger: Försök 12, 40 kW/m^2, sprack efter 1:05

I Figur 19Figur 20Figur 21 presenteras försök 14-20 där sprickbildningsmönstret för 6 mm tjocka glas visas.

Figur 19: Till vänster: Försök 14, 20 kW/m^2, sprack efter 6:34. I mitten: Försök 15, 20 kW/m^2, sprack efter 5:53. Till höger: Försök 16, 30 kW/m^2, sprack efter 3:45

Figur 20: Till vänster: Försök 17, 30 kW/m^2, sprack efter 3:08. I mitten: Försök 18, 400 kW/m^2, sprack efter 2:43. Till höger: Försök 19, 40 kW/m^2, sprack efter 2:14

Figur 21: Försök 20, 40 kW/m^2, sprack efter 2:45

I Figur 22Figur 23 presenteras försök 23-28 där sprickbildningsmönstret för 8 mm tjocka glas visas.

Figur 22: Till vänster: Försök 23, 30 kW/m^2, sprack efter 2:35. I mitten: Försök 24, 30 kW/m^2, sprack efter 4:43. Till höger: Försök 25, 40 kW/m^2, sprack efter 4:18

Figur 23: Till vänster: Försök 26, 40 kW/m^2, sprack efter 1:46. I mitten: Försök 27, 40 kW/m^2, sprack efter 2:21. Till höger: Försök 28, 40 kW/m^2, sprack efter 2:35

Bilaga 3 - Redovisning av användning av generativ AI

Tabell 6 redovisar hur författaren har använt så kallad generativ AI.

Tabell 6: Redovisning av användandet av generativ AI

Användning av GAI	***Ja eller nej***
1) I rapporten har jag använt verktyg för Generativ AI (t.ex. ChatGPT eller liknande)	*Nej*
2) Jag har använt ett GAI-verktyg för språkbehandling (t.ex för att åtgärda grammatiska fel etc.	*Nej*
3) Jag har använt ett GAI-verktyg för att söka efter information.	*Nej*
4) Jag har använt ett GAI-verktyg för att skapa programkod.	*Nej*
5) Jag har använt ett GAI-verktyg för att översätta text	*Nej*
6) Jag har använt ett GAI-verktyg för att skapa figurer eller andra illustrationer.	*Nej*
7) Jag har använt ett GAI-verktyg för att strukturera texten i rapporten.	*Nej*
Skriv en kort beskrivning hur och i vilken omfattning du använt GAI-verktyg i ditt arbete.	-