

Fönsterglas under värmepåverkan – samt beskrivning och utvärdering av datorprogrammet BREAK1

Robert Larsson

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 5033, Lund 1999

**Fönsterglas under värmepåverkan – samt beskrivning och
utvärdering av datorprogrammet BREAK1**

Robert Larsson

Lund 1999

Fönsterglas under värmepåverkan – samt beskrivning och utvärdering av datorprogrammet BREAK1

Robert Larsson

Report 5033

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB--5033--SE

Number of pages: 85

Keywords:

Window glass, BREAK1, glass breakage, heat transfer, compartment fire, evaluation of BREAK1, sensitivity analysis

Abstract:

This report describes window glass breakage due to heating. Mathematical models are explained. The computer program BREAK1 is described and evaluated by comparing it to experimental results. The history and production of window glass are presented. A literature survey is also presented.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

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

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se/english>

Telephone: +46 46 222 73 60
Fax: +46 46 222 46 12

Summary

This report describes window glass affected by thermal load. The theories that explain window breakage in a compartment fire are discussed. The computer program BREAK1, which predict time to glass breakage due to heating, is evaluated by comparing computer calculations to experimental results.

A window fall-out during a compartment fire will affect the development of the fire scenario. If the fire is ventilation controlled, the increase in ventilation area will increase the intensity of the fire due to the extra oxygen supply. It is therefore of interest to predict if and when the window glass will break during a compartment fire.

The shaded edges that are hidden in the window frame are not heated as much as the exposed area of the glass due to the poor heat conduction of window glass. The central, exposed part wants to expand because of the increase in temperature. The shaded edges do not expand as much resulting in tensile stress and eventually in glass breakage.

The cracks always initiate at the edges. The tensile stresses that occur here concentrate at small cracks in the rough edges.

The tensile strength of glass is difficult to define. The reason for this is how the glass is cut. A rough edge contains large cracks. The tensile stress concentrates to these cracks and reduces the strength of the glass. A window with smooth edges can stand a higher load because it contains smaller cracks and the tensile strength does not concentrate as much here as it does at larger cracks at windows with rough edges.

The window glass absorbs heat due to heat convection and radiation from the hot fire-gases as well as from the flames. At wavelengths from the flames, glass is semi-transparent. This means that heat is not only absorbed at the surface but also through the depth of the glass. At wavelengths from the hot fire-gases, glass can be considered opaque, i.e. radiation reaches the surface and thereafter heat is conducted into the depth of the glass.

It is difficult to predict when glass will break due to heating. There are three main reasons for this. First of all there are many material properties of glass, which are important in heat transfer calculations, that are difficult to predict. The second reason is that the edges and mounting of the glass will affect the time to breakage while subjected to fire. These parameters are hard to quantify and are therefore usually neglected. The third reason is the difficulty in predicting the fire scenario, which will affect the heat transportation to the window glass.

The computer program BREAK1 is evaluated by comparing it to experimental results. The computer calculations are carried out on two scenarios. One of them gave good agreement and the other didn't.

The sensitivity analysis showed that, in order to reduce the uncertainty in the calculations, it is important to predict parameters like radiation from the flames, the emissivity of the hot layer gases and the heat transfer coefficient on the exposed side of the window.

The window glass often cracks without falling out of its frame. This means that a new vent is not created to let fresh air in to the fire.

Sammanfattning

Denna rapport beskriver fönsterglas under värmepåverkan. Teorierna som kan förklara fönsterbrott vid en pågående brand diskuteras. Datorprogrammet BREAK1 som ska kunna förutsäga när ett fönster spricker till följd av värmepåverkan utvärderas genom att tillämpas på ett antal halvskaleförsök.

Att ett fönster går sönder vid pågående brand i t ex en lägenhet, kan ha stor betydelse för hur brandförloppet utvecklar sig. Är branden ventilationskontrollerad kommer den ökning av ventilationsarea som ett fönsterbrott innebär, att bidra till en ökad effektutveckling på grund av att syretillförseln ökar. Det är därför av intresse att kunna förutsäga när ett fönster går sönder vid ett brandscenario.

Glaset spricker på grund av att det uppstår spänningar i glasets kanter då det utsätts för värmepåverkan. Glas är en relativt dålig värmeledare vilket medför att då ett fönster värms upp vid en brand kommer glasets kanter, som är dolda i infästningen, inte att öka i temperatur i samma takt som den synliga ytan. Mittpartiet vill expandera, kanterna håller emot. Kanterna utsätts för en dragspänning som kan bli så stor att glaset spricker.

Sprickor till följd av värme börjar alltid vid en kant. Detta beror dels på att det är där dragspänningen uppstår och dels på att spänningarna där koncentreras till ojämnheter i den skurna kanten.

Hållfastheten för glas är svår att bestämma. Vid prover brukar stor spridning i resultat erhållas. Orsaken till detta är den skurna kantens utseende. En grov kant innehåller större ojämnheter som bygger upp spänningskoncentrationer. En finare kant kan inte bygga upp spänningskoncentrationer i samma omfattning vilket innebär att det glaspartiet tål en högre belastning.

Ett fönsterglas tar upp värme genom konvektion och strålning från brandgaserna samt strålning från flammorna. Glas är "halvgenomskinligt" för de våglängder som flammorna utstrålar. Detta innebär att värmets inte bara tas upp vid ytan utan även på djupet. För de våglängder som brandgaserna avger kan glaset betraktas som ogenomskinligt, d v s strålningen träffar ytan varefter värmen leds in i glaset.

Det är svårt att förutsäga då glas spricker till följd av värmepåverkan. Detta beror dels på att det är många materialparametrar som påverkar resultatet varav få är noggrant bestämda, och dels på att kanterna och infästningen har en stor betydelse för hållfastheten. Dessutom ligger det svårigheter i att bestämma brandförloppets utveckling vilket påverkar värmetransporten till glaset och på så sätt ger ytterliggare osäkerheter i beräkningarna.

Datorprogrammet BREAK1 utvärderades genom att jämföra det med experimentella värden. Beräkningar utfördes på två scenarier. God överensstämmelse erhöles vid ett av dem medans det andra gav stor avvikelse.

Resultaten från känslighetsanalysen av datorprogrammet BREAK1 visar att det är viktigt att noggrant bestämma parametrar som flammornas strålning, brandgasernas emissionstal och värmeövergångstalet på den exponerade sidan för att inte erhålla alltför stora osäkerheter i beräkningarna.

Ofta spricker glaset utan att falla ur sin båge. Detta innebär att det inte bildas någon ny ventilationsöppning för luften att ta sig in eller ut genom.

1	INLEDNING	13
1.1	Bakgrund.....	13
1.2	Syfte	14
1.3	Översikt	14
1.4	Metod.....	14
1.5	Begränsningar	14
2	HISTORIA OCH TILLVERKNING	17
2.1	Tillverkning.....	17
3	FYSIKALISKA EGENSKAPER	19
3.1	Brottspänning	19
3.2	Värmeledning	21
3.3	Värmekapacitet	22
3.4	Värmeutvidgning.....	22
3.5	Viskositet	23
3.6	Elasticitetsmodul.....	23
3.7	Värmediffusivitet	24
4	VARFÖR SÅ VIKTIGT ATT VETA DÅ GLAS SPRICKER?	25
4.1	Simulerat effekt- och temperaturutvecklingsexempel.....	26
5	VARFÖR SPRICKER GLAS?	29
6	HUR TAR FÖNSTRET UPP VÄRME?	31
6.1	Konvektion	31
6.2	Strålning.....	32
6.2.1	Strålning från flammorna.....	32
6.2.2	Strålning från brandgaslagret.....	33
7	VARFÖR SVÅRT ATT FÖRUTSÄGA DÅ GLASSET SPRICKER?	35
7.1	Brandens egenskaper	35
7.2	Glasetts egenskaper	36

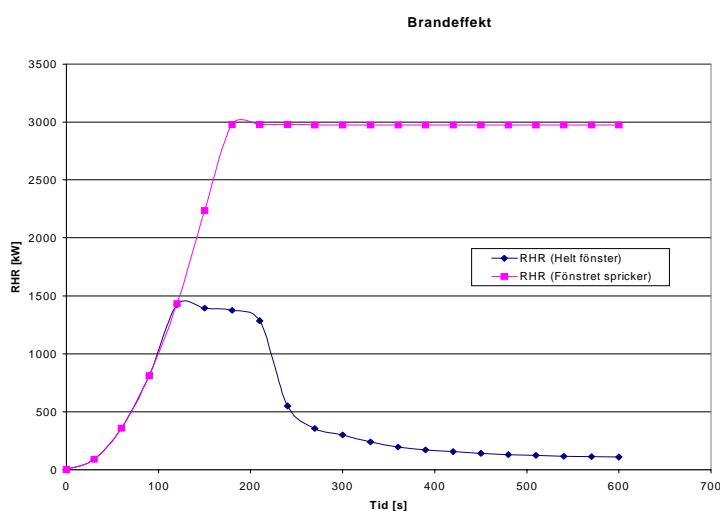
8	BESKRIVNING AV DATORPROGRAMMET BREAK1	37
8.1	Hur ska programmet användas?.....	37
8.2	Modellen	38
8.3	Indata.....	39
8.4	Begränsningar med programmet och skillnader från verkligheten.....	40
9	JÄMFÖRELSE MELLAN BREAK1 OCH EXPERIMENT.....	41
9.1	Beskrivning av Skellys experiment	41
9.2	Datorberäkningar	42
9.3	Slutsats.....	45
10	LITTERATURSAMMANFATTNING	47
11	SLUTSATSER	55
12	FORTSATTAS STUDIER OCH FORSKNING	57
13	ERKÄNNANDEN.....	59
14	REFERENSLISTA.....	61
	APPENDIX 1-5.....	63

1 Inledning

Rapporten är en slutprodukt av kursen Problembaserad brandteknisk riskhantering som ingår i utbildningen för brandingenjörer vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har bestått av enskilt arbete som motsvarar tio veckors arbetstid.Handledning har förekommit från Institutionen för brandteknik, Lunds Tekniska Högskola.

1.1 Bakgrund

En del av dagens brandingenjörers arbete består av att försöka förutsäga utvecklingen av ett brandförlopp. De flesta rumsbränder är ventilationskontrollerade [1] och därför är storleken på luftinsläpp till ett rum av stor betydelse. Om ett fönster eller en dörr står öppen spelar stor roll för brandens tillväxt. Luftens syre kommer in i rummet och underhåller branden. Om öppningarna är stängda får branden ingen näring och tillväxten avstannar. En fönsterruta kan spricka under ett brandförlopp och ett nytt ventilationshål bildas. Branden får mer tillgång till syre och tillväxten ökar. Figur 1 nedan visar ett fiktivt brandförlopp, simulerat med datorprogrammet C-FAST, för två identiska lägenheter där en fönsterruta i ena fallet går sönder efter drygt 100 sekunder.



Figur 1. Diagram som visar hur brandeffekten kan variera beroende på om ett fönster går sönder eller inte. I det ena fallet är fönstret helt och i det andra går det sönder efter drygt 100 sekunder. Scenarierna är simulerade i C-FAST.

Idag används ofta en förenklad metod som går ut på att fönstret antas gå sönder vid en viss temperatur på de omgivande brandgaserna. Vilken temperatur detta skulle vara är inte vetenskapligt fastställt (Shields et al. säger 500°C [2] respektive 600°C [3], [4] anger 257-357°C). Det finns alltså all anledning att ha kunskaper om fönsterglas och de parametrar som påverkar tiden till brott för att kunna göra rimliga bedömningar om hur ett brandförlopp kommer att utveckla sig.

En hel del forskning bedrivs idag på området fönsterglas och värmepåverkan. En av de mest aktiva institutionerna finns på Irland och leds av professor Jim Shields. Men detta är fortfarande forskning och de flesta konsulter använder sig av idag tillgängliga datorprogram eller den ovan nämnda modellen som anger att fönster går sönder vid en viss brandgastemperatur.

1.2 Syfte

Denna rapport har som syfte att beskriva glas som material, försöka förklara faktorer bakom glasbrott till följd av värmepåverkan samt att visa och utvärdera ett av marknadens tillgängliga datorprogram (BREAK1) som säger sig kunna förutsäga då glas går sönder.

Rapporten är riktad till konsulter och andra intresserade inom branschen som har intresse av att förstå hur glas som material beter sig vid värmepåverkan. Det finns en hel del publicerat på området i artikelform på engelska. En idé med denna rapport är att sammanfatta den kunskapen på ett lättbegripligt sätt på svenska.

1.3 Översikt

Rapporten är uppbyggd i fyra områden. Det första är en allmän beskrivning av glas som material där historia, tillverkning och materialegenskaper beskrivs (kapitel 2-3). Den andra delen behandlar glas och värmepåverkan som tar upp frågor som: Vilka faktorer påverkar tid till brott? Hur lång tid tar det innan glaset spricker? Även en matematisk modell beskrivs för att förklara värmeledningen i glaset (kapitel 4-7). Den tredje delen är en beskrivning och utvärdering av datorprogrammet BREAK1 där dess modell och indata presenteras samt att datorberäkningar jämförs med utförda experiment (kapitel 9). Den fjärde och sista delen är en sammanfattning av en del av arbetet som är gjort på området de senaste åren (kapitel 10). Såväl experimentella som teoretiska rapporter och artiklar sammanfattas i detta kapitel.

1.4 Metod

Arbetet har bestått till stor del av litteraturstudier eftersom rapporten huvudsakligen är av sammanfattande karaktär. Det mesta av den litteratur som finns på området är på engelska och mycket av det som publiceras är pågående projekt. Detta medför att de löpande resultaten ofta publiceras i brandtekniska tidskrifter och inte i färdiga rapporter.

Arbetet har även bestått av att utföra beräkningar i datorprogrammet BREAK1. Ett stort antal körningar har utförts för att undersöka hur de olika parametrarna påverkar tiden till brott på glaset.

För att ta reda på materialdata för glas har förutom litteraturstudier en enkätundersökning gjorts som lämnats ut till ett antal fönster- och glastillverkare i Sverige. Dock är det bara två som har svarat.

Några egna laborationer eller experiment har inte utförts, vare sig på materialdata eller rumsbränder.

1.5 Begränsningar

Arbetet har fått ge vika för en del förenklingar respektive begränsningar. För det första behandlas bara vanligt fönsterglas i lägenheter. Sålunda involveras inte armerat glas eller andra specialglas av brandavskiljande karaktär.

För det andra undersöks inte betydelsen av tryckökningen i brandrummet för tiden till fönsterbrott. Detta påverkar spänningen i glaset, speciellt vid rumskonstruktioner som är väldigt täta, d v s utan

stora läckor. Istället konstateras att den primära anledningen till glasbrott vid en lägenhetsbrand är just termiska spänningar i glaset [4] varför tryckproblemet lämnas åt sidan. Fallet då flammorna är i kontakt med glaset har inte undersökts.

De konstruktioner som tas upp i rapporten är till stor del enkelglaskonstruktioner. Teorin behöver bara utvidgas lite för att även innefatta flerglasfönster vilket även tas upp i vissa kapitel i rapporten. Det datorprogram som utvärderas, BREAK1, behandlar bara enkelglas.

Vid utvärderingen jämförs datorberäkningar med verkliga experiment i halvskala. Några egna experiment har inte utförts utan resultat har erhållits från försök gjorda av Michel J. Skelly i en av rapporterna [5] i litteraturundersökningen. Alla experimentella data som är intressanta för det här arbetet är inte dokumenterade i Skellys rapport. Detta leder till en viss osäkerhet i indata som är en begränsning för utvärderingen av datorprogrammet.

Viss materialdata för glas är svårtillgänglig. Inte ens fabrikanterna kan ge exakta svar. Detta rör sig om materialdata som är viktiga vid beräkning av värmeupptagningsförmåga för och värmetransport inom glaset. Detta medför begränsningar, inte bara för detta arbetet utan även för dem som vill tillämpa teorierna vid t e x brandförloppsberäkningar.

Slutligen är det bara ett datorprogram som utvärderas. Detta är BREAK1 och konstruerades av Joshi och Pagni vid Mechanical Engineering Department, University of California at Berkely 1991. Det finns ett till på marknaden som heter McBreak och är en vidareutveckling av BREAK1.

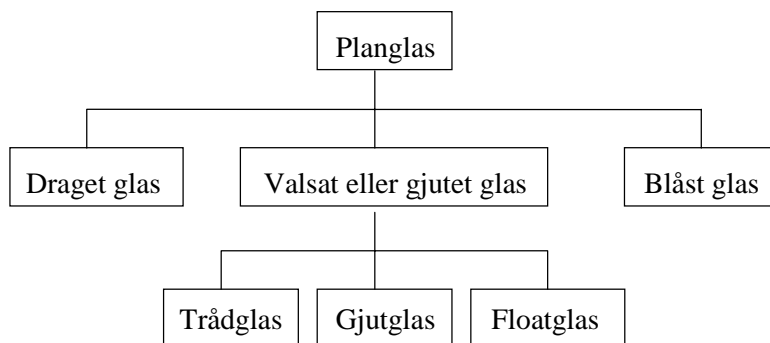
2 Historia och tillverkning

Glas har funnits naturligt på jorden ända sedan jordskorpan bildades och urkontinenterna tog form för 4-5 miljarder år sedan. Det har bildats av magma som har stelnat nära jordytan, d v s snabbt och vid lågt tryck, och bildat obsidian. Även idag bildas naturligt glas vid vulkanutbrott på olika ställen på jorden. Under människans tid har vi styrt utvecklingen av glasets användningsområde. Först använde vi det vassa naturliga glaset till skärverktyg och pilspetsar. Sedan lärde vi oss smälta det naturliga glaset och tillverkade små smycken, varefter vi kom underfund med hur vi själva kunde blanda råvaror för att smälta eget glas och forma vaser och bågare. Idag tillverkar vi allt från smycken, via dricksglas, till fönsterglas med enorm precision och tillverkningshastighet.

De första fönsterglasen användes redan så tidigt som 100 f. Kr. i Pompeji. Idag förekommer fönsterglas i praktiskt taget alla byggnader med funktionen att ge den boende kontakt med utomhusmiljön samtidigt som det ska skydda henne mot bl a väder och ljud.

2.1 Tillverkning

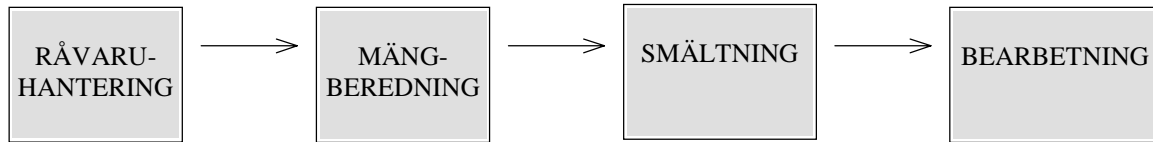
Glas delas in i olika typer beroende på hur de tillverkats. Ett släkträd för planglas ses i Figur 2. Med planglas menas all typ av glas som vid den ursprungliga tillverkningen framställdes i form av skivor. Alla fönster är alltså tillverkade av någon typ av planglas.



Figur 2. Schema som visar hur olika typer av glas är besläktade.

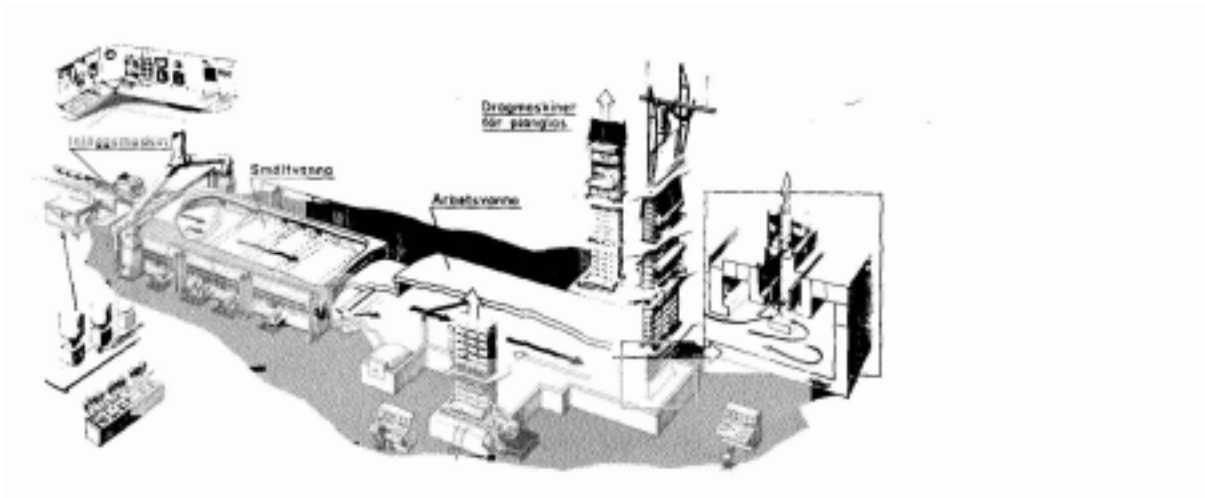
Den idag absolut dominerande typen av planglas vid montering av vanliga lägenhetsfönster är floatglas. Därför kommer endast tillverkningen av denna att redovisas här.

Tillverkningen av planglas kan delas in i fyra olika faser: råvaruhantering, mängberedning, smältning och bearbetning, se Figur 3. För alla typer av planglastillverkning är de tre första faserna lika och går ut på att man ska blanda samman råvarorna i rätt proportioner och under korrekta förutsättningar samt att smälta det till rätt arbetstemperatur. Under mängberedningen tillförs förutom grundråvarorna även tillsatsämnen för att erhålla rätt egenskaper på glaset.



Figur 3. Schematisk beskrivning över tillverkningsfaserna för planglas.

Vid bearbetning av floatglas använder man sig av en så kallad smältvanna som kan liknas vid ett stort men grunt badkar, se Figur 4. Den är ca 5 m bred och 50 m lång samt har en bädd av smält tenn i botten. Det flytande glaset tillförs kontinuerligt vid vannans ena kortsida och förs efterhand till motstående sida. På grund av att glaset har lägre densitet än tenn flyter det ovanpå tennet. Eftersom tenn har en smältpunkt på ca 230°C kan man se till att då glaset når motstående sida så har glaset stelnat samtidigt som tennet fortfarande är flytande. På så sätt ligger glaset under hela processen på en flytande massa vilket gör att det inte repas.



Figur 4. Figur över tillverkning av maskindraget planglas. Bilden är hämtad från [6].

Floatprocessen var helt revolutionerande då den kom 1959 och är idag den helt dominerande metoden för att framställa planglas. Den har betydligt lägre arbets- och anläggningskostnader än de andra metoderna för gjutglastillverkning.

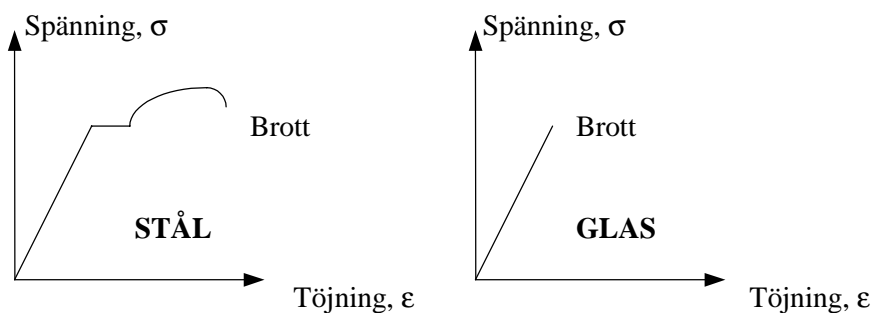
3 Fysikaliska egenskaper

Det finns ett antal fysikaliska egenskaper för glas. De som är mest väsentliga för dess hållfasthet vid värmepåverkan är brottspänning, värmekonduktivitet, värmekapacitivitet och värmeutvidgning.

Nedan kommer dessa egenskaper, och några till, att beskrivas översiktligt och i kapitel 9 kommer det att diskuteras hur de påverkar glaset vid värmebelastning.

3.1 Brottspänning

Glas är ett sprött material och uppvisar en elastisk deformation under hela intervallet från belastning till brott till skillnad från de flesta ståltyper, se Figur 5. Glas har olika hållfasthet för drag- och tryckspänning. Tryckhållfastheten är mer än 10 ggr större än draghållfastheten [6].



Figur 5. Jämförelse mellan glas och ståls spännings- töjningsdiagram.

Beroende på var man söker ges olika svar på hållfastheten för glas. De flesta anger en draghållfasthet mellan 30 och 50 MPa, se appendix 1. Om man väljer en brottspänning på 40 MPa så är man på säkra sidan med 90-95% säkerhet enligt Joshi et al. [7].

Vid undersökningar har det visat sig att glas inte har en specifik hållfasthet utan resultaten kan skilja sig mycket från prov till prov [7]. Det anses finnas två orsaker till detta. Det första är att en glasyta innehåller mikrosprickor som påverkar hållfastheten. Dessa sprickor blir, enkelt uttryckt, fler och grövre ju äldre glasytan blir. Man kan säga att glaset vittrar. Dessutom påverkas mikrosprickorna av kemiska angrepp som nedsätter glasytans hållfasthet. Den andra anledningen är kanterna på glasstycket. Är glaset skuret för hand blir kanten grövre än om det är skuret med t ex maskin och det uppstår, vid belastning, spänningskoncentrationer vid ojämnheter. Även kanter som är skurna med samma maskin kan uppvisa skilda resultat beroende på hur fina kanterna har blivit. Spänningskoncentrationerna orsakar sprickbildning vid betydligt lägre belastning än vad som annars är normalt för glas.

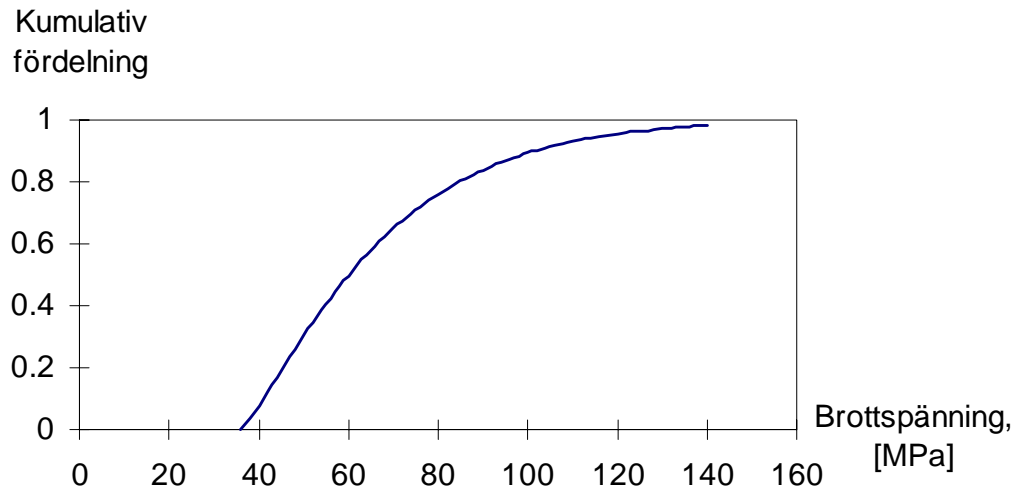
Joshi et al. [7] har gjort en undersökning av draghållfastheten för glas. Prover på 59 glasskivor utfördes och resultatet blev att brottspänningen kan beskrivas som en kumulativ Weibullfördelning*, se Figur 6. Ur figuren kan tydas att de flesta hållfastheter ligger mellan 40 och 60 MPa eftersom kurvan

* En kumulativ Weibullfördelning är en statistisk fördelning och ser för glas ut enligt följande:

$$G(\sigma_b) = 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_b - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m} \text{ med } m=1,21, \sigma_0=33\text{MPa och } \sigma_u=35,8\text{MPa.}$$

är som brantast där. Jämfört med andra material är dock spridningen stor. Diagrammet ska avläsas ”Vad är sannolikheten att hållfastheten på glaset är mindre än...”

Weibullfördelning av hållfastheten för glas

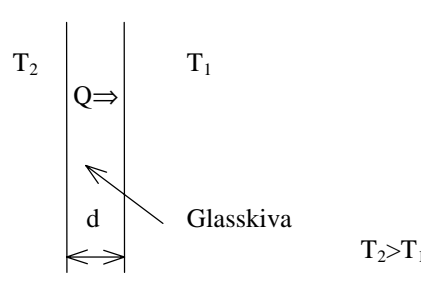


Figur 6. Kumulativ fördelning av drag- och böjhållfastheten för glas. Diagrammet ska läsas ”Vad är sannolikheten att hållfastheten på glaset är mindre än...”

I appendix 1 finns en sammanställning av vilka hållfastheter som anges för glas beroende på i vilken litteratur man läser eller vilken glastillverkare man frågar.

3.2 Värmeledning

Värmeledning är ett mått på hur pass bra ett material leder värme. Värmeledningsförmågan, som tidigare kallats värmeledningsförmåga och värmeledningstal, har beteckningen λ och anger den energimängd som leds genom en kub med sidan ett och har en temperaturskillnad mellan två motstående sidor på en grad Celsius. Ekvation (1) härledd från Fouriers lag om värmeledning och ses i Figur 7 nedan.



$$Q = \lambda \cdot (T_2 - T_1) \frac{A \cdot t}{d} \quad (1)$$

Q – värmemängd [J]
 λ – värmeledningsförmåga [$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]
 $(T_2 - T_1)$ – temperaturskillnad [$^\circ\text{C}$]
 A – glasets area [m^2]
 t – tid [s]
 d – glasets tjocklek [m]

Figur 7. Figur över värmeledning genom en glasskiva. Till höger ses uttrycket för värmeledning genom ett material.

Glas har ett λ -värde som varierar med temperaturen men för praktiska beräkningar inom energihushållning används ett värde på ca $0,81 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$, vilket betraktas som ganska lågt i jämförelse med andra byggnadsmaterial, se Tabell 1 nedan [6]. Värmeledningsförmågan för vatten och luft har också angivits. För att ange skillnaden i värden beroende på vilken litteratur som används kan nämnas att Cengel et al. [8] anger ett λ -värde på $1,4 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ för glas, vilket är drygt 70% större än värdet i tabellen nedan.

Tabell 1. Några vanliga byggnadsmaterials värmeledningsförmåga. Värdena är hämtade från [6].

MATERIAL	VÄRMELEDNINGSTAL, λ [$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]
Planglas	0,81
Aluminium	210
Gjutjärn	30-50
Stål	45-60
Betong, torr	0,9
Trä (16-18% fukt)•	0,35
Vatten (12°C)	0,57
Luft (0°C)	0,024

I appendix 1 finns en sammanställning av vilka värden på värmeledningsförmåga som anges för glas beroende på i vilken litteratur man läser eller vilken glastillverkare man frågar.

3.3 Värme kapacitet

Värme kapaciteten är ett mått på ett materials förmåga att lagra värme och anger den energimängd som krävs för att värma upp ett kilo av ämnet en grad Celsius. Detta värde kan skilja sig en hel del mellan olika material. Till exempel krävs 500 J för att värma ett kilo gjutjärn en grad Celsius samtidigt som det åtgår drygt 4 000 J för ett kilo vatten, d v s nästan 10 gånger mer. Värme kapaciteten betecknas med c och har för glas ett värde på ca $0,84 \text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$. I Tabell 1 jämförs värme kapaciteten för några olika byggnadsmaterial [6]. Värme kapaciteten för vatten och luft har också angivits.

Tabell 2. Några vanliga byggnadsmaterials värme kapacitet. Värdena är hämtade från [6].

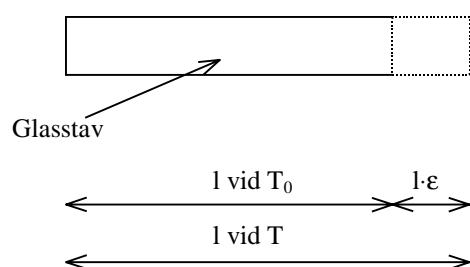
MATERIAL	VÄRMEKAPACITIVITET, c [kJ/kg·°C]
Planglas	0,84
Aluminium	0,92
Gjutjärn	0,50
Stål	0,46
Betong	0,92
Trä	1,68-2,51
Vatten	4,19
Luft	1,00

Förr användes benämningen specifikt värme och hade även då beteckningen c . I appendix 1 finns en sammanställning av vilka värden på värme kapaciteten som anges för glas beroende på i vilken litteratur man läser eller vilken glastillverkare man frågar.

3.4 Värme utvidgning

Glas utvidgar sig, som de flesta andra material, när det värms. Jämfört med andra byggnadsmaterial är dock denna utvidgning relativt liten, se Tabell 3. Som vi kommer att se i kapitel 5 är det trots detta värme utvidgningen som är avgörande vid de flesta fönsterbrott till följd av värmepåverkan.

Värme utvidgningskoefficienten, här betecknad β , är ett mått på hur mycket ett material utvidgar sig vid uppvärmning, se Figur 8. Sambandet mellan uppvärmning och utvidgning ges enligt följande.



$$\varepsilon = \beta \cdot \Delta T \quad (2)$$

ε - relativ töjning [-]
 β - värme utvidgningskoefficient [$^\circ\text{C}^{-1}$]
 ΔT - temperaturhöjning ($=T-T_0$) [$^\circ\text{C}$]
 T_0 - ursprunglig temperatur [$^\circ\text{C}$]
 T - temperatur efter uppvärmning [$^\circ\text{C}$]
 l - längden vid olika temperaturer [m].

Figur 8. Till vänster, bild över utvidgningen av en glasstav. Till höger, sambandet mellan relativ töjning och temperaturhöjning.

Värmeutvidgningskoefficienten, β , för glas ökar något med ökad temperatur men för temperaturer upp till 300°C kan man med två siffrors noggrannhet använda sig av $\beta=8,0-8,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Vid temperaturer runt 520-550°C (transformationsintervallet) ökar värmeutvidgningskoefficienten markant när glaset övergår från sprött till visköst tillstånd [6]. Detta är av ringa betydelse för oss eftersom de flesta fönster redan spruckit vid lägre temperaturer.

Tabell 3. Några vanliga byggnadsmaterials värmeutvidgningskoefficienter. Värdena är hämtade från [6].

MATERIAL	VÄRMEUTVIDGNINGSKOEFFICIENT, β [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
Planglas	$8,0-8,5 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$23,7 \cdot 10^{-6}$
Gjutjärn	$11 \cdot 10^{-6}$
Stål	$12 \cdot 10^{-6}$
Betong, torr	$12 \cdot 10^{-6}$
Trä (ek) •	$5 \cdot 10^{-6}$

3.5 Viskositet

Glas är ett sk amorf material och övergår successivt från sprött till plastiskt tillstånd utan att passera en definierad smältpunkt. Viskositeten för vanliga glastyper vid rumstemperatur ligger vanligen kring $10^{19}-10^{20}$ Pois (vatten har ca 10^{-2} Pois) och en mätbar plastisk deformation hinner därför inte äga rum under en period mindre än ett par miljarder år. Påståenden om att glasrutor i gamla byggnader är tjockare nedtill än upptill till på grund av tyngdkraften är alltså inte att betrakta som trovärdiga. Det faktum att vissa glasrutor verkligen har observerats med en tjockare del i gamla byggnader har antagligen sin förklaring i att glastillverkningen inte var mer precis på den tiden och att glaset därmed var ojämnt tjockt redan då det monterades [6].

3.6 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen betecknas med E och är proportionalitetskonstanten i sambandet mellan spänning och töjning i Hookes lag:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

σ - spänning [N/m^2]

E - elasticitetsmodul [N/m^2]

ε - relativ töjning [-]

Vanligtvis uppvisar ett material ett elastiskt område vid låga spänningar och ett plastiskt område vid högre spänningar. Den elastiska egenskapen innebär att materialet återfår sin ursprungliga form efter belastning. Det plastiska intervallet innebär att en viss deformation uppvisas även efter det att belastningen frångåtts. I det elastiska området gäller Hookes lag men i det plastiska intervallet gäller andra samband som inte är linjära. Vid dragprover utförda på glasexemplar har man upptäckt att glas inte har något plastiskt intervall. Glaset uppvisar med andra ord ingen deformation då lasten tas ifrån glaskroppen. Detta innebär att Hookes lag gäller ända fram tills det att brott uppstår [6], vilket ger ett

spänningstöjningsdiagram som illustreras i Figur 5, sidan 19. Elasticitetsmodulerna för några olika byggnadsmaterial redovisas i Tabell 4.

Tabell 4. Några vanliga byggnadsmaterials elasticitetsmoduler. Värdena är hämtade från [9].

MATERIAL	ELASTICITETSMODUL, E [N/M ²]
Planglas	4,5-10·10 ¹⁰
Aluminium	7,0·10 ¹⁰
Gjutjärn	10·10 ¹⁰
Stål	20·10 ¹⁰
Betong, torr	2-4·10 ¹⁰

I appendix 1 finns en sammanställning av vilka elasticitetsmoduler som anges för glas beroende på i vilken litteratur man läser eller vilken glastillverkare man frågar.

3.7 Värmediffusivitet

Värmediffusiviteten är ett mått på hur bra temperaturen leds in i (eller ut ur) ett material [9]. Det påminner alltså om värmekonduktiviteten men tar även hänsyn till densitet och värmekapacitivitet. Den beräknas som kvoten mellan värmekonduktiviteten och produkten av densiteten och värmekapacitiviteten enligt formel (4) och har följaktligen enheten m²/s. Värmediffusiviteten för glas är ca 3,0-4,0×10⁻⁷ m²/s [13].

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (4)$$

α - värmediffusivitet [m²/s]

λ - värmekonduktivitet [W/m·°C]

ρ - densitet [kg/m³]

c - värmekapacitivitet [J/kg·°C]

4 Varför så viktigt att veta då glas spricker?

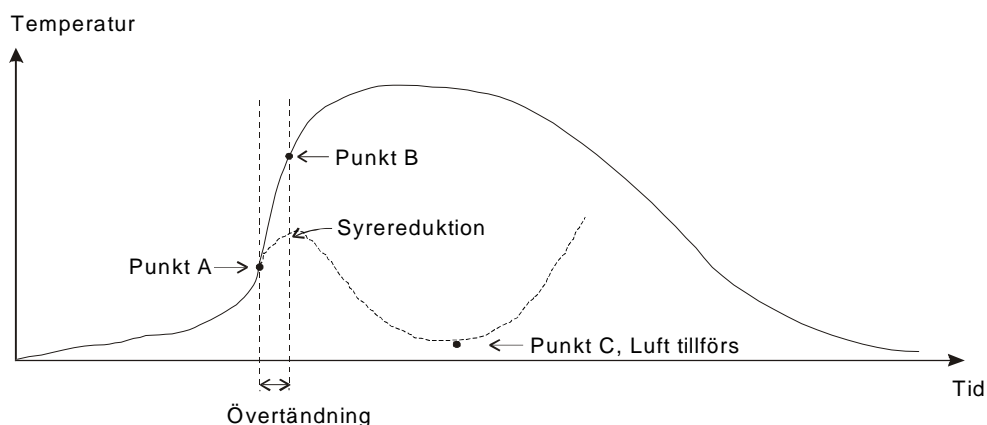
De flesta lägenhetsbränder idag är ventilationskontrollerade [1]. Detta innebär att brandens effektutveckling begränsas av syretillförseln, d v s att även om brandrummet skulle tillföras mer brännbart material skulle inte branden öka i intensitet. Detta beror i sin tur på att de öppningar som finns (öppna dörrar, fönster och läckageareor) inte kan släppa in luft i tillräcklig mängd för att branden ska öka i intensitet.

En lägenhetsbrand som är ventilationskontrollerad kommer därför att växa i intensitet om lägenhetens öppningar ökas av någon anledning. Det kan t ex vara en dörr som öppnas för att komma in och rädda kvarvarande personer eller en fönsterruta som går sönder på grund av värmebelastning.

En brand som pågår i en lägenhet med stängda dörrar och fönster kommer att minska i intensitet efterhand som syret förbrukas. Vid ett eventuellt fönsterbrott sugs frisk, syrerik luft in i lägenheten på grund av det undertryck som bildats och följden kan bli en s k *backdraft* [10]. Detta innebär att den friska luften sugas in och blandas med de oförbrända gaserna i lokalen och bildar en brännbar blandning som antänds. Detta medför ett betydligt kraftigare brandförlopp som i sin tur kan medföra en övertändning, ett tillstånd då allt brännbart i rummet brinner.

För att grafiskt illustrera vad som kan hända vid ett fall då ett fönster går sönder efter det att en lägenhetsbrand har hållit på en stund används Figur 9. Den heldragna linjen visar fallet då branden har god tillgång på syre. Det här skulle t ex kunna vara en lägenhet med en öppen dörr. Branden går i det här fallet till övertändning.

Den streckade linjen illustrerar ett fall då brandens tillväxt avstannar (punkt A) och istället minskar på grund av otillräcklig syretillförsel. Tillväxten avbryts precis innan övertändning skulle inträffa. Istället antas att ett fönster går sönder efter en tid. Det har nu hunnit bildas en hel del oförbrända gaser i rummet och när den friska luften kommer in ökar intensiteten (punkt C). Om den nya ventilationsöppningen är av väsentlig storlek kan det leda till en övertändning med den fullt utvecklade rumsbranden som följd [10].

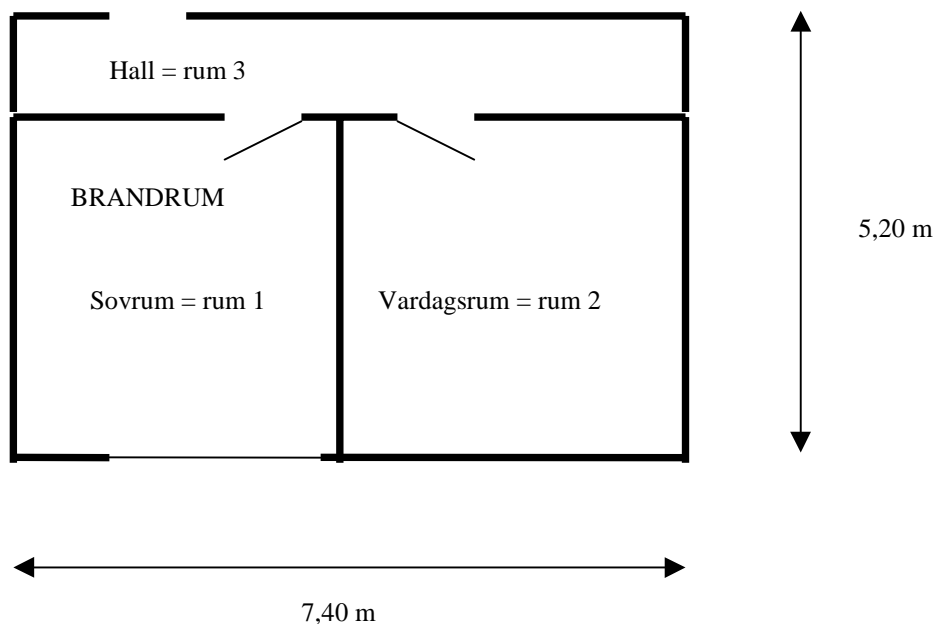


Figur 9. Illustration över skillnaden mellan ett välventilerat brandscenario (heldragen kurva) och ett underventilerat (streckad kurva) där en öppning öppnas efter en viss tid (kort innan punkt C). Bilden är hämtad från [11].

För att ytterligare visa på skillnaderna i brandförlopp beroende på hur pass stor ventilationsarea en lägenhet har kommer det att redovisas ett simulerat exempel i avsnittet nedan.

4.1 Simulerat effekt- och temperaturutvecklingsexempel

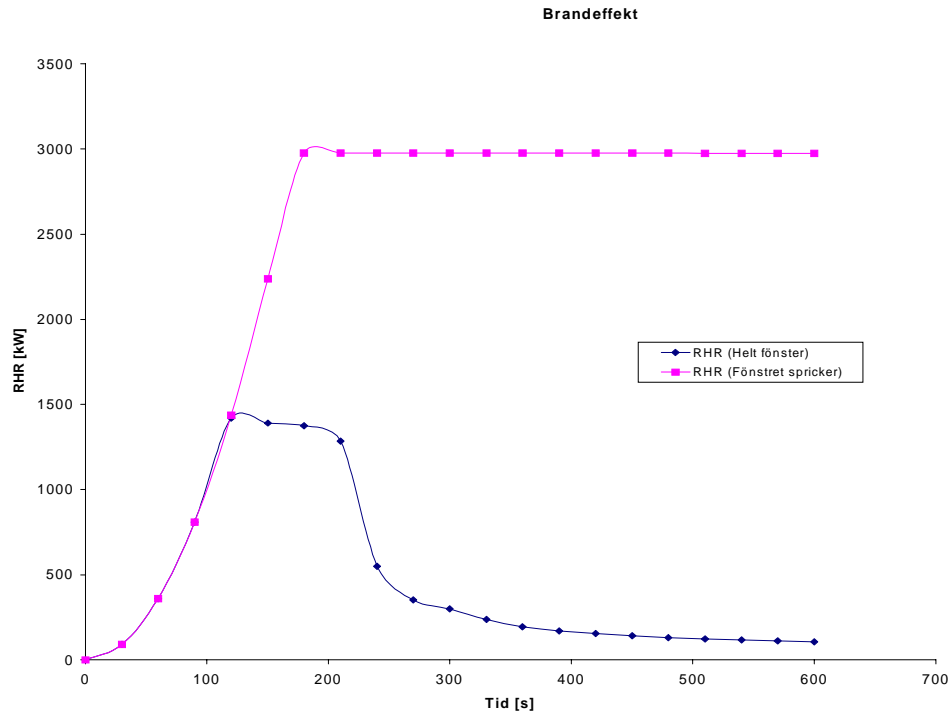
Här kommer ett exempel att redovisas där en brand startar i en tvårumslägenhet. Det är en säng som börjar brinna. Två skilda fall redovisas. Ett där en fönsterruta i brandrummet går sönder efter en viss tid och ett där inget fönster går sönder. Lägenhetens geometrier visas i Figur 10. Ytterdörren hålls stängd under hela simuleringen. Brandförlopp beräknas med hjälp av datorprogrammet C-FAST och tid till fönsterbrott beräknas med BREAK1.



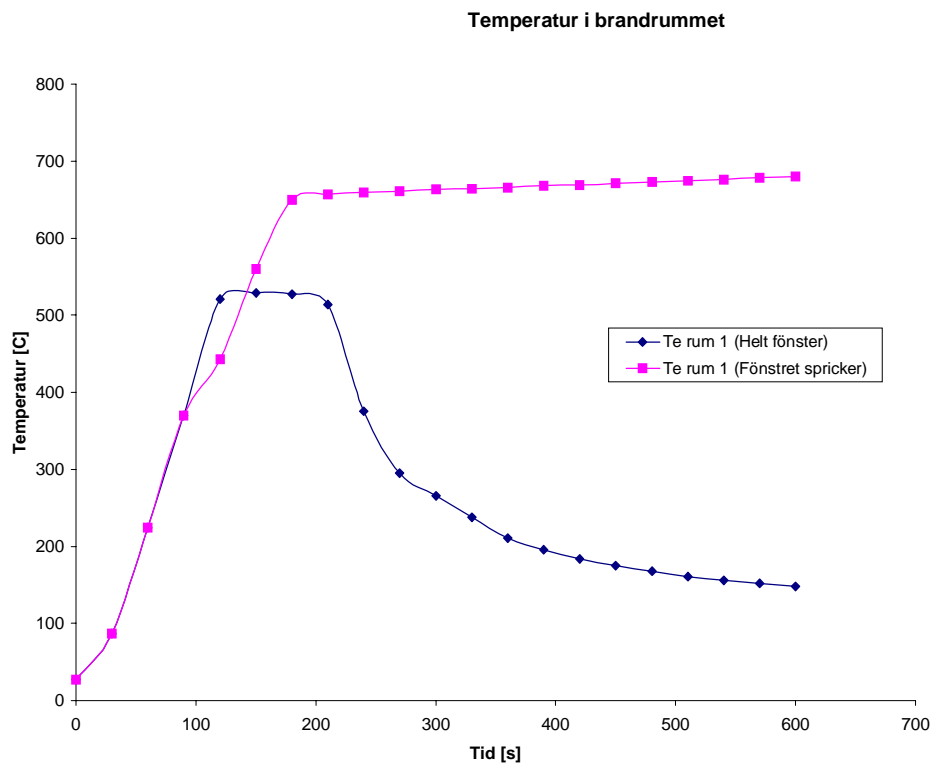
Figur 10. Skiss över lägenhet utsatt för brandscenario.

Som indata till C-FAST anges en effektutveckling som växer med en viss tillväxthastighet för att sedan uppnå en maximal effekt på 3 MW. Beräkningarna i C-FAST ger bl a en temperaturkurva med avseende på tiden i brandrummet för stängda fönster. Denna används som indata i BREAK1 varefter tid till fönsterbrott erhålles. En ny beräkning utförs i C-FAST för att erhålla det ”riktiga” brandförloppet med en fönsterruta som går sönder efter en viss tid. För utförligare beskrivning av beräkningsgång med C-FAST och BREAK1, se kapitel 8. Detta exempel finns mer utförligt beskrivet i appendix 2.

Beräkningarna i BREAK1 ger att fönsterrutan går sönder efter drygt 100 s. Figur 11 och 12 visar effekt- respektive temperaturutvecklingen i brandrummet dels för fallet då hänsyn tas till att fönstret går sönder och dels för fallet då hänsyn ej tas. Orsaken till att effektutvecklingarna ser olika ut i de två fallen är att C-FAST tar hänsyn till syreförbrukningen och begränsar därmed effektutvecklingen då fönstret antas förbli intakt.



Figur 11. Figuren visar effektutvecklingen av branden vid två olika scenarier i samma lägenhet. I det ena fallet antas fönstrena vara hela under förloppet, och i det andra fallet antas ett fönster gå sönder efter drygt 100 s.



Figur 12. Figuren visar temperaturutvecklingen i brandrummet vid två olika scenarier i samma lägenhet. I det ena fallet antas fönstrena vara hela under förloppet, och i det andra fallet antas ett fönster gå sönder efter drygt 100 s.

Som kan urskiljas i båda diagrammen ovan avstannar både effektutvecklingen och temperaturökningen vid ca 100 s för att sjunka vid ca 200 s i fallet då ingen hänsyn tas till att fönstret går sönder efter värmepåverkan. I det fallet då fönsterbrott tas med i beräkningarna erhålls ett värre scenario med växande effektutveckling och temperaturstegring. Det framgår tydligt i diagrammen att den förra branden är ventilationskontrollerad och den senare är bränslekontrollerad.

Det kan nämnas att det i det här fallet inte blev någon nämnvärd skillnad i brandgaslagrets höjd mellan de två fallen mer än i själva brandrummet där fallet med det spruckna fönstret ger ett värre fall då lagret befinner sig ca fyra decimeter närmare golvet. Diagram över temperatur och brandgaslagrets höjd för de olika rummen samt över effektutvecklingen för det här exemplet finns redovisade i appendix 2.

Samtidigt kan nämnas utifrån temperaturdiagrammet ovan att det ”realistiska fallet”, d v s fallet med det trasiga fönstret, leder till övertändning. Vad beträffar det andra fallet är det svårt att uttala sig. Enligt Bengtsson [10] måste brandgastemperaturen nå upp till 600°C för att övertändning ska inträffa. I det nämnda fallet når brandgaserna drygt 500°C varför det är svårt att avgöra ifall övertändning inträffar eller ej, med tanke på osäkerheter i beräkningarna.

Tydligt är i alla fall att det blir betydlig skillnad på brandscenariot beroende på hur stor ventilationsarea brandrummet har samt när en eventuell ändring av dess storlek äger rum. En realistisk bedömning eller beräkning på när detta inträffar är därför av största vikt för en brandingenjör som arbetar med att avgöra verklighetstroga brandscenarier.

5 Varför spricker glas?

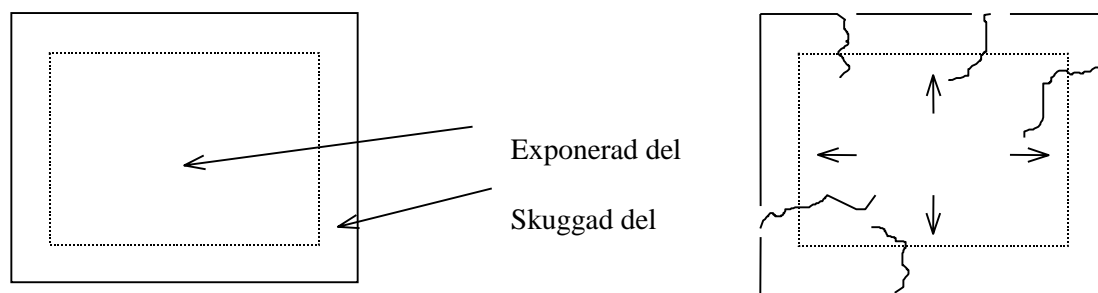
Vid en rumsbrand kan ett fönster spricka av primärt två anledningar. Det ena är att glaset går sönder av det övertryck som byggs upp då temperaturen stiger i rummet. Detta förutsatt att rummet är något så när tätt. För att glaset ska spricka krävs normalt ett övertryck i storleksordningen 2-7 kPa [10]. Den andra anledningen är att glaset utsätts för någon form av värmepåverkan som är mer än vad glaset klarar av.

I vanliga fall uppstår de kriterier som orsakar fönsterbrott till följd av värmepåverkan tidigare än de för tryckpåverkan [4]. Av den anledningen kommer bara värmefallet att tas upp i denna rapport.

Principen bakom varför glas spricker till följd av värmepåverkan är ganska enkel. För att förstå den behöver man bara enkla fysikkunskaper såsom förståelse för värmetransport och värmeutvidgning. Det är när man ger sig på att försöka förutsäga när det sker som problemen uppstår, se kapitel 7. En del ”materialkonstanter” är temperaturberoende i de intervall som vi rör oss vid en rumsbrand samtidigt som glasets hållfasthet är svår att ange inom ett intervall mindre än ~30MPa.

Vid värmepåverkan spricker ett fönsterglas på grund av de temperaturgradienter som uppstår mellan den synliga delen av glaset och den del som är infäst i bågen. Den exponerade delen värms upp av strålning från flammorna och de varma brandgaserna samt av konvektion från brandgaslagret. De dolda (infästa) delarna skuggas av fönsterbågen och värms bara upp genom konduktion från den exponerade glasdelen. Glas är en relativt dålig värmeledare varför denna värmetransport sker långsamt och det yttre glaset kommer inte att värmas upp i samma takt som mittpartiet.

Det som nu sker är att glasets mittparti vill utvidga sig mer än glasets utkanter. Tryckspänningar uppstår i mittpartiet och dragspänningar i ytterkanterna. Vid tillräckligt hög temperaturskillnad går glaset sönder, se Figur 13. För normala fönsterdimensioner kommer sprickan alltid att börja vid en kant [2], [12]. Detta har två förklaringar. För det första har glas mycket större tryck- än draghållfasthet vilket talar för att glaset borde spricka där det finns dragspänningar, det vill säga vid de skuggade partierna. För det andra finns det alltid ojämnheter i kanterna som orsakar spänningskoncentrationer vilka gör att en spricka startar lätt just där.

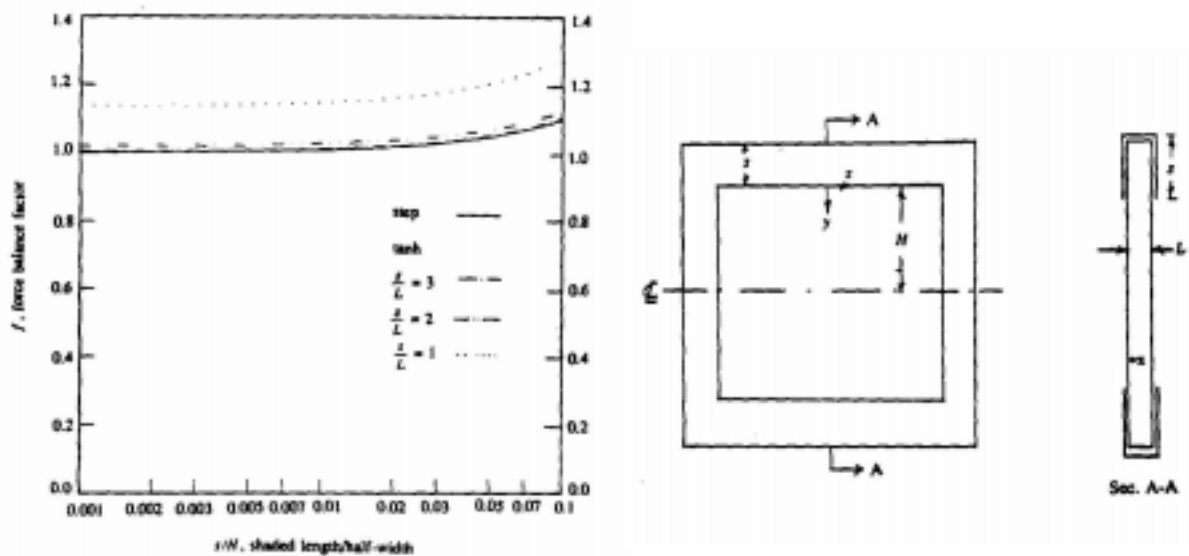


Figur 13. Figur som beskriver varför fönsterglas går sönder till följd av värmepåverkan. Mittpartiet värms upp, utvidgas och utsätter de yttre kanterna för dragspänningar större än hållfastheten.

De två grundläggande formlerna för teorin om varför glas spricker till följd av värmepåverkan ((2) och (3)) har beskrivits i kapitel 3. Antag nu att den exponerade delen utsätts för en temperaturhöjning av ΔT . Då kommer den att utvidgas $\epsilon \cdot X$ i x-led. Om vi antar vidare att ytterkanten inte ger något motstånd kommer den att utvidgas lika mycket, d v s $\epsilon \cdot X$. Eftersom Hookes lag gäller ända till brott för glas, se avsnitt 3.1, kan vi säga att i och med att ytterkanten förlängts med $\epsilon \cdot X$ måste den ha utsatts

för dragspänningen $\sigma = E \cdot \epsilon$. På motsvarande sätt kommer man fram till samma uttryck om man tittar på förlängningen i y-led.

Ovanstående gäller förutsatt att det skuggade partiet inte värms upp alls. Så är emellertid inte alltid fallet. Detta problem kringgås lätt genom att låta ΔT stå för temperaturskillnaden mellan de exponerade och oexponerade glaspartierna. Dessutom kommer inte de inre partierna att expandera utan motstånd beroende på att det yttre glaspartiet håller emot. Detta medför att expansionen blir mindre och därmed också dragspänningen i de yttre kanterna. Därför kompletteras spänningsformeln i stycket ovan med en faktor, $g \approx 1$, som beror på glasskivans tjocklek och höjd samt det skuggade partiets bredd [1], [13], se Figur 14.



Figur 14. Till vänster, diagram över hur korrektionsfaktorn g varierar med s/H och s/L . Till höger en figur som förklarar beteckningarna s , H och L . Bilderna är hämtade från [13].

Sammanfattar man detta kan man säga att glasets ytterkanter utsätts för en dragspänning som är

$$\sigma = \frac{E \cdot \beta \cdot \Delta T}{g} \quad (5)$$

σ - dragspänning i ytterkanten [N/mm^2]

E - elasticitetsmodul [N/mm^2]

β - värmeutvidgningskoefficient för glas [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ΔT - Temperaturskillnaden mellan exponerade och skuggade glaspartier [$^{\circ}\text{C}$] eller [K]

g - korrektionsfaktor [-].

6 Hur tar fönstret upp värme?

Glasrutan i ett fönster kan ta upp värme på två olika sätt, nämligen genom konvektion och strålning. Proportionerna mellan dessa beror på faktorer såsom var branden är i förhållande till fönstret, om det övre brandgaslagret är i kontakt med glaset, vilket bränsle som brinner, mm.

De två fysikaliskt olika sätten att överföra värme och hur det förhåller sig för just glas förklaras nedan.

6.1 Konvektion

Om brandgaslagret sjunkit till en nivå så att det är i kontakt med glaset i ett fönster kommer värme att överföras från de varma gaserna till det svalare fönstret. Detta sker genom både strålning och konvektion varav det senare kommer att behandlas i det här stycket.

Överföring av värme genom konvektion till glas sker på samma sätt som för andra fasta material, d v s värme överförs till glaset med ett visst värmeövergångsmotstånd varefter värmets leds in i glaset genom konduktion, se (6).

$$\dot{Q}_c = h_c (T_{br} - T_{glas}) \cdot A_{glas} \quad (6)$$

\dot{Q}_c -konvektivt värmeflöde [W]

h_c – konvektiva värmeövergångstalet [W/m^2K]

T_{br} – brandgasernas temperatur [K]

T_{glas} – glasytans temperatur [K]

A_{glas} – glasets yta [m^2].

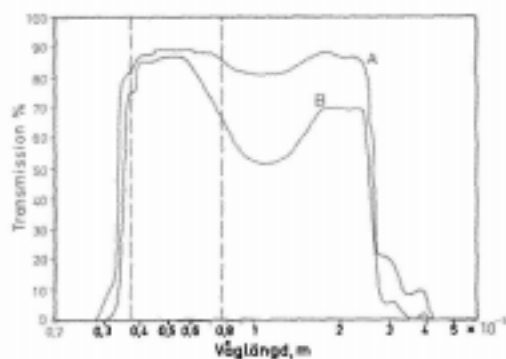
Värmeflödet är alltså beroende av temperaturskillnaden och värmeövergångstalet, h_c . h_c är i sin tur beroende av brandgasernas strömning vid glasytan. Naturlig konvektion, som bara beror på temperaturskillnaden mellan gas och glasyta, medför en relativt lugn strömning och ett lågt värde på h_c . I brandrummet kan konvektionen vara påtvingad vilket innebär att brandgasströmmen förbi glasytan beror på turbulensen i brandgaslagret. Detta medför ett större värde på h_c .

Värmeflödet från brandgaserna till glaset är i de flesta fall inte konstant. Såväl temperaturdifferensen som det konvektiva värmeövergångstalet ändras efterhand som branden fortgår. Joshi och Pagni anger att en linjär ökning från 10 till 40 W/m^2K på ca 60-100 s är lämpligt för de halvskaleförsök de gjort [7]. Samma författare anger ett konstant värmeövergångstal på insidan med värdet 76 W/m^2K [14]. Författaren motiverar det höga värdet med att det är typiskt för påtvingad konvektion av brandgaslagret. Cuzillo et al. däremot anger ett värde på 3-8 W/m^2K [15], vilket är att betrakta som lågt med tanke på att en av författarna även har författat de övriga två artiklarna. En sammanställning av värmeövergångstal funna i litteraturen redovisas i appendix 1. Troligtvis beror de stora variationerna i värden på att en del författare avser det konvektiva värmeövergångstalet medans andra syftar på det totala värmeövergångstalet vilket även tar hänsyn till strålning. Detta medför naturligtvis att värdena kan skilja sig åt betydligt. En slutsats är dock, trots detta, att den kunskap som finns idag inte är tillräcklig för att ange den konvektiva värmeöverföringen vid de varma brandgaserna inom ett klart definierat intervall.

Utsidan av glaset, som är vänd från branden, förlorar värme till den omgivande luften. Glasytan kyls av. Detta sker på motsvarande sätt som glaset tar upp värme på insidan. Avkylningen är dock enklare att modellera så till vida att värmeövergångstalet kan betraktas som konstant. Detta beror på att strömningen inte påverkas nämnvärt av branden på insidan. Joshi och Pagni redovisar värden på $15,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ [14] och $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ [7]. I det här fallet är uppgifterna lite mer samlade men inte mer än att det får anses som osäkra data.

6.2 Strålning

Värme överförs även till glaset genom strålning. Den strålning med våglängder inom det synliga området absorberas inte av glaset vilket gör att fönstret får just den egenskap vi vill att det ska ha, nämligen genomskinlighet. Dessutom dämpar fönstret ljud. Detta beror på att det inte är helt ”genomskinligt” för de ljudvågor som är inom vårt hörbara område. De våglängder som glas släpper igenom visas i Figur 15.

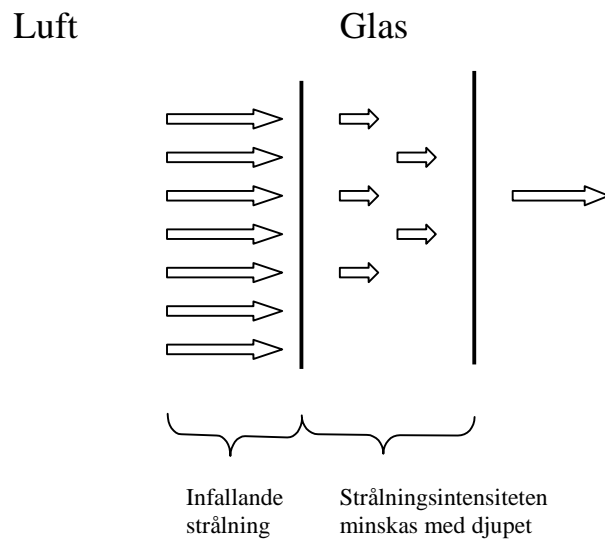


Figur 15. Figuren visar transmissionen för 6 mm maskindraget glas. Området mellan de streckade linjerna är synligt strålning. Glas A har en järnhalt av 0,04% och B 0,28%. Bilden är hämtad från [6].

6.2.1 Strålning från flammorna

Glas är alltså både genomskinligt och icke genomskinligt beroende på vilken våglängd strålningen har. Vad beträffar strålning från flammor gäller något av ett mellanting. Denna strålning har våglängder runt $3 \mu\text{m}$ [15]. Glaset släpper igenom en del av denna strålning men absorberar desto mer. På engelska benämns glas ”semi-transparent” vilket kan översättas med ”halvgenomskinligt”. Detta innebär att strålningen tar sig in i materialet men intensiteten tunnare ut ju längre in i materialet strålningen kommer, se Figur 16. Glaset tar alltså inte enbart upp strålningen vid den träffade ytan utan även på djupet. Figur 15 visar att för våglängder större än $3 \mu\text{m}$ är transmissionen mindre än 10 %.

I vanliga fall träffar strålningen en yta och värmer upp den, varefter konduktion (ledning) transporterar energin från ytan vidare in i materialet. Semitransparensfenomenet komplicerar den teoretiska analysen av värmetransporten så till vida att all energi som ska transporteras genom konduktion inte börjar vid ytan utan redan har en fördelning i materialet.



Figur 16. Figur som visar hur strålningsintensiteten minskar med djupet.

6.2.2 Strålning från brandgaslagret

Strålningen från brandgaslagret har betydligt längre våglängder än de från flammorna [15]. Glas kan därför för våglängder av den här storleken betraktas som ogenomskinlig. Detta innebär att problemet med semitransparens undviks. Formeln för strålning blir därför enligt (7).

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{br}^4 - T_{glas}^4) A_{glas} \quad (7)$$

\dot{Q} - värmefflöde [W]

ε - emissionstal [-]

σ - Stefan Boltzmanns konstant = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T_{br} - brandgasernas temperatur [K]

T_{glas} - glasytans temperatur [K]

A_{glas} - glasets yta [m^2].

Såväl glaset som brandgaslagret kan betraktas som gråa kroppar [4]. Grå kropp innebär att föremålet skickar ut strålning av samma spektrala fördelning som den tar upp.

Värmefflödet genom strålning från brandgaslagret kommer att förändras med tiden eftersom de båda inblandade temperaturerna förändras samt att emissionstalet kommer att förändras med ökad sotmängd i brandgaslagret.

7 Varför svårt att förutsäga då glaset spricker?

Att förutsäga då glaset spricker i en fönsterruta är förknippat med osäkerheter som påverkar noggrannheten i resultatet. Det som vållar dessa osäkerheter beror dels på svårigheterna att bestämma glasets materialegenskaper och dels på att beräkna utvecklingen av ett visst brandscenario. Dessa två områden kommer att diskuteras vidare i detta kapitel.

7.1 Brandens egenskaper

Det är branden och dess förlopp som påverkar glaset på så sätt att flammorna och brandgaslagret värmer upp det genom strålning och konvektion, se kapitel 6. Detta innebär att utvecklingen av brandförloppet är viktigt för att beräkna tiden till fönsterbrott. Följande punkter är viktiga men svåra att förutsäga.

- Hur stor är strålningen från flammorna till glaset? Var branden är placerad har stor betydelse för hur mycket värmestrålning som absorberas. Glas är ett material som reflekterar en stor del av strålning med hög infallsvinkel medans det upptar nästan all strålning som infaller vinkelrätt mot ytan.
- Hur stort är brandgasernas emissionstal, ϵ ? [4] indikerar att brandgaserna kan betraktas som en grå kropp med emissionstalet 0,9. Joshi et al. [7] har utfört känslighetsanalyser till datorprogram vid jämförelse med halvskaleexperiment och funnit det lämpligt att ϵ ökar linjärt med tiden från 0,1 till 0,9 under en tid på 100 s varefter värdet hålls konstant. Detta på grund av att brandgaserna till en början innehåller mycket luft och därmed är tunna. Då brandgaslagret sjunker sugts mindre luft in i det och gaserna blir tjockare och innehåller mer sot, vilket medför att ϵ ökar. Varför just värdena 0,1-0,9 och 100 s valts förklaras inte.
- Hur påverkar ett sjunkande brandgaslager glaset under tiden det passerar fönstret? Övre delen av glaset kommer att utsättas för konvektion vid ett tidigare stadium och en kraftigare strålning från brandgaslagret än den nedre delen. Är detta tillräckligt för att orsaka termiska spänningar stora nog för glaset att gå sönder? Shields har skrivit om problemet [2], [16]. Det är framför allt aktuellt för fönster av stora dimensioner såsom glas från tak till golv. De modeller som finns idag bygger på att fönstret värms upp med en jämn strålningsintensitet och jämn konvektion över hela den exponerade delen av fönstret.
- Hur påverkas fönstret vid långsamma bränder? De modeller och teorier som finns idag bygger på att värmeförseln till glaset är så snabb att hänsyn inte behöver tas till att värme leds in i den delen av glaset som sitter i infästningen. Vid långsamma bränder och/eller fönsterdimensioner med liten infästning i förhållande till glasets tjocklek kommer värme att hinna ledas in till kanten och på så vis hejda ökningen av temperaturdifferensen mellan kant och mitt.
- Det har visat sig vara svårt att hitta enhetliga värden på det konvektiva värmeövergångstalet mellan brandgaslager och glas. Litteraturundersökningen som ligger till grund för det här arbetet har gett spridda värden (se appendix 1) som ger stor spridning i beräkningsresultaten (se kapitel 9). Kanske ligger Joshi och Pagni nära sanningen när de låter värmeövergångstalet öka med tiden från 10 till 40 kW/m² på grund av att konvektionen vid glasytan går från att vara naturlig till påtvingad och turbulent då branden och temperaturen ökar. Värdena bygger dock inte på teoretiska beräkningar utan är tagna ”på känn” för att i efterhand märka att de stämmer rätt bra med utförda experiment.

- Faktumet att det även är sammansättningen av brandgaslagret som avgör dess strålning mot fönstret och inte bara dess temperatur innebär att ett svalare brandgaslager kan ha en större strålning mot ett fönster än ett varmare [16]. Detta medför att bränsle och syretillförsel måste identifieras och analyseras för att kunna avgöra strålningens intensitet.

7.2 Glasets egenskaper

Ett fönster har några egenskaper som påverkar tiden till fönsterbrott vid värmepåverkan. En del av dem är svåra att på ett kvantitativt sätt ta hänsyn till vid beräkningar.

- Trots olika blandningar för olika fönster är det tillverkningen och monteringen som har mest betydelse för vilken hållfasthet ett fönster har [17]. De skurna glasskivorna har mer eller mindre grova kanter. En handskuren kant är grövre än en maskinskuren men även två kanter skurna av samma maskin kan uppvisa betydligt olika kvalitet. Finheten på kanten är direkt avgörande för vilken hållfasthet glaset har. Vid belastning koncentreras nämligen spänningen runt ojämnheter och ju grövre sprickorna är ju lägre belastning tål glaset. Detta medför även att en större glasruta vanligtvis inte klarar av samma spänning som en mindre ruta eftersom större skärta ger större sannolikhet för att en grov mikrospricka att finnas på kanterna till just den glaskroppen [7]. Detta innebär att den hållfasthetsfördelning som Joshi et al. [7] laborerat fram genom att belasta 59 små glaskroppar till brott (se Figur 6, sidan 20) kommer att förskjutas åt lägre hållfasthet för större glaskroppar, typ fönsterrutor. Professor T J Shields föreslår att dela in fönster i tre olika klasser beroende på kvaliteten på dess kanter [1]. Detta skulle definitivt underlätta att säkerställa hållfastheten för ett fönster. Frågan är ifall fönstertillverkare av vanliga fönsterglas är intresserade av att deras fönster klassas. Det skulle innebära ett dyrare fönster jämfört med fönster som inte klassats och för konsumenten spelar inte klassningen någon roll. Är det praktiskt genomförbart?
- Materialdata för fönsterglas är svårtillgängligt. Idag tillverkas flera fönster med varierande materialegenskaper. Det är främst isolerande och optiska egenskaper som man försöker förbättra. Dessa påverkar värmeupptagningen och uppgifter om dem kan vara svåra att få tag på. Tillgängliga data på planglas i litteraturen behöver inte alls stämma med verkligheten. Speciellt äldre litteratur kan vara inaktuell då egenskaperna har ändrats med att utvecklingen gått framåt. Dessutom finns det parametrar som är temperaturberoende men betraktas som konstanta vid normala rumstemperaturer. Hur dessa parametrar beter sig vid temperaturer upp mot 300°C är svårt att finna i litteraturen.

8 Beskrivning av datorprogrammet BREAK1

BREAK1 är ett datorprogram som beräknar tiden till fönsterbrott vid värmepåverkan av brand. Som utdata visas temperaturen på fönstrets båda ytor (insida och utsida) som funktion av tiden. Beräkningarna upphör vid den tiden då glaset går sönder. Programmet är skrivet i FORTRAN 77 och skapat av Aruna A. Joshi och Patrick J. Pagni vid Mechanical Engineering Department, University of California at Berkeley [13]. Programmet är från 1991.

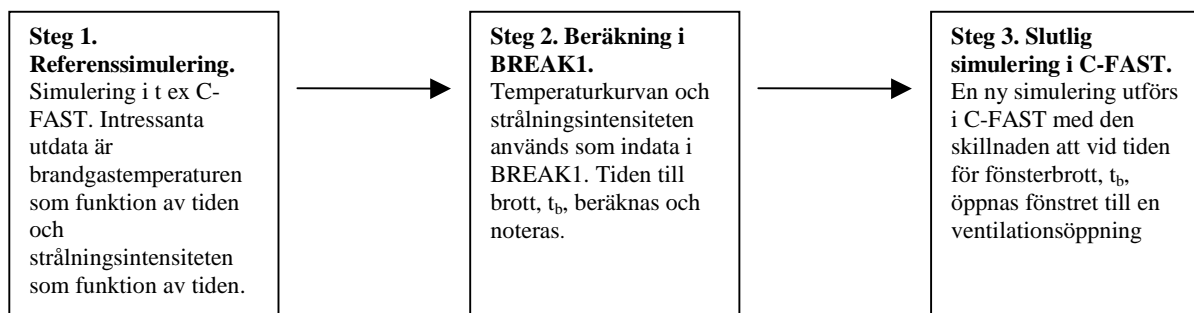
8.1 Hur ska programmet användas?

Programmet ska ses som ett komplement till datorprogram som simulerar brandförlopp inomhus och har således ingen större funktion som enda datorprogram.

De datorprogram som idag simulerar rumsbränder modellerar ett rum med eventuella öppningar såsom fönster och dörrar. I dessa program, t ex C-FAST, kan man ange variationer i öppningens storlek med avseende på tiden, t ex en dörr som öppnas. Däremot klarar programmen inte av att själva bedöma när en fönsterruta går sönder till följd av värmepåverkan. Det är här BREAK1 kan hjälpa till.

BREAK1 är tänkt att användas på följande vis. Till att börja med simuleras en rumsbrand, i t ex C-FAST, utan att hänsyn tas till att något fönster går sönder. De utdata som är intressanta är den temperatur på brandgaserna som är i kontakt med fönstret och den strålning som når glaset som funktion av tiden. Dessa uppgifter används i sin tur som indata till programmet BREAK1 för att avgöra vid vilken tidpunkt glaset går sönder.

Därefter utförs en ny simulering i C-FAST med den skillnaden att fönstrets yta modelleras som en öppning efter den tid som beräknats i BREAK1.



Figur 17. Beskrivning av beräkningsgång då datorprogrammet BREAK1 används.

Ett exempel som följer ovanstående flödesschema redovisas i appendix 2.

8.2 Modellen

Modellen bygger på de teorier som redovisas i kapitel 5. Huvudprincipen är att de partier som inte värms upp utsätts för dragspänning och de partier som värms utsätts för tryckspänning. I och med att de varma området är mycket större än det svala och att hållfastheten är mycket mindre för dragspänning än för tryckspänning (ca en tiondel [6]) börjar sprickorna uteslutande i de svala kanterna för att sedan fortplanta sig i den varma exponerade delen. Den formel som arbetats fram för spänningen i kantpartiet har följande bakgrundstanke. Antag att kanten inte existerar. Då expanderar glaset enligt formeln nedan.

$$\varepsilon = \beta \cdot \Delta T \quad (8)$$

ε - relativ töjning [-]

β - värmeutvidgningskoefficient [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

ΔT – temperaturhöjning [$^{\circ}\text{C}$]

Antag nu att kanten finns där. Om den expanderar lika mycket (den sitter ju fast i det varma partiet) måste den utsättas för följande dragspänning.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (9)$$

σ - spänning i glaset [N/m^2]

E – elasticitetsmodul [N/m^2]

Sammansatt får man ett uttryck för spänningen i den skuggade zonen som en funktion av temperaturhöjningen av det varma glaset.

$$\sigma = E \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (10)$$

Samtidigt måste man ta hänsyn till att det inte bara är det varma partiet som utsätter det svala för dragspänningar utan även att det svala partiet bromsar upp utvidgningen av det varma partiet. Detta kompenseras genom en faktor g , se även appendix 3, vilket innebär att töjningen inte blir så stor och därmed inte heller spänningen i det skuggade partiet. Den slutliga formeln blir därför enligt nedan.

$$g \cdot \sigma = E \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (11)$$

Faktorn g är ungefär lika med ett och beroende av dels hur stor del av fönstret som är skuggad, nämligen förhållandet mellan s och H , och dels förhållandet mellan skuggad del och tjockleken på glaset, nämligen s och L , se Figur 14, sidan 30.

Av formeln ovan kan man utläsa att temperaturhöjningen vid brott blir högre ju större g är. Detta innebär att fönster med en relativt bred infästning kräver en större temperaturhöjning för brott.

8.3 Indata

Programmet kräver en del indata för att utföra beräkningarna. En del av dessa är konstanta och andra varierar med tiden. En lista på vilka indata som krävs finns angivna i Tabell 5 nedan. Tabellen anger även vilka indata som är konstanta i modellen och storleksordningen på respektive indata [13].

Tabell 5. Tabell över indata till programmet BREAK1.

	NAMN	SYMBOL	ENHET	NORMALT INTERVALL [13]	
1.	Värmeledningsförmåga	k	W/mK	0,6-1,3	Konstant
2.	Värmediffusionskoefficient	α	m ² /s	3,0-4,0×10 ⁻⁷	Konstant
3.	Absorptionslängd	l	m	0,9-1,5×10 ⁻³	Konstant
4.	Brottspänning	σ_b	N/m ²	2,0-13,8×10 ⁷	Konstant
5.	Elasticitetsmodul	E	N/m ²	7,0-7,25×10 ¹⁰	Konstant
6.	Värmeutvidgningskoefficient	β	°C ⁻¹	8,5-9,5×10 ⁻⁶	Konstant
7.	Tjocklek på glaset	L	m	0,1-3,0×10 ⁻²	Konstant
8.	Skuggad bredd	s	m	0,3-5×10 ⁻²	Konstant
9.	Halva bredden eller höjden på fönstret	H	m	0,05-5,0	Konstant
10.	Värmeövergångstal på varma sidan	$h_2(t)$	W/m ² K	5-80	Varierar med tiden
11.	Värmeövergångstal på svala sidan	h_1	W/m ² K	3-20	Konstant
12.	Omgivningstemperatur på svala sidan	$T_{1\infty}$	K	270-320	Konstant
13.	Glaset's emissionstal	ϵ	-	0,8-1,0	Konstant
14.	Svala luftens emissionstal	$\epsilon_{1\infty}$	-	0,1-1	Konstant
15.	Brandgasernas emissionstal	$\epsilon_{2\infty}(t)$	-	0,1-1	Varierar med tiden
16.	Tiden	t	s	0,0-1500	-
17.	Strålning från flammorna	$I(t)$	W/m ²	0,0-10000	Varierar med tiden
18.	Brandgastemperatur	$T_{2\infty}(t)$	K	300-1300	Varierar med tiden
19.	Storlek på beräkningssteg	Δt	s	0,2-2	-
20.	Lösningens maximala fel	ϵ_{\max}	-	10 ⁻⁴ -10 ⁻²	-
21.	Maxtid	t_{\max}	s	100-1500	-
22.	Tidssteg i utdata	δt	s	1-100	-

Några av egenskaperna hos glaset (1, 2, 4, 5 och 6 i tabellen ovan) förklaras i kapitel 3.

Glaset's geometriska värden (7-9 i tabellen ovan) illustreras i Figur 14, sidan 30.

8.4 Begränsningar med programmet och skillnader från verkligheten

Det finns vissa begränsningar med att använda sig av programmet BREAK1. Det är främst en anledning till detta förutom de som anges i kapitel 7. Modellen är från 1991 och modellerar englasfönster. Idag används uteslutande flerglasfönster i nybyggen i vårt klimat och en enkel, praktisk lösning att använda programmet i multipla steg för att beräkna då andra och eventuellt tredje glaset går sönder har visat sig ge felaktiga resultat på att de redan värmts upp av den strålning som infallit mot fönstret. Det går alltså inte att bara addera tiderna från två eller tre datorkörningar för att få reda på vid vilken tid ett tvåglas- respektive treglasfönster går sönder.

Ett annat problem, som inte bara gäller BREAK1 utan alla modeller idag, är det att även om ett glas spricker kan det mycket väl vara så att det inte faller ur sin båge. Detta skulle innebära att det inte alls öppnas upp en ny ventilationsöppning. Faktum är att vid de försök Shields gjorde [2] stannade nästan alltid glaset kvar i sin båge efter det att det spruckit. I fall med ventilationskontrollerade bränder (vilket är vanligast vid de flesta rumsbränder) medför detta en stor skillnad i brandförlopp, se kapitel 4.

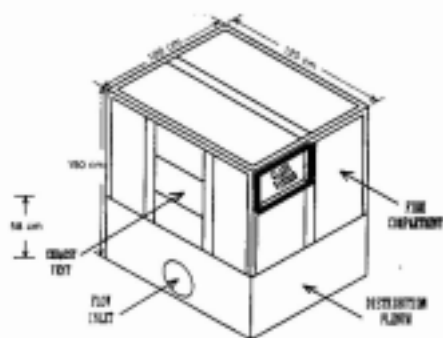
En annan förenkling som gjorts är att den temperaturskillnad som avgör tiden till fönsterbrott inte är vad teorin säger att den borde vara. ΔT ska vara skillnaden mellan medeltemperaturen på det varma partiet och den svalare skuggade kanten. Modellen i BREAK1 har gjort den förenklingen att man låter temperaturskillnaden motsvara temperaturhöjningen av det varma partiet. Temperaturhöjningen av det skuggade partiet försummas alltså.

9 Jämförelse mellan BREAK1 och experiment

För att utvärdera och demonstrera datorprogrammet BREAK1 kommer experimentella försök i halvskala att jämföras med datorberäkningar. Försöken är utförda av Michael J. Skelly vid Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, 1990 [5]. Inga försök har utförts specifikt för den här rapporten varför vissa indata saknas. Detta medför osäkerheter i beräkningarna och det här kapitlet kommer att visa hur detta påverkar resultaten.

9.1 Beskrivning av Skellys experiment

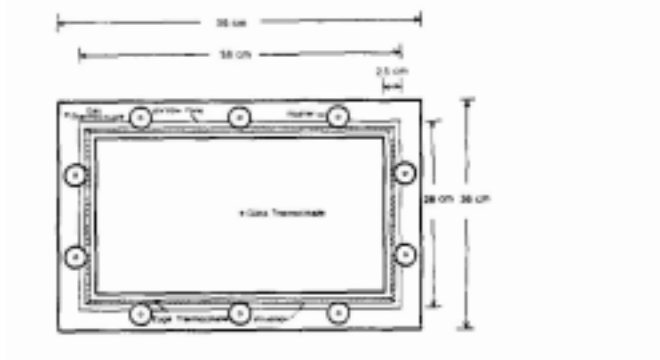
Skellys rapport [5] publicerades 1990 och arbetet var ett försök att undersöka hur temperaturfördelningar påverkar glaset då det spricker till följd av värmepåverkan. Han utförde experiment på 11 glasrutor med kanten dold i infästningen och sex glasrutor där även kanten var exponerad för branden. Försöken gjordes i halvskala med mått enligt Figur 18. Sex av experimenten med dold kant kommer att användas i denna rapport för att jämföras med datorberäkningar i BREAK1.



Figur 18. *Figur över det rum som användes vid försöken. Bilden är hämtad från [12].*

Försöken uppvisade tvåzonsbildning i alla försöken och glaset var i samtliga fall täckt av brandgaslagret inom de första 10 sekunderna.

Glaset som användes vid försöken var 50 cm breda, 28 cm höga och 2,4 mm tjocka. Bredden på infästningen (den skuggade delen) var 2,5 cm. Hexan användes som bränsle i fat av fyra storlekar ($20 \times 30 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$, 20 cm i diameter samt $10 \times 20 \text{ cm}^2$). Termoelement placerades för att mäta brandgastemperaturen samt glastemperaturerna i såväl mitt som kant, se Figur 19.



Figur 19. Figur över fönsterdimensionerna som användes i försöken. Bilden är hämtad från [12].

Temperaturerna redovisas i rapporten som funktion av tiden i tabeller och diagram. En mer detaljerad beskrivning av Skellys experiment finns i appendix 4.

9.2 Datorberäkningar

För att utvärdera datorprogrammet BREAK1 behövs verkliga försök för att ha någonting att jämföra med. Som nämnts ovan har Skelly [5] utfört en experimentserie som är användbar i detta fallet. Sex försök kommer att tas upp här där tre består av $20 \times 30 \text{ cm}^2$ hexanbränder och tre består av $20 \times 20 \text{ cm}^2$ hexanbränder. Programmet ska alltså tillämpas på två scenarier.

Först utfördes en beräkning för vart och ett av de två scenarierna med en ”rimlig” uppsättning indata som visas i Tabell 6. De tider som då erhöles för tid till brott jämförs med de tre experimentella värdena för respektive scenario (se Tabell 7). I det här fallet är det i princip bara brandgastemperaturen och fönstrets geometrier som är kända varför de övriga parametrarna har varierats en efter en, utifrån grunduppställningen, för att göra en slags känslighetsanalys. Hur de olika parametrarna har varierats visas också i Tabell 6 och bygger på den sammanställning som har gjorts i appendix 1.

Tabell 6. Tabell som visar grunduppställningen för indata i BREAK1 samt de värden som variablerna varierades inom. *) Värmeövergångstalet på den varma sidan varierades mellan $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ och ett temperaturberoende h enligt $h=h_{\min}(h_{\max}-h_{\min})(T-300)/100$ med $h_{\min}=5 \text{ W/m}^2\text{K}$ och $h_{\max}=50 \text{ W/m}^2\text{K}$.

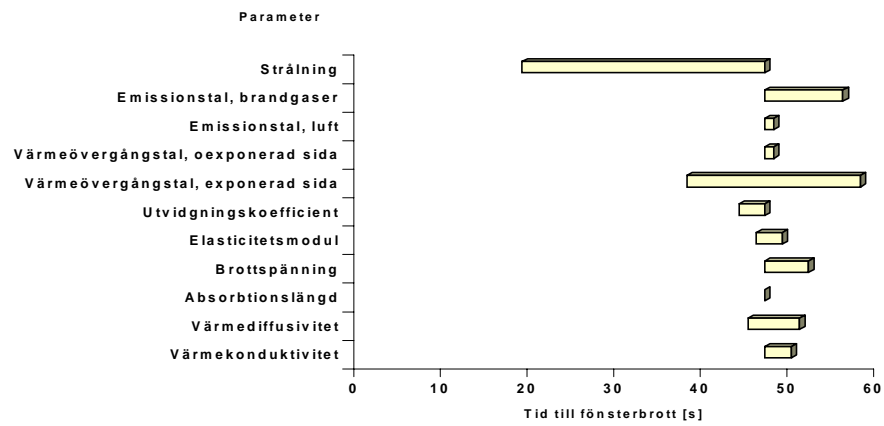
NAMN	SYMBOL	ENHET	GRUND- UPPSTÄLLNING	VARIATION I BERÄKNINGARNA
Värmeledningsförmåga	k	W/mK	0,8	0,76-0,93
Värmediffusionskoefficient	α	m^2/s	$3,7 \times 10^{-7}$	$3-4,4 \times 10^{-7}$
Absorptionslängd	l	m	0,001	$0,9-1,5 \times 10^{-3}$
Brottspänning	σ_b	N/m^2	40×10^6	$40-50 \times 10^6$
Elasticitetsmodul	E	N/m^2	75×10^9	$68,6-80 \times 10^9$
Värmeutvidgningskoefficient	β	$^\circ\text{C}^{-1}$	8×10^{-6}	$8-9,5 \times 10^{-6}$
Tjocklek på glaset	L	m	0,0024	-
Skuggad bredd	s	m	0,025	-
Halva bredden eller höjden på fönstret	H	m	0,14	-
Värmeövergångstal på varma sidan	$h_2(t)$	$\text{W/m}^2\text{K}$	40	*
Värmeövergångstal på svala sidan	h_1	$\text{W/m}^2\text{K}$	10	3-20
Omgivningstemperatur på svala sidan	$T_{1\infty}$	K	294	-
Glasetts emissionstal	ϵ	-	0,84	0,8-1,0
Svala luftens emissionstal	$\epsilon_{1\infty}$	-	1,0	0,1-1,0
Brandgasernas emissionstal	$\epsilon_{2\infty}(t)$	-	0,9	0,1-1,0
Strålning från flammorna	$I(t)$	W/m^2	0	0-28000
Brandgastemperatur	$T_{2\infty}(t)$	K	Enligt appendix 4.	-

Tabell 7. Tabell som visar tid till fönsterbrott. Både Skellys uppmätta värden från försöken och de beräknade tiderna från BREAK1 med grunduppställningen av indata visas.

	SKELLYS UPPMÄTTA TIDER	BERÄKNING I BREAK1
$20 \times 30 \text{ cm}^2$	55, 56 resp. 48 s	47 s
$20 \times 20 \text{ cm}^2$	100, 112 resp. 109 s	63 s

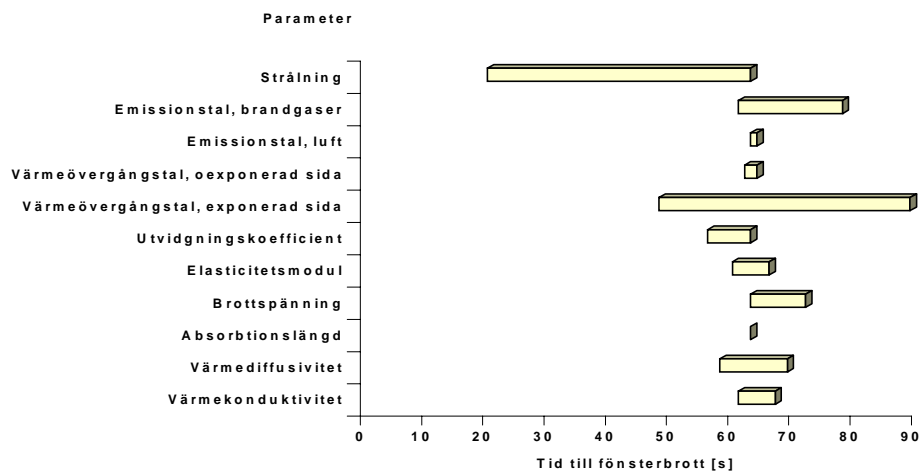
För varje scenario har resultaten av känslighetsanalysen sammanställts i två diagram, se Figur 20 och Figur 21.

Känslighetsanalys, 20*30cm 2 hexanbrand



Figur 20. Sammanställning över hur tiden till fönsterbrott ändras då de olika parametrarna varieras en efter en enligt Tabell 6. Grunduppställningen gav ett värde på 47 s.

Känslighetsanalys, 20*20 cm 2 hexanbrand



Figur 21. Sammanställning över hur tiden till fönsterbrott ändras då de olika parametrarna varieras en efter en enligt Tabell 6. Grunduppställningen gav ett värde på 63 s.

Vad gäller den första beräkningarna med grunduppställningarna kan man säga att den stämmer ganska bra överens med experimenten för $20 \times 30 \text{ cm}^2$ -branden medan den inte stämmer överens med $20 \times 20 \text{ cm}^2$ -branden, se Tabell 7.

Vad gäller känslighetsanalysen ska inte var och en av staplarna jämföras med de experimentella värdena. Jämförelser ska göras med värdet från grunduppställningen samt mellan staplarna i respektive diagram.

9.3 Slutsats

Enligt Tabell 7 stämmer beräkningsresultatet vid $20 \times 30 \text{ cm}^2$ -fallet bra överens med de experimentella värdena. Däremot stämde $20 \times 20 \text{ cm}^2$ -fallet dåligt överens trots samma grunduppställning (frånsett brandgasernas temperaturkurva). Detta kan dels bero på att datorprogrammet stämmer dåligt överens med verkligheten eller att indata är felaktig. Kanske skulle det gå att med en annan uppställning, som fortfarande är inom rimliga värden, få en bra överensstämmelse med båda scenarierna.

De båda diagrammen med känslighetsanalyser ser ungefär likadana ut, frånsett att de ligger runt olika värden (47 s respektive 63 s). Man kan se att det är primärt tre parametrar som måste bestämmas mer noggrant än de data som redovisas i appendix 1 för att inte beräkningsresultaten ska skilja sig alltför mycket åt. Detta märks eftersom deras staplar är längre än de andra, d v s deras beräkningsresultat skiljer sig mer åt. De tre parametrarna är strålningen från flammorna, brandgasernas emissionstal samt värmeövergångstalet på den exponerade sidan.

Vad som också är märkbart är att resultaten skiljde sig relativt lite trots att variationerna i indata för luftens emissionstal, värmeövergångstalet på den oexponerade sidan och absorptionslängden var relativt stor.

10 Litteratursammanfattning

Elva artiklar och rapporter från referenslistan har sammanfattats i det här kapitlet.

Referens [1]: *Thermal Fracture of Window Glazing: Performance of Glazing in Fire*

Författare: S. K. S. Hassani, T. J. Shields & G. W. Silcock
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Applied Fire Science, vol. 4(4), pp. 249-263
År: 1994-95

Artikeln innehåller en del som sammanfattar hur långt man kommit i forskningen inom fönsterglas och värmepåverkan. Samtidig påpekas betydelsen av forskningen för utvecklingen inom brandingenjörsområdet.

Författarna godtar förenklingarna att temperaturen i kanten anses konstant med avseende på tiden och att det inte existerar några temperaturgradienter vinkelrät mot glasytan, d v s att glasrutan håller samma temperatur genom hela tjockleken vid varje tidpunkt. Istället fäster man vikten vid andra fenomen som inte har tagits hänsyn till tidigare. Det är fenomen som

- Ett sjunkande brandgaslager kommer inte att värma hela fönstret samtidigt utan den övre delen först. Kan detta skapa tillräckligt stora temperaturgradienter för att glaset ska spricka?
- Att anta en hållfasthet på 40 MPa för alla glas är orimligt med tanke på vilken betydelse ytan på den skurna kanten har för hållfastheten. Författarna föreslår tre olika kvalitetsklasser på skurna kanter som var och en ska förknippas med en faktor att multiplicera med den karakteristiska hållfastheten för glas.
- Tvåglasfönster. Tidigare modeller behandlar enkelglas. En modell med tvåglasfönster är något mer komplicerad. Det räcker inte med att applicera enkelglasmodellen "två gånger".

Författarna har en något mer verklighetsanknuten syn på problemet fönsterglas och dess värmeförmåga än vad många andra artikelförfattare haft.

Referens [2]: *An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fires*

Författare: S. K. S. Hassani, T. J. Shields & G. W. Silcock
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Applied Fire Science, vol. 4(4), pp. 303-323
År: 1994-95

En artikel som för utvecklingen ett steg vidare och är en fortsättning på det arbete som bedrivits tidigare. Analyserar problemet med temperaturskillnad inte bara mellan exponerad del och infästning utan mellan övre och undre delen av glaset då de befinner sig i var sin del av tvåzonsbildningen. Författarna analyserar även sprickbildning.

Uppgifterna är experimentella mätvärden samt observationer från halvskaleförsök och består av temperaturer, sprickbildningsmönster och spänningar i glaset. Försöken är gjorda på enkelglas, tvåglasfönster samt tvåglas lågemissionsfönster.

En observation av stor betydelse är att få av fönstren gav upphov till sprickbildning av den omfattning att delar föll ur.

Referens [3]: *In Situ Experimental Thermal Stress Measurements in Glass Subjected to Enclosure Fires*

Författare: S. K. S. Hassani, T. J. Shields & G. W. Silcock
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Applied Fire Science, vol. 5(2), pp. 123-134
År: 1995-96

Denna artikel handlar om mätteknik vid undersökning av fönsterbrott vid värmepåverkan. Bland annat utvärderas huruvida en "strain gauge" (trådtöjningsmätare \approx spänningsmätare) är lämplig att användas vid experiment.

En viss skepsis visas gentemot teorin om att det ska vara temperaturskillnaden mellan kant och mitt som får fönstret att spricka samt att kanttemperaturen kan betraktas som konstant. Anledningen till detta är ett försök som talar emot påståendena.

Artikeln förklarar vidare att det behövs mer detaljerade experiment för att undersöka problemet med glasbrott vid brandpåverkan. Den inleds med att påstå att de modeller som finns idag är alltför enkla för att ge realistiska resultat. Bland annat bygger de på att fönsterrutan värms upp jämnt över hela ytan och att de skuggade partiernas temperaturstegring är så pass liten att den kan betraktas som obefintlig. Författarna hänvisar till egen litteratur med gjorda experiment och visar på att detta långt ifrån gäller i alla fall. Dessutom är det sällan så att en fönsterruta värms upp jämnt utan ofta är bara en del av glaset i kontakt med det varma rökgaslagret.

Resten av artikeln visar att det inte är en omöjlighet att mäta temperaturer på flera ställen av glaset samt att mäta spänningen i det under uppvärmning. Artikeln är detaljerad och beskriver bland annat hur man kan använda trådtöjningsmätare för att bestämma spänningen i glaset. Artikeln visar att detta är möjligt även för tvåglasfönster.

Referens [7]: *Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass II – Experiments*

Författare: A. A. Joshi & P. J. Pagni
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Fire Safety Journal, vol. 22, pp. 45-65
År: 1994

Denna artikel består av tre huvuddelar. Första delen går ut på att utreda den statistiska fördelningen för hållfastheten av fönsterglas. Fyrpunktsprover utförs på 59 glasstavar och resultaten skiljer sig en hel del. Fördelningen kan liknas vid en "three-parameter Weibull distribution" som är en statistisk funktion till för att beskriva fördelningar. En brottspänning på 40 MPa anses som ett rimligt (på säkra sidan) värde eftersom endast 5-10% (8% enligt Weibulfördelningen) av glasproverna gick sönder vid en spänning mindre än denna.

I andra och tredje delen provar man sig fram till ett rimligt sätt att ange värmeövergångstalet på den brandutsatta sidan samt rökgaslagrets emissivitet med hjälp av gjorda experiment på glasbrott till följd av värmepåverkan och datorkörningar (BREAK1). En slutsats är att låta båda öka linjärt från det att branden börjat. Detta ger god överensstämmelse om man ser till tid till brott.

Artikeln tar även upp olika tänkbara parametrar som kan tänkas påverka tiden till brott såsom storlek på fönstret, repor på ytan, ojämna kanter, etc.

Referens [12]: *An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires*

Författare: Michel J. Skelly & Rihard J. Roby
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Fire Protection Engineering, vol. 3(1), pp. 25-34
År: 1991

Artikel som beskriver teorin bakom glasbrott vid värmepåverkan och jämför denna med experiment i mindre skala. Den avgörande faktorn är temperaturskillnader mellan glasets medeltemperatur och lokala temperaturer. Artikeln behandlar enkelglas. Spänningen i glaset kan beskrivas som

$$\sigma = E \cdot \beta \cdot (T_c - T_e) \quad (12)$$

σ - Spänning i glaset
 E - Glasets elasticitetsmodul
 β - Värmeutvidgningskoefficient för glas
 T_c - Det uppvärmda glasets temperatur
 T_e - Den isolerade kantens temperatur.

Sedan utförs experiment i ett rum 1,5m×1,2m×1,0m (H×B×D) på fönster av storleken 28cm×50cm. Försöken gjordes dels på glasrutor med skuggade kanter och dels på rutor med oskuggade kanter. De skuggade glasen spricker vid ett tidigare skede än de oskuggade på grund av att de har en större temperaturgradient. Orsaken till varför de oskuggade glasen spricker ges inte riktigt.

11 skuggade försök utförs och glasen spricker i genomsnitt vid en temperaturskillnad på 90°C med en standardavvikelse på 18°C, d v s en relativt stor spridning.

Efter försöken gjordes labbförsök på glasbitarna för att bestämma σ , E och β . Med hjälp av dessa beräknades den teoretiska temperaturskillnaden vid glasbrott till följd av värmepåverkan. Den beräknade temperaturen blev 70°C. Detta är 20°C mindre än de uppmätta vid experimenten varför olika tänkbara anledningar till detta diskuteras. Man anger att termoelementet tar upp mer värme än vad fönsterglasets gör och därför får en högre temperatur. Detta skulle medföra att den uppmätta temperaturskillnaden vid experimenten blir större än vad de egentligen är. Man anger detta som den mest troliga felkällan. Diskussioner om huruvida detta skulle medföra en skillnad i just denna storleksordningen diskuteras dock ej.

En förenkling som ofta görs är att man antar att temperaturen i de skuggade partierna hålls konstant. Detta för att slippa räkna på värmeledningen in i de här partierna. Man poängterar dock i artikeln att man ska vara försiktig med detta vid långsamt utvecklande bränder. Med andra ord kan man säga att då hinner värme ledas in i kanterna. Detta medför att glasrutan klarar av högre medeltemperaturer.

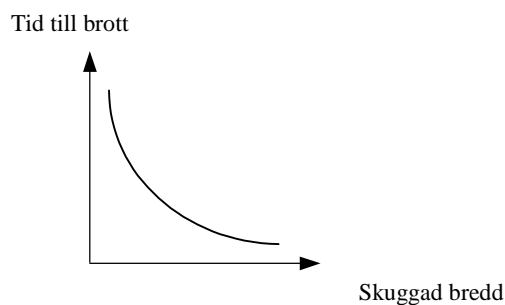
Referens [14]: *Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass I – Theory*

Författare: A. A. Joshi & P. J. Pagni
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Fire Safety Journal, vol. 22, pp. 22-43
År: 1994

En mycket teoretiskt betonad artikel om förklaringen till varför fönster spricker till följd av värmepåverkan, såväl strålning som konvektion. Författarna konstaterar att tidigare studier har behandlat temperaturskillnader vid glasbrott. Det man försöker göra här är att beräkna tiden tills det att denna temperatur uppnås, d v s tiden till fönsterbrott.

Författarna kommer bl a fram till att antagandet om en konstant temperatur i glasets hela tjocklek är orimlig. Här förekommer tillräckligt stora temperaturgradienter för att det ska ha betydelse för spänningsfördelningen i glaset.

Författarna gör en undersökning av hur olika indata påverkar temperaturskillnaden vid brott och tiden till brott. Det mest intressanta är hur tiden till brott varierar med hur pass stor del av glaset som är skuggat.



Dessutom redovisas ett antal intressanta stapeldiagram som visar fördelningen för infallande värmemängd (gaskonvektion/gasstrålning/flamstrålning) och utgående värmemängd (strålning/konvektion/ledning/lagring).

Referens [15]: *Thermal Breakage of Double-Pane Glazing by Fire*

Författare: Bernard R. Cuzillo & Patrick J. Pagni
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Fire Protection Engineering, vol. 9(1), pp. 1-11
År: 1998

Artikeln tar upp en modell som bygger på den som används i BREAK1. Utvecklingen består i att modellen behandlar tvåglasfönster och tar därmed upp värmetransporten till det glas längst ifrån branden även före det att närliggande glas gått sönder. Vidarutvecklingen av BREAK1 har gjorts i Mathcad och kallas för McBreak. Även McBreak betraktar värmeflödet som endimensionellt.

Artikeln tar upp teorin bakom uppvärmningen av fönsterglas. För pedagogikens skull behandlas först enkelglas varefter värmetransporten i dubbelglas beskrivs.

Ett av kapitlen behandlar den konvektiva värmeöverföringen till och från glasrutorna. Fall som betraktas som laminära respektive turbulenta tas upp. Modellen tar hänsyn till temperaturskillnader på djupet och utdata är tid till brott samt de fyra ytornas temperaturer som funktion av tiden.

Referens [16]: *The Behaviour of Single Glazing in an Enclosure Fire*

Författare: S. K. S. Hassani, T. J. Shields & G. W. Silcock
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Applied Fire Science, vol. 7(2), pp. 145-163
År: 1997-98

Denna artikel behandlar inte teori i stor utsträckning. Ett antal halvskaleexperiment utförda i ett litet rum med två fönster beskrivs. Det ena är så stort att det sträcker sig från tak till golv så att endast en del av det utsätts för de varma gaserna i tvåzonsskiktningen. Det andra är mindre och helt täckt av det övre brandgasskiktet kort efter antändning.

Det som undersöks är hur placeringen av branden påverkar uppvärmningen, hur ett sjunkande brandgaslager påverkar uppvärmningen och hur sprickbildningen ser ut i de olika fallen. Även hur olika stora ventilationsöppningar påverkar tiden till fönsterbrott undersöks.

Artikeln innehåller illustrativa diagram över temperaturer och spänningar som funktion av tiden.

Referens [17]: *Development of a Glass Fracture Model for Zone Type Computer Fire Codes*

Författare: Paul E. Sincaglia & Jonathan R Barnett
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Journal of Fire Protection Engineering, vol. 8(3), pp. 1-18
År: 1997

Denna artikel beskriver teorin bakom ett datorprogram som säger sig kunna förutsäga vid vilken tidpunkt glas spricker till följd av värmepåverkan. Programmet bygger på ett endimensionellt värme flöde till och genom glasrutan.

Teorin har vissa begränsningar. Dessa beror på att i och med att modellen behandlar endast ett endimensionellt värme flöde tar man inte hänsyn till att värme leds in i de skuggade partierna av glaset (innanför bågen). Vid de flesta bränder går detta att försumma, men rör det sig om en långsamt växande brand kommer ledningen in i de skuggade partierna vara av betydelse inom den aktuella tidsrymden. Två kriterier för att modellen ska gälla ges:

- infästningen skall vara minst dubbelt så bred som glasets tjocklek, och
- glaset måste spricka inom tillräckligt kort tid i förhållande till infästningens dimensioner.

Referens [18]: *Breaking of Window Glass Close to Fire*

Författare: Olavi Keski-Rahkonen
Artikel/rapport/bok: Artikel
Hämtad från: Fire and Materials, vol. 12, pp. 61-69
År: 1988

Artikeln sammanfattar att det finns olika anledningar till att glas kan gå sönder till följd av värmepåverkan. Man konstaterar att temperaturskillnader i planets riktningar är den absolut dominerande. Man försöker härleda fram ett uttryck för temperaturdifferensen vid glasbrott och gör detta på ett oerhört strikt teoretiskt och matematiskt sätt. Bl a används Greens formel och asymptotiska gränsvärden.

En slutsats som är av intresse är att det inte går att reducera spänningen i glaset nämnvärt genom att ändra förhållandet mellan bredden på infästningen och tjockleken på glaset.

Olika tredimensionella spänningsdiagram visas som funktion av diverse variabler. Diagrammen är ganska svårtolkade bl a på grund av att de har dimensionslösa och ibland normerade axlar. Alla visar dock att den största spänningen uppnås ute i glasets yttersta kant, dvs i den svala delen.

Efter att en grundlig teoretisk analys av problemet har gjorts förenklar man det slutliga uttrycket till

$$\sigma_y(0, \infty) = \alpha_1 \cdot (T_\infty - T_0) \cdot E \quad (13)$$

σ - Spänning i glasets kant efter "oändlig tid"

α_1 - Värmeutvidgningskoefficienten för glas

T_∞ - Glasets genomsnittliga temperatur

T_0 - Lokal temperatur av glaset som är lägre än den genomsnittliga

E - Glasets elasticitetsmodul

Spänningen i glaset är beroende av var i glaset man befinner sig och vid vilken tidpunkt. $\sigma(0, \infty)$ anger att spänningen beräknas för kanten och efter oändligt lång värmepåverkan.

Artikeln innehåller diagram som visar att de höga spänningarna inte breder ut sig nämnvärt från de skuggade partierna. De varma partierna visas vara praktiskt taget spänningsfria. På de skuggade partierna finns det också ojämnheter i den skurna kanten som orsakar spänningskoncentrationer vid värmepåverkan och kan resultera i sprickbildning.

Keski-Rahkonen visar att teoretiskt borde en temperaturskillnad på 80°C mellan glas och kant resultera i fönsterbrott. Vid de experiment han utfört krävdes däremot en temperaturskillnad på drygt 100°C.

Referens [19]: *Thermal Analysis of a Compartment Fire on Window Glass*

Författare: A. Joshi & P. J. Pagni
Artikel/rapport/bok: Rapport
Hämtad från: -
År: 1990

Denna artikel behandlar en endimensionell icke-linjär värmetransport till och från fönsterglasets. Resultaten illustreras grafiskt med dimensionslösa variabler vilket bara ger en översikt och introduktion till hur glas beter sig vid värmepåverkan. Dessutom undersöks hur temperaturstegringen varierar med vissa indata (enligt modellen). En variabel varierar (förutom tiden) medan de andra hålls konstanta. Variabler som undersöks är värmestrålning, värmeövergångskoefficienter och absorptionslängder. Resultaten redovisas grafiskt i dimensionslösa diagram.

11 Slutsatser

Det är motiverat att försöka förutsäga då glas spricker till följd av värmepåverkan eftersom det i högsta grad påverkar brandförloppet vid ventilationskontrollerade bränder.

Flera faktorer påverkar den tid vid vilket glaset går sönder till följd av värmepåverkan. Det faktum att var och en av dessa är mer eller mindre svåra att bestämma samt att osäkerheterna tillsammans resulterar i stora osäkerheter i resultaten gör att de modeller som finns idag ska tillämpas med försiktighet. Faktorerna är följande:

- glasets materialegenskaper,
- glasets geometri och dimensioner,
- fönstertyp,
- glasets skurna kanter och
- brandens egenskaper.

Glaset materialegenskaper

Glas är ett mycket speciellt material. Att bestämma dess materialegenskaper så pass noggrant att man erhåller tillfredsställande exakta beräkningsresultat är inte möjlig endast genom litteraturstudier. Undersökning av den specifika glastypen ifråga rekommenderas för att få mer exakta indata.

Glaset geometri och dimensioner

Glaset dimensioner kan utgöra en begränsning för de modeller som används idag. Speciellt är förhållandet mellan bredden på infästningen och glasets tjocklek viktigt. Modellen till BREAK1 antar att ingen värme leds in till den del av glaset som sitter i infästningen. Är inte detta förhållande inom vissa värden kommer värmeledningen in till det skuggade området att ha en betydande inverkan så att tiden till brott ökar, eller att brott inte inträffar överhuvudtaget.

Om glaset är så stort att det inte täcks helt av de varma brandgaserna kompliceras situationen. Den modell som beskrivs i den här rapporten bygger på en jämn uppvärmning av hela den synliga delen av glaset. Även situationen med ett sjunkande brandgaslager medför liknande problem då det passerar fönstret.

Fönstertyp

Modellen som beskriver uppvärmningen av enkelglas är relativt enkel. Det blir genast mer komplicerat att utöka teorin till flerglasfönster. För det första är det svårt att beräkna hur mycket de glas som inte är i kontakt med brandgaserna värms upp innan det utsatta glaset går sönder. För det andra påverkas uppvärmningen av de icke utsatta glaserna av om det första glaset faller ur sin båge eller inte efter det att det spruckit.

Glaset skurna kanter

Kanterna på en glasskiva har för stor inverkan för att man ska få en tillfredsställande noggrannhet i resultaten. Faktumet att infästning och montering har större betydelse för glasets hållfasthet än dess materialegenskaper visar att det är en svår uppgift att förutsäga vid vilken tidpunkt glaset spricker.

Om skärtekniken vid fönsterglastillverkning utvecklas så att skärytorna blir mer och mer lika kommer hållfastheten att kunna bestämmas med en noggrannhet som är större än idag. Det skulle betyda mycket i strävan efter att försöka förutsäga när glas spricker vid värmepåverkan.

Shields förslag om att glasskivor borde klassas i exempelvis tre klasser efter hur pass fina kanter de har skulle få ner spridningen vid hållfasthetsprover för varje klass. Detta skulle innebära att tiden till fönsterbrott vid värmepåverkan blir lättare att beräkna.

Brandens egenskaper

Vid beräkningar är det framför allt tre parametrar, bortsett från kant och infästning, som måste bestämmas extra noggrant för att inte erhålla för stora osäkerheter i resultaten. Det är strålningen från flammorna till glaset, brandgasernas emissionstal och värmeövergångstalet på den exponerade sidan av glaset.

Tillsammans kan osäkerheten i var och en av de ovan angivna faktorerna resultera i stora osäkerheter i beräkningsresultaten. Detta tillsammans med ovissheten ifall glaset faller ur sin båge eller ej medför att det är svårt att avgöra om, och i så fall när ett fönster blir till en ventilationsöppning vid en brand inomhus.

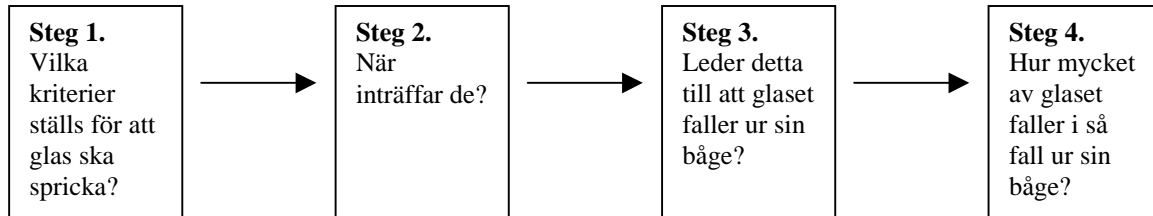
Detta har visat sig vid utvärderingen av datorprogrammet BREAK1. Vid två till synes lika scenarier med enda skillnaden att brandgasttemperaturen var olika gav beräkningar i BREAK1 bra överensstämmelse i det ena fallet och dålig i det andra.

Genom att variera indata till datorprogrammet BREAK1 inom ”rimliga” gränser kan stora variationer i beräkningsresultaten erhållas. Många parametrar är i de flesta fall okända för användaren av programmet vilket gör att beräkningsresultatet ofta blir osäkert.

Om BREAK1-beräkningar jämförs med experimentella uppgifter kan man genom att variera indata inom rimliga gränser få resultat som stämmer bra överens. Om man däremot utför beräkningarna utan att veta resultaten av experimenten måste resultaten betraktas som mycket osäkra.

12 Fortsatta studier och forskning

Forskningen inom detta område, för att nå målet att veta när ett stängt fönster bildar en ventilationsöppning, kan ha följande utformning:



Följande behöver göras vid respektive steg för att beräkningar på när en ventilationsöppning bildas ska kunna anses tillförlitliga.

Steg 1

Man har kommit fram till att det är temperaturskillnader mellan olika delar i glaset är orsaken till att glaset spricker vid värmepåverkan. Hur stor denna temperaturskillnad är beror på hållfastheten för glas, vilken inte går att definiera inom ett någorlunda litet intervall. Här får vi invänta utvecklingen av skärtekniken inom glasindustrin. På grund av att hållfastheten är så pass beroende av hur den skurna kanten ser ut kan inte hållfastheten bestämmas förrän denna utvecklingen kommit längre. Ett alternativ till detta är att klassa fönsterglas efter hur pass fina kanter de har [1].

Steg 2

Här är det främst två områden inom vilka kunskaperna måste bli bättre för att forskningen ska kunna gå framåt. För det första måste begreppet konvektivt värmeövergångstal skiljas från det totala värmeövergångstalet, samt att storleken på dessa måste bestämmas. Idag förekommer det i rapporter spridda värden på "värmeövergångstalet" (utan att ange om det är konvektivt eller totalt) som anses vara rimliga. För det andra måste spridningen på rimliga värden av brandgasernas emissivitet minska för att inte osäkerheten i beräkningarna ska vara för stor.

Dessutom behöver en undersökning göras för att ta reda på vilka faktorer som rimligtvis kan försummas. Är det rimligt att försumma värmetransporten in till den dolda delen av glaset i infästningen, dvs att använda sig av en endimensionell värmetransport? Ett annat antagande som görs i de modeller som finns idag är att glaset värms upp jämnt över hela ytan, dvs att det är lika varmt i övre delen av glaset som i den undre. Är detta rimligt?

Teorierna har idag utvidgats från att bara behandlat enkelglas till att även omfatta flerglaskonstruktioner. Detta är en förutsättning med tanke på att praktiskt taget ingen nybyggnation på våra breddgrader innehåller enkelglas.

Steg 3

Syftet med att försöka ta reda på när ett fönster spricker till följd av värmepåverkan är att erhålla den tidpunkt vid vilken en ny ventilationsbrand uppkommer. Idag har bara tiden till fönsterbrott beaktats och inte tiden tills det att glaset faller ur sin båge. Anledningen är att om ett fönster ska kollapsa eller bara spricka betraktas som svåröversägbart eller rent av slumpmässigt. De bakomliggande faktorerna måste undersökas mer noggrant. Dessa faktorer skulle kunna vara glasets tjocklek, glasets höjd i förhållande till bredd, glasets infästning, hastigheten på värmeöverföringen till glaset, bredden på infästningen, tryckuppbyggnad i rummet, fönsterbågens materialegenskaper, mm.

Steg 4

En del arbete har gjorts på det här området. För det mesta har det dock bara handlat om att kartlägga sprickbildningsmönstret samt att konstatera att ibland faller glaset ur sin båge och ibland inte. Vissa fall har observerats då endast ca 5% av glasets yta har fallit ur sin båge och ibland har praktiskt taget hela fönstrets yta bildat ventilationsöppning. För att vi ska ha någon nytta av våra beräkningar av tid till fönsterbrott måste vi även veta om glaset faller ur sin båge och i så fall hur stor öppningen blir.

13 Erkännanden

Detta arbetet har i praktiken inte utförts helt och hållet av mig själv utan jag har fått en hel del hjälp. Först och främst vill jag tacka min handledare på Institutionen för brandteknik, LTH, Dr Björn Karlsson som har hjälpt mig och styrt mig på rätt spår då arbetet kört fast. Dessutom skulle jag vilja tacka min samtida examensarbetare vid Maskinteknik, LTH, Marcus Andreasson, som hjälpt till med materialdata vid värmetransport samt vid tekniska problem vid datorn. Ett stort tack riktas även till alla er andra som deltagit på ert speciella vis, med allt från att svara på enkäter via litteratursökning till moraliskt stöd.

Tack!
Robert

14 Referenslista

- [1] Shields T. J. et al., "Thermal Fracture of Window Glazing: Performance of Glazing in Fire", *Journal of Applied Fire Science*, vol 4(4), pp. 249-263, 1994-95.
- [2] Shields T. J. et al., "An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fire", *Journal of Applied Fire Science*, vol 4(4), pp. 303-323, 1994-95.
- [3] Shields T. J. et al., "In Situ Experimental Thermal Stress Measurements in Glass Subjected to Enclosure Fires", *Journal of Applied Fire Science*, vol 5(2), pp. 123-134, 1995-96.
- [4] Fire Code Reform Centre Project 4. Fire Safety Design Solutions. Part I: Core Model & Residential Buildings, Modelling Phase, Chapter 4.
- [5] Skelly, M. J., *An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires*. Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, VA 24061, NIST-GCR-90-578, 1990.
- [6] Adamsson, B. och Backman, H. E., *Glas i hus*. Lund, 1975, ISBN 91-24-17448-3.
- [7] Joshi, A. A. and Pagni, P. J., "Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. II – Experiments", *Fire Safety Journal* vol. 22, pp. 45-65, 1994.
- [8] Cengel, A. Y. and Boles, M. A., *Thermodynamics – An Engineering Approach*. USA, McGraw-Hill, 1994. ISBN 0-07-113249-X
- [9] Ingelstam, E. et al., *TEFYMA – Handbok för grundläggande teknisk fysik, fysik och matematik*. Helsingborg: Sjöberg's Bokförlag AB, 1993. ISBN 91-87234-13-0
- [10] Bengtsson, L-G., *Övertändning, backdraft och brandgasexplosion sett ur räddningstjänstens perspektiv*. Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, 1999, Report 1019.
- [11] Karlsson, B. and Quintiere, J. G., *Enclosure Fire Dynamics*. Lund, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, 1997.
- [12] Skelly M. J. et al., "An Experimental Investigation of Glass Brekage in Compartment Fires", *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 3(1), pp. 25-34, 1991.
- [13] Joshi, A. and Pagni, P. J., *Users´ Guide to BREAK1, The Berkely Algorithm for Breaking Window Glass in a Compartment Fire*. University of California Department of Mechanical Engineering, Berkely, CA 94720, NIST-GCR-91-596, 1991.
- [14] Joshi, A. A. and Pagni, P. J., "Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass. I – Theory", *Fire Safety Journal* vol. 22, pp. 22-43, 1994.
- [15] Cuzillo, B. R. and Pagni, P. J., "Thermal Breakage of Double-Pane Glazing by Fire", *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 9(1), pp. 1-11, 1998.
- [16] Shields T. J. et al., "The Behaviour of Single Glazing in an Enclosure Fire", *Journal of Applied Fire Science*, vol. 7(2), pp. 145-163, 1997-98.
- [17] Sincaglia, P. E., Barnett, J. R., "Development of a Glass Window Fracture Model for Zone Type Computer Fire Codes", *Journal of Fire protection Engineering*, vol 8(3), pp. 1-18, 1997.

- [18] Keski-Rahkonen, Olavi, "Breaking of Window Glass Close to Fire", *Fire and Materials*, vol. 12, pp. 61-69, 1988.
- [19] Joshi, A. and Pagni, P. J., *Thermal Analysis of a Compartment Fire on Window Glass*. University of California Department of Mechanical Engineering, Berkely, CA 94720, NIST-GCR-90-579, 1990.

APPENDIX 1-5

APPENDIX 1 – SAMMANSTÄLLNING AV MATERIALDATA.....	65
APPENDIX 2 – BERÄKNINGSEXEMPEL MED BREAK1.....	67
APPENDIX 3 – MATEMATISK MODELL FÖR BREAK1.....	73
APPENDIX 4 – BESKRIVNING AV SKELLYS EXPERIMENT.....	77
APPENDIX 5 – IN- OCH UTDATA TILL BREAK1-BERÄKNINGAR.....	81

ing av materialdata

	/1/	/2/	/3/	/4/	/5/	/6/	/7/	/8/	/9/	/10/	/11/	/12/	/13/	/14/	/15/	/16/	/17/	/18/
Thermal conductivity	W/mK	0.76		0.76/1.37							0.6-1.3		0.76					
Thermal diffusivity	m ² /s			3.6E-7/6.8E-7							3-4E-7		3.60E-07		0.81			
Absorption length	m			0.001/0.001							0.9-1.5E-3		1.00E-03		3.86E-07			
Breaking stress	MPa	50	47	40/47/392?	48	20-50	55-138	72.4	0.001		40 (2-13.8E7)	50			30-100	Kanske 40	30-100	
Youngs modulus	GPa	80	70	70/68.6	80	72	72.4				70-72.5	80			70-75	70	70-75	
Thermal coefficient of linear expansion	K	8.00E-06	9.50E-06	3.6E-6/3.6E-6	8.00E-05	9.20E-06	8.50E-06				8.5-9.5E-6	8.00E-06			8.0-8.5E-6	8.50E-06	8.50E-06	8.5-5E-6
Thickness of the glass	m										0.1-3.0E-2							
Shading thickness	m										0.3-5E-2							
Heat transfer coefficient on exposed side	W/m ² K		7.6	10 - 40 (60/20/0.9)			3-8				5-60							
Heat transfer coefficient on unexposed side	W/m ² K		15.2								3-20							
Ambient temperature on unexposed side	K						0.91/0.8-0.9				270-320							
Emissivity of glass	-										0.8-1.0						0.837	0.84
Emissivity of ambient	-										0.1-1.0							
Emissivity of hot layer	-										0.1-1.0							
Flame radiation flux	kW/m ²		10-28	0.1 - 0.9 (100/50/0.9)							0.0-1.0							
Specifika värmekapaciteten	KJ/kgK										0.0-1.0							
Densitet	kg/m ³										0.84*			2500	2500	2500	2500	2500

/1/ Breaking of Window Glass Close to Fire, Olavi Keski-Rahkonen, 1988

/2/ An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires, Michel J. Shelly & Richard J. Roby, 1991

/3/ Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass, I - Theory, A. A. Joshi & P. J. Pagni, 1994

/4/ Fire-Induced Thermal Fields in Window Glass, II - Experiments, A. A. Joshi & P. J. Pagni, 1994

/5/ Thermal Fracture of Window Glazing: Performance of Glazing in Fire, S. K. S. Hassani, T. J. Shields & G. W. Silcock, 1994-95

/6/ An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fire, S. K. S. Hassani, J. Shields & G. W. Silcock, 1994-95

/7/ och /8/ Development of a Glass Window Fracture Model for Zone Type Computer Fire Codes, Paul E. Sircaglia & Jonathan R. Barnett, 1997

/9/ Thermal Breakage of Double-Pane Window Glazing by Fire, Bernard R. Cuzillo & Patrick J. Pagni, 1998

/10/ The Behaviour of Single Glazing in an Enclosure Fire, T. J. Shields, G. W. H. Silcock & S. K. S. Hassani, 1997-98

/11/ User's Guide to BREAK1, The Berkeley Algorithm for Breaking Window Glass in a Compartment Fire, Aruna A. Joshi & Patrick J. Pagni, 1991

/12/ Fire Code Reform Centre Project 4, Fire Safety System Design Solutions, Part I: Core Model & Residential Buildings, Modelling Phase

/13/ Thermal Analysis of a Compartment Fire on Window Glass, A. Joshi & P. J. Pagni, 1990

/14/ TEFYMA - Handbok för grundläggande teknisk fysik och matematik, Ingemar, Rönngren & Sjöberg, 1993

/15/ M&P-yke - Tabeller och formler, Lennart Ekbohm, Sigvard Lilleberg & Lars Bergström, 1990

/16/ Glas i Hus, Bo Adamsson & Harry E. Backman, 1975

/17/ Enkät: Tomas Grange, Pilkington Flatglas AB

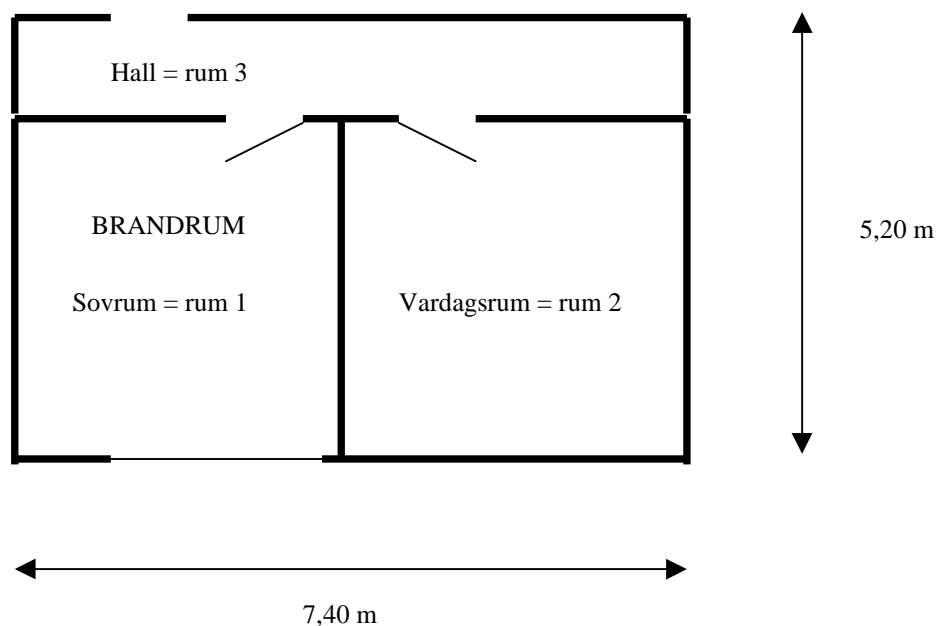
/18/ Enkät: Anders Brovall, forskningsansvarig på Elfönster

*) Vid 20 C

**) Vid 0-100 C

Appendix 2 – Beräkningsexempel med BREAK1

Detta appendix illustrerar hur BREAK1 är tänkt att användas genom att tillämpa det på ett brandscenario i en tvårumslägenhet. Tanken är att C-FAST ska simulera brandförloppet och BREAK1 ska beräkna tiden till fönsterbrott. Diagram över de tre rummens temperaturer och brandgaslagrets höjd samt över effektutvecklingen redovisas. Lägenheten är illustrerad i Figur 22_A.



Figur 22_A. Skiss över lägenhet utsatt för brandscenario.

Brandscenariot

I det här fallet antas att en säng brinner i sovrummet, rum 1. Brandeffekten har ett maximalt värde av 3 MW (kan vara rimligt vid jämförelser i [11]) och tillväxtfaktorn sätts till $\alpha=0,1 \text{ kW/s}^2$, vilket ligger mellan fast och ultrafast. Vid nådda 3 MW hålls brandeffekten konstant.

Dörrarna mellan rummen antas vara helt öppna medan fönster och dörrar ut till det fria antas vara stängda eller ha en öppning på 10%.

Beräkningsgång

Beräkningsgången är indelad i tre steg. Först utförs en referenssimulering i C-FAST, därefter en beräkning i BREAK1 och slutligen en simulering till i C-FAST.

Steg 1. Referenssimulering

Branden simuleras i C-FAST utan att hänsyn tas till att något fönster spricker under brandförloppet. Härifrån erhålls temperatur, effektutveckling samt brandgaslagrets höjd som funktion av tiden. För brandrummet ser temperaturutvecklingen ut enligt följande, se Tabell 8_A. OBS! Indatafilen måste sparas. Den ska användas i steg 3.

Tabell 8_A. Brandgastemperaturen som funktion av tiden i sovrummet utan att hänsyn tagits till att fönstret går sönder. Temperaturerna har erhållits genom simulering i C-FAST.

point #	time [s]	temperature [K]
1	.00	300.00
2	30.00	360.00
3	60.00	497.00
4	90.00	643.00
5	120.00	794.00
6	150.00	802.00
7	180.00	800.00
8	210.00	787.00
9	240.00	648.00
10	270.00	568.00
11	300.00	539.00
12	330.00	511.00
13	360.00	484.00
14	390.00	469.00
15	420.00	457.00
16	450.00	448.00
17	480.00	441.00
18	510.00	434.00
19	540.00	429.00
20	570.00	425.00
21	600.00	421.00

Steg 2. Beräkning i BREAK1

Temperaturutvecklingen från steg 1 används som ingångsvärden i datorprogrammet BREAK1. Här måste även anges andra indata såsom fönsterdimension och egenskaper hos glaset. Därefter beräknar programmet ut tid tills det att fönstret spricker. I det här fallet erhålls värdet 103 s.

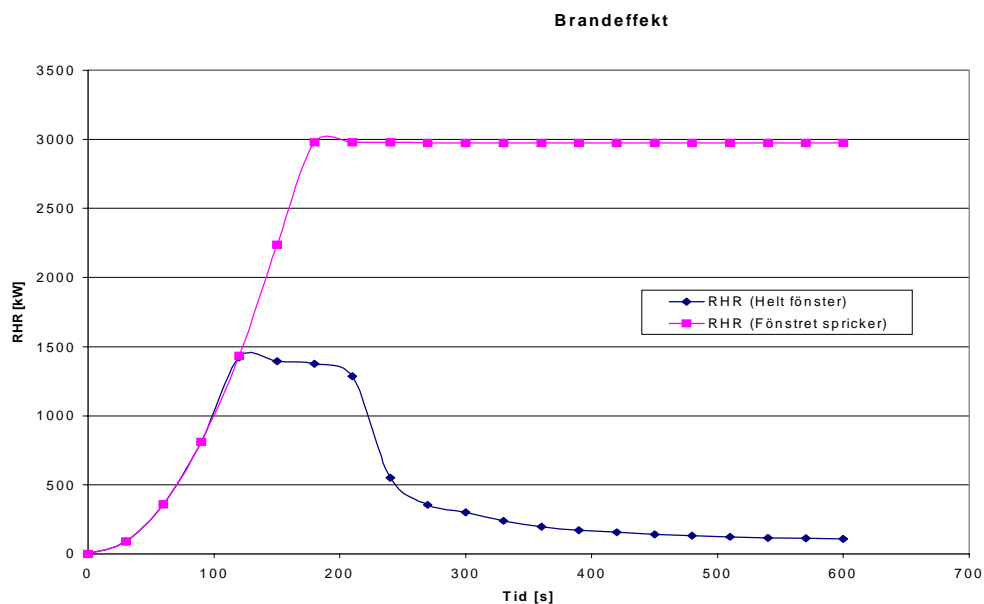
Steg 3. Slutlig simulering i C-FAST

Ännu en simulering utförs i C-FAST. Samma scenario som det i steg 1 simuleras med den skillnaden att fönstret i brandrummet öppnas vid den i steg 2 beräknade tiden (i det här fallet 103 s). Nya effekter, temperaturer och höjder på brandgaslager erhålls eftersom det öppna fönstret påverkar brandscenariot.

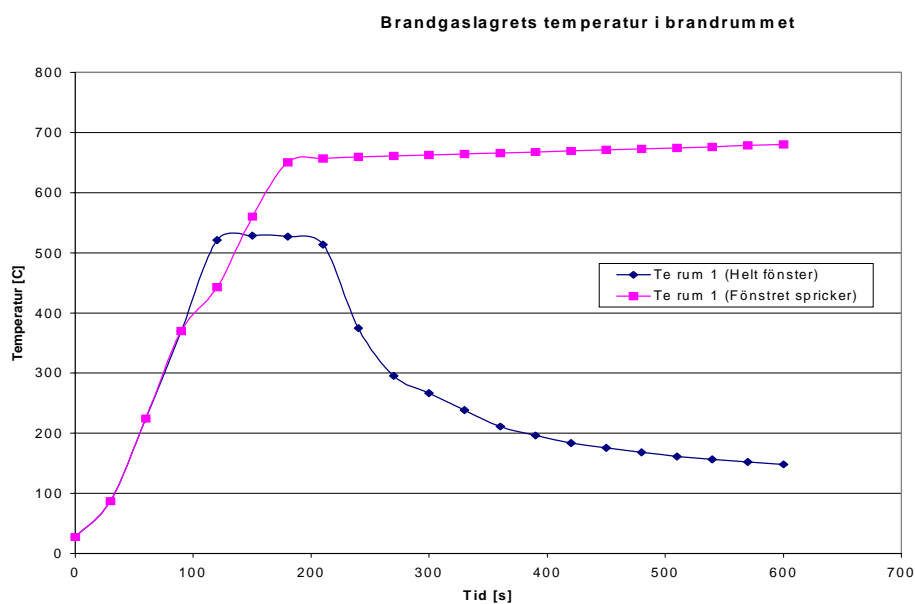
Redovisning av resultaten

Resultaten av simuleringarna (brandens effektutveckling, brandgastemperaturen i de olika rummen samt brandgaslagrets höjd i de olika rummen) kommer här att presenteras grafiskt. För att illustrera skillnaden i brandscenario kommer i varje diagram både fallet med helt fönster och fallet med trasigt fönster att redovisas.

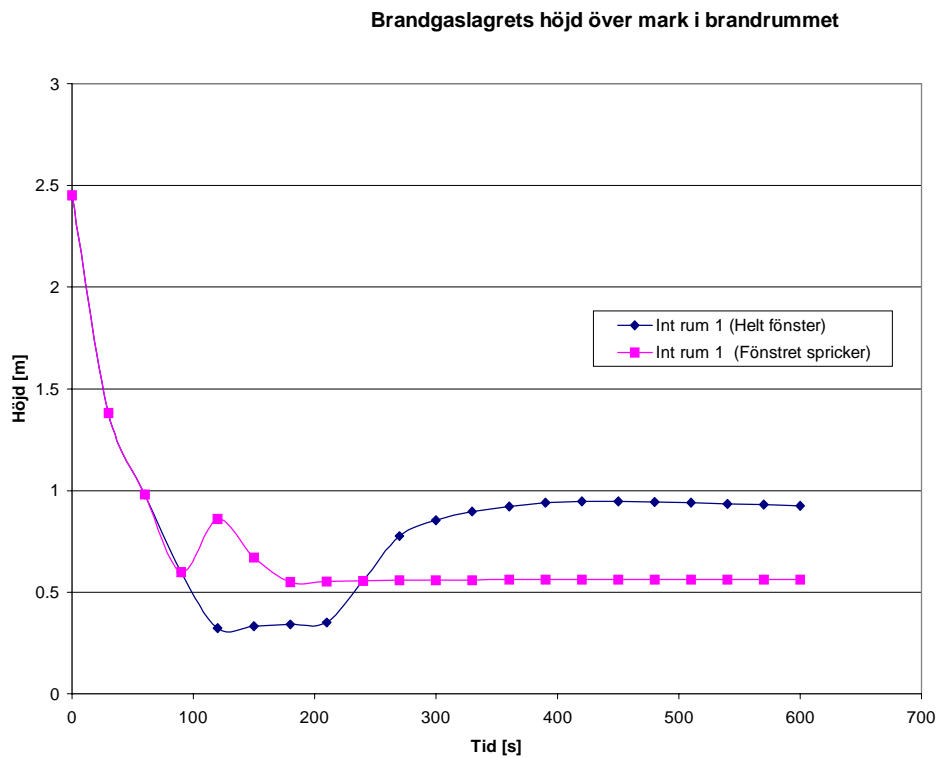
Brandrummet - sovrummet



Figur 23_A. Skillnaden i brandens effektutveckling beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

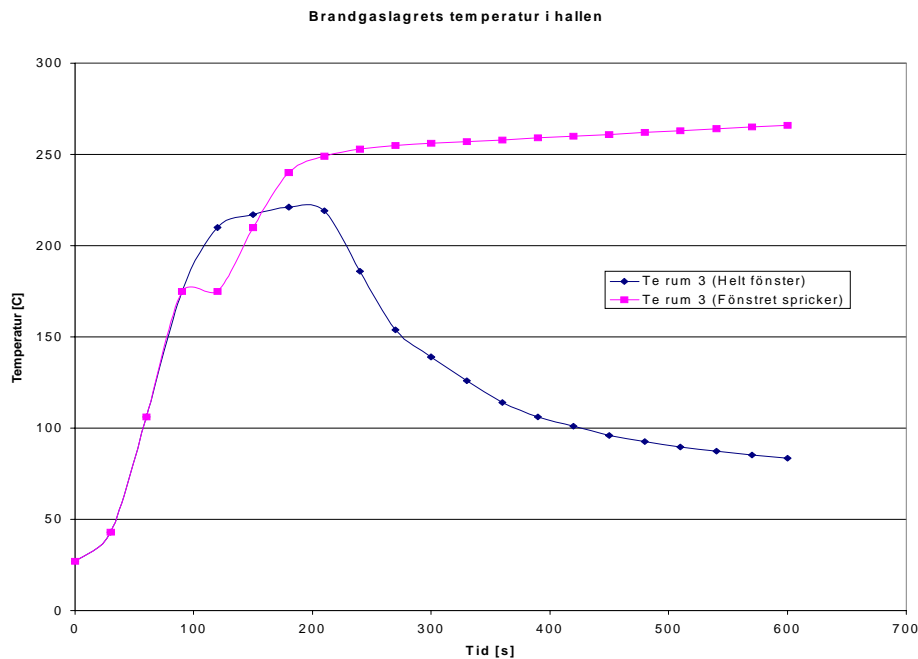


Figur 24_A. Skillnaden i brandgaslagrets temperatur i brandrummet beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

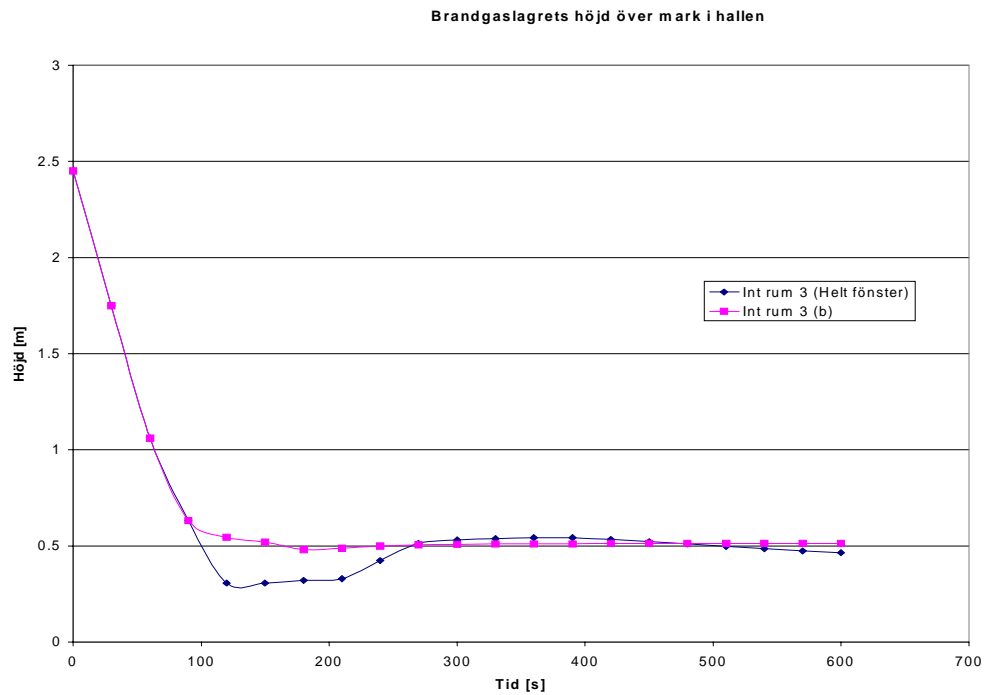


Figur 25_A. Skillnaden i brandgaslagrets höjd i brandrummet beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

Hallen

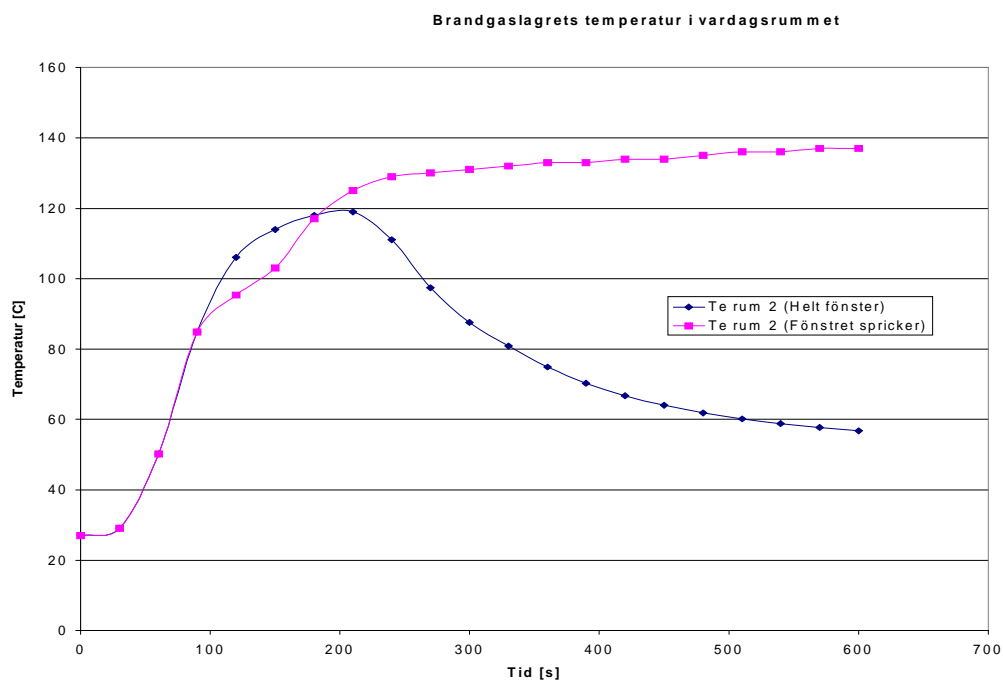


Figur 26_A. Skillnaden i brandgaslagrets temperatur i hallen beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

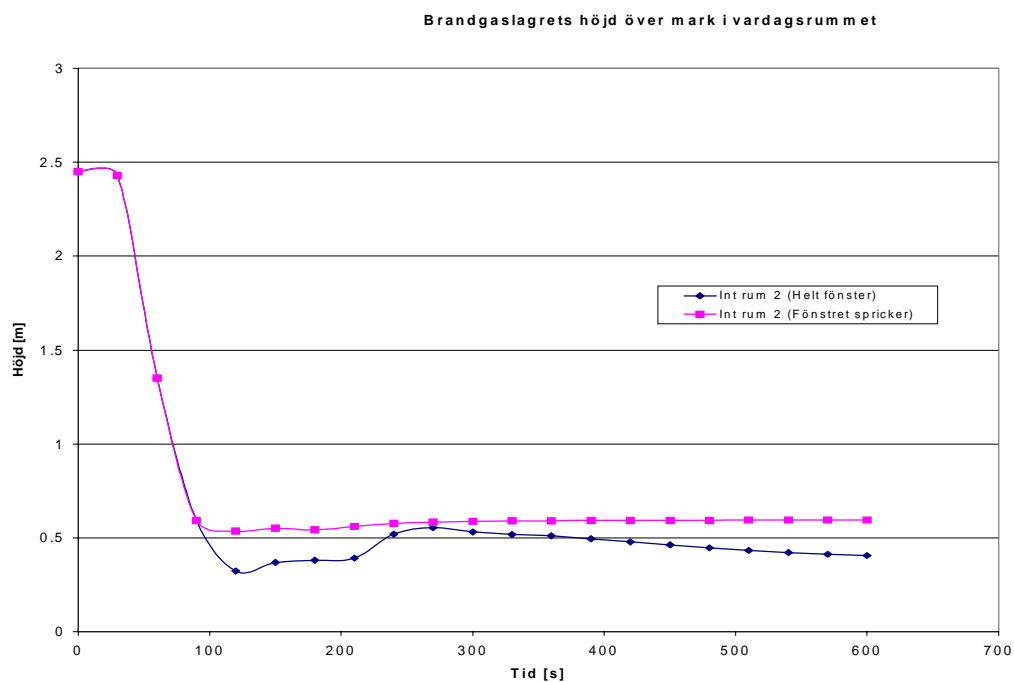


Figur 27_A. Skillnaden i brandgaslagrets höjd i hallen beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

Vardagsrummet



Figur 28_A. Skillnaden i brandgaslagrets temperatur i vardagsrummet beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.



Figur 29_A. Skillnaden i brandgaslagrets höjd i vardagsrummet beroende på om man tar hänsyn till ifall ett fönster spricker på grund av värmepåverkan eller inte.

Figurerna ovan visar att effektutvecklingen och temperaturutvecklingen förändras betydligt vid det fall då ett fönster går sönder. I de tre rummen påverkas inte rökgaslagrets höjd i samma utsträckning.

Appendix 3 – Matematisk modell för BREAK1

E	Elasticitetsmodul [N/m ²]	β	Värmeutvidgningskoefficient [°C]
g	Korrektionsfaktor [-]	ϵ	Glaset's emissionsförmåga [-]
h_1	Värmeövergångstalet på utsidan [W/m ² K]	$\epsilon_{1\infty}$	Luftens emissionsförmåga [-]
h_2	Värmeövergångstalet på insidan [W/m ² K]	$\epsilon_{2\infty}$	Brandgasernas emissionsförmåga [-]
I	Strålning från flammorna [W/m ²]	ρ	Densiteten för glas [kg/m ³]
k	Glaset's värmekonduktivitet [W/mK]	σ_b	Brottspänning [N/m ²]
L	Tjocklek på glaset [m]	σ	Stefan-Boltzmanns konstant
l	Absorptionslängd [m]		
s	Bredd på infästningen [m]		
ΔT	Temperaturhöjning, se nedan [°C]		
T_i	Initialtemperatur [°C]		
t	Tiden [s]		
x	Avståndsvariabel vinkelrät mot ytan [m]		

Den matematiska modellen för datorprogrammet BREAK1 bygger på ett endimensionellt värmefflöde genom fönsterglasets. Den grundläggande formeln för värmeutvidgning av ett fast material är följande.

$$\beta \cdot \Delta T = \sigma_b / E \quad (1_A)$$

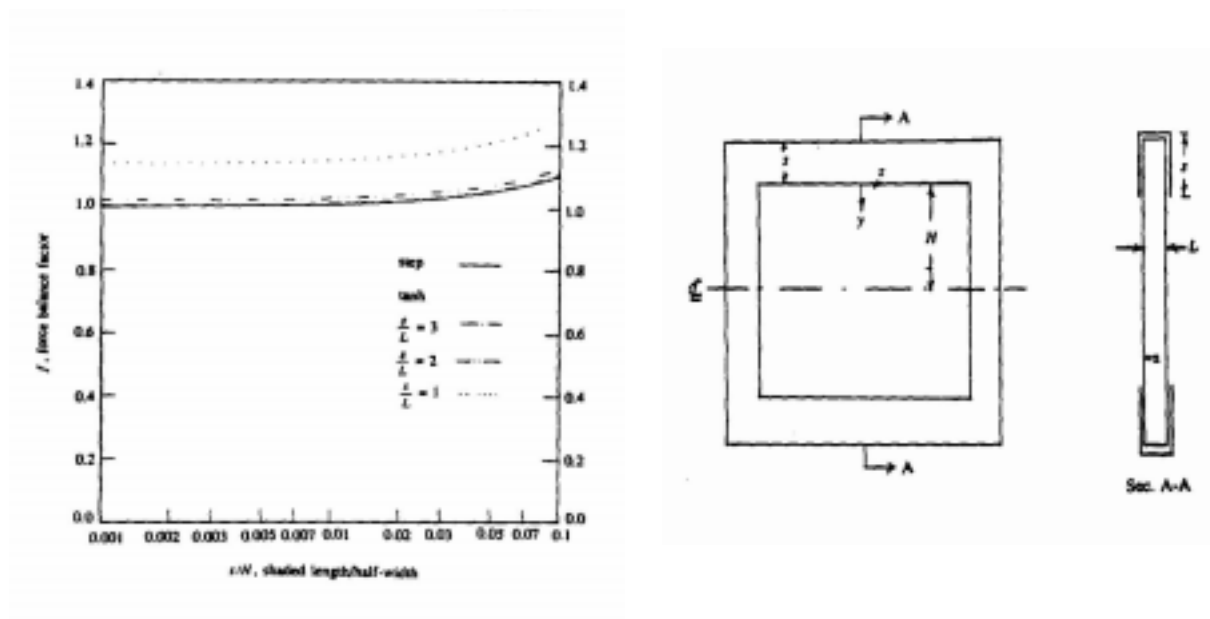
Temperaturhöjningen i formeln ovan definieras som medeltemperaturen över glaset's tjocklek subtraherat med initialtemperaturen.

$$\Delta T = (1/L) \int_0^L T(x,t) dx - T_i \quad (2_A)$$

Antag att glaset inte har något skuggat parti som inte värms upp. Då utvidgas det enligt formel (2_A) ovan. Antag nu att det finns en skuggad kant som inte värms upp runt om det upphettade partiet. Det expanderande glaset kommer att utsätta kanten för dragspänning. Samtidigt kommer kanten att ha en bromsande inverkan på mittenpartiet vilket innebär att det inte expanderar lika mycket som om det hade fått utvidgas fritt. Därför införs en faktor g som är beroende av fönstrets geometrier.

$$\Delta T = g \cdot \sigma_b / E\beta \quad (3_A)$$

Hur g beror på fönstrets geometrier framgår av Figur 30_A. Kortfattat kan sägas att g ökar med ökad bredd på infästningen i förhållande till dels bredden eller höjden på fönstret och dels tjockleken på glaset.



Figur 30_A. Till vänster, figur som visar korrektionsfaktorn g (kallad f i figuren!) som funktion av glasets dimensioner. Till höger, figur som visar de olika beteckningarna på fönstret.

Temperaturskillnaden ΔT ska stå för skillnaden i temperatur mellan kant och mitt. Det är svårt att matematiskt ta hänsyn till att temperaturen ökar i kanten varför kanttemperaturen sätts till konstant och lika med initialtemperaturen. ΔT i modellen förenklas alltså till att stå för den genomsnittliga temperaturhöjningen av mittpartiet, se formel (2_A). För att detta ska gälla med tillfredsställande noggrannhet måste fönstret värmas upp tillräckligt fort för att värmen inte ska hinna ledas in till kanterna. Kriterierna som ställts upp för detta är att $s/L \geq 2$, d v s bred infästning, och $k \cdot t / (\rho \cdot c \cdot s^2) \leq 1$, dvs snabb upphettning.

För att beräkna tiden tills det att denna temperaturdifferens uppstår används teorier om värmetransport. Utgångsformeln, (4_A), är följande.

$$\delta \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + I(t) \cdot \frac{e^{-x/l}}{l} \quad (4_A)$$

Randvillkoren följer nedan där strålningen från brandgaslagret är med

$$t = 0; T = T_i, \quad (5_A)$$

$$x = 0; -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_2(t) \cdot (T_{2\infty}(t) - T(0,t)) + \varepsilon_{2\infty}(t) \cdot \sigma \cdot T_{2\infty}^4(t) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4(0,t) = q_2(t) \quad (6_A)$$

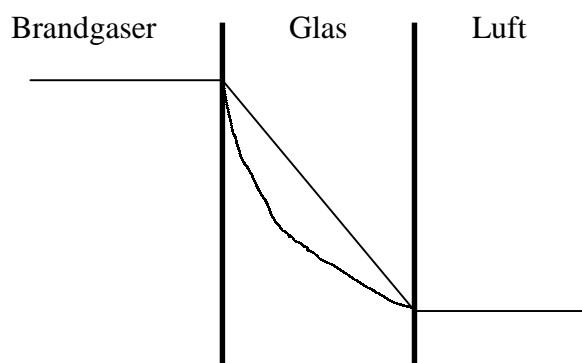
$$x = L; -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = h_1(t) \cdot (T(L,t) - T_{1\infty}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4(L,t) - \varepsilon_{1\infty} \cdot \sigma \cdot T_{1\infty}^4 = q_1(t) \quad (7_A)$$

För att förenkla beräkningarna införs de dimensionslösa variablerna enligt nedan.

$$\xi = \frac{x}{L}; \tau = \frac{\alpha \cdot t}{L^2}; \gamma = \frac{l}{L}; \theta = \frac{T - T_i}{T_c}; T_c = \frac{\sigma_b}{E \cdot \alpha}; Bi_1 = \frac{h_1 \cdot L}{k}; Bi_2 = \frac{h_2(t) \cdot L}{k} \quad (8_A)$$

Sedan löses ekvationerna med hjälp av Laplacetransformationer och Newtons metod.

Att anta en linjär fördelning av temperaturen på djupet av glaset kommer att underskatta tiden till brott. Men temperaturfördelningen i glaset är inte konstant i tiden. Ju längre tid som löper från värmepåverkan desto mer linjär fördelning, se Figur 31_A.



Figur 31_A. Figur som visar temperaturfördelningen i glaset. Den böjda kurvan visar den verkliga fördelningen i inledningsskedet medans den raka visar den linjära fördelningen som tillståndet går mot ju längre tiden går.

Därför införs en funktion för att beskriva medeltemperaturen i glaset, se formel (9_A).

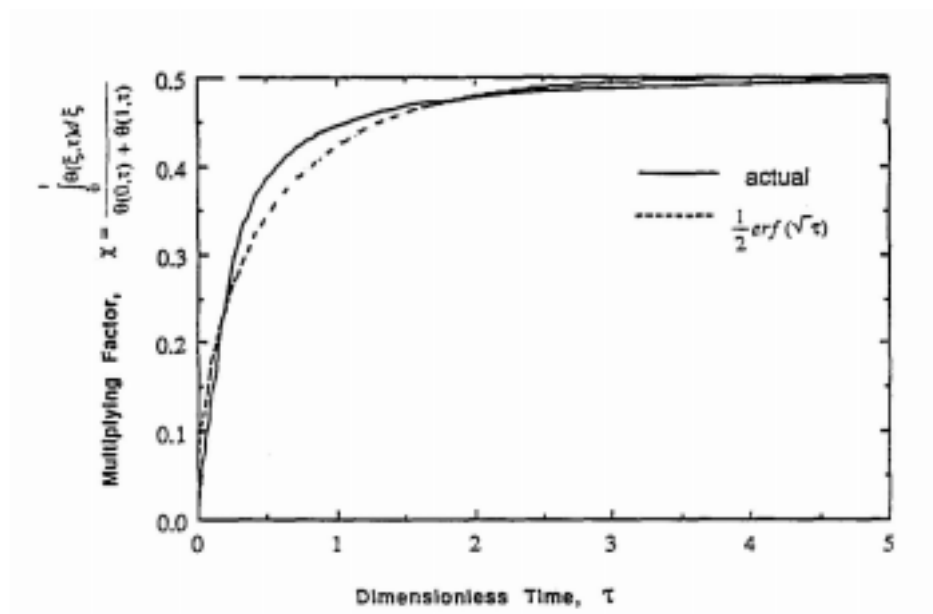
$$\chi(\tau) = \frac{\int_0^1 \theta(\xi, \tau) d\xi}{\theta(0, \tau) + \theta(1, \tau)} \quad (9_A)$$

Vid det linjära fallet är $\chi(\tau)=0,5$. Funktionen $\chi(\tau)$ är alltså en funktion av tiden och går mot 0,5 då tiden går mot oändligheten, se Figur 32_A.

För verkliga fall ändrar sig χ med tiden enligt den heldragna linjen i Figur 32. Här är även en funktion införd för att approximera den verkliga kurvan. Den illustreras av den streckade linjen och används i programmet.

Programmet bygger på de ovan redovisade formlerna och itererar fram en temperaturkurva med avseende på tiden. Beräkningarna upphör vid första sprickbildningen. Som ingångsvärde till datorprogrammet ska anges lägsta godtagbara noggrannhet. Datorn halverar eller dubblar tidsstegen vid beräkningarna tills det att tillräcklig noggrannhet har uppnåtts.

Programmet förutsäger inte ifall fönstret trillar ur sin ram eller ej.



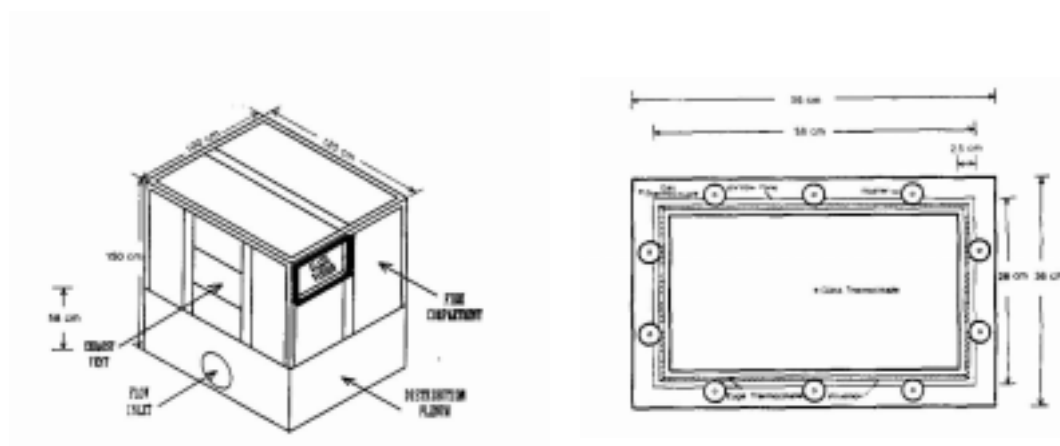
Figur 32_A. Figur som visar hur faktorn χ varierar med tiden. Observera att tiden är dimensionslös varför bilden ska ses som en illustration. Bilden är hämtad ifrån [13].

Appendix 4 - Beskrivning av Skellys experiment

1990 gjorde Michael J. Skelly en undersökning om hur fönsterglas påverkas av värme. Syftet var att undersöka temperaturen i exponerad del såväl som den del som är dold i infästningen samt att kartlägga sprickbildningen. Experimenten utfördes vid Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Skelly utförde 17 experiment på glasrutor med dold kant respektive exponerad kant som utsattes för olika storlekar på brandscenarier. Som värmealstrare användes fat med hexan som varierades i olika storlekar ($20 \times 20 \text{ cm}^2$, $20 \times 30 \text{ cm}^2$, $\text{Ø}20 \text{ cm}$ respektive $20 \times 10 \text{ cm}^2$).

Brandrummet var i halvskala med mått enligt Figur 33_A. Fönstret var bara 2,4 mm tjockt och med övriga dimensioner enligt Figur 33_A. Rummet är byggt med skiljda ventilationsöppningar för till- och frånluft för att underlätta tvåzonsbildning.



Figur 33_A. Till vänster, dimensionerna på Skellys brandrum. Till höger, dimensionerna på fönstret. Bilderna är hämtade från [12].

Till utrustningen hör en huv för att samla brandgaserna som strömmar ut ur rummet med möjlighet att analysera beståndsdelar. Information om sådan analys redovisas inte i rapporten. Det som dokumenteras är:

- storlek på bränsleytan
- bränsle
- rummets geometrier
- brandgasernas temperatur som funktion av tiden
- det exponerade glasets temperatur som funktion av tiden
- det dolda glasets (kantens) temperatur som funktion av tiden
- tid till fönsterbrott.

Redovisade data av intresse

Endast två storlekar på bränder har visat sig vara av intresse för den här rapporten (20×20 cm² och 20×30 cm²). Detta på grund av att brandgastemperaturen inte är dokumenterad för de andra. Tre försök gjordes med var och en av bränslestorlekarna och brandgastemperaturerna ses i Tabell 9_A och Tabell 10_A.

Tabell 9_A. Tabell över brandgastemperaturen i tre försök med 20×30 cm² hexanbrand.

TID [S]	TEMP. [°C]	TEMP. [°C]	TEMP. [°C]	MEDELTEMP.* [°C]
0	20	27	20	22
5	32	47	35	38
10	61	81	59	67
15	103	127	93	108
20	142	175	127	148
25	180	222	165	189
30	244	283	207	245
35	298	339	252	296
40	336	417	288	347
45	379	485	329	398
50	424	521	370	438
55	453	579	408	480
60	485	593	448	509
65	518	619	495	544
70	575	648	542	588
75	622	629	598	616
80	655	674	638	656
85	693	667	674	678
90	753	683	697	711
95	772	709	717	733
100	801	695		748
105		626		626

Tabell 10_A. Tabell över brandgastemperaturen i tre försök med 20×20 cm² hexanbrand.

TID [S]	TEMP. [°C]	TEMP. [°C]	TEMP. [°C]	MEDELTEMP.* [°C]
0	22	27	27	25
10	57	57	61	58
20	115	120	122	119
30	200	177	182	186
40	269	225	225	240
50	300	261	259	273
60	305	281	281	289
70	317	308	312	312
80	344	327	324	332
90	365	346	332	348
Forts.				

* Medeltemperaturen på brandgaslagret redovisades inte i Skellys rapport. Det har räknats ut för att användas i det här arbetet.

100	386	353	344	361
110	408	377	346	377
120	408	386	360	385
130	412	391	370	391
140	424	384	374	394
150	427	391	384	401
160	429	393	396	406
170	436	396	408	413
180	436	403	403	414
190	441	403	410	418
200	467	408	424	433
210	488	448	415	450
220	537	445	417	466
230	553	485	443	494
240	588	474	457	506
250	584	518	469	524
260	568	521	509	533
270	532	546	542	540
280	483	570	579	544
290	437	575	586	533
300	384	542	556	494
310	351	497	514	454
320		471	474	453
330		441	420	431
340		408	374	391
350		382		382
360		348		348

Tiden till fönsterbrott för de olika bränslestorlekarna var enligt följande, se Tabell 11_A.

Tabell 11_A. Tid till fönsterbrott för tre försök med 20×30 cm² och tre försök med 20×20 cm² hexanbrand.

20×30 cm ²	20×20 cm ²
55 s	100 s
56 s	112 s
48 s	109 s

Appendix 5 – Indata och utdata till BREAK1-beräkningar

Utgångsberäkningar – 20×20 cm² hexanbrand

Indata

```

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS
"
1.Thermal conductivity [W/mK]= .8000E+00
"
2.Thermal diffusivity [m^2/s]= .3700E-06
"
3.Absorption length [m]= .1000E-02
4.Breaking stress [N/m^2]= .4000E+08
5.Youngs modulus [N/m^2]= .7500E+11
6.Linear coefficient of expansion [/deg C]= .8000E-05
GEOMETRY
1.Glass thickness [m]= .0024
2.Shading thickness [m]= .0250
3.Half-width [m]= .1400
COEFFICIENTS
1.Heat transfer coeff, unexposed [W/m^2-K]= 10.00
2.Ambient temp, unexposed [K]= 294.0
3.Emissivity of glass = .84
4.Emissivity of ambient (unexposed) = 1.00
FLAME RADIATION
Number of points used for flux input: 2
  point #      time [s]          flux [W/m^2]
    1         .00              .00
    2        1000.00          .00
GAS TEMPERATURE
Number of points used for temperature input: 37
  point #      time [s]          temperature [K]
    1         .00            297.00
    2         10.00           330.00
    3         20.00           391.00
    4         30.00           458.00
    5         40.00           512.00
    6         50.00           545.00
    7         60.00           561.00
    8         70.00           584.00
    9         80.00           604.00
   10        90.00           620.00
   11       100.00           633.00
   12       110.00           649.00
   13       120.00           657.00
   14       130.00           663.00
   15       140.00           666.00
   16       150.00           673.00
   17       160.00           678.00
   18       170.00           685.00
   19       180.00           686.00
   20       190.00           690.00
   21       200.00           705.00
   22       210.00           722.00
   23       220.00           738.00
   24       230.00           766.00
   25       240.00           778.00
   26       250.00           796.00
   27       260.00           805.00

```

28	270.00	812.00
29	280.00	816.00
30	290.00	805.00
31	300.00	766.00
32	310.00	726.00
33	320.00	745.00
34	330.00	703.00
35	340.00	663.00
36	350.00	654.00
37	360.00	620.00

HEAT TRANSFER COEFF. ON HOT LAYER SIDE

Number of points used for heat transfer coeff input: 3

point #	time [s]	h2 [W/m ² -K]
1	.00	40.00
2	1000.00	40.00
3	1.00	40.00

EMISSIVITY OF HOT LAYER

Number of points used for emissivity input: 2

point #	time [s]	emissivity
1	.00	.90
2	1000.00	.90

NUMERICAL PARAMETERS

- 1.Maximum fractional error in soln= .000100
- 2.Size of time step [s]= 1.000
- 3.Maximum run time [s]= 250.00
- 4.Time interval for output [s]= 10.00

Utdata

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS

- 1.Thermal conductivity [W/mK]= .8000E+00
- 2.Thermal diffusivity [m²/s]= .3700E-06
- 3.Absorption length [m]= .1000E-02
- 4.Breaking stress [N/m²]= .4000E+08
- 5.Youngs modulus [N/m²]= .7500E+11
- 6.Linear coefficient of expansion [/deg C]= .8000E-05

GEOMETRY

- 1.Glass thickness [m]= .0024
- 2.Shading thickness [m]= .0250
- 3.Half-width [m]= .1400

COEFFICIENTS

- 1.Heat transfer coeff, unexposed [W/m²-K]= 10.00
- 2.Ambient temp, unexposed [K]= 294.0
- 3.Emissivity of glass = .84
- 4.Emissivity of ambient (unexposed) = 1.00

FLAME RADIATION

Number of points used for flux input: 2

point #	time [s]	flux [W/m ²]
1	.00	.00
2	1000.00	.00

GAS TEMPERATURE

Number of points used for temperature input: 37

point #	time [s]	temperature [K]
1	.00	297.00
2	10.00	330.00
3	20.00	391.00
4	30.00	458.00
5	40.00	512.00
6	50.00	545.00
7	60.00	561.00
8	70.00	584.00
9	80.00	604.00
10	90.00	620.00
11	100.00	633.00
12	110.00	649.00
13	120.00	657.00
14	130.00	663.00
15	140.00	666.00
16	150.00	673.00
17	160.00	678.00
18	170.00	685.00
19	180.00	686.00
20	190.00	690.00
21	200.00	705.00
22	210.00	722.00
23	220.00	738.00
24	230.00	766.00
25	240.00	778.00
26	250.00	796.00
27	260.00	805.00
28	270.00	812.00
29	280.00	816.00
30	290.00	805.00
31	300.00	766.00
32	310.00	726.00
33	320.00	745.00
34	330.00	703.00
35	340.00	663.00
36	350.00	654.00
37	360.00	620.00

HEAT TRANSFER COEFF. ON HOT LAYER SIDE

Number of points used for heat transfer coeff input: 3

point #	time [s]	h2 [W/m ² -K]
1	.00	40.00
2	1000.00	40.00
3	1.00	40.00

EMISSIVITY OF HOT LAYER

Number of points used for emissivity input: 2

point #	time [s]	emissivity
1	.00	.90
2	1000.00	.90

NUMERICAL PARAMETERS

1.Maximum fractional error in soln= .000100
 2.Size of time step [s]= 1.000
 3.Maximum run time [s]= 250.00
 4.Time interval for output [s]= 10.00

TEMPERATURE HISTORY

Time (s)	Exposed T(K)	Unexposed T(K)	Theta (Average)	Tau
.0	294.7	294.6	.000	.000
10.0	297.7	295.8	.023	.642
20.0	305.7	300.1	.110	1.285
30.0	319.7	309.3	.283	1.927
40.0	338.3	323.8	.533	2.569
50.0	359.1	341.9	.828	3.212
60.0	379.5	361.3	1.130	3.854
62.0	383.6	365.1	1.190	3.983

Window breaks at time = 62.00 [s]

tau = t/tc, tc = 15.6 s, Avg. theta = (Tav-Ti)/Tc, Tc = 66.7 K
 g = 1.179
 Avg. T init = 294.6 K, Avg. Delta T = 79.4 K, Avg. T break = 374.0 K

Utgångsberäkningar – 20×30 cm² hexanbrand

Indata

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS

1.Thermal conductivity [W/mK]= .8000E+00
 2.Thermal diffusivity [m²/s]= .3700E-06
 3.Absorption length [m]= .1000E-02
 4.Breaking stress [N/m²]= .4000E+08
 5.Youngs modulus [N/m²]= .7500E+11
 6.Linear coefficient of expansion [/deg C]= .8000E-05

GEOMETRY

1.Glass thickness [m]= .0024
 2.Shading thickness [m]= .0250
 3.Half-width [m]= .1400

COEFFICIENTS

1.Heat transfer coeff, unexposed [W/m²-K]= 10.00
 2.Ambient temp, unexposed [K]= 294.0
 3.Emissivity of glass = .84
 4.Emissivity of ambient (unexposed) = 1.00

FLAME RADIATION

Number of points used for flux input: 2

point #	time [s]	flux [W/m ²]
1	.00	.00
2	1000.00	.00

GAS TEMPERATURE

Number of points used for temperature input: 22

point #	time [s]	temperature [K]
1	.00	294.00
2	5.00	310.00
3	10.00	339.00
4	15.00	380.00
5	20.00	420.00
6	25.00	461.00
7	30.00	517.00
8	35.00	568.00
9	40.00	619.00
10	45.00	670.00
11	50.00	710.00
12	55.00	752.00
13	60.00	781.00
14	65.00	816.00
15	70.00	860.00
16	75.00	888.00
17	80.00	928.00
18	85.00	950.00
19	90.00	983.00
20	95.00	1005.00
21	100.00	1020.00
22	105.00	898.00

HEAT TRANSFER COEFF. ON HOT LAYER SIDE

Number of points used for heat transfer coeff input: 2

point #	time [s]	h2 [W/m ² -K]
1	.00	40.00
2	1000.00	40.00

EMISSIVITY OF HOT LAYER

Number of points used for emissivity input: 2

point #	time [s]	emissivity
1	.00	.90
2	1000.00	.90

NUMERICAL PARAMETERS

1.Maximum fractional error in soln= .000100
 2.Size of time step [s]= 1.000
 3.Maximum run time [s]= 250.00
 4.Time interval for output [s]= 10.00

Utdata

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS

1.Thermal conductivity [W/mK]= .8000E+00
 2.Thermal diffusivity [m²/s]= .3700E-06
 3.Absorption length [m]= .1000E-02
 4.Breaking stress [N/m²]= .4000E+08
 5.Youngs modulus [N/m²]= .7500E+11
 6.Linear coefficient of expansion [/deg C]= .8000E-05

GEOMETRY

1.Glass thickness [m]= .0024
 2.Shading thickness [m]= .0250
 3.Half-width [m]= .1400

COEFFICIENTS

1.Heat transfer coeff, unexposed [W/m²-K]= 10.00
 2.Ambient temp, unexposed [K]= 294.0
 3.Emissivity of glass = .84
 4.Emissivity of ambient (unexposed) = 1.00

FLAME RADIATION

Number of points used for flux input: 2

point #	time [s]	flux [W/m ²]
1	.00	.00
2	1000.00	.00

GAS TEMPERATURE

Number of points used for temperature input: 22

point #	time [s]	temperature [K]
1	.00	294.00
2	5.00	310.00
3	10.00	339.00
4	15.00	380.00
5	20.00	420.00
6	25.00	461.00
7	30.00	517.00
8	35.00	568.00
9	40.00	619.00
10	45.00	670.00
11	50.00	710.00
12	55.00	752.00
13	60.00	781.00
14	65.00	816.00
15	70.00	860.00
16	75.00	888.00
17	80.00	928.00
18	85.00	950.00
19	90.00	983.00
20	95.00	1005.00
21	100.00	1020.00
22	105.00	898.00

HEAT TRANSFER COEFF. ON HOT LAYER SIDE

Number of points used for heat transfer coeff input: 2

point #	time [s]	h2 [W/m ² -K]
1	.00	40.00
2	1000.00	40.00

EMISSIVITY OF HOT LAYER

Number of points used for emissivity input: 2

point #	time [s]	emissivity
1	.00	.90
2	1000.00	.90

NUMERICAL PARAMETERS

1. Maximum fractional error in soln= .000100
2. Size of time step [s]= 1.000
3. Maximum run time [s]= 250.00
4. Time interval for output [s]= 10.00

TEMPERATURE HISTORY

Time (s)	Exposed T(K)	Unexposed T(K)	Theta (Average)	Tau
.0	294.0	294.0	.000	.000
10.0	297.4	295.1	.025	.642
20.0	308.3	300.7	.140	1.285
30.0	328.0	313.2	.379	1.927
40.0	360.2	335.5	.789	2.569
47.0	390.8	358.1	1.190	3.019

Window breaks at time = 47.00 [s]

$\tau = t/t_c$, $t_c = 15.6$ s, Avg. theta = $(T_{av}-T_i)/T_c$, $T_c = 66.7$ K

$g = 1.179$

Avg. T init = 294.0 K, Avg. Delta T = 79.3 K, Avg. T break = 373.3 K