

# Värdering av brandspridningsrisker i tät trähusbebyggelse

*Nicklas Jansson*  
*Anton Wikensten*

---

Department of Fire Safety Engineering  
Lund University, Sweden

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet

Report 5482, Lund 2014



# **Värdering av brandspridningsrisker i tät trähusbebyggelse**

**Nicklas Jansson  
Anton Wikensten**

**Lund 2014**

Bedömning av brandspridning i tät trähusbebyggelse  
Assessment of fire hazards in an area densely-built and composed of wooden buildings

Nicklas Jansson  
Anton Wikensten

**Report 5482**  
**ISSN: 1402-3504**  
**ISRN: LUTVDG/TVBB--5482--SE**

Number of pages: 101  
Illustrations: 54

Keywords

Conflagration, fire spread, flying brands, consequence assessment, fire hazard, wooden buildings,

Sökord

Trähusbebyggelse, konflagrationsbrand, brandspridning, spridningsvägar, takgenombränning, fönsterflamma, flygbränder, konsekvensbedömning, checklista

Abstract

The purpose of this report was to examine if there was an easy way for the rescue services to get knowledge about the possible consequences regarding a fire in an area of densely-built wooden buildings. By following the method proposed in this report rescue services can get an understanding if their capacity to combat a fire in this type of area is sufficient. The method is originated in two pathways of fire spread and by dividing them into sub-models and using typical parameter values for the area type a resulting checklist was obtained. The method can be used to determine the time until fire spread for six typical configurations and how many houses that will be subjected to a radiation level higher than the critical radiation level for wood.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet,  
Lund 2014.

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund

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

## Förord

Rapporten har tagits fram i samarbete med Bohus Räddningstjänstförbund. Vi hoppas att de kommer att ha användning av rapporten och den framtagna metoden.

Författarna av rapporten vill tacka de personer som på olika sätt hjälpt oss under arbetets gång:

Stefan Svensson                      Universitetslektor vid Avdelningen för Brandteknik och Riskhantering.  
Tack för handledning och stöd under arbetets gång.

Anders Finn                              Brandingenjör på Bohus Räddningstjänstförbund. Tack för handledning  
och stöd under arbetets gång.

Johan Wendt                            Brandingenjör på Räddningstjänsten Storgöteborg. Tack för svar och  
information om hur ni arbetar i dessa frågor.

Carl-Gösta Hermansson              Insatsledare på Bohus Räddningstjänstförbund. Tack för allt du lärt oss  
om hur det operativa arbetet går till.

Vi vill även rikta ett stort tack till personalen på Bohus räddningstjänstförbund och särskilt på Marstrands brandstation. Tack för att ni tillhandahöll ett roligt och givande projekt samt en inspirerande arbetsmiljö.



## Summary

In areas composing of densely-built wooden buildings fire spread to surrounding buildings can occur quickly. The necessary prerequisites for a local fire to evolve into a conflagration are also in place. In light of this there is reason to examine what kind of capacity the rescue services need to combat a fire in this sort of area. The purpose of this report is to examine if there is an easy way for the rescue services to judge what kind of consequences might occur in a densely-build area of wooden buildings. Knowledge of the possible consequences is a step in judging what kind of capacity is needed, hence two research questions are chosen. How fast can a fire spread from a building to another close by and how extensive can a fire become.

A fire can spread between buildings in many ways but the most relevant pathways to examine are spread due to radiation of window flames and radiation due to the roof becoming involved in the fire. Both of these pathways are expected to be in combination with flying brands. Fire spread due to radiation can be divided into three sub-models that handle the radiation intensity, configuration and ignition.

The time until ignition has occurred in the adjacent building is the main parameter to investigate in the early stages of a fire. The pathway of fire spread that's expected to occur first is radiation due to window flames from the room where the fire starts. By using a temperature curve and calculate the configuration factor the incident radiation in the adjacent facade can be obtained for every time-step. The incident radiation can then be used to model the temperature rise of the material in that facade and when it exceeds the ignition temperature the fire has spread.

The risk for a conflagration is most potent in the stage when the roof is involved in the fire. Flames from a fire of this magnitude can be large and generate a lot of radiation. By assuming what temperature the flames have and calculating the configuration factor the incident radiation can be calculated at varying distances. To get to grips with the problem the distance where the incident radiation exceeds the critical radiation level of wood is calculated for this pathway.

An approach suitable for the rescue services is proposed in this report and it consists of doing an inventory of the buildings in the area by using a checklist. The checklist is based on calculations made using the three sub-models and the benefit gained by using it is that the person performing the building inventory does not have to do a lot of calculations for every building. An assessment can be made by identifying the cases contained in the checklist. A method of handling the cases not covered by the checklist is also proposed.

The conclusion of the report is that it is possible for the rescue services to assess the consequences of a fire in a densely-built area consisting of wooden buildings. The result can also be presented in a suitable manner both for use within the organization and to external policy makers.

## Sammanfattning

I tät trähusbebyggelse kan en uppkommen brand snabbt sprida sig till intilliggande byggnader. Det finns även förutsättningar för att branden skall utvecklas till en konflagrationsbrand, det vill säga en brand som är utom kontroll och involverar en stor del av en bebyggelse. Med denna bakgrund finns det anledning att undersöka hur väl räddningstjänstens kapacitet räcker till att hantera en uppkommen brand i tät trähusbebyggelse. Detta arbete syftar till att undersöka möjligheten för räddningstjänsten att på ett enkelt sätt skapa sig en bild av konsekvensen av en uppkommen brand. En bild av konsekvensen ger ett underlag för räddningstjänsten att väga sin kapacitet mot. Med dessa utgångspunkter finns två frågeställningar som anses vara relevanta att besvara. Dels hur snabbt en uppkommen brand kan sprida sig från en byggnad till en intilliggande samt hur omfattande den kan komma att bli.

Ur litteraturen framgår att de spridningsvägar som är särskilt relevanta att undersöka vidare är spridning via strålning från fönster och strålning från flammor vid takgenombränning, båda i kombination med flygbränder. För de spridningsvägar som berör stålning kan beräkningen av brandspridning delas upp i tre undermodeller som beskriver den strålande källans intensitet, hur stor del av strålningen som når en punkt, samt antändningskriterier för det material som nås av strålningen.

Tid till antändning anses vara av störst betydelse i ett tidigt skede av förloppet. Den spridningsväg som förväntas uppkomma tidigast är strålning via fönster från det rum där branden uppkommer och tid till antändning beräknas därför för denna spridningsväg. Genom att ansätta en temperaturkurva i ett rum och beräkna konfigurationsfaktorn kan den infallande strålningen till en intilliggande fasad beräknas i varje tidssteg. Den infallande strålningen genererar sedan en uppvärmning av materialet i den intilliggande fasaden. Genom att beräkna temperaturen i materialet för varje tidssteg kan också tiden till att antändningstemperaturen nås beräknas. Antändningstemperaturen som ansätts är den med närvaro av pilotlåga vilken anses svara väl mot de förhållanden som råder, detta på grund av flygbränderna.

Risken för en konflagrationsbrand är särskilt påtaglig i det skede då takgenombränning har skett då dessa flammor kan bli stora och därmed generera en hög strålningsnivå på längre avstånd. Avståndet där en kritisk strålningsnivå kan uppkomma beräknas därför för denna spridningsväg. Genom att anta en temperatur och beräkna konfigurationsfaktorn kan infallande strålning på varierande avstånd beräknas. Därmed kan också det avstånd där en kritisk strålningsnivå uppkommer beräknas.

För att räddningstjänsten på ett enkelt sätt ska kunna bedöma konsekvensen föreslås i arbetet ett tillvägagångssätt där underlag inhämtas vid en inventering utifrån en checklista. Principen bakom checklisten är att den som gör bedömningen ska slippa genomföra alla beräkningssteg för varje enskild byggnad. En bedömning kan istället genomföras genom att identifiera olika fall och sedan avläsa tid eller omfattning i en tabell. Önskvärt hade varit att i tabellen omfatta alla konfigurationer som kan uppkomma men eftersom detta inte är möjligt omfattas tabellen av ett antal typfall. Om konfigurationen inte omfattas av ett typfall får en beräkning genomföras. I arbetet föreslås därför även en metod som kan användas som stöd för dessa beräkningar. Slutsatsen är att det på ett förhållandevis enkelt sätt går att få en uppfattning av konsekvenserna av en brand inom ett visst område och presentera resultatet visuellt på ett sätt som både är lämpligt att för beslutsfattare inom kommunen och som går att använda inom den egna organisationen.



# Innehåll

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Inledning.....                         | 1  |
| 1.1   | Bakgrund.....                          | 1  |
| 1.2   | Syfte.....                             | 2  |
| 1.3   | Mål.....                               | 2  |
| 1.4   | Problemformulering.....                | 2  |
| 1.5   | Metod.....                             | 2  |
| 1.5.1 | Initieringsfas.....                    | 2  |
| 1.5.2 | Platsbesök.....                        | 2  |
| 1.5.3 | Informationssök.....                   | 3  |
| 1.5.4 | Metodutveckling.....                   | 3  |
| 1.5.5 | Utvärdering.....                       | 3  |
| 2     | Tät trähusbebyggelse.....              | 4  |
| 2.1   | Tät trähusbebyggelse i historien.....  | 4  |
| 2.2   | Bränder.....                           | 4  |
| 2.3   | Platsbesök.....                        | 5  |
| 3     | Riskhantering.....                     | 6  |
| 3.1   | Riskhanteringsprocessen.....           | 6  |
| 3.1.1 | Utgångspunkter.....                    | 7  |
| 3.1.2 | Riskbedömning.....                     | 7  |
| 3.1.3 | Sårbarhetsbedömning.....               | 8  |
| 3.1.4 | Resultat och slutsatser.....           | 8  |
| 3.1.5 | Riskbehandling.....                    | 8  |
| 3.2   | Analysverktygets roll i processen..... | 9  |
| 4     | Brandspridning.....                    | 10 |
| 4.1   | Värmeöverföring.....                   | 10 |
| 4.1.1 | Konduktion.....                        | 10 |
| 4.1.2 | Konvektion.....                        | 10 |
| 4.1.3 | Värmestrålning.....                    | 10 |
| 4.2   | Brandförlopp i ett rum.....            | 11 |
| 4.2.1 | Antändning.....                        | 12 |
| 4.2.2 | Tidigt brandförlopp.....               | 12 |
| 4.2.3 | Övertändning.....                      | 13 |
| 4.2.4 | Fullt utvecklad rumsbrand.....         | 13 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.2.5 | Avsvlaningsfas .....   | 13 |
| 4.3   | Brandspridning inom byggnad.....                                   | 14 |
| 4.4   | Brandspridning till annan byggnad .....                            | 14 |
| 4.4.1 | Spridningsvägar .....  | 14 |
| 4.4.2 | Dimensionerande spridningsvägar .....                              | 16 |
| 5     | Utgångspunkter för metoden .....                                   | 17 |
| 5.1   | Spridningsvägar.....   | 17 |
| 5.2   | Önskvärt resultat.....   | 17 |
| 5.3   | Önskvärd presentation av resultatet.....                           | 18 |
| 5.4   | Utförande.....   | 18 |
| 6     | Beräkningsmodeller.....  | 19 |
| 6.1   | Strålände källans intensitet.....                                  | 19 |
| 6.1.1 | Fritt brinnande flamma.....  | 19 |
| 6.1.2 | Temperatur i brandrummet.....                                      | 23 |
| 6.1.3 | Emissivitet.....   | 30 |
| 6.2   | Konfigurationsfaktor.....  | 31 |
| 6.3   | Antändning.....  | 33 |
| 6.3.1 | Antändningskriterier för trä.....                                  | 33 |
| 6.3.2 | Tid till antändning av trä.....                                    | 34 |
| 6.3.3 | Kriterier för fönsterbrott .....                                   | 35 |
| 6.3.4 | Tid till fönsterbrott.....   | 36 |
| 7     | Beräkning av brandspridning .....                                  | 37 |
| 7.1   | Spridning via fönster.....   | 37 |
| 7.1.1 | Strålände källans intensitet.....                                  | 37 |
| 7.1.2 | Konfigurationsfaktor .....   | 41 |
| 7.1.3 | Antändning.....  | 52 |
| 7.2   | Spridning via takgenombränning.....                                | 53 |
| 7.2.1 | Strålände källans intensitet.....                                  | 53 |
| 7.2.2 | Konfigurationsfaktor .....   | 53 |
| 7.2.3 | Antändning.....  | 59 |
| 7.3   | Flygbränder.....   | 59 |
| 8     | Samlat resultat utifrån undermodellerna.....                       | 60 |
| 8.1   | Tid till antändning via spridning genom fönster.....               | 60 |
| 8.2   | Avstånd där kritisk strålning uppkommer vid takgenombränning ..... | 62 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 9      | Underlag för checklisten.....  | 64 |
| 9.1    | Spridning via fönster.....   | 64 |
| 9.1.1  | Typfall .....  | 64 |
| 9.1.2  | Arbetsätt för konfigurationer som inte kan beskrivas med lösta typfall ..... | 68 |
| 9.2    | Takgenombränning.....  | 70 |
| 10     | hecklistans utformning .....   | 71 |
| 10.1   | Checklista .....   | 71 |
| 10.2   | Anteckningsstöd för konfigurationer som inte täcks in av typfall .....       | 72 |
| 11     | Presentation av resultat .....   | 73 |
| 11.1   | Kartbild.....  | 73 |
| 11.2   | Brandspridningsprofil .....  | 78 |
| 12     | Känslighetsanalys.....   | 79 |
| 12.1   | Antändningskriterier glas.....   | 79 |
| 12.2   | Avstånd från fönster.....  | 80 |
| 12.3   | Fönsterflammar .....   | 80 |
| 12.4   | Spridning via takgenombränning.....  | 81 |
| 13     | Diskussion .....   | 83 |
| 13.1   | Val av modeller och modellosäkerheter.....                                   | 83 |
| 13.1.1 | Brandrumstemperatur .....  | 83 |
| 13.1.2 | Osäkerheter antändnings modellering.....                                     | 83 |
| 13.1.3 | Fönsterflammar .....   | 84 |
| 13.1.4 | Vind .....   | 84 |
| 13.2   | Resultat.....  | 84 |
| 13.3   | Användarvänlighet .....  | 85 |
| 13.4   | Strålningsberäkningar.....   | 86 |
| 13.5   | Genomförande.....  | 87 |
| 14     | Slutsatser .....   | 89 |
| 15     | Fortsatt arbete.....   | 90 |
| 16     | Referenser.....  | 91 |
| 17     | Bilaga A .....   | 93 |

# 1 Inledning

*Följande avsnitt innehåller beskrivning av arbetets bakgrund, syfte, mål, problemformulering och metod.*

## 1.1 Bakgrund

Förutsättningarna som råder i tät trähusbebyggelse gör att en uppkommen brand kan sprida sig snabbt och bli omfattande. Genom åren har ett antal större kvarters- och stadsbränder uppkommit i nämnd bebyggelse. I områden som har bevarats står trähusen fortfarande lika tätt vilket gör att risken för bränder av sådan dignitet fortfarande finns kvar.

För att leva upp till modern byggstandard är det inte ovanligt att husen i äldre trähusbebyggelse har genomgått olika typer av renoveringar. Renovering sker efter gällande byggnormer men eftersom byggnormerna hela tiden utvecklas är det svårt att ge en samlad bild över byggstandarden inom ett område. Byggstandarden är nära kopplad till brandskyddet i en byggnad. Eftersom byggstandarden kan uppvisa stor variation blir ytterligare en följd att det kan vara svårt att få en uppfattning av brandskyddet i äldre bebyggelse. Ur det större perspektivet är det också svårt att få en uppfattning av vad som händer i ett område med äldre trähusbebyggelse om en brand uppkommer, i jämförelse med ett nyare och kanske mer homogent område med avseende brandskydd. Svårigheten att förutsäga vad som händer vid en uppkommen brand komplicerar också räddningstjänstens uppgift när det kommer till resursplanering då det inte finns något underlag att väga dessa mot.

Olika metoder och arbetssätt har utvecklats i syfte att klargöra riskbilden över ett större område. Somliga där fokus ligger på objektivitet och effektivitet. Dessa metoder lämpar sig väl för större system men en nackdel kan vara att de förenklingar som görs för att uppnå ett effektivt arbetssätt, medför att resultatet baseras på grunder som inte stämmer överens med verkliga förhållanden. Andra metoder lägger istället fokus på noggrannhet. Nackdelen är då istället att arbetssättet är mer tidskrävande och kräver en mer djupgående brandteknisk kompetens. Befintliga metoder besvarar frågan hur brandtekniskt kritiska parametrar förhåller sig till varandra inom ett område och ur resultatet kan utläsas hur byggnader förhåller sig till varandra. Det går att göra en bedömning av vilka byggnader som har den största risken för brand. Emellertid kan det dock vara svårt att tolka och förhålla sig till detta resultat. Ett sätt att utveckla den här typen av arbetssätt är att utöver ett riskvärde också koppla resultatet till något mer konkret med en naturligare koppling till räddningstjänstens organisation.

Som det ser ut i dagsläget har räddningstjänsten en god bild av sina resurser och sin kapacitet i nom en kommun. Vetskap om denna kapacitet är en god grund att stå på men i tät trähusbebyggelse kan det dock vara svårt att bedöma konsekvensen för att väga kapaciteten mot. En bedömning av konsekvensen vid en brand kan användas inom det förebyggande arbetet som ett underlag för att fokusera de förebyggande insatserna dit de är mest effektiva. I det operativa arbetet är det också ett viktigt underlag för att kunna förutse magnituden av en brand, då denna vetskap kan vara betydande vid resursplanering över tid och vilka krav som kan ställas på till exempel släckvattenförsörjning, manskap och utrustning.

## 1.2 Syfte

Det här arbetet skrivs i syfte att utreda möjligheten att på ett enkelt sätt få en uppfattning av risken för brandspridning mellan tätt stående trähus, sett över ett större område. Arbetet genomförs med utgångspunkt i räddningstjänstens organisation och arbetets slutprodukt syftar till att vidare kunna användas för att ta fram ett underlag för räddningstjänsten att arbeta med vid resursplanering för såväl operativ som förebyggande verksamhet.

## 1.3 Mål

Målet med arbetet är att framställa en metod enligt vilken räddningstjänsten kan arbeta för att skapa sig en mer djupgående uppfattning av konsekvensen av en uppkommen brand i tät trähusbebyggelse. Målet är att utforma en metod som är användarvänlig utan att inskränka på dess ackuratess. Vidare är målet att resultatet av metoden på ett lämpligt sätt kan presenteras så att det kan kommuniceras inom räddningstjänstens egen organisation, andra myndigheter, aktörer och beslutsfattare, samt till samhällets invånare.

## 1.4 Problemformulering

Hur ska räddningstjänsten gå tillväga för att på ett förhållandevis enkelt sätt få en uppfattning av hur fort brandspridning kan ske och hur omfattande en brand kan bli inom ett område med tät trähusbebyggelse?

Hur kan detta resultat sedan presenteras på ett lämpligt sätt så att beslutsfattare inom kommunen kan ta till sig informationen, samt att räddningstjänsten själva har nytta av det vid insats- och resursplanering?

## 1.5 Metod

Examensarbetet skrivs i problemlösande syfte och nedan presenteras de olika faser som arbetet genomgår för att lösa problemet.

### 1.5.1 Initieringsfas

Arbetet inleddes med en initieringsfas. I initieringsfasen definierades arbetets utgångspunkter och avgränsningar, efter samråd med extern handledare. Ur detta formulerades arbetets syfte, mål och problemformulering för att ge arbetet en tydlig förhållningslinje. Under initieringsfasen formulerades även strategier och tidsplan för att skapa ett strukturerat arbetssätt. Dessa delar sammanställdes sedan i ett måldokument som godkändes av handledare samt extern handledare. Detta för att säkerställa att ovan nämnda utgångspunkter är relevanta och genomförbara inom ramen för ett examensarbete.

### 1.5.2 Platsbesök

Efter initieringsfasen påbörjades genomförandet av examensarbetet. Platsbesök genomfördes på ön Marstrand, Kungälv kommun, Västra Götalands län. Detta för att ge författarna en verklighetsförankrad uppfattning av hur det kan se ut i tät trähusbebyggelsemiljö, samt få en bättre förståelse för de problem som arbetet ämnar att lösa. På platsbesöket gavs även möjlighet att samla information som ansågs vara relevant för det fortsatta arbetet.

### 1.5.3 Informationssök

Efter platsbesöket genomfördes en informationssökning i syfte att få ett brett underlag att utgå från i det fortsatta arbetet. Under informationssökningen undersöktes vilka teorier, modeller och övrig information som finns kopplade till problematiken. Följande informationskällor genomsöktes:

- Studentlitteratur från tidigare kurser
- Handböcker
- Forskningsrapporter
- Artiklar publicerade i vetenskapliga tidskrifter
- Tidigare examensarbeten
- Utredningar av tidigare inträffade bränder

### 1.5.4 Metodutveckling

Efter platsbesök och informationssökning selekterades informationen varefter delar av den undersöktes djupare. Utifrån informationen identifierades modeller som beskriver brandspridning i tät trähusbebyggelse. Vid framställande av metoden genomfördes strålningsberäkningar utifrån vilka olika parametrars påverkan på resulterande strålning, kunde utvärderas. Efter beräkningar kategoriserades parametrarna och gav kriterierna till en checklista.

### 1.5.5 Utvärdering

Målet med examensarbetet var att presentera ett arbetssätt för räddningstjänsten att arbeta enligt för att på ett systematiskt sätt kunna identifiera, värdera och hantera brandscenarier som kan uppkomma i tät trähusbebyggelsemiljö samt dess egen förmåga att hantera dessa scenarier. Några utgångspunkter för utvärderingen var hur vida arbetssättet svarar mot examensarbetets syfte, mål och problemformulering. Utöver detta utvärderades även arbetssättets användarvänlighet, dess ackuratess samt hur informationen som erhöles efter genomfört arbetssätt, ska tolkas och kan användas vidare i riskhanteringsprocessen.

## 2 Tät trähusbebyggelse

I detta kapitel ges en övergripande bild över en tät trähusbebyggelse.

### 2.1 Tät trähusbebyggelse i historien

Byggnader uppförda i trä har genom århundradena alltid funnits i de svenska städerna. Detta i olika utsträckning, utformning och utseende. Vanligt i äldre bebyggelser är att byggnaderna ligger nära gatan med en ingång till byggnaden som vetter in mot gården (Björk, et al., 1992). Gaturummet återspeglar tidens medel av transport och normer för samhällsplanering. Medeltidsstadens gaturum var dimensionerat för gång- och hästtrafik vilket gav upphov till smala gator (Björk, et al., 2000). I och med att det blev vanligare med andra former av transport så som vagns- och biltrafik ökade storleken på gatorna. Typiskt för den tidens gaturum var att byggnaderna uppfördes i en till två våningar. Gatubredder då biltrafik började bli vanligt var omkring 18 meter, under denna tid började fler åtgärder införas med avseende brandrisker. Det kunde vara saker som större esplanader med planterade träd och buskage som syftade till att hindra en brand från att sprida sig över den breda gatan (Björk, et al., 2000). Det blev även vanligare att då införa brandmurar mellan de sammanbyggda fastigheterna. På 1930-40 talet blev det vanligare att nyuppförda hus hade en grönyta mellan trottoar och fasad. På 1960-1970 talet blev det vanligare med en helt separerad cykel- och gångtrafik från körfältet för bilar och gaturummet blev betydligt mer svärdefinierat. Från 1980 och framåt har det återigen blivit vanligare med sluta gaturum (Björk, et al., 2000).

### 2.2 Bränder

Det finns många städer både i Sverige och internationellt som har gen omgått svåra stadsbränder. Från 1700-talet och framåt finns det trovärdiga skildringar av de olika bränderna. Det torde finnas lärdomar att dra av dessa bränder då mycket av dagens täta trähusbebyggelse är byggt i tidigare århundrade än vårt. Ett problem är dock att trots liknande byggnadsår så har användningsområdet av byggnaderna förändrats, det finns inte längre djurstall med tillhörande halm, uthus och skjul i samma utsträckning (Strömdahl, 1970). En avsaknad av effektiva släckningsväsende var även gällande (Strömdahl, 1970). För att ge en fingervisning av omfattningen av ett antal stadsbränder så hänvisas den intresserade läsaren till boken Svenska stadsbränder (1927) utgiven av Svenska brandskyddsföreningen. I vilken ett antal händelseförlopp över stadsbränder beskrivs samt sammanställs vilket presenteras i Tabell 1, nedan;

| År   | Ort          | Antal förstörda fastigheter | År   | Ort          | Antal förstörda fastigheter |
|------|--------------|-----------------------------|------|--------------|-----------------------------|
| 1823 | Norrköping   | -                           | 1869 | Lindesberg   | 27                          |
| 1827 | Borås        | -                           | 1870 | Båstad       | 60                          |
| 1834 | Vänersborg   | 83                          | 1871 | Strängnäs    | 80                          |
| 1835 | Söderhamn    | 23                          | 1871 | Uddevalla    | 28                          |
| 1838 | Växjö        | 60                          | 1876 | Söderhamn    | 177                         |
| 1843 | Växjö        | 88                          | 1876 | Strömstad    | 70                          |
| 1845 | Halmstad     | 16                          | 1877 | Sundsvall    | 23                          |
| 1846 | Åmål         | 38                          | 1878 | Hudiksvall   | 35                          |
| 1846 | Kungsbacka   | 49                          | 1880 | Sala         | 45                          |
| 1847 | Kristianstad | 36                          | 1887 | Luleå        | 75                          |
| 1849 | Hedemora     | 25                          | 1888 | Sundsvall    | 400                         |
| 1849 | Lidköping    | 43                          | 1888 | Umeå         | -                           |
| 1854 | Örebro       | 62                          | 1889 | Köping       | 49                          |
| 1863 | Varberg      | 91                          | 1893 | Kristinehamn | 52                          |
| 1864 | Ronneby      | 145                         | 1895 | Mariestad    | 34                          |
| 1865 | Karlstad     | 164                         | 1901 | Åmål         | 53                          |
| 1869 | Gävle        | 530                         | 1920 | Strömstad    | 35                          |

Tabell 1. Sammanställning över historiska stadsbränder

Stads- och kvartersbränder kan liknas med begreppet konflagrationsbrand. Detta begrepp karakteriseras av att en brand är utom kontroll och involverar en stor del av en stad, bebyggelse eller område (Burnett & Galbreath, 1962). Internationellt sett tenderar den största anledningen till denna sorts bränder vara en kombination av att takbeklädnader till stor del bestod av material med ofördelaktiga brandtekniska egenskaper så som hög antändlighet och snabb flamspridning. Andra förutsättningar som har en negativ inverkan på förloppet är ifall en uppkommen brand har föregåtts av ett flertal dagar med låg relativ fuktighet. Vind tenderar även att ha en negativ inverkan (Ondrus, 1988).

I Sverige finns det ett antal kvartersbränder som på senare år har varit nära att utvecklas till större stadsbränder ifall inte ett snabbt och effektivt ingripande från räddningsväsende hade genomförts. Ett sådant exempel är branden i kvarteret Arkadien som finns beläget i de centrala delarna av Jönköping. Kvarteret Arkadien består av mestadels träbyggnader uppförda i två våningsplan, med ursprung från sent 1600-tal. Genom århundradens lopp har dessa byggts om och rivits i omgångar. Söndagen den 11 februari 2001 larmades räddningstjänsten till denna brand, totalt omfattades ungefär halva kvarteret av branden. Räddningsstyrkan som involverades var totalt cirka 150 personer och totalt användes ca 2000 kubikmeter släckvatten (Räddningsverket, 2001).

I modern tid har omfattande bränder uppkommit, då bland annat i Norge som drabbades tidigt 2014. Den 18-28 januari utspelades där två separata omfattande bränder, där den första branden uppkom i ett bostadshus i kommunen Laerdal. För att sedan sprida sig till 40 hus varav 17 bostäder. Den andra uppkom den 27 januari på halvön Sørneset i kommunen Flatanger. Gnistbildning från en elledning antände en underliggande gräsyta varvid branden spred sig över halvön till totalt 64 byggnader varav 23 bostäder. I utredningar utpekades starka vindar på mellan 20-28 m/s som den huvudsakliga bakomliggande förutsättningen för en snabb brandspridning (DSB, 2014).

### **2.3 Platsbesök**

För att erhålla en bild av hur en tät trähusbebyggelse kan se ut och för att erhålla en djupare förståelse för problematiken genomfördes ett antal platsbesök. Dessa platsbesök genomfördes på ön Marstrand, Kungälv kommun och i formen av inventeringsbesök. Öns bebyggelse består mestadels av villor med träfasad, sammanbyggda huslängor med en stomme i trä, ett fåtal fristående flerfamiljehus samt hotell och vandrarhem. Som på många öar i skärgården står byggnaderna tätt. Det finns ett flertal byggnader byggda under 1700- och 1800-talet, ett antal av byggnaderna är kulturminnesmärkta. Det finns alltså ett kulturvärde att bevara. Genom åren har ett antal större kvarters- och stadsbränder uppkommit.

Förfarandet vid inventeringarna utgick från en multikriterieanalysmetod. Metoden kallas Brandskyddsvärdering kulturbebyggelse, BSV-K och syftar till att ge en generell bild av brandskyddet hos en byggnad. Detta genom att slå samman värden från 16 olika byggnadstekniska parametrar graderade på en skala mellan 1 till 5. Dessa slås sedan samman och ett indexvärde erhålls för byggnaden. Utöver de 16 parametrarna inventerades ytterligare ett antal parametrar som ansågs viktiga, däribland takhöjd, fönsterkonfigurationer, mängd fönster och taktäckningsmaterial på närliggande byggnader. Den intresserade läsaren hänvisas till publikationen utgiven av Räddningsverket (Wikberg & Johansson, 2007).



### 3 Riskhantering

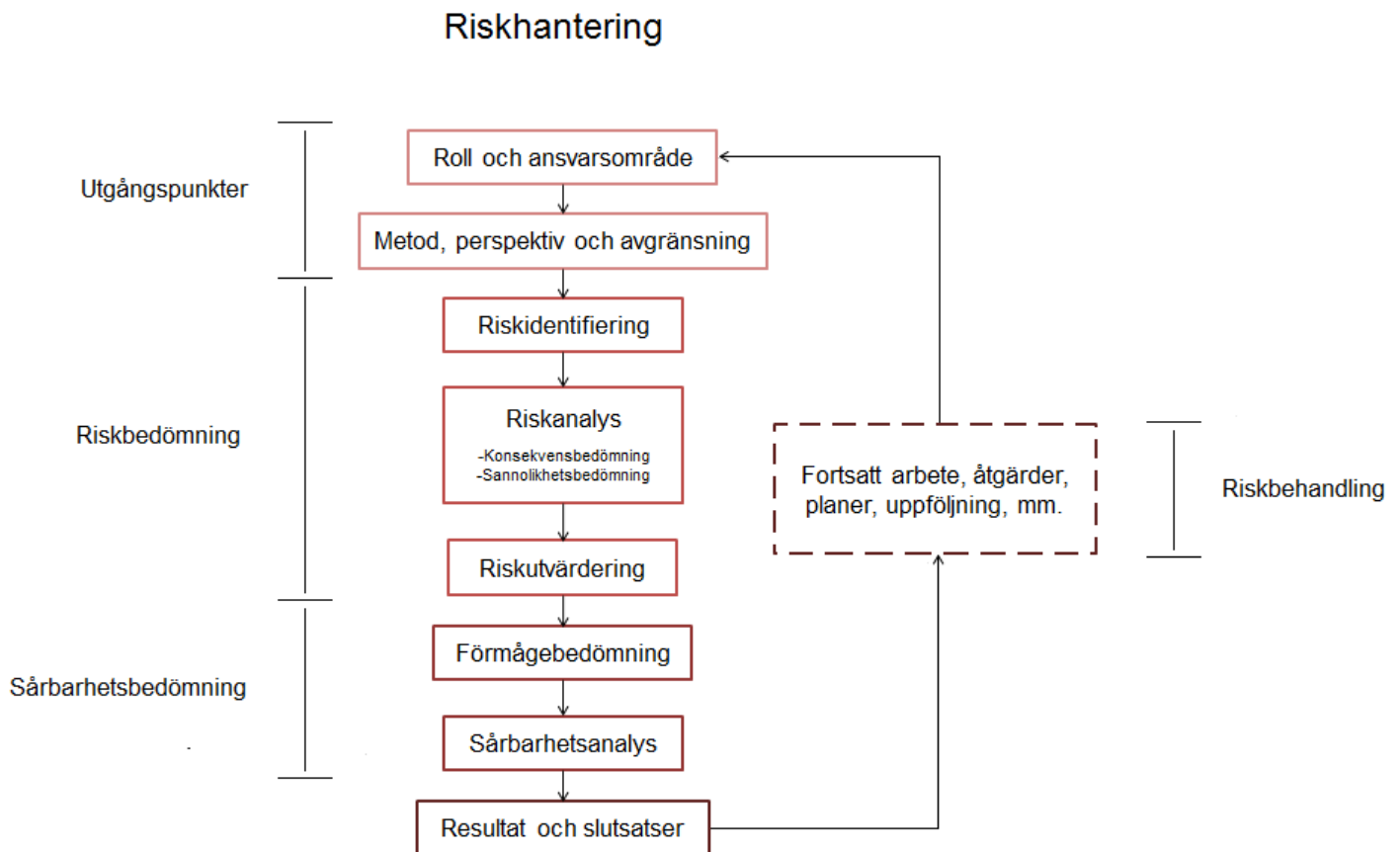
I föregående kapitel gavs en djupare inblick i tät trähusbebyggelsemiljö. I detta kapitel beskrivs övergripande riskhanteringsprocessen och vidare vilken roll ett analysverktyg kan spela i hantering av brandrisker i tät trähusbebyggelse.

#### 3.1 Riskhanteringsprocessen

Riskhanteringsprocessen är en kontinuerligt pågående process och innefattas av en rad olika delmoment. Riskhanteringsprocessens delmoment bestäms till stor del av vilken systemavgränsning som görs och vilket syfte den fyller. Riskhantering kan genomföras i en mängd olika syften och avse olika risktyper. Detta arbete genomförs med utgångspunkt i räddningstjänstens organisation och enligt rapporten Vägledning för risk- och sårbarhetsanalyser (MSB, 2011) kan syftet med risk- och sårbarhetsanalyserna sammanfattas enligt följande punkter:

- ”Ge beslutsunderlag för beslutsfattare och verksamhetsansvariga
- Ett underlag för information om samhällets risker till allmänheten
- Ge underlag för samhällsplaneringen
- Bidra till att ge en riskbild för hela samhället”

I Figur 1 presenteras en schematisk bild över riskhanteringsprocessens olika moment och deras sammanhang, fritt tolkat från Vägledning för risk- och sårbarhetsanalyser. (MSB, 2011)



Figur 1. Flödesschema för riskhanteringsprocessen

### 3.1.1 Utgångspunkter

Utgångspunkter är en initierande fas i riskhanteringsprocessen och utgångspunkterna sätter ramarna för risk- och sårbarhetsanalysens fortsatta arbete. Det finns en poäng i att se vilket syfte risk- och sårbarhetsanalysen fyller i ett större sammanhang. Olika typer av risker inom ett system är ofta kopplade till varandra och det kan finnas effektivitetsmässiga fördelar i att beakta detta under arbetets gång (MSB, 2011). I utgångspunkter beskrivs vilken roll och vilket ansvarsområde som den utövande myndigheten eller aktören har. Detta så att andra myndigheter eller aktörer inom samma system men som hanterar andra typer av risker kan bedöma hur de kan ha nytta av risk- och sårbarhetsanalysen.

I denna fas av riskhanteringsprocessen beskrivs också vilken metod som används, vilka avgränsningar som görs, vilket perspektiv analysen har samt vilka värderingar den utgår från. Vidare i analysarbetet är detta relevant då dessa ligger till grund för bedömning av hur allvarligt ett scenario är och vilka konsekvenser som ska beaktas (MSB, 2011).

### 3.1.2 Riskbedömning

Efter att utgångspunkterna för analysen är fastställda genomförs riskbedömningen. Denna fas inleds med en riskidentifiering. Det finns olika tillvägagångssätt för att genomföra riskidentifieringen, vilka lämpar sig olika väl beroende på vilka utgångspunkter analysen har. Gemensamt för metoderna är dock att de syftar till att på ett systematiskt sätt identifiera potentiella risker i systemet.

Begreppet risk förekommer i många olika sammanhang. I olika sammanhang kan också betydelsen av risk variera. Då det inte finns någon entydig definition är det viktigt att klargöra innebörden av risk i sammanhanget. I tekniska sammanhang förekommer ofta definitionen av risk så som svaret på nedanstående frågor (Kaplan, 1997) (Kaplan & Garrick, 1981). En riskanalys på kommunal nivå behöver åtminstone besvara dessa frågor för att tillgodose syftet att riskanalysen ska bidra till en riskbild över hela samhället (Abrahamsson & Tehler, 2013):

- Vad kan hända?
- Hur stor är sannolikheten?
- Vad blir konsekvensen?

Riskanalysen syftar till att ge en djupare analys av de identifierade riskscenarierna. Då riskidentifieringen ämnar att besvara vilka risker som finns i systemet besvarar de också delvis frågan om vad som kan hända. För att besvara frågan om hur sannolikt det är att ett scenario inträffar finns ett antal tillvägagångssätt och vilket som lämpar sig bäst beror på vilket dataunderlag som finns tillgängligt. Om det finns ett brett empiriskt underlag som motsvarar den risken som undersöks är det ur statistisk synvinkel det mest ideala att använda som underlag vid skattning av sannolikheten (Mattsson, 2000). Om det inte finns ett brett empiriskt underlag kan istället sannolikheten skattas genom att beskriva en risk med logiska modeller vars ingående komponenter kan skattas empiriskt. Om det varken finns ett tillräckligt empiriskt underlag eller modeller som beskriver problematiken kan en skattning ske utifrån subjektiva expertbedömningar (Mattsson, 2000).

Även för att besvara frågan om vad konsekvenserna blir vid ett inträffat scenario behöver utgångspunkterna för analysen beaktas. Både vilket perspektiv analysen har och de värderingar som ligger till grund för analysen avgör vilken enhet konsekvensen lämpligen mäts i.

Skattningen för såväl sannolikheten, som konsekvensen kan beskrivas kvalitativt eller kvantitativt. En kvalitativ beskrivning av skattningen innebär att det presenteras i ordalag. Dock kan en kvalitativ beskrivning uppfattas olika eftersom ord kan uppfattas olika av olika personer (Mattsson, 2000). I en kvantitativ beskrivning presenteras den istället i siffror vilket kan reducera risken för missförstånd.

Nästa del i riskbedömningen är riskutvärderingen. I riskutvärderingen utvärderas om risknivån är acceptabel eller inte. Riskutvärderingen innefattar även utvärdering av förslag på riskreducerande åtgärder, vilkas påverkan på risken ska framgå. Detta då ett syfte med risk- och sårbarhetsanalysen är att den ska fungera som ett beslutsunderlag, vilket är lättare att ta ställning till med konkreta åtgärdsförslag.

### 3.1.3 Sårbarhetsbedömning

Utifrån riskbedömningen skall också en sårbarhetsbedömning utföras. Uppkomsten av ett visst scenario kan bero på otaligt antal anledningar. Därav är det svårt att inkludera alla i en riskbedömning. En sårbarhetsbedömning syftar istället till att besvara vad som händer med systemet givet en viss påfrestning. Skillnaden är alltså att en riskanalys utgår från att systemet är i ett normalt tillstånd medan en sårbarhetsanalys istället utgår från att tillståndet i systemet avviker från det normala, det är utsatt för en påfrestning (Johansson & Jönsson, 2007). Även om ett scenario bedöms vara ovanligt är det av värde att analysera hur väl det kan hanteras om det uppkommer. Analogt med riskanalysen så syftar sårbarhetsanalysen till att skapa en djupare förståelse för de sårbarheter som finns inom systemet för att ta fram underlag för beslut om vidare hantering av sårbarheter. I sårbarhetsbedömningen ingår en förmågebedömning där en utvärdering sker av systemets egen förmåga att hantera ett scenario, samt vilken tolerans systemet har för en påfrestning (MSB, 2011).

### 3.1.4 Resultat och slutsatser

Efter risk- och sårbarhetsanalysens genomförande presenteras dess resultat och slutsatser. Detta kan lämpligen göras i form av en rapport. Resultatet av risk- och sårbarhetsanalysen bör presenteras så att dess tidigare nämnda, syften tillgodoses. Det bör även redovisas vilket tillvägagångssätt som har lett fram till resultatet och slutsatserna (MSB, 2011).

### 3.1.5 Riskbehandling

Vid riskbehandlingsfasen bestäms hur informationen som framgår i resultat och slutsatser ska behandlas vidare. Det kan leda till beslut om vidtagande av riskreducerande åtgärder. Ett systems förutsättningar förändras över tid och därmed också vilka som är de största riskerna inom systemet. För att tillse att den riskhanteringen som bedrivs inom systemet är aktuell med avseende på dess riskbild är det viktigt att det finns en kontinuitet i riskhanteringsprocessen. I riskbehandlingsfasen bestäms därför även hur riskhanteringsarbetet skall bedrivas framledes och hur arbetssättet kan utvecklas för att upprätthålla en hög effektivitet och kvalitet.

### **3.2 Analysverktygets roll i processen**

Syftet med detta arbete är att ta fram ett analysverktyg för att bedöma konsekvenserna vid uppkomst av brand i olika delar av ett system med tät trähusbebyggelse. Analysverktyget har utgångspunkter i räddningstjänstens organisation. Den skall således anpassas utifrån räddningstjänstens perspektiv och ombesörja de värden som räddningstjänsten uppdrag värnar. Enligt lag (2003:778) om skydd mot olyckor är de värden som ligger till grund för räddningstjänstens uppdrag människors liv, hälsa och egendom, samt miljön.

I äldre trähusbebyggelse råder speciella förutsättningar då dess uppförande förhåller sig till då gällande byggnormer och därmed också då gällande säkerhetsföreskrifter samt vilka risker som accepterades. Detta faktum gör att äldre trähusbebyggelse är särskilt intressant ur risk- och sårbarhetssynpunkt eftersom förutsättningarna gör det möjligt för en brand att snabbt sprida sig och få en stor omfattning. Även om analysverktygets syfte primärt ombesörjer egendomsvärdet innebär en snabb brandspridning även att andra värden påverkas. Spridning till en annan byggnad innebär en nyuppkommen brand i en byggnad där det kan finnas människor och därmed påverka risken för deras liv och hälsa. Att en brand kan bli omfattande innebär också att riskbilden i en enskild byggnad i större utsträckning påverkas av riskbilden i andra byggnader inom systemet. Då tät trähusbebyggelse ofta består av äldre byggnader så finns det i dessa fall ofta ett högt kulturellt värde att beakta, vilket också riskerar att gå förlorat i stor omfattning.

Kopplat till riskhanteringsprocessen kan analysverktyget sägas fylla funktionen av ett underlag vid förmågebedömningen i systemet, då påfrestningen utgörs av en brand. Genom att analytiskt förutse omfattningen av en brand vid uppkomst i olika delar av systemet, ges också underlag att väga systemets egen förmåga mot.

## 4 Brandspridning

*I föregående kapitel framgår det att den påfrestning som systemet skall utsättas för är i form utav en brand i en byggnad. I detta kapitel utreds påfrestningen vidare. Detta genom att besvara vad en brand är för något, hur den kan sprida sig inom rummet, byggnaden och mellan byggnader.*

### 4.1 Värmeöverföring

Brandspridning sker till följd av att värme överförs från en värmekälla till en mottagande yta. Principiellt kan värmeöverföringen ske enligt de tre fysikaliska värmeöverföringsmekanismerna Konduktion, Konvektion, Värmestrålning (Drysdale, 2011). I ett brandförlopp verkar dessa simultant och beroende på omständigheterna så bidrar de i olika stor utsträckning till spridning av en brand.

#### 4.1.1 Konduktion

Konduktion är en värmeöverföringsmekanism som innebär att värme leds genom ett material. Konduktion förekommer till följd av temperaturskillnader i det ledande materialet. Hur mycket värme som överförs beror på hur stor temperaturdifferensen är samt materialets konduktivitet. Konduktivitet är en materialegenskap som beskriver hur effektivt värme leds genom materialet.

#### 4.1.2 Konvektion

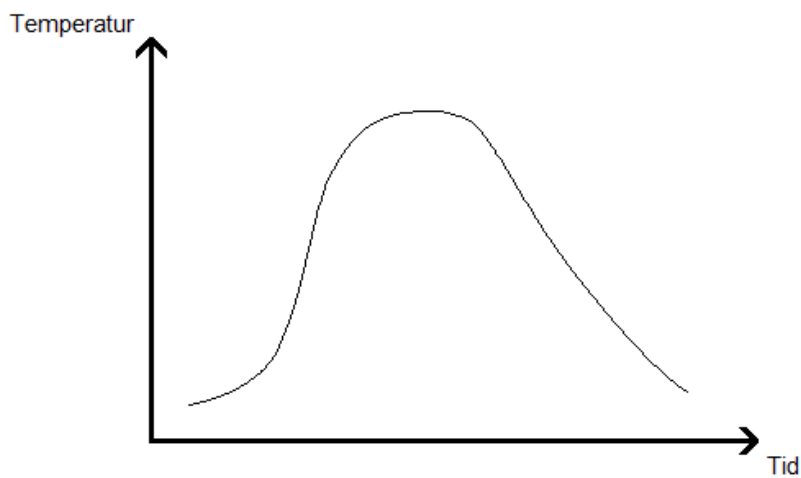
Konvektion är en värmeöverföringsmekanism som innebär att ett värmeutbyte sker mellan en fluid och ett fast material. En värmekälla värmer upp gaser som till följd av termodynamiska lagar kan flöda till en mottagande yta. Hur mycket värme som överförs beror på hur mycket värmeenergi den flödande gasen innehåller samt hur stor energiförlusten är i gränsskiktet. Energiförlusten beror på hur flödesbilden ser ut och vilket material som den mottagande ytan består av.

#### 4.1.3 Värmestrålning

Värmestrålning är en värmeöverföringsmekanism som innebär att en källa överför värme till en mottagande yta genom elektromagnetisk strålning. Elektromagnetisk strålning avges och fortplantas som elektromagnetiska vågor med varierande våglängd. Våglängder inom ett visst intervall av spektrumet förefaller i form av värmestrålning. Hur mycket värme som överförs beror på värmekällans temperatur samt dess och mottagarens emissivitet. Emissivitet är ett mått på hur stor andel av värmeenergin som avges, den varierar med temperatur och beror även på värmekällans övriga materialegenskaper.

## 4.2 Brandförlopp i ett rum

Hur en brand ter sig i ett rum är viktigt att utreda då detta förlopp ger förutsättningarna för branden att sprida sig till intilliggande rum och vidare till intilliggande byggnader. Under brandförloppet genomgår en brand olika faser så som antändning, tidigt brandförlopp, övertändning, fullt utvecklad rumsbrand och avsvalningsfas (Bengtsson, 2001). Faserna beskriver vilka branddynamiska förhållanden som råder i rummet. Det finns en koppling mellan vilken fas branden genomgår och temperaturförändringen i rummet. I Figur 2 visas en principiell bild av hur temperaturen förändras över tid vid en rumsbrand och den kan också användas för beskrivning av brandens olika faser. Vad som är viktigt att poängtera är att detta tankesätt lämpar sig bäst då rummet fortfarande är intakt och branden inte har spridit sig till närliggande rum alternativt byggnader.



Figur 2. Principiell skiss över temperatur utvecklingen över tid i ett godtyckligt brandförlopp

#### 4.2.1 Antändning

En antändning är alltid det första som sker vid en brand. Antändning av ett fast material sker till följd av ett antal kemiska processer. Genom att värmeenergi tillförs materialet, via någon av värmeöverföringsmekanismerna så övergår dess aggregationstillstånd till gas (Drysdale, 2011). Beroende på vilket material som brinner får de brännbara gaserna olika kemiska sammansättningar. Material som brinner i fall av rumsbrand är ofta kemiskt komplexa och kallas med ett sammanfattande ord för pyrolysgaser (Bengtsson, 2001). Tillsammans med omgivande syre bildar pyrolysgaserna en blandning och ifall koncentrationsförhållandena i blandningen uppnår vissa proportioner kan en antändning ske. Detta koncentrationsförhållande kallas för brännbarhetsområde och varierar beroende på vilket material som brinner samt vilken temperatur som råder (Drysdale, 2011). Reaktionen är exoterm vilket innebär att den kemiskt lagrade energin i materialet frigörs i form av värme vid reaktionen (Bengtsson, 2001).

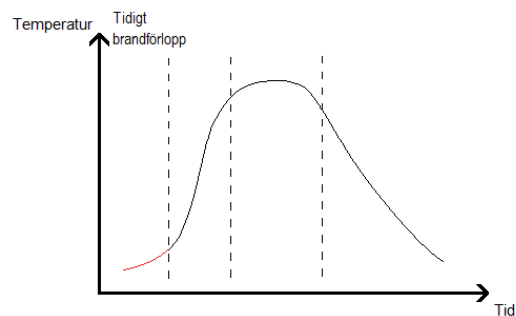
För att en antändning ska kunna ske och en brand fortgå krävs energi, bränsle och syre (Drysdale, 2011). Tillsammans bildar de tre komponenterna brandtriangeln, se Figur 3. Om någon komponent inte finns i tillräcklig utsträckning kan reaktionerna inte fortgå, det kan alltså inte brinna.



Figur 3. Brandtriangeln

#### 4.2.2 Tidigt brandförlopp

Energi frigörs i form av värme då förbränningsprocessen äger rum. Den frigjorda värmen vid reaktionerna tillförs omgivande yta som till slut uppnår en nivå där pyrolysgaser avges och hamnar i brännbarhetsområdet. På detta vis fortsätter värme att genereras och branden kan breda ut sig över en allt större yta. Då ytan som ingår i förbränningsprocessen blir större ökar också den värme som branden genererar. Detta förklarar den succesiva temperaturökningen i rummet i det tidiga brandförloppet, se Figur 4. Samma princip gör även att branden kan sprida sig mellan olika föremål i rummet. I det tidiga brandförloppet är branden fortfarande bränslekontrollerad då syre finns i tillräcklig omfattning för att de pyrolysgaser som produceras också kan förbrännas. Hur branden tilltar i det tidiga brandförloppet kan se olika ut och beror bland annat på rummets storlek samt det antända föremålets placering i förhållande till intilliggande brännbara föremål.

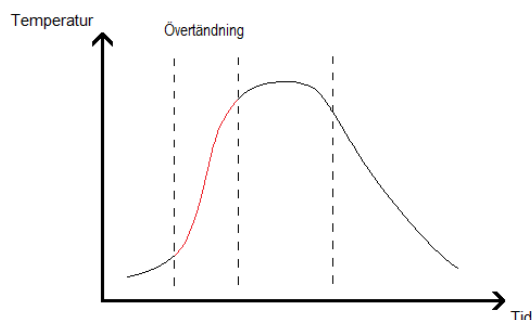


Figur 4. Tidigt brandförlopp

### 4.2.3 Övertändning

Övertändning är den fas då en hastig temperaturökning sker i rummet. Vid förbränningsprocessen bildas restprodukter i form av varma brandgaser. De varma brandgaserna har en lägre densitet vilket gör att de stiger och ansamlas vid taknivå. Vid taket bildas därmed en strålande yta som strålar med allt högre intensitet vid brandens tillväxt. Ytan återstrålar i brandrummet och temperaturen i rummet ökar exponentiellt.

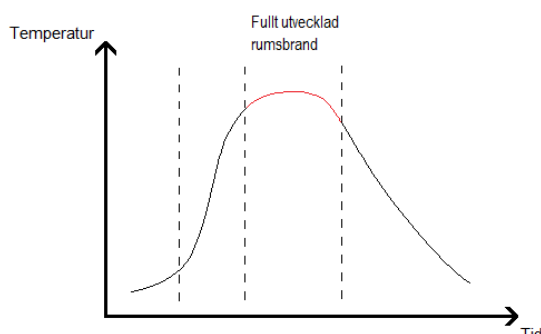
Definitionen av övertändning är att temperaturen i brandgaslagret uppgår till den temperaturen att den strålar med sådan intensitet att all interiör i rummet avger pyrolysgaser (Bengtsson, 2001). Därmed är hela rummet involverat i branden. Då mängden pyrolysgaser ökar i omfattning övergår branden från att vara bränslekontrollerad till att bli ventilationskontrollerad. Detta innebär att det inte finns syre i tillräcklig omfattning för att alla producerade pyrolysgaser ska kunna förbrännas.



Figur 5. Övertändning.

### 4.2.4 Fullt utvecklad rumsbrand

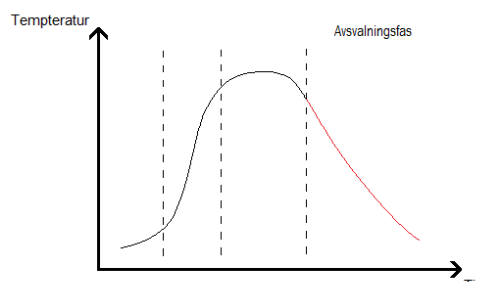
En övertändning leder till en fullt utvecklad rumsbrand. Då detta inträffat är hela rummet involverat i branden, temperaturen är som högst vid denna fas och håller sig någorlunda konstant. Det produceras pyrolysgaser i såpass stor omfattning att det även sker förbränning utanför brandrummet. Den fullt utvecklade rumsbranden pågår så länge det finns tillräckligt med brännbart material och syre i rummet för att den maximala temperaturen skall bibehållas.



Figur 6. Fullt utvecklad rumsbrand.

### 4.2.5 Avsvlningsfas

Under avsvlningsfasen återgår branden till att bli bränslekontrollerad och temperaturen avtar. Under denna fas förekommer branden ofta i form av glödbrand (Bengtsson, 2001).



Figur 7. Avsvlningsfas.

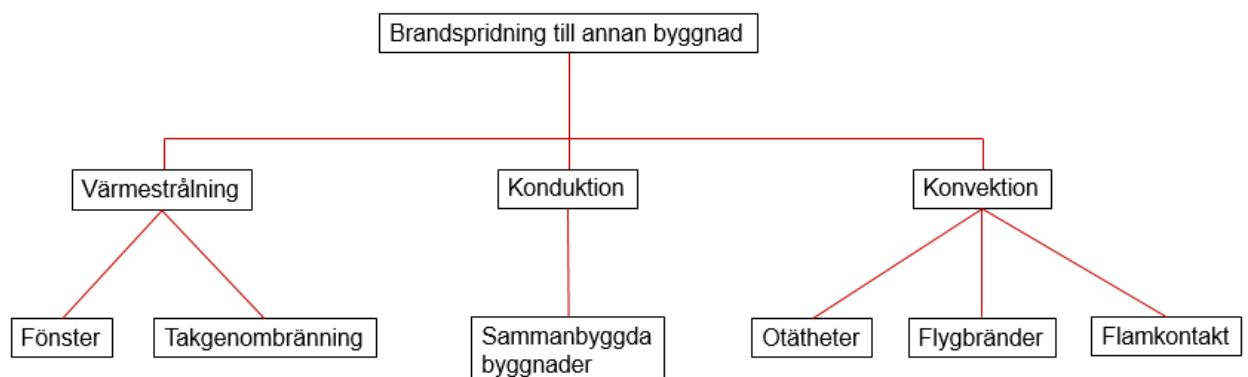


### 4.3 Brandspridning inom byggnad

Enligt ett likartat tankesätt som när en brand utvecklas i rummet kan spridning av brand mellan olika byggnadsdelar tillämpas i det större perspektivet över en byggnad. Det är svårt att ge ett generellt svar på ifall en uppkommen brand kommer sprida sig till flera byggnadsdelar. Detta då det finns ett flertal parametrar som begränsar både en brands tillväxt, men även motverkande byggnadstekniska parametrar som avskiljer brandens spridningsväg. När brandförloppet uppnår en fullt utvecklad rumsbrand så ökar sannolikheten för att branden sprider sig succesivt, detta till dess att brand övergår till avsvlningsfasen och temperaturen i brandrummet kraftigt sänks. Detta genom att branden ges möjlighet att brinna igenom väggar, sprida sig via ventilation, sprida sig utvändigt via fönster till annan våning eller via takfot till vind. Detta är några av de möjliga spridningsvägarna. Bränder som sprider sig till vindsutrymmet tenderar att snabbt involvera ett helt våningsplan. Det snabba förloppet beror på att det finns få avskiljande väggar som motverkar branden samt att det ofta har en hög brandbelastning. När en kritisk mängd byggnadsdelar är involverade kan branden ses som en fullt utvecklad brand över hela byggnaden.

### 4.4 Brandspridning till annan byggnad

En brand kan genom de olika fysikaliska värmeöverföringsmekanismerna sprida sig mellan byggnader. Faktorer som spelar in på varför detta kan ske och hur effektivt kan delas upp på vilken spridningsväg detta sker genom. Vilket illustreras i flödesschemat i Figur 8



Figur 8. Flödesschema över möjliga spridningsvägar

#### 4.4.1 Spridningsvägar

Det har gjorts ett flertal studier över vilka olika spridningsvägar som förekommer då en brand sprider sig mellan byggnader.

Ur Skydd mot brandspridning mellan småhus (Björnfot, 2008) identifieras följande spridningsvägar.

- "Direkt kontakt mellan flammor och den närliggande byggnadens brännbara material
- Konvektiv värmeöverföring från varma gaser
- Flygbränder (gnistor)
- Strålning från öppningar och från flammor utanför fasaden
- Strålning från flammorna vid takgenombränning"

Ur External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research (Carlsson, 1999) identifieras följande spridningsvägar:

- Flygbränder
- Flamkontakt
- Värmeöverföring på grund av konvektion
- Värmeöverföring på grund av strålning

Skillnaden mellan dem är ifall en uppdelning gjorts på vilken del av den brinnande byggnaden som strålar, men principiellt är de likartade.

#### *4.4.1.1 Flygbränder*

En brinnande byggnad producerar i olika mängd glödande gnistor som sprids via den termiska stigkraften av brandgaserna. Flygbränder kan färdas långa sträckor från den brinnande byggnaden, speciellt vid påverkan av yttre faktorer så som vind. Flygbränder kan dels agera pilotlåga för en värmepåverkad byggnad men även utgöra en spridningsväg av sig själva (Carlsson, 1999). Detta främst vid brännbara takbeläggningsmaterial, så som takpannor i trä eller spåntak på kringliggande byggnader (Strömdahl, 1970). De kan även sprida sig via otätheter och ventilationsöppningar i de närliggande byggnaderna eller då de ansamlas på horisontella ytor. Storleken på de glödande gnistorerna kan vara upp till 100 cm<sup>2</sup>, de största gnistbildningar tenderar att härstamma från takkonstruktionen (Glenting, 2002).

#### *4.4.1.2 Konvektiv värmeöverföring från varma gaser*

En produkt från bränder är brandgaser och de kan vara förbrända eller oförbrända. Gemensamt för gaserna är att de kan ha en temperatur på flera hundra grader Celsius. Står en närliggande byggnad på tillräckligt kort avstånd och i gasernas spridningsriktning kan de via konvektiv värmeöverföring utsätta den påverkade byggnaden för betydande värme (Carlsson, 1999).

#### *4.4.1.3 Flamkontakt*

Utslående flammor från en brinnande byggnad kan slå emot den närliggande byggnadens fasad ifall dessa ligger tillräckligt nära. Avståndet som krävs för att detta skall ske är oftast korta då de utslående lågornas horisontella utbredning begränsas av ett flertal parametrar (Carlsson, 1999). Parametrarna är bland annat fönsterkonfiguration, brandens magnitud och vind.

#### *4.4.1.4 Strålning från öppningar och utslående flammor*

Antändning av en närliggande byggnad kan ske på grund av värmestrålning. En av de byggnadsdelarna som kan påverka en intilliggande byggnad med strålningsvärme är strålningen genom fönster (Björnfot, 2008). Ifall dessa i ett senare skede går sönder kommer detta även ge möjlighet för flammor att slå ut vilka också emitterar strålning.

#### *4.4.1.5 Strålning från flammor vid takgenombränning*

En brand som uppkommer eller sprider sig till vindsutrymmet kan efter en tids värmepåverkan medföra att tak- eller takfotskonstruktionen fallerar. Lågorna som slår från taket kan bli stora och genom värmestrålning påverka byggnader på ett långt avstånd (Glenting, 2002).

#### 4.4.2 Dimensionerande spridningsvägar

Det kan förekomma kombinationer av olika spridningsvägar. Den vanligaste är strålning från öppningar och från flammor utanför fasaden i kombination med flygbränder som ger upphov till en brandspridning mellan två byggnader. I ett senare skede är det snarare den fullt utvecklade byggnadsbranden som blir styrande för brandspridningen. En sådan brand karakteriseras av brandspridning över flera våningsplan, genombränning till vind och genom yttertaket. De två spridningsvägarna som spelar in i detta senare skede är strålning från takflammor och flygbränder.

## 5 Utgångspunkter för metoden

*Föregående kapitel beskriver brandspridning mellan byggnader och vilka spridningsvägar som arbetet kommer att hantera vidare. I detta kapitel diskuteras vilken information som behöver framgå i arbetet framöver för att besvara dess frågeställningar.*

### 5.1 Spridningsvägar

Enligt kapitel 4 är två betydande spridningsvägar i tät trähusbebyggelse strålning från takgenombränning och strålning via fönster, båda i kombination med flygbränder. Dessa två spridningsvägar kommer att undersökas närmare vid det fortsatta arbetet. Beroende på hur brandförloppet ter sig och var branden uppkommer så kommer respektive spridningsväg att vara styrande vid olika tidsskeden i brandförloppet. Därmed finns det en poäng i att undersöka dem enskilt.

Uppkomst av brand är ofta kopplad till mänsklig aktivitet (MSB, 2014) vilket förekommer i större utsträckning på bostadsytan snarare än vindsytan. I normalfallet förväntas därför risk för brandspridning via strålning från fönster och utslående flammor föreligga i ett tidigare tidsskede än strålning från flammor vid takgenombränning. Brand på vindsvåning och därmed risk för takgenombränning kan uppkomma till följd av exempelvis otätheter. En vanlig orsak till att en brand uppkommer på vindsvåningen är att en brand sprids från utslående lågor via takfoten.

När takgenombränning väl har skett kan stora flammor förekomma vilket också genererar en hög emitterad strålning i jämförelse med strålningen från fönster vilka är begränsade av dess yta. En hög emitterad strålning vid takgenombränning innebär också att en hög strålningsnivå kan uppkomma på längre avstånd. Detta gör att denna spridningsväg är särskilt relevant att undersöka med avseende konflagrationsbrand.

### 5.2 Önskvärt resultat

Målet med arbetet är att ge räddningstjänsten en metod som utreder konsekvensen av en brand i tät trähusbebyggelse. Detta för att ge räddningstjänsten ett bredare underlag att utvärdera sin förmåga mot. Räddningstjänstens förmåga kan mätas på olika sätt och vad som är styrande för vilket mått som är lämpligt att ange resultatet i är räddningstjänstens kännedom om den egna organisationens begränsningar.

Räddningstjänsten har ofta god kännedom om hur lång tid det tar att infinna sig på olika platser inom kommunen samt hur lång tid det tar innan insatsen kan påbörjas. Mot denna bakgrund anses det vara relevant för metoden att besvara tiden till att en brand kan sprida sig till en intilliggande byggnad. Enligt tidigare uppkommer risken för spridning till annan byggnad tidigast i det skede av brandförloppet då fönster spricker och lågor slår ut genom fönstren.

Varierande förutsättningar vid uppkomsten av brand gör att tiden till att risken för spridning föreligger kan variera väldigt mycket vilket gör det svårt att säga med god noggrannhet. Fönstrets utformning och konfiguration i förhållande till en intilliggande byggnad varierar dock inte beroende på var branden uppkommer vilket gör att detta faktiskt kan bedömas.

Förutsättningarna för en brands tillväxt skiljer sig för olika rum och varierar över tiden. Ett rums inredning varierar beroende på användningsområde och kan möbleras om efter behov. Det är svårt att göra en bedömning om hur ett rum kommer se ut över en längre tid, vilka dörrar som står öppna

och vilken brandbelastning som ett rum har. Fönstrens utformning och konfiguration i förhållande till en intilliggande byggnad är däremot något som inte förändras mer än på lång sikt. Lämpligt tidsmått anses därför vara tiden från att fönstren spricker och lågor slår ut till att branden har spridits till en intilliggande byggnad. Vanligt förekommande tidsintervall över insatstid på insatskartor för räddningstjänsten är 10, 20 och 30 minuter. Detta anses vara lämpliga tidsintervall att ha som utgångspunkt gällande tidsenheter.

I tät trähusbebyggelse finns risk för konflagrationsbränder. Räddningstjänsten har god kännedom om hur stora resurser som finns tillgängliga inom ett område med avseende utrustning, vattenförsörjning och manskap. Kännedom finns även över hur många uppgifter en viss mängd resurser klarar av att hantera. Om brandens magnitud kan bestämmas kan också en bedömning göras över hur väl tillgängliga resurser räcker till. Mot denna bakgrund anses det vara relevant för metoden att besvara hur omfattande en brand kan bli. Enligt tidigare är risken för konflagrationsbränder stor vid de höga strålningsnivåer som kan uppkomma då takgenombränning har skett. En önskvärd enhet är hur många kringliggande byggnader som utsätts för en kritisk strålningsnivå i detta skede av brandförloppet.

### **5.3 Önskvärd presentation av resultatet**

Resultatet ska kunna presenteras så att det kan användas inom organisationen, som beslutsunderlag för andra beslutande organ inom kommunen och att det kan kommuniceras till allmänheten. Utifrån dessa specifikationer anses en grafisk presentation i form av en översiktskarta vara lämpligt.

Utgångspunkten för resultatet med avseende tidsvärden blir att alla byggnader inom systemet skall tilldelas ett tidsvärde och ett dignitetsvärde. Tillsammans ger dessa värden ett mått på hur konsekvensen av en uppkommen brand i en enskild byggnad förhåller sig till andra byggnader inom systemet. Det är även möjligt att dra slutsatser kring konsekvensen på kvartersnivå.

Alla hus ser olika ut till storlek, planlösning, utformning och antalet spridningsvägar kan variera för respektive hus. För att ge en samlad bild över vilka spridningsscenarioer som kan uppkomma är utgångspunkten att tiden till spridning undersöks för samtliga rum i byggnaden. Detta för att inte förbise information som är av betydelse för att kunna dra slutsatser om vilken byggnad som är mest kritisk, sett till områdets helhet. Vilket blir fallet om resultatet endast fokuserar på det värsta tänkbara scenariot och bedömningen enbart har denna information som grund.

### **5.4 Utförande**

För att skapa ett konsekvent arbetssätt där de relevanta parametrarna undersöks föreslås en inventering av samtliga byggnader inom systemet, där data inhämtas utifrån en checklista. För att uppnå ett effektivt arbetssätt är användarvänligheten av checklistan högt prioriterad. En framgångsfaktor är tydligt definierade kriterier som decimerar subjektivt inflytande på resultatet. Varvid ett likvärdigt resultat förväntas erhållas oavsett vem som är utförare. Önskvärt är att kriterierna är så pass väl utformade att det inte krävs någon brandteknisk kompetens för att utföra checklistan.

## 6 Beräkningsmodeller

I detta avsnitt undersöks de modeller som ligger till grund för att kunna göra en analytisk bedömning av brandspridning mellan byggnader. Detta i form av bakomliggande teori och empiri. Enligt kapitel 4 finns det två spridningsvägar som är av intresse att undersöka vidare.

Ett sätt att beskriva brandspridning på grund av värmestrålning är att dela upp spridningsförloppet i följande undermodeller:

- Strålände källans intensitet
- Infallande strålning
- Antändning

Strålände källans intensitet beskriver hur mycket strålning en brand av en viss dignitet ger upphov till. Infallande strålning beskriver hur stor del av strålningen som en mottagande yta träffas av. Undermodellen antändning beskriver vad som sker vid den mottagande ytan och vid vilka förhållanden som en antändning kan uppkomma.

### 6.1 Strålände källans intensitet

Enligt Drysdale (2011) kan den strålände källans intensitet bestämmas enligt följande uttryck.

$$\dot{q}_x'' = \varepsilon \sigma T^4$$

Ekvation 1

Där

$\varepsilon$  = Emissivitet [-]

$\sigma$  = Stefan-Boltzmanns konstant [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ]

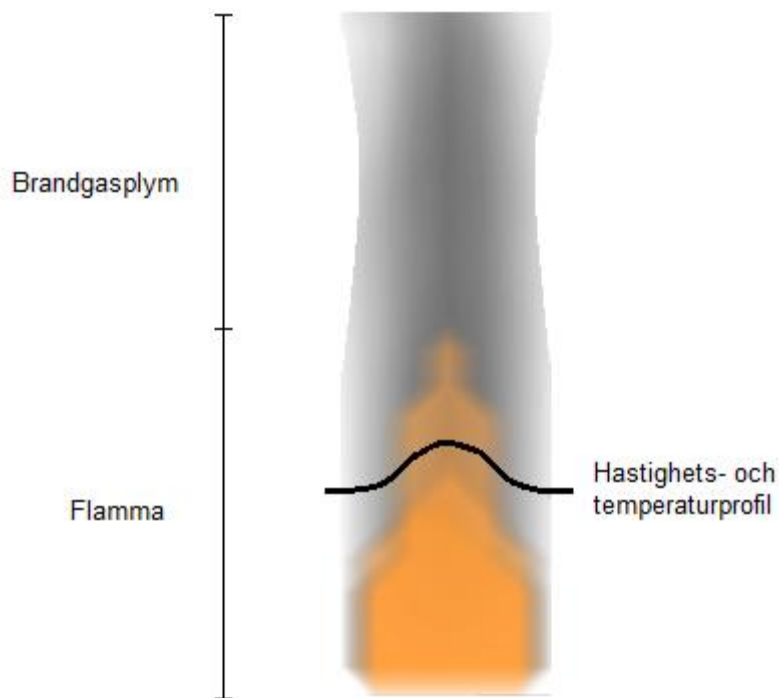
$T$  = Temperatur [K]

Enligt Ekvation 1 finns det två icke konstanta parametrar,  $\varepsilon$  och  $T$ , som påverkar den strålände källans intensitet. Dessa två parametrar undersöks vidare för spridningsvägarna.

#### 6.1.1 Fritt brinnande flamma

En fritt brinnande flamma är en flamma som inte är begränsad av en omslutande konstruktion utan har fri tillgång av luft från omgivningen. Flammen har en turbulent karaktär vilket gör att den fluktuerar och hela tiden förändras till sitt utseende. Flammans höjd definieras som den höjdnivå ovan bas som flammen befinner sig ovanför hälften av tiden och nedanför hälften av tiden. Över flammen bildas en brandgasplym där restprodukterna av förbränningsprocessen flödar uppåt till följd av dess termiska stigmatkraft i form av lägre densitet i förhållande till omgivande luft.

Temperaturen i en flamma varierar över tid och är beroende av vilket material som brinner samt hur stor ytan som brinner, därav är det svårt att ange en allmängiltig modell. Flammans turbulenta karaktär gör att temperaturen varierar inom flammen. Det beror på att kallare omgivande luften blandas in i flammen till följd av turbulensvirvlarna som skapas i gränsskiktet mellan de stigande varma gaserna i flammen och omgivande luft. En följd av detta är att temperaturen är högst längs centrumlinjen, då inblandningen av omgivande luft är som lägst där. Flammans temperatur avtar även i höjddled då inblandningen av omgivande luft ökar med höjden eftersom turbulensvirvlarna är större. Flammans profil kan principiellt beskrivas enligt Figur 9.



Figur 9. Flamma och plym i profil

Heskestad och McCaffrey har i sin forskning tagit fram analytiska uttryck för att bestämma flammors karakteristik så som bland annat flamtemperatur och flamhöjd. Heskestads korrelation är bäst anpassad för pöl-bränder och är enbart giltig i plymen ovanför flammen. McCaffreys ekvation är giltig både i plymen och flammen, dock så leder sambandet till en maximal temperaturökning för stora bränder på ca 800 °C vilket inte stämmer överens med verkliga försök där temperaturer har mätts upp till 1200 °C (Karlsson & Quintiere, 2000). Gemensamt för båda plymmodellerna är att de utgår från antagandet att flammans karakteristik enbart beror på materialets effektutveckling och tar således inte hänsyn till andra materialegenskaper.

Utöver analytiska modeller kan en flammans temperatur bestämmas utifrån mätdata vid genomförda fullskaliga försök. Quintiere (1997) skriver att turbulenta flammor tenderar att uppgå till ca 800 °C för de flesta material. Vidare anger Quintiere (1997) att vid försök har temperaturer på 745 °C uppmätts med trä som bränsle. Drysdale (2011) skriver att temperaturen i mittenskiktet av flammen kan approximeras till 800 °C och temperaturen i gränsskiktet mellan flamma och plym är ca 500-600 °C. Enligt Jönsson och Pettersson (1983) så varierar temperaturen i flammans topp mellan 500-600 °C och enligt Brandteknik, LTH (2005) är temperaturen i flammans mitt mellan 700-1200 °C beroende på vilket bränsle som brinner.

#### 6.1.1.1 Flamma vid takgenombränning

Flammans höjd beror av parametrar som förbränningshastighet och brandens diameter (Brandteknik, LTH, 2005). Höjden ökar vid snabbt brinnande bränslen och större diametrar. För flammor med en diameter större än 1 m anges riktvärdet vara att flamhöjden är lika med diametern. För mycket stora flammor med diameter i storleksordningen 100 m anges riktvärden med en flamhöjd mindre än diametern, ca 10-20 m (Brandteknik, LTH, 2005).

Grahn & Sandström (2003) har gjort en studie av flammornas karaktär vid branden i Jönköping 2001. Branden i Jönköping skedde i trähusbebyggelse och är därmed representativ för de spridningsrisker som undersöks i detta arbete, vilket tidigare nämnts i avsnitt 2.2. I studien studerades video- och fotomaterial som finns dokumenterat från branden för att se flammans höjd efter takgenombränning. Flamhöjden uppskattades till maximalt 5 meter och kvoten mellan flamhöjd och flammans bas uppskattades ligga mellan 0,5-1,5.

Det har även genomförts en liknande studie i USA av National Fire Protection Association, NFPA, i vilken 176 bilder från bränder där taket blivit övertänt. Detta i syfte att fastställa den maximala flamhöjden. Bilderna kommer från bränder i olika typer av byggnader, 69 stycken från industribyggnader, 65 från lagerbyggnader, 30 från offentliga byggnader och 12 från bostäder. Inga bilder från bränder då räddningsväsende hade påbörjat en insats togs med i studien. Studien gav upphov till resultatet som presenteras i Tabell 2 (Ondrus, 1988).

| Antal våningar i brand | Flamhöjd i antal våningshöjder | Flamhöjd höjd vid en våningshöjd på 2,5m |
|------------------------|--------------------------------|--|
| 1                      | 1,4                            | 3,5m                                     |
| 2                      | 1,8                            | 4,5m                                     |
| 3                      | 2,2                            | 5,5m                                     |
| 4                      | 2,6                            | 6,5m                                     |
| 5                      | 2,9                            | 7,25m                                    |
| 6                      | 3,1                            | 7,75m                                    |

Tabell 2. Sammanställning över flamhöjd beroende på antal våningar

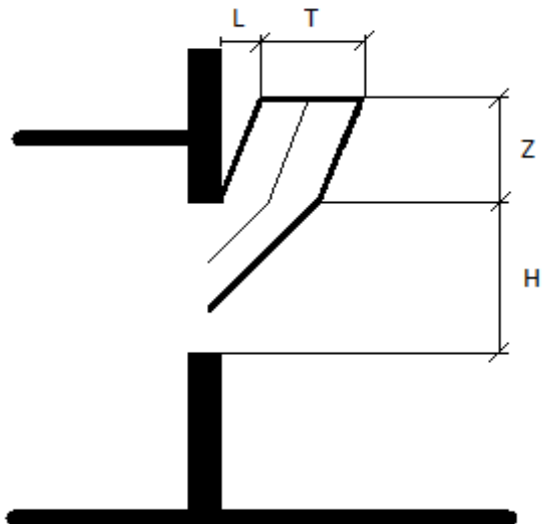
Tabell 2 skall tolkas som att vid en brand i en byggnad med ett visst antal våningar så får flammen en viss höjd i förhållande till vilken våningshöjd som byggnaden har. För tydlighetens skull har en kolumn lagts till för vilken flamhöjd som erhålls vid en våningshöjd på 2,5m. Resultaten från de båda studierna är approximativt eftersom att det baserar sig på film- och bildmaterial.

#### 6.1.1.2 *Flamma utslående från brandrum*

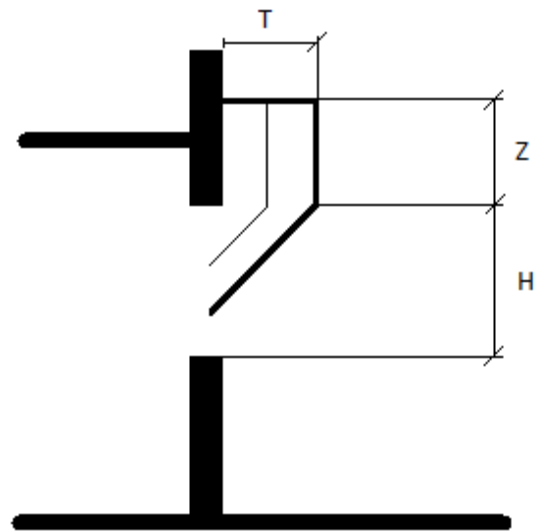
Ett specialfall av den fritt brinnande flammen är en flamma som slår ut genom öppningar från ett brandrum. Detta kan till exempel vara från ett fönster som står öppet eller har gått sönder och fallit ur sin båge. Temperaturen i dessa flammor skiljer sig från temperaturen i brandrummet och passar bättre att beskrivas som en fritt brinnande flamma då förbränningen inte påverkas i samma utsträckning av omgivande ansamlade brandgaser. I fullskaliga försök har temperaturen i utslående flammor uppmätts till ca 900 °C precis utanför brandrummet för att sedan minska med avstånd från fasaden, både vertikalt och horisontellt (Carlsson, 1999).

De utslående flammorna skiljer sig från flammor som uppkommer vid takgenombränning då de mestadels har en horisontell utsträckning. Öppningens utformning, det vill säga förhållandet höjd och bredd påverkar den utslående flammans utseende. Flammor som slår ut från breda fönster tenderar att ligga nära fasaden ovanför fönstret och smala tenderar att få en längre horisontell utsträckning från fasaden.





Figur 10. Fönsterflamma i profil från en smal öppning



Figur 11. Fönsterflamma i profil från en bred öppning

Den horisontella utsträckningen från fasaden, L, kan även påverkas av;

- Vind
- Skorstenseffekter i brandrummet, så som en brand på golvet precis under fönstret
- Brännbar beklädnad i brandrummet

Pettersson et al (1976) har hanterat detta genom att approximera den utslående flammen till att vara kilformad med samma bredd som fönstret och 2/3 av höjden. För att sedan dela upp kilen i ett antal skivor som förutsattes minska i temperatur linjärt från bas till toppen av flammans längd.

Ondrus (1998) hanterade detta genom approximation enligt Ekvation 2 och Ekvation 3.

$$\text{Då } H < 1,25B \text{ är } T + L = \frac{2}{3}H$$

Ekvation 2

$$\text{Och då } H > 1,25B \text{ är } T + L = 0,31 * H^{1,54} * B^{-0,54} + \frac{H}{3}$$

Ekvation 3

Där

H=Fönstrets höjd [m]

B=Fönstrets bredd [m]

T= Flammas bredd [m]

L= Avståndet från fasad till flamma [m]

### 6.1.2 Temperatur i brandrummet

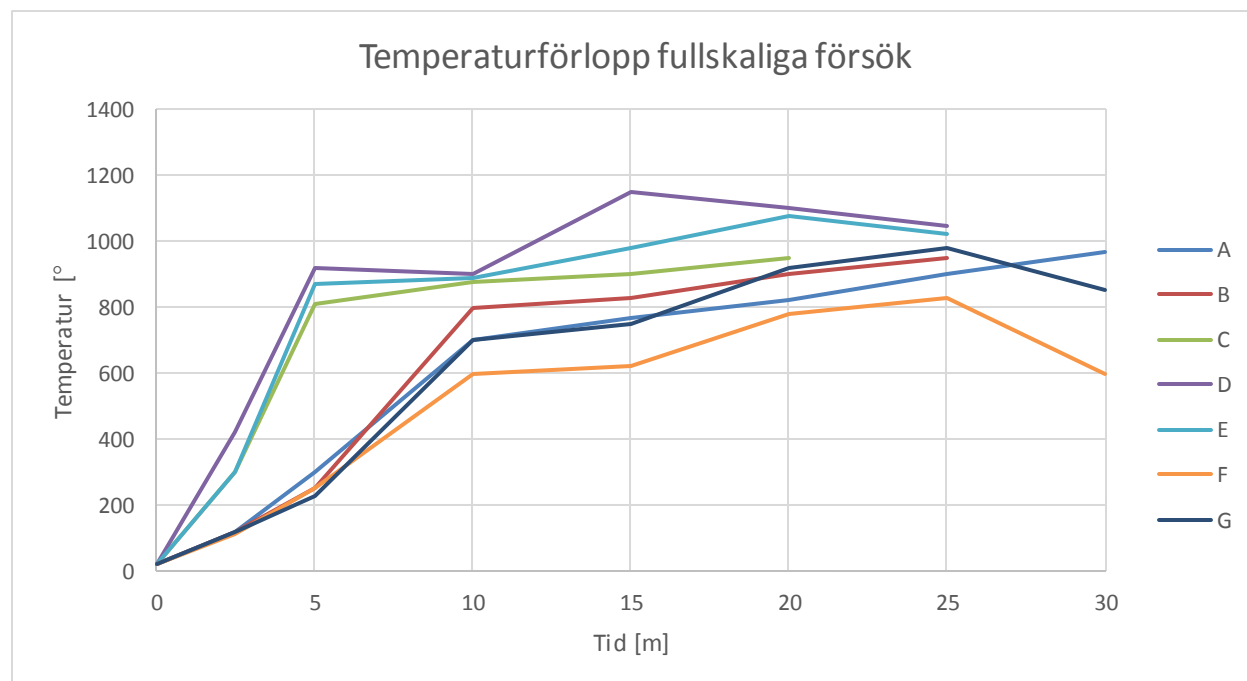
Temperaturerna i ett brandrum har i försök genomförda av Law (1963) maximalt uppmätts till runt 1100 °C både för ventilationskontrollerade och bränslekontrollerade bränder. Detta ger en effekt på ca 170 kW/m<sup>2</sup> (Law, 1963). Liknande försök har genomförts med en lägre brandbelastning i förhållande till öppningsareor. Dessa gav upphov till en maximal temperatur på 800 °C, vilket medför en strålningsintensitet på 84 kW/m<sup>2</sup> (Law, 1963).

Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd genomförde år 1971-74 sju stycken fullskaliga försök där brandspridningsrisker i tät trähusbebyggelse var i fokus. I de sju försöken antändes 330 kg träribbor i ett hus med en omslutande konstruktion av reglade väggar och isolering med varierat innerbeklädnadsmaterial. Den totala brandbelastningen per brandrum var 126 MJ/m<sup>2</sup>. Temperaturen mättes i ett 20-tal mätpunkter, både i och utanför brandrummet. Ett urval av viktiga förutsättningar listas i Tabell 3 (Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd, 1975).

| Försök | Takbeklädnad                    | Väggbeklädnad  | Öppningsfaktor | Forcerad ventilation |
|--------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------------|
| A      | 9mm gipsskiva<br>10mm byggboard | 10mm byggboard | 0,06           | -                    |
| B      | 9mm gipsskiva                   | 9mm gipsskiva  | 0,06           | -                    |
| C      | 9mm gipsskiva                   | Lättbetong     | 0,06           | -                    |
| D      | 12mm byggboard                  | 10mm byggboard | 0,06           | 3-6 m/s              |
| E      | 12mm byggboard                  | Lättbetong     | 0,06           | 3-6 m/s              |
| F      | 2 x 12mm byggboard              | 10mm byggboard | 0,06           | -                    |
| G      | 10mm byggboard                  | 10mm byggboard | 0,06           | -                    |

Tabell 3. Försöksuppställning i fullskaliga försök genomförda av Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd

Fem av mätpunkterna var placerade i brandrummet och gav upphov till temperaturförlopp med utseende enligt Figur 12 (Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd, 1975).



Figur 12. Temperaturförlopp för fullskaligt försök.

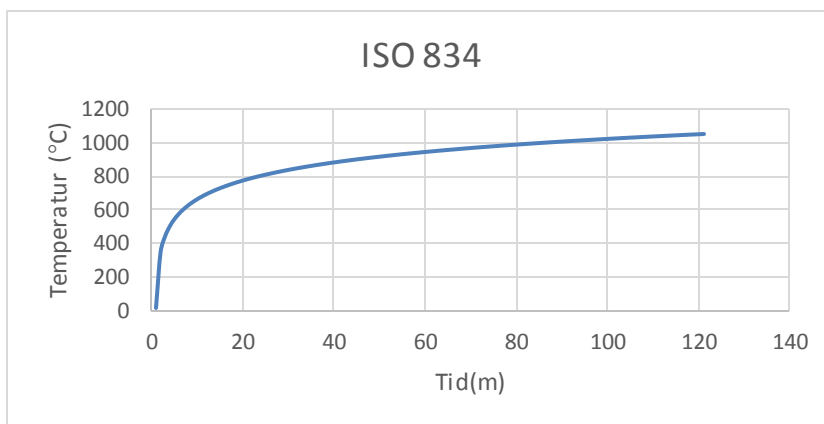
Det finns ett antal olika modeller som syftar till att återspegla temperaturförändringen i brandrummet, vidare i arbetet benämnd temperaturförlopp. Nedan följer en kort sammanfattning över de olika modellernas användningsområden, begränsningar och giltighetsområden.

### 6.1.2.1 ISO 834

ISO 834 är en tid-temperatur kurva framtagen av Europeiska kommittén för standardisering och används för att jämföra olika konstruktioner och byggnadsmaterials motståndskraft mot brand. Genom att värma upp byggnadselement i ugnar och skatta tiden tills de fallerar kan en uppskattning av motståndskraften mot brand göras (Karlsson & Quintiere, 2000). ISO 834 kurvan får sitt utseende genom att följa Ekvation 4.

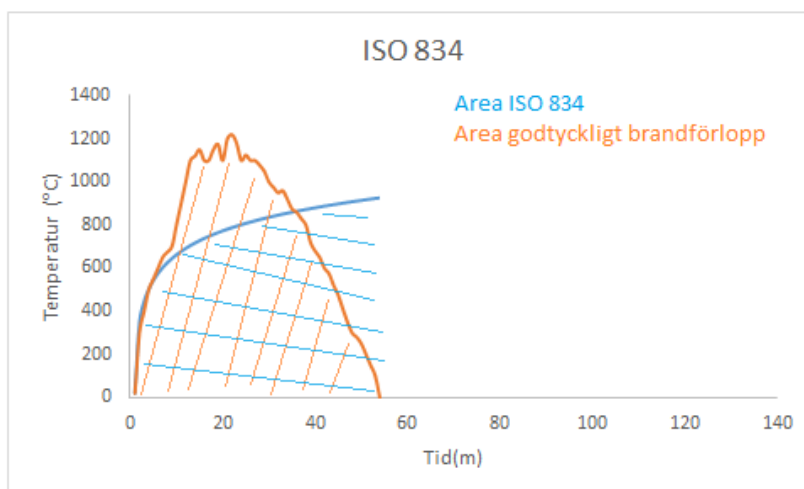
$$T_g = 20 + 345 \log(8t + 1)$$

Ekvation 4



Figur 13. Typutseende för ISO 834

Den princip som används vid bedömning av material och konstruktioner enligt ISO 834 är en tankegång formulerad av Ingberg (1928). Ifall arean under två temperaturförlopp är lika fram till ett visst tidssteg så är de båda bränderna lika allvarliga. Tankegången illustreras i Figur 14.



Figur 14. ISO 834 jämfört med ett godtyckligt brandförlopp

Tankegången tar inte någon hänsyn till inverkan av förhöjda temperaturer och det faktum att många material inte påverkas lika av en temperatur under till exempel 5 minuter som av halva temperatur under 10 minuter (Drysdale, 2011).

### 6.1.2.2 Magnusson-Thelandersson

Magnusson-Thelandersson tog på 1960-70 talet fram en metod för att hantera problematiken med att befintliga temperaturförloppskurvor inte tog hänsyn till faktorer som brandrummets utformning, ventilationsöppningar och stommaterial i byggnaden (Karlsson & Quintiere, 2000). Metoden för att ta fram temperaturkurvor baseras på en lösning av en mass- och värmebalansekvation för brandrummet (Karlsson & Quintiere, 2000). Mass- och värmebalansekvation återges i Ekvation 5, Ekvation 6 och illustreras i Figur 15.

$$\dot{Q} = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B$$

Ekvation 5

Där

$\dot{Q}$  = Total värme utveckling [J]

$\dot{q}_L$  = Värmeförlust på grund av utbyte av varma gaser mot kalla [J]

$\dot{q}_W$  = Värmeförlust via omslutande väggar och tak [J]

$\dot{q}_R$  = Värmeförlust via strålning genom öppningar [J]

$\dot{q}_B$  = Värmelagring i gas över hela volymen [J]

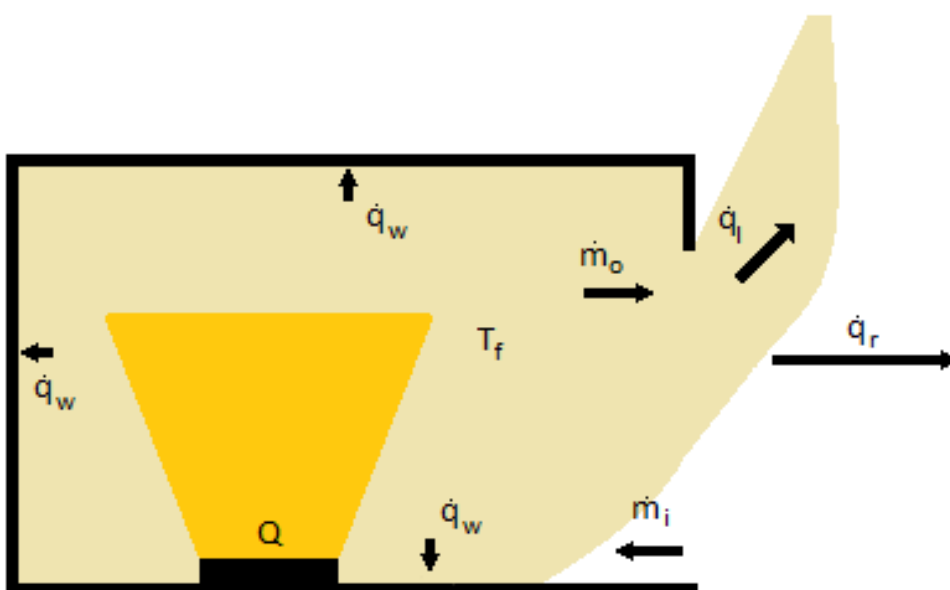
$$\dot{m}_o = \dot{m}_i$$

Ekvation 6

Där

$\dot{m}_o$  = Massflödet ut ur brandrummet [kg/s]

$\dot{m}_i$  = Massflödet in till brandrummet [kg/s]



Figur 15. Mass- och värmebalans för ett godtyckligt brandrum, efter (Karlsson & Quintiere, 2000)

För att lösa dessa ekvationer gjordes följande antaganden (Karlsson & Quintiere, 2000):

- När branden är fullt utvecklad så är den också ventilationskontrollerad
- Tillväxt och avsvlningsfasen kan modelleras utifrån experiment
- Förbränningen är fullständig och sker inom brandrummet
- Temperaturen är uniform över hela brandrummet
- Hela inneslutningsarean modelleras med ett uniformt värmeövergångstal
- Värmeflödet sker endast en väg över hela inneslutningsarean

Utifrån detta togs ett antal temperaturförlopp fram via datorsimulering och benämns vanligtvis ”De svenska brandkurvorna”. Detta för åtta olika typer av omslutande material med fokus på stål och betongkonstruktioner men inte för träkonstruktioner. De parametrar som krävs som styr vilket temperaturförlopp som skall användas är öppningsfaktor och brandbelastning. Öppningsfaktorn definieras enligt Ekvation 7 (Karlsson & Quintiere, 2000).

$$\frac{A_o\sqrt{H}}{A_t}$$

Ekvation 7

Där

$A_o$  = Total öppningsarea i brandrummet [ $m^2$ ]

$\sqrt{H}$  = Höjden av öppningarna [m]

$A_t$  = Total omslutningsarea i brandrummet [ $m^2$ ]

### 6.1.2.3 Eurocode

Europeiska kommitteen för standardisering har tagit fram en metod för att bestämma temperaturförlopp som tar hänsyn till avsvlningsfasen. Denna typ av temperaturförlopp kallas parametriska brandförloppskurvor. Temperaturförloppskurvan baserar sig på att tillväxtfasen modelleras enligt Ekvation 8 och Ekvation 9.

$$T_g = 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{19t^*})$$

Ekvation 8

$$t^* = t * \left( \frac{\frac{A_o\sqrt{H_o}}{A_t}}{\sqrt{k\rho c}} \right)^2 * \left( \frac{1160}{0,04} \right)^2$$

Ekvation 9

Där

$k$  = Värmeledningsförmåga [W/mK]

$\rho$  = Densitet [Kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = Specifik värmekapacitet [J/gK]

$t$  = tid [s]

Detta liknar tillväxtfasen för ISO 834 men tillväxthastigheten skiljer sig beroende på öppningsfaktor och det omslutande materialet i brandrummet (Karlsson & Quintiere, 2000). Avsvlningsfasen återspeglas enligt Ekvation 10.

$$T_g = T_{gmax} - 625(t^* - t_d^*) \text{ för } t_d^* \leq 0,5$$

$$T_g = T_{gmax} - 250(3 - t_d^*)(t^* - t_d^*) \text{ för } 0,5 < t_d^* < 2$$

$$T_g = T_{gmax} - 250(t^* - t_d^*) \text{ för } t_d^* \geq 2$$

**Ekvation 10**

$T_{gmax}$  beräknas enligt Ekvation 8 vid tiden  $t_d^*$  som i sin tur beräknas enligt Ekvation 11.

$$t_d^* = \frac{0,13 * 10^3}{\frac{A_0 \sqrt{H_0}}{A_t}} * \left( \frac{\frac{A_0 \sqrt{H_0}}{A_t}}{\sqrt{k\rho c}} \right)^2 * \left( \frac{1160}{0,04} \right)^2$$

**Ekvation 11**

Denna metod baseras till stor del på jämförelser med metoden framställd av Magnusson & Thelandersson (Karlsson & Quintiere, 2000). Den har även visat sig ge likartade värden för motsvarande förutsättningar.

#### 6.1.2.4 Wickströms modell

År 2014 presenterades en modell för att återspegla temperaturförlopp av Alexandra Byström och Ulf Wickström. Metoden syftar även denna att lösa mass- och värmebalansekvationerna presenterade i Ekvation 12 och Ekvation 13 (Wickström & Byström, 2014).

$$\dot{Q} = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R$$

**Ekvation 12**

Där

$\dot{Q}$  = Total värme utveckling [J]

$\dot{q}_L$  = Värmeförlust på grund av utbyte av varma gaser mot kalla [J]

$\dot{q}_W$  = Värmeförlust via omslutande väggar och tak [J]

$\dot{q}_R$  = Värmeförlust via strålning genom öppningar [J]

$$\dot{m}_o = \dot{m}_i = \dot{m}_a$$

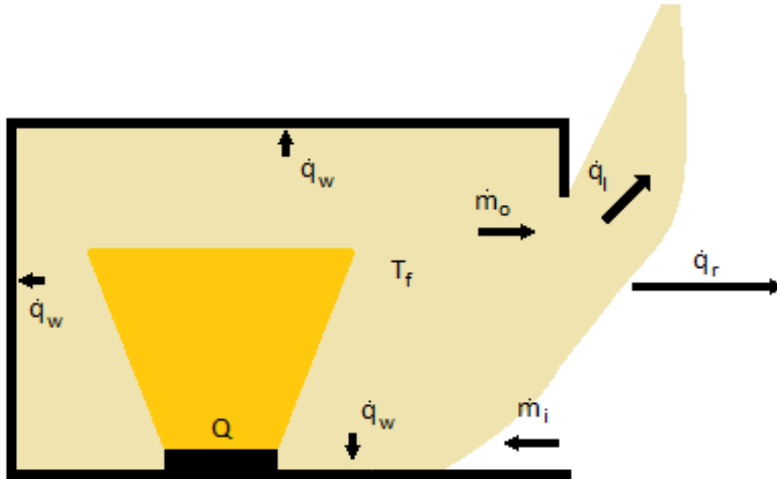
**Ekvation 13**

Där

$\dot{m}_o$  = Massflödet ut ur brandrummet [kg/s]

$\dot{m}_i$  = Massflödet in till brandrummet [kg/s]

Mass- och värmebalansekvationerna illustreras för ett godtyckligt brandrum i Figur 16.



Figur 16. Mass- och värmebalans för ett godtyckligt brandrum, efter (Karlsson & Quintiere, 2000)

De likställda massflödena in och ut ur brandrummet,  $\dot{m}_a$ , är proportionerliga mot arean och höjden på öppningarna i brandrummet. Detta ger upphov till Ekvation 14.

$$\dot{m}_a = \alpha_1 A_o \sqrt{H_o}$$

Ekvation 14

Där

$\alpha_1$  = flödeskonstant [-]

Då branden är ventilationskontrollerad blir värmeutvecklingen proportionerlig mot massflödet av luft in i brandrummet. Värmeutvecklingen beräknas enligt Ekvation 15.

$$\dot{Q} = \chi \alpha_2 \dot{m}_a = \chi \alpha_2 \alpha_1 A_o \sqrt{H_o}$$

Ekvation 15

Där

$\chi$  = förbränningseffektivitet [-]

$\alpha_2$  = utvecklade energi per massenhet luft [J/kg]

Värmeförlust på grund av utbyte av varma gaser mot kalla är proportionerlig mot massflödet multiplicerat med temperaturförändringen. Detta kan ställas upp enligt Ekvation 16.

$$\dot{q}_l = c_p \dot{m}_a (T_f - T_i)$$

Ekvation 16

Där

$c_p$  = Specifik värmekapacitet [J/kgK]

$\dot{m}_a$  = massflöde [Kg/s]

$T_f$  = Temperaturen i brandrummet [K]

$T_i$  = Initial temperaturen [K]

Värmeförlust från strålning ut från brandrummets öppningar beräknas enligt Ekvation 17.

$$\dot{q}_r = A_o \sigma (T_f^4 - T_\infty^4)$$

Där

$T_\infty^4$  = Den omgivande temperaturen [K]

**Ekvation 17**

Värmeförlusten genom den omslutande konstruktionen är proportionerlig mot omslutningsarean. Detta kan beräknas enligt Ekvation 18.

$$\dot{q}_w = A_{tot} \dot{q}_w''$$

**Ekvation 18**

Där

$\dot{q}_w''$  = Värmeflöde per area enhet [W/m<sup>2</sup>]

$A_{tot}$  = Omslutningsarea [m<sup>2</sup>]

Förenkling av dessa ekvationer krävs och genom att anta att brandens teoretiskt maximala temperatur kommer att erhållas när det inte längre sker något utbyte av värme genom den omslutande konstruktionen eller strålning. Då kommer brandens temperatur endast styras av värmeutvecklingen från förbränningen och luftens specifika värmekapacitet. Den maximala temperaturökningen,  $\theta_{ult}$ , kan beräknas enligt Ekvation 19.

$$\theta_{ult} = \frac{\chi \alpha_2}{c_p}$$

**Ekvation 19**

Då temperaturökningen endast är teoretiskt möjlig utifrån ett antal antaganden, så införs en analog liknelse med två elektriska motstånd. Ett som ligger mellan brandens teoretiskt maximala temperatur och den faktiska brandtemperaturen,  $R_f$ . Detta kan beräknas enligt Ekvation 20.

$$R_f = \frac{1}{c_p \alpha_1}$$

**Ekvation 20**

Det andra elektriska motståndet,  $R_h$ , ligger mellan brandens temperatur och den omslutande konstruktionen. Detta beräknas enligt Ekvation 21.

$$R_h = \frac{1}{h_i}$$

**Ekvation 21**



Genom att kombinera Ekvation 15, Ekvation 16, Ekvation 17, Ekvation 18 med Ekvation 12 och sedan kombinera det resulterande uttrycket med de två elektriska motståndet erhålls Ekvation 22. Detta motsvarar värmeförlusten genom omslutande konstruktion,  $\dot{q}_w''$ .

$$\dot{q}_w'' = \frac{1}{R_F + R_{H,i}} (\theta_{ult} - \theta_s) + \frac{A_o}{A_{tot}} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_{h,i}}{R_F}\right)} \sigma (T_\infty^4 - T_f^4)$$

**Ekvation 22**

Ifall detta ansätts som ett randvillkor till temperaturökningen hos den omslutande konstruktionen kan brandens temperatur,  $\theta_f$ , slutligen tas fram genom Ekvation 23.

$$\theta_f = \frac{\theta_s h_i + \theta_{ult} h_f}{h_i + h_f}$$

**Ekvation 23**

Den omslutande konstruktionens temperatur,  $\theta_s$ , tas fram enligt Ekvation 24.

$$\theta_s = \theta_{ult} [1 - e^{t_f} * \operatorname{erfc} \sqrt{t_f}]$$

**Ekvation 24**

Tidskonstant,  $t_f$ , tas fram för branden enligt Ekvation 25.

$$t_f = \frac{k\rho c}{R_F * R_h}$$

**Ekvation 25**

### 6.1.3 Emissivitet

Emissivitet,  $\varepsilon$ , är en av de ingående parametrarna som beskriver den utfallande strålningen. Emissivitet kan ses som hur väl en yta eller ett objekt strålar. Vanligtvis används ett värde på 1 för att beskriva utfallande strålning från ett brandrum, vilket motsvarar en ideal svartkroppstrålare (Carlsson, 1999). Flammor som slår ut från brandrum kan beskrivas med Ekvation 26.

$$\varepsilon = 1 - e^{-\alpha\lambda}$$

**Ekvation 26**

Där

$\alpha$ = Absorptions koefficient [-]

$\lambda$ = Flammans bredd [m]

Vanliga värden på absorptionskoefficienten för trä ligger på mellan 0,5-0,8 (Carlsson, 1999).

## 6.2 Konfigurationsfaktor

En strålande yta strålar i alla riktningar. Konfigurationsfaktorn ger ett mått på hur stor andel av strålningen som når en punkt. För beräkning av vilken strålningsnivå som når en punkt multipliceras konfigurationsfaktorn,  $\phi$ , med Ekvation 1 för strålningsintensitet. En ekvation som beskriver infallande strålning får därmed ett utseende enligt Ekvation 27.

$$\dot{q}_x'' = \phi \varepsilon \sigma T^4$$

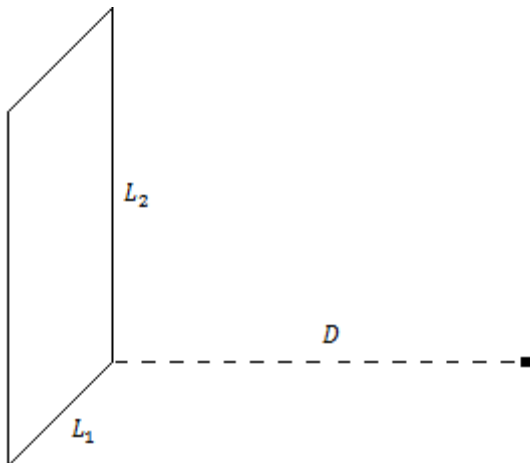
Ekvation 27

Ekvation 28 kan användas för att bestämma konfigurationsfaktorn för en punkt belägen vinkelrätt från ett hörn i den strålande ytan, enligt Figur 17.

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{L_1}{\sqrt{L_1^2 + D^2}} \tan^{-1} \left( \frac{L_2}{\sqrt{L_1^2 + D^2}} \right) + \frac{L_2}{\sqrt{L_2^2 + D^2}} \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{\sqrt{L_2^2 + D^2}} \right) \right]$$

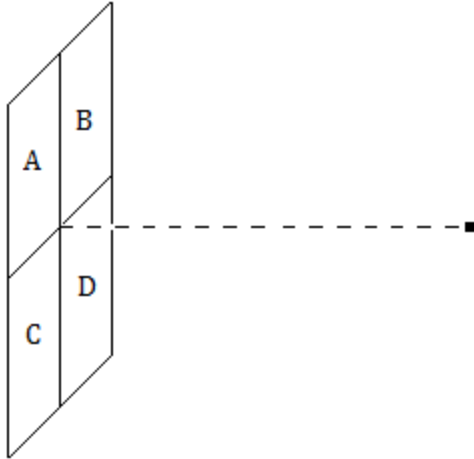
Ekvation 28

De ingående parametrarna för Ekvation 28 beskrivs i Figur 17.



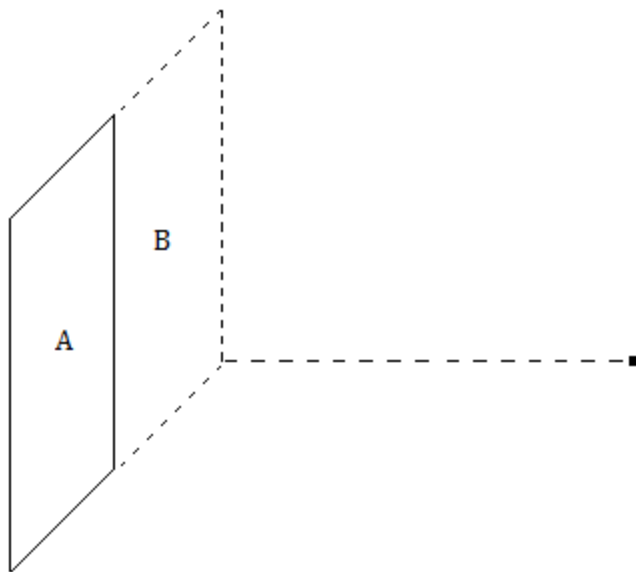
Figur 17. Konfigurationsfaktor i en punkt vinkelrätt från ett hörn av en strålande yta.

Konfigurationsfaktorn är additiv vilket är en egenskap som kan nyttjas vid beräkning av infallande strålning (Drysdale, 2011). Genom att dela upp en yta i olika rektanglar kan därför konfigurationsfaktorn för den infallande strålningen beräknas vid en godtyckligt vald punkt inom fönsterytan på motstående sida. Den strålande ytan kan då delas upp i olika rektanglar, enligt Figur 18 och genom att addera dess respektive synfaktor  $\phi_A + \phi_B + \phi_C + \phi_D$  kan infallande strålning beräknas vid punkten.



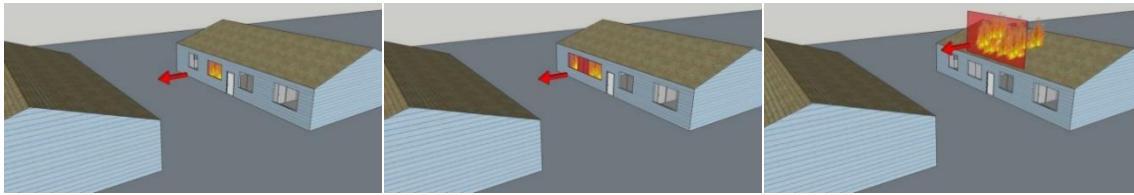
Figur 18. Konfigurationsfaktor i en godtyckligt vald punkt inom fönsterarean.

Synfaktorn är även subtraktiv vilket innebär att synfaktorn för en punkt som är utanför fönsterarean på motstående sida kan hanteras på ett liknande sätt. Detta innebär att en tänkt area delas upp i rektanglar och konfigurationsfaktorn beräknas för respektive. Istället för addition så subtraheras konfigurationsfaktorn för den icke strålande ytan  $\phi_{A+B} - \phi_B$ , se Figur 19.



Figur 19. Konfigurationsfaktor i en godtyckligt vald punkt utanför fönsterarean.

Beräkning av konfigurationsfaktor enligt denna princip kräver att den strålande ytan har en strikt rektangulär form. Flammor som uppkommer på grund av en brand har sällan detta karakteristiska utseende, utan är istället turbulenta och varierar över tid. För att beräkningsmodellen skall kunna användas kan en ekvivalent rektangulär yta som strålar ansättas (Drysdale, 2011). En illustration av detta ges i Figur 20



Figur 20. Illustration av olika flammor som kan uppkomma i en byggnad

## 6.3 Antändning

En stor del i att analysera brandspridning mellan byggnader är att kunna modellera antändning av ett material. Ett vedertaget sätt att hantera detta är att ställa upp ett antal antändningskriterier. Principiellt så kan antändning som ger upphov till en brand ske på två sätt då strålning är värmeöverföringsmekanismen i fråga. Ifall materialet erhåller tillräckligt med energi från den brinnande byggnaden så kan en antändning av pyrolysgaserna ske, antingen genom en spontan antändning eller då det finns en pilotlåga närvarande. En pilotlåga kan vara i form av en gnista, glöd från en flygbrand eller en låga. Vid spontan antändning så krävs en betydligt högre infallande strålning än när det finns en pilotlåga närvarande (Carlsson, 1999).

Två centrala koncept för att kunna ställa upp kriterier för antändning är antändningstemperatur och kritisk strålningsnivå. Konceptet med antändningstemperatur baseras på empiri, d.v.s. att varje material har en fast temperatur då det antänder (Babrauskas, 2001). Ett problem som har uppstått är själva definitionen av antändningstemperatur då det över åren har förändrats. Det har genom åren varit betydligt lättare att mäta temperaturen i en ugn än temperaturen som materialet har då det antänds, varvid temperaturen i ugnen som ger upphov till en antändning mestadels har använts som definition. Detta är också en av anledningarna till att gjorda försök över åren ofta uppvisar spridda resultat trots liknande förutsättningar i övrigt (Babrauskas, 2001). Kritisk strålningsnivå är den minsta strålningsnivån som kan ge upphov till en antändning (Babrauskas, 2001).

### 6.3.1 Antändningskriterier för trä

Det har genomförts ett flertal serier av experiment med inriktning att undersöka vilka förutsättningar som krävs för antändning av trä. Babrauskas (2001) har gjort en sammanställning av omkring 30 genomförda studier. Ur detta underlag kan antändningstemperaturen då det finns en pilotlåga närvarande är mellan 300-400 °C. I detta underlag finns både tester genomförda i en konkalorimeter och ugnstester. Ur samma underlag har även en översikt gjorts på enbart de försök genomförda i en konkalorimeter, för att erhålla den kritiska strålningsnivån.

Gemensamt för samtliga försök genomförda i Babrauskas (2001) underlag är att de genomförts på trä som antingen är torkat eller har en fukthalt som motsvarar den vid rumstemperatur. Detta är relevant vid modellering av tiden till antändning då ett ökat fukttinnehåll i trä även ökar den temperaturen som krävs för att antändning skall ske. Detta på grund av att pyrolysgaserna späds ut av fukten som förångas, speciellt när strålningsnivån är hög och torkning endast sker i en begränsad utsträckning innan den kritiska strålningsnivån för torrt trä uppnås. En ökad fukthalt ökar materialets värmeupptagningsförmåga, på så vis kommer mindre värme stanna vid ytan och mer ledas in i materialet (Bengtsson, 2001). I Babrauskas (2001) underlag uppges den kritiska strålningsnivån för trä ligga mellan 9-12,5 kW/m<sup>2</sup>.

Nordiska industrigruppen genomförde 1975 både små och fullskaliga försök på väggar i trä, både målade och omålade väggar testades. I dessa försök bestämdes den kritiska strålningen innan antändning (Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd, 1975).

|                    | Ej målade | Målade |
|--------------------|-----------|--------|
| Fullskaliga försök | 18-19     | 26-30  |
| Laboratorieförsök  | 10        | 15     |

Tabell 4. Kritisk strålning för målade och omålade träfasader

### 6.3.2 Tid till antändning av trä

En yta som utsätts för sin kritiska strålningsnivå kommer inte att antändas direkt. Det finns ett flertal faktorer som påverkar tiden till antändning, så som materialets fukthalt och värmeupptagningsförmåga. Ett sätt att modellera tiden till antändning är att undersöka temperaturökningen från en viss strålning och sedan undersöka när den överstiger antändningstemperaturen för materialet. Dessa är ofta en förenklad form av den allmänna värmeledningsekvationen. Ett sådant uttryck, som utgår från en konstant infallande strålningsnivå är Ekvation 29 (Sjöström & Wickström, 2013).

$$t_{ig} = \frac{(T_{sa} - T_i)^2}{4(\dot{q}''_{inc} - \dot{q}''_{crit})^2} * k\rho c * \pi$$

Ekvation 29

Där

$k\rho c$  = Värmeupptagningsförmågan hos materialet [ $W^2s/m^4K^2$ ]

$\dot{q}''_{inc}$  = Infallande strålning [ $kW/m^2$ ]

$\dot{q}''_{crit}$  = Kritisk strålningsnivå för materialet [ $kW/m^2$ ]

$T_{sa}$  = Antändningstemperatur [K]

$T_i$  = Initial temperatur [K]

Ett sätt att modellera temperaturökningen som även går att genomföra vid en transient infallande strålning presenteras nedan. Modellen baserar sig på Duhamels superpositionsprincip (Sjöström & Wickström, 2013). Denna princip säger att yttemperaturen av en tjock kropp kan beräknas enligt Ekvation 30 då den påverkas av ett värme flöde över tid.

$$T_{s(t)} = T_i + \dot{q}''(0)A(t) + \int_0^t \frac{d\dot{q}''}{d\tau} A(t - \tau) d\tau$$

Ekvation 30

Där

$T_i$  = Initialtemperaturen [K]

$T_{s(t)}$  = Materialets temperatur per tidssteg [K]

$A(t)$  = Forcerande funktion, definierad i Ekvation 31.

$\dot{q}''$  = Värme flöde vid ytan per areaenhet [ $W/m^2$ ]

Den forcerande funktionen definieras enligt Ekvation 31.

$$A(t) = 2 \sqrt{\frac{t}{\pi k \rho c}}$$

Ekvation 31

För att undersöka temperaturökningen i ett förlopp, till exempel uppvärmning av en tjock vägg så kan Ekvation 30 och Ekvation 31 tillsammans beskrivas som en diskret serie enligt Ekvation 32.

$$T_N = T_i + \dot{q}''(0) + \sum_{i=1}^N (\dot{q}''_i - \dot{q}''_{i-1}) A_{N-i}$$

Ekvation 32

Där

$T_N$  = Temperaturen i ett visst tidssteg [K]

$T_i$  = Initialtemperaturen [K]

Värmeflödet vid ytan erhålls enligt Ekvation 33.

$$\dot{q}''_{yta,i} = \varepsilon [\dot{q}''_{inc,i} - \sigma [T_{i-1}(0,t)]^4] + h [T_{g,i} - T_{i-1}(0,t)]$$

Ekvation 33

Där

$\dot{q}''_{yta}$  = Värmeflödet vid ytan [kW/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$  = Emissivitet [-]

$\sigma$  = Stefan-Boltzmanns konstant [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]

$T_{i-1}$  = Temperaturen hos materialet i föregående tidssteg [K]

$\dot{q}''_{inc}$  = Infallande strålning [kW/m<sup>2</sup>]

$T_g$  = Temperaturen hos den närliggande gasen [K]

Som synes sker detta genom att en återkoppling med föregående tidssteg görs vid beräkning av värmeflödet vid ytan. Denna återkoppling återfinns då även i den diskreta serien för varje tidssteg. Modellen kan återspegla både en gastemperatur vid ytan och infallande strålning som beror av tiden. Den erhållna temperaturkurvan kan sedan kontrolleras mot antändningskriterier och hela förfarandet kan med fördel genomföras i program så som Excel eller Matlab. Den intresserade läsaren hänvisas till Sjöström & Wickström (2013).

### 6.3.3 Kriterier för fönsterbrott

När ett fönster påverkas av infallande strålning kommer en del att reflekteras, en del släppas igenom och en del absorberas. Den delen av strålningen som absorberas kommer att värma upp fönstret. Delen av fönstret som är infäst i dess båge skuggas från strålningen, det vill säga att den fönsterdelen inte kommer att absorbera någon strålning och därför inte heller värmas upp. Glas har generellt en låg värmeledningsförmåga, därför kommer en temperaturdifferens mellan fönstrets mitt och dess ytterkant uppstå. Ifall glasets temperatur ökar så kommer det även utvidgas och vid en temperaturdifferens mellan olika delar av glaset så kan spänningar uppstå. Ifall glasets dragspänning

överstiger dess draghållfasthet så kommer ett brott att ske. Fönsterbrott av detta slag tenderar att ske längs glasets ytterkant och i ett senare skede kan glaset falla ur dess ram (Babrauskas, 2010).

Det har genomförts mer forskning som syftar att undersöka fönsterbrott i brandrummet än fönsterbrott som uppstår till följd av strålning från en extern källa. En skillnad mellan dessa två fall är att inom brandrummet kommer temperaturskillnaderna som ger upphov till brotten skapas både från strålning och konvektion då varma brandgaser som kommer i kontakt med delar av fönstret. Ur denna forskning kan dock information hämtas angående vilken temperaturdifferens som krävs för att ett brott skall uppstå.

En serie försök som har genomförts är av Harada, et al (2000) i vilka kvadratiska floatglas fönster med måtten 0,61 x 0,61m utsattes för strålning mellan 4,5 – 10 kW/m<sup>2</sup>. Försöken fortgick i totalt 900s och bland annat gavs resultat i form av tid till sprickbildning, tid till glaset föll ur och slutgiltig area som föll ur fönstret. Ur dessa försöksserier kan det skådas att det krävs 4,5 kW/m<sup>2</sup> för att sprickbildning skall ske och åtminstone 9-10 kW/m<sup>2</sup> för att den totala arean utfallet glas ur fönstret skall uppgå till över 10 % av total area. Vid strålnings nivåer kring 5kW/m<sup>2</sup> uppvisas areor utfallet glas på nivåer kring 0,1-2 % av total area. I Tabell 5 redovisas försöksdata hämtade från nämnda serier försök.

| Infallande strålning | Tid till sprickbildning | Total area utfallet glas | Tid till första glasdel faller ur ram | Tid till sista glasdel faller ur ram |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 8,99                 | 108                     | 17                       | 108                                   | 108                                  |
| 9,03                 | 78                      | 5,3                      | 78                                    | 78                                   |
| 9,23                 | 96                      | 24                       | 96                                    | 220                                  |
| 9,63                 | 88                      | 7,5                      | 88                                    | 88                                   |

Tabell 5. Resultat från fullskaliga försök genomförda av Harada, et al (2000)

#### 6.3.4 Tid till fönsterbrott

På liknande vis som att trä inte antänder direkt då det utsätts för sin kritiska strålningsnivå kommer inte heller ett fönster fallera precis då dess kritiska strålning infaller. Ett sätt att hantera detta som har använts, både vid bedömning av när skador uppstår på kablar och vid bedömning av personskador på grund av värmestrålning, är att väga den kritiska strålningsnivån då ingen skada uppstår mot den infallande strålningen och på så vis få en kritisk dos (Van Hees & Andersson, 2000). Vilket presenteras nedan i Ekvation 34.

$$E_{crit} = (\dot{q}_{inc}'' - \dot{q}_{crit}'') * t_d$$

Ekvation 34

Där

$E_{crit}$  = Kritisk dos [J/m<sup>2</sup>]

$\dot{q}_{inc}''$  = Infallande strålning [W/m<sup>2</sup>]

$\dot{q}_{crit}''$  = Kritisk strålning [W/m<sup>2</sup>]

$t_d$  = Tid till skada uppstår [s]

## 7 Beräkning av brandspridning

*Utifrån de teoretiska modeller som presenteras i kapitel 6 så görs i detta kapitel val av vilka modeller som skall representera de tre undermodellerna. Detta för att sedan genomföra beräkningar utifrån representativa förutsättningar för bebyggelsen ifråga.*

### 7.1 Spridning via fönster

För att undersöka spridningsvägen som har sin grund i värmestrålning från fönster undersöks i detta avsnitt vilka beräkningsmodeller och antaganden som bäst avspeglar förutsättningarna i brandrummet. Samt vilka förhållanden som råder mellan brandrum och motstående fasad.

#### 7.1.1 Strålning från källans intensitet

Det finns fördelar och nackdelar med de olika modellerna som återspeglar temperaturförloppet i brandrummet. Metodiken som används för att välja vilken modell som bäst återspeglar en tät trähusbebyggelse är att jämföra de olika modellerna med varandra, speciellt i skiljelinjen hur de hanterar omslutande konstruktion och mot fullskaliga försök

Magnusson-Thelanderssons brandförloppskurvor är anpassade för ett brandrum med en omslutande konstruktion uppbyggd av betong, lättbetong eller stål. Detta påverkar brandförloppet så till vida att den omslutande konstruktionen inte kan förväntas delta i förloppet och att inneslutningen inte har samma egenskaper som en typisk träbyggnad. Varvid denna metod inte är lämpad att användas som modell för träbyggnader.

Standardkurvan ISO 834 används mestadels i syfte att testa olika material och konstruktioners motståndskraft mot brand. Den ger en grov bild av ett temperaturförlopp och gör ingen skillnad på olika förutsättningar vad gäller omslutande konstruktion. Den anses inte lämpa sig inte väl för att återspegla ett brandförlopp i träbyggnader.

Eurocode metoden använder både omslutande material och öppningsfaktor som ingående värden och har ett giltighetsområde för värmeledningsförmåga på mellan 10-2000 W/mK<sup>2</sup>. Vanliga värdena för trä är runt 500 W/mK<sup>2</sup> (Bengtsson, 2001). Eurocode metoden anses kunna beskriva brandförloppet inom en träbyggnad.

Wikströms metod hanterar den omslutande konstruktionen genom modellera det som ett elektriskt motstånd. Metoden använder även öppningsfaktor som ingående parameter och anses kunna användas för att beskriva brandförloppet inom ett trähus.

##### 7.1.1.1 Termisk tröghet hos den omslutande konstruktionen

Termiska trögheten hos den omslutande konstruktionen har inverkan på temperaturförloppet och denna parameter behöver därför kvantifieras för ett typiskt trähus. Utifrån inventeringsunderlaget från platsbesöken på Marstrandsön så finns det ett antal olika typer av omslutande material. En del byggnader var konstruerade av massiva trästockar med eller utan ett lager av gips. Andra byggnader hade väggar uppreglade med luftspalter inom väggarna. Det som anses vara vanligast utifrån inventeringen är att väggarna består av massivt trä i form av stockar eller plankor.

Utöver detta beror den termiska trögheten hos materialet på vilket träslag och hur stor andel fukt det innehåller. Träslaget furu används vidare då detta anses vara ett representativt träslag för bebyggelsestypen och medför följande termiska tröghet (Bengtsson, 2001):

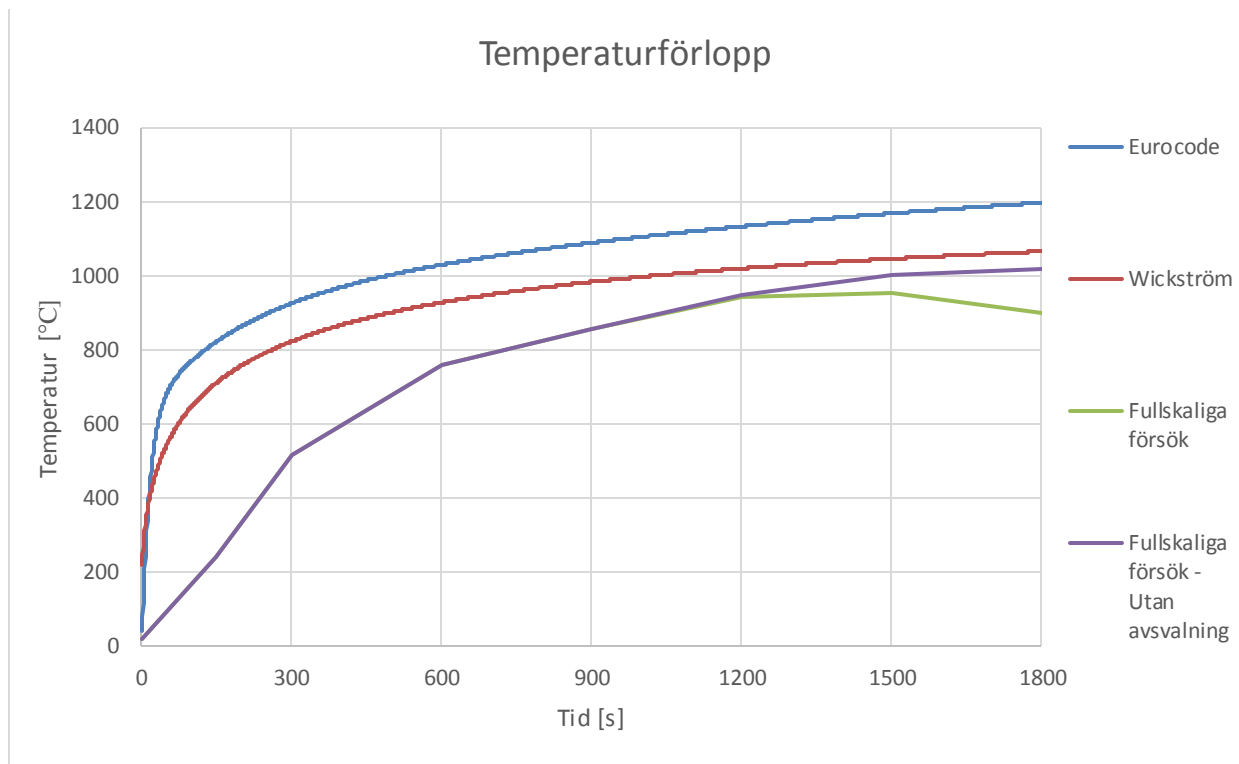


$k = 0,14 \text{ W/mK}$   
 $\rho = 520 \text{ kg/m}^3$   
 $c = 2850 \text{ J/kgK}$

Vilket tillsammans blir  $210000 \text{ W}^2\text{s/m}^4\text{K}^2$ .

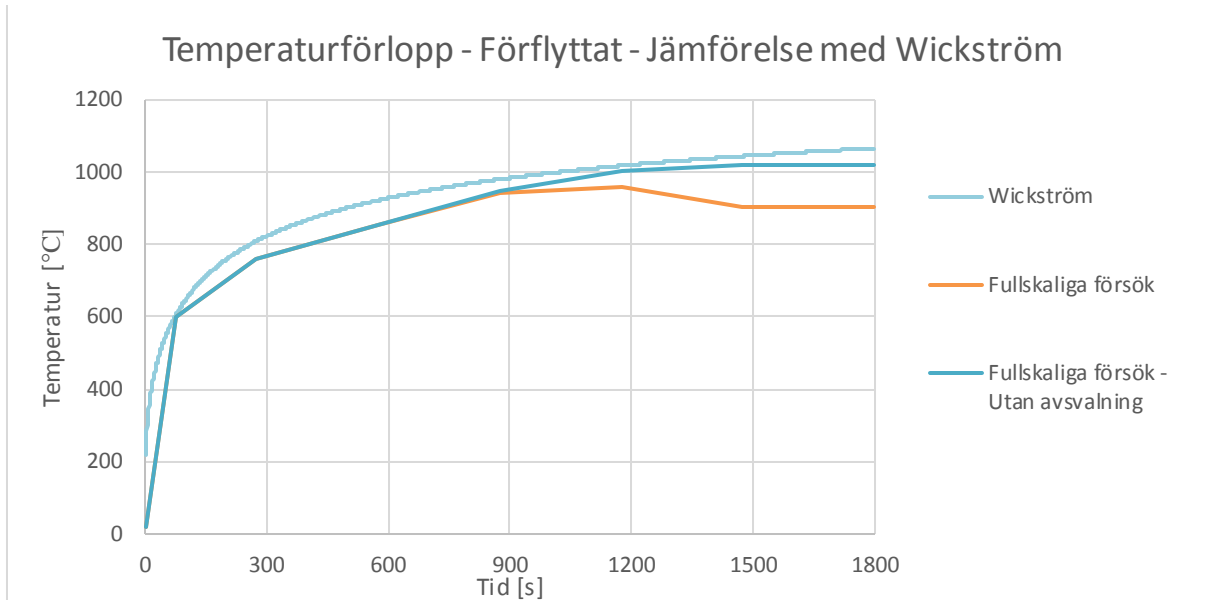
### 7.1.1.2 Val av modell

För att bestämma vilken av modellerna som skall användas fortsättningsvis jämförs de med varandra och med fullskaliga försök. För att bättre jämföra de olika modellerna så förlängs temperaturkurvorna från de fullskaliga försöken så att de sträcker sig över 30 minuter, detta genom att det sista värdet som uppvisas ansätts i varje tidssteg fram till 30 minuter. De fullskaliga försöken genomfördes med en öppningsfaktor på 0,06 vilket används i de två framtagna temperaturförloppen. Temperaturförloppen jämförs i Figur 21.

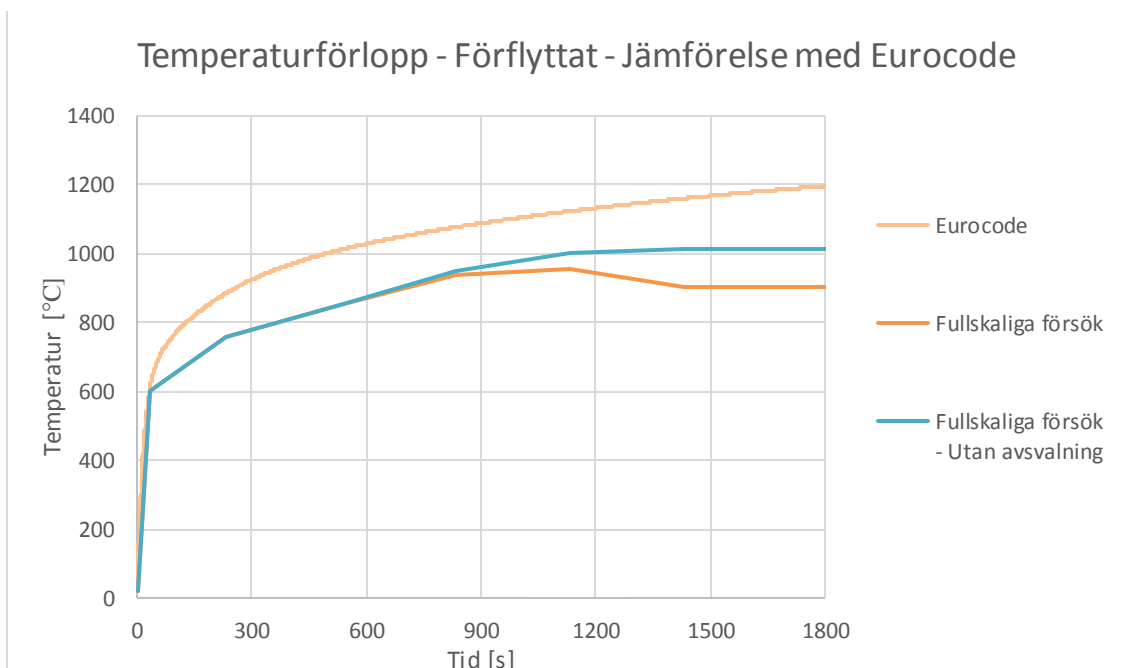


Figur 21. Jämförelse av temperaturförlopp

Eftersom de framtagna temperaturförloppen uppnår sitt giltighetsområde först då temperaturökningen börjar plana ut och stabiliseras så jämförs temperaturförloppen när de parallellförflyttas så att 600 °C sammanfaller. Detta för att bestämma hur väl de framtagna temperaturförloppen stämmer överens med de fullskaliga försöken och därmed ifall de kan användas för att modellera temperaturförloppet efter övertändning. Jämförelsen visas i Figur 22 och Figur 23.



Figur 22. Jämförelse av Wickström och förflyttat fullskaligt försök

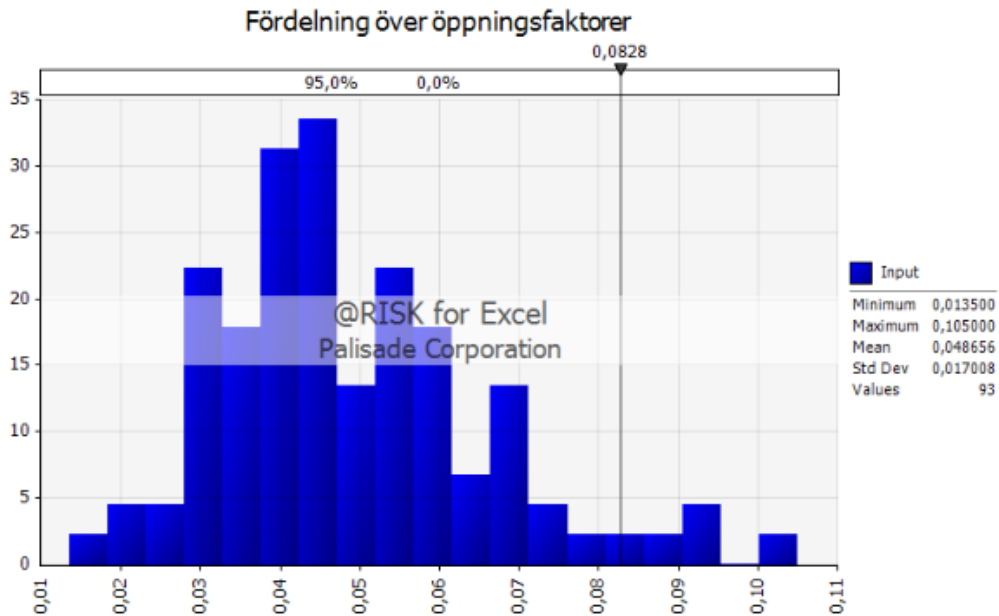


Figur 23. Jämförelse av Eurocode och förflyttat fullskaligt försök

Då Wickströms modell ligger närmare de fullskaliga försöken, både med och utan avsvälningsfas, så används denna vidare.

### 7.1.1.3 Öppningsfaktor

Öppningsfaktorn som används för att skapa det dimensionerande temperaturförloppet baseras på inventeringsunderlaget som genomförts i förarbetet. Underlaget innehåller värden för öppningsfaktorer från 93 byggnader på ön Marstrand. Inventeringsunderlaget visas i Figur 24.

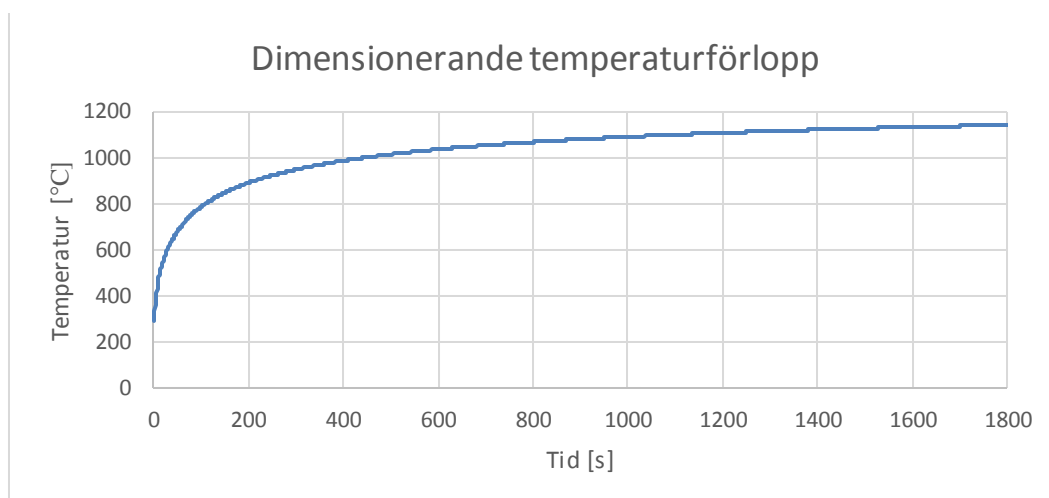


Figur 24. Inventeringsunderlag för öppningsfaktorer

Den vanligaste öppningsfaktorn är 0,049. Värdet för som motsvarar den 95:e percentilen är 0,082. Den 95:e percentilen täcker in en stor del av de värdena som kan uppkomma inom den områdestypen i fråga utan att täcka in de övre extremvärdena och kommer därför att användas vidare.

### 7.1.1.4 Dimensionerande temperaturförlopp

Med Wickströms metod och en öppningsfaktor på 0,08 samt en omslutande konstruktion i form av massivt furu får det dimensionerande temperaturförloppet ett utseende enligt Figur 25.



Figur 25. Graf över det dimensionerande temperaturförloppet

## 7.1.2 Konfigurationsfaktor

I fallet där strålning sker från ett fönster till en punkt genomförs beräkningar utifrån de principer som presenteras i avsnitt 6.2. Detta avsnitt ämnar att besvara vilken konfigurationsfaktor som är gällande vid de tänkbara konfigurationer som kan uppkomma mellan två fasader i tät trähusbebyggelse. Detta för att vidare kunna bedöma vilken tid det tar innan spridning sker till en intilliggande byggnad.

Avsnittet ämnar även besvara hur de parametrar som ingår i beräkningen av konfigurationsfaktor förhåller sig till varandra och hur det påverkar resulterande konfigurationsfaktor. Detta för att vidare kunna formulera kriterier till checklisten. Nedan nämnda parametrar kommer varieras för att utgöra förutsättningar för olika försöksupställningar.

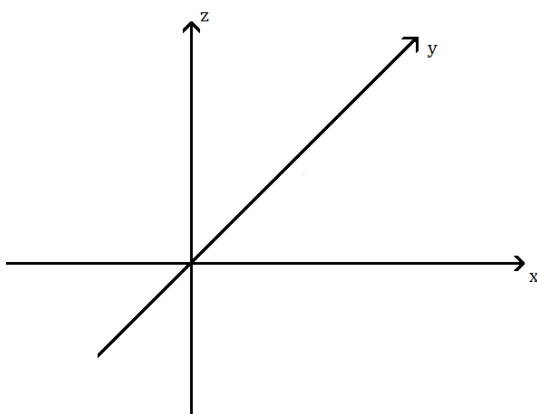
- Mätpunktens position
- Fönstrets storlek
- Avstånd mellan fönster i det brinnande rummet

### 7.1.2.1 Avgränsningar

Det finns oändligt många konfigurationer som kan uppkomma. För att problemet ska bli greppbart så görs ett antal avgränsningar så att beräkningarna hanterar den centrala problematiken med ett färre antal försöksupställningar.

- Beräkningar genomförs för mätpunkter i utsträckningen x- och y-led. Eftersom en högre konfigurationsfaktor förväntas uppkomma i xy-planet där  $z=0$  i jämförelse med övriga xy-plan är det också mätpunkter i detta plan som är mest relevanta att undersöka. Beräkningar i detta plan förväntas vara tillräckligt för att skapa kriterier för checklisten.
- Fönstrens storlek varieras i termer av fönster med standardmått. Fönster kan vara av olika storlekar och geometrier. Med denna avgränsning täcks en stor del av de fönster som typiskt förekommer in.

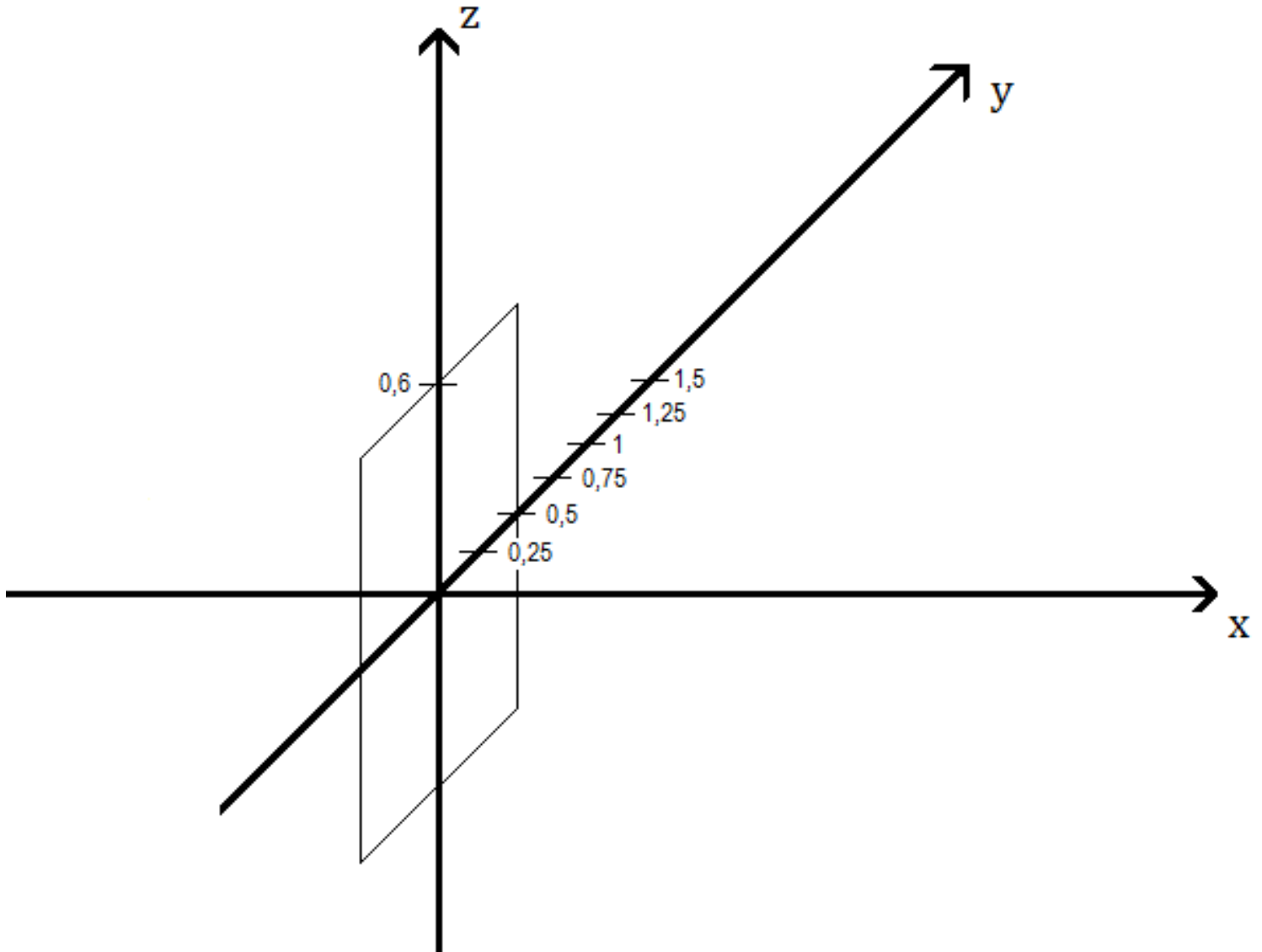
För att erhålla en systematik i arbetssättet definieras ett koordinatsystem och mätpunkternas placering är i enlighet med detta, se Figur 26.



Figur 26. Koordinatsystem i x-,y- och z-led

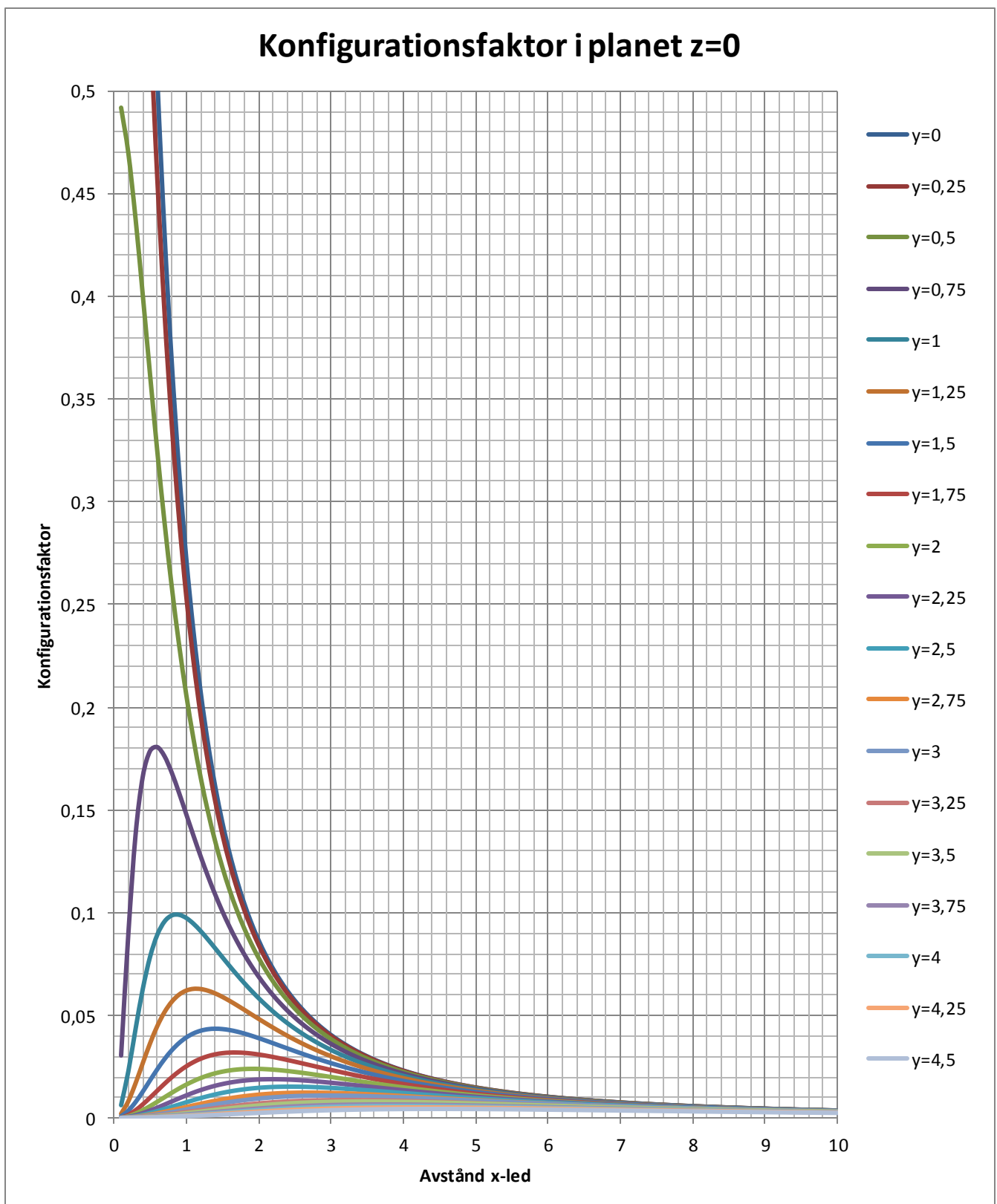
### 7.1.2.2 Konfigurationsfaktor för fönster med standardmått beroende av mätpunktens position

För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn så ställs en försöksupställning upp där ett fönster av storleken 1x1,2m placeras med centrum i origo. Försöksupställningen visas i Figur 27.



Figur 27. Försöksupställning för ett fönster

I Figur 28 presenteras resultatet av hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på avstånd från fönstrets centrum, d.v.s. origo och mätpunkt i x- och y-led.



Figur 28. Konfigurationsfaktor beroende på avstånd från fönstrets centrum

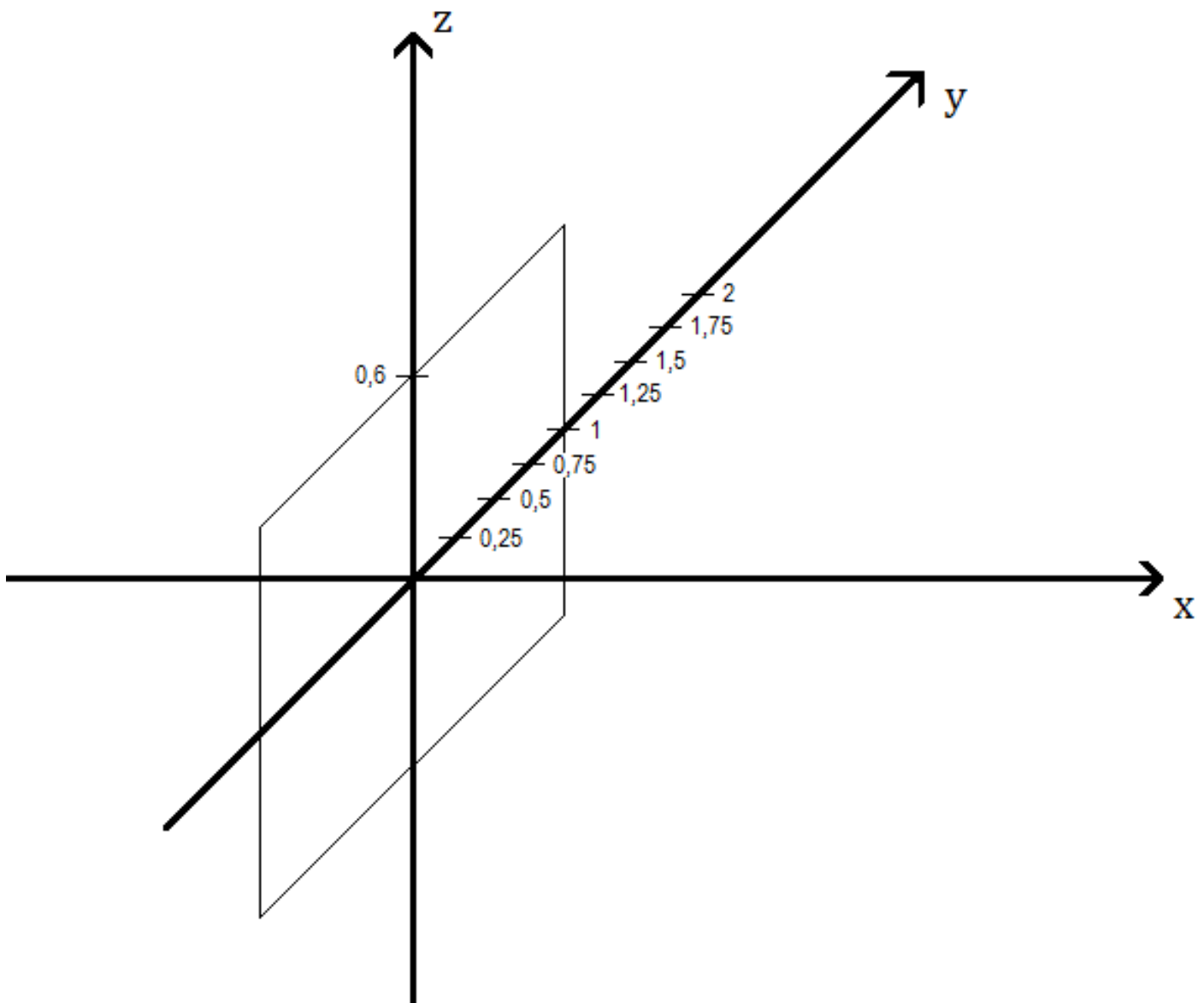
Grafen visar hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på mätpunktens position. Variation i y-led motsvarar mätpunktens position förflyttad i sidled. Den största skillnaden i konfigurationsfaktor

uppvisas på korta avstånd i x-led, vilket motsvarar det vinkelräta avståndet från fönstret. På längre avstånd i x-led sammanfaller konfigurationsfaktorn. Detta resultat kan tolkas som att mätpunktens förflyttning i sidled har mindre betydelse för konfigurationsfaktorn då det vinkelräta avståndet är från fönstret ökar. Grafen visar också att konfigurationsfaktorn avtar med ökande vinkelräta avstånd från fönstret då det är längre än ca 1 meter.

### 7.1.2.3 Konfigurationsfaktor för två sammanhängande fönster med standardmått beroende av mätpunktens position

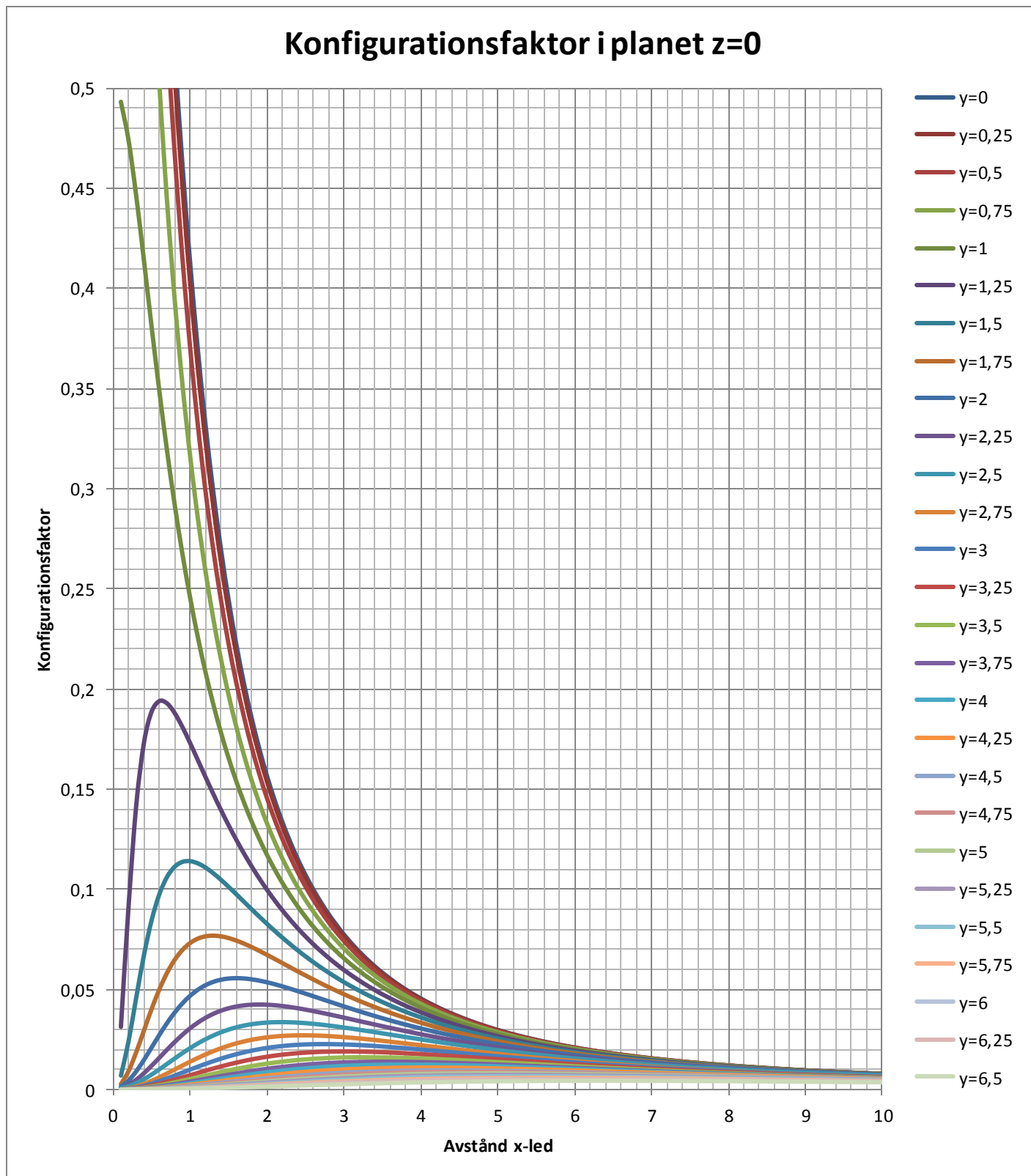
På liknande sätt ansätts en försöksuppställning där ett dubbelt så brett fönster istället utgör den strålande ytan. Fönstrets mått är då istället 2x1,2 m och dess centrum är i origo.

Försöksuppställningen får då ett utseende enligt Figur 29.



Figur 29. Försöksuppställning för två sammanhängande fönster

I Figur 30 presenteras det resultat som erhålls vid beräkning av konfigurationsfaktor beroende på avstånd från fönstrets centrum, d.v.s. origo och mätpunkt i x- och y-led.



Figur 30. Graf över konfigurationsfaktorn beroende på avstånd från två sammanhängande fönsters centrum

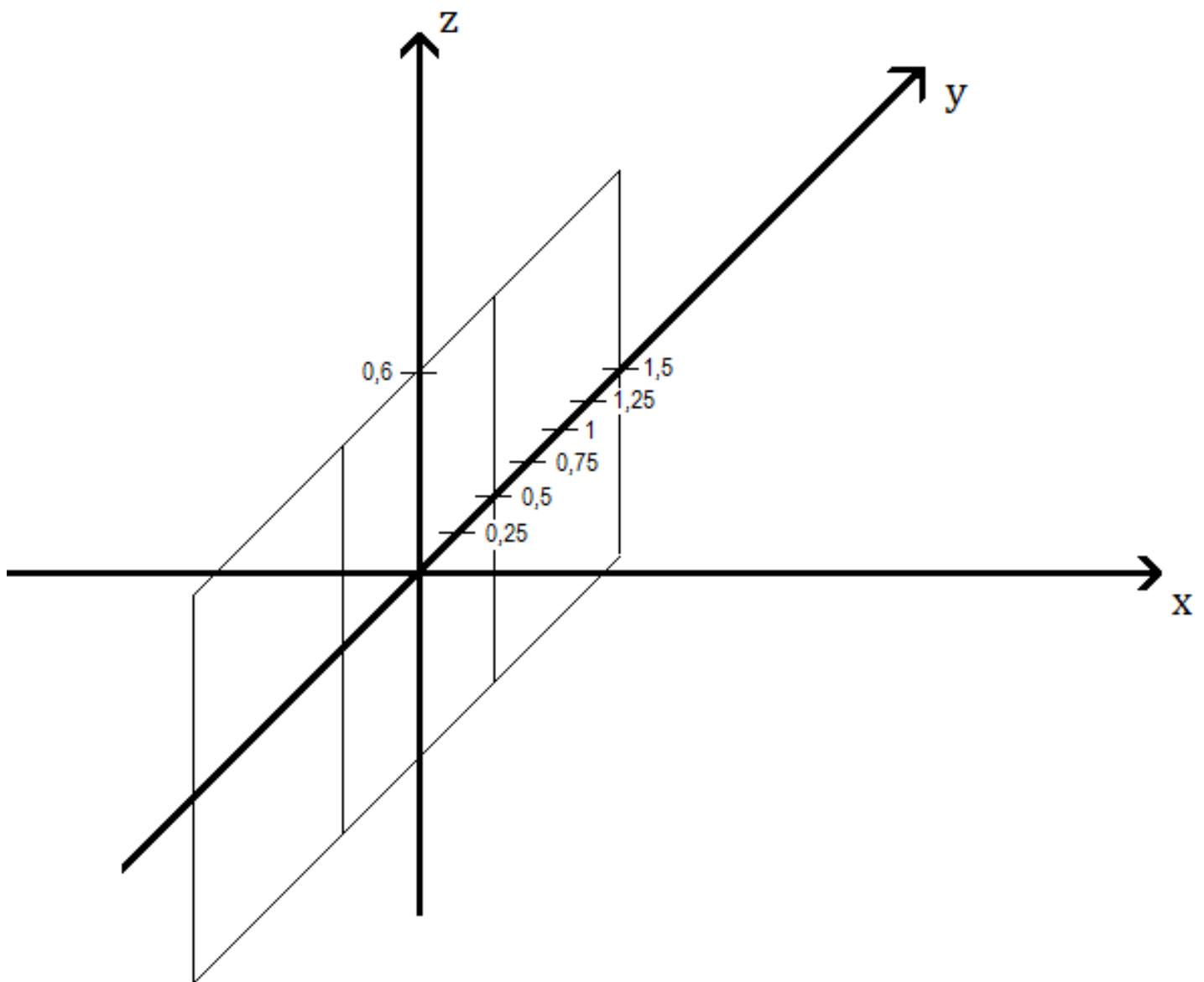
Grafen visar hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på mätpunktens position för två sammanhängande fönster. Resultatet visar på samma tendenser som resultatet för ett



sammanhängande fönster men med skillnaden att konfigurationsfaktorn är något högre i respektive mätpunkt.

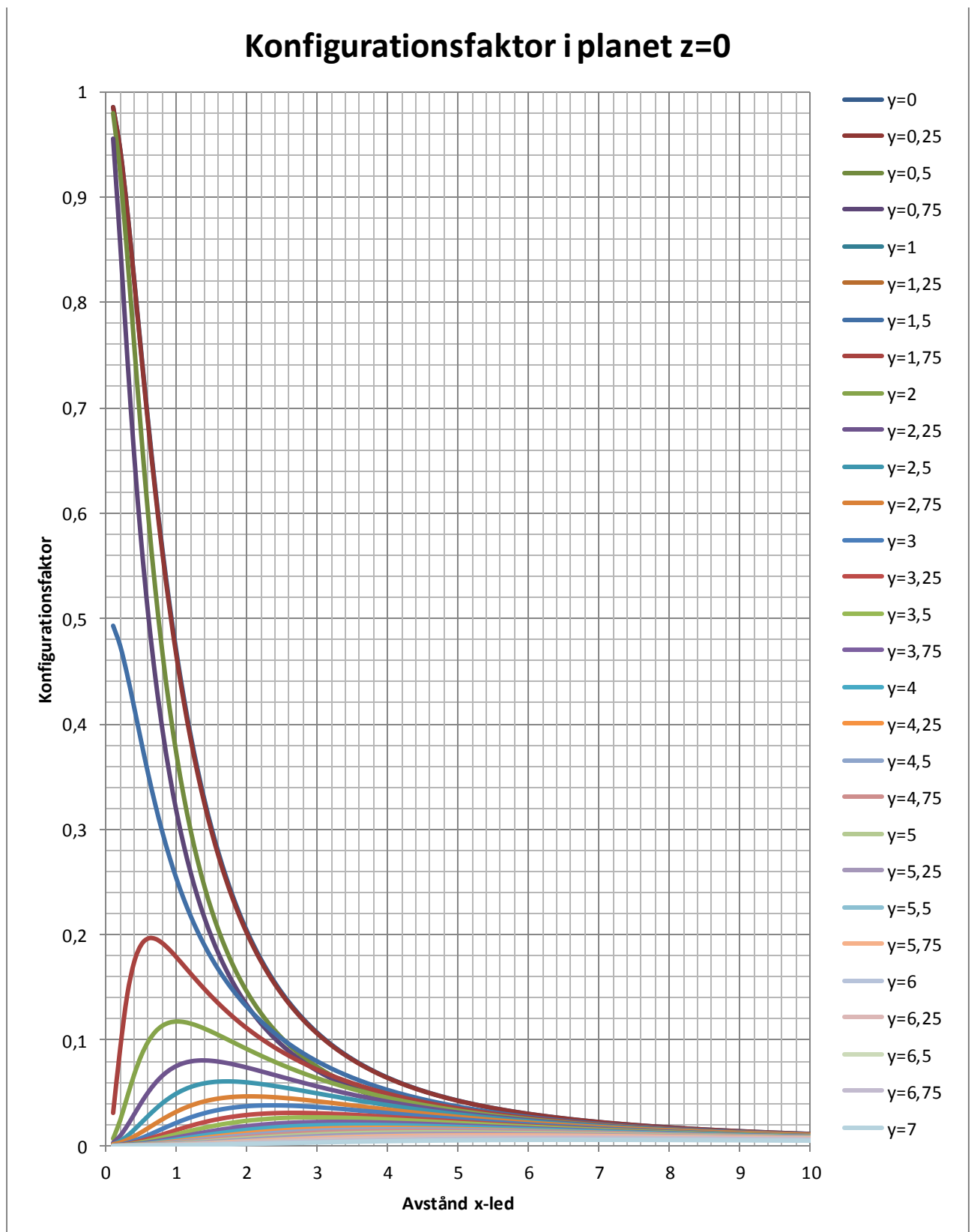
#### 7.1.2.4 Konfigurationsfaktor för tre sammanhängande fönster med standardmått beroende av mätpunktens position

För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn så undersöks en försöksupställning där ett fönster av storleken 3x1,2m placeras med centrum i origo. Försöksupställningen demonstreras i Figur 31.



Figur 31. Försöksupställning för tre sammanhängande fönster

I Figur 32 presenteras resultatet av hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på avstånd från fönstrets centrum, d.v.s. origo och mätpunkt i x- och y-led.

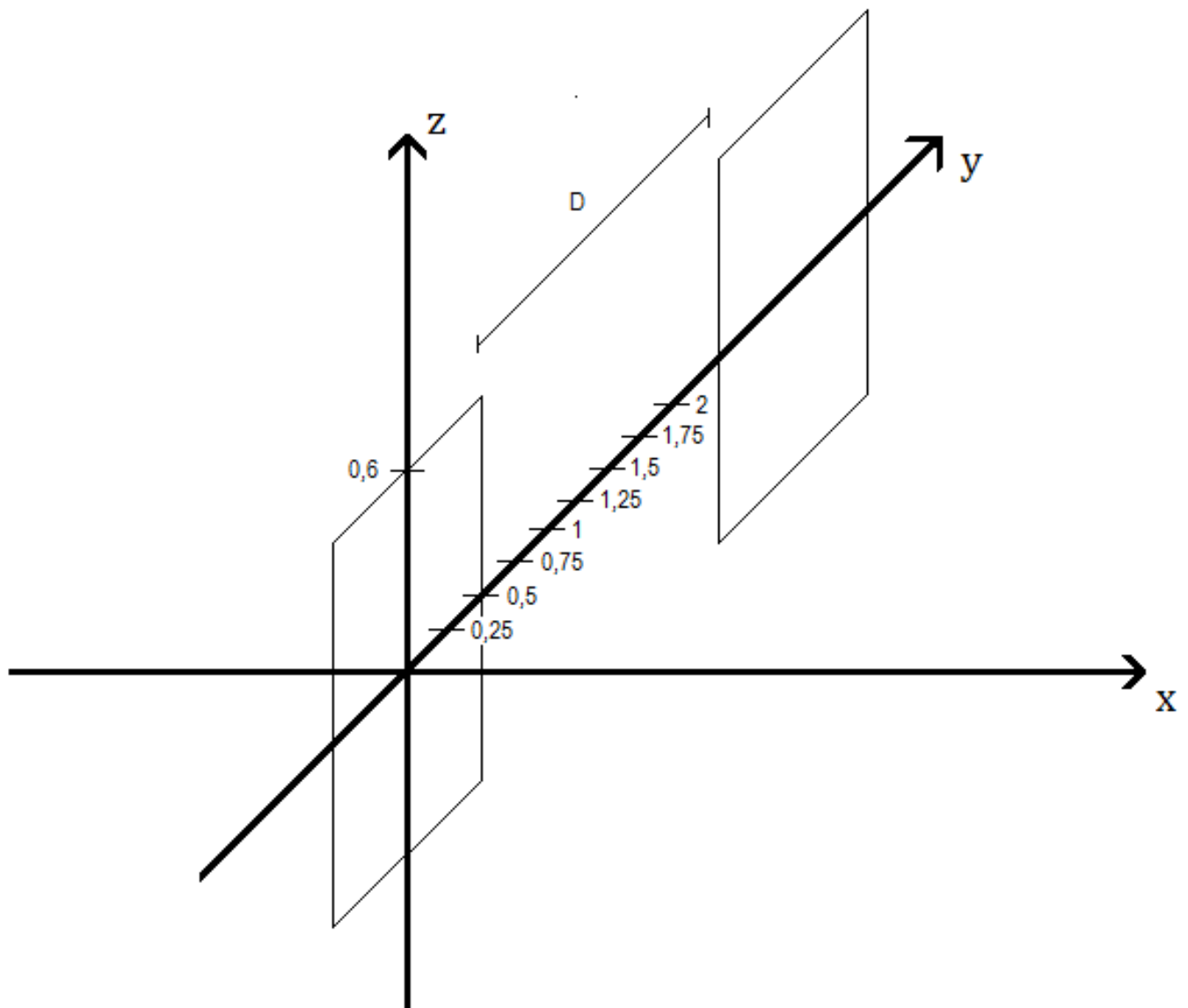


Figur 32. Graf över konfigurationsfaktorn beroende på avstånd från tre sammanhängande fönsters centrum

Grafen visar hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på mätpunktens position för tre sammanhängande fönster. Resultatet visar på samma tendenser som resultatet för ett och två sammanhängande fönster men med skillnaden att konfigurationsfaktorn är något högre i respektive mätpunkt.

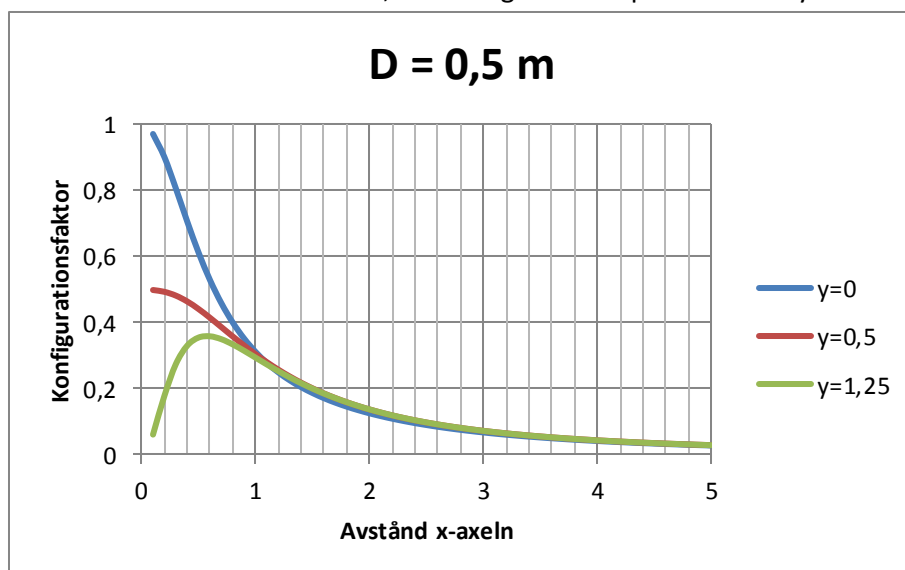
#### 7.1.2.5 Konfigurationsfaktor för två separerade fönster med standardmått

I fall då flera separerade fönster strålar undersöks var den största konfigurationsfaktorn förekommer. För att undersöka detta placeras ett fönster med måtten  $1 \times 1,2$  m likt tidigare med centrum i origo. Utöver detta placeras ytterligare ett fönster med måtten  $1 \times 1,2$  m på avståndet  $D$  i planet  $x=0$ . De axlar som anses vara intressanta att undersöka är längs centrumlinjen på ett fönster,  $y=0$ , i fönstrets ytterkant,  $y=0,5$ , samt axeln mitt mellan fönstren vilket varierar beroende på separationsavstånd,  $D$ . Försöksupställning presenteras i Figur 33.

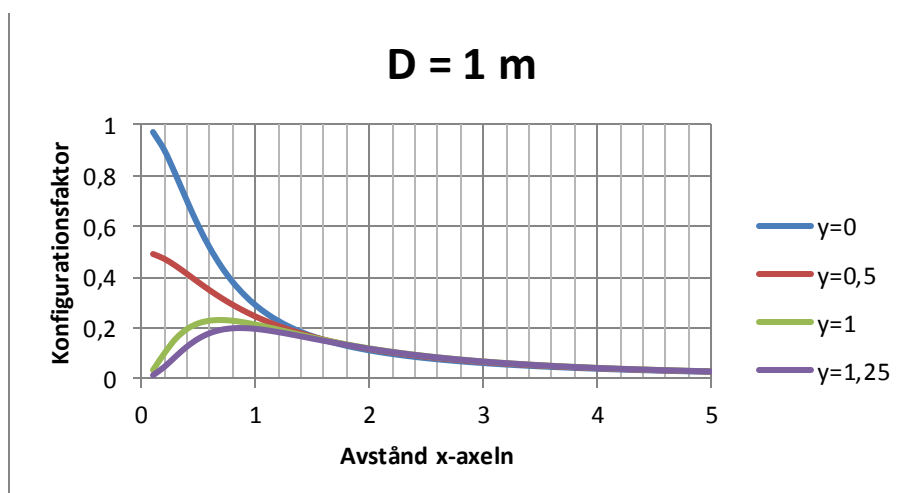


Figur 33. Försöksupställning för två separerade fönster

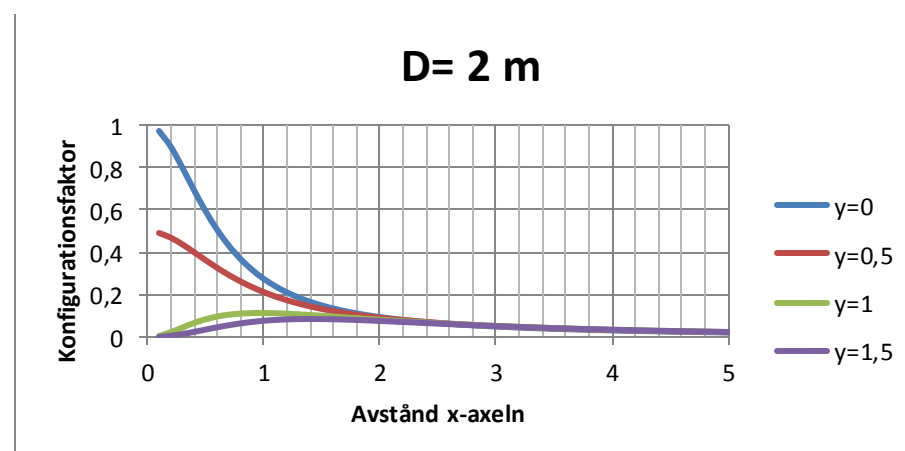
I Figur 34 till Figur 36 presenteras resultatet av hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på avstånd från fönstrets centrum, d.v.s. origo och mätpunkt i x- och y-led.



Figur 34. Graf över konfigurationsfaktor för två fönster separerade 0,5m



Figur 35. Graf över konfigurationsfaktor för två fönster separerade 1m

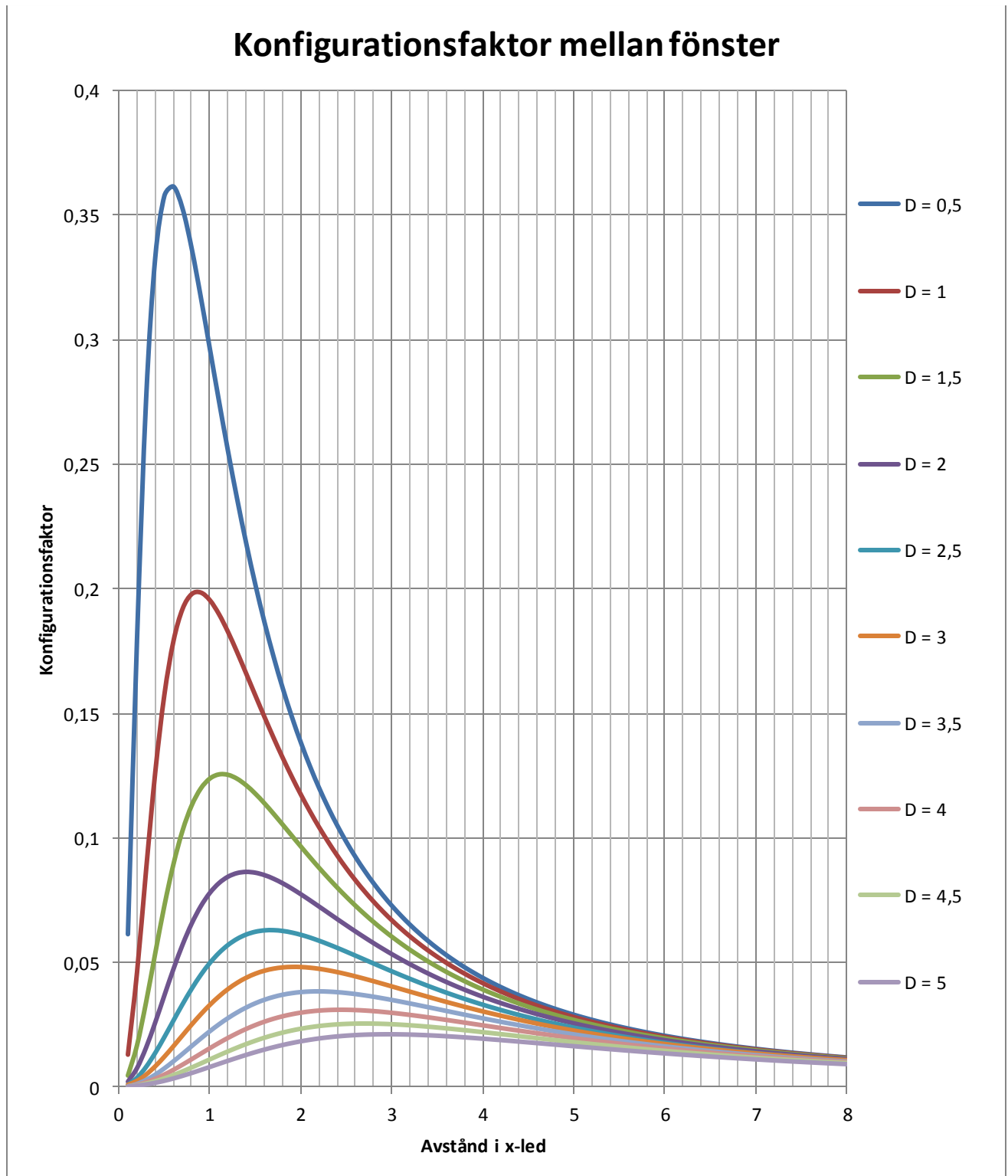


Figur 36. Graf över konfigurationsfaktor för två fönster separerade 2m

Graferna visar hur konfigurationsfaktorn varierar beroende på mätpunktens position för två separerade fönster med separationsavstånden 0,5, 1 och 2 meter. I alla försöksupställningar sammanfaller kurvorna som motsvarar förflyttningen i y-led, alltså förflyttning i sidled. Skillnaden mellan graferna är att kurvornas sammanfallande sker på olika avstånd beroende på hur långt separationsavståndet är. Detta resultat kan tolkas som att det för varje separationsavstånd finns ett vinkelrät avstånd då konfigurationsfaktorn är densamma oavsett vilken position mätpunkten har i sidled. Det vinkelräta avståndet då kurvorna sammanfaller ökar med ökande separationsavstånd.

### 7.1.2.6 Konfigurationsfaktor mitt mellan två separerade fönster med standardmått

Enligt resultatet för ovan genomförda beräkningar så sammanfaller kurvorna på ett visst avstånd. På detta avstånd är alltså konfigurationsfaktorn densamma oavsett hur långt i sidled mätpunkten förflyttas, så länge den är mellan fönstren. I försöksupställningen beräknas konfigurationsfaktorn mitt mellan två separerade fönster med varierande avstånd,  $D$ . Resultatet presenteras i Figur 37.



Figur 37. Graf över konfigurationsfaktor mitt mellan två separerade fönster med varierande separationsavstånd

### 7.1.3 Antändning

Metodiken som används för antändningsförloppet vid den närliggande fasaden är att ställa upp antändningskriterier, både för trä och glas. Genom att sedan modellera när antändningskriterierna överstigs erhålls tiden till antändning.

#### 7.1.3.1 Trä

Modellen som väljs för att återspegla temperaturökningen i en motstående fasad är modellen presenterad i 6.3. Detta då den ger möjlighet att modellera en transient infallande strålning. Förutsättningarna som antas gälla och sedan används i modellen är att den motstående fasaden är konstruerad i träslaget furu och att har en initialtemperatur på 20 °C samt att den påverkas av en gas som har temperaturen 20 °C. Utöver detta så har den motstående fasaden ett konvektivt värmeövergångstal som är typiskt för bränder (Brandteknik LTH, 1990). De Ingående parametrar presenteras i Tabell 6;

| Storhet                      | Förkortning   | Enhet              | Värde  |
|------------------------------|---------------|--------------------|--------|
| Värmeledningsförmåga         | k             | W/mK               | 0,14   |
| Densitet                     | $\rho$        | kg/m <sup>3</sup>  | 520    |
| Värmekapacitet               | c             | J/kgK              | 2850   |
| Emissivitet                  | $\varepsilon$ | -                  | 0,8    |
| Konvektivt värmeövergångstal | $h_c$         | W/m <sup>2</sup> K | 25     |
| Initialtemperatur vägg       | $T_0$         | K                  | 293,15 |
| Omgivande temperatur         | $T_\infty$    | K                  | 293,15 |

Tabell 6. Parametrar för modellering av antändning av trä

Det antändningskriterium som ansätts för att beskriva antändningen av trä är att den kritiska temperaturen för träslaget furu som ligger mellan 300 till 400 °C. Antändningskriteriet som används vidare är 300 °C.

#### 7.1.3.2 Glas

Kriteriet som ansätts för att återspegla ett glasbrott är den motsvarande strålningsdosen som krävs för att ett singel floatglasfönster skall falla ur dess båge med en betydande area i förhållande till den totala arean. Modellen som används för att ta fram denna strålningsdos är samma som senare används för att beräkna tiden det tar tills fönstret fallerar med en transient infallande strålning. Beräkning utförs med Ekvation 34 och den kritiska infallande strålningsnivån ansätts till 5,5 kW/m<sup>2</sup>. I de fullskaliga försöken motsvarar nivån kring 5,5 kW/m<sup>2</sup> gränsen mellan att sprickor aldrig uppkommer och att en liten area i förhållande till fönstrets totala area faller ut. Den lägsta strålningsnivån som ger upphov till betydande utfall av glas ligger kring 9-9,5 kW/m<sup>2</sup> varvid detta blir nivån som används tillsammans med motsvarande tid till skadekriteriet överstigs. I de fullskaliga försöken erhöles det största utfallet på en tid omkring 200s. Den kritiska dosen enligt Ekvation 34 till 800 000 J/m<sup>2</sup>.

##### 7.1.3.2.1 Avgränsning

Ingen hänsyn tas till variationer av initialtemperatur och omgivande gastemperatur vid den motstående fasaden.

## 7.2 Spridning via takgenombränning

### 7.2.1 Strålände källans intensitet

I ekvation 1 som beskriver den strålände källans intensitet så är temperatur den parameter som har störst inverkan på resultatet eftersom termen har exponenten fyra. Detta innebär att en felaktig uppskattning av temperaturen medför ett stort fel på den strålände källans intensitet. Det finns många faktorer som påverkar flammans temperatur, bland annat vilket material som brinner och över hur stor yta.

Temperatur i en flamma kan bestämmas med analytiska modeller. Dock så svarar inte de analytiska modellerna väl mot de förhållanden som råder. Det skulle kräva en ingående inventering av interiören på vindsvåningen i respektive byggnad, vilket förväntas bli ett för tidskrävande och subjektivt moment vid genomförande av checklista. Dessutom begränsas de analytiska modellerna till en maximal temperaturökning på ca 800 °C trots att temperaturer upp emot 1200 °C har uppmätts för stora flammor (Karlsson & Quintiere, 2000). Beräkning av temperatur med hjälp av en analytisk modell medför stora osäkerheter och i arbetet kommer temperaturerna istället att utgå från uppmätta värden vid försök. Beräkningar genomförs med en uppskattad högsta och lägsta temperatur.

Den lägre temperaturen antas vara 800 °C då detta är en temperatur som uppmätts i många tester och är ett vanligt förekommande värde. Vid försök har temperaturer upp emot 1200 °C mätts för fritt brinnande bränslen. Detta gör att det finns anledning att ansätta en högre temperatur så att avståndet inte underskattas. I beräkningsmodellen representeras flammen av en strålände yta med en uniform temperatur. Trots uppmätta temperaturer på 1200 °C så bör den högre temperaturen därför ansättas något lägre. Den högre temperaturen antas därför vara 1100 °C.

### 7.2.2 Konfigurationsfaktor

Detta avsnitt ämnar att besvara vilken konfigurationsfaktor som är gällande vid tänkbara konfigurationer som kan uppkomma mellan en flamma vid takgenombränning och omgivande byggnader. Detta för att vidare kunna bedöma vid vilka avstånd en brand kan sprida sig genom strålning från flamma vid takgenombränning.

#### 7.2.2.1 Val av modell

I fallet där strålning sker från en flamma vid takgenombränning genomförs beräkningar enligt de beräkningsprinciper presenterade i avsnitt 6.2. För fritt brinnande flammor som i fallet med takgenombränning kan konfigurationsfaktorn beräknas som en strålände yta till en punkt. Den dimensionerande ytan utgörs av flamhöjden och flammans bas.

#### 7.2.2.2 Antaganden

Till skillnad från när den strålände ytan utgörs av ett fönster där ytan är förhållandevis klart definierad, så uppkommer svårigheter med att definiera en dimensionerande yta för flammor vid takgenombränning i och med att flammans bas breder ut sig och fluktuerar i höjdlid. För att kunna genomföra beräkningar där flammen ses som en dimensionerande yta görs därför antaganden gällande flammans höjd och bredd.

- Den strålände ytans bredd antas vara  $\sqrt{A}$  där A är arean för det översta våningsplanet.
- Den strålände ytans höjd antas vara 5 meter då detta är en flamhöjd som observerats vid bränder i motsvarande bebyggelse.



### 7.2.2.3 Avgränsningar

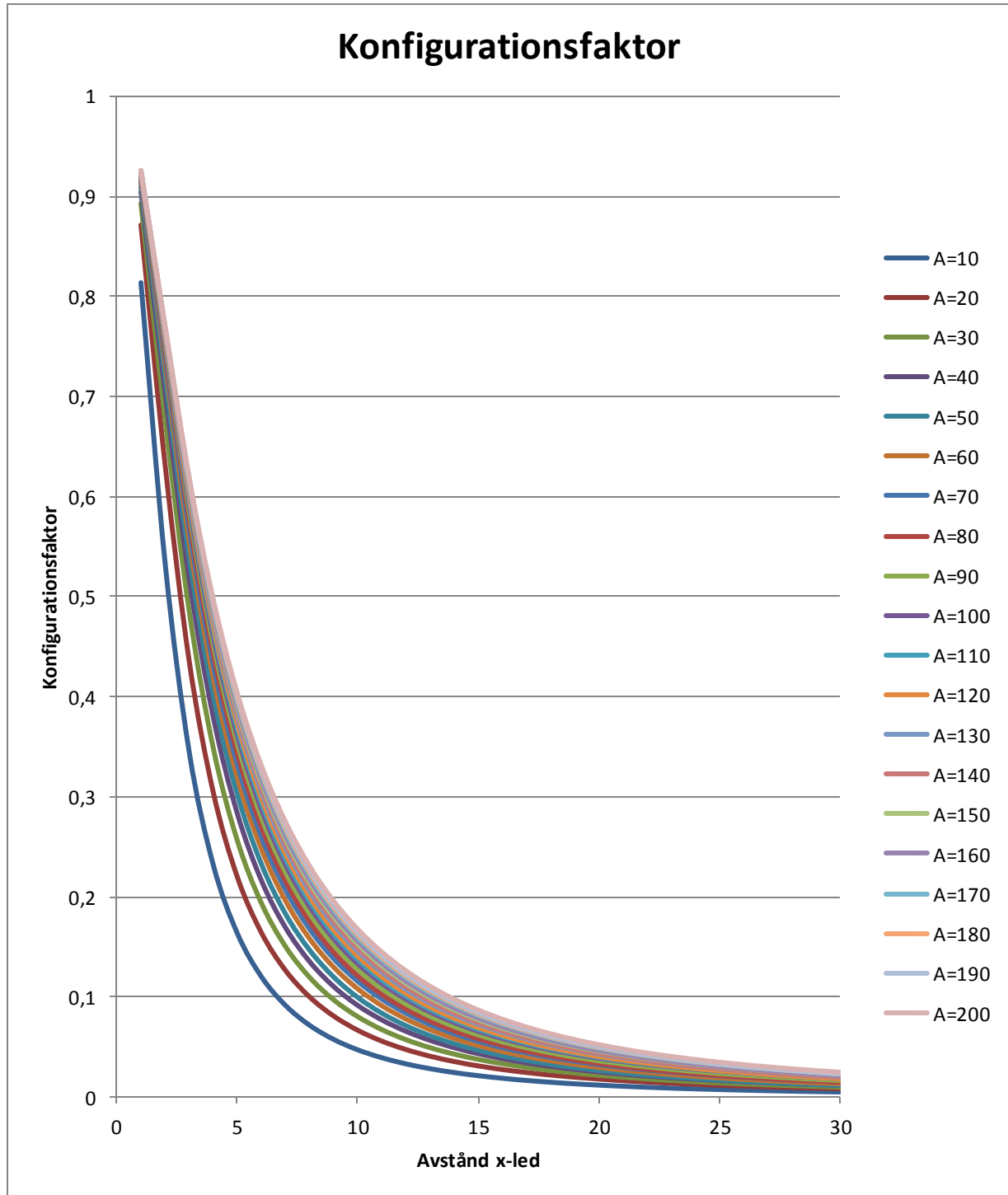
Det finns oändligt många olika avstånd och nivåskillnader mellan byggnader som kan förekomma. I jämförelse med konfigurationsfaktorberäkningar för en strålande fönsteryta är beräkningarna något färre för strålning från en flamma vid takgenombränning. Detta då beräkningarna syftar till att bestämma på vilket avstånd en kritisk strålningsnivå överstigs istället för den strålning som kan uppkomma i olika mätpunkter. Till följd av antagandet att den karakteristiska diametern är  $\sqrt{A}$  kommer detta avstånd att vara samma i alla riktningar och avgränsningen handlar snarare om att bestämma konfigurationsfaktorer vid olika nivåskillnader.

- Beräkningar genomförs för mätpunkter med utsträckning i x- och z-led.

För att erhålla en systematik i arbetssättet användas även i dessa beräkningar det tidigare definierade koordinatsystemet, se Figur 26.

#### 7.2.2.4 Konfigurationsfaktor för olika areor och högre belägen intilliggande fasad

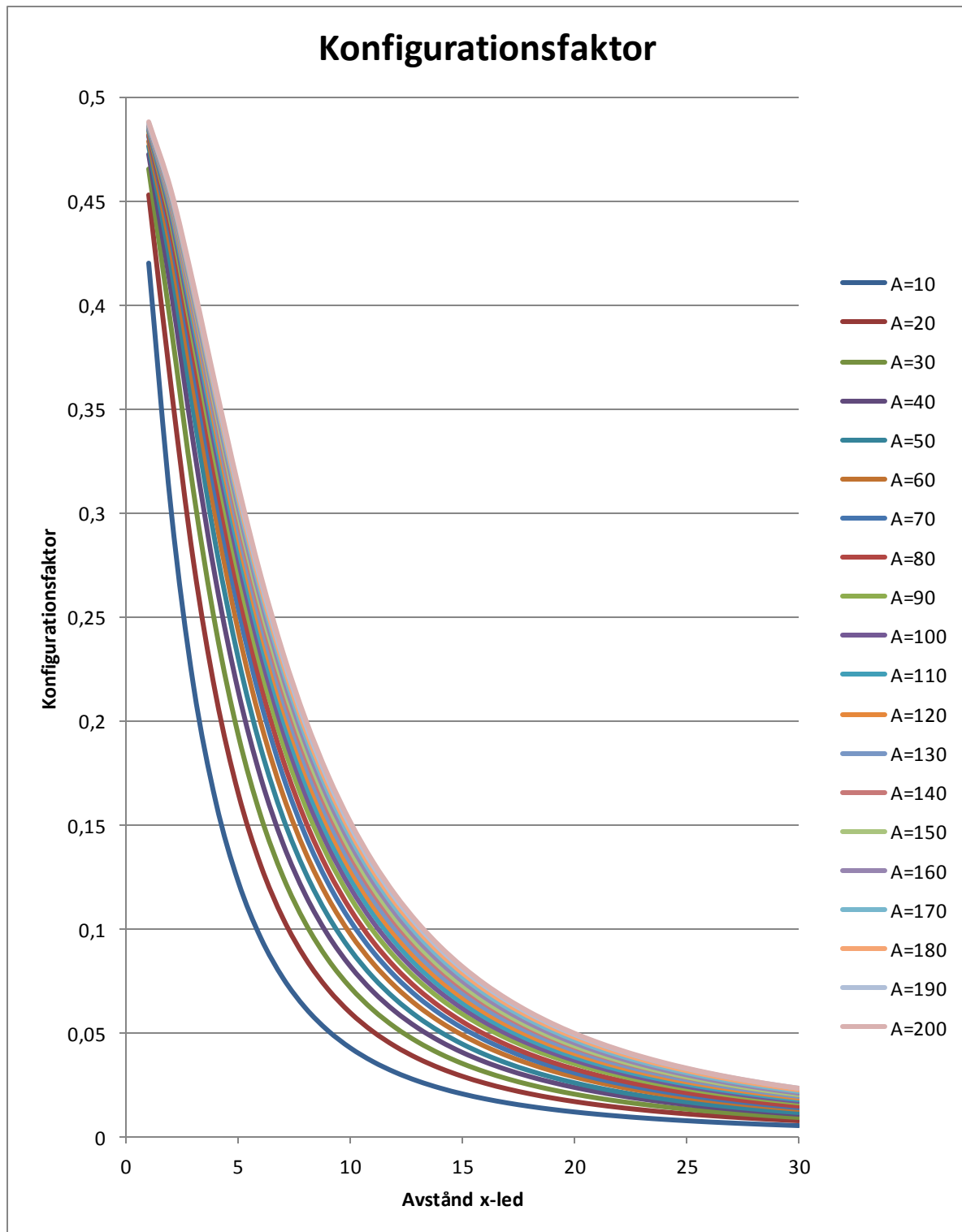
För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn undersöks en försöksuppställning där en rektangulär yta,  $A$ , med höjden 5 meter och bredden  $\sqrt{A}$ .  $A$  varierar sedan mellan 10-200 m<sup>2</sup>. Rektangelns centrum placeras i origo och i ett scenario då den mottagande fasaden är högre än taknivå på det huset där takgenombränning sker, undersöks variationen i utsträckningen längs x-axeln då  $z=0$ . Resulterande konfigurationsfaktor presenteras i Figur 38.



Figur 38. Konfigurationsfaktor för en högre belägen närliggande byggnad med varierade area

### 7.2.2.5 Konfigurationsfaktor för olika areor och intilliggande fasad på samma nivå

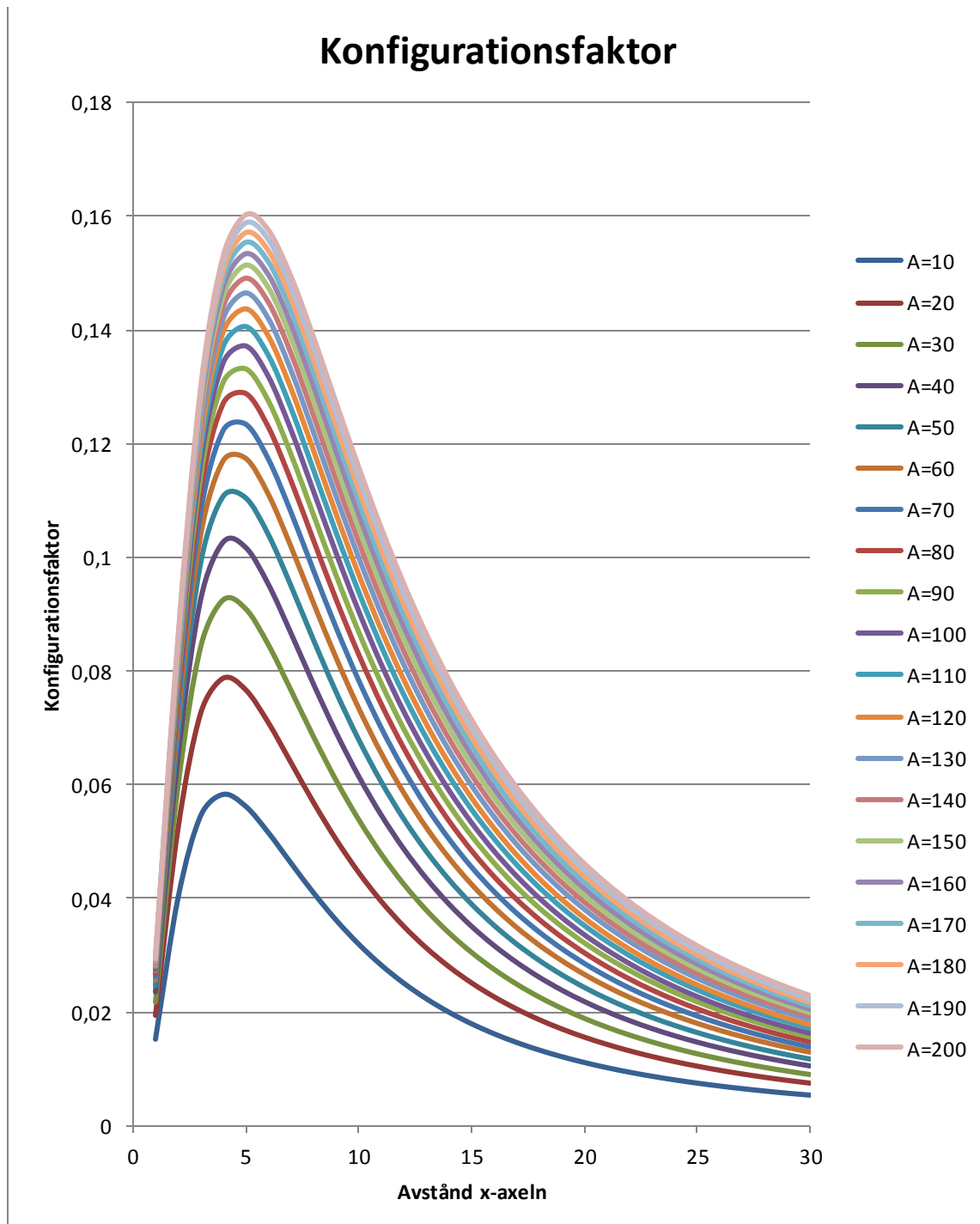
För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn undersöks en försöksuppställning där en rektangulär yta,  $A$ , med höjden 5 meter och bredden  $\sqrt{A}$ .  $A$  varierar sedan mellan 10-200  $\text{m}^2$ . Rektangelns centrum placeras i origo och i ett scenario då den mottagande fasaden är i samma taknivå som huset där takgenombränning sker, undersöks variationen i utsträckningen längs  $x$ -axeln då  $z=-2,5$ . Resulterande konfigurationsfaktor presenteras i Figur 39.



Figur 39. Konfigurationsfaktor för en närliggande byggnad i samma nivå med varierade area

### 7.2.2.6 Konfigurationsfaktor för olika areor och 1 våningshöjd lägre belägen intilliggande fasad

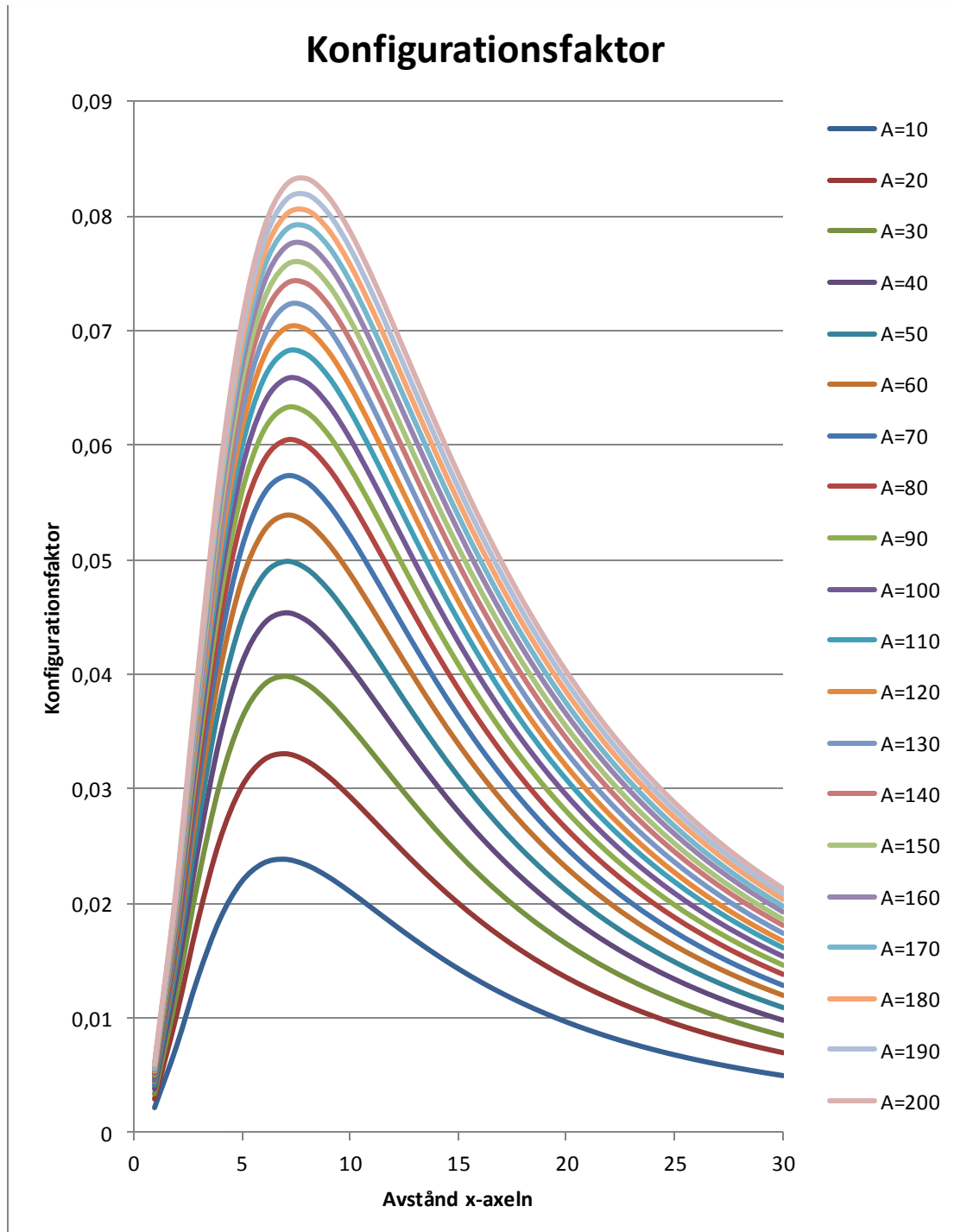
För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn undersöks en försöksupställning där en rektangulär yta, A, med höjden 5 meter och bredden  $\sqrt{A}$ . A varierar sedan mellan 10-200 m<sup>2</sup>. Rektangelns centrum placeras i origo och i ett scenario då den mottagande fasaden är en våning lägre än taknivå i huset där takgenombränning sker, undersöks variationen i utsträckningen längs x-axeln då z=-5. Resulterande konfigurationsfaktor presenteras i Figur 40.



Figur 40. Konfigurationsfaktor för en 1 våningshöjd lägre närliggande byggnad med varierade area

### 7.2.2.7 Konfigurationsfaktor för olika areor och 2 våningshöjd lägre belägen intilliggande fasad

För att undersöka den resulterande konfigurationsfaktorn undersöks en försöksupställning där en rektangulär yta, A, med höjden 5 meter och bredden  $\sqrt{A}$ . A varierar sedan mellan 10-200 m<sup>2</sup>. Rektangelns centrum placeras i origo och i ett scenario då den mottagande fasaden är två våningar lägre än taknivå i huset där takgenombränning sker, undersöks variationen i utsträckningen längs x-axeln då z=-7,5. Resulterande konfigurationsfaktor presenteras i Figur 41.



Figur 41. Konfigurationsfaktor för en 2 våningshöjder lägre belägen närliggande byggnad med varierade area

### 7.2.3 Antändning

Den kritiska strålningsnivån som krävs för att trä skall antända ansätts till  $12,5 \text{ kW/m}^2$ . Med Ekvation 27 kan konfigurationsfaktorn vid vilken antändningskriteriet överstigs beräknas för olika temperaturer i flamman. Emissiviteten för configurationen ansätts till 1. Konfigurationsfaktorn som motsvarar den kritiska strålningsnivån för trä är 0,06203 för en flamtemperatur på  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Motsvarande konfigurationsfaktor är 0,16622 för en flamtemperatur på  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 7.3 Flygbränder

Flygbränder har varit en betydande spridningsväg vid ett antal större konflagrationsbränder. Detta då de glödande bitarna av byggnadsmaterial kan färdas över långa avstånd. Denna spridningsväg hanteras på två sätt i arbetssättet. Det första sättet är att strålningskriterierna som används i de olika undermodellerna motsvarar att det finns en pilotlåga närvarande. Det hanteras även separat genom att i checklistan kontrollera taktäckningsmaterialet på byggnaderna inom området. Detta för att problemen med flygbränder är som störst då de har möjlighet att ansamlas på en horisontell yta. Tak är byggnadstekniskt sett den största horisontella ytan som finns i en byggnad och ett ofördelaktigt taktäckningsmaterial så som trä, gräs eller sågspån ger förutsättningar för konflagrationsbränder.

## 8 Samlat resultat utifrån undermodellerna

*I följande kapitel beräknas tid och avstånd utifrån de representativa undermodellerna.*

### 8.1 Tid till antändning via spridning genom fönster

Enligt metodiken i avsnitt 7.1.3 så behövs en infallande strålningskurva för att modellera antändningen av motstående fasad. Det första steget i att ta fram infallande strålningskurvor är att för varje tidssteg i det dimensionerande temperaturförloppet beräkna en emitterad strålning enligt Ekvation 1 och emissivitet ansätts till 1. Nästa steg är att multiplicera Ekvation 1 med en konfigurationsfaktor så att den får formen enligt Ekvation 27.

Eftersom konfigurationsfaktorerna är additiva och en viss konfigurationsfaktor kan uppkomma på många olika sätt så ökas konfigurationsfaktorn från 1% till 25%. Kontentan är varthän strålningen kommer från inte är det viktiga, utan att det som är mest kritiskt med avseende antändning är att den finns där. För att hantera strålningen från fönsterflammar görs förenklingen att fönsterflammorna motsvarar en ökad strålning på 15% (Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd, 1975). Totalt beräknas 30 olika infallande strålningskurvor.

För glas genomförs en beräkning för varje tidssteg av den dos som erhålls. Detta enligt Ekvation 34 med en kritisk strålningsnivå på  $5,5 \text{ kW/m}^2$ . När den totalt ackumulerade dosen överstiger den kritiska dosen på  $800000 \text{ J/m}^2$  antas fönstret falla ur sin båge och en antändning ske.

Beräkning av tiden till antändning av trä genomförs enligt metodiken presenterad i avsnitt 6.3.2. För varje infallande strålningskurva erhålls en temperaturökningskurva och vid den tiden då temperaturökningen överstiger  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  så antas en antändning ske.

I Tabell 7 nedan presenteras tiden till antändning från dess att lågor slår ut från brandrummet för olika konfigurationsfaktorer för både trä och glas.

| $\Phi$ | $\Phi$ | Trä  | Glas |
|--------|--------|------|------|
| 0,01   | 1,0%   | x    | x    |
| 0,02   | 2,0%   | x    | x    |
| 0,025  | 2,5%   | x    | x    |
| 0,0275 | 2,8%   | x    | 1557 |
| 0,03   | 3,0%   | x    | 1281 |
| 0,0325 | 3,3%   | x    | 1087 |
| 0,035  | 3,5%   | x    | 977  |
| 0,0375 | 3,8%   | x    | 836  |
| 0,04   | 4,0%   | x    | 750  |
| 0,05   | 5,0%   | x    | 537  |
| 0,06   | 6,0%   | x    | 422  |
| 0,07   | 7,0%   | x    | 351  |
| 0,08   | 8,0%   | 1395 | 302  |
| 0,09   | 9,0%   | 1050 | 266  |
| 0,1    | 10,0%  | 810  | 239  |
| 0,11   | 11,0%  | 658  | 217  |
| 0,12   | 12,0%  | 559  | 200  |
| 0,13   | 13,0%  | 480  | 185  |
| 0,14   | 14,0%  | 420  | 173  |
| 0,15   | 15,0%  | 379  | 163  |
| 0,16   | 16,0%  | 342  | 155  |
| 0,17   | 17,0%  | 313  | 146  |
| 0,18   | 18,0%  | 283  | 139  |
| 0,19   | 19,0%  | 263  | 133  |
| 0,2    | 20,0%  | 240  | 127  |
| 0,21   | 21,0%  | 228  | 122  |
| 0,22   | 22,0%  | 215  | 118  |
| 0,23   | 23,0%  | 202  | 113  |
| 0,24   | 24,0%  | 190  | 110  |
| 0,25   | 25,0%  | 180  | 106  |

Tabell 7. Tid till antändning för trä och glas beroende på konfigurationsfaktor



## 8.2 Avstånd där kritisk strålning uppkommer vid takgenombränning

I Tabell 8 och Tabell 9 presenteras vid vilket avstånd som den kritiska infallande strålningen för trä understigs. Detta för areor på den översta våningen mellan 10m<sup>2</sup> till 200m<sup>2</sup> och med en medeltemperatur över den strålade ytan på 1100 °C och 800°C. Avstånden beräknas genom att undersöka vid vilket avstånd den kritiska strålningsnivån överstigs för olika areor och nivåer.

| A [m <sup>2</sup> ] | Högre [m] | Samma [m] | 1 Vån lägre [m] | 2 Vån lägre [m] |
|---------------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| 10                  | 8-9       | 7-8       | -               | -               |
| 20                  | 10-11     | 9-10      | 7-8             | -               |
| 30                  | 11-12     | 11-12     | 7-8             | -               |
| 40                  | 12-13     | 11-12     | 9-10            | -               |
| 50                  | 13        | 12-13     | 10-11           | -               |
| 60                  | 13-14     | 13-14     | 11-12           | -               |
| 70                  | 14        | 13-14     | 12-13           | -               |
| 80                  | 14-15     | 14-15     | 12-13           | -               |
| 90                  | 14-15     | 14-15     | 13-14           | 7-8             |
| 100                 | 15-16     | 14-15     | 13-14           | 9-10            |
| 110                 | 15-16     | 15-16     | 14-15           | 10-11           |
| 120                 | 16-17     | 15-16     | 14-15           | 10-11           |
| 130                 | 16-17     | 15-16     | 14-15           | 11-12           |
| 140                 | 16-17     | 16-17     | 14-15           | 11-12           |
| 150                 | 16-17     | 16-17     | 15-16           | 12-13           |
| 160                 | 17-18     | 16-17     | 15-16           | 12-13           |
| 170                 | 17-18     | 17-18     | 16-17           | 13-14           |
| 180                 | 17-18     | 17-18     | 16-17           | 13-14           |
| 190                 | 17-18     | 17-18     | 16-17           | 13-14           |
| 200                 | 18-19     | 17-18     | 16-17           | 13-14           |

Tabell 8. Avstånd inom vilka antändningskriteriet överstigs, för olika höjder och areor av den närliggande byggnaden. 1100 °C flamtemperatur.

| A [m <sup>2</sup> ] | Högre [m] | Samma [m] | 1 vån lägre [m] | 2- vån lägre [m] |
|---------------------|-----------|-----------|-----------------|------------------|
| 10                  | 4-5       | 3-4       | -               | -                |
| 20                  | 5-6       | 5-4       | -               | -                |
| 30                  | 6-7       | 5-6       | -               | -                |
| 40                  | 7-8       | 6-7       | -               | -                |
| 50                  | 7-8       | 6-7       | -               | -                |
| 60                  | 7-8       | 6-7       | -               | -                |
| 70                  | 8-9       | 7-8       | -               | -                |
| 80                  | 8-9       | 7-8       | -               | -                |
| 90                  | 8-9       | 7-8       | -               | -                |
| 100                 | 8-9       | 7-8       | -               | -                |
| 110                 | 8-9       | 8-9       | -               | -                |
| 120                 | 9-10      | 8-9       | -               | -                |
| 130                 | 9-10      | 8-9       | -               | -                |
| 140                 | 9-10      | 8-9       | -               | -                |
| 150                 | 9-10      | 8-9       | -               | -                |
| 160                 | 9-10      | 8-9       | -               | -                |
| 170                 | 9-10      | 9         | -               | -                |
| 180                 | 9-10      | 9         | -               | -                |
| 190                 | 9-10      | 9-10      | -               | -                |
| 200                 | 10        | 9-10      | 5               | -                |

Tabell 9. Avstånd inom vilka antändningskriteriet överstigs, för olika höjder och areor av den närliggande byggnaden. 800 °C flamtemperatur.

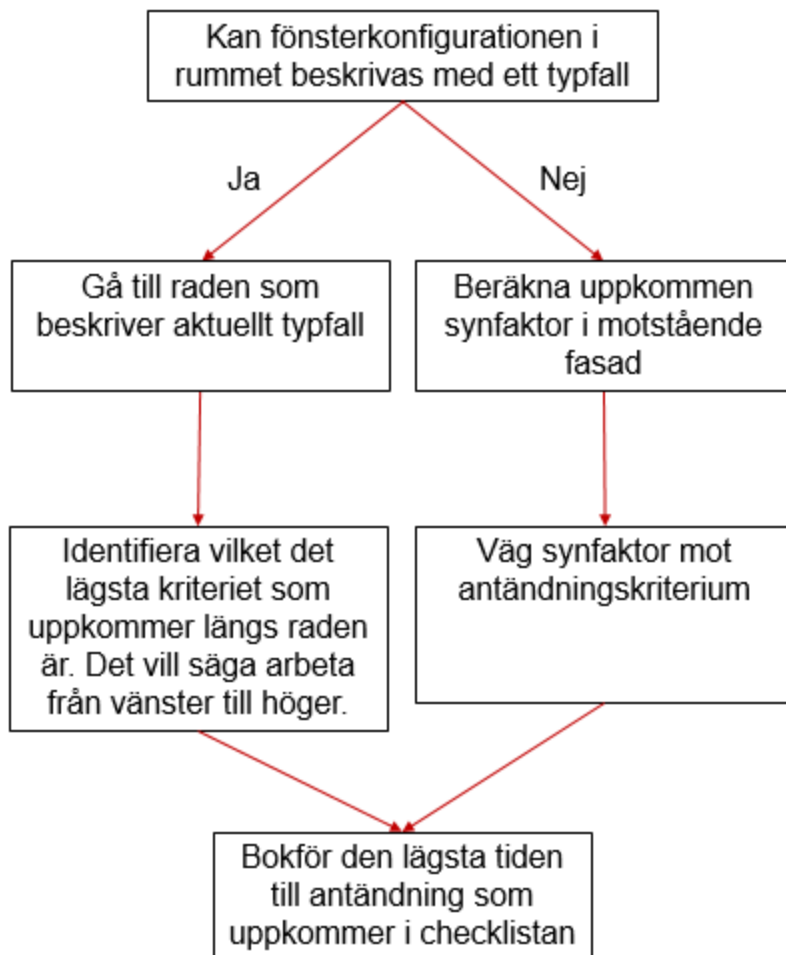
## 9 Underlag för checklisten

För att åstadkomma ett tidseffektivt och stringent arbetssätt så beräknas i detta kapitel en resulterande tid eller avstånd för de vanligast förekommande fallen.

### 9.1 Spridning via fönster

Principen är att vardera rum i en byggnad skall tilldelas ett värde som beskriver om de byggnadstekniska förutsättningarna är sådana att spridning kan ske från rummet till en intilliggande byggnad inom 10 eller 20 minuter.

För att bestämma tidsvärde för ett rum finns två tillvägagångssätt, vilka lämpar sig olika väl beroende på situation. I Tabell 10 kan den resulterande tiden utläsas för vanligt förekommande fönsterkonfigurationer. I fall fönsterkonfigurationen i ett rum inte kan beskrivas utifrån dessa typfall får konfigurationsfaktorn istället beräknas och vägas mot antändningskriterier för att erhålla en resulterande tid. Figur 42 beskriver ett flödesschema för bedömningsförfarandet.



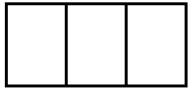
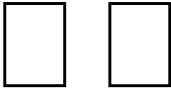
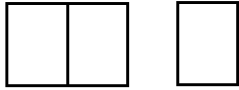
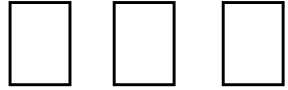


Figur 42. Flödesschema för bedömning av ett rums konfiguration

#### 9.1.1 Typfall

Om fönsterkonfigurationen kan beskrivas enligt ett typfall utgår bedömningen från Tabell 10 vilken består av de möjliga konfigurationer som ger upphov till en spridning och involverar upp till tre

fönster med standardmått. De typfallen som finns beräknade och därmed ingår i Ekvation 11 presenteras i Figur 43

|                        |  |  |  |
|------------------------|--|--|--|
| Sammanhängande fönster | 1<br>   | 2<br>   | 3<br>     |
| Separerade fönster     | 1+1<br> | 2+1<br> | 1+1+1<br> |

**Figur 43. Illustration över lösta typfall**

Kriterierna är beräknade genom att addera konfigurationsfaktorer för sammanhängande fönster, se avsnitt 7.1.2, i olika mätpunkter. Summan av konfigurationsfaktorerna i mätpunkterna jämförs sedan mot den minsta konfigurationsfaktorn då brandspridning kan ske till trä eller glas inom ett visst tidsintervall enligt avsnitt 8.1. Kriterierna för respektive typfall och mottagande material utgörs sedan av det maximala avstånd då brandspridning via fönster kan ske inom ett tidsintervall.

I tabellen anges 10- och 20-minuterskriterierna för trä och glas vilket förväntas vara de två material som kan förekomma i motstående fasad i trähusbebyggelsemiljö. Nedan ges en beskrivning av hur kriterierna i Tabell 10 ska testas för olika typfall.

### Sammanhängande fönster – Trä

När kriteriet för brandspridning till trä testas för ett eller flera sammanhängande fönster, det vill säga typfall 1,2 och 3 i Tabell 10, är kriteriet uppnått om avståndet,  $x$ , mellan fönster och motstående fasad är kortare än avståndet som utgör kriteriet för respektive tidsintervall.

### Separerade fönster - Trä

I fall då fönstren i fasaden är separerade, det vill säga typfall 1+1,2+1 och 1+1+1, kan brandspridning ske inom ett visst tidsintervall på längre avstånd än om fönstren verkar enskilt. Detta då deras respektive strålning mot en punkt i motstående fasad adderas. Därför är kriteriet för att en brand ska sprida sig inom ett visst tidsintervall beroende av hur långt avståndet,  $D$ , är mellan de fönster som strålar. Bedömning av hur vida en brand kan uppkomma inom ett tidsintervall i fall med separerade fönster sker därför i tre steg.

**Steg 1:** Mät avståndet,  $D$ , mellan fönstren.

**Steg 2:** Bestäm avståndet som utgör kriteriet för respektive tidsklass. Detta görs genom avläsning på tallinjen som finns angiven i tabellen. På tallinjen kan avstånd mellan fönster och fasad som utgör kriteriet läsas av för olika avstånd,  $D$ , mellan fönster. Om avståndet,  $D$ , är inom intervallet i tallinjen interpoleras kriterier fram.

I fallet med tre separerade fönster är principen för att bestämma kriteriet detsamma. Skillnaden mot de andra fallen med separerade fönster är att avståndet mellan fönster och fasad som utgör kriteriet bestäms utifrån A istället för D. Avståndet, A, är avståndet mellan de två yttersta fönstrens ytterkanter.

**Steg 3:** Bestäm om avståndet,  $x$ , mellan fönster och motstående fasad är kortare än det avstånd som utgör kriteriet.

### **Sammanhängande fönster - Fönster**

När kriteriet för brandspridning till glas testas för ett fönster eller flera sammanhängande fönster, det vill säga typfall 1,2 och 3 i Tabell 10, är kriteriet uppnått om avståndet,  $r$ , mellan fönster och ett fönster i motstående fasad är kortare än avståndet som utgör kriteriet för respektive tidsintervall.

### **Separerade fönster - Fönster**

Principen om hur separerade fönster, det vill säga typfall 1+1,2+1 och 1+1+1, tillsammans kan bidra till en högre strålningsnivå i motstående fasad i jämförelse med om de hade verkat enskilt tas i beaktande även för glas. Bedömning av hur vida en brand kan uppkomma inom ett visst tidsintervall i fall med separerade fönster görs nu i fyra steg.

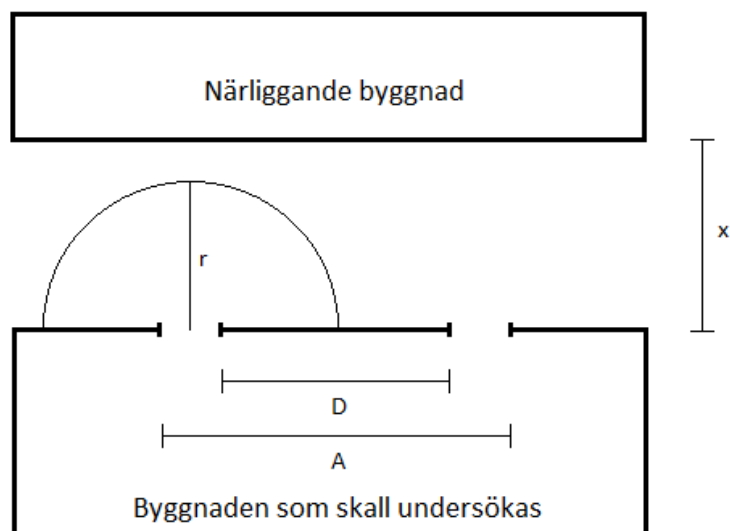
**Steg 1:** Mät avståndet,  $D$ , mellan fönstren. Är avståndet längre än tallinjen omfattar så skall fönstren ses som att det verkar enskilt och jämföras mot kriterierna för sammanhängande fönster.

**Steg 2:** Bestäm avståndet som utgör kriteriet för respektive tidsklass. Detta görs genom avläsning på tallinjen som finns angiven i tabellen. På tallinjen kan avstånd mellan fönster och fasad som utgör kriteriet läsas av för olika avstånd,  $D$ , mellan fönster. Om avståndet,  $D$ , är inom intervallet i tallinjen interpoleras kriteriet fram.

I fallet med tre separerade fönster är principen för att bestämma kriteriet detsamma. Skillnaden mot de andra fallen med separerade fönster är att avståndet mellan fönster och fasad som utgör kriteriet bestäms utifrån A istället för D. Avståndet, A, är avståndet mellan de två yttersta fönstrens ytterkanter.

**Steg 3:** Bestäm om avståndet,  $x$ , mellan fönster och motstående fasad är kortare än det avstånd som utgör kriteriet.

**Steg 4:** Undersök om det finns ett fönster inom den omslutande ytan. Det vill säga rakt motstående något av fönstren eller där emellan.



Figur 44. Förklaring över parametrar använda i Tabell 10

Där

$r$  - avstånd från mitten av det fönster som undersöks [m]

$x$  – avstånd mellan det fönster som undersöks och motstående fasad [m]

$D$  – avstånd mellan de fönster som undersöks [m]

$A$  – avstånd mellan ytterkanterna av de yttersta fönstren som undersöks [m]

I Tabell 10 presenteras tabellen som utgör ett underlag för att identifiera och värdera de olika typfallen.

| Kriterium<br>Typfall | 10                             |                               | 20                             |                               |
|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
|                      | Trä                            | Fönster                       | Trä                            | Fönster                       |
| 1                    | $x < 1,7$                      | $r < 2,8$                     | $x < 2,1$                      | $r < 3,5$                     |
| 2                    | $x < 2,4$                      | $r < 3,9$                     | $x < 2,9$                      | $r < 4,9$                     |
| 1+1                  | D 0<br>2,4  -----  1,5<<br>1,7 | D 0<br>3,9  -----  2,8<br>2,8 | D 0<br>2,9  -----  1,8<<br>2,1 | D 0<br>4,9  -----  3,5<br>3,5 |
| 3                    | $x < 2,9$                      | $r < 4,8$                     | $x < 3,4$                      | $r < 5,9$                     |
| 2+1                  | D 0<br>2,9  -----  1,5<<br>2,4 | D 0<br>4,8  -----  3<br>3,3   | D 0<br>3,4  -----  1,8<<br>2,9 | D 0<br>5,9  -----  4<br>4,2   |
| 1+1+1                | A 3<br>2,9  -----  7<<br>1,7   | A 3<br>4,8  -----  10<br>3,3  | A 3<br>3,4  -----  8<<br>2,1   | A 3<br>5,9  -----  12<br>4,2  |

Tabell 10. Tabell med underlag för identifiering och värdering av en typfallskonfiguration

### 9.1.2 Arbetssätt för konfigurationer som inte kan beskrivas med lösta typfall

Förfarandet då en konfiguration inte täcks in av typfall går ut på att genomföra avståndsmätningar. Mätningarna genomförs från fönstren i byggnaden som skall bedömas mot fönster i den motstående byggnaden. Detta genomförs i följande steg.

**Steg 1:** Mät avståndet mellan fasaderna.

**Steg 2:** Mät det kortaste avståndet mellan byggnadernas fönster. Detta från samtliga fönster som finns i rummet som skall bedömas till samtliga fönster i den motstående fasaden.

**Steg 3:** Bedöm storleken på fönstret i rummet som skall undersökas.

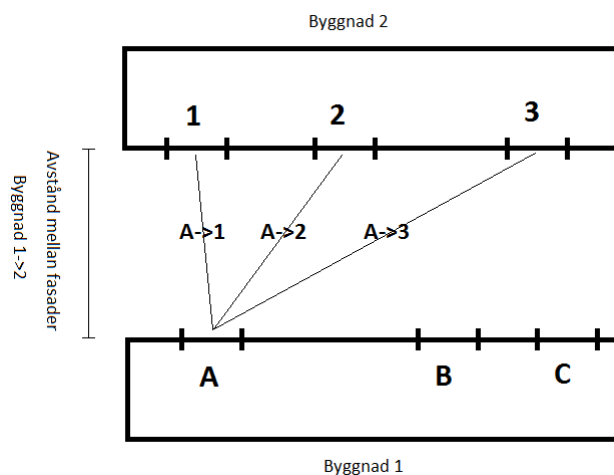
**Steg 4:** Läs av konfigurationsfaktortabellerna i bilaga A utifrån avståndet mellan fasader och det kortaste avståndet mellan fönster.

**Steg 5:** Addera konfigurationsfaktorer så att varje fönster i motstående byggnad har ett värde från samtliga fönster i rummet som skall bedömas.

**Steg 6:** Jämför konfigurationsfaktorn för varje fönster i motstående fasad. Det fönster som har den högsta konfigurationsfaktorn blir dimensionerande för rummet som skall bedömas.

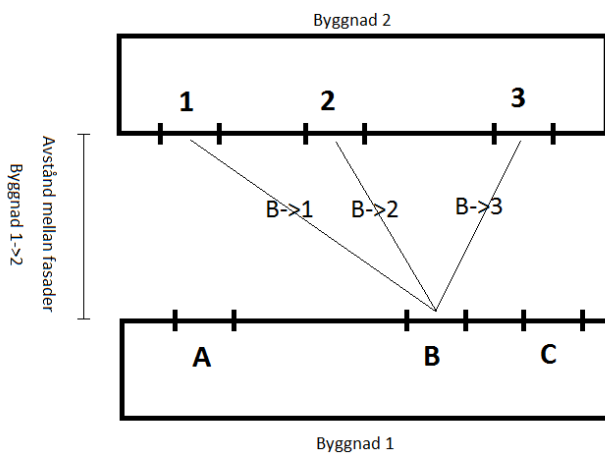
I Figur 45 till Figur 47 illustreras förfarandet för två godtyckliga byggnader med tre fönster vardera. Förutsättningarna som gäller är att samtliga tre fönster i byggnad 1, vilken skall bedömas, ligger i samma rum. Principiellt så kan en mer ingående bedömning av vilka synfaktorer som kommer påverka byggnad två gå till enligt arbetssättet beskrivet ovan och illustrerat nedan.

Figur 45 illustrerar vilka mått som behövs från fönster A i byggnad 1, alltså den byggnaden som skall bedömas.



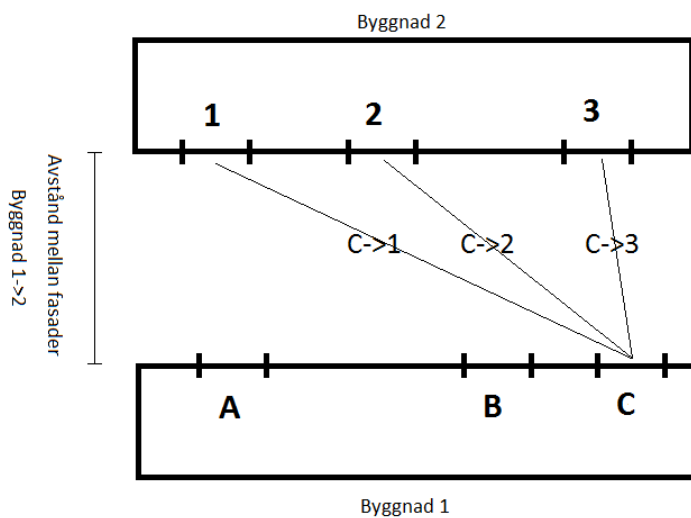
Figur 45. Avståndsmätning från fönster A

Figur 46 illustrerar vilka mått som behövs från fönster B i byggnad 1, alltså den byggnaden som skall bedömas.



Figur 46. Avståndsmätning från fönster B

Figur 47 illustrerar vilka mått som behövs från fönster C i byggnad 1, alltså den byggnaden som skall bedömas.



Figur 47. Avståndsmätning från fönster C

För det illustrerade fallet ovan så kommer den totala konfigurationsfaktorn för fönster 1 vara summan av A->1, B->1 och C->1 och motsvarande summa för fönster 2 och 3. Det fönster som erhåller den högsta konfigurationsfaktorn kommer att vara den dimensionerande. För att erhålla en tid till antändning så avläses den dimensionerande konfigurationsfaktorn mot antändningskriterierna i Tabell 7. Bedömningen av tiden till spridning kan göras på plats men även i ett senare skede.



## 9.2 Takgenombränning

Principen för denna bedömning är att det totala antalet hus som vid en brand med takgenombränning påverkas över den kritiska strålningsnivån för trä skall undersökas. I Tabell 11 presenteras avstånden inom vilket en antändning kan ske då en takgenombränning har uppkommit. Förfarandet genomförs i två steg.

**Steg 1:** Mät area på det översta våningsplanet

**Steg 2:** Anteckna antalet hus som befinner sig inom avståndet som anges i Tabell 11. Detta utifrån arean uppmätt i steg 1 och nivå skillnaden mellan byggnaden som undersöks och kringliggande byggnader.

| A [m <sup>2</sup> ] | Högre nivå [m] | Samma nivå [m] | 1 Vån lägre [m] | 2 Vån lägre [m] |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 10                  | 7              | 6              | -               | -               |
| 20                  | 9              | 7              | 4               | -               |
| 30                  | 10             | 9              | 4               | -               |
| 40                  | 11             | 10             | 5               | -               |
| 50                  | 11             | 10             | 6               | -               |
| 60                  | 11             | 11             | 6               | -               |
| 70                  | 12             | 11             | 7               | -               |
| 80                  | 12             | 12             | 7               | -               |
| 90                  | 12             | 12             | 7               | 4               |
| 100                 | 13             | 12             | 7               | 5               |
| 110                 | 13             | 13             | 8               | 6               |
| 120                 | 14             | 13             | 8               | 6               |
| 130                 | 14             | 13             | 8               | 6               |
| 140                 | 14             | 13             | 8               | 6               |
| 150                 | 14             | 13             | 8               | 7               |
| 160                 | 14             | 13             | 8               | 7               |
| 170                 | 14             | 14             | 9               | 7               |
| 180                 | 14             | 14             | 9               | 7               |
| 190                 | 14             | 14             | 9               | 7               |
| 200                 | 15             | 14             | 11              | 7               |

Tabell 11. Dimensionerande avstånd för olika fall och areor vid takgenombränning

## 10 Checklistans utformning

I detta kapitel presenteras utformningen av checklistan och anteckningsstöd.

### 10.1 Checklista

I Figur 48 presenteras checklistans utformning.

| Utfört av:   |  | Fastighet | Noteringar |
|--|--|-----------|------------|
| Datum:   |  |           |            |
| Parameter  | Beskrivning  | Värde     |            |
| <b>Takgenombränning</b><br>Underlag finns i 9.2      | Area   |           |            |
|  | Avstånd Högre  |           |            |
|  | Avstånd samma  |           |            |
|  | Avstånd 1vån lägre   |           |            |
|  | Avstånd 1vån lägre   |           |            |
|  | Byggnader inom avstånd: Högre  |           |            |
|  | Byggnader inom avstånd: Samma  |           |            |
|  | Byggnader inom avstånd: 1vån lägre   |           |            |
|  | Byggnader inom avstånd: 2vån lägre   |           |            |
| <b>Taktäckning</b><br>Underlag finns i 7.3           | <u>Taktäckningsmaterial</u><br>TB: Tegelpannor/betong<br>TP: Takpapp<br>P: Plåt<br>T: Trä<br>AB: Annat brännbart<br>AE: Annat ej brännbart |           |            |
| <b>Spridning via fönster</b><br>Underlag finns i 9.1 | Antal rum: 10 min  |           |            |
|  | Antal rum: 20 min  |           |            |

Figur 48. Checklistans utformning

## 10.2 Anteckningsstöd för konfigurationer som inte täcks in av typfall

I Figur 49 presenteras anteckningsstödet för konfigurationer som inte täcks in av typfall.

| Avstånd mellan fasader (m)  | Tillhör fastighet: | Tillhör rum: |  |
|---|--------------------|--------------|--|
| Notera närmsta avstånden mellan fönster i den byggnad som skall bedömas (A-J) till fönster i den närliggande byggnaden (1-10). Notera även storleken på fönster i byggnaden som skall bedömas (Enkelt/Dubbelt) (A-J). |                    |              |  |
| Fönster 1   |                    | Fönster A    |  |
| Fönster 2   |                    | Fönster B    |  |
| Fönster 3   |                    | Fönster C    |  |
| Fönster 4   |                    | Fönster D    |  |
| Fönster 5   |                    | Fönster E    |  |
| Fönster 6   |                    | Fönster F    |  |
| Fönster 7   |                    | Fönster G    |  |
| Fönster 8   |                    | Fönster H    |  |
| Fönster 9   |                    | Fönster I    |  |
| Fönster 10  |                    | Fönster J    |  |

Figur 49. Bokförningsmall för ej lösta typfall

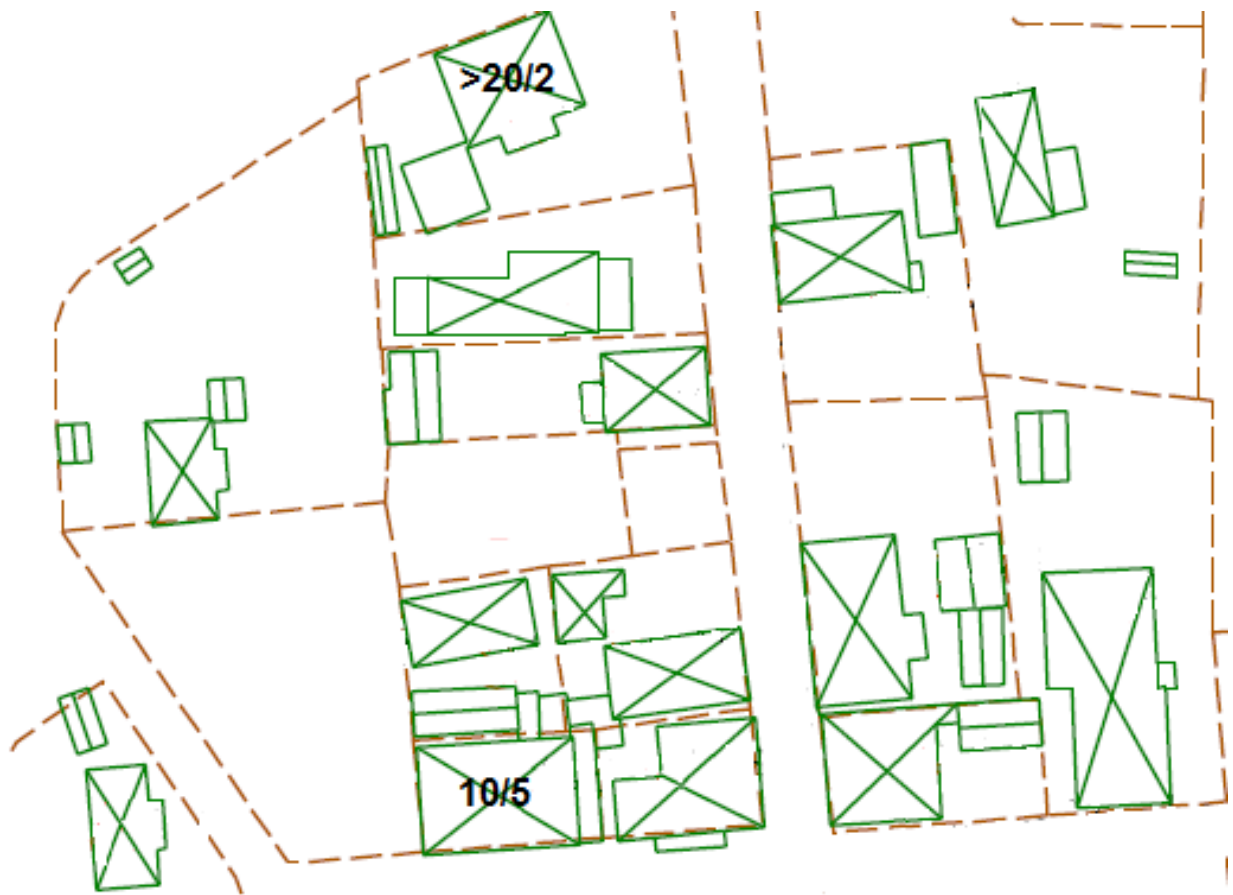
## 11 Presentation av resultat

En av frågeställningarna i arbetet är att utreda möjligheten att presentera resultatet på ett lämpligt sätt både för den egna organisationen och för andra intressenter. Två sätt som anses lämpliga och som tillsammans både blir talande och lätta att ta till sig utan att dra ned på resultatens noggrannhet.

### 11.1 Kartbild

Det första grundar sig i att visuellt presentera resultatet som framkommit genom inventeringen på en kartbild. Kartbilden är lämpligen en fastighetskarta över området där byggnaderna inom området erhåller ett värde utifrån det inventerade materialet. En sådan karta kan på ett enkelt sätt dela in de olika byggnaderna utifrån vilka förutsättningar de har. Till exempel genom att gradera inventeringsunderlaget utifrån en skala som baseras på utgångspunkterna för studien och vilken fråga som den ämnar att besvara. Skalan kan med fördel färg-kodas för att erhålla ett tydligt visuellt resultat. Sammanslagning kan i denna skala göras på tidsvärde och dignitetsvärde men de kan även hållas separata. Kartbilder anses vara enkla att ta till sig både för beslutsfattare och att använda inom den egna organisationen. Speciellt ifall ett stringent arbete har genomförts vid framtagningen av vilken information som är intressant att presentera.

Ett exempel på hur resultatet från en inventering kan presenteras visas i Figur 50. I detta exempel så har två byggnader inventerats och resultatet presenteras i form av två siffror. Dessa siffror motsvarar den lägsta tiden till spridning och ett dignitetsvärde, det vill säga det antal hus som strålningspåverkas över den kritiska strålningsnivån för trä.



Figur 50. Presentation av resultat - Tidsvärde & dignitetsvärde.

Kartbilder utifrån en inventering av tiden till spridning fungerar i princip som en inverterad insatstidskarta, där det istället presenteras inom vilken tid som räddningstjänsten behöver vara framme vid en byggnad för att kunna hindra spridning till närliggande byggnader. Alla tidsklasser behöver inte nödvändigtvis presenteras på kartan. En användare kan ha större nytta av att veta hur många byggnader som kan sprida sig inom 10 minuter då deras närmaste resurser kanske befinner sig 15 minuter från området i fråga.

Ett exempel på en sådan kartbild presenteras i Figur 51. I detta exempel så tar det räddningstjänsten 15 minuter att ha tillräckliga resurser på plats och tiden till spridning presenteras för varje byggnad som en siffra. Färgkodningen motsvarar ifall tiden till spridning överstiger tiden till räddningstjänsten har resurser på plats eller inte. Grön färg motsvarar att räddningstjänsten inte överstiger tiden till spridning och röd att de överstiger den.



Figur 51. Presentation av resultat - Fönster

Kartbilder utifrån inventering av omfattningen blir istället en inverterad resurskarta. Där resultatet istället syftar till att beskriva hur mycket resurser som kommer krävas. Detta kräver dock en bedömning görs av utföraren av vad olika mängder strålningspåverkade hus motsvarar i termer av resurser.

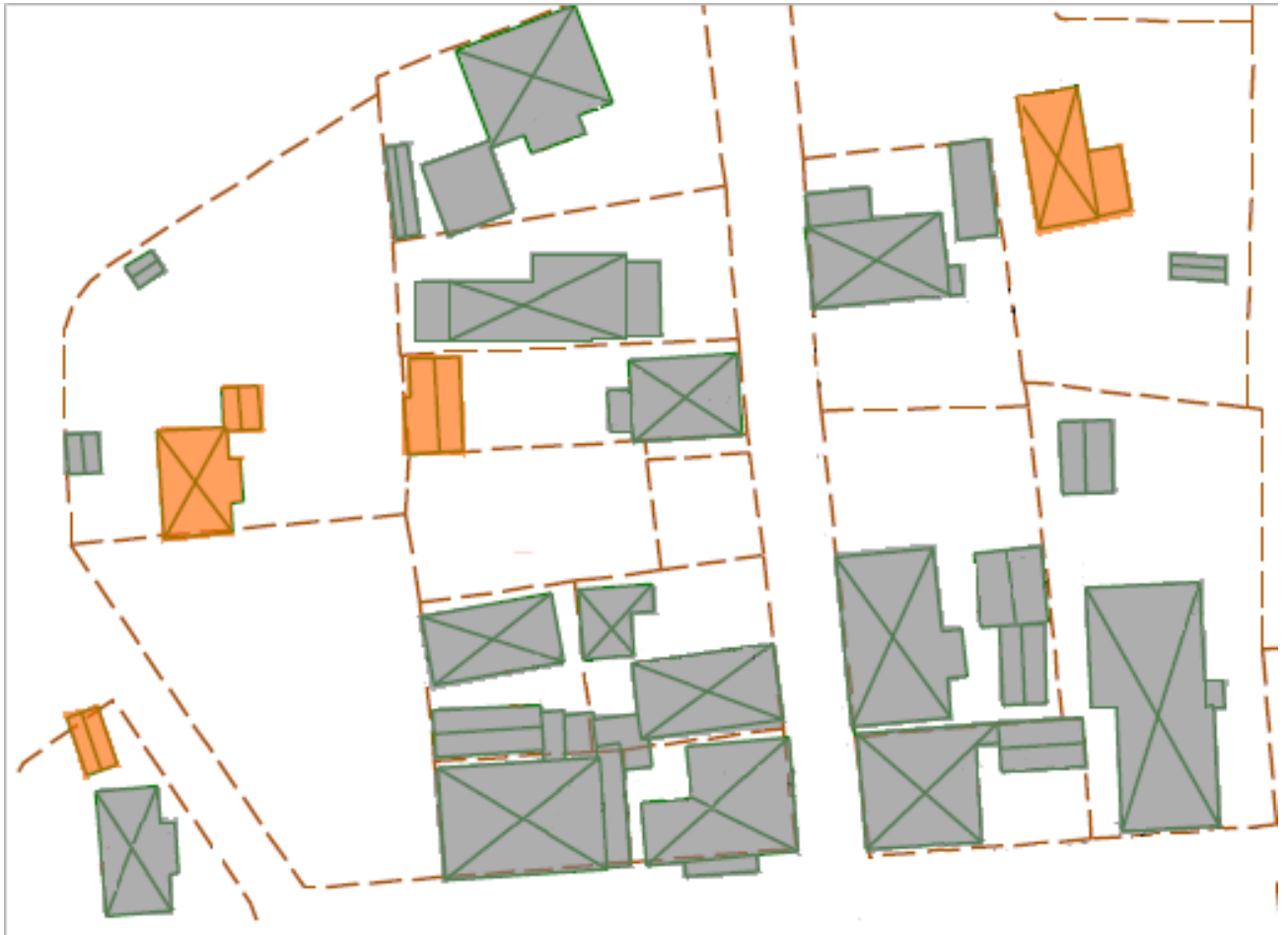
Ett exempel på en sådan kartbild presenteras i Figur 52. I detta exempel presenteras dignitetsvärdet, det vill säga antalet byggnader som påverkas med en strålningsnivå över den kritiska strålningsnivån för trä, som en siffra. Färgkodningen illustrerar ifall räddningstjänsten bedömer att de har tillräckligt med resurser eller inte. Grön färg motsvarar att de bedömer att de har tillräckligt med resurser och röd färg motsvarar att de inte har det. Viktigt att poängtera att användaren själv här behöver göra en bedömning.



Figur 52. Presentation av resultat - Takgenombränning

Kartbilder utifrån inventering av taktäckningsmaterial kan göras. Resultatet syftar till att visa de byggnader som har en ökad risk för att involveras i en brand på grund av spridningsvägen flygbränder.

Ett exempel på en sådan kartbild presenteras i Figur 53. I detta exempel visas grafiskt de byggnader som har ett brännbart taktäckningsmaterial med hjälp av en färgkod. Orange färg motsvarar att byggnaden har ett brännbart taktäckningsmaterial.

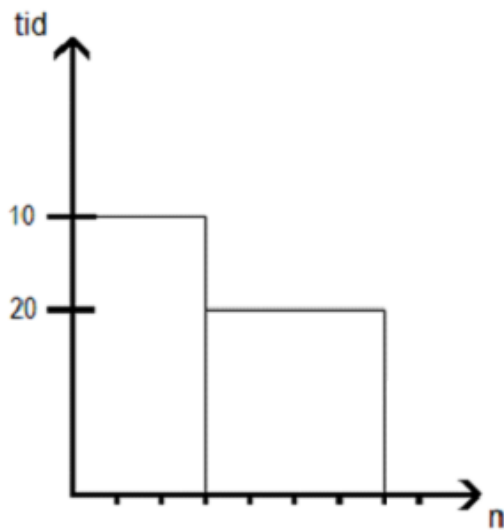


Figur 53. Presentation av resultat - Flygbränder



## 11.2 Brandspridningsprofil

Ett annat tillvägagångsätt för att presentera resultatet som anses vara lämpligt är i form av profiler. En principskiss av en brandspridningsprofil presenteras i Figur 54 och är i grunden ett histogram. Detta histogram åskådliggör både tiden till spridning och antalet rum som denna tid till spridning kan uppkomma i. Vad en sådan profil ger för mervärde jämfört mot att endast ge resultatet i form av den högsta uppkomna tidsklassen för byggnaden är att hela spektrumet av spridningsvägar som huset innehar belyses. Det vill säga en samlad bild av de olika spridningsvägarna som kan uppkomma.



Figur 54. Exempel spridningsriskprofil

Ett exempel på användningsområden för brandspridningsprofiler är att för hela området ta fram det genomsnittliga antalet spridningsvägar per tidsklass. Då kan det genomsnittliga antalet spridningsvägar som understiger tiden till en resurs är på plats och har påbörjat en insats enkelt och visuellt presenteras. De kan även användas för att jämföra byggnader inom system med varandra.

## 12 Känslighetsanalys

I tidigare avsnitt har olika avgränsningar och antaganden gjorts för att kunna genomföra beräkningar som ligger till grund för en checklista. I detta kapitel kommer påverkan av ett antal olika avgränsningar och antaganden utredas.

### 12.1 Antändningskriterier glas

Dataunderlaget som ligger till grund för beräkningen av kritiskdos utgörs av en försöksserie. Detta anses inte vara ett brett underlag och för att undersöka vilken inverkan antagande om en lägre dos hade haft på resultatet så genomfördes antändningsberäkningar med en halverad dos. Detta presenteras i Tabell 12.

| $\Phi$ | $\Phi$ | 800 J/m <sup>2</sup> [s] | 400 J/m <sup>2</sup> [s] | Tidsskillnad [s] |
|--------|--------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| 0,01   | 1,0%   | x                        | x                        |                  |
| 0,02   | 2,0%   | x                        | x                        |                  |
| 0,025  | 2,5%   | x                        | 1600                     |                  |
| 0,0275 | 2,8%   | 1557                     | 1241                     | 316              |
| 0,03   | 3,0%   | 1281                     | 1013                     | 268              |
| 0,0325 | 3,3%   | 1087                     | 853                      | 234              |
| 0,035  | 3,5%   | 977                      | 737                      | 240              |
| 0,0375 | 3,8%   | 836                      | 649                      | 187              |
| 0,04   | 4,0%   | 750                      | 579                      | 171              |
| 0,05   | 5,0%   | 537                      | 408                      | 129              |
| 0,06   | 6,0%   | 422                      | 317                      | 105              |
| 0,07   | 7,0%   | 351                      | 261                      | 90               |
| 0,08   | 8,0%   | 302                      | 223                      | 79               |
| 0,09   | 9,0%   | 266                      | 195                      | 71               |
| 0,1    | 10,0%  | 239                      | 175                      | 64               |
| 0,11   | 11,0%  | 217                      | 158                      | 59               |
| 0,12   | 12,0%  | 200                      | 145                      | 55               |
| 0,13   | 13,0%  | 185                      | 132                      | 53               |
| 0,14   | 14,0%  | 173                      | 125                      | 48               |
| 0,15   | 15,0%  | 163                      | 117                      | 46               |
| 0,16   | 16,0%  | 155                      | 110                      | 45               |
| 0,17   | 17,0%  | 146                      | 104                      | 42               |
| 0,18   | 18,0%  | 139                      | 99                       | 40               |
| 0,19   | 19,0%  | 133                      | 94                       | 39               |
| 0,2    | 20,0%  | 127                      | 90                       | 37               |
| 0,21   | 21,0%  | 122                      | 86                       | 36               |
| 0,22   | 22,0%  | 118                      | 83                       | 35               |
| 0,23   | 23,0%  | 113                      | 80                       | 33               |
| 0,24   | 24,0%  | 110                      | 77                       | 33               |
| 0,25   | 25,0%  | 106                      | 75                       | 31               |

Tabell 12. Känslighetsanalys av antändningskriterier för glas

En halverad dos har liten inverkan på den vilket värde den minsta synfaktorn som ger upphov till en

antändning inom 30 minuter har. För samma konfigurationsfaktorer med olika doser kan en tidsskillnad uppgå till 300 s. Vad gäller gränserna för vilka konfigurationsfaktorer som ger upphov till antändning inom olika tidsskisser gör antagandet en marginell skillnad.

## 12.2 Avstånd från fönster

Antagandet om att undersöka avstånd mellan ett strålande fönster och ett fönster i motstående fasad oavsett hur det är förskjutet i sidled görs då detta anses vara till stor fördel för användarvänligheten. Antagandet är i princip att strålningsbilden ut från fönstret antar formen av en halvcirkel istället för en halv ellips. I det följande beräknas känsligheten av detta genom att se skillnaderna mellan det avstånd som utgör kriteriet enligt antagandet och det avstånd som hade utgjort kriteriet om inte antagandet hade gjorts. I Tabell 13 presenteras skillnaderna i avstånd i den utsträckning där de är som störst.

|                          | 10 min |       |       | 20 min |       |       |
|--------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Typfall                  | 1      | 2     | 3     | 1      | 2     | 3     |
| Avstånd enligt beräkning | 2,4    | 3,2   | 4,2   | 3      | 4,3   | 4,9   |
| Avstånd i checklista     | 2,8    | 3,9   | 4,8   | 3,5    | 4,9   | 5,9   |
| Skillnad                 | 16,7%  | 21,9% | 14,3% | 16,7%  | 14,0% | 20,4% |

Tabell 13. Känslighetsanalys för avståndet från fönster.

Genom förenklingen är det avstånd i checklistan en ökning med i genomsnitt 17 %. Antagandet om att den strålning som kommer från fönsterflamman tas med i beräkningen genom att öka strålningen från fönstret gör att skillnaden bör vara mindre än 17 %. Detta då beräkningarna utgår från att all strålning kommer från fönstret vilket gör att konfigurationsfaktorn för mätpunkter i sidled underskattas i beräkningarna eftersom fönsterflammorna har en utsträckning i x-led.

## 12.3 Fönsterflammar

I resultatet som ligger till grund för checklistan så gjordes förenklingen att strålningen från fönsterflammar uppgår till 15% av den totala strålningen. För att få klarhet i hur denna förenkling påverkar resultatet genomfördes även strålningsberäkningar där fönsterflammorna sågs som en egen strålande yta. Formen av denna strålande yta ansattes att ha samma bredd som fönstret och en höjd ovan fönstret på 2/3 av fönstrets höjd. Den horisontella utsträckningen beräknades enligt Ekvation 3 och emissivitet enligt Ekvation 26.

| Temperatur | y | x=1    | x=1,5  | x=2    | x=2,5  | x=3    | x=3,5  | x=4    | x=4,5  | x=5    |
|------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 500        | 0 | 8,72%  | 9,64%  | 9,55%  | 9,25%  | 8,94%  | 8,65%  | 8,38%  | 8,16%  | 7,99%  |
| 800        | 0 | 24,89% | 27,17% | 26,99% | 26,29% | 25,58% | 24,87% | 24,27% | 23,78% | 23,34% |
| 500        | 2 | 30,06% | 19,64% | 15,44% | 13,02% | 11,54% | 10,60% | 9,88%  | 9,36%  | 9,41%  |
| 800        | 2 | 60,20% | 46,06% | 38,89% | 34,36% | 31,36% | 29,27% | 27,74% | 26,48% | 25,44% |

Tabell 14. Känslighetsanalys av förenklingen av fönsterflammar

Resultatet av beräkningar presenteras i Tabell 14 form av hur stor andel av den totala infallande strålningen som fönsterflammorna ger upphov till. I Tabell 14 visas att på olika avstånd mitt framför

fönstret så medför en flamtemperatur på 500 °C och 800 °C att strålningen från fönsterflammorna uppgår till omkring 8-9% respektive 23-26% av den totala utfallande strålningen. Ju längre ut i sidled som kontrollen görs desto större andel av den totala strålningen uppkommer till följd av fönsterflamman.

## 12.4 Spridning via takgenombränning

Vid val av modell gjordes ett par antaganden och i det följande undersöks känsligheten av dessa parametrar. Känslighetsanalysen genomförs för högre närliggande byggnad och det genomförs både med en temperatur på 1100 °C och 800 °C för den strålande ytan. Resultatet från känslighetsanalysen presenteras i Tabell 15 till Tabell 17. De antaganden som görs för att genomföra känslighetsanalysen är:

- Flamhöjden är 7 meter
- Flammans bas antar en rektangulär form med långsidan tre gånger längre än kortsidan

| Fall:               | Högre           | Temperatur: 1100 °C |                                 |                                 |
|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| A [m <sup>2</sup> ] | 5m flamhöjd [m] | 7m flamhöjd [m]     | Rektangulär form – Kortsida [m] | Rektangulär form – Långsida [m] |
| 10                  | 8-9             | 8-9                 | 6-7                             | 11-12                           |
| 20                  | 10-11           | 12-13               | 7-8                             | 13-14                           |
| 30                  | 11-12           | 13-14               | 8-9                             | 15-16                           |
| 40                  | 12-13           | 14-15               | 9-10                            | 16-17                           |
| 50                  | 13              | 15-16               | 9-10                            | 17-18                           |
| 60                  | 13-14           | 16-17               | 10-11                           | 17-18                           |
| 70                  | 14              | 16-17               | 10-11                           | 18-19                           |
| 80                  | 14-15           | 17-18               | 11-12                           | 18-19                           |
| 90                  | 14-15           | 17-18               | 11-12                           | 19-20                           |
| 100                 | 15-16           | 18-19               | 11-12                           | 19-20                           |
| 110                 | 15-16           | 18-19               | 12-13                           | 20-21                           |
| 120                 | 16-17           | 19-20               | 12-13                           | 20-21                           |
| 130                 | 16-17           | 19-20               | 12-13                           | 20-21                           |
| 140                 | 16-17           | 19-20               | 12-13                           | 21-22                           |
| 150                 | 16-17           | 20-21               | 13-14                           | 21-22                           |
| 160                 | 17-18           | 20-21               | 13-14                           | 21-22                           |
| 170                 | 17-18           | 20-21               | 13-14                           | 22-23                           |
| 180                 | 17-18           | 21-22               | 13-14                           | 22-23                           |
| 190                 | 17-18           | 21-22               | 13-14                           | 22-23                           |
| 200                 | 18-19           | 21-22               | 13-14                           | 23-24                           |

Tabell 15. Känslighets analys takgenombränning, 1100 °C flamtemperatur

| Fall:               | Högre            | Temperatur:      | 800 °C                          |                                 |
|---------------------|------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| A [m <sup>2</sup> ] | 5m flammhöjd [m] | 7m flammhöjd [m] | Rektangulär form – Kortsida [m] | Rektangulär form – Långsida [m] |
| 10                  | 4-5              | 5                | 3-4                             | 6-7                             |
| 20                  | 5-6              | 7                | 4-5                             | 7-8                             |
| 30                  | 6-7              | 7-8              | 5                               | 8-9                             |
| 40                  | 7-8              | 8-9              | 5-6                             | 9                               |
| 50                  | 7-8              | 8-9              | 5-6                             | 9-10                            |
| 60                  | 7-8              | 9-10             | 6                               | 9-10                            |
| 70                  | 8-9              | 9-10             | 6-7                             | 10                              |
| 80                  | 8-9              | 9-10             | 6-7                             | 10-11                           |
| 90                  | 8-9              | 10-11            | 6-7                             | 10-11                           |
| 100                 | 8-9              | 10-11            | 6-7                             | 10-11                           |
| 110                 | 8-9              | 10-11            | 7                               | 11                              |
| 120                 | 9-10             | 11               | 7                               | 11                              |
| 130                 | 9-10             | 11               | 7-8                             | 11-12                           |
| 140                 | 9-10             | 11-12            | 7-8                             | 11-12                           |
| 150                 | 9-10             | 11-12            | 7-8                             | 11-12                           |
| 160                 | 9-10             | 11-12            | 7-8                             | 11-12                           |
| 170                 | 9-10             | 11-12            | 7-8                             | 11-12                           |
| 180                 | 9-10             | 12               | 7-8                             | 12                              |
| 190                 | 9-10             | 12               | 8                               | 12                              |
| 200                 | 10               | 12-13            | 8                               | 12                              |

Tabell 16. Känslighets analys takgenombränning, 800 °C flamtemperatur

| Fall:               | Högre            | Temperatur:      | Dimensionerande medelvärde      |                                 |
|---------------------|------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| A [m <sup>2</sup> ] | 5m flammhöjd [m] | 7m flammhöjd [m] | Rektangulär form – Kortsida [m] | Rektangulär form – Långsida [m] |
| 10                  | 7                | 7                | 3-4                             | 9,5                             |
| 20                  | 8,5              | 10               | 6                               | 11                              |
| 30                  | 9,5              | 11               | 6,5                             | 12,5                            |
| 40                  | 10,5             | 12               | 7,5                             | 13                              |
| 50                  | 10,5             | 12,5             | 8                               | 14                              |
| 60                  | 11               | 13,5             | 8                               | 14                              |
| 70                  | 11,5             | 13,5             | 9                               | 14,5                            |
| 80                  | 12               | 14               | 9                               | 15                              |
| 90                  | 12               | 14,5             | 9,5                             | 15,5                            |
| 100                 | 12,5             | 15               | 9,5                             | 15,5                            |
| 110                 | 12,5             | 15               | 9,5                             | 16                              |
| 120                 | 13,5             | 15,5             | 10                              | 16                              |
| 130                 | 13,5             | 15,5             | 10,5                            | 16,5                            |
| 140                 | 13,5             | 16               | 10,5                            | 17                              |
| 150                 | 13,5             | 16,5             | 10,5                            | 17                              |
| 160                 | 14               | 16,5             | 11                              | 17                              |
| 170                 | 14               | 16,5             | 11                              | 17,5                            |
| 180                 | 14               | 17               | 11                              | 17,5                            |
| 190                 | 14               | 17               | 11                              | 17,5                            |
| 200                 | 14,5             | 17,5             | 11                              | 18                              |

Tabell 17. Dimensionerande avstånd utifrån känslighetsanalysen.

## 13 Diskussion

*I följande kapitel kommer diskussion föras med avseende val av modeller, resultat, användarvänlighet, strålningsberäkningar och genomförande.*

### 13.1 Val av modeller och modellosäkerheter

En problematik som framkom vid framtagningen av arbetssättet som presenteras i detta arbete var valet av modeller. Fokus har legat på att i litteratursökningen erhålla modeller som återspeglar problematiken i fråga utan att införa stora osäkerheter. Nedan kommer valet av modeller som återspeglar problematiken och om de osäkerheter som införs vid användandet av dem diskuteras.

#### 13.1.1 Brandrumstemperatur

En svårighet vid modellering av temperaturförlopp i ett brandrum som har en omslutande konstruktion av trä är att de allmänt vedertagna metoderna för modellering av detta, Magnusson & Thelanderson samt Eurocode baserar sig till mångt och mycket på samma antagande och är snarare framtagna för modellering av brandrum med en omslutande konstruktion av stål, betong eller liknande material som inte förväntas medverka i förbränningsprocessen. Metodiken för att välja vilken metod som skulle användas för att ta fram temperaturförloppet blev på så vis att utvärdera ett urval av befintliga metoder och använda den som stämde bäst överens med ett fullskaligt försök. Det dimensionerande brandförloppet som har använts i denna rapport stämmer väl överens med de uppkomna brandrumstemperaturerna efter övertändning i det fullskaliga försöket. Dock så är inte förutsättningarna vad gäller öppningsfaktor samma mellan det fullskaliga försöket och förutsättningarna för det dimensionerande brandförloppet. Det är dock ingen stor skillnad och på så vis förväntas det dimensionerande temperaturförloppet även stämma vid en något större öppningsfaktor.

#### 13.1.2 Osäkerheter vid antändningsmodellering

En osäkerhet som gör sig gällande vid modellering av antändning är de antaganden och parametervärden som används för denna modellering. Den första gör sig gällande vid modellering av antändning av trä. Detta i form utav att trä ses som är torrt och inte målat. Antagandet om att materialet är torrt medför att den förväntade tiden till antändning minskar, speciellt på de högre strålningsnivåerna då ingen uttorkning förväntas hinna ske innan pyrolysgaser skapas. När fukten förångas blandas vattenånga i pyrolysgaserna och kommer på så vis späda ut pyrolysgaserna. Detta kan inte förväntas på samma sätt vid de lägre strålningsnivåerna eftersom att materialet har hunnit torka innan ett större flöde av pyrolysgaser skapas. Antagandet av att fasaden i trä inte är målad görs på grund av att det är svårt att bestämma om hur stor del av en fasad som är målad och hur degraderad färgen har hunnit bli sedan den målades dit. Det har visats i fullskaliga experiment att målat trä av god kvalité har en betydande skyddande effekt. Dessa två antagande om de ingående parametrarna som används gör att modellen blir mest träffande i de fall då det förväntas att träet kan vara torrt och ifall fasaden är målad alternativt har ett degraderat färglager. I Sverige kan låga fukthalter i träfasader uppkomma både under sommaren och på vintern. De förväntade effekterna av antagandena borde spela mot att modellen underskattar tiden till antändning för vissa välskötta fasader under en viss del av året. Samtidigt kan modellen ses som att arbeta mot ett värsta tänkbara scenario med antändning av trä och dessa parametrar i åtanke.

Ett annat antagande som medför osäkerhet när det kommer till antändning av trä är att endast strålning ger upphov till värmeökningen av trä. Detta stämmer väl överens med de antagandena om

föväntade spridningsvägar men i realiteten kommer säkerligen konvektion spela en viss roll i upphettningsprocessen av fasaden, speciellt på korta avstånd mellan fasaderna. Det är emellertid svårt att uppskatta då inga modeller för horisontella plymer fanns att finna i genomsökt litteratur.

### 13.1.3 Fönsterflamnor

Utifrån känslighetsanalysen i avsnitt 12.3 så kommer förenklingen angående fönsterflamnor medföra ett visst fel då avstånden är korta mellan fasaderna och en punkt i sidled kontrolleras. Det är dock inte lämpligt modellera strålningen från fönsterflammorna som en egen strålande yta då det medför att i början av brandförloppet så kommer fönsterflammorna vara den dominerande strålningskällan. Detta för att den transienta brandrumstemperaturen då är som lägst och strålningen från fönsterflammorna blir konstant. En möjlighet hade varit att försöka att modellera fönsterflammorna i ett transient förlopp där deras storlek växte. Detta valdes bort på grund av för lite försöksdata att väga en möjlig ansatt modell mot.

### 13.1.4 Vind

Vind är en av de parametrar som enligt litteraturstudien påverkar brandspridningsförloppet mellan byggnader mest. Detta har hanterats i arbetet på två sätt. Det första är att det dimensionerande temperaturförloppet har tagits fram med stöd av genomförda fullskaliga försök där en del av försöken i försökserien innehöll ventilering som motsvarar en vind på 3-6 m/s. Utöver detta har även spridningsvägen flygbränder hanterats genom att taktäckningsmaterial antecknas. Den stora osäkerheten som finns kvar är en vinds inverkan på flammors utsträckning. Detta speciellt på de flamnor som uppkommer vid takgenombränning då dessa är direkt påverkade av vinden. När utsträckningen ändras så kan lågorna dels bli större men även vara närmare den motstående fasaden.

## 13.2 Resultat

Arbetsättet med en inventering i form av en checklista lämpar sig bäst att genomföra på skalan över ett större område. Skulle en inventering av endast en byggnad genomföras finns här lämpligare tillvägagångssätt som ger ett mer träffande resultat. Genom att i varje enskild byggnad göra en ingående analys av vilka bränder som kan uppkomma och vilken dignitet de kan uppnå så kan relativt exakta tider till spridning erhållas. Ett sådant tillvägagångssätt är dock tidskrävande och att genomföra det på ett större område blir på så vis problematiskt. Denna skillnad ger dock en fingervisning om hur och på vilken skala som det är lämpligt att tolka resultatet från en inventering med metoden presenterad i rapporten. Ifall endast en byggnad inventeras och inventeringen visar att byggnaden endast innehåller rum som överstiger 20 minuters kriteriet till spridning från fönster till fasad så är det inte per definition omöjligt att det understiger vid uppkommen brand. Detta då modellen har byggts upp baserat på ett antal antaganden som avspeglar verkligheten mer eller mindre väl. Däremot ifall ett större antal hus inventeras och de uppvisar att samtliga hus har ett flertal spridningsvägar som har potential att sprida sig inom 10 minuter så finns det anledning att väga hur väl räddningstjänstens förmåga svarar upp mot behovet.

Något som dock skall poängteras angående tidsmättet som används i metoden presenterad i detta arbete är att det utgår från tiden då flammor slår ut från ett fönster och alltså inte tiden från att en brand startar. Det är såklart möjligt, kanske även troligt att räddningstjänst har larmats redan innan lågorna slår ut genom fönstren. Det är inte heller säkert att alla uppkomna bränder kommer leda till att lågor slår ut från fönster. Ett ingripande med brandsläckare från en privatperson, ett tidigt

larmande eller en sådan enkel sak som att en dörr står öppen eller stängd kan medföra brandrummet aldrig övertänds utan självslocknar. Detta är även några av de saker som borde ges hänsyn ifall en analys av en enskild byggnad skall genomföras med ett träffande resultat ifall den enskilda byggnaden är i fokus.

Ansatsen att detta är ett väl valt mått för räddningstjänsten att mäta sin förmåga anses dock fortfarande vara gällande. Detta för att de olika modellerna som återspeglar temperaturförloppen i brandrummen först då blir valida samt att det först är då som en större andel strålning kommer att falla ut från brandrummet. I vissa områden kommer denna ansats ligga närmre tiden till larm än för andra. Det kan förekomma variationer beroende på vilken tid på dygnet eller året. Det kan vara så att larmning sker i ett senare skede mitt på dagen då personer förväntas vara på jobbet. En årstidsvariation av denna karaktär uppvisades under förarbetet till rapporten under inventering av ön Marstrand. Större delen av byggnaderna på ön används endast under sommaren och storhelger. Det är därför troligt att ett larm i en sådan bebyggelse skulle ske senare än ifall det var mestadels byggnader som var bebodda under hela året. Dessa variationer och vilken skillnad det finns mellan larm och tid till dess att lågor slår ut genom fönstren är något som utföraren själv får kvantifiera när resultatet från checklistan skall vägas mot den egna förmågan.

### **13.3 Användarvänlighet**

Vikten av att lägga fokus på användarvänligheten i metoden har poängterats under arbetet. Hur vida detta har åstadkommit är svårt för oss att ge en objektiv bedömning av eftersom det är vi som har arbetat fram arbetssättet.

Eftersom användarvänlighet väger såpass tungt har det också adderat ytterligare en dimension i beräkningsprocessen. I normala fall så görs olika antaganden för att på ett så ackurat sätt som möjligt beskriva ett fall. Detta är gemensamt även för detta arbete men den stora utmaningen i detta arbete har varit att förenkla resultatet i ytterligare ett steg för att skapa kriterier som passar in på formen av en checklista. Eftersom arbetet utgår från beräkningar är det relativt lätt att kvantitativt bestämma vilken påverkan en förenkling eller antagande har på resultatet genom att genomföra beräkningen på nytt utifrån det antagandet. Eftersom användarvänlighet är subjektivt kan motsvarande tillvägagångssätt inte användas för att bestämma hur stor påverkan en viss förändring av arbetssättet har för användarvänligheten. Utmaningen har legat i att vikta dessa mot varandra.

Strategin har istället varit att genomföra förenklingar som vi anser ha stor positiv inverkan på användarvänligheten och sedan i en känslighetsanalys beräkna hur stor påverkan blir på resultatet. Detta kan exemplifieras med två val som vi stod inför där vi i det ena fallet ansåg att förenklingen övervägde avvikelsen från resultatet och i det andra fallet ansåg att avvikelsen från resultatet var för stor och därför övervägde användarvänligheten. Avstånd mellan fönster i en fasad kan variera väldigt mycket och har samtidigt påverkan på strålningsbilden. Istället för att sätta ett avstånd som kriterium för fall med separerade fönster beskriver checklistan en tallinje så att utföraren själv tar fram ett kriterium utifrån avstånd mellan fönster. I och med detta så införs ett moment i arbetssättet vilket påverkar användarvänligheten negativt men vi ansåg att en förenkling hade gett en för stor avvikelse från resultatet. Det andra valet vi stod inför var hantering av fall där ett fönster strålar mot ett fönster i motstående fasad. Vi valde då att göra förenklingen att enbart undersöka avståndet dem emellan och bortse från förskjutningen i sidled. Detta förutsätter att strålningsbilden tar formen av en halvcirkel, vilket inte stämmer enligt beräkningarna som snarare visar att strålningsbilden antar en



ellipsoid form. I det fallet ansågs dock de positiva effekterna med avseende på användarvänlighet väga tyngre än det avvikelser från resultatet.

Trots att mycket fokus har ägnats åt användarvänligheten så finns det anledning att så här efter arbetets genomförande fundera kring hur användarvänligheten hade kunnat förbättras ytterligare. En tanke på hur metoden hade kunnat förbättras ytterligare är att med samma bakomliggande principer och beräkningar skapa ett ändamålsenligt program till en surfplatta eller liknande. Utan några djupare programmeringskunskaper anser vi att det inte är orimligt att åstadkomma ett sådant program. Detta då beräkningarna inte kompliceras för mer komplicerade konfigurationer eftersom de utgår från en additionsprincip. Har beräkningarna för ett fönster av varierande storlek väl genomförts i ett referensnät, likt de genomförda i detta arbete, så kan dessa kombineras på olika sätt för att åstadkomma olika konfigurationer.

Fördelar med ett program är även att strålningen i tre dimensioner hade kunnat ombesörjas, vilket är en avgränsning som gjorts i detta arbete. I ett program hade även de förenklingar som gjorts enbart för att anpassas till formen av en checklista kunnat reduceras eftersom resultatet av de beräkningar som gjorts i detta arbete som underlag för att ta fram en checklista hade gjorts direkt i programmet.

Ytterligare ett moment som hade kunnat underlättas med ett program är hantering av data. Detta arbete har fokuserat på att ta fram data som sedan ska presenteras. Arbetet har inte fokuseras på steget där emellan men detta görs lämpligen genom att föra in data från platsbesöken i en databas och sedan förs in i en kartbild över området. För att kunna använda ett program så kräver det att det finns en dator med ute på platsen och därmed finns också möjlighet att direkt föra in data i databasen.

#### **13.4 Strålningsberäkningar**

Strålningsberäkningar genomförs i olika sammanhang och i olika syfte. Ofta genomförs strålningsberäkningar i dimensionerande syfte och det handlar då om att beräkna vilken strålningsnivå som uppkommer givet vissa antaganden och sedan jämföra mot den strålningsnivå som anses vara kritisk med avseende skyddsmålet. Emellertid är det viktigt att komma ihåg att det som beräknas inte är ifall en brand kan sprida sig eller ej, utan enbart vilken strålningsnivå som uppkommer givet vissa förutsättningar och antaganden. En risk med att ansätta en kritisk nivå är att det kan skapa uppfattningen om att en uppkommen brand som överstiger en kritisk nivå direkt innebär att en brand kommer att sprida sig. På samma sätt kan det skapa uppfattningen om att en uppkommen brand inte kommer sprida sig då den kritiska nivån inte överstigs. Det är viktigt att komma ihåg att det är ett transient förlopp och att tidsaspekten inte kan bortses ifrån.

En skillnad mellan strålningsberäkningar vid dimensionering och strålningsberäkningar i detta arbete är hur man förhåller sig till den kritiska nivån. Utifrån skyddsmål kan en kritisk nivå ansättas och vid dimensionering handlar beräkningarna om att bedöma ifall strålningsnivån kan uppkomma eller inte. Om den kritiska nivån överstigs kan slutsatsen dras om att ytterligare åtgärder måste vidtas. Syftet med arbetet är att räddningstjänsten ska kunna göra en bedömning av spridningsrisken inom ett område för att vidare kunna jämföra mot den egna kapaciteten. För att besvara frågeställningen i det här arbetet är det därför inte tillräckligt att enbart bestämma om kritisk strålning kan uppkomma eller inte. En möjlighet hade varit att ange resultatet i form av differens mellan potentiell strålningsnivå i ett fall och den kritiska strålningsnivån. Ett resultat på den formen hade då tillfört en form av värdering och utifrån det hade ett inbördes förhållande mellan olika byggnader inom ett

område kunnat anges. Dock så är strålningsnivåer fortfarande svårt att relatera till och är därför otillräckligt som underlag för planering inom räddningstjänsten. Av den anledningen har vi i arbetet tagit fram en metod för att nå fram till ett resultat i form av tid.

En fundering som har väckts under arbetets gång är att arbetssättet kanske inte enbart är intressant för räddningstjänsten. Försäkringsbolag är ett exempel på aktör där arbetssättet kan lämpa sig. Detta då försäkringsbolag med detta arbetssätt kan göra en bättre värdering av risken för spridning mellan byggnader. Vilket ger dem ett bättre underlag att utgå från när de sätter premier.

### **13.5 Genomförande**

I detta arbete så föreslås ett arbetssätt där vardera byggnad inom ett område inventeras vid ett platsbesök. Detta arbetssätt är tidskrävande och det finns anledning att i en diskussion belysa olika aspekter som bör tas i beaktande innan ett projekt likt detta påbörjas.

I detta arbete presenteras ett arbetssätt som involverar platsbesök i byggnader som bedöms. Anledningen är att vi anser att detta är det möjliga tillvägagångssättet som kan fånga upp en stor del av problematiken med brandspridning mellan byggnader. Det beror framför allt på att det inte går att se några generella mönster i de parametrar som behöver bedömas. En möjlighet som diskuterades men också avfärdades var möjligheterna att göra en undersökning genom att kolla på karta. En sådan metod kan det horisontella avståndet bedömas med relativt god noggrannhet. Anledningen till att det avfärdades var just att det inte enbart går att göra en bedömning utifrån avstånd.

Det tar tid och det är inte ekonomiskt försvarbart att genomföra inom alla kommunens områden och det finns inte heller behov att göra det. Även om arbetssättet förmodligen hade kunnat utvecklas så att det även går att tillämpa i annan typ av bebyggelse. Dock så anser vi att det i just äldre trähusbebyggelse ofta är motiverat att genomföra ett sådant projekt. Detta då det ofta innehar ett högt kulturellt värde och att spridningsrisken ofta är större på grund av de byggnormer som rådde vid dess uppförande. Detta gör även att det är svårt för räddningstjänsten att bedöma vilka konsekvenser en brand kan få, ur ett samhällsperspektiv.

En anledning till att arbetssättet är tidskrävande är de förberedelserna som krävs. Målet med detta arbete har varit att skapa en metod såpass långt utvecklad så att steget från att en person läser rapporten till att det kan börja genomföra inventeringen, är så litet som möjligt. Trots detta så krävs en viss tids förarbete i att få en djupare förståelse för checklisten och dess ingående parametrar.

Vi vill dock poängtera den stora marginalnyttan av den tiden som läggs i arbetets inledande skede. Ett besök vid inventering kan med ett väl genomtänkt arbetssätt och genomförande få oerhört många positiva sidoeffekter. En positiv sidoeffekt är att det ger en möjlighet att informera kring brandrisker och även att svara på frågor. Något som vi har upplevt under liknande besök vid platsbesök är ett väldigt positivt bemötande, det var många som visade intresse och ställde frågor som de hade funderat på tidigare. Exempelvis hur många brandvarnare de borde ha och var de borde sitta, vilka handbrandsläckare vi rekommendera, etc. Den generella uppfattningen är att de får ett mer personligt förhållande till räddningstjänsten. Att räddningstjänsten inte enbart kommer när en olycka har inträffat, utan också bryr sig och är närvarande innan den har inträffat.

Ytterligare en nytta med besök i hushållen är checklisten på ett enkelt sätt kan utökas för undersökning av andra parametrar. Checklisten som presenteras i rapporten berör i första hand

parametrar som är relevanta undersöka med avseende brandspridning. Därmed inte sagt att andra parametrar kan vara av intresse att undersöka, tvärt om så uppmuntras den som ska utföra checklisten att utöka den. Exempel på något som kan vara intressant att undersöka är brandvarnarförekomsten.

## 14 Slutsatser

För att nå fram till slutmålet att skapa en metod för bedömning av konsekvenserna vid en brand i tät trähusbebyggelse genomgicks olika delsteg i arbetsprocessen. Arbetet inleddes med en informationssökning för att vidare undersöka vad som finns skrivet inom området samt vilka möjliga enheter som resultatet kan mätas i. De slutsatser som kunde dras efter det inledande skedet kan summeras i följande punkter.

- **Det är möjligt att ge ett mått på hur lång tid det kan ta innan brandspridning sker till en intilliggande byggnad.** Tiden från att branden uppkommer är svårt att bedöma på grund av att tiden till att de når spridningsvägarna är beroende av var branden uppkommer. Där emot kan tiden från att branden slår ut genom fönstren från ett rum till att en intilliggande fasad antänds beräknas.
- **Det är möjligt att ge ett mått på omfattningen av en brand.** Det är dock svårt att skatta den totala omfattningen av en brand eftersom det är många omgivande faktorer som spelar in. Däremot kan förutsättningarna för om en möjlig konflagrationsbrand kan uppkomma skattas. Detta genom att beräkna vid vilket avstånd som kringliggande byggnader mottar strålning som är i nivå med den kritiska strålningen för trä. Samt hur vida området i stort har ofördelaktigt taktäcknings material, då flygbränder är en betydande spridningsväg.

Nästa steg i arbetsprocessen var att föreslå en metod för hur räddningstjänsten på ett enkelt sätt kan ta fram resultatet och hur det lämpligen presenteras. De slutsatser som kunde dras utifrån dessa steg kan summeras i följande punkter:

- **Det går att på ett förhållandevis enkelt sätt få en uppfattning av konsekvenserna av en brand inom ett visst område.** Detta genom att följa den metod som presenteras i arbetet.
- **Det går att presentera resultatet visuellt på ett sätt som både är lämpligt att presentera för beslutsfattare inom kommunen och som går att använda inom den egna organisationen.** Detta genom att presentera resultatet i form av en översiktskarta. På översiktskartan bör vardera byggnad inom ett område tilldelas ett tidsvärde och ett dignitetsvärde. För att göra resultatet överskådligt och lättare att tolka kan dessa värden med fördel kombineras med en färgkod som anger förhållandena insatstid/tid till brandspridning och dignitet/mängd tillgängliga resurser.

## 15 Fortsatt arbete

Metoder och arbetssätt kan alltid förbättras, verifieras mer, göras mer användarvänliga och kopplas till annan teori. För att förbättra metoden i detta arbete ges därför nedan ett antal förslag på vad framtida forskning kan inriktas på kopplat till arbetets problematik.

- **Verifiering med fullskaliga försök**

Metoden som tagits fram i examensarbetet bygger på ett antal olika försöksupställningar där teoretiska modeller har använts för att beräkna resultatet. Teoretiska modeller bygger på antaganden och förhållanden som kanske inte alltid stämmer överens med de rådande. Ett förslag till fortsatt arbete är att genomföra fullskaliga försök med samma försöksupställningar som i detta arbetet. Detta för att verifiera resultatet som ligger till grund för den i examensarbetet framtagna metoden.

- **Verifiering och jämförelse med andra värderingsmetoder**

I liknanden syfte som ligger till grund för det här examensarbetet har andra metoder för värdering av brandrisker tagits fram. Ett förslag till fortsatt arbete är att verifiera den i examensarbetet framtagna metoden genom jämförelser med andra värderingsmetoder.

- **Bredda metoden**

Den i examensarbetet framtagna metoden syftar till att värdera brandspridning mellan byggnader i tät trähusbebyggelse. Detta för att räddningstjänsten ska kunna ta fram ett underlag för att planera resurser för att hantera en sådan händelse. Ett förslag till fortsatt arbete är att utveckla metoden så att den ger underlag för annan typ av planering. Ett exempel kopplat till brandspridning är att ta fram ett tillvägagångssätt för att värdera brandspridningsriskerna inom en byggnad. Brandspridning inom- och till annan byggnad beskriver konsekvensen av en brand. Genom att även väga in sannolikhet för uppkomst kan metoden utvecklas och ge en bild som fokuserar på den övergripande risken.

- **Skapa ett datorprogram**

Enligt vad som nämns i diskussionen kan ett datorprogram ha stora användarvänlighetsmässiga fördelar. Ett förslag till fortsatt arbete är att undersöka möjligheterna till att utveckla ett sådant program vidare.

## 16 Referenser

- Abrahamsson, M. & Tehler, H., 2013. Evaluating risk and vulnerability assessments: A study of the regional level in Sweden. *Int J. Emergency Management*, 9(1), pp. 76-92.
- Babrauskas, V., 2001. *Ignition of wood: A review of the State of the art, Interflam 2001*. London, Interscience Communications Ltd., pp. 71-88.
- Babrauskas, V., 2010. *Glass brakage in fires*, Issaquah, USA: Fire Science and Technology inc..
- Bengtsson, L.-G., 2001. *Inomhusbrand*. Karlstad: Räddningsverket.
- Björk, C., Kallentius, P. & Reppen, L., 1992. *Så byggdes husen 1880-1980 : arkitektur, konstruktion och material i våra flerbostadshus under 100 år*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning, Stockholms Stadsbyggnadskontor.
- Björk, C., Reppen, L. & Nordling, L., 2000. *Så byggdes staden*. Stockholm: Svensk byggtjänst.
- Björnfot, J., 2008. *Skydd mot brandspridning mellan småhus*. Karlskrona: Boverket.
- Brandteknik LTH, 1990. *Analytisk lösning av värmeledningsekvationen*, Lund: Brandteknik LTH.
- Brandteknik, LTH, 2005. *Brandskyddshandboken. Rapport 3134*, Lund: Lunds tekniska högskola.
- Burnett, C. & Galbreath, M., 1962. *Report on conflagration in Lanark, Ontario - 15 June 1959*, Ottawa: National Research Council, Canada.
- Carlsson, E., 1999. *External fire spread to adjoining buildings - A review of fire safety design guidance and related research*, Lund: LTH.
- Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, 2014. *Brannen i Laerdal, Flatanger og på Frøya vinteren 2014*, u.o.: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.
- Drysdale, D., 2011. *An introduction to fire dynamics*. 3:e red. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd..
- Fredlund, B., Pettersson, O. & Strandberg, S., 1977. *Skydd mot brandspridning inom småhusbebyggelse i betong*, Lund: LTH, Department of structural mechanics.
- Glenting, M., 2002. *Brand i äldre trähusbebyggelse*, Lund: Brandteknik, LTH.
- Grahn, E. & Sandström, A.-C., 2003. *Flamhöjder - Kv. Arkadien i Jönköping - Slutrapport 2003-09-22*, u.o.: Brandskyddslaget.
- Harada, K., Enomoto, A., Uede, A. & Wakamatsu, T., 2000. An Experimental Study on Glass Cracking and Fallout by Radiant Heat Exposure. *Fire Safety Science--Proc. 6th Intl. Symp.*, pp. 1063-1074.
- Ingberg, S. H., 1928. Tests of the Severity of Building Fires. *NFPA Quarterly*, 22(1), pp. 43-61.
- Johansson, H. & Jönsson, H., 2007. *Metoder för risk- och sårbarhetsanalys ur ett systemperspektiv*, Lund: Lunds universitets centrum för riskanalys och riskhantering.

- Jönsson, R. & Pettersson, O., 1983. *Träkonstruktioner och brand - Kunskapsöversikt och forskningsbehov*. Lund: LTH.
- Kaplan, S., 1997. The words of risk analysis. *Risk Analysis*, 17(4), pp. 407-417.
- Kaplan, S. & Garrick, J. B., 1981. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), pp. 11-27.
- Karlsson, B. & Quintiere, J. G., 2000. *Enclosure fire dynamics*. Washington: CRC Press.
- Law, M., 1963. *Heat radiation from fires and building separation*, London: H.M.S.O.
- Mattsson, B., 2000. *Riskhantering vid skydd mot olyckor - problemlösning och beslutsfattande*. Karlstad: Räddningsverket.
- MSB, 2011. *Vägledning för risk- och sårbarhetsanalyser*, Karlstad: Myndigheten för samhällsskydd och beredskap.
- MSB, 2014. *Räddningstjänsten isiffror 2013*, Karlstad: MSB.
- Nordiska industrigruppen trähus/brandskydd, 1975. *Tät småhusbebyggelse och brandspridningsrisker*, u.o.: u.n.
- Olsson, P. & Skårman, J., 2012. *Brandspridning mellan fönster - En analys av lämpligt avstånd*, Lund: LTH.
- Ondrus, J., 1988. *Brandspridning och brandförlopp i tät småhusbebyggelse*, Lund: LTH.
- Pettersson, O. & Jönsson, R., 1983. *Träkonstruktioner och brand: Kunskapsöversikt och forskningsbehov*. Lund: LTH.
- Quintiere, J. G., 1997. *Principles of fire behavior*. College Park, Maryland.: Cengage Learning.
- Räddningsverket, 2001. *Branden i Jönköping den 11 februari 2001*. Karlstad, Räddningsverket.
- SFS 2003:778., u.d. *Lagen om skydd mot olyckor*. Stockholm: Försvarsdepartementet.
- Sjöström, J. & Wickström, U., 2013. *Slutrapport BF projekt nr 300-121 - Utveckling av teori för beräkning av tid till antändning*, u.o.: Styrelsen för svensk brandforskning.
- Strömdahl, I., 1970. *Brandrisker och brandskydd i tät trähusbebyggelse*. Stockholm: Svenska brandförsvärsföreningen.
- Van Hees, P. & Andersson, P., 2000. *Performance of cables subjected to thermal radiation*, u.o.: Sveriges tekniska forskningsinstitut, SP.
- Wickström, U. & Byström, A., 2014. Compartment fire temperature - A new simple calculation method. *Fire safety science - Draft - Proceedings of the eleventh international symposium*.
- Wikberg, P. & Johansson, L.-E., 2007. *Bedömning av brandskydd i kulturbebyggelse*. Karlstad: Räddningsverket.

## 17 Bilaga A

Tabellerna i denna bilaga är producerade utifrån synfaktor grafema presenterade i avsnitt 7.1.2. D är det närmsta avståndet mellan två fönster

Avstånd mellan fasader 0,5m

Enkelfönster

| Y | 0       | 0,5     | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 0,50    | 0,71    | 1,12   | 1,58   | 2,06   | 2,55   | 3,04   | 3,54   | 4,03   | 4,53   | 5,02   |
| Φ | 59,524% | 36,220% | 7,862% | 1,833% | 0,597% | 0,246% | 0,119% | 0,064% | 0,037% | 0,023% | 0,015% |

Dubbelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1       | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 0,50    | 0,71    | 1,12    | 1,58   | 2,06   | 2,55   | 3,04   | 3,54   | 4,03   | 4,53   | 5,02   | 5,52   | 6,02   |
| Φ | 72,440% | 67,387% | 38,053% | 8,459% | 2,079% | 0,715% | 0,310% | 0,156% | 0,087% | 0,053% | 0,034% | 0,023% | 0,016% |

Avstånd mellan fasader 1m

Enkelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 1,00    | 1,12    | 1,41   | 1,80   | 2,24   | 2,69   | 3,16   | 3,64   | 4,12   | 4,61   | 5,10   |
| Φ | 27,289% | 20,640% | 9,767% | 3,903% | 1,645% | 0,772% | 0,401% | 0,226% | 0,136% | 0,087% | 0,058% |

Dubbelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1       | 1,5     | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 1,00    | 1,12    | 1,41    | 1,80    | 2,24   | 2,69   | 3,16   | 3,64   | 4,12   | 4,61   | 5,10   | 5,59   | 6,08   |
| Φ | 41,279% | 37,056% | 24,543% | 11,412% | 4,676% | 2,046% | 0,998% | 0,537% | 0,313% | 0,194% | 0,127% | 0,086% | 0,061% |

Avstånd mellan fasader 1,5m

Enkelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 1,50    | 1,58    | 1,80   | 2,12   | 2,50   | 2,92   | 3,35   | 3,81   | 4,27   | 4,74   | 5,22   |
| Φ | 14,398% | 12,225% | 7,852% | 4,310% | 2,276% | 1,234% | 0,703% | 0,421% | 0,265% | 0,173% | 0,118% |

Dubbelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1       | 1,5     | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 1,50    | 1,58    | 1,80    | 2,12    | 2,50   | 2,92   | 3,35   | 3,81   | 4,27   | 4,74   | 5,22   | 5,70   | 6,18   |
| Φ | 24,450% | 22,250% | 16,535% | 10,128% | 5,544% | 2,979% | 1,655% | 0,967% | 0,313% | 0,383% | 0,256% | 0,177% | 0,127% |



Avstånd mellan fasader 2m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 2,00   | 2,06   | 2,24   | 2,50   | 2,83   | 3,20   | 3,61   | 4,03   | 4,47   | 4,92   | 5,39   |
| Φ | 8,672% | 7,817% | 5,860% | 3,875% | 2,411% | 1,482% | 0,923% | 0,591% | 0,389% | 0,264% | 0,185% |

Dubbelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1       | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 2,00    | 2,06    | 2,24    | 2,50   | 2,83   | 3,20   | 3,61   | 4,03   | 4,47   | 4,92   | 5,39   | 5,85   | 6,32   |
| Φ | 15,634% | 14,533% | 11,692% | 8,271% | 5,356% | 3,335% | 2,072% | 1,313% | 0,855% | 0,574% | 0,396% | 0,281% | 0,204% |

Avstånd mellan fasader 2,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 2,50   | 2,55   | 2,69   | 2,92   | 3,20   | 3,54   | 3,91   | 4,30   | 4,72   | 5,15   | 5,59   |
| Φ | 5,739% | 5,348% | 4,378% | 3,247% | 2,267% | 1,538% | 1,038% | 0,707% | 0,489% | 0,345% | 0,248% |

Dubbelfönster

| y | 0       | 0,5     | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 2,50    | 2,55    | 2,69   | 2,92   | 3,20   | 3,54   | 3,91   | 4,30   | 4,72   | 5,15   | 5,59   | 6,04   | 6,50   |
| Φ | 10,695% | 10,117% | 8,595% | 6,644% | 4,786% | 3,305% | 2,245% | 1,527% | 1,051% | 0,736% | 0,526% | 0,383% | 0,284% |

Avstånd mellan fasader 3m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 3,00   | 3,04   | 3,16   | 3,35   | 3,61   | 3,91   | 4,24   | 4,61   | 5,00   | 5,41   | 5,83   |
| Φ | 4,061% | 3,860% | 3,335% | 2,666% | 2,018% | 1,478% | 1,066% | 0,767% | 0,555% | 0,406% | 0,300% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 3,00   | 3,04   | 3,16   | 3,35   | 3,61   | 3,91   | 4,24   | 4,61   | 5,00   | 5,41   | 5,83   | 6,26   | 6,71   |
| Φ | 7,719% | 7,396% | 6,526% | 5,353% | 4,144% | 3,084% | 2,245% | 1,621% | 1,173% | 0,855% | 0,631% | 0,471% | 0,371% |

Avstånd mellan fasader 3,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 3,50   | 3,54   | 3,64   | 3,81   | 4,03   | 4,30   | 4,61   | 4,95   | 5,32   | 5,70   | 6,10   |
| Φ | 3,018% | 2,905% | 2,600% | 2,187% | 1,754% | 1,362% | 1,037% | 0,782% | 0,590% | 0,446% | 0,340% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 3,50   | 3,54   | 3,64   | 3,81   | 4,03   | 4,30   | 4,61   | 4,95   | 5,32   | 5,70   | 6,10   | 6,52   | 6,95   |
| Φ | 5,810% | 5,618% | 5,092% | 4,354% | 3,549% | 2,791% | 2,144% | 1,626% | 1,228% | 0,929% | 0,707% | 0,542% | 0,419% |

Avstånd mellan fasader 4m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 4,00   | 4,03   | 4,12   | 4,27   | 4,47   | 4,72   | 5,00   | 5,32   | 5,66   | 6,02   | 6,40   |
| Φ | 2,328% | 2,260% | 2,072% | 1,807% | 1,512% | 1,227% | 0,976% | 0,766% | 0,599% | 0,467% | 0,365% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 4,00   | 4,03   | 4,12   | 4,27   | 4,47   | 4,72   | 5,00   | 5,32   | 5,66   | 6,02   | 6,40   | 6,80   | 7,21   |
| Φ | 4,520% | 4,401% | 4,067% | 3,584% | 3,034% | 2,488% | 1,994% | 1,574% | 1,233% | 0,964% | 0,754% | 0,593% | 0,468% |

Avstånd mellan fasader 4,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 4,50   | 4,53   | 4,61   | 4,74   | 4,92   | 5,15   | 5,41   | 5,70   | 6,02   | 6,36   | 6,73   |
| Φ | 1,849% | 1,806% | 1,684% | 1,507% | 1,302% | 1,094% | 0,901% | 0,732% | 0,589% | 0,473% | 0,379% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 4,50   | 4,53   | 4,61   | 4,74   | 4,92   | 5,15   | 5,41   | 5,70   | 6,02   | 6,36   | 6,73   | 7,11   | 7,50   |
| Φ | 3,612% | 3,534% | 3,313% | 2,987% | 2,602% | 2,203% | 1,826% | 1,490% | 1,204% | 0,968% | 0,777% | 0,593% | 0,503% |

Avstånd mellan fasader 5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 5,00   | 5,02   | 5,10   | 5,22   | 5,39   | 5,59   | 5,83   | 6,10   | 6,40   | 6,73   | 7,07   |
| Φ | 1,503% | 1,475% | 1,393% | 1,271% | 1,125% | 0,971% | 0,823% | 0,687% | 0,568% | 0,467% | 0,383% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 5,00   | 5,02   | 5,10   | 5,22   | 5,39   | 5,59   | 5,83   | 6,10   | 6,40   | 6,73   | 7,07   | 7,43   | 7,81   |
| Φ | 2,949% | 2,896% | 2,745% | 2,518% | 2,242% | 1,948% | 1,658% | 1,390% | 1,154% | 0,950% | 0,780% | 0,640% | 0,525% |

Avstånd mellan fasader 5,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 5,50   | 5,52   | 5,59   | 5,70   | 5,85   | 6,04   | 6,26   | 6,52   | 6,80   | 7,11   | 7,43   |
| Φ | 1,246% | 1,226% | 1,169% | 1,083% | 0,977% | 0,862% | 0,747% | 0,638% | 0,539% | 0,453% | 0,379% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 5,50   | 5,52   | 5,59   | 5,70   | 5,85   | 6,04   | 6,26   | 6,52   | 6,80   | 7,11   | 7,43   | 7,78   | 8,14   |
| Φ | 2,452% | 2,333% | 2,309% | 2,146% | 1,944% | 1,723% | 1,500% | 1,286% | 1,091% | 0,918% | 0,769% | 0,643% | 0,537% |

Avstånd mellan fasader 6m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 6,00   | 6,02   | 6,08   | 6,18   | 6,32   | 6,50   | 6,71   | 6,95   | 7,21   | 7,50   | 7,81   |
| Φ | 1,049% | 1,035% | 0,994% | 0,931% | 0,853% | 0,766% | 0,676% | 0,589% | 0,508% | 0,434% | 0,370% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 6,00   | 6,02   | 6,08   | 6,18   | 6,32   | 6,50   | 6,71   | 6,95   | 7,21   | 7,50   | 7,81   | 8,14   | 8,49   |
| Φ | 2,070% | 1,979% | 1,966% | 1,847% | 1,697% | 1,529% | 1,354% | 1,184% | 1,023% | 0,877% | 0,748% | 0,635% | 0,538% |

Avstånd mellan fasader 6,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 6,50   | 6,52   | 6,58   | 6,67   | 6,80   | 6,96   | 7,16   | 7,38   | 7,63   | 7,91   | 8,20   |
| Φ | 0,895% | 0,885% | 0,855% | 0,808% | 0,749% | 0,682% | 0,612% | 0,542% | 0,475% | 0,413% | 0,357% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 6,50   | 6,52   | 6,58   | 6,67   | 6,80   | 6,96   | 7,16   | 7,38   | 7,63   | 7,91   | 8,20   | 8,51   | 8,85   |
| Φ | 1,770% | 1,751% | 1,694% | 1,604% | 1,491% | 1,361% | 1,224% | 1,086% | 0,954% | 0,831% | 0,720% | 0,620% | 0,533% |

Avstånd mellan fasader 7m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 7,00   | 7,02   | 7,07   | 7,16   | 7,28   | 7,43   | 7,62   | 7,83   | 8,06   | 8,32   | 8,60   |
| Φ | 0,773% | 0,765% | 0,743% | 0,708% | 0,662% | 0,610% | 0,554% | 0,497% | 0,442% | 0,390% | 0,341% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 7,00   | 7,02   | 7,07   | 7,16   | 7,28   | 7,43   | 7,62   | 7,83   | 8,06   | 8,32   | 8,60   | 8,90   | 9,22   |
| Φ | 1,531% | 1,516% | 1,473% | 1,405% | 1,317% | 1,216% | 1,107% | 0,996% | 0,887% | 0,783% | 0,688% | 0,601% | 0,523% |

Avstånd mellan fasader 7,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 7,50   | 7,52   | 7,57   | 7,65   | 7,76   | 7,91   | 8,08   | 8,28   | 8,50   | 8,75   | 9,01   |
| Φ | 0,674% | 0,668% | 0,651% | 0,624% | 0,589% | 0,547% | 0,503% | 0,456% | 0,411% | 0,366% | 0,325% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 7,50   | 7,52   | 7,57   | 7,65   | 7,76   | 7,91   | 8,08   | 8,28   | 8,50   | 8,75   | 9,01   | 9,30   | 9,60   |
| Φ | 1,337% | 1,325% | 1,292% | 1,240% | 1,171% | 1,091% | 1,004% | 0,913% | 0,823% | 0,736% | 0,653% | 0,577% | 0,508% |

Avstånd mellan fasader 8m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 8,00   | 8,02   | 8,06   | 8,14   | 8,25   | 8,38   | 8,54   | 8,73   | 8,94   | 9,18   | 9,43   |
| Φ | 0,593% | 0,589% | 0,575% | 0,554% | 0,526% | 0,493% | 0,457% | 0,419% | 0,381% | 0,366% | 0,308% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 8,00   | 8,02   | 8,06   | 8,14   | 8,25   | 8,38   | 8,54   | 8,73   | 8,94   | 9,18   | 9,43   | 9,71   | 10,00  |
| Φ | 1,177% | 1,168% | 1,142% | 1,101% | 1,047% | 0,983% | 0,912% | 0,838% | 0,763% | 0,689% | 0,619% | 0,553% | 0,491% |

Avstånd mellan fasader 8,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 8,50   | 8,51   | 8,56   | 8,63   | 8,73   | 8,86   | 9,01   | 9,19   | 9,39   | 9,62   | 9,86   |
| Φ | 0,526% | 0,522% | 0,512% | 0,495% | 0,472% | 0,446% | 0,417% | 0,385% | 0,353% | 0,322% | 0,291% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 8,50   | 8,51   | 8,56   | 8,63   | 8,73   | 8,86   | 9,01   | 9,19   | 9,39   | 9,62   | 9,86   | 10,12  | 10,40  |
| Φ | 1,044% | 1,037% | 1,017% | 0,984% | 0,941% | 0,889% | 0,831% | 0,770% | 0,707% | 0,645% | 0,584% | 0,527% | 0,473% |

Avstånd mellan fasader 9m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 9,00   | 9,01   | 9,06   | 9,12   | 9,22   | 9,34   | 9,49   | 9,66   | 9,85   | 10,06  | 10,30  |
| Φ | 0,469% | 0,466% | 0,458% | 0,444% | 0,426% | 0,405% | 0,381% | 0,355% | 0,328% | 0,301% | 0,275% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 9,00   | 9,01   | 9,06   | 9,12   | 9,22   | 9,34   | 9,49   | 9,66   | 9,85   | 10,06  | 10,30  | 10,55  | 10,82  |
| Φ | 0,933% | 0,907% | 0,911% | 0,884% | 0,849% | 0,807% | 0,760% | 0,709% | 0,656% | 0,603% | 0,551% | 0,501% | 0,453% |

Avstånd mellan fasader 9,5m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 9,50   | 9,51   | 9,55   | 9,62   | 9,71   | 9,82   | 9,96   | 10,12  | 10,31  | 10,51  | 10,74  |
| Φ | 0,421% | 0,419% | 0,412% | 0,401% | 0,387% | 0,369% | 0,349% | 0,327% | 0,305% | 0,282% | 0,259% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 9,50   | 9,51   | 9,55   | 9,62   | 9,71   | 9,82   | 9,96   | 10,12  | 10,31  | 10,51  | 10,74  | 10,98  | 11,24  |
| Φ | 0,838% | 0,817% | 0,820% | 0,799% | 0,770% | 0,735% | 0,696% | 0,653% | 0,609% | 0,564% | 0,519% | 0,475% | 0,433% |

Avstånd mellan fasader 10m

Enkelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 10,00  | 10,01  | 10,05  | 10,11  | 10,20  | 10,31  | 10,44  | 10,59  | 10,77  | 10,97  | 11,18  |
| Φ | 0,380% | 0,379% | 0,373% | 0,364% | 0,352% | 0,337% | 0,321% | 0,302% | 0,283% | 0,264% | 0,230% |

Dubbelfönster

| y | 0      | 0,5    | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 3      | 3,5    | 4      | 4,5    | 5      | 5,5    | 6      |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D | 10,00  | 10,01  | 10,05  | 10,11  | 10,20  | 10,31  | 10,44  | 10,59  | 10,77  | 10,97  | 11,18  | 11,41  | 11,66  |
| Φ | 0,757% | 0,753% | 0,743% | 0,725% | 0,701% | 0,672% | 0,640% | 0,604% | 0,566% | 0,527% | 0,488% | 0,450% | 0,413% |