

Utvärdering av dagens befintliga dimensioneringsmetod för brand i bärande konstruktioner

Jens Thuresson

**Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety
Lund University, Sweden**

**Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet**

Rapport 5307, Lund 2009

Rapportens titel

Utvärdering av dagens befintliga dimensioneringsmetod för brand i bärande konstruktioner

English title

Evaluation of existing fire dimensioning methods valid for load carrying structures

Jens Thuresson

Rapport

ISSN: 1402-350

ISRN: LUTVDG/TVBB-5307-SE

Antal sidor:

Nyckelord:

Branddimensionering, bärande konstruktioner, brandgastemperatur, standardbrandförlopp, naturligt brandförlopp etc.

Abstract

The existing Swedish regulation of fire dimensioning regarding structures are separated into two separate parts which isn't unproblematic. This sets demands for a new regulation based on a holistic view that can reveal how a fire in a compartment can affect the whole building. This compared to the existing demands that only could quantify a certain time limit as a demand in only a single fire cell. This report is an attempt to evaluate the existing demands and compare them against more future like demands. In order to accomplish this literature study and model build have been accomplished in order to build up a model that can evaluate the existing demands. The new model differs in several ways from the old one, for example how the fire gas temperature is describe and how uncertainties are handled.

The evaluation of the existing demands has shown that they are suitable in some cases and thereby that the demands today are suitable for the moment. But in the future the model has to change because a divide demand for building regulations isn't an appropriate alternative for the future.

© Copyright: Brandteknik och Riskhantering, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2009.

Brandteknik och Riskhantering
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund
brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>
Telefon: 046 - 222 73 60
Telefax: 046 - 222 46 12

Department of Fire Safety Engineering
and Systems Safety
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden
brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se/english>

Förord

Denna rapport är slutresultatet av examensarbetet på Civilingenjörsprogrammet i riskhantering vid Lunds tekniska högskola (LTH) och motsvarar 20 poäng (30 ETCS). Arbetet har utförts med handledning av Håkan Frantzich, Brandteknik (LTH). Examinator är Robert Jönsson, Brandteknik (LTH).

Därutöver har Bernt Johansson, ProDevelopment, handlett och bidraget med hjälp under arbetets gång. Inspirationen till examensarbetet kommer ursprungligen från Michael Strömgren, Boverket.

Ett stort tack till er som varit inblandade!

Jens Thuresson
Lund den 6 oktober 2009

Sammanfattning

I Sverige finns idag två olika krav som gör det möjligt att säkerställa att branddimensionering för en viss given konstruktion är acceptabel. Bakgrunden ligger i att det är möjligt att beskriva brandförloppet på två olika, helt skilda sätt. Det första alternativet saknar koppling med en verklig brand och är en standardisering som erhållits genom att testa olika byggnadsmaterial i ugnar. Därav har en standardbrandkurva definierats och ligger till grund för det som kallas standardbrandförlopp. Detta är ett samband mellan tid och temperatur oberoende av andra parametrar.

Det andra alternativet är att brandförloppet beskrivs genom att ta till vara på hur de verkliga förutsättningarna är i rummet där branden sker, brandcellen. Kravet för att kunna beskriva branden är att utseendet på brandcellen är känt, hur mycket brännbart material det finns i brandcellen samt hur konstruktionselementen är belastade.

Konstruktionselement är antingen en balk eller en pelare som ser till att säkerställa att en viss given verksamheten kan ske i rummet, dvs klara av de laster som uppstår, och där inräknat en viss säkerhetsmarginal.

Det finns ett problem med att det finns två möjliga krav, eftersom det saknas transparens mellan kraven och med detta som utgångspunkt önskar Boverket att det i framtiden endast ska finnas ett krav vilket då betyder att en ny branddimensioneringsmodell måste tas fram.

Den mest använda metoden vid dimensionering är idag standardbrandförloppet vilket då uppfyller ett av de två möjliga kraven som ställs vid branddimensionering. Med anledning av att metoden saknar koppling med en verklig brand är det intressant att utvärdera dagens branddimensioneringsmetod genom att utvärdera den mot en branddimensionering som utgår från ett naturligt brandförlopp.

För att utföra denna utvärdering har metoderna deskription, modellbildning och prediktion använts. Deskription användes för att beskriva hur en modell som baserat på naturligt brandförlopp skulle byggas upp genom modellbildning. Prediktionen gick ut på att resultaten som modellen presenterade kunde därmed användas utvärdera dimensioneringsmetoden som utgick från standardbrandförloppet.

Modellen som byggdes upp utgick dels från information från standarddimensioneringen och dels från statistik över hur olika rum såg ut. Vidare gäller det olika kriterier för balken respektive pelaren för när brott sker. Den naturliga dimensioneringsmetoden ställde dessutom krav på att verksamheten som finns i brandcellen presenteras för att genom det kunna ge variabler dess rätta fördelning. Med utgångspunkt från detta valdes tre verksamheter där balken och pelaren testades.

Modellen riktighet kunde kontrolleras genom att testa den i ett standardbrandförlopp och modellen verkade rimlig.

Det konstateras att dagens standardbranddimensioneringsmetod i det utvalda fallet för en balk och en pelare visade sig vara tillräcklig för åtminstone två av tre olika verksamheter vilket pekade på att den duger för tillfället. Dock måste problemet med att det är möjligt att branddimensionera enligt två olika krav lösas och detta kräver att en nyare modell tas fram. Fram tills den nya modellen har utvecklats kan därmed dagens standarddimensioneringsmetod användas ett tag till framöver.

Summary

In Sweden today two possible methods that could be used to secure that the fire dimensioning regarding a certain structure is fulfilled. The background for the situation is that it is possible to describe a fire in two different ways which are completely separated. The first alternative doesn't have a connection to a real fire and is a result of testing different materials in ovens. The testing resulted in a standardized fire curve called a standard fire which is independent of parameters and is described by a temperature-time curve.

The second alternative is that the real conditions valid for the fire compartments where the fire is situated is being used. To be able to describe the fire some parameters must be known such as the geometry of the compartment, the amount of combustible material and the loads acting on the structural elements.

Structural elements are either a column or a beam which are dimensioned to be able to satisfy that the certain occupancy could take place in a compartment including a certain safety margin.

There is a problem regarding that there are two possible ways to fulfill the demands which points at the demands aren't transparent. This forms the basis for a starting point where Boverket wishes that the future should present only one demand which means that a new fire dimensioning model must be developed.

The most used method regarding fire dimensioning is the standard fire description which fulfills one of the two possible demands which is set regarding fire dimensioning. With the background that the method doesn't have a connection with a real fire it is interesting to evaluate the standard fire dimensioning method which could be accomplished using a model built upon natural fire curves.

To be able to fulfill this evaluation the methods description, model building and prediction have been used. Description was used to explain how a model built upon natural fire should look like. This information could be used to build up the model through model building. The prediction was used to evaluate the standard fire model by comparing results with the natural fire model.

The new model that was built up used information from the standard fire dimensioning and also statistics from different compartments. Regarding the structural elements there are different criteria regarding when failure happens. The natural fire dimensioning method demanded that the occupancy in the compartment was presented because variables got a certain distribution dependent of the occupancy. With this as a background three occupancies were chosen.

The developed model could be reviewed using the standard fire as a starting point and it showed that the model seemed reasonable.

It could be concluded that the existing standard fire dimensioning in the chosen cases beam and column seemed to be valid for two of three occupancies which confirmed that the standard method is suitable. However the problem with the different demands must be solved and this calls for the development of a new model. Until the new model is developed the standard fire method could be used.

Innehållsförteckning

Förord.....	3
Sammanfattning.....	4
Summary	5
1. Inledning.....	9
1.1. Bakgrund	9
1.1.1. Dagens dimensionering	12
1.2. Syfte.....	13
1.3. Frågeställningar	13
1.4. Mål.....	13
1.5. Begränsningar och avgränsningar	13
1.6. Målgrupp	13
1.7. Övergripande metod	14
2. Metoder och tekniker.....	15
2.1. Metoder.....	15
2.2. Tekniker	15
2.3. Angreppssätt	16
3. Teori.....	19
3.1. Befintlig branddimensionering.....	19
3.1.1. Gastemperaturmodeller.....	20
3.1.2. Beskrivning av sambandet för naturligt brandförlopp.....	22
3.1.3. Öppningsfaktor.....	23
3.1.4. Brandbelastning.....	24
3.1.5. Maximal gastemperatur	24
3.1.6. Avsvalningsfasen	25
3.1.7. Brandcellen.....	25
3.2. Problematiken med dagens dimensionering	26
3.2.1. Sammanställning av problematiken	26
4. Analys av bärande konstruktioner i en brand	27
4.1. Konstruktionselement i brandceller	27
4.2. Konstruktionselement i bärande konstruktioner	27
4.2.1. Balk	28

4.2.2.	Pelare.....	29
4.3.	Lasteffekter.....	29
4.3.1.	Variabel last.....	29
4.3.2.	Egentyngd.....	30
4.4.	Modell för konstruktionselement.....	30
4.4.1.	Modell för balken.....	30
4.4.2.	Modellen för pelaren.....	32
4.5.	Brandgastemperaturpåverkan på den bärande konstruktionen.....	33
4.6.	Parametrar för temperaturökningen i stålet.....	33
4.6.1.	Bakgrunden till valen av lämpliga parametrar.....	33
4.6.2.	Beräkningsmetod.....	34
4.6.3.	Termiska egenskaper och temperaturberoende variation.....	35
4.6.4.	Deterministiska värden.....	35
5.	Beräkningar och genomförande.....	35
5.1.	Översikt.....	35
5.2.	Simuleringsmodell.....	37
5.2.1.	Villkor och antaganden.....	37
5.3.	Stokastiska och deterministiska ingångsparametrar.....	37
5.3.1.	Brandbelastning.....	38
5.3.2.	Lasteffekter.....	39
5.3.3.	Bärförmåga.....	40
5.4.	Ingångsparametrar med termiska egenskaper.....	40
5.4.1.	Specifik värmekapacitet.....	40
5.4.2.	Densitet.....	41
5.4.3.	Försämring av bärförmågan.....	41
5.5.	Sammanställning av scenarier.....	42
5.6.	Verifiering av den framtagna modellen.....	43
6.	Resultat.....	44
6.1.	Simuleringsresultat för en balk utsatt för brand.....	44
6.1.1.	Brottsannolikheten för en balk utsatt för brand.....	45
6.2.	Simuleringsresultat för en pelare utsatt för brand.....	46
7.	Diskussion.....	48
7.1.	Simuleringsmodellen.....	48
7.1.1.	Bakgrundsmaterialet.....	48

7.1.2. Modelljämförelse	48
7.2. Simuleringsresultat.....	50
8. Slutsatser	53
9. Källhänvisning.....	55
Bilaga 1	57
Probabilistic design of steel structures in fire.....	57
Bilaga 2	62
B2.1. Monte Carlo simulation.....	62
B2.1.1. How the simulation works	62
B2.1.2. Theory	62
B2.1.3. Distributions used in the simulation	63
Bilaga 3. Ekvationssammansättning inklusive förändringar.....	64
B.3.1. Temperatur	64
B.3.2. Balkens bärförmåga	65
B.3.3. Pelarens bärförmåga	65
B.3.3. Lasteffekter på balken.....	65
B.3.4. Lasteffekter på pelaren	65
Bilaga 4. Brandbelastning.....	66

1. Inledning

Detta kapitel behandlar bakgrunden, syfte, frågeställningar och mål för examensarbetet. Vidare rymmer kapitlet begränsningar och avgränsningar.

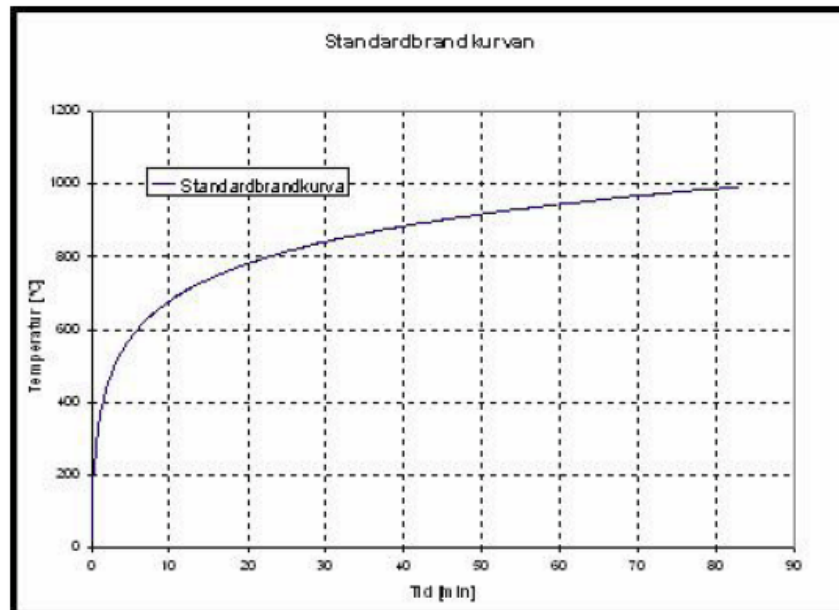
1.1. Bakgrund

Under 70-talet gjordes flertalet experiment, i Lund, som undersökte stålkonstruktioners bärförmåga i bränder med olika förutsättningar. Genom att studera bränder i olika brandceller kunde parametriska temperatur-tid-kurvor framställas vilket således blev resultatet av experimenten. Dessa parametriska kurvor beskrev hur gastemperaturen förändrades med tiden och kunde därmed användas för att beskriva det som kallas naturliga bränder (Magnusson, Petterson, & Thor, 1974). I dagens befintliga föreskrifter i Sverige gällande branddimensionering för bärande konstruktioner tillåts det att dimensioneringen sker genom klassificering alternativt baserad på en modell som bygger på naturligt brandförlopp. Boverkets byggnadsregler, BBR, medger dessa två alternativ i det femte avsnittet och gällande användning av modell för naturligt brandförlopp är det allmänna rådet att följa avsnitt tio i Boverkets byggnadsregler, BKR (Boverket1, 2008). I BKR modell för naturligt brandförlopp återfinns delar av experimenten som inledde stycket. Därmed finns ett alternativ till att använda det parametriska brandförloppet vid branddimensionering. Hädanefter kommer ordet dimensionering användas synonymt med branddimensionering. Oftast används dock metoden i BBR, standardbrandförlopp, vilket kommer att behandlas närmare i det efterföljande stycket. I dagsläget borde dock standardbrandens dimensioneringsmetod kunna utvärderas med hjälp av beskrivningen av den parametriska branden (naturligt brandförlopp). Det skulle vara intressant att undersöka riskerna med dagens branddimensioneringsmetod som uppstår på grund av de tudelade dimensioneringsalternativen i föreskrifterna, vilka saknar transparens och är svåra att kvantifiera för att få en jämförbar absolut säkerhetsnivå mellan de olika dimensioneringsalternativen. Det som menas med att undersöka riskerna är att utreda den mer verklighetsnära brottsannolikheten för en bärande konstruktion, som är dimensionerad med standardbrandförloppet, genom att studera den i ett naturligt brandförlopp. Slutsatser som dras i och med detta skulle därefter kunna fungera delvis som underlag för en förnyad dimensioneringsmetod. Ursprungligen kommer idén till detta examensarbete från Boverket vilka är intresserade av att förnya sina tudelade föreskrifter och ersätta dem med en gemensam (Strömgren1, 2008).

Dagens befintliga dimensioneringsmetod för bärförmåga, givet att brand uppstår, uttrycker säkerhetsnivån genom ett klassificeringssystem kvantifierat som en tidsperiod baserat utifrån en standardbrandpåverkan. Alternativt kan en modell för naturligt brandförlopp användas vilket innebär att hänsyn tas till brandcellens brandbelastning, öppningsfaktor samt de omgivande förutsättningarna (Boverket2, 2003). Denna uppdelning är inte oproblematiskt vilket leder till att nya krav som är mer lämpliga för framtiden bör utformas (Strömgren2, 2008).

Genom att använda klassificeringssystemet kan dimensioneringen göras genom att använda provning och/eller beräkning av konstruktionselementen i en standardbrand. Provning uppnås genom att använda det föreslagna konstruktionselementet tillsammans med en statisk last samt det faktum att elementet utsätts för brandpåverkan (Boverket1, 2008). Standardbranden, ISO 834, definieras

genom en temperatur-tid-kurva vilken beskriver hur gastemperaturen förändras med tiden och därmed ger möjligheten att sätta krav kvantifierade som en tidsgräns enligt figur 1.



Figur 1. Standardbrandkurvan som visar hur temperatur förändras med tiden.

Brandmotståndet för olika konstruktionselement jämförs med en förutbestämd brandteknisk klassificering som beror på egenskaper hos brandcellen vilket innebär var någonstans konstruktionselementet är placerat och hur mycket brännbart material som finns tillgå, brandbelastning, i brandcellen. Det utrymme där branden äger rum benämns härefter brandcell. När denna typ av dimensionering görs kan metoderna provning eller beräkning användas enligt standardbrandkurvan (ISO 834) eller en kombination av båda metoderna (Boverket1, 2008).

Båda metoderna, standardbrandförloppet och det naturliga brandförloppet, ger alltså en relation för hur gastemperaturen förändras med tiden och detta kan därefter användas för att beskriva hur temperaturen fortplantar sig genom andra material med hjälp av olika samband. Det som sambanden beskriver är med vilken hastighet temperaturen fortplantar genom olika material. Därmed kommer gastemperaturen kunna användas för att beskriva hur temperaturökningen sker i ett konstruktionselement och därmed indirekt hur det påverkar bärförmågan. Ökande temperatur i konstruktionsdelen kommer att försämra dess bärförmåga och utförligare beskrivning av hur en brand i ett rum påverkar bärförmågan kommer att behandlas i teorikapitlet nedan (Kapitel 3).

Givet att olika metoder kan användas för att uppfylla kraven som föreskrifterna ställer angående brandskydd visar att det finns några problem. Kraven som finns i dagsläget för branddimensionering är inte transparenta vilket resulterar i svårigheter att jämföra de två alternativen vad det gäller direkta säkerhetsnivåer. Transparensen kan förklaras ligga i det faktum att de två föreskrifterna inte alltid ställer samma krav och därför kan en konstruktionslösning uppfylla den ena föreskriften samtidigt som den andra föreskriften säger att konstruktionen inte är acceptabel. Detta leder till slutsatsen att dagens krav inte är helt utredda eller helt omfattande. Utifrån denna slutsats är det intressant att undersöka säkerhetsnivåer och hur andra lämpliga krav på dimensionering kan se ut.

Boverket har en ambition att i framtiden kunna utveckla nya, mer hållbara, kriterier för branddimensionering av bärande konstruktioner. Detta med anledning av att det i framtiden endast ska finnas en föreskrift med en metod till skillnad från dagens föreskrifter med två möjliga metoder. Den framtida metoden är tänkt att vara baserad på ett holistiskt synsätt. Innebörden med ett holistiskt synsätt är att det är möjligt att simulera en byggnads brandförlopp i en brandcell, för att kunna utvärdera vilken påverkan det har på andra brandceller i byggnaden samt om branden i den givna brandcellen kan leda till kollaps av hela byggnaden. Då en byggnad består av många brandceller kommer det vara möjligt att simulera brandförloppet i varje brandcell, var för sig, för att på så vis konstatera vilka brandceller som är av väsentlig betydelse för att byggnaden inte ska kollapsa. Detta synsätt är lite tvetydigt på det viset att det är oklart att förutsäga om det går att åstadkomma en metod som kan uppfylla beskrivningen ovan eller inte och detta resonemang blir därmed utgångspunkten för examensarbetet (Strömgren1, 2008).

För att ytterligare knyta an till varför en förnyad modell kommer att vara nödvändig i framtiden kan problematiken med standarddimensionering behandlas mera ingående och på så vis belysa varför dagens föreskrifter kan anses vara tvetydiga.

Standardbranden, ISO 834, jämfört med det naturliga brandförloppet skiljer sig på flera sätt. Övergripande kan det konstateras att standardbrandkurvan inte representerar ett verkligt brandförlopp vilket betyder att den är vald utgående från några temperatur-tidförhållanden vilka baserats på provning av byggnadsmaterial i ugnar. Konsekvensen av denna typ av representation kan bli att kollaps av en bärande konstruktionsdel kan tillåtas ibland. Ett exempel är när brandcellen innehåller bränsle eller något som gör att temperaturen stiger snabbt under en kort tid och därmed är gastemperaturen betydligt högre jämfört med standardbrandförloppet vilket gör att stålet på så vis värms upp fortare om samma förhållande i övrigt råder. Naturligt brandförlopp vilket representeras av en parametrisk kurva är däremot en modell av en verklig brand. Genom att testa den bärande konstruktionen i brandcellen för den verksamhet som den är ämnad för skulle därmed branddimensioneringen bättre kunna optimeras och därmed skulle modellen kunna beskriva verkligheten med mindre osäkerhet.

Dagens branddimensionering enligt standardbrandkurvan, ISO 834, tar viss hänsyn till osäkerheter genom olika faktorer, partialkoefficienter, och därmed finns det viss marginal av osäkerhet med dagens dimensionering. Standardbrandkurvan och partialkoefficienter är bara två av flera ingående delar som används vid branddimensionering vilka kommer behandlas vidare i kapitel 3. Den nuvarande branddimensionering har också en annan svaghet eftersom den utgår från att en viss kvantifierad tidsgräns ska uppnås och vad som sker efter det gränsen kan därmed inte metoden säga något om. Därför borde ett annat probabilistiskt angreppssätt vara en bättre metod jämfört med dagens, eftersom hela tidförloppet kan studeras och därmed kan en gräns sättas utifrån dess resultat av brottsannolikhet vid olika tidpunkter. Dagens dimensioneringsmetod för brand har också svagheter som att den ger lättnader i form av införande av olika faktorer om till exempel byggnaden har sprinklers och om brandmännen kan utföra aktiva åtgärder för att släcka branden inom en viss tidsram (Boverket1, 2008).

Utgångspunkten för examensarbetet blir därför att granska en befintlig branddimensionering av bärande konstruktioner som innehar den ovan nämnda problematiken (Bilaga 1). Detta betyder att en ny modell måste byggas upp, som kan jämföras med dagens dimensioneringsmetod och på så vis

kunna ge en fingervisning huruvida dagens modell verkar rimlig eller inte i olika sammanhang. Dagens dimensionering utgår delvis från olika Eurocodestandarder som därmed kan användas i olika datorsimuleringar. Eurocodestandarden består av ett flertal dokument, en form av Europastandard, som innehåller beräkningsregler för dimensionering av bärverk gällande för byggnader och anläggningar (SIS, 2009).

Bakgrundsmaterialet (dimensioneringen enligt Bilaga 1) kommer också att kunna användas för att ge viktiga indata till modellen som ska byggas upp. Övriga parametrar som behövs kommer att identifieras samt motiveras varför de ingår i modellen.

1.1.1. Dagens dimensionering

Den konventionella branddimensioneringen (Bilaga 1) innebär en dimensionering med hjälp av standardbrandkurvan ISO 834 som utgångspunkt för hur gastemperaturen förändras med tiden. När kraven kvantifieras som en tidgräns kan därmed Eurocodestandarderna användas för att dimensionera hur ett bärande konstruktionselement ska isoleras för att uppfylla de ställda kraven (CEN1, 2002) (CEN2, 2005). Genom att använda Eurocodestandarderna kan tidskravet omvandlas till en ekvivalent temperatur i konstruktionselementet och detta kan användas för att därigenom kunna fastställa vilken tjocklek på brandskyddsmaterialet som krävs för att motstå kollaps inom en viss förbestämd tidsram (Bilaga 1).

För att kunna förstå hur förhållande mellan ökande gastemperatur och minskande bärförmåga fungerar krävs att ytterligare detaljer klargörs. Tillämpning av förloppen som kommer att beskrivas nedan härstammar från en metod som presenteras i sin helhet i bilaga 1.

Givet att gastemperatur-tidkurvan är känd är det möjligt att beräkna hur temperaturen fortskrider i olika material och för att uppnå detta krävs det att några parametrar är kända. De storheter som behövs är värmeöverföringsförhållandena på materialens ränder och de inre värmeöverföringsegenskaperna (Pettersson & Ödeen, 1978).

För att sammanfatta hur den rådande branddimensioneringen går till (Bilaga 1) kan det nämnas att givet ett visst konstruktionselement och ett krav kvantifierat som en tidsgräns kan en kritisk ståltemperatur bestämmas. Detta följer från Eurocode (2005) vilken innehåller förhållandet mellan ökande ståltemperatur och indirekt reducerad bärförmåga. Detta förutsätter att konstruktionselementets bärförmåga och lasteffekt (lasterna som verkar på konstruktionselementet) har beräknats i förväg. Storleken på reduktionen, till följd av ökad ståltemperatur, av bärförmåga som är tillåten finns återgivet i Eurocodestandarderna. Detta betyder alltså att Eurocode presenterar en kvot mellan den normala temperaturen (20°C) och temperaturen beroende av bärförmågan. De eventuella osäkerheter som finns, vilket nämnts tidigare, behandlas genom partialkoefficienter och införs därmed kvantifierat som en faktor.

De sista bitarna av processen vilket betyder sambandet mellan gastemperatur och ståltemperatur kräver en vidare förklaring. I början av detta avsnitt nämndes villkoren för värmetransporten och det kommer att koppla samman de två temperaturerna. Stålkonstruktionselementet är avskilt från brandcellen genom en gipsskiva vilken isolerar elementet och fungerar därmed som ett brandskyddande material. Tjockleken på gipsskivan är den parameter tillsammans med hur många sidor som är exponerade som bestämmer hur ståltemperaturen förändras. Genom resonemang kan det konstateras att ett oskyddat stålkonstruktionselement värms upp snabbare jämfört med ett

brandskyddat element. Förklaringen till detta är att stål leder värme bättre jämfört med ett brandskyddsmaterial såsom gips. En tjockare gipsskiva betyder att uppvärmningen av stålet går långsammare. När den kritiska temperaturen i konstruktionselementet är känd är det möjligt att bestämma hur tjock isoleringen måste vara för att uppfylla det kvantifierade tidskravet.

1.2. Syfte

Examensarbetets primära syfte är att utvärdera dagens metod för branddimensionering genom att göra en jämförelse med en mer omfattande probabilistisk metod. Detta är intressant eftersom skillnaden mellan standardbranden och ett naturligt brandförlopp kan påvisas och på så vis granska och kontrollera dagens branddimensionering.

1.3. Frågeställningar

- Är det möjligt att använda ett utvidgat probabilistiskt angreppssätt för att kvantifiera säkerhetsnivåer gällande för brandutsatta bärande konstruktioner?
- Hur är denna simuleringsmodell för kvantifiering av säkerhetsnivåer uppbyggd?
- Vilka felkällor finns i modellen och är den realistisk?
- Vad kan modellen konstatera om dagens dimensioneringsmetod?

1.4. Mål

Det övergripande målet är att ta fram en ny och mer utvecklad probabilistisk modell. Den framtagna modellen ska kunna undersöka två bärande konstruktionselement, en balk och en pelare, dimensionerade enligt standardbranden, ISO 834 (Bilaga 1). Med att undersöka menas att konstruktionselementen ska testas i den probabilistiska modellen och därmed kunna utvärderas.

1.5. Begränsningar och avgränsningar

På det övergripande planet kan det konstateras att modellen som ska utvecklas börjar på en grov inledande nivå och förfinas med tiden. Detta examensarbete är inte tillräckligt för att göra modellen perfekt och det är inte intentionen heller, utan denna rapport ska betraktas som en inspirationskälla för hur början till ett probabilistiskt angreppssätt kan se ut.

De bärande konstruktionselementen som valts att studeras som ingångsdata till simuleringsmodellen är valda enligt bilaga 1. Detta innebär att det är två konstruktionselement, en balk och en pelare, som ska studeras med varsitt givet tvärsnitt.

Det är den bärförmågan som kommer att studeras i simuleringsmodellen, andra hållfasthetsfenomen som kan ske till följd av att en brand uppstår har inte undersökts. De gällande bärförmågeegenskaperna för olika konstruktionselement följer från dimensioneringen i bilaga 1.

Det finns en del osäkerheter gällande termiska fenomen som kommer att redovisas och begränsas på det viset att de i vissa fall kan försummas i modellen.

1.6. Målgrupp

Detta examensarbete riktar sig till civilingenjörstudenter med inriktning mot ämnena konstruktion, brand och/eller riskhantering. Rapporten kan även vara av intresse för andra personer med intressen inom konstruktion, brand och/eller riskhantering.

1.7. Övergripande metod

Examensarbetet har genomförts på följande sätt:

- Projektplan utformas efter diskussioner med Michael Strömgren (Boverket), Bernt Johansson (konsultföretaget ProDevelopment), konstruktionsprofessorn Sven Thelandersson samt handledaren Håkan Frantzich.
- Examensarbetet började med en grundlig litteraturstudie för att undersöka vad som är gjort inom området samt för att finna väsentlig information för utvärderingen. Då detta ansågs vara tillräckligt började utformande av modellen som skulle fungera som underlag för utvärdering av dagens standarddimensioneringsmetod. När modellen ansågs vara tillräcklig kunde dess resultat tolkas och diskuteras för att kunna dra viktiga slutsatser.

2. Metoder och tekniker

Detta kapitel beskriver metoder och tekniker för hur arbete har utförts. Med metod avses hur ett vetenskapligt tillvägagångssätt används för att undersöka och behandla ett visst valt ämne. Metoden påverkar arbetet och karakteriserar hela rapporten. Med teknik avses hur material samlas in för att exempelvis kunna beskriva och jämföra något (Ejvegård, 2003). Vidare förklaring samt tillämpningar av metoder och tekniker ges i detta kapitel.

2.1. Metoder

I detta examensarbete har metoderna *deskription*, *modellbildning* och *prediktion* använts.

Deskription är när en redogörelse eller beskrivning för ett specifikt ämne görs. För att använda denna metod måste fakta presenteras på det viset att de kan avslöja vilken betydelse de har för rapporten, alltså dess relevans. Detta arbete består till en del av en deskriptiv studie eftersom en granskning av dagens branddimensionering har varit nödvändig för att kunna uppfylla det övergripande syftet med att göra en probabilistisk modell och därför har det krävts att relevant teori rörande ämne har fått avhandlas.

Modellbildande är när en bild av verkligheten skapas genom en mer eller mindre avancerad modell. En enklare modell ger intrycket att verkligheten är någorlunda representerad medan en mer avancerad modell ger en mer detaljerad beskrivning av verkligheten. Graden av svårighet på modellen ska anpassas efter dess tänkta användningsområde. Till stor del utgörs examensarbetet av modellbildande eftersom syftet var att representera ett verkligt brandförlopp genom ett probabilistiskt angreppssätt. Graden på detaljrikedom har begränsats dels till tillgängligt material samt för att få en nivå som representerar verkligheten relativt väl utan att medföra att det är alltför svårt att förstå hur modellen är uppbyggd.

Prediktion är när framtida händelser kan förutses. Om det väntade resultat uppnås är det bra och om det inte är tillfredsställande måste modellen analyseras för att kunna göra nästa förutsägelse mer riktig. Det finns ibland svårigheter i att bestämma om en förutsägelse var riktig och detta inträffar exempelvis då förutsägelsen var delvis sann (Ejvegård, 2003). Prediktionen har fungerat som en mätare för att kontrollera att simuleringsmodellen som arbetet mynnat ut i har varit rimlig och även för att förbättra modellen. Denna metod har varit nödvändig för arbetet eftersom det var det enda sättet att kontrollera att modellen verkade rimlig. Alltså den probabilistiska modellens resultat kunde användas tillsammans med den traditionella branddimensioneringen för att se att modellen verkade rimlig.

2.2. Tekniker

I detta examensarbete har teknikerna *litteratursökning*, *litteraturstudie* och *beräkning*, *statistiskt material* använts.

Det som avses med litteratur är i princip allt tryckt material såsom böcker, artiklar, rapporter, uppsatser m.m. När en *litteratursökning* ska genomföras är det lämpligt att göra det genom att söka i databaser eftersom mycket litteratur finns samlat på en och samma plats. När lämpliga källor hittats är det fördelaktigt att granska vilken ursprungskällan är eftersom den kan leda till ytterligare information eller andra lämpliga källor. När insamlad information granskas görs det genom en *litteraturstudie* vilket är en form hopsamling av informationen som vill påvisas vara av väsentlig karaktär för rapporten. Med andra ord så gäller det att sälla ut de viktiga bitarna som kan bidra med

relevanta fakta till rapporten (Ejvegård, 2003). Litteraturinsamlingen till examensarbetet började till en början på en grovskalig nivå för att se hur mycket information som kunde samlas in gällande området branddimensionering. Framför allt låg fokus på att sätta sig in i dagens dimensionering samt att se vad som var gjort på området probabilistisk branddimensionering. Informationen har inhämtades både från tryckt material i form av vedertagen litteratur samt genom databaser från Lunds Tekniska Högskola: Electronic Library Information Navigator (ELIN). Artiklarna har huvudsakligen fungerat som information om de ingående bitarna som är nödvändiga vid en probabilistisk branddimensionering. Artiklarna har också tillsammans med den tryckta litteraturen fungerat som utgångspunkt för att formulera olika krav på hur modellen bör se ut och vilka ingående delar som måste undersökas vidare.

Då naturvetenskapliga undersökningar ska genomföras är det vanligt att statistik används. I detta examensarbete förekommer det på flera ställen, dels då beräkningar genomförs och dels erhålls resultaten som statistiska fördelningar. *Statistiskt material* är när statistiska data används för att kunna slutsatser och det är viktigt att när denna teknik används att ge anledningar till hur samt varför en viss typ av data använts. Då den probabilistiska modellen skulle byggas upp krävdes stor tillgång på statistiskt material eftersom det ökar modellens chanser för att beskriva verkligheten till en viss grad i alla fall. Detta gjordes genom att dels genom att studera tryckt material och även databaserna som nämnts tidigare. Det statistiska materialet som erhålls från resultaten återspeglar de fördelningar som använts som indata och ger därmed upphov till nya fördelningar i resultaten.

Speciella aspekter i de använda teknikerna måste beaktas; *reliabilitet* och *validitet* är därigenom två viktiga begrepp.

Reliabilitet innebär hur tillförlitliga undersökningens mätinstrument är. Om samma resultat erhålls gång på gång vid upprepade undersökningar så betyder det att reliabiliteten hög (Björklund & Paulsson, 2003). För att säkerhetsställa tillförlitligheten används främst tryckt material samt databaser. Tryckt material har den egenskapen att innan de kommit ut granskats och på vis innehåller det en form av garanti att informationen bör vara åtminstone om inte helt korrekt så åtminstone rimlig. Vad det gäller databaserna som använt har större delen kommit från *Elsevier* vilket bör ses som en tillförlitlig källa då Lunds universitet anger den som möjlig informationsenhet.

Validitet är instrumentet som talar om i vilken utsträckning undersökningen verkligen mäter det som vill mätas (Björklund & Paulsson, 2003). Författaren har i kombination med litteraturen som funnits till detta arbete bildat en uppfattning om hur modellen bör se ut vilket tills viss del påverkat hur arbetet är genomfört. Tillgången på information, mest avsett statistiska data har också påverkat hur modellen har kunnat utvecklas. Ökad tillgång på statistiskt material skulle kunna öka validiteten på undersökningen. Validiteten skulle också kunna ökas genom att beredda studierna för att på så vis kunna belysa modelluppbyggande från flera olika håll och perspektiv.

2.3. Angreppssätt

Detta examensarbete baseras, enligt ovanstående avsnitt, på litteraturstudie och brandsimuleringar för att kunna få fram temperaturförändringar vilket ska kunna användas för att skapa en modell för

bärförmågan i olika konstruktionselement. Modellerande och utvecklande av simuleringen kommer att göras genom @RISK vilket är ett tilläggsprogram till Excel (för kalkylering se Bilaga 2).

Det finns idag metoder som gör det möjligt att förutse temperaturen i en brandcell och det finns också modeller som kan beräkna temperaturen i ett bärande konstruktionselement.

Framtidens mål är att det ska vara möjligt att använda ett holistiskt perspektiv för att studera bara en liten del av en hel byggnad och se hur den påverkar byggnaden i helhet. Detta mål är inte oproblematiskt att nå och övergången från dagens metoder till framtidens mera moderna modell bör genomföras stegvis. Detta examensarbete ska ses som en inspiration till nästa steg mot en mera modern branddimensioneringsmetod.

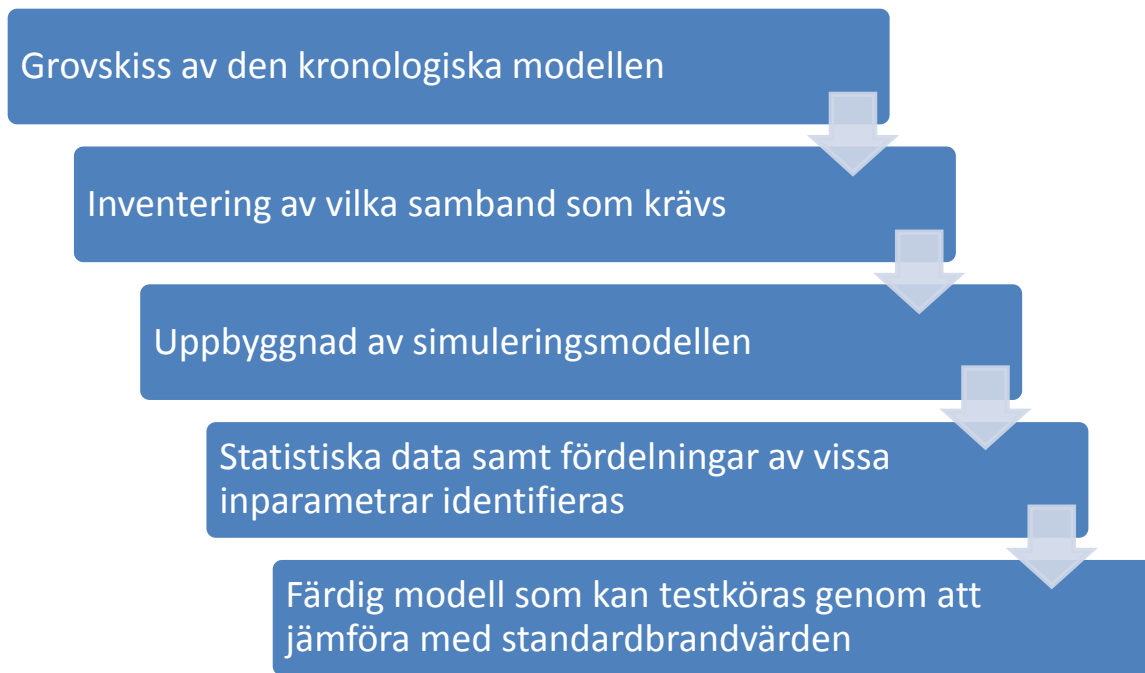
Det första steget i utvecklingen mot ett holistiskt synsätt är att göra probabilistiska modeller vilka kan utvecklas efterhand för att i slutändan förhoppningsvis nå fram till målet.

Genom att använda dagens metoder för branddimensionering tillsammans med statistik skulle det vara intressant att introducera ett probabilistiskt angreppssätt. Fördelen med att göra detta kan vara av flera anledningar och en är att detta ger möjligheten att göra en känslighetsanalys. Detta kan vara intressant eftersom det kan finnas något mönster och/eller samband som kan leda till viktiga slutsatser.

Brand i en brandcell kan idag beskrivas genom parametriska temperatur-tid-kurvor vilka ger information om hur gastemperaturen förändras med tiden i en brandcell. De parametriska kurvorna kan beskriva verkligheten bättre jämfört med standardbrandförloppet. Detta beror på att den parametriska brand är kopplad till faktorer som beror på brandcellens egenskaper. Parametrarna är öppningsfaktor, brandbelastning och materialegenskaper i brandcellen.

Jämfört med dagens existerande branddimensionering kommer den modellen som skapas i och med examensarbetet att vara mer kronologiskt ordnad jämfört med den modell som finns i bilaga 1. Detta innebär alltså att modellen följer hela proceduren från när en brand börjar tills slutet då den bärförmågan hos ett konstruktionselement förändras. Kortfattat kan detta beskrivas som att först ska det antas att en övertändning sker vilket betyder att hela brandcellen har ekvivalent gastemperatur överallt. Gastemperaturen kan därefter användas tillsammans med samband för att beräkna hur ståltemperaturen förändras. Sambanden beskriver hur värmen fortplantar sig genom olika material och på så vis kan påverka ståltemperaturen. Således är det alltså samband om trögheten hos stålets isolering samt hur många sidor det utsatta elementet är exponerat på. Stål har temperaturberoende egenskaper och ökande temperatur i stålet leder till lägre bärförmåga. När den bärförmågan minskar under de pålagda lasterna leder detta slutligen till kollaps. Elementet är därmed inte tillräckligt starkt för att klara av den pålagda lasten.

Detta är förklaringen till den kronologiska ordningen vilken början från början och följer förloppet tills slutet.



Figur 2. En överblick hur modellen började på en grov nivå, för att efterhand förfinas och bli en probabilistisk modell.

3. Teori

I detta kapitel återfinns en djupgående beskrivning av hur dimensioneringen går till idag med avsikt att lyfta fram problematiken med dagens branddimensionering ytterligare och är en vidareutveckling av bakgrundsavsnittet.

3.1. Befintlig branddimensionering

För att kunna återge hur branddimensionering går till är en lämplig utgångspunkt standardbranden och detta för att behandla förloppet när konstruktionselement dimensioneras för brand i kronologisk ordning.

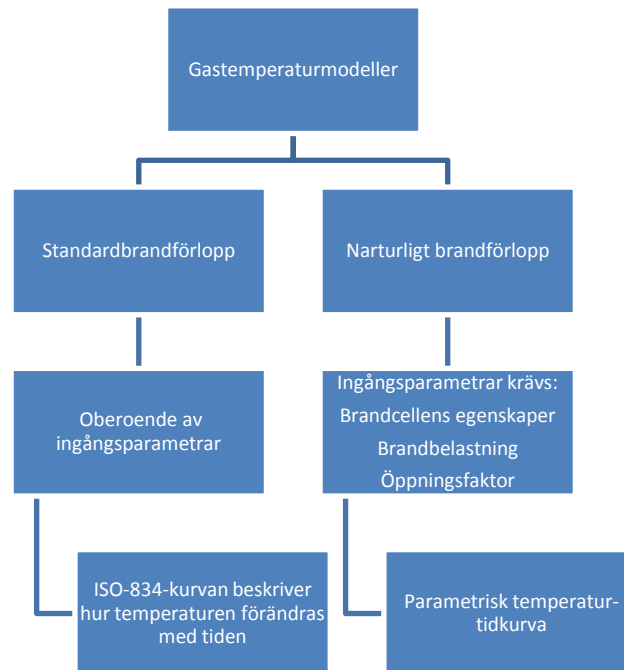
Bakgrunden till detta examensarbete och några viktiga parametrar kommer från ett dokument (Bilaga 1) som innehåller tillvägagångssättet för dagens branddimensionering av två bärande konstruktionselement (en balk och en pelare). Beräkningen som används för branddimensionering i dagens metod utgår från standardbrandkurvan ISO 834 och detta är viktigt att nämna eftersom resultatet ska endast ses som ett mått på brandmotståndet. Vad som menas är alltså att verkligheten beskrivs inte fullt ut eftersom en riktig brand kan skilja sig betydligt från standardbranden vilket förklarades i bakgrundskapitlet (SBI, 2008). Syftet med kurvan är att ha ett "standard"-mått på brand som då kan användas i en klassificeringsmetod.

Det bör också nämnas att då värme transporteras genom olika medium sker det med en viss tröghet vilket vill förtydliga att gastemperaturen inte är ekvivalent med ståltemperaturen.

Dagens branddimensioneringskrav, givet att standardbranden används, kvantifieras genom en tidsgräns. Standardbrandkurvan, ISO 834, ger den övre gränsen för gastemperaturen som konstruktionselementet ska klara av utan att kollapsa. När gastemperaturen ska översättas till en form av motstånd som konstruktionselementet måste klara av finns det en del osäkerheter som måste behandlas. Dagens dimensioneringsmetod kan ta hänsyn till osäkerheter genom partialkoefficientmetoden vilken behandlar osäkerheter på ett grovt sätt då metoden går ut på att utforma konstruktioner som är dimensionerade med hänsyn till säkerhet och ekonomisk rimlighet. Med detta vill sägas att det inte är ekonomiska hållbart att t.ex. dimensionera med för stora stålbalkar vilket då är kostsamt och inte ett rimligt alternativ. Partialkoefficienter introduceras i flera steg (Bilaga 1) i dimensioneringen och kan ses som en kalibrerad faktor som inställd på att behandla de rådande osäkerheterna och samtidigt få ett förenklat dimensioneringsarbete. Vilket värde de olika partialkoefficienterna bör anta regleras bland annat i Eurocodestandarderna (Schleich3, 2005).

I sammanhanget ingår det som kallas säkerhetsindex β som svarar mot en viss given brottsannolikhet och är en sorts säkerhetsnivå. Sannolikhet för brott studeras genom att jämföra bärförmågan med lasteffekten och därigenom sätta ett kriterium för hur konstruktionselementet bör dimensioneras (Schleich3, 2005). Ursprungligen kommer definitionen på säkerhetsindexet som används från Hasofer & Lind, som utgår från att bärförmågan och lasteffekten kan ses som statistiskt oberoende samt normalfördelade. Skillnaden mellan bärförmåga och lasteffekt kallas för säkerhetsmarginal. Det sker brott alltså då säkerhetsmarginalen understiger noll. Eftersom lasteffekten och bärförmågan är normalfördelade blir även säkerhetsmarginalen normalfördelad (Björkenstam, 1991). Detta kan vara intressant att ta med till simuleringsmodellen för en jämförelse av om en annorlunda probabilistisk dimensionering leder till en normalfördelad brottsannolikhet eller inte.

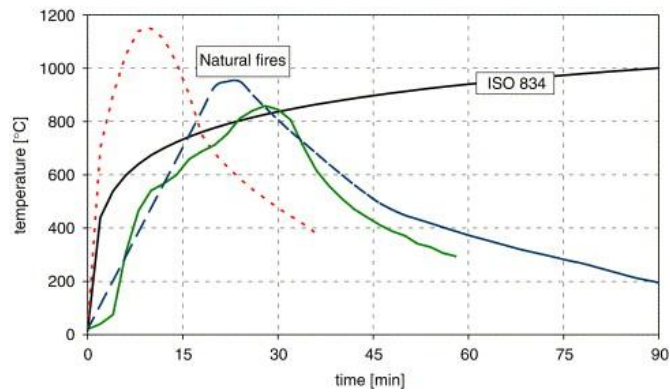
3.1.1. Gastemperaturmodeller



Figur 3. Skillnaden mellan olika beskrivningar av gastemperaturen.

Standardbrandkurvan, ISO 834, är den internationellt dominerande modellen för praktisk dimensionering och beskrevs närmare i bakgrundskapitlet (Kapitel 1). Ett alternativ till att utföra dimensionering gällande brand är att använda en modell för naturligt brandförlopp vilken beskriver ett verkligt brandförlopp (Jönsson & Petterson, 1985). En översikt på vad som krävs för respektive metod för att beskriva gastemperaturen ses i figur 3.

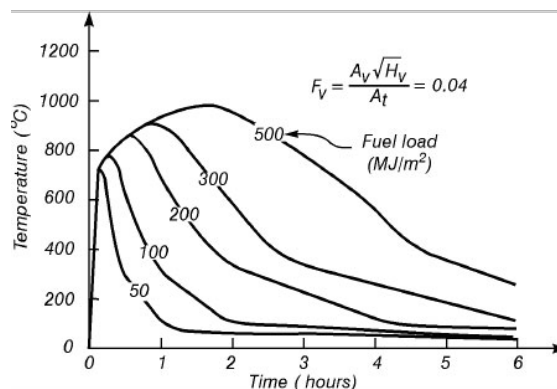
För att förstå skillnaden mellan de två tillvägagångssätten, standardbranden och naturligt brandförlopp, kan det föras lite resonemang omkring metoderna. Genom att jämföra kurvorna för standardbranden och naturligt brandförlopp kan några slutsatser dras och dessa kan observeras i figur 4 nedan. Den naturliga brandförloppskurvan når högre än standardbrandkurvan (ISO 834) och avtar snabbt därefter jämfört med standardbrandkurvan som växer kontinuerligt (Hosserb & Zehfussa, 2007). För att knyta tillbaka till tidigare resonemang är den rödstreckade kurvan ett exempel på när gastemperaturen faktiskt är högre än vad standardbrandkurvan anger. Konsekvensen av detta kan bli att kollaps tillåts då en konstruktionsdel dimensionerats med standardbranden.



Figur 4. Jämförelse mellan temperatur-tid-kurvor gällande standardbranden (ISO 834) och naturligt brandförlopp (Hosserb & Zehfussa, 2007).

De möjliga problemen som nämndes i bakgrunden kan konstateras genom att studera figur 4. Vad som bör åter igen nämnas är att temperaturen i fråga är gastemperaturen i brandcellen. Ett annat viktigt faktum som bör nämnas är att standardbranden och naturligt brandförlopp är modeller vilka har för avsikt att ge en tillfredsställande bild för att göra det möjligt att dimensionera bärande konstruktionselement vid brand. Standardbranden är, med hänvisning till tidigare avsnitt, bara en kurva jämfört med det naturliga brandförloppet som representeras av flera. Vad det gäller skillnaderna mellan kurvorna för de två olika brandmodellerna kan det konstateras att den naturliga branden oftast är mer aggressiv och når högre temperatur jämfört med standardbranden samt avtar snabbare efter att dess maximum uppnåtts. Toppen kan ses som att det brännbara materialet därmed har tagit slut och därför vänder kurvan nedåt för avsvälning vilket betyder att temperaturen sjunker.

Naturligt brandförlopp kräver att en brandcell innehåller en viss typ av verksamhet såsom exempelvis lägenheter, kontor, skolor, sjukhus, hotell och bibliotek som oftast har en relativt begränsad yta vilket inte standardbrandförloppet tar hänsyn till. Med andra ord fungerar modellen för naturligt brandförlopp inte särskilt bra med brandceller såsom industrier vilket beror på att modellen är optimerad för en viss typ av utrymmen som inte inkluderar stora öppna ytor. Formen på temperatur-tid-kurva som beskriver det naturliga brandförloppet beror på brandbelastningen (q), öppningsfaktorn (O) och de termiska egenskaperna hos det omslutande materialet i brandcellen (Jönsson & Petterson, 1985).



Figur 5. Naturliga temperatur-tid-kurvor (Magnusson, Petterson, & Thor, 1974).

Ett exempel på representation av naturligt brandförlopp ges i gastemperatur-tid-kurvor i figur 5. Detta är resultatet av flera tester givet en standardbrandcell med en konstant öppningsfaktor och varierad brandbelastning. Standardbrandcellen har definierats med givna förutsättningar såsom vilka material som väggar, golv och tak består av. Brandcellen som är aktuell i examensarbete har inte samma förutsättningar som standardbrandcellen och därför måste den skalas om för att passa de rådande förutsättningarna. Hur detta görs är en del av det experiment som utfördes på 70-talet (Pettersson & Ödeen, 1978).

3.1.2. Beskrivning av sambandet för naturligt brandförlopp

Undersökningarna på 70-talet tog branddimensioneringen till en ny nivå och resultaten används än idag som en pålitlig källa vilket påvisas då litteratur angående konstruktion och branddimensionering studeras. Vidare forskning har försökt beskriva utvecklingen av gastemperaturen i rummet genom att använda ekvationer för de naturliga temperatur-tidkurvorna. Dessa naturliga brandkurvor finns återgivna och används i flera av Eurocoderna. Förutsättningen för att använda den parametriska branden är att det antas att det är möjligt att tillämpa en en-zonsmodell vilket betyder att hela utrymmet har samma gastemperatur och därmed finns det endast en gastemperatur-tidkurva som gäller för brandcellen.

En anledning till varför parametriska brandkurvor är lämpligt att använda är att bränderna som ska studeras är ventilationskontrollerade och därför kommer kurvorna representera brandförloppet på ett bra sätt (Schleich2, 2005). Det som menas med att bränderna är ventilationskontrollerade är att brandförloppet styrs genom öppningsfaktorn, öppningarna på brandcellen, som reglerar hur mycket luft som finns tillgängligt. Ytterligare anledningar att använda parametriska brandkurvor är modellen behandlar relevanta randvillkor som brandbelastning, ventilation och brandcellens geometri (Hosserb & Zehfussa, 2007).

Anledningen till varför den naturliga branden har valts att beskrivas parametriskt är att det leder till möjligheten att använda den i en modell i Excel för att kunna utföra beräkningar i simuleringsmodellen. Varför Excel valts grundas i att påvisa hur en datormodell kan byggas upp och därigenom påvisa potentialen som mjukvaran innehar. Det är också en fördel att många är bekanta med Excel vilket torde underlätta förståelsen av hur modellen är uppbyggd.

Ekvationen som beskriver parametrisk brand ges av (CEN1, 2002):

$$\theta_g = 20 + 1325 \times (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$$

där

$$\theta_g = \text{gastemperaturen i brandcellen} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t^* = t \times \Gamma \quad [\text{h}]$$

med

$$t = \text{tid} \quad [\text{h}]$$

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad [-]$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \text{ med gränserna } 100 \leq b \leq 2200 \quad [\text{J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}]$$

$$\rho = \text{densiteten för omslutningsmaterialet} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$c = \text{specifika värmekapaciteten för omslutningsmaterialet} \quad [\text{J/kgK}]$$

$$\lambda = \text{Termiska konduktiviteten för omslutningsmaterialet} \quad [\text{W/mK}]$$

$$O = \text{öppningsfaktorn med följande gänser } 0,02 \leq O \leq 0,20 \quad [\text{m}^{1/2}]$$

3.1.3. Öppningsfaktor

Utvecklingen av en brand är till stor del beroende av brandcellens öppningsfaktor vilken också påverkar brandförloppets temperatur-tidkurva. Om brandcellen bara innehåller vertikala öppningar kan öppningsfaktorn definieras som:

$$O = \frac{A\sqrt{h}}{A_{tot}}$$

där

A_{tot} är brandcellens inre area, vilket betyder väggar, golv och tak inklusive öppningar (m^2)

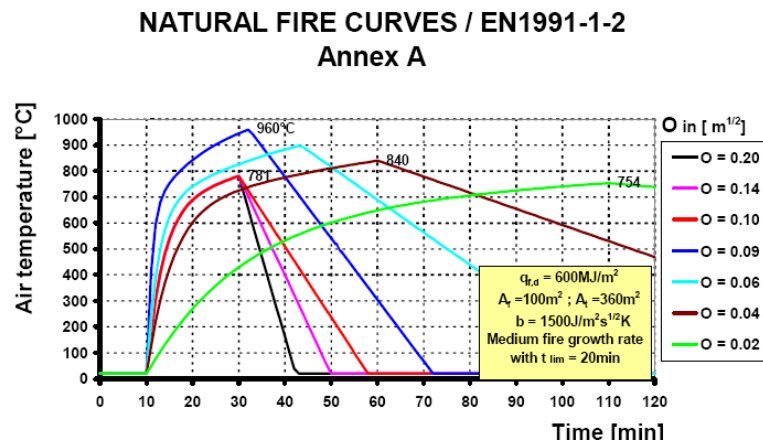
A är den totala arean av vertikala öppningar såsom fönster, ventilation och andra öppningar (m^2)

h Ett viktat medelvärde av öppningarnas höjd i brandcellen (m)

Beräkningen av öppningsfaktor antar att alla öppningar som finns i brandcellen går sönder direkt när branden startar (Pettersson & Ödeen, 1978). Detta är en förenkling som gjordes för att inte utveckla en modell för hur sprickbildning sker i glas vid en brand.

Öppningsfaktorn är den parameter som beskriver brandcellens geometri och även dess egenskaper. Olika öppningsfaktorer ger relativt stor förändring i hur brant gastemperatur-tidkurvan blir vilket visas i figur 6 nedan. För att få en bild av hur gastemperaturen förändras till följd av att inte alla

öppningar går sönder kan det ses i figur 6 genom att en högre öppningsfaktor antar att alla öppningar är öppna jämfört med en lägre öppningsfaktor som visar gastemperaturen då inte alla öppningar antas vara öppna.



Figur 6. Olika kombinationer av öppningsfaktor och brandbelastning ger olika gastemperatur-tidkurvor (Schleich2, 2005).

För att kunna göra relativt enkla beräkningar rekommenderas det att öppningsfaktorn sätts deterministiskt (Schleich2, 2005). Detta innebär antagandet, som nämndes ovan, att alla öppningarna förutsetts vara öppna då branden utbryter alternativt att vissa öppningar inte går sönder och håller hela brandförloppet. Det kan nämnas att för en öppningsfaktor som är låg kommer det finnas mindre tillgång till syre, vilket ger en längre tid innan övertändning passerar, jämfört med en större öppningsfaktor som således ger en kortare tid. Övertändning är när en lokal brand i rummet övergått till att vara ekvivalent för hela rummet och därmed är temperaturen den samma i hela utrymmet. Efter övertändning skett kommer till slut ett stadium då allt brännbart material brunnit upp och detta stadium kan observeras i figur 5 i form av ett maximum på kurvan (Lamont, Usmani, & Gillie, 2004).

Genom att studera modellen för parametrisk brand i början av detta avsnitt kan det konstateras att öppningsfaktorn är den enda parametern, förutom tiden, som påverkar hur formen på gastemperatur-tidkurvan ser ut.

3.1.4. Brandbelastning

Brandbelastning är ett mått på hur mycket potentiell värmeenergi som utvecklas under ett helt brandförlopp. Detta kan definieras på två olika sätt och den typ som modellen kräver är att brandbelastningen ska vara definierad per enhet golvarea (MJ/m^2). Det andra sättet att definiera brandbelastningen på är per omslutningsarea och anledningen till att det avhandlas här är att förtydliga så att det blir rätt enhet på indata till modellen. Typiska värden på brandbelastningen varierar mellan 100 till 10 000 MJ/m^2 golvarea (Buchanan, 2001). Brandbelastningen beror på vilken typ av verksamhet som brandcellen innehåller och kan därför variera ganska mycket.

3.1.5. Maximal gastemperatur

Gastemperaturökningen kan inte fortskrida hur länge som helst eftersom det finns begränsande faktorer. En är brandbelastningen och när allt brännbart material i brandcellen har blivit konsumerat har gasen nått sin maximala temperatur.

Den andra faktorn som påverkar den maximala temperaturen är öppningsfaktorn. Förhållandet mellan faktorerna och den maximala gastemperaturen kan beskrivas genom (CEN1, 2002):

Den maximala temperaturen, θ_{max} , i uppvärmningsfasen sker då $t = t_{max}^$*

$$t_{max}^* = t_{max} \times \Gamma \quad [h]$$

$$\text{med } t_{max} = 0,2 \times 10^{-3} \times \frac{q_{t,d}}{O} \quad [h]$$

där

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad [-]$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \text{ med gränserna } 100 \leq b \leq 2200 \quad [J/m^2 s^{1/2} K]$$

$$O = \text{öppningsfaktorn med följande gränser } 0,02 \leq O \leq 0,20 \quad [m^{1/2}]$$

$q_{t,d}$ = brandbelastningen relaterad till den totala omslutningsarean A_t där

$$q_{t,d} = q_{f,d} \times \frac{A_f}{A_t} [MJ/m^2]. \text{ Värde måste uppfylla } 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 [MJ/m^2]$$

$$q_{f,d} = \text{brandbelastningen relaterad till golvarean } A_f [MJ/m^2]$$

3.1.6. Avsvalningsfasen

När den maximala gastemperaturen har uppnåtts kommer avsvalning av gastemperaturen i brandcellen att ta vid. Fasen under vilken temperaturen minskar kan vara av varierad tidslängd och avsvalningshastigheten skiftar därigenom också. Vad som påverkar hastigheten på avsvalningen är hur lång tid den fullt utvecklade branden har varat och avsvalningen kan därmed beskrivas enligt en indelning bestående av tre olika intervall för temperatur-tidkurvorna (CEN1, 2002):

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 \times (t^* - t_{max}^*) \quad \text{för } t_{max}^* \leq 0,5$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \times (3 - t_{max}^*)(t^* - t_{max}^*) \quad \text{för } 0,5 \leq t_{max}^* \leq 2$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \times (3 - (t^* - t_{max}^*)) \quad \text{för } t_{max}^* \geq 2$$

där t^* definierats i avsnitt 3.1.2

$$t_{max}^* = 0,2 \times 10^{-3} \times \frac{q_{t,d}}{O} \times \Gamma$$

3.1.7. Brandcellen

Då bakgrundsmaterialet (Bilaga 1) utgår från en brandcell bestående av ett betongbjälklag samt väggar och tak bestående av gips måste detta användas i modellen för naturligt brandförlopp. I ett tidigare avsnitt om standardbrandcellen nämndes att om inte brandcellen stämde överens med standardbrandcellen kunde formeln skalas om för att passa den aktuella brandcellen. Anledningen till att detta poängteras ytterligare är att forskning har visat att Eurocodestandarderna ofta ger lägre temperaturer än vad de bör och därför kan det vara aktuellt att uppdatera formlerna ovan för att på så vis korrigera för detta (Buchanan, 2001).

3.2. Problematiken med dagens dimensionering

Detta avsnitt ger en utvidgning av varför dagens dimensionering är bristfällig och det behövs en ny mera moderniserad metod för branddimensionering i framtiden.

3.2.1. Sammanställning av problematiken

Fram tills nu har problematiken avhandlas efterhand som olika områden behandlats och detta avsnitt har för avsikt att återigen samla upp och belysa vilka dem är. För att samla upp problematiken som redogjorts för fram tills detta avsnitt är det lämpligt att göra det i punktform, för att på så vis få en överskådlig bild:

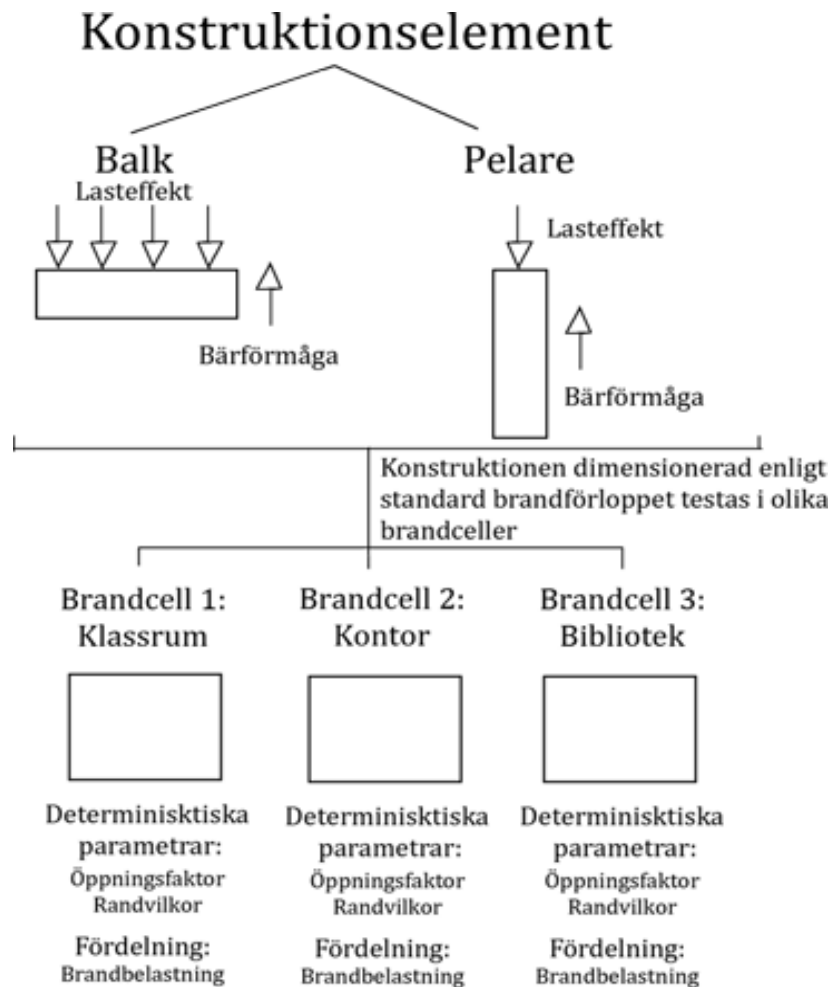
- På det övergripande planet kan det konstateras att dagens krav på dimensionering kan göras genom två olika metoder och det medför en viss problematik. Det som främst är lite problematiskt är att kraven är svåra att jämföra med varandra vilket medför att transparens saknas mellan kraven.
- Metoden för att beskriva gastemperaturen i brandförloppet har fungerat som ett "standard"-påverkan vilken saknar koppling med en riktig brand.
- En konstruktion dimensionerad med hjälp av standardbrandförloppet kan återfinnas i liknande brandcell i byggnader, men innehållandes olika verksamheter. Givet att verksamheten är känd och dimensionering sker med en naturlig brand kommer det att leda till att brottsannolikheten varierar vilket då vill påvisa att dimensionering enligt standardbrandförloppet ibland kan medföra att kollaps sker. Detta härstammar från hur gastemperaturen förändras med tiden i verkligheten jämfört med gastemperaturbeskrivningen enligt standardbrandförloppet.
- Kvantifiering av kraven i form av en tid är inte helt oproblematiska eftersom det är oklart vad som sker efter det förutbestämda tidskravet.
- Kraven kan med dagens dimensionering enligt standardbranden endast ställas i form av en tid vilket kanske inte alltid är det bästa alternativet.

4. Analys av bärande konstruktioner i en brand

Detta kapitel har för avsikt att förklara de ingående delarna som är nödvändiga för att bygga upp en simuleringsmodell. Tillämpning av de ingående delarna i detta avsnitt kommer redogöras för i det kommande avsnittet.

4.1. Konstruktionselement i brandceller

För att få en ökad förståelse för hur den dimensionerade konstruktionen ska kunna utvärderas krävs en vidare beskrivning av kopplingen mellan konstruktionen och brandcellerna. En överblick på konstruktionselementen samt brandcellerna ges i figur 7 nedan.

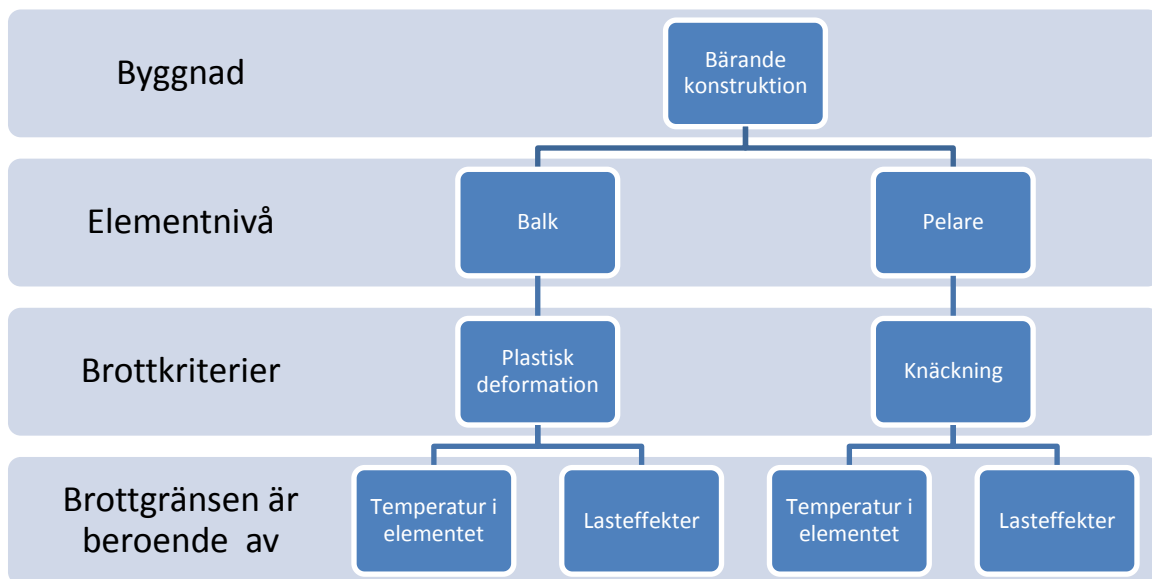


Figur 7. En modellöversikt hur konstruktionselementen ska utvärderas.

Konstruktionselementen, vilka behandlas i följande avsnitt, som dimensionerats enligt standardbrandförloppet ska utvärderas genom att de testas i en modell som utgår från tre givna brandceller, vilkas förutsättningar behandlas i avsnitt 5.3.

4.2. Konstruktionselement i bärande konstruktioner

En bärande konstruktion en utgörs av konstruktionselement. Beroende på var konstruktionselement är placerat i brandcellen har det olika egenskaper som spelar in och därmed är det placeringen i brandcellen bestämmer dess funktion (Schleich1, 2005). När brott sker i ett konstruktionselement kan det vara till följd av flera faktorer. Vad som påverkar olika element samt brottvillkoret kan ses i figur 8 nedan.



Figur 8. Förklaring av hur en bärande konstruktion påverkas på elementnivå

4.2.1. Balk

En balk är ett konstruktionselement som är till för att bära laster längs dess horisontella yta (se figur 7). När en last appliceras på den horisontella ytan anses den lasten vara jämnt fördelad över längsöver hela ytan. Då lasten ökar kommer balken att böjas mer och när lasten ökas tillräckligt mycket kommer en gräns överskridas med resultatet att deformationen sker plastiskt (Burström, 2001). Det finns också andra fenomen, förutom att öka lasten som leder till plastisk deformation och brand är ett exempel på det. En brand kommer att leda till ökad temperatur i rummet med följden att stålets egenskaper kommer att påverkas. En temperaturökning i stålet leder till förändringar av stålets egenskaper med konsekvensen att materialet får sämre förmåga att hantera last. Kopplingen mellan gastemperaturen och ståltemperatur kommer att redogöras för mer ingående i slutet av detta kapitel.

När ett material, såsom exempelvis stål, belastas kommer det att börja deformeras till följd av den spänning som uppstår i materialet då det bär en last. När lasten tas bort kommer den ursprungliga formen att återtas, alltså den som form som stålet hade då det var obelastat. Detta gäller inte för alla laster, utan då lasten når en viss gräns vilken beror på materialets egenskaper kommer inte materialet att återta sin ursprungliga form. Gränsen där detta sker finns i ett sträckgränsområde, f_y , vilken definieras som den spänning där den plastiska deformationen av materialet börjar. I sträckgränsen kommer en del av materialets deformation vara permanent och därmed inte återgå till sin ursprungliga form (Wihlborg, 2004).

För balken är det viktigt att studera var gränsen för plasticitet går eftersom detta är gränskriteriet för det som avses med brott i konstruktionselementet.

Bärförmågan är proportionell mot sträckgränsen, f_y , givet att det inte finns några instabiliteter och det givna elementet är valt så att det inte har några instabiliteter (Johansson, 2009). När ett konstruktionselement är i stabilitet betyder det att en liten störning varken påverkar eller bidrar till ytterligare deformationer i konstruktionselementet (Höglund, 2006). Förhållandet mellan

sträckgränsen och temperaturen kan fungera som ett lämpligt verktyg för att bestämma när den plastiska gränsen överskrids. Förhållandet bör inte direkt tolkas som en spegelbild av verkligheten, men förhållandet uppfyller syftet med att fungera som ett verktyg som kan användas för dimensionering av en bärande konstruktion.

För analysens genomförande krävs det att typ och dimension väljs på balken eftersom det kommer att utgöra indata till modellen. När det kommer till valet av vilken typ av balk som är lämplig som ett bärande konstruktionselement är svaret typen IPE (se figur 9). Motiveringen till detta val är tudelad, den primära orsaken är att det är lätt att göra beräkningar med denna typ samt det sekundära grundas i hur den traditionella dimensioneringen är gjord enligt Bilaga 1.

4.2.2. Pelare

Pelaren kan förklaras som ett vertikalt konstruktionselement vilket betyder att det bär axiella krafter som är applicerade på dess tvärsnittsarea. Som exempel på axiella krafter kan golv, tak och snölast nämnas. Dessa krafter ger upphov till tryckspänningar.

När en pelare studeras som ett lastbärande element kan det konstateras att det ska dimensioneras för att klara av knäckning vilket är en konsekvens av tryckspänningarna som studeras (Höglund, 2006).

För analysen måste pelarens anta vissa förutbestämda krav såsom gällde för balken. Pelaren har därför i analysen valts till en form av ett tvärsnitt som betecknas HFHRF vilket är en ihålig stålprofil (bilaga 1) vilken illustreras i figur 10 nedan.

4.3. Lasteffekter

Lasteffekter är ett samlingsbegrepp för de laster som verkar på konstruktionselementen. Gällande för den bärande konstruktionen som kommer att studeras kan lasteffekten delas in i två delar som består av variabel last och egentyngd (JCSS2, 2001).

4.3.1. Variabel last

Variabel last uppstår till följd av den verksamhet som finns i byggnaden samt användandet i form av personal, deras inventarier och rörliga saker såsom mellanväggar och utrustning (Ellingwood, 2005). Den variabla lasten verkar på golvet i byggnader och har den generella egenskapen att nästan ha samma last inom samma grupp av verksamhet. Den variabla lasten kan delas upp i två delar, där den ena representerar de vardagliga förhållandena som vanligtvis råder och den andra delen utgör de speciella situationer som sällan inträffar då lasten är extra stor. Det senare fallet uppstår exempelvis då det kanske är en tillställning och därmed extra mycket folk vilket bidrar med ökad last på det viset. Denna last används främst vid dimensionering (ej avsett branddimensionering) och kan därför bortses ifrån vid branddimensionering eftersom sannolikheten att de skulle inträffa samtidigt kan anses som låg. Den första delen av den variabla lasten utgörs av en ihållande last främst bestående av möbler och tung utrustning. Typiskt för denna last är att den är relativt konstant med tiden (CIB, 1989).

Det finns även fenomen som gör att lasten kan förändras medan branden äger rum. Det kan tänkas, gällande för balken, att material ramlar ned och ger därmed extra belastning. Även motsatsen att material brinner upp och därmed minskar lasten på elementet. Dessa dynamiska laster har dock valts att inte tas med eftersom det skulle göra modellen alltför osäker då dessa fenomenens bidrag måste

uppskattas. Ett annat argument kan grundas i att det både tillkommer och försvinner last vilket skulle kunna jämna ut varandra vilket resulterar i en jämnare last under brandförloppet.

4.3.2. Egentyngd

Egentyngden orsakas till följd av vikten på bärande och icke bärande konstruktionsdelar. I modellen utgörs bland annat egentyngden av betongbjälklaget samt bärande konstruktionselement (JCSS2, 2001).

4.4. Modell för konstruktionselement

Modellen för hur sambanden knyts ihop för att kunna bygga upp en simuleringsmodell kommer att presenteras här samt parametrarna som behövs för att se hur stålets egenskaper varierar med temperaturen. Värden som används i detta avsnitt hänger samman med de valda dimensionerna i föregående avsnitt och är därmed specifika för den kommande analysen.

4.4.1. Modell för balken

Det som avgör när brott sker för balken är när plasticitetsgränsen på balkens mitt uppnås. Den acceptabla nivån kommer att sättas i enlighet med geometrin på balken som därmed definierar hur dess sträckgränskurva ser ut och därigenom vilken temperatur som leder till brott (Johansson, 2009).

I enlighet med formel 6.13 i Eurocode 3 (2005) ges den dimensionerande bärförmågan mot böjmoment som, med hjälp av värden från bilaga 1, kan beräknas genom:

$$M_{Rd} = W_{pl} * f_y$$

där

f_y är balkens kritiska sträckgräns som ges av materialkoden för elementet vilken är S355 och det betyder en kritisk sträckgräns vid 355 MPa.

W_{pl} är det plastiska böjmotståndet med värdet 1019 mm^3

$$M_{Rd} = 1019 * 10^{-6} * 355 * 10^6 = 362 \text{ kNm}$$

Dessa beräkningar gäller för rumstemperatur (20°C) och med ökande ståltemperatur kommer plasticeringsmomentet reduceras i enlighet med tabell 1 nedan.

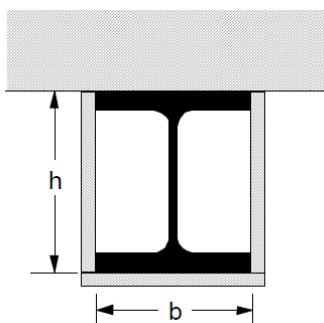
Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

Tabell 1. Reducering av sträckgränsen till följd av ökad temperatur i stålet (Eurocode 3, 2005).

Bärförmågan för böjmoment gällande för en balk består i Eurocode 3 (2005) av tre faktorer jämfört med formeln i början på avsnittet som består av två. Faktorn som saknas är en partialfaktor, tidigare benämnd partialkoefficient, vilken var en form av säkerhetsfaktor. Det vill säga faktorn har uteslutits därför att den istället ska hanteras på ett annat probabilistiskt sätt i form av en fördelning som representerar dess osäkerhet.

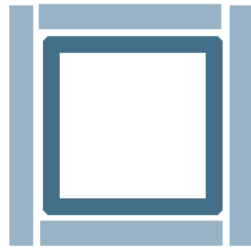
För att skydda balken mot brand har den isolerats med gipsskivor på tre sidor (Figur 9). Den fjärde sidan täcks av ett betongbjälklag som utgör en del av golvet på våningen ovanför.



Figur 9. Balken sett från dess tvärsnitt

4.4.2. Modellen för pelaren

För pelaren gäller kriteriet att när fenomenet knäckning inträffar sker brott i konstruktionselementet vilket behandlas i ett ovanstående avsnitt. För balken gäller det att den har försetts med brandskydd på samma vis som balken, vilket betyder att den skyddas av gipsskivor med den skillnaden att alla fyra sidor skyddas (Figur 10).



Figur 10. Pelaren sedd ovanifrån.

Pelarens förmåga att bära last kan beskrivas genom formel 6.47 i Eurocode 3 (2005) och enligt resonemanget där ges, tillsammans med dimensionerade värde i bilaga 1, knäckningsmotståndet som:

$$N_{Rd} = \chi * f_y * A$$

f_y = sträckgränsen som följer av materialkoden S355 och är därför 355 MPa.

χ = Reduktionsfaktor för bucklingskurvan

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

α = Imperfektionsfaktor

$\bar{\lambda}$ = Slankhetstalet

För tvärsnittet med avseende på knäckningsfenomen, gäller att:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A * f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

L_{cr} = Knäckningslängden i den knäckningsriktning som betraktas

i = Gyrationradie kring den aktuella axeln

Beräkningen görs på samma vis som dimensionering i bilaga 1 med den skillnaden att knäckningslängden kan vid brand bestämmas genom (Cajot & Haller, 2006):

$$L_{cr} = 0,5 * 3,5 = 1,75 \text{ m}$$

4.5. Brandgastemperaturpåverkan på den bärande konstruktionen

Givet att det är en brand i ett utrymme kommer ståltemperaturen påverkas till följd av den förändrade gastemperaturen vilket kan leda till reducerad styrka och styvhet i stålet. Förändringarna av stålets egenskaper kan leda till deformation av stålet och till slut även till brott av konstruktionsdelen. Temperaturförändringen i stålet beror på branden, den exponerade stålytan och tjockleken på brandskyddsmaterialet. Alla tre faktorerna bestämmer hur snabbt den uppvärmda gasen påverkar stålets temperatur. Stålet kan isoleras mot brand på flera olika sätt för att få ett bra motstånd mot den rådande branden i utrymmet (Buchanan, 2001).

Givet att en brand uppstår kan det konstateras att oskyddade stålkonstruktioner har en tendens att fungera sämre jämfört med armerad betong eller tunga träkonstruktioner. Anledningen till det är att stålelementen oftast är mycket tunnare jämfört med de andra materialen samt att stål har också en högre konduktivitet vilket betyder att termisk energi kommer att spridas mycket fortare i materialet (Li, Wang, & Chena, 2009). Detta är bakgrunden till varför brandskyddsmaterial ofta används i kombination med stålkonstruktioner och som nämndes i ovanstående avsnitt skyddas stålet av gips.

Hur stålet beter sig i en brand beror, enligt Buchanan (2001), på följande huvudfaktorer:

- Ökad temperatur i stålkonstruktionen
- Pålagda laster på konstruktionen
- Mekaniska egenskaper hos stålet
- Geometrin och designen på konstruktionen

Dessa faktorer kommer att diskuteras mer i följande kapitel och hur lämpliga parametrar för modellen kan väljas.

4.6. Parametrar för temperaturökningen i stålet

Detta avsnitt kommer att ge motiveringar och förklaringar över hur olika delar har sammansatts för att göra en simuleringsmodell för olika scenarier.

4.6.1. Bakgrunden till valen av lämpliga parametrar

Först och främst kan det konstateras att en del val har gjorts i enlighet med de två elementen då de dimensionerats för standardbrandförloppet (Bilaga 1) vilket har och kommer att kommenteras löpande i texten.

Allmänt kan det konstateras att brandmotståndet måste vara större än brandpåfrestningen för att inte kollaps ska ske av den bärande konstruktionen. Detta är ett allmänt sätt att uttrycka det bärande elementets krav. Utifrån detta kan det konstateras att detta krav kan uppfyllas genom att använda någon av de tre domänerna: tid, temperatur eller hållfasthet. Alla tre kan användas för att verifiera stålets motstånd mot brand (Buchanan, 2001). I hållfasthetsdomänen kan det allmänna kravet på hållfastheten översättas till att bärförmågan (R) måste vara större än lasten (S). En brand påverkar

bärförmågan på det viset att en ökad temperatur ger minskad bärförmåga vilket betyder att temperaturen i konstruktionen måste studeras. I temperaturdomänen är den begränsande temperaturen ståltemperaturen vid vilken bärförmågan har reducerats under vad elementet är dimensionerat för, $R-S < 0$ (Buchanan, 2001).

Eurocode 3 (2005) ger en begränsande temperatur för branddimensionering av enskilda konstruktionselement. Dessa beräkningar är mest lämpliga när stålets tvärsnittsarea antas ha likformig temperatur (samma temperatur i hela tvärsnittet) vilket måste förutsättas eftersom stegmetoden i kommande i avsnitt 4.6.2 i simuleringsmodellen bygger på det antagandet (Buchanan, 2001). En mer avancerad metod skulle lämpligen beräkna temperaturen i elementet på några olika punkter och interpolera värdena till en likformig temperatur i elementet.

4.6.2. Beräkningsmetod

Givet att den parametriska brandkurvan används som ingångsparameter till ståltemperaturen kan en datorbaserad stegmetod användas. Denna metod antar att en del av stålet har konstant temperatur efter varje tidssteg och därmed är det en konstant temperaturfördelning över tvärsnittet. Alltså har konstruktionselementet ekvivalent temperatur överallt efter varje tidssteg (Buchanan, 2001).

Enligt Buchanan (2001), ekvation 8.9, kan stålets temperaturökning för isolerade stålkonstruktionselement beskrivas genom:

$$\Delta T = \frac{F}{V} \frac{k_i}{\rho_s c_s} \left\{ \frac{\rho_s c_s}{\left(\rho_s c_s + \left(\frac{F}{V} \right) \frac{d_i \rho_i c_i}{2} \right)} \right\} (T_f - T_s) \Delta t$$

där

F = Mantelarea	[m ²]
V = Stålets volym	[m ³]
ρ_s = Stålets densitet	[kg/m ³]
c_s = Stålets specifika värmekapacitet	[J/kg K]
d_i = Isolermaterialets tjocklek	[m]
ρ_i = Isolermaterialets densitet	[kg/m ³]
c_i = Isolermaterialets specifika värmekapacitet	[J/kg K]
k_i = Isolermaterialets termiska konduktivitet	[W/mK]
T_f = Temperaturen i brandcellen	[°C or K]
T_s = Ståltemperaturen	[°C or K]
Δt = Tidssteget	[s]

Det bör poängteras att formeln ger stålets temperaturökning och inte den direkta temperaturen hos stålet.

4.6.3. Termiska egenskaper och temperaturberoende variation

Från Eurocode 3 (2005) kan det konstateras att stålets specifika värmekapacitet är temperaturberoende och det ska tas i beaktning då formeln i avsnittet ovan, 4.6.2, används.

Den termiska värmekapaciteten varierar också med temperaturen (EC3, 2005), vilket användes i modellen. Dock kunde satts till att vara en konstant för att få förenklade beräkningar (Buchanan, 2001).

4.6.4. Deterministiska värden

Tidssteget kommer att sättas genom rekommendation till 30 sekunder (EC3, 2005), men andra källor visar att större tidssteg kan användas (Gamble, 1989). Angående hur noggrann den parametriska branden beskrivs och andra gjorda approximationer följdes rådet med 30 sekunders tidssteg.

Faktorn $\frac{F}{V}$ kallas tvärsnittsfaktor och tar hänsyn till hur stålkonstruktionselementet är skyddat och hur många sidor som är exponerade.

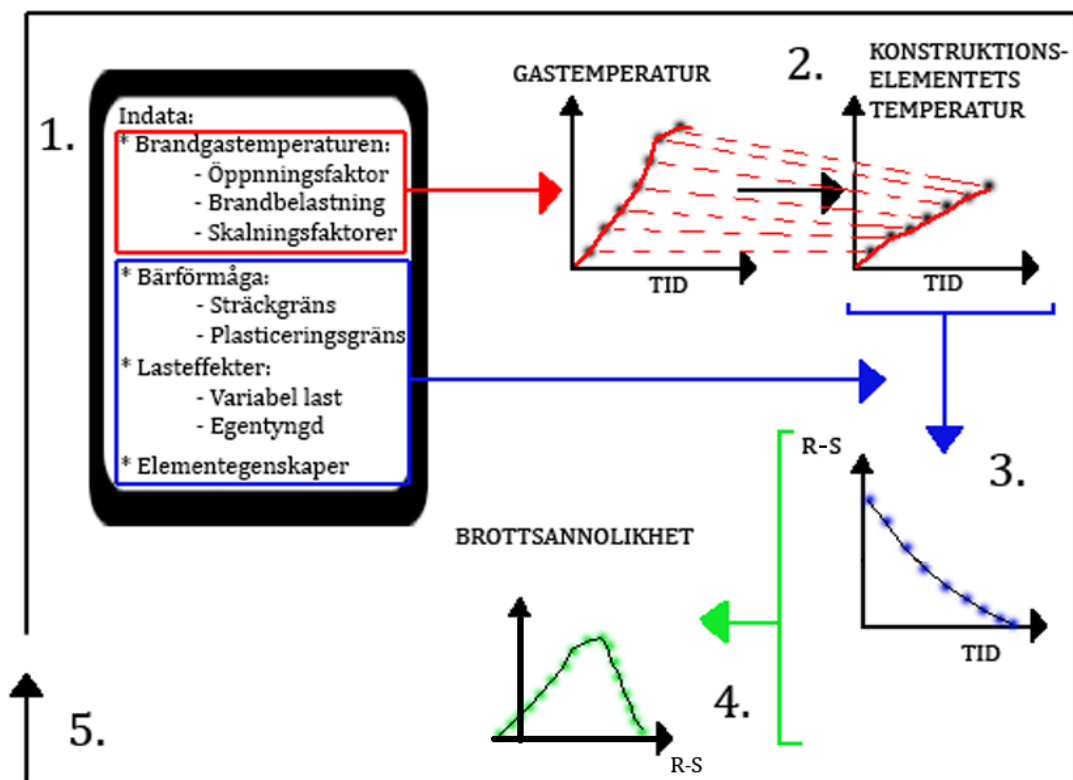
De resterande värdena kan sättas deterministiskt enligt Eurocode (2005), utom temperaturen som beror av det föregående tidssteget, T_s , respektive den föregående gastemperaturen, T_f .

5. Beräkningar och genomförande

Detta kapitel ger en övergripande förklaring genomförandet av modellen i Excel och hur de sista beräkningarna har gjorts.

5.1. Översikt

För att på ett enkelt och överskådligt vis kunna presentera den framställda datormodellen gjordes en översiktlig bild på tillvägagångssättet, se figur 11. Vissa ingående bitar har behandlats i tidigare avsnitt och de övriga delarna kommer att förklaras i kommande avsnitt.



Figur 11. Överblick på simuleringsmodellen

För att få lite mer förståelse har vissa delar i figuren ovan numrerats för att få en förklaring härunder:

1. Deterministiska data, öppningsfaktor och skalningsfaktorer, samt brandbelastningen i form av en fördelning givet en viss verksamhet ger indata till modellen som genom simuleringar ger en gastemperaturkurva. En mera detaljerad figur av de ingående parametrarna presenterades i avsnitt 4.1. Vidare redogörelse för valen av parametrarna ges i avsnitt 5.3
2. Stegvis byggs gastemperaturkurvan upp med ökande tidssteg vilket visas med de diffusa prickarna och detta steg sker genom en inre loop. Gastemperaturen kan därefter användas för att beräkna spridningen i andra material och i detta fall isolerat stål (avsnitt 4.5). Temperaturökningen i stålet sker långsammare jämfört med gastemperaturökningen vilket de röda streckade linjerna anger.
3. Då tiden fortskrider ökar temperaturen, dock inte längre än att det finns brännbart material att tillgå. Ökad temperatur i konstruktionselementet innebär minskad bärförmåga (R) och under tidsaxeln är då brott sker ($R-S < 0$). Lasteffekten (S) består dels av fördelning vilken beskriver den variabla lasten och dels en deterministisk del som beskriver egentyngden.
4. Tiden sparas undan när brott sker, vilket symboliseras med en grön punkt, för att successivt bygga upp en brotts sannolikhetskurva.

5. Loopen återupprepas från steg 1 tills det valda antalet iterationer slutförts och för varje varv byggs brottssannolikhetskurvan på.

5.2. Simuleringsmodell

Detta avsnitt beskriver hur modellen i Excel byggdes upp med hjälp av @RISK och därigenom hur Monte Carlosimuleringsmodellen skapades (Bilaga 2). @RISK är kortfattat ett tilläggsprogram till Excel som kan användas för att behandla de rådande osäkerheterna i modellen (Palisade_Corporation, 2008).

Formlerna som har beskrivits i tidigare kapitel kan i vissa fall uppdateras genom att de kan användas med stokastiska variabler och dessa kommer att behandlas i kommande avsnitt.

5.2.1. Villkor och antaganden

Alla stokastiska variabler är kontinuerliga vilket betyder att de kan anta värden mellan $-\infty$ till $+\infty$ vilket kan ställa till problem. Ett exempel är att laster inte fysiskt kan vara negativa och därför har det satts krav på några variabler att de måste vara positiva.

I avsnitt B.1.2 (Bilaga 2) finns en kort förklaring om iterationer och hur många som är lämpliga att använda. Det konstateras att för få iterationer bör inte användas och att det till en viss gräns är sant att fler iterationer medför bättre representation av verkligheten. Det rekommenderas också att iterationerna inte bör vara för många eftersom det kan leda till att simuleringen tar väldigt lång tid och därför måste en bra balans uppnås mellan de både alternativen. Med hjälp av informationen ovan kan det inte direkt konstateras hur många iterationer som är lämpligt utan det får ske med hjälp av den subjektiva bedömningen. Därmed bestämdes att ett lämpligt antal iterationer var 100 000 iterationer och det gav en simuleringstid på cirka 20 minuter vilket ansågs rimligt för att hinna genomföra alla simuleringar samt att noggrannheten inte ökade nämnvärt med ökande antal itereringar. Dock började modellen simuleras med 10 000 iterationer enligt avsnitt 5.1 för att göra de sista finjusteringarna.

Vilken typ av verksamhet som ska väljas för brandcellen baseras lite på att få ett någorlunda brett spektrum på olika ingångvariabler. Resultaten kommer därmed kunna påvisa om det var lämpligt att använda detta resonemang. Detta är viktigt att nämna eftersom utgångspunkten (Bilaga 1) förutsätter en viss typ av verksamhet och den är där vald till att vara kontorsverksamhet.

Oberoende av vilken verksamhet som finns i brandcellen kan två eller flera av de angivna fördelningarna vara beroende vilket benämns att de är korrelerade (Palisade_Corporation, 2008). I simuleringsmodellen har inte korrelationer beaktats. Ett exempel på en korrelation som kan finnas i modellen är då brännbart material brinner upp och därigenom förändras vikten vilket är en del av den variabla lasten.

5.3. Stokastiska och deterministiska ingångparametrar

Ingångsparametrarna som ska bli tilldelade en fördelning istället för att vara deterministiskt bestämda kommer att presenteras i detta avsnitt.

Joint Committee on Structural Safety, JCSS, är en kommitté vars mål är att förbättra den allmänna kunskapen angående konstruktionssäkerhet och har med det underlaget satt samman en probabilistisk modellsamling. Samlingen är ett första försök att sätta samman regler, föreskrifter och förklaringar som behövs för att skapa ett probabilistiskt synsätt (JCSS, 2009). Denna samling kan

användas för att tillgodose de flesta lämpliga fördelningar som kan användas som ingångsvariabler till den probabilistiska modellen.

5.3.1. Brandbelastning

Brandbelastningen är en variabel som beror på verksamheten i brandcellen och är en av huvudvariablerna som avgör om det kommer att ske kollaps av konstruktionselementet. Förklaringen ligger i det faktum att när brandbelastningen tilldelas en fördelning kommer utseendet på fördelningen vara viktig att studera. Detta följer från det faktum att kollaps kan bero på ett extremvärde som fördelningen kan anta och därför kan utseendet på fördelningen vara viktigare än medelvärde och varians för brandbelastningen (Melinek, 1993). Ett exempel kan vara att dimensionera brandskyddsmaterialet mot extremvärdet, som annars kan missas då endast medelvärdet och varians studeras.

Grunden för undersökningen i denna rapport är att verksamhetens area och öppningsfaktor ska varieras för att få en viss dimensionerad konstruktion, enligt standardbrandförloppet, som kan återfinnas hos flera olika verksamheter. Beroende på vilken verksamhet som finns i brandcellen varierar brandbelastningen då den är knuten till det brännbara materialet specifikt för verksamheten i fråga.

Angående validiteten på brandbelastningarnas fördelningar bör den anses som god eftersom den härstammar från Boverket och förstahandskällorna är flera vilka kan tolkas som att källan är väl undersökt (Boverket3, 2008).

Tre olika verksamheter valdes för att få ett brett spektrum av ingångsparametrar och samtidigt få dem att passa in på brandcellsstorleken (Tabell 2).

Verksamhet	Medel	Standardavvikelse	Fördelning
Klassrum	285	85,5	Gumbel
Kontor	420	126	Gumbel
Bibliotek	1500	150	Gumbel

Tabell 2. Olika brandbelastningar vilka beror på verksamheten i brandcellen (Boverket3, 2008).

Andelen brännbart material vilket brandbelastningen representerar beror till stor del vilken typ av verksamhet som brandcellen innehåller och fördelningar breder ut sig som störst vid låga medelvärden vilket kan observeras i tabellen ovan. Lämplig beskrivning av spridningen på variationen i brandbelastning enligt Boverket och Schleich (2005) är att välja en Gumbelfördelning. En anledning till detta skulle kunna vara att det är möjligt att dimensionera efter extremvärdena som återkommer oftare jämfört med en normalfördelning. Det finns också undersökningar som visar att data kan användas för att passa en lognormalfördelning (Melinek, 1993). Det tyder på att det finns fler fördelningar än Gumbel som kan beskriva brandbelastningen, men för modellen har ändå Gumbel valts som representation av på grund av validitetstolkningen ovan.

Detta val av fördelning kom dock att leda till problem då @Risk inte har Gumbelfördelning, men det fanns sätt att ta sig förbi detta problem. Lösningen blev genom att använda MATLAB vilket är ett matematiskt beräkningsprogram (MathWorks, 2009). För att kunna göra beräkningarna i MATLAB krävdes dock ett tilläggspaket som heter WAFO vilket är ett statistiskt verktyg som kan generera

slumpmässiga tal från en specificerad Gumbelfördelning (Mathematical_Statistics, 2007). Genom detta tillvägagångssätt kunde resultatet presenteras i form av en vektor som kunde exporteras till Excel för att därmed kunna användas som ingångsdata till modellen.

5.3.2. Lasteffekter

Lasteffekter som utgörs av variabel last och egentyngd verkar i form av laster på konstruktionselementen.

5.3.2.1. Variabel last

Parametrarna som beskriver den variabla lasten är beroende av vilken sorts verksamhet som finns i brandcellen. Detta betyder att lastintensiteten kan representeras av en medellast för den valda verksamheten samt en standardavvikelse. En tredje part kan också introduceras vilken involverar de den tvådimensionella osäkerheten över hur brandcellen är möblerad, men detta har valts bort på grund av modellens i övrigt grova uppskattningar (CIB, 1989). Exempelvis behandlar osäkerheten det faktum om alla möbler står i ett hörn eller om de är spridda i rummet. Argumentet för detta ställningstagande grundar sig på tidigare konstateringar om att lasten ska anses var jämt fördelad över konstruktionselementet. Generellt för verksamheterna kan det konstateras att den variabla lasten är normalfördelad och i tabell 3 kan de olika värdena för verksamheterna utläsas (JCSS2, 2001).

Verksamhet	Medel [kN/m ²]	Standardavvikelse [kN/m ²]	Fördelning
Klassrum	0.6	0.15	Normal
Kontor	0.5	0.3	Normal
Bibliotek	1.7	0.5	Normal

Tabell 3. Variabla laster för olika verksamheter (JCSS2, 2001).

Den variabla lasten kommer ursprungligen från insamlad data som därmed har visat sig vara normalfördelad och det är bakgrunden till varför den fördelningen valts (CIB, 1989). Liksom för brandbelastningen finns här delade uppfattningar om representationen av den variabla lasten. Boverket har en annan åsikt om hur den variabla lasten bör var fördelad och deras rekommendation föreslår en Gumbelfördelning precis som brandbelastningen. Anledningen till varför detta inte har använts i modell är dels för att Gumbel inte finns definierat i @RISK och därför har normalfördelningen valts. Dock är väl den starkare motiveringen till valet att diskussioner med Professor Sven Thelandersson (2009) styrkte teorin att den variabla lasten bör vara normalfördelad eftersom den är det vid konventionell dimensionering (ej avsett branddimensionering).

5.3.2.2. Egentyngd

Egentyngden för elementen och för betongbjälklaget valdes i enlighet med bilaga 1. Vad det gäller osäkerheten i egentyngd vilken är beroende på variabiliteten inom konstruktionselementet är den normalt sett är liten och kan därför försummas (JCSS2, 2001).

5.3.2.3. Osäkerheter i lasteffekt

En relevant modellosäkerhet i lasteffekt bör ingå, genom att använda en slumpmässig variabel som, för att ta hand om eventuella brister och ofullständigheter. Detta har beaktats genom en

lognormalfördelning med COV 0,2 för balken och en normalfördelning med COV 0,1 för pelaren (JCSS2, 2001).

5.3.3. Bärförmåga

Bärförmågan är ett mått på motståndet hos konstruktionselementets förmåga, vilket beror på materialets egenskaper, att klara av laster.

5.3.3.1. Tvärsnittsarea

När det kommer till dimensionering av ett stålkonstruktionselement, mer precist dess tvärsnittsarea har det konstaterats att oberoende av storleken på profilen varierar medelvärdet från dess nominella värde obetydligt. Variansen som kan beskrivas genom varianskoefficienten (COV), vilket är en kvot mellan standardavvikelsen och medelvärdet. Kvoten ger ett mått på den relativa variationens storlek vilket i sin tur kan användas för att jämföra variationen mellan olika parametrar. COV för tvärsnittsarean antar värdet 0,032 vilket kan användas tillsammans med en normalfördelning för att därmed beskriva den geometriska variationen (JCSS2, 2001).

5.3.3.2. Sträckgräns

Sträckgränsen spelar in vid båda konstruktionsfallen, med balken och pelaren, eftersom det är karakteristiskt för materialet och därmed närvarande vid många fenomen.

Materialets egenskaper varierar oberoende av branden och variationen tas här hand om med hjälp av en normalfördelning. Som medelvärde antas ett värde som är cirka 1,14 gånger större än det nominella värdet och COV antar 0,07 (JCSS2, 2001).

5.3.3.3. Osäkerheter hos bärförmågekapaciteten

En relevant modellosäkerhet i bärförmågan tar hänsyn till användandet av en slumpmässig variabel som täcker in brister och ofullständigheter. För balken rekommenderades att en lognormalfördelning med medelvärde 1 och COV 0,05 användes för att täcka osäkerheterna i bärförmåga vid böjmoment. För pelaren användes samma värden som för balken fast istället med en normalfördelning (JCSS2, 2001).

5.4. Ingångsparametrar med termiska egenskaper

Hur en brand påverkar stålkonstruktionselementet beror på två egenskaper; specifik värmekapacitet och densitet.

5.4.1. Specifik värmekapacitet

Specifik värmekapacitet är en termodynamisk egenskap som mäter hur mycket värmeenergi (J) som behövs för att öka temperaturen på 1 kg av materialet 1°C (Incropera & DeWitt, 2002).

Angående stålets värmekapacitet kan det konstateras genom att studera figur 12 nedan att den är relativt konstant förutom en topp på 735°C där den stiger upp till 5000 J/kg K (CEN2, 2005).

Den specifika värmekapaciteten, c_a , kan bestämmas genom följande:

$$20^{\circ}\text{C} \leq \Theta_a \leq 600^{\circ}\text{C}:$$

$$c_a = 425 + 7,73 * 10^{-1} \Theta_a - 1,69 * 10^{-3} \Theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6} \Theta_a^3 \text{ J/kgK}$$

$600^{\circ}\text{C} \leq \Theta_a \leq 735^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 666 + 13002/(738 - \Theta_a) \text{ J/kgK}$$

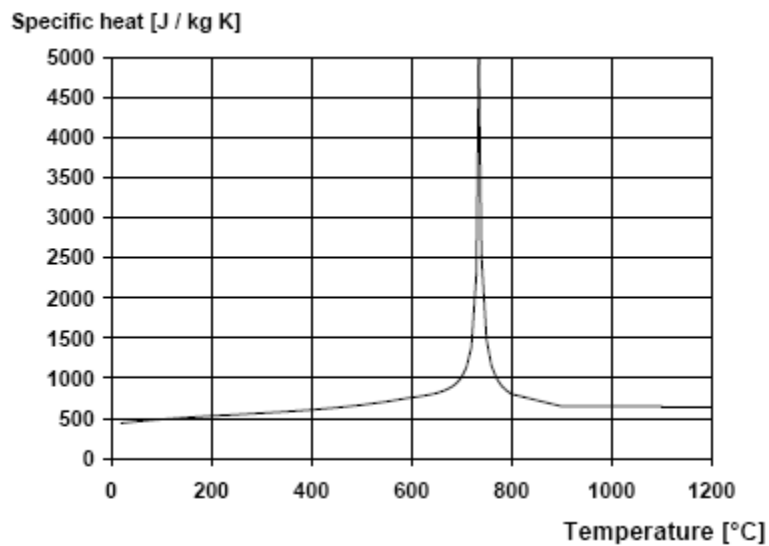
$735^{\circ}\text{C} \leq \Theta_a \leq 900^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 545 + 17820/(\Theta_a - 731) \text{ J/kgK}$$

$900^{\circ}\text{C} \leq \Theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kgK}$$

Θ_a är ståltemperaturen [$^{\circ}\text{C}$]



Figur 12. Specifik värmekapacitet som funktion av temperaturen (CEN2, 2005).

5.4.2. Densitet

Ståldensiteten påverkas inte av temperaturskillnader upp till 1000°C vilket kan konstateras genom tabell 4 nedan. Figur 12 visar dock det som inte fångas in i tabell 4, nämligen en topp vid 735°C . Tabell 4 visar också densiteten för gips. Gipset innehåller kristallbundet vatten som kan förångas vid brandpåverkan vilket inte har beaktats i simuleringsmodellen (Danogips, 2006).

Material	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	ρ (kg/m^3)
Stål	20	7850
	200	7850
	500	7850
	1000	7850
Gips	20/1000	800

Tabell 4. Stålegenskaper vid olika temperaturer (Eurocode 3, 2005).

5.4.3. Försämring av bärförmågan

Parametrarna som är temperaturberoende presenteras i detta avsnitt.

Då temperaturen i ett stålelement ökar leder det till sämre bärförmåga. Hur temperaturen reducerar bärförmågan hos stålet kan ses i tabell 3.1 i Eurocode 3 (1993).

Termiska effekter kommer också leda till variation i sträckgränsen och E-modulen eftersom de parametrarna är beroende av stålets karakteristiska.

Sträckgränsen kommer med ökad temperatur att reduceras vilket betyder att vid en brand kommer förändringen att ha konsekvenser för var gränsen går för både den plastiska deformationen och för knäckningsfenomenet. Reducering av sträckgränsen får därmed konsekvenser för både balken och pelaren när simuleringarna utförs.

E-modulen är ett mått på materialets styvhet vilken är en materialberoende egenskap och reduceras med ökad temperatur (Whilborg, 2004). I simuleringsmodellen kan det konstateras att E-modulen bara är närvarande vid simulering av pelaren.

Steel Temperature θ_a	Reduction factors at temperature θ_a relative to the value of f_y or E_a at 20°C		
	Reduction factor (relative to f_y) for effective yield strength	Reduction factor (relative to f_y) for proportional limit	Reduction factor (relative to E_a) for the slope of the linear elastic range
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

NOTE: For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.

Tabell 5. Reduktionsfaktorer vid ökad ståltemperatur (Eurocode 3, 2005)

5.5. Sammanställning av scenarier

I förebyggande syfte kommer denna del sammanfatta de olika scenarier som ska simuleras vilket kan vara bra att få en överblick på innan resultaten presenteras.

Den ISO-branddimensionerade konstruktionen ska testas i tre olika verksamheter; kontor, skola och bibliotek, som kommer medföra variation i flera parametrar. De parametrar som är beroende av verksamheten i brandcellen är brandbelastning och variabel last. Gällande brandcellen kan öppningsfaktorn varieras och den kommer att vara central då resultaten presenteras.

Känslighetsanalys kommer dels vara en del av simuleringarna, men kommer också att göras genom att förändra andra parametrar än de som är nämnda. De angivna ekvationerna och sambanden som givet i tidigare avsnitt har sammanställts i bilaga 3 för att ge en enklare överblick på hur modellen är sammansatt och fungerar.

5.6. Verifiering av den framtagna modellen

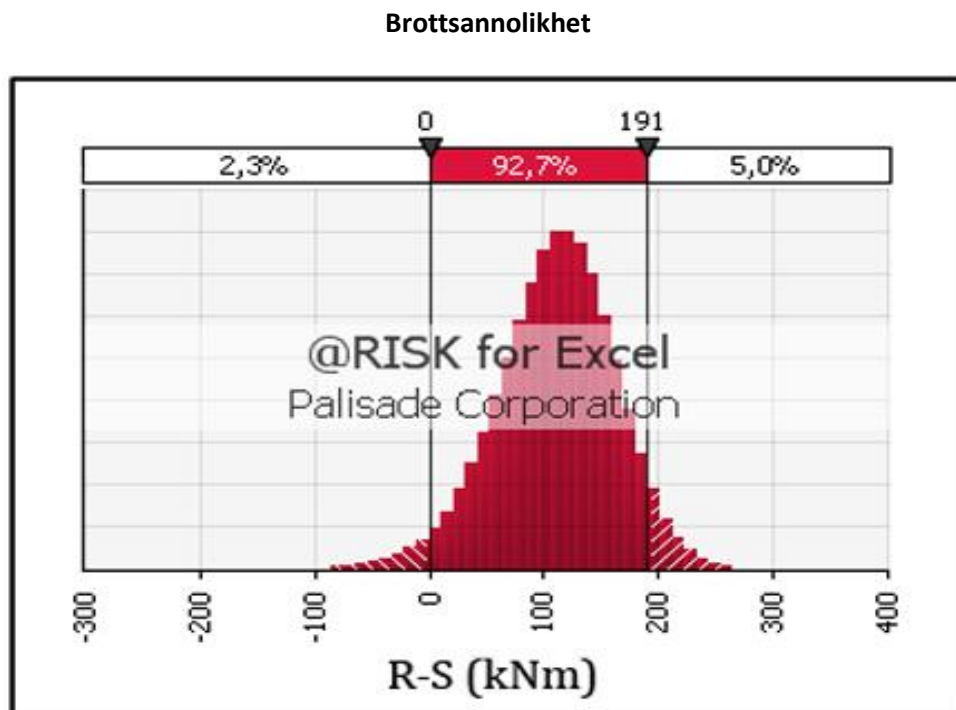
För att se att modellen verkade rimlig kunde den testas med hjälp av ISO-branden vilket också var det enda sätt att kontrollera att modellen gav rimliga resultat i form av låg brottsannolikhet. För att testa modellen byttes gastemperaturmodell ut mot standardbrandförloppet. Därefter kan resultaten, d.v.s. brottsannolikheten studeras för att få en omfattning om de ligger i en låg region eller inte och därmed påvisa om modellen verkar rimlig.

6. Resultat

De erhållna resultaten presenteras i detta kapitel uppdelat för balk och pelare. För att få lite överskådlig syn har resultaten presenterats i tabellform och några även i grafiskt format. Generellt gäller att det är brottsannolikheten efter 60 minuter om inget annat anges.

6.1. Simuleringsresultat för en balk utsatt för brand

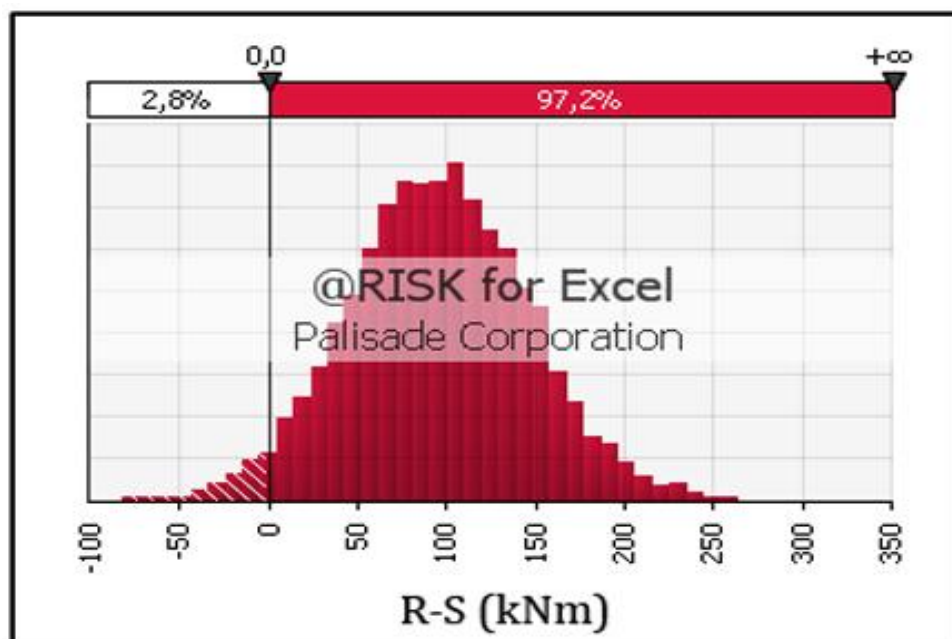
För att på något sätt validera modellen byttes gastemperaturbeskrivningen ut mot standardbrandmodellen. Meningen med detta var att på något sätt se om resten av modellen verkade rimlig. Alltså kontrollera hur stor brottsannolikheten var efter 60 minuter som elementet var dimensionerat för. Då standardbranden används borde en låg sannolikhet gälla brott eftersom den används i dimensioneringen idag. I figur 12 nedan är allt mindre än noll alltså sannolikheten för att brott ske vilken är endast en liten svans av sannolikhetsfördelningen.



Figur 13. Validering av modellen genom att använda ISO-branden.

Figur 13 beskriver brottsannolikheten då det naturliga brandförloppet användes för att beskriva gastemperaturen.

Brottsannolikhet



Figur 14. Kontor med standardinställningar ($O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$)

6.1.1. Brottsannolikheten för en balk utsatt för brand

Verksamhet:	Skola	Kontor	Bibliotek
Förändrad parameter:	Brottsannolikhet	Brottsannolikhet	Brottsannolikhet
$O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$	3,2%	2,8%	15,5%
$O = 0,03 \text{ m}^{1/2}$	8,2%	36,3%	62,7%
$O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$	26,5%	3,4% (Isolerings tjocklek = 22mm)	-

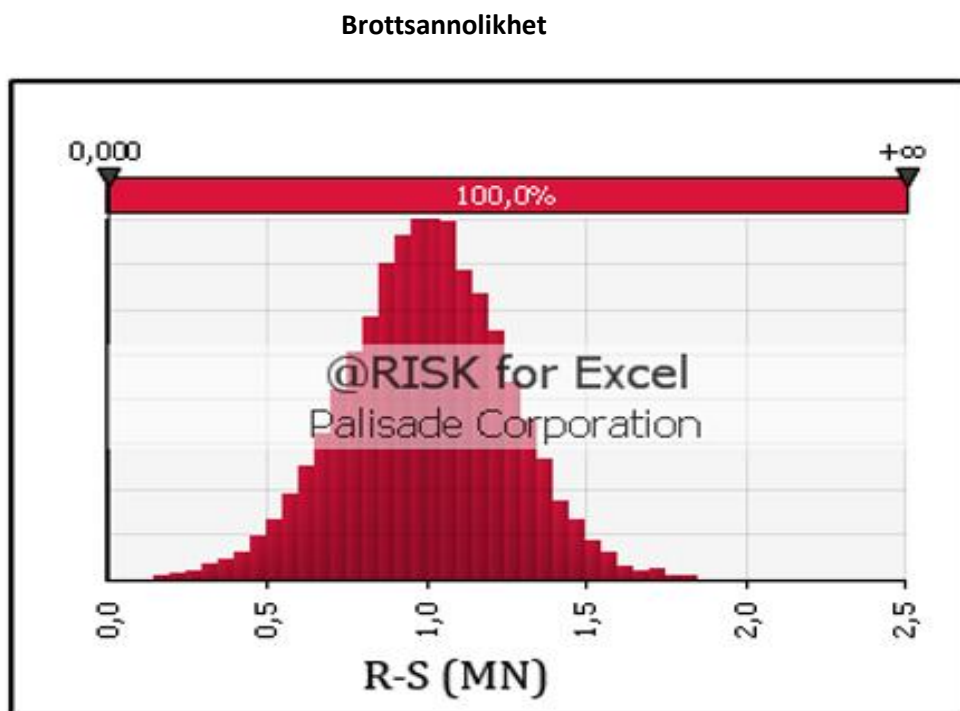
Tabell 6. Summering av olika simuleringsresultat.

Valideringen av simuleringsmodellen (Figur 11) visade att brottsannolikheten var låg vilket förväntades och även att modellen verkade ge rimligt resultat i form av en låg brottsannolikhet. Då naturligt brandförlopp användes i modellen visade det sig att vid en låg öppningsfaktor, för kontor, var den tämligen snarlik den i valideringsfallet vilket tyder på en rätt dimensionerad balk. Viktigt att poängtera är att de fall av brott som uppstod skedde nära 60 minuter och inte tidigt i brandförloppet. Dock kommer brottsannolikheten öka drastiskt vid förhöjd öppningsfaktor vilket inte är så konstigt eftersom branden är ventilationskontrollerad kommer syret att bidra till en aggressivare brand i form av en snabbare temperaturhöjning. För verksamheten kontor kommer isoleringen kunna ökas för att få ner brottsannolikheten vilket kunde påvisas och motiveringen varför det sker är att värmeöverföringen går långsammare genom isoleringen. Detta gjordes för att påvisa hur en ökad tjocklek på brandskyddsmaterialet leder till en lägre brottsannolikhet efter som ståltemperaturen ökar långsammare. Det påvisas också att konstruktionen inte är särskilt lämpligt i verksamheten bibliotek eftersom brottsannolikheten är relativt hög. Förklaringen till detta ligger främst i att böcker är tunga vilket bidrar till hög last samt det faktum att böckerna brinner vilket ger en hög brandbelastning. En hög brandbelastning behöver dock inte betyda en aggressivare brand i

detta fall utan snarare att branden varar längre. Eftersom bibliotek har så pass skilda förutsättningar mot kontor och skola kan det konstateras att balken inte är lämplig i en sådan verksamhet eftersom brott sannolikheten är för stor.

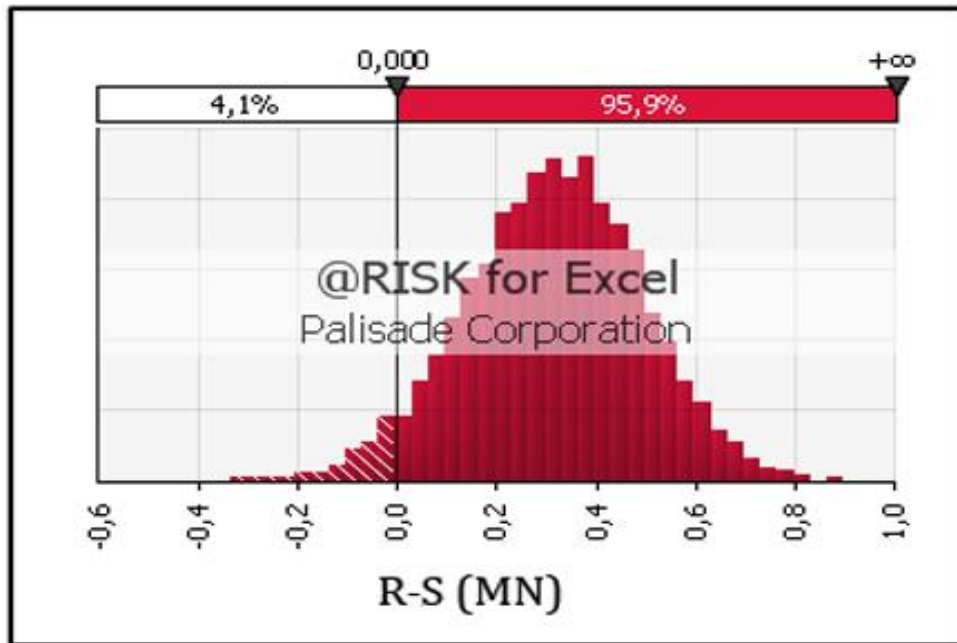
Generellt kan det konstateras att balken som dimensionerats med standardbrandförloppet är underdimensionerad vilket kan konstateras genom att studera brottsannolikheterna för kontor. De olika öppningsfaktorerna kan liknas vid olika situation då den högsta kan tänkas vara att alla öppningar är öppna och den mindre representerar fallet då vissa öppningar fortfarande inte är öppna efter 60 minuter. Vad det gäller tidpunkten för brottet gällde det generellt, även fast det var en hög brottsannolikhet att de flest brotten inträffade efter ca 55 minuter.

6.2. Simuleringsresultat för en pelare utsatt för brand



Figur 15. Skola med standardinställningar ($O=0,02m^{1/2}$).

Brottsannolikhet



Figur 16. Kontor (öppningsfaktor 0,08 m^{1/2}) efter en 63 minuter.

Brottsannolikheten för en pelare utsatt för brand

Verksamhet:	Skola	Kontor		Bibliotek
Förändrad parameter:	Brottsannolikhet	Brottsannolikhet	Förändrad parameter:	Brottsannolikhet
O = 0,02 m ^{1/2}	2,3% (Efter 85 minuter)	0%	O = 0,04 m ^{1/2}	0,1%
O = 0,06 m ^{1/2}	4,9%	-	O = 0,08 m ^{1/2}	0,2%
O = 0,08 m ^{1/2}	-	4,1% (62 min)	-	-

Tabell 7. Summering av olika simuleringsresultat

För pelaren, som dimensionerats med standardbrandförloppet, kunde det konstateras att genom validering av modellen visade sig att brottsannolikheten var noll. För att få en ökad brottsannolikhet då pelaren testades i simuleringsmodellen visade det sig att en öppningsfaktor på 0,08 m^{1/2} krävdes för att få en ökad brottsannolikhet. För bibliotek visade det sig att brottsannolikheten var marginellt större jämfört med de andra verksamheterna. Det visades att samtliga verksamheter, då öppningsfaktorn var liten, skulle inte få någon eller liten sannolikhet för brott då 60 minuter passerats. I de fall det fanns en sannolikhet för brott skedde brotten nära tidsgränsen 60 minuter.

För pelaren kan jämfört med balken konstateras att simuleringsmodellen kommer fram till att en överdimensionering har skett. Detta kan konstateras genom att studera brottsannolikheten efter 60 minuter.

7. Diskussion

I detta avsnitt diskuteras utvärderingen av modellen och hur den kan användas för att utvärderas dagens befintliga dimensioneringsmetod för brand. Diskussionsavsnittet baseras huvudsakligen på erfarenheter från kapitel 5 och 6.

7.1. Simuleringsmodellen

Grunden till rapporten bestod av litteraturstudie samt uppbyggande av en simuleringsmodell för att kunna utvärdera dagens branddimensioneringskrav. Examensarbetet har varit krävande på många sätt. Dels att hitta relevant litteratur har varit en svår uppgift och mycket arbete har ägnats åt det. Slutligen ledde detta vidare till tillräckligt med information för att kunna sätta ihop en modell som skulle fungera som utvärdering av dagens krav.

Det finns många delar i modellen som kan diskuteras och de flesta av de delarna ska försöka avhandlas i detta avslutande kapitel.

7.1.1. Bakgrundsmaterialet

Vad det gäller bakgrundsmaterialet, som skulle identifieras för att kunna ge en bild över hur en utvärderingsmodell kunde utformas, så var det väldigt spritt och oftast kunde endast små fragment av rapporter och artiklar användas för att ge den nödvändiga informationen. Detta ställde till det lite extra eftersom när bitar plockas från flera olika rapporter gäller det att vara extra noggrann för att säkerhetsställa att allt passar ihop längs hela vägen och slutligen fungerar i simuleringsmodellen. Hur det säkerställs att den hittade informationen passar ihop med modellen kan verifieras på flera olika sätt. För att nämna ett exempel kan det konstateras att då den parametriska branden användes som ingångsparameter kunde den bytas ut mot standardbrandförloppet och på så vis kunde det konstateras om simuleringsmodellen verkade rimlig eftersom brotts sannolikheten blev relativt låg. Detta kan kanske ses som ett grovt sätt att kontrollera att resultaten verkar rimliga, men det var också det enda sätt att få en fingervisning på att resultaten var rimliga och är förklaringen till varför det var viktigt att göra en validering med hjälp av standardbranden. Motiveringen till det kommer ursprungligen från hur standardbrandförloppet har kvantifierat tidsgränsen. Det måste vara rimligt att ha en låg brotts sannolikhet vid det kvantifierade tidskravet då det används vid dimensionering.

Att det var begränsad tillgång till väsentlig litteratur påverkade utformandet av modellen på ett negativt sätt eftersom materialet som fanns att tillgå formade hur modellen skulle se ut. Om mera information hade kunnats tillgå kanske delar av modellen sett annorlunda ut. Det kan också vara av vikt att poängtera att det rör sig troligtvis inte om några väsentliga skillnader eftersom modellen måste följa ett visst mönster såsom har redogjorts för i rapporten.

7.1.2. Modelljämförelse

Branddimensionering enligt den i bilaga 1 är på många vis enkel vilket ger fördelar på det området att den är lättare att följa och få en överblick på samt lättare att utföra. Det är dock många delar som borde förbättras vilket den framtagna modellen vill peka på. Detta kommer därför behandlas mera ingående nedan.

Framförallt fördelen med att använda naturligt brandförlopp jämfört med standardbrandförloppet har behandlats en hel del i rapporten. För att knyta tillbaka till de ambitioner som Boverket ställde med det holistiska synsättet så måste det byggas på en utvidgad probabilistisk modell med naturligt brandförlopp som grund för beskrivningen av brandgastemperaturen. En modell kan troligen aldrig

beskriva verkligheten exakt som den är vilket betyder att det är viktigt att ha en dynamisk modell som hela tiden lever och uppdateras då nya upptäckter görs. Uppdatering av modellen har för avsikt att göra modellen mer och mer lik verkligheten. Därigenom kommer det att vara en grund för att kunna uppnå till ett holistiskt synsätt.

Det som kan nämnas i anslutning till hur modellen bör utformas är att den ska vara hållbar för framtiden vilket ställer vissa krav på de ingående parametrarna. Ett exempel är att istället för standarddimensioneringens sätt (bilaga 1) att hantera osäkerheter genom använda partialkoefficienter, borde det var mer fördelaktigt att införa osäkerheter som är gjort i modellen. Dessa kan verka på alla parametrar och är lätta att införa eller ta bort i efterhand. Därefter kan valet av osäkerheterna diskuteras utifrån hur de beräknas och motiveras. Ibland bygger modellosäkerheterna på faktiska undersökningar exempelvis hur mycket dimensionen på ett konstruktionselement avviker och i andra fall tas en standardosäkerhet i form av en normalfördelning. Standardosäkerheten uppkommer då det är svårt eller helt enkelt inte går att ta reda på osäkerheten, men då parametrarna ändå innehåller en viss osäkerhet. Det kan också konstateras att partialkoefficienter som består av en faktor är mer lätthanterligt jämfört med osäkerheterna som får införas på flera olika parametrar vilket är partialkoefficienternas fördel. Dock kommer den vara mer besvärlig då en eventuell uppdatering av en osäkerhet ska ske och modellosäkerheter gör det enklare att förstå när en viss del i modellen ska uppdateras. Förståelse för modellen kommer troligen spela stor roll för det holistiska perspektivet för att kunna engagera flera sakkunniga att komma med synpunkter och förbättringar.

Det som standardbranddimensionering hade som fördel var att den var relativt enkel att genomföra till skillnad från modellen som byggdes upp. Temperaturspridningen var en sak i modellen som blev relativt mycket diskuterad under examensarbetets gång. Det var främst kring balken som det uppstod lite osäkerheter huruvida en tresidig exponering ledde till för slags temperaturfördelning. Det fanns där delade meningar i konstruktionsbranschen om balken eventuellt kunde kylas eller leda bort värmen genom betongen som fanns på ovasidan av balken. Detta kunde dock inte undersökas vidare eftersom en sådan modell i Excel hade varit för krävande att ta fram då temperaturförändringen måste undersökas på varje sida och därefter extrapoleras vidare till en gemensam temperaturfördelning. En vidare undersökning av detta fenomen kunde kanske avslöjat att en åtgärd på en sida av ett konstruktionselement kunde få det mer hållbart för temperaturförändringar.

En ytterligare fördel med modellen som togs fram är det kan ställas krav i olika domäner och det är överskådligt att se de olika delarna och därmed kan kvantifiering ställas i flera olika domäner jämfört med standard dimensionering (bilaga 1) som oftast användas med ett kvantifierat tidskrav. Det holistiska synsättet borde troligen vara öppet för att sätta kvantifierade krav i flera domäner, exempelvis kan ett temperaturkrav komma att ställas. Meningen med det kan vara att då temperaturen kan hållas på en viss högsta nivå kan det kanske påvisas att endast brandcellen berörs och byggnaden i helhet inte påverkas nämnvärt.

Vidare kan det vara intressant att kommentera lite kring hur modellen sammansattes för att därmed kunna dra lite slutsatser om rimligheten med den. Vad det gäller de använda temperaturmodellerna bör reliabiliteten vara hög eftersom de är de bästa som finns att tillgå på denna detaljeringsnivå. Därmed kan det kanske konstateras att reliabilitet kan vara lite subjektivt enligt författarens åsikt,

men motiveringen kan vidare vara att modellen verkade vara rimlig och då borde följden vara att temperaturmodellerna är relativt rimliga i sammanhanget. Med rimlig menas att då standardbranden användes för att beskriva gastemperaturen blev sannolikheten relativt låg vilket borde tyda på att stegmodellen fungerar bra i sammanhanget.

Reliabiliteterna hos osäkerheterna är relativt vedertagna hos dagens konstruktörer samt det faktum att den finns en expertkommitté som utvecklat dem. Avsikten som kommittén hade med modellsamlingen har tidigare presenterat och frågan om de är helt oberoende kan säkert alltid diskuteras. Dock anser författaren att den probabilistiska skriften som kommittén framställt har relativt hög reliabilitet med tanke på att flera experter har samrått vid dess framtagande.

Slutligen kan det konstateras att även om alla parametrar i modellen har hög reliabilitet och validitet så betyder det inte att modellen i sig har samma egenskaper. Dock kunde detta påvisas genom valideringen som därmed intygar att de egenskaperna återfinns i modellen.

7.2. Simuleringsresultat

Trots att bakgrundsmaterialet utgör en viss del av utvärderingen är resultaten också intressanta i den meningen att de kan ge upplysningar om hur kvaliteten är på dagens dimensioneringsmetod.

När brandförloppet utgjordes av det naturliga brandförloppet resulterade det i att brotts sannolikheten blev generellt högre jämfört med standarddimensioneringens gällande för balken. För pelaren visade sig dock situationen vara annorlunda och resultatet liknade mer det för standardbranden då variation av parametrarna gjordes. Beroende på verksamhet blev resultaten ungefär de samma för skola och kontor. Medan biblioteket hade betydligt högre brotts sannolikhet, framförallt då balken studerades, vilket gjorde det intressant att ta reda på varför så var fallet. Det visade sig också att de brotten som skedde visade sig vara strax innan 60 minuter vilket är ett bra tecken eftersom det visar att andra typer av fenomen inte har inträtt eller att det finns eventuella felaktigheter i modellen.

För att redogöra för helhetsperspektivet kan det finnas en del frågetecken om hur de olika verksamheterna valdes. Avsikten som nämndes var att ett brett spektrum vill täckas och därigenom få flera olika scenarier att undersöka. Denna tanke kan så klart ifrågasättas.

Det kan visas genom att använda känslighetsanalys att brandbelastningen inte påverkar resultatet under förutsättning att öppningsfaktorn är låg. Detta kan låta märkligt, eftersom det kanske kan tänkas att en högre brandbelastning borde leda till högre gastemperatur. Detta tankesätt är riktigt då stålet är oskyddat, men eftersom stålet är brandisolerat samt att öppningsfaktorn är låg betyder det alltså att värmen transporteras långsammare och uppvärmningen av stålet sker således långsammare. Genom att studera temperaturen i stålet efter en timme så har stålet fortfarande inte nått sin maximala temperatur.

Det kan visas att genom att öka öppningsfaktorn, samtidigt som brandbelastning är stor, kommer konsekvenserna att bli stora. Med detta menas att brotts sannolikheten ökar snabbt vilket känslighetsanalysen visar. Resonemanget ovan om brandbelastningens små effekter visar sig bara vara giltiga för små öppningsfaktorer ($<0.03\text{m}^{1/2}$). Detta kan kopplas till föregående stycke genom att konstatera att isolerings tjocklek var därmed inte tillräcklig för att påverka uppvärmningstakten.

Utgångspunkten för examensarbetet bestod av två branddimensionerade element i en brandcell innehållande kontorsverksamhet. Genom att jämföra data för kontor och skola kan det konstateras att deras medelvärde för den variabla lasten var 0,5 och 0,6 kN/m². Medelvärdena är väldigt snarlika vilket gjorde att deras resultat blev snarlika vid simuleringarna. Gällande bibliotekets medelvärde är den variabla lasten runt tre gånger större vilket får stora konsekvenser för gränsen när brott sker. Betydelsen av en hög variabel last är att konstruktionselementet har en hög lastutnyttjandegrad vilket betyder att det är stora spänningar innan branden har börjat. Detta kommer påverka bärförmågan och är spänningarna i elementet stora före en brand bryter ut kommer dess förmåga att motstå ökad temperatur att vara mindre.

Det nämndes i rapporten att lasterna kan förändras genom ett brandförlopp vilket är lämpligt att spinna vidare på här. Förändring av lasterna kunde ske då exempelvis material brinner upp eller material ramlar ned vilket påverkar den variabla lasten. Ställningstagandet som togs var att dessa delar var ungefär lika vilket så klart är en förenkling. Speciellt stor skillnad gör det när antalet våningar beaktas och är kvoten material som försvinner till följd av branden på varje våning kan det spela stor roll för resultatet. Det som gjorde att detta inte beaktades är främst att det kan vara svårt att uppskatta hur detta ska vägas in och för att fånga in rimliga antagen för en sådan modell anser författaren att statistik hade kunnat utgöra en bra grund för det. Bristen på statistiskt material gjorde det svårt att bygga upp en rimlig modell för det och därför bestämdes det att det mest lämpliga var att försumma fenomenet med tanke på att simuleringssmodellen i sig inte är väldigt detaljerad.

Valet av verksamhet kan återigen nämnas och försöka få ett brett spektrum är möjligtvis inte den bästa anledningen till valet. Trots att biblioteket hade betydligt större värden jämfört med de andra verksamheterna fyllde ändå den undersökningen en funktion i form av att det kan ses som en del i känslighetsanalysen genom att ge högra ingångsparametrar. Känslighetsanalysen visade också att öppningsfaktorn påverkade konstruktionselementens resultat. Den första simuleringen som utfördes med hjälp av en öppningsfaktor på 0,02m^{1/2} och genom att öka öppningsfaktorn skulle det konstateras att brotts sannolikheten ökade betydligt vilket tydligast observerades för balken.

Det faktum att Eurocode ibland underskattar temperaturen undersöktes också och genom att använda en annan faktor så ökade temperaturen en aning. Detta påverkade resultatet genom att brotts sannolikheten ökade lite. Dock är det väl diskutabelt vilken kompensationsfaktor som behövs för att få en så verklighetsnära temperatur liknande den i en riktig brand. Detta faktum borde troligen undersökas vidare i en förfinad modell där detta möjligen kan påverka resultatet ännu mer.

Grundförutsättningarna nämligen att konstruktionselementet inte ska kollapsa inom 60 minuter var väl uppfyllt för verksamheterna kontor och skola. Dock för biblioteket är det lite för hög brotts sannolikhet för balken. Pelarens brotts sannolikhet, för biblioteket, är väldigt diskutabel då den borde vara konsekvent högre än både resultaten för skola och kontor eftersom brandbelastningen är högre. Därför kan de resultaten för pelaren i ett bibliotek därmed anses som icke användbara och tidigare konstaterades det att konstruktionen inte var lämpligt för den verksamheten vilket återigen bekräftas. Pelarens brottkriterier bygger på ett annat fenomen, knäckning, vilken möjligen kan påverka utgången av resultaten eftersom beräkningarna är mera komplexa jämfört med de för balken.

Kvantifieringen i form av tid gjorde det hela intressant att undersöka vad som hände efter 60 minuter och speciellt under ett helt brandförlopp. Det visade sig att ingen konstruktionsdel klarade av ett helt

brandförlopp under utgångsförhållandena. Att simulera ett helt brandförlopp blir i och med en annorlunda probabilistisk modell därmed nu en möjlighet jämfört med den traditionella som endast kan undersöka att konstruktionen håller fram till en viss tidsgräns och kan därmed inte säga något om vad som sker efter den tidsgränsen. Detta torde också vara ett steg mot det holistiska synsätt att kunna avgöra vid vilken tid eller temperatur som brandcellen blir kritisk för hela byggnaden.

Det som snedvrider modellen en aning är att verksamheterna som undersöktes inte är viktade mot varandra vilket betyder att resultatet borde ses i proportion till hur många av varje verksamhet som faktiskt finns. Då resultaten inte har viktats kan det snedvrida dem eftersom det troligen finns fler kontor och klassrum jämfört med bibliotek. Denna aspekt har övervägts, men har dock inte kunnats undersöka eftersom det är svårt att hitta den typen av information.

Säkerhetsindex beta ledde, som tidigare nämnts i rapporten, till en normalfördelad brottsannolikhet och motsvarande fördelning för den framtagna modellen är inte entydig. Snarare visade resultaten att det kan vara olika fördelningar vilket då delvis beror på vilka fördelningar som använts som stokastiska variabler och hur mycket de påverkat brottsannolikheten. Ibland kan det dock påvisas att brottsannolikheten varierar på grund av verksamhet.

Det kan konstateras att resultaten mellan balk och pelare visar på olika saker då främst menat hur dimensionering är gjord. Det handlar om två helt skilda fenomen för hur brottet äger rum vilket gör att de också får olika brottsannolikheter. Detta kunde också konstateras i standarddimensionering att de skiljdes åt genom att de hade t.ex. olika tjocklek på isoleringen.

8. Slutsatser

Beträffande målet med rapporten var det att ta fram en modell som kunde användas för att undersöka två bärande konstruktionselement. I rapporten har presenterat hur en inledande modell för en ny probabilistisk dimensioneringsmetod skulle kunna tas fram. Den utvecklade modellen är inte perfekt utan innehåller stommen som bör vidareutvecklas och förfinas. Det har i och med modellens utvecklande visats att det är möjligt att ta fram en modell som kan användas för utvärdering av dagens branddimensioneringsmetod. Detta trots att det finns en del felkällor såsom oklarheter i termiska fenomen och hur valet sker av olika probabilistiska variabler.

Detta konstaterande leder vidare in på syftet som var att utvärdera dagens befintliga branddimensioneringsmetod. Det kan konstateras att de beräkningar som gjorts i och med modellen kunde användas för enklare studier och utvärdering av dagens metod. Det gick att visa att öppningsfaktorn spelar stor roll och kommer vara avgörande då gastemperaturen ska beskrivas. Det visade sig vara stor skillnad i brottsannolikhet då öppningsfaktorn varierades vilket vill peka på bristen med standarddimensioneringen, nämligen att brott ibland tillåts.

Det har kunnat påvisas att det går att använda ett annorlunda angreppssätt för att kvantifiera säkerhetsnivåer och därmed visa att dagens metod går att använda för bärande konstruktioner i vissa verksamheter. Detta bekräftas av att brottsannolikheten blir relativt låg då standardbranden och naturligtbrandförlopp används som indata till den skapade modellen. Då detta uppfylls går det också att påvisa att säkerhetsnivåer går att kvantifiera i samtliga tre domäner. Detta visar på hur rustad en sådan modell bör vara för framtiden då det t.ex. kan det komma att ställas krav på enskilda brandceller i en byggnad. Att sätta ett krav på temperaturen eller hållfastheten under ett helt brandförlopp, i en brandcell, skulle kunna utgöra en del ett holistiskt perspektiv som en framtida förnyad probabilistisk modell skulle kunna redogöra för. Det exakta utförandet eller utseendet för modellen ligger dock utanför denna rapport som skulle tillgodose kraven för att kunna utvärdera dagens dimensioneringsmetod. Dock kan det konstateras att modellen är relativt realistiskt i vissa sammanhang då den jämförs med standard brandförloppet och de brister som finns med den i form av att den kurvan är orealistisk. Den modellen som tagits fram innehåller bister som skulle kunna förbättras. Vidare forskning och kompetens måste dock till för att kunna förfinas den framtagna modellen till att fungera bättre. Det den framtagna modellen vill peka på är också att den lämpliga strukturen för den mer utvecklade probabilistiska modellen är kronologiskt ordnad vilket innebär att givet att en brand sker följs konsekvenserna för det i en viss kedja. Förloppet i kedjan kan övergripande förklaras som hur en gastemperaturförändring leder till ståltemperaturförändring vidare till förändrad bärförmåga.

Slutligen kan det konstateras att dagens dimensioneringsmetod i det utvalda fallet för en balk och en pelare visade sig vara tillräcklig för åtminstone två av tre olika verksamheter vilket tyder på att den duger för tillfället. Dock måste problemet med de tudelade föreskrifterna lösas vilket kräver att en nyare modell tas fram som då kan uppfylla Boverkets krav och denna rapport har gett inspiration till hur arbetet kan se ut framöver. Det som skulle kunna byggas vidare förutom modellutformningen är att testa modellen i faktiska bränder där det skett brott i stålkonstruktionen, vid brand, för att se om det går att dra några intressanta slutsatser och därmed förankra modellen ytterligare med verkligheten.

9. Källhänvisning

- Björkenstam, U. (1991). *Probabilistisk dimensionering*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Björklund, M., & Paulsson, U. (2003). *Seminarieboken: att skriva, presentera och opponera*. Lund: Studentlitteratur.
- Boverket1. (2008). *Regelsamling för byggande, BBR*. Stockholm: Boverket.
- Boverket2. (2003). *Regelsamling för konstruktion – Boverkets konstruktionsregler, BKR, byggnadsverkslagen och byggnadsverksförordningen*. Vällingby: Boverket.
- Boverket3. (2008). *Brandbelastning*. Hämtat från Bilaga 4
- Buchanan, A. (2001). *Structural design for fire safety*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Burström, P. (2001). *Byggnadsmaterial*. Lund: Studentlitteratur.
- Cajot, L.-G., & Haller, M. (2006). *Fire resistance of steel structures*. Esch-sur-Alzette: Archelor.
- CEN1. (2002). *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*. Brussels: CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION.
- CEN2. (2005). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1.2: General rules - Structural fire design*. Bryssel: CEN European Committee for Standardization.
- CIB. (1989). *Actions on structures - Live loads in buildings*. Rotterdam: CIB commission W81.
- Danogips, K. (den 12 09 2006). *Gips och miljö*. Hämtat från Knauf Danogips: http://byggsystem.knaufdanogips.se/about_us/gypsum/gypsum_env.html den 25 10 2009
- Ejvegård, R. (2003). *Vetenskaplig metod*. Lund: Studentlitteratur.
- Ellingwood, B. R. (2005). Load Combination Requirements for Fire-resistant Structural Design . *Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 15, No. 1* , 43-61.
- Hosserb, D., & Zehfussa, J. (2007). A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire safety journal* 42 , 115-126.
- Höglund, T. (2006). *Modul 6 - Stabilitet för balkar och stänger*. Stockholm: KENSAN Technologies.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- JCSS. (2009). *About JCSS*. Hämtat från Joint Committee on Structural Safety: <http://www.jcss.ethz.ch/about/about.html> den 05 05 2009
- JCSS2. (2001). *Probabilistic model code*. Hämtat från JCSS: http://www.jcss.ethz.ch/publications/publications_pmc.html den 10 05 2009
- Johansson, B. (den 14 Mars 2009). Bärande konstruktioner. (J. Thuresson, Intervjuare)
- Jönsson, R., & Petterson, O. (1985). *Byggnadskonstruktioners brandmotstånd*. Lund: Brandteknik.

- Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton: CRC Press LLC.
- Lamont, S., Usmani, A., & Gillie, M. (2004). Behaviour of a small composite steel frame structure in a "long-cool" and a "short-hot" fire. *Fire Safety Journal* 39 , 327–357.
- Li, G.-Q., Wang, W.-Y., & Chena, S.-W. (2009). A simple approach for modeling fire-resistance of steel columns with locally damaged fire protection. *Engineering Structures* , 617-622.
- Magnusson, S.-E., Petterson, O., & Thor, J. (1974). *Brandteknisk dimensionering av stålkonstruktioner*. Uppsala: Almqvist & Wiksell.
- Mathematical_Statistics. (2007). *What is WAFO*. Hämtat från WAFO: <http://www.maths.lth.se/matstat/wafo/about.html> den 10 02 2009
- MathWorks. (2009). *MATLAB®*. Hämtat från The MathWorks: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html&http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/helpdesk.html> den 10 02 2009
- Melinek, M. (1993). The Distribution of Fire Load. *Fire Safety Journal* 20 , 83-88.
- Palisade_Corporation. (2008). *Guide to using @RISK*. Retrieved 04 29, 2009, from Palisade Corporation: www.palisade.com
- Petterson, O., & Ödeen, K. (1978). *Brandteknisk dimensionering*. Vällingby: LiberTryck.
- SBI. (2008). *Stålbyggnad Publikation 130*. Stockholm: SBI - Stålbyggnadsinstitutet.
- Schleich1, J.-B. (2005). *Fire actions in buildings*. Luxembourg: University of Liège.
- Schleich2, J.-B. (2005). *Fire actions in buildings*. Luxembourg: University of Liège.
- Schleich3, J.-B. (2005). *Calibration of reliability parameters*. Luxembourg: University of Liège.
- SIS. (2009). *Eurokoder - SIS/TK 203*. Hämtat från SIS: <http://www.sis.se/DesktopDefault.aspx?tabName=%40projekt&PROJID=8400&menuItemID=6249> den 11 03 2009
- Strömgren1, M. (2008). *Utveckling av metoder för att beräkna brottsannolikheter för bärförmåga vid brand - projektbeskrivning*. Karlskrona: Strömgren, Michael.
- Strömgren2, M. (2008). PM Bärförmåga vid brand i BBR 20XX. *PM Bärförmåga vid brand i BBR 20XX*. Karlskrona: Michael Strömgren.
- Thelandersson, S. (den 15 April 2009). Rådgivning om brand i stålkonstruktioner. (J. Thuresson, Intervjuare)
- Wihlborg, G. (2004). *Hållfasthetslära*. Lund: Avdelningen för Hållfasthetslära.

Bilaga 1

Probabilistic design of steel structures in fire

By Bernt Johansson, ProDevelopment

1. Introduction

2. Design at room temperature

An office building with four storeys is considered. Each storey is 500 m² and is a single fire cell. Two members are studied, a simply supported beam and a continuous column with data as follows:

Beam span 7,2 m, spacing 5 m

Column length 3,5 m, lower end fixed.

Self weight floor 6 kN/m²

Live load floor 3 kN/m² $\psi_0 = 0,7$

The design follows EN 1993-1-1 [1].

2.1 Design of beam

Reduction factor for live load:

$$\alpha_A = \frac{5}{7} \cdot 0,7 + \frac{10}{2 \cdot 5 \cdot 7,2} = 0,64$$

The design load on the beam in USL becomes

$$q_d = 5(1,35 \cdot 6 + 1,5 \cdot 0,64 \cdot 3) = 55 \text{ kN/m}$$

$$M_{Sd} = \frac{55 \cdot 7,2^2}{8} = 356 \text{ kNm}$$

IPE 360 S355

$$M_{Rd} = 355 \cdot 1,02 = 362 \text{ kNm } (u=0,98)$$

2.2 Design of column

Reduction factor for live load with three storeys above the column:

$$\alpha_n = \frac{2 + (3 - 2)0,7}{3} = 0,90$$

The self weight of the roof is taken as the same as the floors and the reduced snow load as 0,6 kN/m².

$$N_{sd} = 5 \cdot 7(1,35 \cdot 6 \cdot 4 + 1,5(0,6 + 3 \cdot 0,9 \cdot 3)) = 1590 \text{ kN}$$

$$l_c = 0,7 \cdot 3,5 = 2,45 \text{ m}$$

VKR 200x200x6,3 S355

$$\lambda_1 = 93,9 \sqrt{\frac{235}{355}} = 76,4$$

$$\bar{\lambda} = \frac{2,45}{0,0789 \cdot 76,4} = 0,406$$

$$\phi = 0,5(1 + 0,21(0,406 - 0,2) + 0,406^2) = 0,604$$

$$\chi = \frac{1}{0,604 + \sqrt{0,604^2 - 0,406^2}} = 0,951$$

$$N_{Rd} = 0,951 \cdot 355 \cdot 4,84 = 1630 \text{ kN } (u=0,97)$$

3 Conventional design for fire

The design follows the simplified method in EN 1993-1-2 [2]. The required fire rating is R60 for ISO-fire.

3.1 Beam

Following 2.4.2 with correction for the beam being not fully utilized we get

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}} \quad (2.5a)$$

where:

- $Q_{k,1}$ is characteristic value of the leading variable action;
- G_k is the characteristic value of a permanent action;
- γ_G is the partial factor for permanent actions;
- $\gamma_{Q,1}$ is the partial factor for variable action 1;
- ψ_{fi} is the combination factor for values, given either by $\psi_{1,1}$ or $\psi_{2,1}$, see EN1991-1-2;
- ξ is a reduction factor for unfavourable permanent actions G .

$$\eta_{fi} = 0,98 \frac{6 + 0,7 \cdot 3 \cdot 0,64}{1,35 \cdot 6 + 1,5 \cdot 3 \cdot 0,64} = 0,65$$

According to expression (4.10) the presence of the concrete slab on top of the beam will increase the bending resistance of the beam at time t by division with 0,85 for a protected beam. Accordingly we need a resistance of $0,65 \times 0,85 = 0,55$ times the resistance at room temperature. Provided that the plastic resistance still can be utilized Table 2.4 gives that the critical temperature is

$$\theta_a = 570 \text{ } ^\circ\text{C}$$

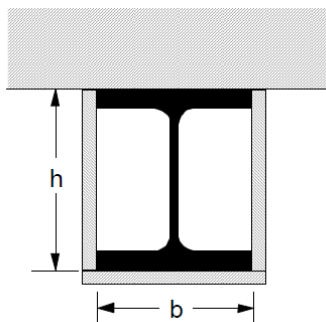


Figure 3.1 Fire protection of beam with boards of mineral wool.

The fire protection is arranged according to Figure 3.1 and the heat conductivity of the mineral wool board is assumed to be $\lambda_p = 0,2 \text{ W/(mK)}$ and their required thickness d_p is to be determined. The section factor for three sided exposure is $A_p/V = 122 \text{ m}^{-1}$. From diagram in [3] it is found that the critical temperature is reached after 60 min with $\frac{A_p \lambda_p}{V d_p} = 1450$. From this the thickness of the

insulation can be calculated to

$$d_p = 17 \text{ mm}$$

The cross section class of the beam should be checked for the fire situation. According to [2] this is done with a reduced value of

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235 / f_y} = 0,85 \sqrt{235 / 355} = 0,69$$

For the flange the limit for class 2 is

$$c/t < 10\varepsilon = 6,9$$

For the actual section it is

$$c/t = \frac{85 - 18 - 8/2}{12,7} = 5,0$$

For the web the limit of class 2 is

$$c/t < 83\varepsilon = 57$$

For the actual section it is

$$c/t = \frac{360 - 2(12,7 + 18)}{8} = 37$$

The conclusion is that the plastic resistance that was assumed above is relevant.

3.2 Column

Assuming $\psi_2 = 0$ for the snow load the reduction factor for the fire case becomes

$$\eta_{fi} = 0,97 \frac{6 \cdot 4 + 3 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 3}{1,35 \cdot 6 \cdot 4 + 1,5 \cdot 3 \cdot 0,9 \cdot 3} = 0,65$$

The corresponding stress at failure in the column is

$$\sigma_{fi} = 0,65 \cdot 1590 / 4,84 = 214 \text{ MPa}$$

According to [1] it is allowed to assume a buckling length equal to half the actual length for the fire situation. The resistance of the column in fire is calculated according to [3] in which the parameter

$$\bar{\lambda}_{20^\circ C} = \frac{0,5 \cdot 3,5}{0,0789 \cdot 76,4} = 0,29$$

is used. There is no difference in the resistance function for different cross sections and the critical temperature is found by interpolation in Table 4.2 of [3]

$$\theta_a = 517^\circ \text{C}$$

The column is protected with mineral wool as described above and the section factor is 159. The

critical temperature is reached after 60 min for $\frac{A_p \lambda_p}{V d_p} = 1190$. From this we get

$$d_p = 27 \text{ mm.}$$

The calculation was based on an assumption that the cross section class of the column was 3 or better. The limit for class 3 is

$$c/t < 42\varepsilon = 29$$

For the actual section it is

$$c/t = \frac{200 - 4 \cdot 6,3}{6,3} = 28$$

So, the calculations above are valid.

4. Probabilistic design for fire

5. Conclusions

References

[1] EN 1993-1-1 Design of steel structure, Part 1-1 General rules and rules for buildings, CEN 2005.

[2] EN 1993-1-2 Design of steel structure, Part 1-2 General rules Structural fire design, CEN 2005.

[3] Haller, M., Cajot, L-G, Fire resistance of steel structures, Arcelor 2006

Bilaga 2

B2.1. Monte Carlo simulation

A Monte Carlo simulation gives the ability to change uncertain deterministic input values into stochastic variables in form of a probability distributions. The total range of possible values is then represented by the probability distribution (Palisade_Corporation, 2008).

B2.1.1. How the simulation works

The simulation refers to a method whereby the distribution of possible outcomes is generated by letting a computer recalculate the model being used over and over again in order to create a probability distribution for the outcome. In every step of the recalculation the computer generates a random number and by doing this valid combination of numbers are tried out in order to simulate all possible outcomes (Palisade_Corporation, 2008).

B2.1.2. Theory

In order to understand how the Monte Carlo sampling method has been built up cumulative distribution must be explained. Any probability distributions could be expressed in a cumulative way in form of a cumulative curve scaled from 0 to 1 on the Y-axis. Values on the Y-axis represent the cumulative probability of the corresponding X-axis value. This means that 0 on the Y-axis represent the minimum value of the distribution and 1 the maximum value. The most likely values are shown in the curve where it is steepest. In a Monte Carlo sampling sequence the computer generates a random number between 0 and 1 where all numbers are equally like to be sampled. The random number is then used to select a value from the cumulative curve which is shown in figure 2.

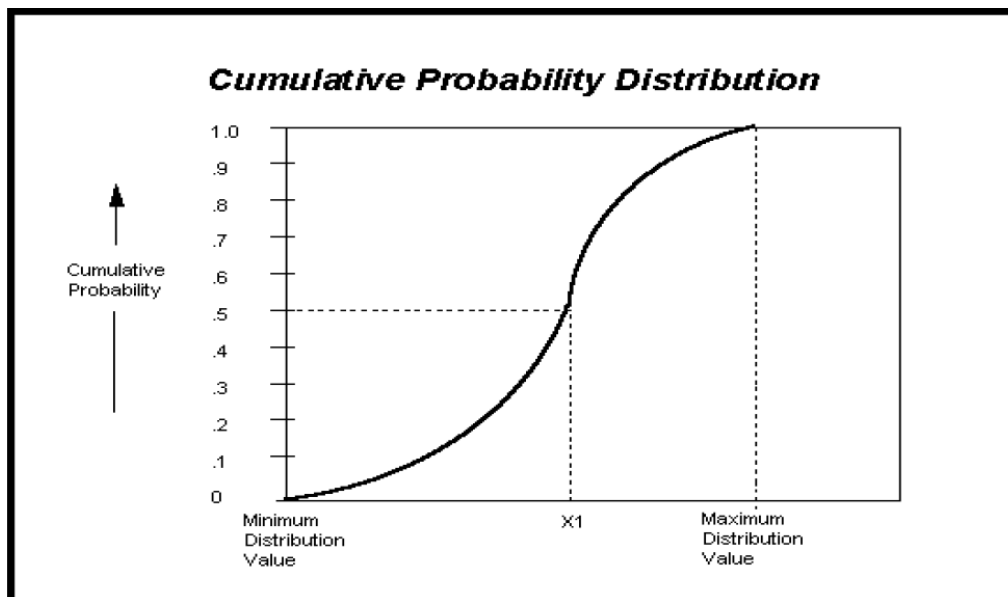


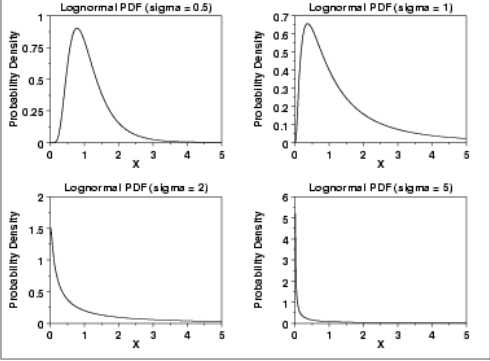
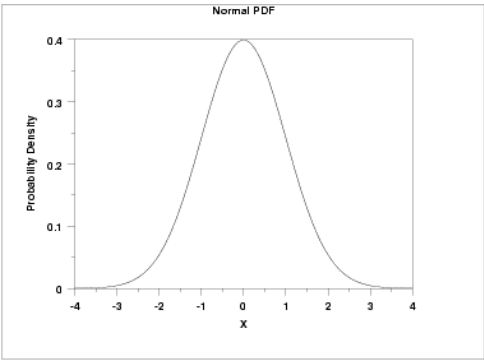
Figure 1. The principle of Monte Carlo simulation (Palisade_Corporation, 2008)

The sampling technique of Monte Carlo are entirely random and by that is meant that any given sample may fall anywhere within the range of the input distribution. Samples are more likely to be drawn in areas of the distribution which have higher probabilities of occurrence.

In the cumulative distribution shown earlier, each Monte Carlo sample uses a new random number between 0 and 1. Monte Carlo sampling could thereby recreate an input distribution through sampling if enough iterations are performed (Palisade_Corporation, 2008).

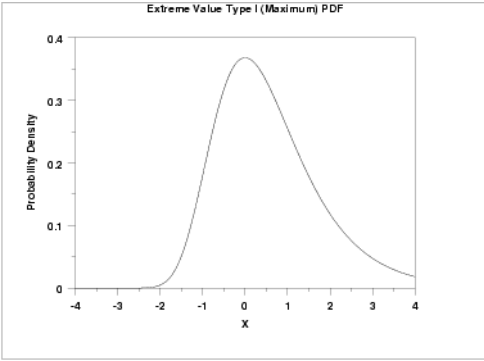
B2.1.3. Distributions used in the simulation

In order to be able to understand some distributions a good way could be to see them visually and thereby get a little feeling for how different factors varies. The pictures below are only illustrative examples of how different distributions could look like.



Normal

Lognormal



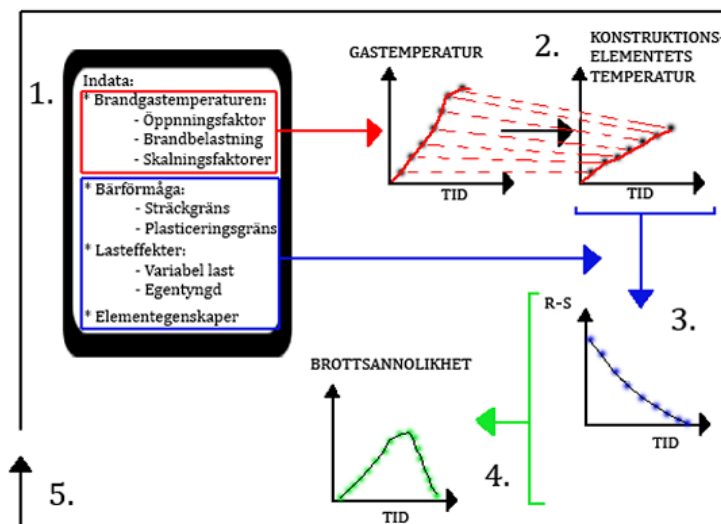
Gumbel

SOURCE: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda366.htm>

The meaning of showing the distributions is to get a hunch about how the variation of different stochastic variables could look like and thereby get an idea of the variation when a certain distribution is presented in the following sections. This could also be used when interpretation of the result should be made and also when the sensitivity analysis are performed.

Bilaga 3. Ekvationssammansättning inklusive förändringar

En övergripande bild av ekvationerna kan framställas och därför illustreras figur 11 här igen för att enklare kunna följa med i resonemanget.



Figur B1. Överblick på simuleringsmodellen

B.3.1. Temperatur

För att beskriva hur gastemperaturen förändras användes formeln i avsnitt 3.1.2:

$$\theta_g = 20 + 1325 \times (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*})$$

Detta motsvarar hur den vänstra grafen i steg 2 byggs upp efter hand. För att kunna överföra denna temperaturförändring till stålet och se hur dess temperatur förändrades användes formeln i avsnitt 4.6.2:

$$\Delta T = \frac{F}{V} \frac{k_i}{\rho_s c_s} \left\{ \frac{\rho_s c_s}{\left(\rho_s c_s + \left(\frac{F}{V} \right) \frac{d_i \rho_i c_i}{2} \right)} \right\} (T_f - T_s) \Delta t$$

Här fungerade gastemperaturen som en input för att kunna beräkna ståltemperaturförändringen vilket är den högra grafen i steg 2. Denna formel beror dels på sambandet från avsnitt 5.4 vilket innebär att den specifika värmekapaciteten för stål är temperaturberoende. Balk och pelare skiljer sig också åt genom att balken exponeras på tre sidor och pelaren på fyra samt tjockleken på isoleringen enligt tabellen nedan.

	Balk	Pelare	Enhet
di (tjocklek)	0,017	0,027	[m]
F/V	122	162	[m ⁻¹]

Tabell B1. Parametrar för balk och pelare.

Ståltemperaturen kan användas för att beskriva hur bärförmågan förändras enligt nedan.

B.3.2. Balkens bärförmåga

Bärförmågan, R, ges av sambandet i avsnitt 4.4.1 samt sambanden i avsnitt 5.3:

$$M_{Rd} = W_{pl} \times f_y \times Theta$$

f_y är beroende av ståltemperaturen och kommer att förändras vid temperaturer över 400°C, enligt tabell 5, vilket kommer ha effekten att bärförmågan minskar med ökad temperatur.

$Theta$ = modellosäkerheten för bärförmågan enligt avsnitt 5.3.3.3

B.3.3. Pelarens bärförmåga

Bärförmågan, R, för pelaren utgår ifrån sambandet i avsnitt 4.4.2 samt sambanden i avsnitt 5.3:

$$N_{Rd} = \chi \times f_y \times A \times Epsilon$$

χ är temperaturberoende genom att den innehåller E-modulen vilken förändras då temperaturen i stålet överskrider 100°C

f_y är beroende av ståltemperaturen och kommer att förändras vid temperaturer över 400°C, enligt tabell 5, vilket kommer ha effekten att bärförmågan minskar med ökad temperatur.

A innehåller en modellosäkerhet enligt avsnitt 5.3.3.1.

$Epsilon$ är osäkerheten i bärförmåga enligt 5.3.3.3.

B.3.3. Lasteffekter på balken

På balken verkar följande lasteffekt, S:

$$M_{Sd} = \frac{(q_{egen} + q_{var}) \times l^2}{8} * Omega$$

q_{egen} är egentyngden för balken

q_{var} är den variabla lasten vilken är verksamhetsspecifik och presenteras i avsnitt 5.3.2.1.

l är balkens längd

$Omega$ är osäkerheten i lasteffekt given i avsnitt 5.3.2.3

B.3.4. Lasteffekter på pelaren

På pelaren verkar följande lasteffekt, S:

$$N_{Sd} = (q_{egen} + q_{var}) \times l \times Sigma$$

q_{egen} är egentyngden utgörs av tre våningsplan samt taket som väger som ett våningsplan

q_{var} är den variabla lasten vilken är verksamhetsspecifik och presenteras i avsnitt 5.3.2.1.

l är balkens längd

$Sigma$ är osäkerheten i lasteffekt given i avsnitt 5.3.2.3

Brandbelastning (MJ/m²) arean avser golvarean om inget annat anges
brandbelastningen avser variabla brandbelastningen om inget annat anges

Ursprungsregion	Typ av lokal	medelv.	Std.av.	källa	anmärkning	
svensk undersökning	bostäder					
	2 rum inkl kök	150	24,7	1-4	beräknad på hela omslutningsarean	
	3 rum inkl kök	139	20,1	1-4	beräknad på hela omslutningsarean	
	2 rum	780	128	2-4		
	3 rum	720	104	2-4		
	6 rum	500	180	5		
	5 rum	540	125	5		
	3 rum	670	133	5		
	2 rum	780	129	5		
	1 rum	720	104	5		
	lägenhet	330	9			
	Vardagsrum	350	104	10		
	familjerum (?)	250	58	10		
	sovrum	390	104	10		
	matsal	330	92	10		
	kök	290	71	10		
	Samtliga undersökta rum	320	88	10		
	Residens	750	12		Total brandbelastning	
	Bostad	780	234	15,16	Gumble I fördelning	
		Kontorslokaler				
		Tekniska	124	31,4	1-4	beräknad på hela omslutningsarean
		Ekonomi & admin	102	32,2	1-4	beräknad på hela omslutningsarean
		Samtliga undersökta kontor	114	39,4	1-4	beräknad på hela omslutningsarean
		styrelserum	272	126	3,4	
		Produktionslednings kontor	355	168	3,4	
		Offentliga rum	441	250	3,4	
		Kontor (allmänt)	417	210	3,4	
	Special rum	1172	798	3,4		

Bilaga 4

Tekniska rum	278	109 3,4
Kommunikationsrum	168	240 3,4
Samtliga undersökta kontor	411	334 3,4
styrelserum	270	125 5
Produktionslednings kontor	360	170 5
Offentliga rum	450	260 5
Kontor (allmänt)	380	46 5
Special rum	1330	890 5
Tekniska rum	330	67 5
Kommunikationsrum	170	220 5
Samtliga undersökta kontor	420	370 5
styrelserum	270	125 6
Produktionslednings kontor	350	170 6
Offentliga rum	440	250 6
Kontor (allmänt)	420	210 6
Specialrum	1170	790 6
Tekniska rum	280	108 6
Kommunikationsrum	170	240 6
Samtliga undersökta kontor	410	330 6
styrelserum	300	140 7
Kontor (allmänt)	380	180 7
Special rum	1000	390 7
konferenslokal	220	117 7
kontor (allmänt)	260	225 7
kommunikationsrum	80	83 7
samtliga undersökta kontor	330	400 7
Tekniska rum	580	9
administrativa kontor	750	9
Offentliga - allmänt	555	285 3,10
Offentliga - Cerical	415	425 3,10
Offentliga - Lobby	115	92 3,10
Offentliga - Konferensrum	270	515 3,10
Offentliga - Arkiv	1420	1025 3,10
Offentliga - Lager	950	1700 3,10

Bilaga 4

	Offentliga - samtliga undersökta	555	625 3,10	
	privata - allmänt	525	355 11	
	Privata - Cerial	465	315 11	
	Privata - Lobby	300	325 11	
	Privata - Konferens	370	380 11	
	Privata - Arkiv	1300	1110 11	
	Privata - Lager	1040	980 11	
	Privata - samtliga undersökta	580	535 11	
	kontor (Standard)	1670	11	Total brandbelastning
	kontor (Standard) exl arkiv	960	11	Total brandbelastning
	kontor (standard)	420	126 15,16	Gumble I fördelning
Indisk undersökning	Reception	537	349 19	Total brandbelastning
Office-Buildings	Lager och arkiv	601	372 19	Total brandbelastning
	Tekniska rum	434	302 19	Total brandbelastning
	Clerical	432	200 19	Total brandbelastning
	Allmänna	300	191 19	Total brandbelastning
	Korridor	153	140 19	Total brandbelastning
	Konferenslokal	189	39 19	Total brandbelastning
	Toalett och badrum (Lavatory)	146	143 19	Total brandbelastning
	Miscellaneous	278	270 19	Total brandbelastning
	Samtliga undersökta rum	348	262 19	Total brandbelastning
	Skolor			
svensk undersökning	Lågstadieskola	84,2	14,2 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
	Mellanstadieskola	96,7	20,5 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
	Högstadieskola	61,1	18,4 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
	Samtliga undersökta	80,4	23,4 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
	Lågstadieskola	295	50 3,4	qf = qt x 3,53
	Mellanstadieskola	340	71 3,4	qf = qt x 3,53
	Högstadieskola	215	67 3,4	qf = qt x 3,53
	Samtliga undersökta	285	83 3,4	qf = qt x 3,53
	Lågstadieskola	295	58 5	
	Mellanstadieskola	340	58 5	
	Högstadieskola	220	67 5	

Bilaga 4

	Samtliga undersökta klassrum	285	79 5	
	Cardboardroom	245	5	
	Collection room	235	5	
	Korridor	435	5	
	Korridor	63	5	
	medellvärde från undersökta rum	240	5	
	Samtliga undersökta	215	5	
	Samtliga undersökta	250	9	
	Samtliga undersökta klassrum	1420	12	Total brandbelastning
	klassrum	115	13	
	Lärarrum	375	13	
	Specialrum	190	13	
	Materialrum	705	13	
	föreläsningssal	80	13	
	Administration	450	13	
	förråds rum	440	13	
	Övriga rum	190	13	
	klassrum	285	85,5 15,16	Gumble I fördelning
	Sjukhus			
svensk undersökning	Sjukhus	116	36 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
svensk undersökning	Patientrum		3,4	
uropeisk undersökning	Sjukhus	230	3	
Schweizisk undersökning	Sjukhus	330	9	
Amerikansk undersökning	Patientrum	108	33 10	
Amerikansk undersökning	Sjukhus	250	12	Total brandbelastning
uropeisk undersökning	Sjukhus (rum)	230	69 15,16	Gumble I fördelning
	Hotell			
svensk undersökning	Hotell	67	19,3 1-4	beräknad på hela omslutningsarean
	Hotell	310	92 3,4	qf = qt x 4,7
	hotell sovrum		3,4	qf = qt x 4,7
uropeisk undersökning	sovrum	310	104 5	
Scweizisk undersökning	Hotell	330	9	

Hotell (rum)	310	93 15,16	Gumble I fördelning
Affär och varuhus			
Dagligvaror	420	5	med area anses endast
Mat	585	5	försäljningsarea = 20 - 25 %
Textilier	380	535 5	av den totala golvarean
parfym, leksaker, hushållsprodukt	420	560 5	
Möbler och mattor	585	960 5	
Mat	665	9	
Kläder	585	9	
Parfym	420	9	
Stationery	665	9	
Möbler	420	9	
Leksaker	500	9	
Mattor	835	9	
Department store	420	9	
Department store	935	12	Total brandbelastning
Varuhus	2270	12	Total brandbelastning
Shopping centrum	600	180 15,16	Gumble I fördelning
Klädbutik	390	175 17	Total brandbelastning, lognormal
Lager	1150	1131 18	Total brandbelastning, lognormal
Klädbutik	393	164 18	Total brandbelastning, lognormal
Industrier			
Lager för brännfarlig vara <150 kg	1780	1260 9,12,14	lognormal fördelning
Lager för brännfarlig vara >150 kg	15360	10600 9,12,14	lognormal fördelning
Tillverkning och lagring av brännk	1180	855 9,12,14	lognormal fördelning
Lagring av icke brännbart material	130	100 9,12,14	lognormal fördelning
Biltillverkning	145	105 9,12,14	lognormal fördelning
Metallförädling	140	120 9,12,14	lognormal fördelning
Trä- och plastförädling	305	175 9,12,14	lognormal fördelning
Metallindustri	240	170 9,12,14	lognormal fördelning
Tillverkning av elektroniska komponenter	235	115 9,12,14	lognormal fördelning
Motorpark	190	105 9,12,14	lognormal fördelning

	Keramik och glas industri	280	225	9,12,14	lognormal fördelning
	Bibliotek				
amerikansk	Offentliga - Bibliotek	2650	695	3,10	
	Privata - Bibliotek	1980	940	11	
	Skolbibliotek	1510		13	
europesk	Bibliotek	1500	450	15,16	Gumble I fördelning
	Teater och biograf				
europesk	Teater (biograf)	300	90	15,16	Gumble I fördelning
	Transport				
europesk	transport (offentlig plats)	100	30	15,16	Gumble I fördelning
	Restaurang				
Canadensik	Fast food	542	326	17	Total brandbelastning, lognormal
	Fast food	535	327	18	Total brandbelastning, lognormal
	Restaurang	275	196	17,18	Total brandbelastning, lognormal

källor i nummerordning

Ondrus, J., (1989) *Brandbelastning i lager- och industrilokaler*, Institutionen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund

Nilsson, L., (1970) *Brandbelastning/Bostadslägenheter/Fire loads in flats*, Statens institution för byggnadsforskning, Stockholm (National Swedish Building Research Summaries R 34: 1970)

Petterson, O., Magnusson, S. E., Thor, J., (1976), *Fire Engineering Design for Steel Structures, Publ 50*, Swedish Institute for Steel Construction, Stockholm

European recommendations for the Fire Safety of Steel Structures; Ch 2 (1981), Fire Exposure, *Fire safety of Steel Structures*, Technical Committee 3, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels

Bryl, S., (1975), *Brandbelastung in Hochbau*, Schweizerische Bauzeitung, 93. Jahrgang, heft 17

Bryl, S., (1974), *Brandbelastung im Stahlbau, Teil III. Brandbelastung in Bürogebäuden, ECCS-III-74-2-D*, European Convention for Constructional Steelwork, Rotterdam

Bonetti, M., Kree, P., & Kruppa J., (1975) *Estimation des Charges Mobilières d'Incendie dans les Immeubles à Usage de Bureaux*, Construction Métallique, No. 3, Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, Puteaux

Bilaga 4

- (2001), *Valoristaion projcet: Natural Fire Safety Concept*, CEC Agreement 7215-PA/PB/PC-042 & CEC Agreement 7215-PA/PB/PC-057, CEN/TC 250/SC1 N 300 A, Steel Structure F6,
- British Standards Institute, (2002), *Eurocode 1: Actions on structures - Part 1.2 General Actions - Actions on Structures Exposed to fire*, BS EN 1991-1-2
- Hadjisophocleous, G., Zalok, E., (2003) *A Survey of Fire Loads in Commercial Premises*, Department for Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa
- Hadjisophocleous, G., Zalok, E., (xxxx), *Development of Design Fires for Commercial Buildings*, Department for Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa
- Kumar, S., Rao, C.V.S.K, (1997), Fire Loads in Office Buildings, *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, No. 3, pp. 365-368