



# LUND UNIVERSITY

## **SAFE MULTIBYGG, Slutrapport Riskidentifiering, analys och åtgärdsmetodik för olycksförebyggande arbete för multifunktionella byggnader med avseende på specifika antagonistiska hot**

van Hees, Patrick; Nilsson, Martin; Frantzich, Håkan; Andersson, Berit; Lange, David; Strömgren, Michael; Sjöström, Johan

2014

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

van Hees, P., Nilsson, M., Frantzich, H., Andersson, B., Lange, D., Strömgren, M., & Sjöström, J. (2014). *SAFE MULTIBYGG, Slutrapport Riskidentifiering, analys och åtgärdsmetodik för olycksförebyggande arbete för multifunktionella byggnader med avseende på specifika antagonistiska hot*. (Department of Fire Safety Engineering and System Safety; Nr 3174). Lund University, Department of Fire Safety Engineering.

*Total number of authors:*  
7

### **General rights**

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

# **SAFE MULTIBYGG**

## **Slutrapport**

**Riskidentifiering, analys och  
åtgärdsmetodik för  
olycksförebyggande arbete för  
multifunktionella byggnader med  
avseende på specifika  
antagonistiska hot**

*Patrick van Hees*

*Martin Nilsson*

*Håkan Frantzich*

*Berit Andersson*

*David Lange*

*Michael Strömgren*

*Johan Sjöström*

---

Department of Fire Safety Engineering and System Safety  
Lund University, Sweden

Brandteknik och Riskhantering  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet

Rapport 3174, Lund 2014



## Slutrapport SAFE MULTIBYGG

Patrick van Hees  
Martin Nilsson  
Håkan Frantzich  
Berit Andersson  
David Lange  
Michael Strömgren  
Johan Sjöström

Lund 2014

SAFE MULTIBYGG, Slutrapport  
Riskidentifiering, analys och åtgärdsmetodik för olycksförebyggande arbete för multifunktionella byggnader med avseende på specifika antagonistiska hot

Patrick van Hees  
Martin Nilsson  
Håkan Frantzich  
Berit Andersson  
David Lange  
Michael Strömgren  
Johan Sjöström

**Report 3174**  
**ISSN: 1402-3504**  
**ISRN: LUTVDG/TVBB--3174--SE**

Number of pages: 73

**Keywords**

Fire, multifunctional buildings, antagonistic threats, fire development, emergency plan, routines, interview, rescue operation, design fire, fire scenarios

**Sökord**

Brand, multifunktionella byggnader, antagonistiska hot, brandförlopp, systematiskt brandskyddsarbete, rutiner, intervju, räddningsinsats, dimensionerande brand, brandscenarier

**Abstract**

Multifunctional buildings are characterized by multiple functions located within the same building. The report summarizes the project, SAFE MULTIBYGG, and provides references to additional reports and papers resulting from work performed within the project. The project presents a rationale structure for analyzing fire hazards in multifunctional buildings considering also antagonistic threats. Research work has also been performed in the areas of fire development, fire mitigation, evacuation and structural safety. In addition areas in need for further research are identified. The research project SAFE MULTIBYGG was supported by grants from MSB, Swedish Civil Contingencies Agency.

© Copyright: Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund 2014

---

Brandteknik  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
221 00 Lund  
brand@brand.lth.se  
<http://www.brand.lth.se>

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

Department of Fire Safety Engineering

Lund University  
P.O. Box 118  
SE-221 00 Lund, Sweden  
brand@brand.lth.se  
<http://www.brand.lth.se/english>

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

## Förord

Multifunktionella byggnader karaktäriseras av att flera olika funktioner (verksamheter) finns inom en och samma byggnad. Ofta är några av funktionerna att betrakta som samhällsviktiga. Brandskyddet i sådana byggnader är av största vikt med hänsyn till att ett stort antal personer kan befinna sig i byggnaden samtidigt som en brand skulle kunna orsaka förlust av samhällsviktiga funktioner. Vidare har det i samhället skett en ökning av antagonistiska attacker. I forskningsprojektet SAFE MULTIBYGG har ett helhetsgrepp tagits över den problematik som finns avseende brandskydd och antagonistiska hot i multifunktionella byggnader. Denna rapport utgör en sammanfattande slutrapport för forskningsprojektet och summerar resultaten av ingående arbetspaket. Projektet har finansierats av MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap. Projektet inleddes 2011 och avslutades i december 2013.

Till projektet har en referensgrupp varit knuten som gett värdefulla synpunkter under projektets gång. Följande personer har deltagit i referensgruppen:

Emma Nordwall, Helsingborgs brandförsvär  
Anders Lundberg, MSB  
Malin Pettersson, MSB  
Staffan Bengtson, Brandskyddslaget  
Anders Johansson, Boverket  
Thomas Järphag, NCC  
Margaret Simonson, SP  
Lars Boström, SP

Lund, 1 januari 2014.

Patrick van Hees  
Projektledare

# Innehåll

<b>FÖRORD</b> .....	<b>5</b>
<b>INNEHÅLL</b> .....	<b>6</b>
<b>1 INLEDNING</b> .....	<b>9</b>
1.1 BAKGRUND.....	9
1.2 SYFTE OCH MÅL .....	9
1.3 PROJEKTETS UPPLÄGG .....	9
1.4 PUBLIKATIONER INOM PROJEKTET.....	10
1.5 AVGRÄNSNINGAR .....	12
<b>2 LITTERATURSTUDIE OCH FÖRSTA FÖRSLAG TILL METOD</b> .....	<b>13</b>
<b>3 SEMISTRUKTURERADE INTERVJUER OCH FÄLTBESÖK</b> .....	<b>14</b>
3.1 SAMMANFATTNING AV RESULTATET FRÅN INTERVJUERNA SAMT KOPPLING TILL DEN FÖRESLAGNA METODEN BESKRIVEN I KAPITEL 2.....	14
3.2 SAMMANFATTNING AV RISKER SOM BÖR BEAKTAS .....	15
3.2.1 <i>Identifierade risker till följd av intervjuer</i> .....	15
3.2.2 <i>Identifierade risker enligt Nilsson et al (2012)</i> .....	16
3.3 SLUTSATSER FRÅN INTERVJUERNA.....	17
3.3.1 <i>Slutsatser avseende räddningstjänstens insatsmöjligheter</i> .....	17
3.3.2 <i>Slutsatser avseende ansvar, rutiner och handlingsplaner</i> .....	18
<b>4 METOD FÖR ANALYS AV BRANDSÄKERHET I MULTIFUNKTIONELLA BYGGNADER</b> .....	<b>21</b>
4.1 IDENTIFIERADE PROBLEMMOMRÅDEN I MULTIFUNKTIONELLA BYGGNADER.....	21
4.2 SAMMANFATTNING AV METODEN FÖR ANALYS AV BRANDSÄKERHET I MULTIFUNKTIONELLA BYGGNADER .....	22
<b>5 FORSKNINGSFRÅGOR SOM STÖD FÖR ANVÄNDANDE AV METODEN SAMT EN DEL SLUTSATSER FRÅN INTERVJUER</b> .....	<b>24</b>
5.1 POTENTIELLA FORSKNINGSFRÅGOR.....	24
5.2 VAL AV FORSKNINGSFRÅGOR .....	25
5.2.1 <i>Kritiska komponenter för brandskyddet och samhällsviktiga funktioner – Underlag till bedömning av skydds nivåer</i> .....	25
5.2.2 <i>Scenarier och brandtekniska skyddssystem – Underlag till bedömning av skydds nivåer</i> 26	
5.2.3 <i>Skydds nivåer</i> .....	28
5.2.4 <i>Utrymning</i> .....	28
5.3 SAMMANFATTNING AV VALDA FORSKNINGSFRÅGOR OCH TYP AV AKTIVITET INOM RESPEKTIVE§.....	31
<b>6 HUR KAN VI PÅ BÄSTA SÄTT SKYDDA ELEKTRISK UTRUSTNING</b> .....	<b>33</b>
6.1 BRANDSKYDD GENOM REDUCERAD SYREHALT FÖR ELEKTRISK UTRUSTNING OCH KONTROLLRUM (HYPOXIC AIR) .....	33
6.1.1 <i>Systemuppgygnad och funktion</i> .....	33
6.1.2 <i>Överväganden vid val av syrgashalt</i> .....	33
6.1.3 <i>Sammanfattning av litteraturstudien (samtlig information nedan kommer från (Nilsson &amp; van Hees 2013))</i> .....	35
6.1.4 <i>Kort utvärdering av testmetoderna i PAS 95:2011 och VdS 3527en</i> .....	36
6.1.5 <i>Slutsats</i> .....	40
6.2 STANDARDER FÖR BRANDSKYDD AV ELEKTRISK UTRUSTNING.....	40
<b>7 HUR PÅVERKAS BRANDENS UTVECKLING AV TÄNDKÄLLANS STORLEK?</b> .....	<b>41</b>
7.1 KVANTIFIERING AV BRANDTILLVÄXTHASTIGHETER OCH EFFEKTEN AV ANLAGD BRAND.....	41
7.2 BRÄNNBAR VÄTSKAS EFFEKT PÅ BRANDTILLVÄXTHASTIGHETEN .....	43

<b>8 ÖVRIGA BRANDSPRIDNINGSRELATERADE FORSKNINGSFRÅGOR.....</b>	<b>43</b>
8.1 FUNKTIONSBETEENDE HOS ELEKTRISK UTRUSTNING .....	43
8.2 HUR TÄTA ÄR EGENTLIGEN BRANDCELLSGRÄNSER? .....	44
8.3 BRAND- OCH BRANDGASSPRIDNING MELLAN OSKYDDADE OCH SKYDDADE UTRYMMEN .....	44
8.4 HUR PÅVERKAR TEKNISKA BYTEN BRANDSPRIDNING VID STÖRRE BRANDKÄLLOR.....	45
8.5 DOMINOEFFEKTER.....	45
<b>9 UTRYMNING.....</b>	<b>46</b>
9.1 HUR PÅVERKAS UTRYMNINGSFÖRLOPPET OM UTRYMNINGSLARMET AVBRYTS UNDER UTRYMNINGSFÖRLOPPET? .....	47
9.1.1 Genomförande och förutsättningar.....	47
9.1.2 Resultat.....	47
9.2 HUR AGERAR PERSONER SOM UTSÄTTS FÖR ÖKANDE HOT UNDER UTRYMNINGSFÖRLOPPET?.....	48
9.2.1 Genomförande och förutsättningar.....	49
9.2.2 Resultat.....	50
9.3 HUR KAN BYGGNADENS UTRYMNINGSSYSTEM ANPASSAS EFTER DET UPPKOMNA HOTET OCH I VILKEN GRAD ANPASSAR SIG PERSONERNA EFTER DETTA?.....	51
9.3.1 Genomförande och förutsättningar.....	51
9.3.2 Resultat.....	53
9.4 SLUTSATS .....	54
<b>10 BÄRANDE KONSTRUKTIONER .....</b>	<b>55</b>
10.1 HUR SÅRBARA ÄR MULTIFUNKTIONELLA BYGGNADER NÄR DET GÄLLER EXPLOSION?.....	55
10.2 HUR VIKTIGA ÄR MATERIALEGENSKAPERNA HOS BETONG NÄR MAN UTVÄRDERAR BRANDMOTSTÅNDET HOS BETONGELEMENT?.....	57
10.3 VILKA FAKTORER BÖR BEAKTAS NÄR HÅLDÄCK DIMENSIONERAS FÖR BRAND?.....	58
10.4 HUR SIGNIFIKANT KAN DEN ICKE-HOMOGENA TEMPERATUR-FÖRDELNINGEN BLI VID LOKAL BRAND OCH HUR KAN DET UTVÄRDERAS?.....	60
10.5 VILKEN PÅVERKAN PÅ EKONOMISK RISKNIVÅ HAR EN MINSKNING AV PASSIVT SKYDD PÅ BALKAR OCH PELARE AV STÅL?.....	63
<b>11 APPLICERING AV METODEN FÖR ANALYS AV BRANDSÄKERHET I MULTIFUNKTIONELLA BYGGNADER .....</b>	<b>65</b>
<b>12 SLUTSATSER.....</b>	<b>66</b>
<b>13 REFERENSER.....</b>	<b>67</b>



# 1 Inledning

Denna rapport utgör slutrapporten i forskningsprojektet ”SAFE MULTIBYGG – Riskidentifiering, analys och åtgärdsmetodik för olycksförebyggande arbete för multifunktionella byggnader med avseende på specifika antagonistiska hot” som påbörjades 2011. I projektet har ett antal andra publikationer producerats och denna slutrapport sammanfattar dessa samt beskriver forskningsläget för ett antal områden. I detta inledande kapitel beskrivs bakgrunden till arbetet, syfte och mål samt avgränsningar med projektet. Vidare beskrivs projektets upplägg och en översikt av relaterade publikationer till de olika arbetspaketen.

## 1.1 Bakgrund

Multifunktionella byggnader har blivit vanligare på senare tid och innehåller ofta samhällsviktiga funktioner (Nilsson 2013). Till skillnad från traditionella byggnader innehåller de flera olika funktioner och verksamheter inom samma byggnad, exempelvis tunnelbana, affärer, kontor, hotell etc. Samtidigt är dessa byggnader i högre grad exponerade för antagonistiska hot såsom anlagd brand eller terroristattacker (Nilsson et al. 2013). En olycka som t ex en stor brand eller explosion i en sådan anläggning kan få stora konsekvenser i form av mänskligt lidande, dödsfall, stora egendoms- och samhällskostnader samt bortfall av viktiga funktioner i samhället.

Det ökande antalet multifunktionella byggnader där flera funktioner samlas på en liten yta tillsammans med det ökade antagonistiska hotet skapar nya problemområden som inte tidigare analyserats och som inte beaktas i dagens byggregler (Nilsson 2013). Dessa problem måste analyseras samtidigt som potentialen för stora konsekvenser vägs in och ett helhetsperspektiv på säkerheten i dessa byggnader behöver tas.

För en utförligare bakgrundsbeskrivning av multifunktionella byggnader och dess koppling till antagonistiska hot hänvisas till Nilsson (2013) och Nilsson et al. (2013).

## 1.2 Syfte och mål

Syftet med projektet är att stödja den olycksförebyggande verksamheten inom kategorin multifunktionella byggnader för att tillgodose medborgarens behov av en säker och trygg miljö.

Målet med projektet är att utveckla en metodik som identifierar risker och analyserar dem. Den föreslagna metodiken är nödvändig på grund av byggnadernas och verksamheternas komplexitet samt brist på tydliga riktlinjer vid projektering samt kontroll och konstruktion av sådana byggnader. Metodiken, en form av förebyggande verksamhet, ska fokusera på konsekvenserna av antagonistiska hot eller stora olyckor som bränder eller explosioner. Vidare ska projektet identifiera kunskapsluckor där vidare forskning är nödvändig för att metoden ska kunna användas. Viss sådan forskning genomförs inom projektets ram främst inom områdena brandutveckling, brandbegränsande åtgärder, utrymning samt skydd av bärande konstruktioner.

## 1.3 Projektets upplägg

Projektet inleddes med en litteraturstudie för att identifiera specifika problemområden i multifunktionella byggnader. Baserat på denna litteraturstudie utvecklades ett första förslag till metod för att utveckla brandrelaterade scenarier för multifunktionella byggnader. Genom att semistrukturerade intervjuer och fältbesök erhöles ytterligare information avseende problemområden i multifunktionella byggnader med avseende på antagonism och multifunktionalitet. Med denna information var det möjligt att förfina det första förslaget till metod och den slutgiltiga metoden för

analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader togs fram. I nästa steg identifierades forskningsfrågor som om de besvaras stödjer användning av den utvecklade metoden. En del av forskningsfrågorna valdes för vidare utredning inom ramen för projektet. Slutligen applicerades den utvecklade metoden på en multifunktionell byggnad för att identifiera styrkor och svagheter med metoden.

Projektet har varit uppdelat i sju arbetspaket (AP):

AP 1 innefattar litteraturstudier och riskidentifiering. Resultatet av detta arbetspaket var ett förslag till metod för att utveckla relevanta brandrelaterade scenarier för multifunktionella byggnader som tar hänsyn till såväl multifunktionalitet som antagonistiska hot. En sammanfattning av litteraturstudien och förslag till metoden ges i kapitel 2.

AP 2 innefattar semistrukturerade intervjuer och fältbesök. En sammanfattning av dessa ges i kapitel 3.

AP 3 innefattar val av scenarier för utveckling av metodiken. Det konstaterades i ett ganska tidigt skede av projektet att det inte är möjligt att ge referensscenarier för multifunktionella byggnader då byggnaderna i sig är väldigt unika. Istället etablerades en metod för hur projektörer eller utvärderare kan utveckla brandrelaterade scenarier. En sammanfattning av metoden ges i kapitel 4.

AP 4 innefattar forskning som stöd för metoden. I kapitel 5 identifieras möjliga forskningsfrågor och motivering och val av forskningsfrågor att arbeta vidare med görs. Rapportens kapitel 6-10 sammanfattar dessa forskningsuppgifter.

AP 5 innefattar applikation av metoden för att identifiera styrkor och svagheter med metoden. Denna del sammanfattas i kapitel 11.

AP 6 innefattar informationsspridning vilken har skett genom publikationer i vetenskapliga tidskrifter, populärvetenskap, licentiatseminarium, deltagande och presentation vid konferenser etc. Informationsspridning sker också enligt MSBs krav för forskningsprojekt.

AP 7 innehåller rapportering vilket sker genom denna rapport samt övriga publikationer. En sammanfattning av publikationer inom ramen för projektet återfinns i avsnitt 1.4.

Sammanfattningsvis har följande metoder använts:

- Litteraturstudier
- Fallstudier av aktuella byggnader
- Semistrukturerade intervjuer
- Beräkning med modeller
- Experiment för utrymning

#### **1.4 Publikationer inom projektet**

Som del av projektet och utöver denna rapport har följande artiklar och rapporter publicerats, se Tabell 1. Koppling till de olika arbetspaketen ges nedan. Några artiklar är fortfarande endast inskickade och ännu inte publicerade.

Tabell 1 Publikationer och rapporter inom projektet (informationsspridning)

Publikation	Koppling till arbetspaket
Andrée, K., Frantzich, H. & Nilsson, D (2014). <i>Utrymning och eskalerande hot, en experimentell undersökning i VR-miljö</i> . Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.	AP 4 utrymning
Lange, D., 2013, <i>A review of blast loading and explosions in the context of multifunctional buildings</i> , SP Arbetsrapport 2013:11	AP 4 Bärförmåga
Lange, D., Albrektsson, J., Jansson, R., 2014, <i>Application of an explicit transient strain concrete model to hollow core slabs in fire</i> , submitted to Fire Technology December	AP 4 Bärförmåga
Lange, D., Devaney, S., Usmani, A., 2014, <i>An Application of the PEER PBEE Framework to Structures in Fire</i> , submitted to Engineering Structures	AP 4 Bärförmåga
Lange, D., Jansson, R., 2014a, <i>A comparison of an explicit and an implicit transient strain formulation for concrete in fire</i> , submitted to Fire Technology	AP 4 Bärförmåga
Lange, D., Jansson, R., 2014b, <i>A comparison of an explicit and an implicit transient strain formulation for concrete in fire</i> , IAFSS 2014, Christchurch	AP 4 Bärförmåga
Lange, D., Sjöström, J., 2014, <i>Mechanical response of a partially restrained column exposed to localised fires</i> , Submitted to fire safety journal	AP 4 Bärförmåga
Nilsson, M. (2013). <i>Fire safety evaluation of multifunctional buildings - Special emphasis on antagonistic attacks and protection of sensitive areas</i> . Licentiate Thesis, Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.	AP 1-3 AP 4 Brandutveckling
Nilsson, M. & van Hees, P. (2012). <i>Delrapport SAFE MULTIBYGG AP 1-4</i> (Report no 3165). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.	AP 1-3 och AP 4 räddningstjänster
Nilsson, M., & van Hees, P. (2013). Advantages and Challenges with Using Hypoxic Air Venting as Fire Protection. <i>Fire and Materials</i> . doi: 10.1002/fam.2197. (published on-line).	AP 4 Brandutveckling
Nilsson, M., Frantzich, H., & van Hees, P. (2013). Selection and Evaluation of Fire Related Scenarios in Multifunctional Buildings Considering Antagonistic Attacks. <i>Fire Science Reviews</i> , 2(3), pp. 1-20. doi: 10.1186/2193-0414-2-3.	AP 4 Brandutveckling
Nilsson, M., Johansson, N., & van Hees, P. (2014). A New Method for Quantifying Fire Growth Rates Using Statistical and Empirical Data – Applied to Determine the Effect of Arson. Accepted for publication in: <i>Proceedings of the 11th International Symposium on Fire Safety Science</i> .	AP 3
Nilsson, M., van Hees, P., Frantzich, H., & Andersson, B. (2012). Analysis of Fire Scenarios in Order to Ascertain an Acceptable Safety Level in Multi-Functional Buildings. In <i>Proceedings of the 9th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods</i> , Hong Kong, China, 20-22 June 2012, Society of Fire Protection Engineers, USA.	AP 3
Pettersson, C. (2014). <i>Brandteknisk analys av multifunktionella byggnader - Fokus på antagonistiska hot och dominoeffekter</i> (Rapport 5449). Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.	AP 5
Sjöström, J.; Byström, A.; Lange, D. and Wickström, U.; 2012, <i>Thermal exposure to a steel column exposed to localized fires</i> ; SP Report 2012: 43	AP 4 Bärförmåga
van Hees, P., Frantzich, H., & Nilsson, M. (2012). <i>Kartläggning och kvalitativ analys av möjligheter och risker med reducerad syrehalt i brandceller innehållande elektrisk utrustning</i> (Rapport 3162). Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.	AP 4 Brandutveckling

## **1.5 Avgränsningar**

Avseende antagonistiska hot avgränsas projektet till att enbart innefatta brandrelaterade antagonistiska hot såsom anlagd brand, explosion som följs av brand etc. Exempel på antagonistiska hot som inte analyseras är vapenhot, spridning av toxiska gaser, datarelaterade attacker (virus) etc.

Projektet avgränsas till att studera aspekter såsom brandgasspridning, explosioner, byggnadens brandmotståndsförmåga, utrymning vid olyckor samt möjlighet till räddningsinsats. Vissa områden har enbart behandlats i inledande platsbesök och intervjuer detta gäller t ex explosioner och möjlighet till räddningsinsats.

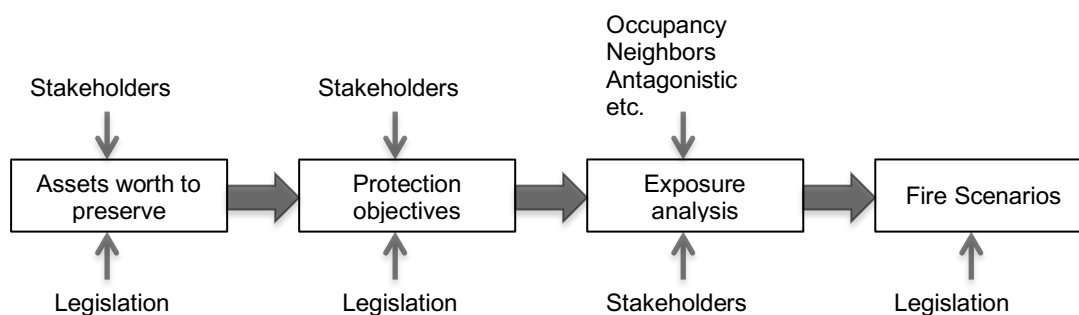
## 2 Litteraturstudie och första förslag till metod

Den inledande litteraturstudien identifierade ett antal viktiga aspekter för multifunktionella byggnader där de viktigaste sammanfattas i punktlistan nedan. Utifrån dessa punkter utvecklades ett första förslag till en metod för att ta fram relevanta brandrelaterade scenarier i multifunktionella byggnader som översiktligt beskrivs nedan. En fullständig beskrivning av det första förslaget till metod samt resultat av litteraturstudien finns i Nilsson et al. (2012).

Viktiga aspekter att ta hänsyn till i multifunktionella byggnader (Nilsson et al. 2012):

- Stor variation i skyddsmål och dess behöver dessutom fokusera mer på skydd av funktioner.
- Det finns ett större antagonistiskt hot mot multifunktionella byggnader jämfört med vanliga byggnader.
- Antagonistiska scenarier har potential att vara allvarligare än vanliga brandscenarier.
- Multifunktionella byggnader kan vara komplexa till sin utformning och personer i byggnaden är inte väl förtrogna med lokalernas utformning såsom utrymningsvägar.
- Traditionellt fokus i byggreglerna är personsäkerhet med avseende på olycksbränder men i multifunktionella byggnader kan det finnas behov av skydd av funktioner och ta hänsyn till antagonistiska hot.
- Skyddssystemen är ofta komplexa och består av flertalet brandskyddssystem vilket ökar sannolikheten för felfunktion.
- Anlagd brand är ett vanligt antagonistiskt hot.
- Brandens placering i förhållande till det som kräver skydd är extra viktigt.

Förslaget till metod bygger på att identifiera tillgångar/resurser (assets) som behöver skyddas, skyddsmål, exponeringar och slutligen brandscenarier, stegen sammanfattas i figuren nedan.



Figur 1 Övergripande process för utveckling av brandscenarier (från Nilsson et al. 2012).

De övergripande slutsatserna från litteraturstudien och förslaget till metod är (Nilsson et al. 2012):

- Det behövs en strukturerad metod för utveckling av brandscenarier i multifunktionella byggnader som tar hänsyn till skydd av funktioner och antagonistiska hot.
- Multifunktionella byggnader har fler tillgångar/resurser som behöver skyddas vilket medför fler skyddsmål och nya exponeringar. Detta i sin tur medför att brandscenarier som vanligtvis inte analyseras behöver tas hänsyn till.
- Antagonistiska hot kan inte ignoreras och generellt sett så resulterar de i allvarligare bränder än normalt.
- Antagonistiska händelser har en större sannolikhet att medföra dominoeffekter och felfunktion av såväl aktiva som passiva brandskyddssystem

### 3 Semistrukturerade intervjuer och fältbesök

Huvudsyftet med de semistrukturerade intervjuerna och fältbesöken var att ge input till de olika stegen i förslaget till metoden presenterad i kapitel 2 och i Nilsson et al. (2012) som underlag för att förfinas förslaget till metod. En fullständig beskrivning av hur intervjuerna genomfördes och resultatet av dem återfinns i Nilsson & van Hees (2012). I Nilsson et al. (2013) och Nilsson (2013) återfinns också en översiktlig beskrivning av intervjuerna. I avsnitt 3.1 ges en kort sammanfattning av resultaten.

#### 3.1 Sammanfattning av resultatet från intervjuerna samt koppling till den föreslagna metoden beskriven i kapitel 2

Samtlig information nedan är hämtad från Nilsson & van Hees (2012).

Intervjudeltagarna anser att det viktigaste att skydda i händelse av brand eller antagonistisk attack alltid är människor och personsäkerheten har därför högsta prioritet, därefter är det de samhällsviktiga funktionerna. De samhällsviktiga funktionerna är mycket beroende av supportsystem såsom el och telekommunikation och det verkar därmed lämpligt att fokusera på detta som ett led i metoden presenterad i Nilsson et al (2012), även övriga skyddsvärda objekt täcks bra in i den föreslagna metoden. Utifrån intervjuerna kan det konstateras att viktiga utrymmen att analysera är där det finns mycket folk, el och tele- utrymmen, vad som kan orsaka förlust av lagstadgade system och driftledningscentraler. Även utrymmen som krävs för att hantera en pågående olycka kom upp.

Det förefaller finnas en problematik i att en verksamhet eller fastighetsägare inte är medveten om vad grannen har för rutiner och planer i händelse av olycka. Likaså verkar ansvarsfördelningen vara otydlig. Det föreligger troligtvis ett behov av styrning från fastighetsägarens sida i dessa frågor och att verksamheterna i viss mån ställer krav på vad som bör innefattas. Ytterligare problem anges som olika ambitionsnivå med skyddet, underhåll som riskerar falla mellan stolarna, begränsade rutiner för att fånga upp förändringar, speciellt vid byte av fastighetsägare. Metoden föreslagen i Nilsson et al (2012) bör troligtvis kompletteras med utvärdering av systematiskt brandskyddsarbete och rutiner i händelse av brand eller annan olycka. Det blev också klart att de olika verksamheterna har en uppfattning om möjlig make-up, men det är inte formaliserat och analyserat varför tillförlitligheten är tveksam och exempel tyder på tveksam funktion av make-up i händelse av längre avbrott.

Det förefaller vara så att fastighetsägaren inte har full insyn i hur brandskyddet i byggnaden är tänkt att fungera, en springande punkt är larmlagringsfunktion. Vidare finns det indikationer på att tekniska system inte underhålls tillräckligt i denna typ av byggnader. Det finns också inträffade händelser där det passiva brandskyddet inte fungerat såsom det är tänkt där rök spreds i stora mängder förbi brandcellsgränser. Detta styrker tesen att analysera scenariot 'worst credible consequence' som föreslaget i Nilsson et al (2012) med avseende på tekniska system, eventuellt kan metoden behöva kompletteras med scenario där brandcellsgränser läcker.

Det kan konstateras att de skyddsåtgärder som finns inom verksamheterna idag är vaga och av formen ingen ska skadas, inget avbrott får inträffa etc. Vid analys av en multifunktionell byggnad med samhällsviktiga funktioner krävs att sådana mål tydliggörs och specificeras.

De svaga punkterna i byggnaden associeras med utrymmen där det är mycket folk och där det finns brandfarlig vara eller mycket brännbart material samt där det finns fordon och där brandintensiteten kan bli stor. Vidare fokuseras på kritiska utrymmen och utrymmen där personer enkelt har tillgång. Dessa delar förefaller täckas väl in i metoden presenterad av Nilsson et al (2012). Som svaghet identifierades också funktioner som krävs för att hantera en olycka och bristfälliga brandcellsgränser, metoden bör eventuellt kompletteras med dessa aspekter.

I den aktuella byggnaden har en del bränder/tillbud inträffat, t ex fordonsbrand, mindre småbränder och en väska med antenner som troddes vara en bomb. Brandcellsgränser fungerade inte som tänkt med stor rökspridning som följd i ett fall och en viktig funktionskabel skadades och orsakade funktionsavbrott. Det sistnämnda stärker tillvägagångssättet att fokusera på supportsystem.

De främsta åtgärderna som har vidtagits för att skydda sig mot den här typen av oönskade händelser förefaller vara handlingsplaner, rutiner, utbildning samt begränsa tillgång till utrymmen och övervakning. Övervakning och begränsad tillgång till utrymmen täcks bra in i metoden av Nilsson et al (2012) dock bör den kompletteras med utvärdering av rutiner och handlingsplaner. Ett problemområde som dök upp var att angränsande utrymmen inte alltid är skyddade och att t ex sprinkler inte kommer åt inne i ett fordon.

Avseende räddningstjänstens insats anser räddningstjänsten att man i många fall har orealistiska förväntningar på vad de klarar av. Som exempel nämns tekniska system som är en förutsättning för brandsäkerheten som ska styras av räddningstjänsten under en pågående olycka. Vidare poängterar man att det i flera fall är så att angreppsvägar sammanfaller med utrymningsvägar samt att man vid insats öppnar upp brandcellsgränser och därmed ökar potentialen för rökspridning. Detta ses som en följd av utformningen av angreppsvägarna. Vidare poängterar de vikten av en tydlig insatsplan och att brandtillväxthastigheten och hur stor branden är vid ankomst styr hur mycket de kan göra, förekommer stora mängder brännbara vätskor såg de möjligheterna som små. Metoden bör kompletteras med dessa aspekter.

Då det gäller exponering från andra verksamheter så erkänns exponeringen, dock är där ingen som gjort en bedömning av hur en brand i angränsande verksamhet påverkar den egna verksamheten.

Avseende antagonistiska hot så finns det en större medvetenhet hos de verksamheter där regelverk berör dessa aspekter. De flesta associerar antagonistiska hot med bomber och större händelser men även anlagda bränder erkänns. Konsekvensen beror på vad förövaren vill uppnå och hur väl informerad denna är, detta täcks väl in i metoden av Nilsson et al (2012). Ett intressant scenario kom också upp vid diskussion avseende antagonistiska hot och det var potentialen att ett fordon där ett hot finns kör in till byggnaden för att evakuera fordonet, detta gäller även vanliga bränder.

## **3.2 Sammanfattning av risker som bör beaktas**

I rapporten av Nilsson & van Hees (2012) ges en sammanfattning av relevanta risker som bör beaktas, dessa återges nedan.

### **3.2.1 Identifierade risker till följd av intervjuer**

Följande risker har identifierats under intervjuerna och är faktorer som bör beaktas vid analys av de specifika scenarierna.

1. För funktionerna som sådana finns ofta kritiska supportsystem såsom el- och telekommunikation eller driftledningscentraler. Dessa supportsystem i sig har ofta en infrastruktur i form av kablar osv. Det är av stor vikt att analysera hur komponenterna i ett sådant system påverkas vid en brand eller annan olycka såsom exponering av brandgaser och värme.
2. Det kan förekomma utrymmen som är kritiska i avseendet att hantera en pågående händelse såsom driftledningscentraler och kommunikationscentraler. Dessa behöver identifieras och skada på dessa bör beaktas för varje enskilt scenario.
3. I multifunktionella byggnader tenderar det att finnas speciell utrustning som har långa ersättningstider hur dessa påverkas av en olycka bör beaktas.
4. Samspelet mellan 'safety' och 'security' måste analyseras. En del utrymmen är undagömda och lättillgängliga. I ett sådant utrymme kan en attackerare "jobba" ostört och förbereda sig väl. Vidare kan det finnas möjligheter att, beroende på infrastrukturen, föra in

- stora mängder farligt material såsom brännbara vätskor eller explosiva ämnen. Sådana utrymmen måste identifieras, exempel kan vara öppningar till tunnlar.
5. Hur räddningstjänsten kan tänkas angripa en brand eller annan olycka i ett utrymme måste beaktas med avseende på huruvida de öppnar t ex brandcellsgränser då detta kan bidra till omfattande rökspridning. Deras angreppsvägar i förhållande till utrymningsvägar är också en faktor som kan störa personflödet beroende på hur lång utrymningstiden är.
  6. I händelse av en antagonistisk attack kan en stor faktor i avgörandet av placering av attacken vara syftet med attacken. Beroende på vad attackeraren vill åstadkomma kan attacken placeras på olika ställen. Om attackeraren vill skada mycket människor är kanske en vänthall ett lämpligt mål, men vill man slå ut samhällsfunktionen är kanske en driftledningscentral eller el-rum ett mer lämpligt mål. Attackerarens syfte, mål och kapacitet måste analyseras.
  7. Av intervjuerna har det framkommit att det finns tveksamheter kring rutiner och handlingsplaner i händelse av brand eller annan olycka eller hot, speciellt hos de mindre verksamheterna. En risk är då att en antagonistisk attack eller brand uppstår inom denna mindre verksamhet och att åtgärder inte vidtas i den omfattning som är önskvärt. Vidare är det i denna typ av verksamhet inte ovanligt att uppmärksamheten är låg mot hot och risker.
  8. Brandcellsgränser ger oftast ett bra skydd mot brandspridning dock har det visat sig att de är relativt otäta mot rök, detta är en riskfaktor för känsliga komponenter men även vid utrymning och bör tas hänsyn till i scenarierna.
  9. Speciellt i infrastrukturanläggningar befinner sig transportfordon ofta inne i byggnaden. Multifunktionella byggnader i sig är ofta skyddade med släcksystem såsom sprinkler. Ett sådant system har begränsade möjligheter att angripa brandens bas och effekten av systemet kan då bli begränsad. En riskfaktor som bör beaktas är alltså ”dolda utrymmen” där släcksystemet har begränsade möjligheter att släcka en brand.
  10. Räddningstjänsten har bara möjlighet att hantera en viss storlek av brand eller händelse. Potentialen för att händelsen växer större än vad de klarar av att hantera måste beaktas.
  11. Antagonistiska hot kan innebära att en byggnad, som normalt utryms sektionsvis, kan behöva utrymmas fullständigt. Detta kan innebära långa utrymningstider samtidigt som tidskriterierna är odefinierade för en säker utrymning.
  12. Underhåll av brandtekniska system verkar ha en tendens att falla mellan stolar i denna typ av byggnader då ansvarsfördelningen i vissa avseenden kan vara komplicerad. Detta medför att tillförlitligheten och tillgängligheten hos de brandtekniska systemen, såväl aktiva som passiva måste beaktas.
  13. Vid utrymning passeras ofta brandcellsgränser, detta innebär att brandcellsgränser kan vara öppna i det tidiga skedet av brandförloppet. I scenarierna bör möjligheten att en brandcellsgräns är öppen under delar av brandförloppet beaktas.
  14. I dessa komplexa byggnader förekommer många dolda utrymmen och vägar för röken att transporteras. Detta bidrar till en ökad risk för brandgasspridning som kan vara svår att förutse. Med anledning av detta behöver ventilationssystemets kanaler, dolda utrymmen, genomföringar i brandcellsgränser m m identifieras för att kunna avgöra det scenario som är värst ur brandgasspridningssynpunkt.

### **3.2.2 Identifierade risker enligt Nilsson et al (2012)**

Nedan sammanfattas risker för multifunktionella byggnader som tidigare identifierats i Nilsson et al (2012). I de fall riskerna identifierats i intervjuerna upprepas de inte i detta avsnitt.

15. Antagonistiska attacker såsom anlagda bränder och explosioner kan bidra till snabbare och större brandförlopp. Beroende på den ”förväntade” attacken/scenariot måste detta vägas in i nedan föreslagna scenarier.
16. För att en verksamhet ska fungera krävs ofta ett antal supportsystem såsom el, tele och data. Dessa kan skadas vid exponering från relativt små bränder eller olyckor som normalt sett inte analyseras vid dimensionering.
17. Byggnaderna är ofta stora och komplexa och de vägval som behöver göras vid utrymning kan resultera i att personer tvingas förflytta sig i en del av byggnaden som de inte har

- kännedom om. Detta kan bidra till osäkerheter i det mänskliga beteendet samt en långsammare utrymning. Vidare är dessa byggnader ofta förknippade med hög persontäthet i vissa delar vilket också kan bidra till långa utrymningstider och potential för att många människor skadas.
18. Då den här typen av byggnader ofta innehåller samhällsviktiga funktioner kan påverkan på samhället bli stor i händelse av brand eller annan olycka i byggnaden. Vidare kan det finnas beroenden som medför att konsekvenser uppstår i andra områden än inom den specifika byggnaden. Detta bör beaktas när scenariernas allvarlighetsgrad analyseras.
  19. För att hantera en brand eller olycka i den här typen av byggnader installeras ofta en kombination av tekniska system som ska fungera tillsammans. Detta ökar sannolikheten för felfunktion och bortfall av olika tekniska system måste beaktas.
  20. Det kan finnas anordningar som krävs av regelverket för att verksamheten ska kunna bedrivas, detta kan vara en viss typ av övervakningssystem eller miljöaspekter. Förlust av sådana system skulle kunna innebära avbrott i verksamheten.
  21. Beroende på hur väl planerad en antagonistisk attack är eller den inledande händelsen kan förlust av skyddssystem inträffa. Detta kan ta sin form genom att attackeraren kopplar bort skyddssystem såsom sprinkler eller utrymningslarm. Andra faktorer kan vara att bränder startas på flera olika ställen s k multipla bränder, att lagringskonfigurationen eller t ex brännbar vätska medför att släcksystemet är ineffektivt eller att utrymningsvägar blockeras.
  22. En inträffad antagonistisk attack kan innebära långvariga effekter i samhället. I det fall en attack sker i t ex en tågtunnel kan det långt efter en sådan attack finnas en aversion mot att åka tåg, detta bör beaktas i den skydds nivå man vill uppnå.
  23. Det kan finnas scenarier där flera händelser sker som en följd av varandra. Det mest tydliga exemplet är en inledande händelse i form av explosion som efterföljs av en brand. Dock kan det finnas andra liknande händelser såsom att en attackerare först blockerar en utrymningsväg och därefter slänger en brandbomb i anslutning till den andra utrymningsvägen.
  24. En vanlig anlagd brand är brand utomhus mot en byggnad. Denna brand utgör oftast inte hot mot personsäkerheten och utelämnas därför ofta vid dimensionering. Denna typ av brand kan därför få stora konsekvenser i form av avbrott i verksamheten.

### **3.3 Slutsatser från intervjuerna**

En del slutsatser kan dras från informationen som erhållits vid intervjuerna, dels avseende räddningstjänstens insatsmöjligheter men också avseende ansvar, rutiner och handlingsplaner i multifunktionella byggnader. Det ska i detta sammanhang poängteras att de slutsatser som dras utifrån intervjuerna är baserade på intervjuer genomförda för en specifik byggnad. Slutsatserna avseende problematiken i den här typen av byggnad kan därför inte ses som generella för samtliga multifunktionella byggnader, dock kan de identifierade behoven ses som mer allmänna. Ytterligare information återfinns i Nilsson & van Hees (2012).

#### **3.3.1 Slutsatser avseende räddningstjänstens insatsmöjligheter**

1. Ett av räddningstjänstens viktigaste verktyg vid insats är insatsplanen. På denna finns möjlighet att indikera skyddsvärda utrymnen, brandcellsindelning, brandtekniska skyddssystem etc. För att en insats ska bli så effektiv och framgångsrik som möjligt krävs att det finns en tydlig insatsplan. En sådan plan bör utvecklas vid ett samarbete mellan räddningstjänsten och de intressenter som finns i byggnaden för att säkerställa att all viktig information framgår. På planen bör det också framgå en tydlig benämning av de olika ingående byggnaderna, ingångar osv, samma terminologi som används av aktörerna verksamma på objektet ska användas i syfte att minimera missförstånd.
2. Räddningstjänstens angreppsvägar kolliderar ofta med utrymningsvägar. Detta kan utgöra ett problem där utrymningstiderna är långa och utrymning fortfarande pågår då räddningstjänsten anländer. I de fall det kan befaras att utrymning fortfarande sker då räddningstjänsten anländer bör separata angreppsvägar övervägas.

3. Då räddningstjänsten gör sin insats i multifunktionella byggnader där separata angreppsvägar inte är tillgängliga måste de ofta angripa branden från en angränsande brandcell. Slangdragning etc. medför att brandcellsgränsen hålls öppen under en pågående brand med rökspridning som följd. I de fall denna rökspridning kan orsaka oacceptabla skador bör separata angreppsvägar övervägas eller tekniska system som evakuerar rök. För de olika brandscenarierna bör räddningstjänsten agerande vägas in för att analysera denna problematik.
4. Räddningstjänsten upplever att det ofta finns orealistiska förväntningar på vad de kan hantera vid en insats. Detta tar sig bl a formen där man förväntar sig att räddningstjänsten ska styra komplicerade tekniska system. Sådan information går ofta förlorad över tiden varför det inte är önskvärt att räddningstjänsten ska hantera t ex manuella fast installerade släcksystem eller brandgasventilation. Vid dimensionering av en byggnad bör det därför förutsättas att räddningstjänsten endast förfogar över den utrustning de har med sig själva och att detta utgör grunden för räddningsinsatsen.
5. Räddningstjänsten upplever att projektörer vid dimensionering underskattar insatstiden och att räddningstjänsten anländer och kan påbörja en insats i ett mycket tidigt skede. Detta har visat sig vara orealistiskt vid utförda övningar. Med anledning av detta bör den faktiska insatstiden för en multifunktionell byggnad bestämmas i samråd med räddningstjänsten.
6. I multifunktionella byggnader förekommer ofta låsning av enskilda lokaler. Denna låsning kan innebära problem för räddningstjänsten avseende tillgänglighet, ett typexempel är låsta jalousier. Möjlighet för räddningstjänsten att få tillträde (normalt kan de forcera en vanlig dörr) till samtliga utrymmen i byggnaden behöver beaktas.
7. Bedömning av hur väl räddningstjänsten kan kontrollera ett brandförlopp måste baseras utifrån faktorer som brandens förväntade tillväxthastighet och storlek vid den faktiska insatstiden.
8. Räddningstjänster med multifunktionella byggnader inom sitt område måste skapa ett system för att erhålla och bibehålla kunskap om de multifunktionella byggnaderna. God kännedom om byggnaderna och deras brandskydd ansågs vara en viktig punkt för en lyckad insats. Erhålla kunskap kan ta sig form i att de olika styrkorna besöker anläggningen, orienteringar med verksamma aktörer o s v, men det måste också finnas ett sätt att dokumentera detta som gör att informationen är tillgänglig när den behövs som mest, kanske måste också operativa avdelningen erhålla utbildningar om de här specifika objekten.

### **3.3.2 Slutsatser avseende ansvar, rutiner och handlingsplaner**

1. Det förefaller vara så att ansvarsfördelningen avseende brandskyddet i många avseenden är otydlig. Detta kan resultera i att underhållsfrågor hamnar mellan stolarna och att viktiga funktioner inte underhålls. I den här typen av byggnader är det av yttersta vikt att systemen fungerar som det är tänkt då en olycka/brand kan få stora konsekvenser. En tydlig ansvarsfördelning avseende de brandtekniska funktionerna tillsammans med en väl utvecklad underhållsplan är därför essentiellt.
2. Det kan konstateras att olika verksamheter och fastighetsägare inom en multifunktionell byggnad förefaller ha olika ambitionsnivå då det gäller skydd mot brand och antagonistiska hot. Detta visar sig genom att en del förefaller sakna rutiner och handlingsplaner i händelse av brand eller hot medan andra har mer välutvecklade planer. Detta faktum kan bidra till en ojämn nivå i skyddet och de verksamheter som har en hög ambitionsnivå exponeras av verksamheter som har en lägre nivå. För att säkerställa att oacceptabla exponeringar, framförallt för de samhällsviktiga funktionerna och besökare, inte uppkommer bör en miniminivå avseende rutiner och handlingsplaner säkerställas. Då alla verksamheter ansvarar mot fastighetsägaren bör fastighetsägaren samordna ett sådant arbete. Miniminivån i sin tur bör fastställas tillsammans med verksamheterna som kravställare där huvudverksamheterna för byggnaden bör ges stort inflytande. I handlingsplanerna bör dessutom utrymmen som är kritiska för att hantera en pågående olycka identifieras och en plan för att hålla dessa intakta under olyckan bör inkluderas eller möjlig ersättning till ett

sådant utrymme. En brist som uppkommit i de rutiner som finns är att formerna för informationsflöden under en olycka eller ett tillbud är oklara, detta bör också hanteras i handlingsplanen. Handlingsplaner och rutiner för de olika verksamheterna behöver inte nödvändigtvis vara likadana, det viktiga är att en miniminivå fastställs där det tydligt framgår vad som behöver ingå.

3. De intervjuade verksamheterna hade i varierande grad handlingsplaner för att hantera en olycka eller ett hot och man vidtar åtgärder för att minska sannolikheten att en händelse ska inträffa. Detta görs främst genom övervakning och begränsning av tillträde då det gäller antagonistiska hot. Det förefaller dock vara så att handlingsplaner saknas för att hantera situationen som uppstår efter en händelse. Situationer som kan uppstå efter en händelse är stort mediaptryck, ett stort antal anhöriga som hör av sig för att ta reda på hur deras nära har klarat sig osv. Detta är frågor som behöver hanteras. Dessutom behöver det finnas en plan för idrifttagande av verksamheten igen. En sådan plan bör identifiera möjligheter att minimera avbrottstider, t ex listor över leverantörer av kritisk utrustning, skrivna avtal med leverantörer där leveranstider specificeras, lista över kritisk utrustning, möjligheter till make-up mm för att öka sannolikheten för en kortare återställningstid.
4. Medvetenheten avseende antagonistiska hot varierar mycket mellan olika verksamheter. Det kan dock konstateras att medvetenheten hos de verksamheter där skydd mot antagonistiska hot är reglerat har en betydligt högre medvetenhet och har infört rutiner. Införande av rutiner och handlingsplaner inom de övriga verksamheterna verkar vara incidentstyrt, d v s först när en olycka eller ett tillbud har inträffat så införs ett skydd eller rutin. I detta sammanhang kan det också poängteras att det förefaller finnas en form av aversion mot antagonistiska hot, d v s man tycker att det finns så många andra ställen som har en större hotbild än den egna så därför anser man att det inte är ett problem.



## 4 Metod för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader

Genom litteraturstudien (kapitel 2) samt intervjuerna och fältbesöken (kapitel 3) så identifierades ett antal problemområden i multifunktionella byggnader. Dessa problemområden är relaterade dels till den multifunktionella aspekten och dels till antagonistiska hot. En metod för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader måste ta hänsyn till dessa problemområden. Metoden i sin helhet finns beskriven i Nilsson et al. (2013) och sätts i en större kontext i Nilsson (2013). Nedan ges en övergripande beskrivning av metoden samt de problemområden som identifierats, informationen baseras på Nilssons (2013) arbete.

### 4.1 Identifierade problemområden i multifunktionella byggnader

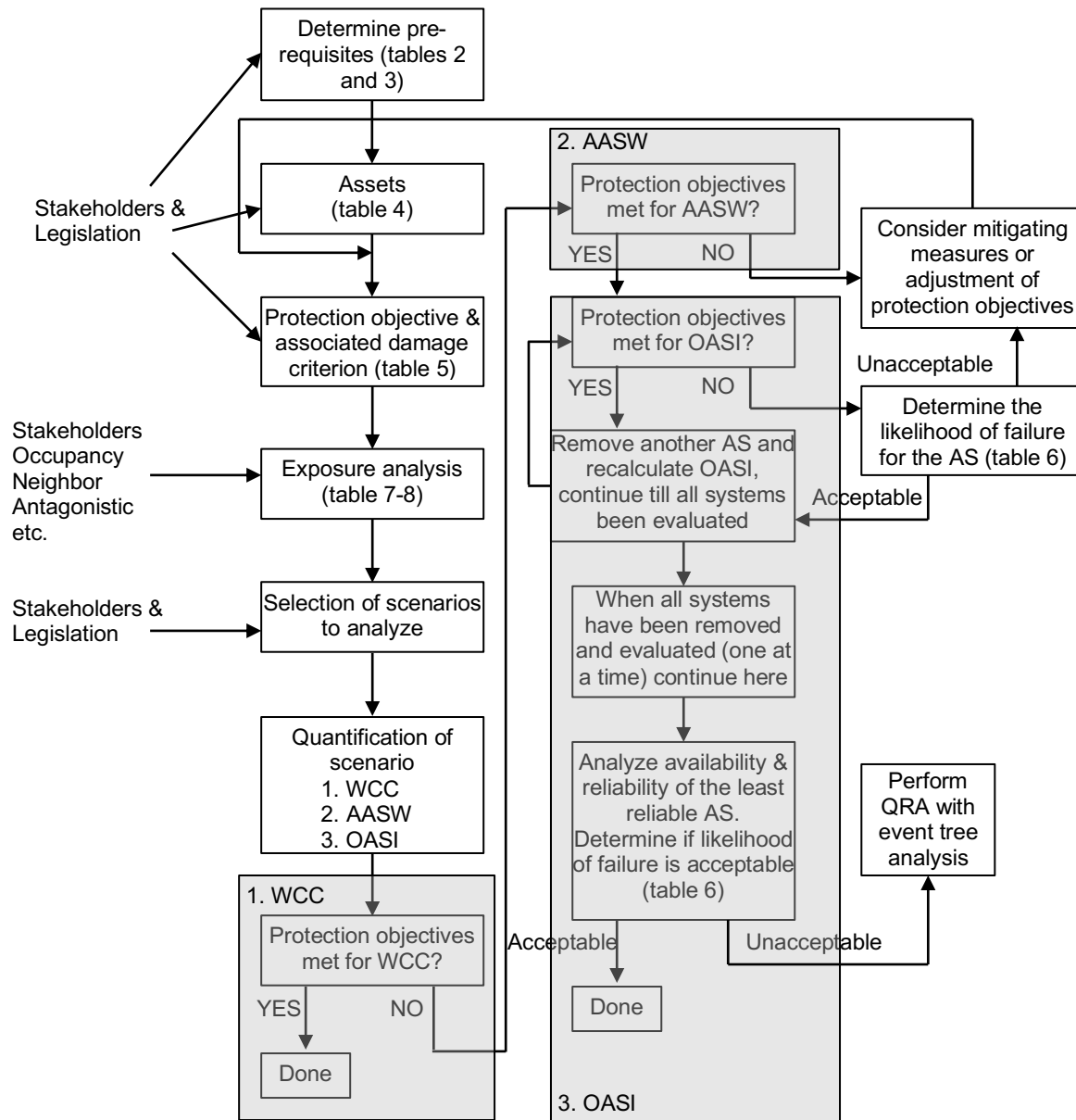
Tabellen nedan redovisar de identifierade problemområdena för multifunktionella byggnader. En utförligare beskrivning återfinns i Nilsson et al. (2013) och Nilsson (2013).

Tabell 2 *Problemområden i multifunktionella byggnader som ett resultat av multifunktionalitet och antagonism.*

<b>Problemområden i multifunktionella byggnader som en metod för analys av brandsäkerhet måste ta hänsyn till. (Reproducerad från (Nilsson et al. 2013))</b>
Flexibilitet att ta hänsyn till många olika typer av skyddsmål.
Stort antal intressenter.
Intressenter med en hög exponering för antagonistiska hot (som då i sin tur exponerar andra intressenter)
Den initierande händelse kan medföra att aktiva och passiva brandskyddssystem skadas/görs otillgängliga.
Common-cause failure med hänsyn till att det finns ett stort antal skyddssystem samt med hänsyn till att den ökade sannolikheten att den initierande händelsen är allvarigare.
Det förekommer ett flertal olika funktioner och de som är av störst vikt behöver identifieras.
Brandscenariot kan vara allvarigare än vad som är dimensionerat för, tex snabbare brandtillväxt eller högre effektutveckling.
Support system som är viktiga för olika funktioner samt brandrelaterade funktioner.
Dominoeffekter (t.ex. explosion återföljt av brand)
Brandens placering (kritiska punkter, t.ex. känsliga utrymmen, mindre bränder där skyddssystemen inte är effektiva för att uppnå skyddsmålet)
Säkerhetsaspekter såsom övervakning, belysning o.s.v.
Svårigheter med att avgöra vad som är relevanta antagonistiska hot (både små- och storskaliga)
Högsta prioritet bör vara på personsäkerhet och därefter på huvudfunktionerna i byggnaden.
Huvudfunktionerna i byggnaden behöver bestämmas och intressenter associerade med dessa funktioner.
Ytor och funktioner som behövs för att hantera en pågående händelse behöver analyseras.
Vägledning för att ta fram koncisa och mätbara skyddsmål behövs.
Flexibilitet behövs för att ta hänsyn till handlingsplaner.
En större sannolikhet att brandskyddssystem (både aktiva och passiva) fallerar pga dåligt underhåll
Externa exponerings såsom ett bombhotat fordon som tas till byggnaden för utrymning.
Metoden behöver vara tillräckligt enkel för att identifiera scenarier vid ett platsbesök.

## 4.2 Sammanfattning av metoden för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader

Figur 2 visar en översikt av metoden för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader. En fullständig beskrivning av metoden återfinns i Nilsson et al. (2013) och en djupare diskussion kring hur metoden hanterar de identifierade problemområdena i avsnitt 4.1 återfinns i Nilsson (2013). Den översiktliga metodbeskrivningen nedan är en sammanställning av det som återges i Nilsson (2013).



Figur 2 Översikt av metoden för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader (Nilsson et al. 2013) (tabellnummer i figuren hänvisar till (Nilsson et al. 2013).

Metoden börjar med att förutsättningarna för analysen ska klargöras, **Determine prerequisites**, vilket i princip innebär att avgöra huvudfunktioner och relevanta intressenter för byggnaden samt byggnads- och personkaraktäristika. Nästa steg innefattar att bestämma vad som behöver skyddas, **assets**, dessa ska ses i ljuset av byggnadens huvudfunktioner och har delats in i fyra kategorier, personsäkerhet, egendom, miljö och funktioner. När det bestämts vad som ska skyddas måste skyddsmål och skadekriterier för det som ska skyddas upprättas, **protection objectives and associated damage criterion**. Nästa steg är att avgöra de exponeringar som hotar att skyddsmålen inte uppfylls, **exposure analysis**, exponeringarna har delats in i naturliga och antagonistiska.

Baserat på vad som ska skyddas, skyddsmålen och exponeringarna så utförs en utvärdering av brandsäkerheten genom scenarioanalys. Detta innebär att osäkerheter hanteras genom val av konservativa värden på osäkra parametrar och scenarierna ska utgör värst troliga fall. Detta sätt att hantera osäkerheter relaterar till vad Paté-Cornell (1996) definierar som nivå 2. Fördelen med detta tillvägagångssätt är att det är transparent vilka scenarier som beaktats och om de kan hanteras eller inte. Generellt så har det i detta läge identifierats ett stort antal möjliga scenarier och ett val måste göras vilka scenarier som ska analyseras vidare, *selection of scenarios to analyze*. Detta urval görs genom att gruppera liknande och värre scenarier tillsammans och välja representativa scenarier, dvs om de scenarier som analyseras vidare kan hanteras så ska det även vara så att de icke analyserade scenarierna kan hanteras eftersom de inte är lika allvarliga.

De sista stegen är att kvantifiera de utvalda scenarierna, *quantification of scenario*, vilket görs genom att studera tre olika versioner av samma scenario, *Worst Credible Consequence (WCC)*, *All Active Systems Working (AASW)* och *One Active System Impaired (OASI)*. Anledningen till att studera dessa olika versioner är för att ta hänsyn till aktiva systems inneboende sannolikhet att felfungera. Avslutningsvis utvärderas huruvida skyddsmålen uppfylls för scenariot eller inte. Om slutsatsen av analyserna är att det inte går att avgöra om säkerhetsnivån är acceptabel eller inte så rekommenderas en kvantitativ riskanalys, *QRA*.

## 5 Forskningsfrågor som stöd för användande av metoden samt en del slutsatser från intervjuer

I avsnitt 5.1 redogörs för identifierade forskningsfrågor där svaren på forskningsfrågorna skulle stödja applikation av metoden och ge input till hur metoden kan användas, se också Nilsson (2013). En utförligare beskrivning av en del av forskningsfrågorna återfinns i Nilsson & van Hees (2012), i detta avsnitt återges bara frågorna.

### 5.1 Potentiella forskningsfrågor

Tabell 3 Potentiella forskningsfrågor

<b>Kritiska komponenter för brandskyddet och samhällsviktiga funktioner - Underlag till bedömning av skyddsnivåer</b>
Funktionsbeteende av elektrisk utrustning, vid vilka nivåer av brandexponering slutar elektrisk utrustning att fungera?
Hur kan vi på bästa sätt skydda elektrisk utrustning?
<b>Scenarier och brandtekniska skyddssystem – Underlag till bedömning av skyddsnivåer</b>
Hur täta är egentligen brandcellsgränser?
I vilken utsträckning sker brand- och brandgasspridning mellan oskyddade lokaler och lokaler skyddade med automatiskt släcksystem?
Hur väl skyddar ett sprinklersystem som inte kommer åt brandens bas?
Hur påverkas brandens utveckling av tändkällans storlek?
Hur ser brandförloppet ut i dagens gasbussar?
Hur påverkar tekniska byten brandspridningen vid större brandkällor?
Hur påverkas brandskyddet av att flertalet tekniska system används samtidigt för att erhålla en brandsäker lösning?
Vilka dominoeffekter bör beaktas för multifunktionella byggnader med avseende på antagonistiska hot?
Hur sprider sig bränder i konstruktioner?
Hur påverkas brandförloppet när brandgaslagret närmar sig brandens bas och når flammorna?
<b>Skyddsnivåer</b>
Ska vi ha en högre skyddsnivå för multifunktionella byggnader med samhällsviktiga funktioner där en olycka kan få stor påverkan på samhället?
Varför är skydd och säkerhetstänk så incidentstyrt?
Vad bör allvarlighetsgraden i referensscenarierna vara för att erhålla en rimlig skyddsnivå?
Vilka ändringar åtgärder bör vidtas?
<b>Utrymning</b>
Hur påverkas utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet?
Hur påverkas utrymningsförloppet vid förlust av för utrymningen viktiga tekniska system?
Hur påverkas personflödet i trånga utrymnen då ett motriktat flöde uppstår?
Vad är en rimlig utrymningstid av en byggnad vid ett antagonistiskt hot?
Hur agerar personer som utsätts för ökande hot under utrymningsförloppet?
Vilken möjlighet har personer med funktionsnedsättningar, äldre personer och barn att utrymma säkert när utrymningssystemet utsätts för en yttre förändring?
Hur kan byggnadens utrymningssystem anpassas efter det uppkomna hotet och i vilken grad anpassar sig personerna efter detta?
Vad kännetecknar utrymningsförloppet när personerna tvingas utrymma genom nya miljöer?

<b>Bärande konstruktioner</b>
Hur reagerar den bärande konstruktionen vid brand då det ursprungliga skyddet skadats?
Hur reagerar den bärande konstruktionen om man utsätter den för två på varandra följande olyckslaster?
Hur sårbara är multifunktionella byggnader när det gäller explosion? Hur kan man uppskatta påverkan av en explosion på en byggnad och finns det vägledning (Guidelines) för hur man estimerar risken för en sådan explosion uppstår samt hur man designar en byggnad för att motstå en explosion?
Betongpelare och väggmoduler utsätts för stora trycklaster i många platsgjutna betongkonstruktioner, t ex parkeringsgarage. Hur viktiga är materialegenskaperna hos betong när man utvärderar brandmotståndet hos betongelement?
Som ett led i fältbesöket för den multifunktionella byggnaden identifierades ett antal strukturella detaljer där endast begränsad kunskap finns kring deras brandegenskaper, t ex håldäck. Vilka faktorer bör beaktas när dessa element dimensioneras för brand?
Många multifunktionella byggnader, exempelvis fasadsystemet i den studerade multifunktionella byggnaden, inbegriper stålbalkar och pelare i utrymmen med öppen planlösning. Brandutvecklingen i dessa öppna utrymmen skiljer sig markant från de typiska homogena brandförloppen såsom standardbrandkurvan eller de parametriska rumsbränderna. Dessutom, storleken på vissa pelare är sådan att värmepåverkan varierar kraftigt längs pelarens höjd. Hur signifikant kan den icke-homogena temperaturfördelningen bli och hur utvärderar vi det?
Vid branddimensionering är ett allt vanligare önskemål att minska omfattningen av det passiva brandmotståndet runt balkar eller pelare av stål eller, om möjligt, helt avlägsna det. Vilken påverkan har detta på den ekonomiska risknivån för en verksamhet i en byggnad?

## 5.2 Val av forskningsfrågor

I avsnitt 5.1 redogjordes för de uppslag till forskningsfrågor som uppkommit inom projektet. Mängden forskningsfrågor innebär att inte alla kan behandlas speciellt utförligt vilket medför att en prioritering av forskningsfrågorna måste göras.

De forskningsfrågor som är av störst vikt för att stödja den metodik som presenterats i kapitel 4 har prioriterats för vidare undersökning och forskning. I de fall det finns andra pågående eller beviljade forskningsprojekt som utreder frågan har forskningsfrågan prioriterats ner i detta projekt med hänsyn till att frågan kommer att utredas vidare och djupare inom andra forskningsprojektet.

Då antalet forskningsfrågor för bärande konstruktioner och brand varit relativt begränsat görs inte denna motivering för detta forskningsområde. Genomförd forskning redovisas i kapitel 10.

### 5.2.1 Kritiska komponenter för brandskyddet och samhällsviktiga funktioner – Underlag till bedömning av skyddsnivåer

#### **Funktionsbeteende av elektrisk utrustning, vid vilka nivåer av brandexponering slutar elektrisk utrustning att fungera?**

Vikten av elektrisk utrustning (kablar, komponenter etc.) och datorkomponenter har visats ovan och som ett första steg i att utreda kritiska nivåer vid brandpåverkan kommer en litteraturstudie att genomföras för att utreda kunskapsläget avseende t.ex. kritiska temperaturer, sotproduktion, korrosiva gaser etc. De nivåer som finns framtagna i litteraturen kommer att redovisas och identifierade behov av vidare forskning kommer att redogöras. Vidare planeras, om utrymme finns, att validera tidigare framtagna modeller för temperaturberäkning i kablar vid brandpåverkan. Då dagens modeller för beräkning av temperatur inuti kabeln är baserad på en enkel modell för värmeledning där kabeln antas bestå av ett homogent material är det intressant att ur ett forskningsperspektiv studera validiteten av en sådan modell gentemot försöksdata samt mer avancerade beräkningsmodeller.

### **Hur kan vi på bästa sätt skydda elektrisk utrustning?**

Elektrisk utrustning och datorrum har under lång tid skyddats med traditionella släcksystem såsom sprinkler, gasläcksystem, brandgasventilering, etc. enligt diverse internationella standarder. En inventering av dessa standarder samt hur stora skadorna kan tänkas bli hade varit nyttigt.

Över den senaste tiden har användandet av permanent syrgasreducerad miljö för brandskydd ökat, se t.ex. Chiti (2009), Jensen et al. (2006), Berg & Lindgren (2004). Skyddsnivån som erhålls beror på den uppnådda syrgasnivån i det skyddade utrymmet (Xin & Khan 2007) och det finns standarder som specificerar syrgasnivåer för olika material samt testmetoder för skyddsmetoden, se t.ex. BSI (2011) och VdS (2007). Då skyddsmetoden är relativt ny så råder osäkerheter kring den faktiska skyddsnivån samt för- och nackdelar med skyddsmetoden och det finns ett behov av att undersöka detta närmre vilket gör ämnet intressant ur ett forskningsperspektiv. En omfattande litteraturstudie kommer därför att genomföras där dagens kunskapsläge samt för- och nackdelar klagörs, försök med aktuella testmetoder genomförs och behov av vidare forskning på området kommer att identifieras.

En annan ganska ny skyddsmetod som skulle kunna vara applicerbar för elektrisk utrustning är pyrotekniskt genererade aerosoler.

### **5.2.2 Scenarier och brandtekniska skyddssystem – Underlag till bedömning av skyddsnivåer Hur täta är egentligen brandcellsgränser?**

En del forskning har bedrivits på området inom bl.a. PRISME (OECD 2013) (van Hees & Wahlqvist 2011) (van Hees et al 2011). En övergripande litteratursökning kommer att genomföras på området med målet att finna rimliga läckageareor för brandcellsgränser. Detta kan sen användas i metoden vid utvärdering av brandgasspridning inom komplexa byggnader.

### **I vilken utsträckning sker brand- och brandgasspridning mellan oskyddade lokaler och lokaler skyddade med automatiskt släcksystem och hur väl skyddar ett sprinklersystem som inte kommer åt brandens bas?**

Båda dessa forskningsfrågor behandlar till största del sprinklersystems potentiella effekt när systemet inte når brandkällan, vikten av dessa konfigurationer har poängterats ovan. Inom ramen för detta projekt kommer litteraturen studeras för att finna experimentell data, det kommer inte vara möjligt att inom projektet utföra försök då fullskaleförsök krävs för att undersöka fenomenet och inom ramen för projektet kommer frågorna endast studeras övergripande.

### **Hur påverkas brandens utveckling av tändkällans storlek?**

Anlagd brand utgör ett vanligt antagonistiskt hot och ofta används brännbara vätskor. I en studie kommer tillgänglig statistik användas för att se hur stor andel av alla bränder (inklusive anlagda) som täcks in av de dimensionerande bränder som specificeras i Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (Boverket 2011). Detta kommer att genomföras för en verksamhetstyp dock kommer tillvägagångssättet kunna användas för andra verksamhetstyper. Vidare kommer litteratur att studeras för att se hur brandtillväxthastigheten påverkas då brand anläggs med brännbar vätska. Denna del av forskningen är ett prioriterat område för projektet då denna typ av brandscenarier är av sådan karaktär som projektet inriktar sig på.

### **Hur ser brandförloppet ut i dagens gasbussar?**

Även om denna fråga är av vikt för en del multifunktionella byggnader avses det inte utredas vidare i projektet med hänsyn till att ämnet studeras inom ramen för andra projekt och forum, se t.ex. Johansson & Axelsson (2006) och Hammarström et al. (2006). Vidare har Statens haverikommission beslutat att utreda olyckan med de två gasbussarna som brann i Helsingborg 2012 (Sydsvenskan 2012). Av media framgår att fullskaletest kommer genomförts inom ramen för utredningen och att bussarna blev totalt utbrända (Sydsvenskan 2012). Informationen som redan finns tillgänglig samt den information som kommer fram inom ramen för Statens Haverikommissionsutredning tillsammans med att det regelbundet ordnas konferenser inom området, t.ex. FIVE (Fire in Vehicles) torde utgöra en bra bas för bedömning av gasbussars brandförlopp.

### **Hur påverkar tekniska byten brandspridningen vid större brandkällor?**

Hur tekniska byten påverkas vid större brandkällor har till stor del att göra med tändkällans storlek och hur den i sin tur påverkar brandens utveckling i kombination med när det automatiska släcksystemet aktiverar. Då utredningen av denna fråga beror av resultaten från forskningsfrågan avseende hur brandens utveckling påverkas av tändkällans storlek väljs att vänta med utredning av aktuell fråga tills ovanstående är utrett.

### **Hur påverkas brandskyddet av att flertalet tekniska system används samtidigt för att erhålla en brandsäker lösning?**

Kvantifiering av hur brandskyddet påverkas är unikt för varje byggnad och är beroende av antalet tekniska system som finns installerat för att uppnå en tillfredställande brandskyddsnivå. Metoden i Nilsson et al. (2013) hanterar bortfall av tekniska system genom att analysera tre olika versioner av varje scenario vilket anses vara tillräckligt i dagsläget och kommer därför inte att utredas vidare.

### **Vilka dominoeffekter bör beaktas för multifunktionella byggnader med avseende på antagonistiska hot?**

Potentiella dominoeffekter beror av scenariot som analyseras och till stor del på hur allvarlig den initiala händelsen är. En del forskning har gjorts inom ramen för processindustrin, se t.ex. Abdolhamidzadeh et al. (2010), Gómez-Mares et al. (2008), Khan & Abbasi (1998), Khan & Abbasi (2001a) och Khan & Abbasi (2001b). Vidare har en del studier genomförts inom ramen för kritisk infrastruktur och det internberoende som förekommer mellan olika infrastruktur, se t.ex. Little (2002), Utne et al. (2011) och Zimmerman & Restrepo (2009). Ofta bygger modellerna för att analysera dessa scenarier på händelsetråd eller felträd men även Monte Carlosimuleringar förekommer. Framtagen metodik i Nilsson et al. (2013) är tänkt att appliceras på befintliga byggnader och behöver vara relativt enkel för att applicera i praktiken vid en analys då tiden för platsbesök och analys kommer att vara begränsad. De avancerade modellerna (datormodeller, Monte Carlosimuleringar etc) innebär oftast ett stort analysbehov och deras praktiska tillämpbarhet är nog begränsad. Däremot kan händelsetråd och felträd vara praktiska hjälpmedel för att identifiera och strukturera hur dominoeffekter kan analyseras. En litteraturstudie med fokus på dessa metoder och dominoeffekter kommer därför att genomföras inom ramen för ett examensarbete som dessutom ska applicera metoden på en multifunktionell byggnad.

### **Hur sprider sig bränder i konstruktioner?**

För närvarande bedrivs forskningsprojektet ”Fallstudie av konstruktionsbränder” finansierat av Brandforsk. I projektet ska relevanta problem identifieras och kunskap skapas om väsentliga faktorer som leder till en viss skada eller händelse, målet med projektet är att kunna beskriva hur bränderna startar och utvecklas och ta reda på vilka faktorer som bidrar till stora skador (van Hees, 2012). Resultaten från ovan nämnt projekt kommer att ge information om identifierade forskningsfrågor varför dessa inte kommer att utredas vidare inom detta projekt.

### **Hur påverkas brandförloppet när brandgaslagret närmar sig brandens bas och når flammorna?**

Brandutvecklingens beroende av brandens placering i höjddled har undersökts i mycket begränsad omfattning (Carman, 2011) till skillnad från hur brandens placering nära väggar och i hörn inverkar på brandutvecklingen. Carman (2011) studerade fenomenet där brandgaslagret når flammorna i samband med en brandutredning. När brandgaslagret når flammorna minskar syret som är tillgängligt för förbränning och mer oförbrända gaser ansamlas i brandgaslagret, mer sot och kolmonoxid bildas samtidigt som temperaturen ökar då mindre ren luft tränger in i brandplymen. Följden av detta blir ett varmare brandgaslager och då luftinträngningen minskar också en långsammare nedstigning av brandgaslagret. Dock innebär det för mindre rum att flammor kan uppträda utanför rummet utan att övertändning inträffat (Carman, 2011). Fenomenet och problemen förefaller vara mest intressanta för mindre rum och utrymmen såsom t.ex. en brand på en spis i en lägenhet. I multifunktionella byggnader är problemet inte lika stort då utrymmen och lokaler ofta har stora volymer såsom atrium där balkonger finns på olika nivåer i atriet. I en sådan konfiguration skulle det kunna inträffa att brandgaslagret når flammorna och fenomenet beskrivet ovan inträffar. Då brandgaslagret skulle sjunka

långsammare och det är högt till tak förefaller det vara så att det inte innebär en negativ effekt för utrymmande eller åtminstone vara ett problem som inte är direkt stort. Med anledning av detta prioriteras denna forskningsfråga ned till förmån för övriga frågor som är mer specifika och applicerbara för multifunktionella byggnader och antagonistiska hot.

### 5.2.3 Skyddsnivåer

Forskningsfrågorna avseende vilken skyddsnivå som ska vara gällande för multifunktionella byggnader är till stor del av politisk karaktär. Att höja skyddsnivån i denna typ av byggnader innebär en kostnadsökning eller inskränkningar i friheter vid byggnation och ändring. På samma sätt skulle en sänkning av skyddsnivåerna innebära billigare byggnader och möjligtvis en ökad frihet i användandet. Detta är frågor som politiker, myndigheter etc måste ta ställning till och kommer inte att göras i projektet. Dock kommer en analys göras av vilka typer av bränder som täcks in i dagens dimensioneringsregler att göras för publika byggnader, se avsnitt 5.2.2 avseende tändkällans storlek, resultaten presenteras i kapitel 7. Med anledning av ovanstående kommer forskningsfrågorna avseende skyddsnivåer inte att utredas på djupet.

Då det gäller forskningsfrågan avseende varför skydd och säkerhetstänk är så incidentstyrt så lämpar sig denna forskningsfråga bättre att utredas på ett psykologiskt plan. Denna kompetens besitter inte projektgruppen och frågan kommer inte att utredas vidare inom projektet.

### 5.2.4 Utrymning

#### **Hur påverkas utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet?**

Mycket av tidigare forskning har visat att närvaron av ett utrymningslarm är gynnsam för personers möjlighet att utrymma snabbt (Frantzich, 2001). Den faktor som då främst påverkas är möjligheten att snabbare besluta sig att inleda en utrymning. Forskningen visar att personer som vistas i en okänd miljö uppvisar ett beteende som relaterar till osäkerhet och tveksamhet. Meddelandets utformning har en betydelse för hur det uppfattas (Frantzich & Nilsson, 2010). Ett utrymningslarm som förmedlar ett talat meddelande med information om vad som har hänt och vad personerna förväntas göra har därför en gynnsam effekt på utrymningsförloppet, det inleds tidigare. Det är tydligt att personer som inleder sin utrymning tidigt har större möjligheter att sätta sig i säkerhet eftersom brandförloppet ofta utvecklar sig ogynnsamt med tiden.

Problemet för många större byggnader är att utrymningslarmets funktion kan vara sårbar vilket leder till att det kan sluta att fungera. Denna möjlighet kan bedömas vara större för byggnader som också utsätts för antagonistiska hot. En relevant frågeställning är att undersöka vad som inträffar om utrymningslarmet upphör att fungera efter det startat och gett den inledande informationen. Frågeställningen för en undersökning är om nyttan med utrymningslarmet avtar när väl beslutet att utrymma väl är fattat. En inledande studie (Holmström & Sävmark, 2013) görs för en verksamhetstyp för att bedöma effekterna av avbrutna utrymningslarm.

#### **Hur påverkas utrymningsförloppet vid förlust av för utrymningen viktiga tekniska system?**

I föregående avsnitt exemplifierades ett fall där ett tekniskt system som är väsentligt för möjligheterna att utrymma faller bort. Det finns även andra system som är betydelsefulla för utrymningsförloppet såsom belysning i lokalen och funktionen för de vägledande markeringarna. Möjligheterna att utrymma en lokal i dålig belysning har inte undersökts i någon vidare bemärkelse. Det som undersökts är främst hur gånghastigheten påverkas av en försämrad belysning (Webber & Hallman, 1988). Dock har flera försök knutna till utrymning också undersökt hur möjligheterna att orientera sig i en lokal förändrats med försämrad belysning men då ofta i kombination med t ex närvaron av rök. Detta betyder att det främst är rökens dämpande effekt som påverkar i form av försämrad sikt (Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D. & Frantzich, H., 2013).

Närvaron av vägledande markeringar påverkar möjligheterna att orientera sig i en lokal. Detta är påtagligt i större lokaler där möjligheten att få en överblick kan vara sämre. Det har visat sig att kontrastförhållandena mellan skylt för vägledning och omgivningen påverkar möjligheten att uppfatta

skylten (Fransson, 2008). Det betyder att ett utrymningsförlopp kan förväntas vara långsammare och förenat med större osäkerhet när övriga tekniska system upphör att fungera.

### **Hur påverkas personflödet i trånga utrymmen då ett motriktat flöde uppstår?**

Som tidigare nämnts i samband med intervjuerna med representanter från räddningstjänsten, se avsnitt 3.3.1, kan det uppstå problem i samband med att en och samma passage används både av räddningstjänsten som angreppsväg och av personer som utrymmer. Det uppstår då konflikter i samband med att två flöden möts. Problemet med mötande flöden har studerats i flera sammanhang eftersom det är liknande situationer som förekommer i andra sammanhang t ex vid utformning av gångvägar i tunnelbanestationer (Tajima m fl, 2002 och Helbing, 2001).

En av de mest omfattande undersökningarna som baseras på observationer är genomförd av Fruin (1971). I den förekommer resultat som indikerar att personflödet bara minskar obetydligt om mötande flöden förekommer. Dock baserar Fruin sina resultat på observationer från personer som pendlar dvs från tunnelbanestationer och tågstationer. I dessa verksamheter är gångarna förhållandevis breda vilket gör att personer som är på kollisionskurs kan parera detta utan att gånghastigheten påverkas. För trappor rapporterar Fruin att personflödet kan minsta ner till hälften om flödena är motriktade.

Ytterligare en aspekt som bör beaktas är när problemet ses ur räddningstjänstens perspektiv. I det sammanhanget är kanske inte flödes minskning det stora problemet utan den extra belastning som det motriktade flödet av utrymmande personer utgör på personalen som ska genomföra en insats. Konsekvensen blir att insatsen försenas samt att personalen är mer ansträngd.

Detta betyder sammantaget att motriktade flöden måste beaktas i samband med planering av möjligheterna till utrymning för de passager där det kan förväntas att motriktade flöden kan förekomma. I projektet kommer någon vidare undersökning kring effekterna av motriktade flöden inte att göras.

### **Vad är en rimlig utrymningstid av en byggnad vid ett antagonistiskt hot?**

Frågeställningen är egentligen inte relevant eftersom grunden för all analys och dimensionering är att utrymningsförloppet ska vara avslutat innan personer utsätts för kritiska förhållanden. Det innebär att den godtagbara tiden för utrymning beror på de specifika förhållandena för en byggnad och den brandrisk som finns.

Det finns dock en annan aspekt som bör beaktas och den relaterar till personernas uppfattning om sin möjlighet att komma ut om utrymningsförloppet blir utdraget. Det handlar i detta fall mer om individernas upplevda känsla av möjligheterna att utrymma och styrs av faktorer knutna till riskperceptionen i det aktuella fallet. Faktorer som kan påverka har att göra med bl a möjligheterna att kontrollera situationen, den potentiella konsekvensen och förändringstakten i miljön.

Ett exempel på situation som kan påverka den upplevda risken är om utrymningsmöjligheterna förändras t ex genom att en omfattande köbildning uppstår eller om brandförloppet får en oväntad händelseutveckling. Båda dessa aspekter är aktuella för multifunktionella byggnader då antalet personer kan vara stort samtidigt som byggnadens utformning kan medverka till ökanda brandutvecklingsförlopp. Forskning som omfattar långvariga kösituationer samtidigt som brand hotar är inte vanligt förekommande. Det finns en del tidigare forskning vilken bl a sammanfattas i Willander (2009). Frågeställningen utreds inte vidare inom projektet.

### **Hur agerar personer som utsätts för ökande hot under utrymningsförloppet?**

Utrymning från multifunktionella byggnader kan innebära att förflyttningen sker genom olika verksamheter samtidigt som hotet i byggnaden ökar till följd av brandförloppet. Förändringen av brandförloppets utveckling kan dessutom påverkas av närvaron av den antagonistiska aspekten dvs brandförloppet kan vara anlagt eller utgöra en följd effekt av annat attentat. Detta leder till en situation där utrymmande personer tvingas utrymma genom miljöer där situationen kan upplevas som mer

allvarlig ju längre utrymningen fortsätter. Denna aspekt har inte studerats i någon större omfattning och kommer därför att utredas vidare genom experiment.

### **Vilken möjlighet har personer med funktionsnedsättningar, äldre personer och barn att utrymma säkert när utrymningssystemet utsätts för en yttre förändring?**

Mycket av den forskning som genomförts är utförd med personer som är fullt friska och i god fysisk kondition. Det blir dock vanligare att äldre personer och personer med olika former av funktionsnedsättningar vistas i det offentliga sammanhanget (Kulturrådet, 2008). Det ligger också i samhällets önskan att publika miljöer ska vara anpassade för personer med t ex funktionsnedsättningar vilket ställer krav på byggnadens utformning.

Detta leder samtidigt till ökade svårigheter i samband med utrymning vid brand eftersom de flesta byggnader utformas för att medge en god tillgänglighet men samtidigt anpassas inte alltid möjligheterna för utrymning i motsvarande grad. En förändring i bygglagstiftningen har dock skett på senare år bl a genom att det idag ställs krav på att det ska finnas utrymningsplatser där personer som har svårt att gå i trappor kan vänta, i den förhållandevis säkra miljön, tills hjälp anländer.

Undersökningar som visar på svårigheterna att utrymma för personer med funktionsnedsättningar har gjorts av bl a Brand & Sörqvist (2000) och Möller & Nygren (2004). I projektet görs inga riktade undersökningar för att kartlägga behoven för personer med funktionsnedsättning utöver att även dessa personkategorier omfattas av nyttan med de system som undersöks i experiment.

### **Hur kan byggnadens utrymningssystem anpassas efter det uppkomna hotet och i vilken grad anpassar sig personerna efter detta?**

Det som kännetecknar de multifunktionella byggnader som undersöks inom projektets ram är att de innehåller ett stort antal personer, flera olika typer av verksamheter samt att de kan utgöra en måltavla för antagonistiska attacker. Det kan leda till att utrymningsituationen blir mer dynamisk jämfört med traditionella byggnader på så sätt att utrymningsvägar kan komma att bli obrukbara efter en tid in i förloppet. Det kommer att innebära ett problem för personer som redan inlett utrymningen och fattat ett beslut om hur de avser att ta sig ut ur byggnaden.

Om då en utrymningsväg blockeras av brand eller annan fara måste de aktuella personerna fatta ett nytt beslut och välja en annan väg ut. Detta behöver inte innebära ett stort problem men kan utvecklas till ett sådant om antalet personer som utrymmer är stort eller om förändringen sker i nära anslutning till platsen där personerna befinner sig. Det skulle därför vara en fördel om personer som utrymmer i ett tidigt skede blir varse om att en utrymningsväg längre fram blivit obrukbar.

En frågeställning som blir aktuell är om personer kan förmås att omvärdera sitt tidigare beslut och om detta kan ske med någon form av tekniskt installation. Nackdelen med en sådan installation är att även den blir känslig för t ex elbortfall i byggnaden. En sådan installation skulle också kräva att det finns ett intelligent system som vet var branden finns och vilka alternativa utrymningsvägar som är aktuella för den nyuppkomna situationen. De pågår forskning kring dessa system t ex det brittiska FireGrid (Hann m fl, 2010). Frågeställningen kring personernas beslutsfattande är dock så intressant att denna fråga kommer att utvecklas senare genom att undersöka om det finns möjligheter att förmå personer att omvärdera beslut i samband med en utrymning.

### **Vad kännetecknar utrymningsförloppet när personerna tvingas utrymma genom nya miljöer?**

Det som är typiskt för multifunktionella byggnader är att det i en och samma byggnad kan finnas flera helt olika verksamheter och att personer som vistas i en del av byggnaden bara befinner sig i en sådan verksamhet. Naturligtvis förekommer det att personer utnyttjar flera verksamheter men det måste inte vara på det viset och den intressanta aspekten uppkommer när personer som vistas i en verksamhet tvingas passera andra verksamheter för att nå en säker plats om en brand skulle uppstå. För att kunna analysera utrymningsförloppet på ett rationellt sätt krävs en modell som beskriver företeelsen på ett sätt som kan analyseras. Nilsson (2006) presenterar en sådan modell som knyter samman observationer från forskningen med teoretiska modeller för människors beteenden.

Det som i hög grad påverkar hur personer agerar i en situation är i vilken roll personen är i (Frantzich, 2001). En person kan anta olika roller beroende på om personen t ex är på sin arbetsplats och är i en bekant situation eller om personen är kund i samma miljö men då med helt andra förutsättningar vad gäller förkunskaper om byggnadens utformning. En rad andra faktorer påverkar också agerandet t ex den sociala anknytningen (om man är tillsammans med andra personer), kunskap om byggnaden, påverkan av mediciner eller droger, ljudnivå i byggnaden och byggnadens överblickbarhet. En annan aspekt som är knuten till begreppet ”nya miljöer” är att byggnadens geometri kan ändras i samband med brand. Branddörrar stängs och brandskjutportar går igen vilket gör att tidigare öppna förbindelser stängs av eller ersätts med smalare dörrpassager. Det finns även situationer där större väggpartier sätts i rörelse och fullständigt förändrar utformningen av en annars öppen yta.

Det kan förväntas att det uppstår tveksamheter i anslutning till att personer byter verksamhetsmiljö och kanske också roll. I viss utsträckning kan förberedande planeringar och övningar med t ex närvarande personal medverka till att utrymningen ändå kommer att fungera tillfredsställande. Även närvaron av tekniska installationer t ex för att vägleda personer i en utrymningsituation kan förbättra möjligheterna till en snabb förflyttning. För att kunna undersöka frågeställningen mer noga krävs att fullskaliga utrymningsförsök analyseras. Detta ligger dock inte inom ramen för det föreliggande projektet och vidare undersökningar görs inte.

### 5.3 Sammanfattning av valda forskningsfrågor och typ av aktivitet inom respektive§

Tabell 4 Valda forskningsfrågor och planerade aktiviteter.

Forskningsfråga	Planerad aktivitet	Kapitel i denna rapport
Hur kan vi på bästa sätt skydda elektrisk utrustning?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inventering av standarder/litteratur för att klargöra huvudstrategier för skydd samt för och nackdelar med dessa</li> <li>• Motsvarande som ovan för pyrotekniskt genererade aerosoler</li> <li>• Djupgående litteraturstudie avseende Hypoxic air</li> </ul>	5
Hur påverkas brandens utveckling av tändkällans storlek?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studie som med hjälp av statistik klargör vilka bränder som täcks in i dagens dimensionerande bränder enligt BBR.</li> <li>• Studie för att se hur brandtillväxthastigheten påverkas då antändning sker med brännbar vätska</li> </ul>	7
<b>Övriga brandspridningsrelaterade forskningsfrågor</b>		8
Funktionsbeteende av elektrisk utrustning, vid vilka nivåer av brandexponering slutar elektrisk utrustning att fungera?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litteraturstudie – kritiska nivåer för brandpåverkan</li> <li>• Ev validering av modeller för temperaturpåverkan av kablar</li> </ul>	8.1
Hur täta är egentligen brandcellsgränser?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Övergripande litteratursökning</li> </ul>	8.2
I vilken utsträckning sker brand- och brandgasspridning mellan oskyddade lokaler och lokaler skyddade med automatiskt släcksystem och hur väl skyddar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litteraturstudie för att finna experimentell data</li> </ul>	8.3

ett sprinklersystem som inte kommer åt brandens bas?		
Hur påverkar tekniska byten brandspridningen vid större brandkällor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avvakta resultat från ovanstående fråga.</li> </ul>	8.4
Vilka dominoeffekter bör beaktas för multifunktionella byggnader med avseende på antagonistiska hot?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utvärdering av hur metoder inom processindustri och infrastruktur kan appliceras för multifunktionella byggnader</li> </ul>	8.5
Skyddsnivåer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Input fås från forskningsfråga avseende tändkällans storlek.</li> </ul>	7
<b>Utrymning</b>		
Hur påverkas utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litteraturstudie och experiment.</li> </ul>	9.1
Hur agerar personer som utsätts för ökande hot under utrymningsförloppet?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litteraturstudie, experiment i VR-miljö samt enkätundersökning.</li> </ul>	9.2
Hur kan byggnadens utrymningssystem anpassas efter det uppkomna hotet och i vilken grad anpassar sig personerna efter detta?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Litteraturstudie, experiment i VR-miljö samt enkätundersökning.</li> </ul>	9.3
<b>Bärande konstruktioner</b>		
Hur sårbara är multifunktionella byggnader när det gäller explosion?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studie av inträffade händelser, riktlinjer och möjligheter till skyddssystem</li> </ul>	10.1
Hur viktiga är materialegenskaperna hos betong när man utvärderar brandmotståndet hos betongelement?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie med beräkningar</li> </ul>	10.2
Vilka faktorer bör beaktas när håldäck dimensioneras för brand?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studie av beräkningsmodeller</li> </ul>	10.3
Hur signifikant kan den icke-homogena temperaturfördelningen bli vid lokal brand och hur kan det utvärderas?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studie av olika testserier</li> </ul>	10.4
Vilken påverkan på ekonomisk risknivå har en minskning av passivt skydd på balkar och pelare av stål?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probabilistisk dimensioneringsmetod utvärderas</li> </ul>	10.5

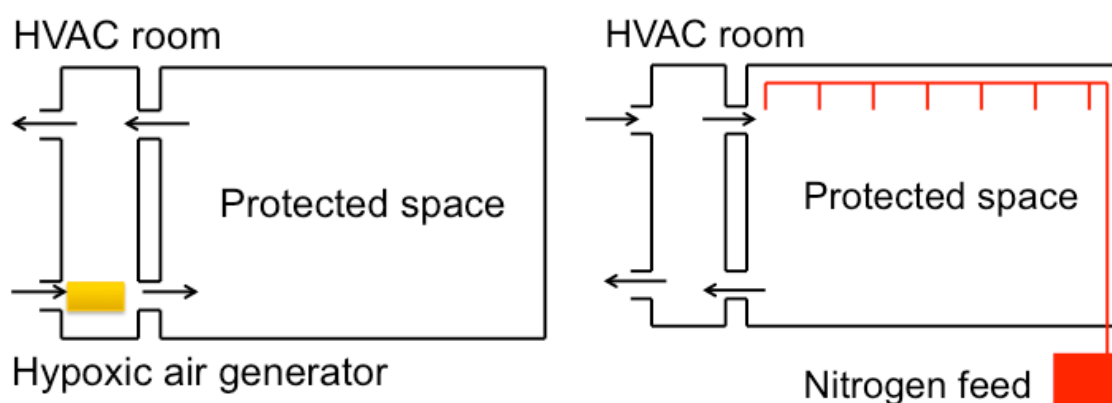
## 6 Hur kan vi på bästa sätt skydda elektrisk utrustning

### 6.1 Brandskydd genom reducerad syrehalt för elektrisk utrustning och kontrollrum (Hypoxic air)

Syftet med reducerad syrgashalt är att förhindra uppkomst och spridning av brand i det skyddade utrymmet. Tekniken har bl.a. använts i museer och datorhallar (Jensen et al. 2006) och installation sker nu också för el-rum inom den svenska kärnkraftsindustrin (van Hees et al. 2012). Tekniken är tilltalande för känsliga utrymmen där även en liten brand kan få stora konsekvenser p.g.a. exempelvis sot och korrosiva gaser. Med anledning av hur viktiga el-rum, kontrollrum och datorrum är i multifunktionella byggnader genomfördes en litteraturstudie. Litteraturstudiens syfte var att kartlägga kunskapsläget avseende reducerad syrgasmiljö som brandskyddsmetod samt att öka kunskapen om att använda metoden som skyddssystem i aktuella typer av rum. Målet var att presentera fördelar och utmaningar med att använda tekniken samt identifiera behov av fortsatt forskning på området. Litteraturstudien i sin helhet återfinns i artikeln *Advantages and challenges with using hypoxic air venting as fire protection* (Nilsson & van Hees 2013). Nedan presenteras en kort beskrivning av hur systemet fungerar, överväganden vid val av syrgashalt, en sammanfattning av litteraturstudien samt de tester som genomfördes enligt specificerade testmetoder.

#### 6.1.1 Systemuppbyggnad och funktion

Skyddssystemet bygger på en reduktion av syrgashalten i det skyddade utrymmet. I princip finns två generella sätt att åstadkomma detta, se Figur 3, vilka båda bygger på att kväve tillsätts utrymmet för att höja kvävekoncentrationen och därmed minska syrgaskoncentrationen. Det första sättet innebär att kväve tillsätts via ventilationen och på så sätt introduceras en förblandad syrgasreducerad luft i det skyddade utrymmet, vilket ofta refereras till som *hypoxic air venting* (Jensen et al. 2006). Det andra sättet innebär att kväve tillsätts direkt i det skyddade utrymmet, dvs via ventilationen introduceras vanlig luft (21% syrgashalt) och rent kväve tillsätts i det skyddade utrymmet för att ge ett överskott på kväve och sänka syrgaskoncentrationen, vilket ofta refereras till som *nitrogen feed* (Jensen et al. 2006). Det tillsatta kvävet kan åstadkommas på olika sätt, t.ex. genom en kvävegenerator, se bl.a. Chiti (2009). Fördelen med *hypoxic air venting* är att det är lättare att tillse en jämn syrgaskoncentration i rummet än med *nitrogen feed* där risken för olika syrgaskoncentrationer i rummet är större vilket ställer högre krav på övervakning (Jensen et al. 2006).

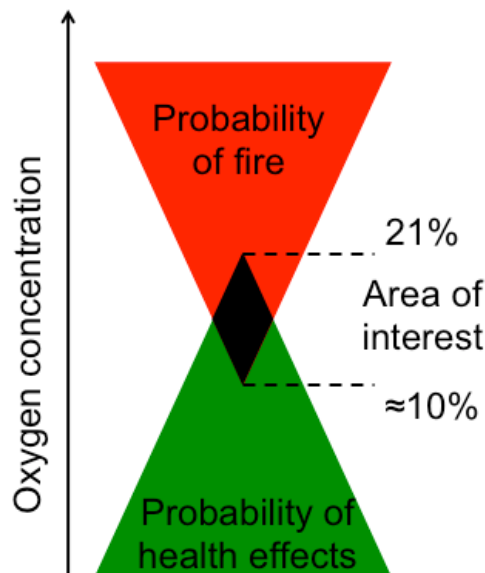


Figur 3. Systemuppbyggnader för utrymme skyddat med reducerad syrgashalt, t.v. skydd med introduktion via ventilationssystemet, t.h. skydd med tillsats av kväve direkt i det skyddade utrymmet.

#### 6.1.2 Överväganden vid val av syrgashalt

Den uppnådda skyddsnivån är beroende av vald syrgashalt (Nilsson & van Hees 2013), ju lägre syrgashalt desto bättre skydd mot uppkomst och spridning av brand. I praktiken måste dock vald syrgasnivå vägas mot den negativa hälsorisk som en låg syrgashalt innebär för människor som ska

vistas i det skyddade utrymmet (Chiti 2009). Enligt arbetsmiljöverkets (Arbetskyddsstyrelsen 1993) bör syrehalten vara mellan 20-22 %. Om syrgashalten ska sänkas under denna nivå krävs extra åtgärder, detta kan innebära begränsningar i tid man vistas i utrymmet, läkarundersökningar och som en sista åtgärd personlig skyddsutrustning i form av luftpaket. I den svenska kärnkraftsindustrin möjliggjorde läkarundersökningar av personal samt tidsbegränsningar en syrgasnivå på 15 % utan att personlig skyddsutrustning används. Val av syrgasnivå är alltså en avvägning mellan den skyddsnivå som önskas samt friheten att vistas i utrymmet vilket styrs av hälsoaspekter, se Figur 4. I praktiken innebär detta att en syrgasnivå runt 15 % ofta väljs för utrymmen där man kan kontrollera tillträdet och vill ha en frihet att vistas under vissa premisser.



Figur 4 Faktorer som övervägs vid val av syrgashalt samt intressant område.

För närvarande finns det två standarder för brandskydd med syrgasreducerad miljö, VdS 3527en (VdS 2007) och PAS 95:2011 (BSI 2011). Dessa standarder specificerar en testmetod för att avgöra vilken syrehalt det ska vara i det skyddade rummet beroende på det brännbara materialet i rummet. Denna består i en svetslåga som appliceras på materialet under en viss tid för att avgöra om antändning sker eller ej. I VdS 3527en ges också det som kallas ignition thresholds och design koncentrationer för vissa material, vilka erhållits genom testmetoden. Inom brandtekniken finns många olika metoder för att avgöra ett materials brännbarhet och antändningsegenskaper vid olika syrgaskoncentrationer. Exempelvis oxygen index metoden enligt ASTM 2863 (ASTM International 2012), limiting oxygen concentration med Fire Propagation Apparatus enligt ISO 12136 (ISO 2011) eller motsvarande med en innesluten konkalorimeter enligt ISO 5660 (ISO 2002) samt den testmetod som specificeras för ignition thresholds i VdS 3527en (VdS 2007) och PAS 95:2011(BSI 2011). Tabell 5 redovisar olika erhållna syrgaskoncentrationer med de olika testmetoderna, under de angivna koncentrationerna kunde förbränning inte ske. Nedan kan ses att de olika metoderna ger väldigt skilda värden på syrgaskoncentrationen som krävs för att förhindra brand och brandspridning. Detta beror på skillnader i testmetoderna, för att erhålla LOC används t.ex. extern värmestrålning vilket inte används i VdS 3527en, i oxygen index metoden används en liten tändkälla och för NFPA 69 testas materialet som damm vilket underlättar förbränning då dammet är suspenderat i luft.

Tabell 5 Syrgaskoncentrationer under vilka förbränning inte kan ske i respektive testmetod.

Material	VdS Ignition threshold (Vol.%) (Design koncentration Vol%) (VdS 2007)	Limiting Oxygen Concentration (LOC) (Vol%) (Xin & Khan 2007)	Oxygen index ASTM 2863 (Vol%) (Charsley & Schulz 1975)	NFPA 69 (Vol%) (NFPA 2008)
Metanol	11,0 (10,0)	11,64	-	10
Etanol	12,8 (11,8)	12,40	-	10,5
PMMA	15,9 (14,9)	10,48	17,8	
Polyeten	HD: 16,0 (15,0) LD: 15,9 (14,9)	LD: 11,39	HD: 16,9	h.p.: 10
Wellpapp	15,0 (14,0)	12,86	-	-
PVC	16,9 (15,9)	-	44,9	-

Som exempel kan tas PMMA, där syrgaskoncentrationen varierar mellan 17,8 % och 10,5%. Den normalt använda koncentrationen på 15 % i många fall ger enligt standarden VdS 3527en ett sådant skydd att man förhindrar brand, dock kan det konstateras att PMMA brinner ner till i alla fall 10,5 % under vissa förhållanden, i detta fall när det förekommer extern strålning (som kan uppkomma om t.ex. brand anläggs med brännbar vätska). Det kan alltså konstateras att syrgaskoncentrationerna som erhålls med de olika testmetoderna förhindrar brand under de förhållanden som råder i testmetoden. Skulle antändningsscenario, geometrisk konfiguration etc. vara mer utmanande kan det inte garanteras att brand förhindras (Nilsson & van Hees 2013). T.ex. brinner inte PVC enligt oxygen index metoden om syrgaskoncentrationen är under 44,9 %, trots detta vet vi att PVC brinner i normal luft.

Sammanfattningsvis kan konstateras att en syrgaskoncentration på 15 % förhindrar inte att brand uppkommer eller släcks. För att få ett brandskydd som verkligen förhindrar brand måste syrgaskoncentrationen sänkas ytterligare till det som kallas inerteringsgränsen, ofta runt 10 % syrehalt. Detta är som poängterats tidigare svårt att med hänsyn till hälsoaspekter. Dock finns det fördelar även vid högre syrgaskoncentrationer än 10 % men även en del utmaningar och nackdelar, dessa redogörs för i sammanfattningen av litteraturstudien.

### 6.1.3 Sammanfattning av litteraturstudien (samtlig information nedan kommer från (Nilsson & van Hees 2013))

#### Allmän slutsats

Generellt sett eliminerar inte en syrgaskoncentration på 15 % risken att en brand uppstår och vid en sådan koncentration kan systemet inte ses som ett substitut för ett traditionellt släcksystem i nuläget. Om systemet ska ses som ett substitut krävs att syrgashalten sänks ytterligare (ca 10 %) och i de fall detta är möjligt erbjuder den syrgasreducerade miljön ett bra brandskyddsalternativ för el-rum, kontrollrum, datorrum, och rum med känslig utrustning i multifunktionella byggnader. Dessvärre är det ofta svårt med hänsyn till hälsoaspekter att uppnå en sådan låg syrgaskoncentration, dock finns det fördelar med systemet även vid 15 % syrgaskoncentration men där är också utmaningar och nackdelar.

#### Fördelar med reducerad syrgashalt (till ca 15 %)

- Lägre sannolikhet för antändning och möjligtvis förlängda antändningstider.
- Effektutvecklingen sänks och det finns indikationer på reducerad flam- och brandspridningshastighet vilket medför reducerad brandspridning mellan bränslepaket.
- Den reducerade syrgasmiljön är alltid närvarande och behöver inte aktiveras i händelse av brand.

#### Nackdelar och utmaningar

- Hur stor effekt ovanstående fördelar har förefaller vara mycket materialberoende och information finns i princip bara för generiska material (PVC, PMMA osv). Många

komponenter i aktuella typer av rum består av en kombination av material och det är inte säkert att alla material uppvisar samma fördelaktiga beteende.

- Bränslets konfiguration (geometriskt) är ytterst viktigt precis som orientering och avstånd till andra bränslepaket vilket medför att återstrålning av värme kan uppstå vilket ökar risken för såväl antändning som brandspridning. Syrgashalterna som erhålls med tester enligt PAS 95:2011 och VdS 3527en tar inte hänsyn till sådana parametrar och användandet av de av standarderna rekommenderade syrgasnivåerna kan innebära ett otillräckligt skydd.
- Produktion av rök och sot ökar vilket leder till ökade skador i händelse av brand. Det ska dock beaktas i ljuset av att massavbrinningen minskar.
- Informationen om tillförlitlighet för systemen är osäker och det finns troligtvis ett behov av redundanta system (detektion, släcksystem och produktion av reducerad syrgasmiljö).
- Hälsoaspekter måste hanteras där exponeringstider, läkarundersökningar, ansträngande arbete, ökad risk för mänskliga fel, tekniska installationer, information etc. beaktas.

### **Speciella aspekter för känsliga utrymmen i multifunktionella byggnader**

I el-rum finns potentialen för en hög elektrisk urladdning med en förhöjd temperatur som följd, med hänsyn till detta måste det också beaktas att brännbarhetsgränserna utvidgas med ökad temperatur. Vidare måste effekten av ökad produktion av rök och korrosiva gaser tas i beaktande då det kan innebära ett förvärrat skadescenario för känslig utrustning.

Där höga krav ställs på tillförlitlighet och redundans, vilket kan vara aktuellt för multifunktionella byggnader med viktiga funktioner, finns det en möjlighet att ytterligare skyddssystem behövs i de fall syrgasnivån inte sänks under 10 % då syrgashalter över denna nivå har visat sig vara på gränsen till att ge ett acceptabelt skydd.

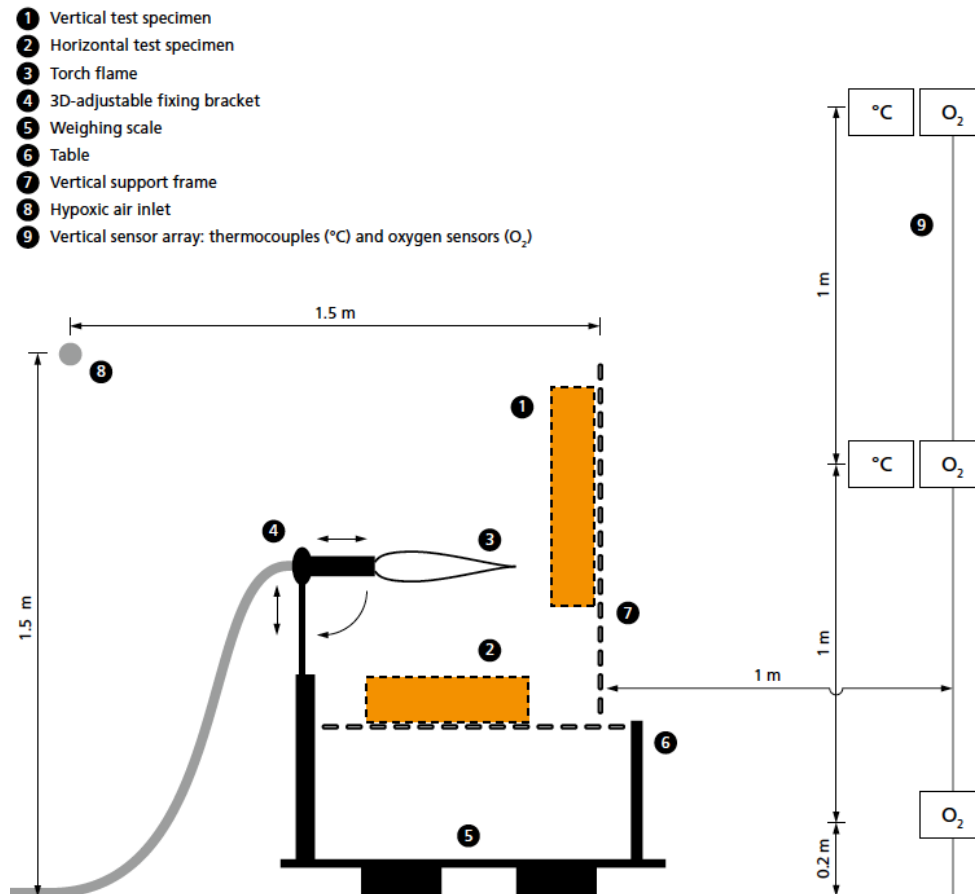
Vidare om ett system med reducerad syrgashalt installeras som brandskydd är det av yttersta vikt att brännbart material, utöver nödvändig utrustning, begränsas i dess utrymmen. Syrgashalterna som är framtagna ska vara framtagna för de material som finns i rummet och introduceras material som är mer brandfarligt än vad systemet är dimensionerat för finns det en överhängande risk att systemet inte fungerar som avsett.

### **Behov av fortsatt forskning**

Området är fortfarande relativt outrett och det finns ett stort behov av vidare forskning. Som exempel kan nämnas effekten av bränslets konfiguration avseende effektutveckling, brandspridning och antändning, sannolikheter för felfunktion, produktion av olika gaser, brandspridningshastighet, effekten av olika material mm. För en mer utförlig beskrivning av forskningsbehov hänvisas till Nilsson & van Hees (2013).

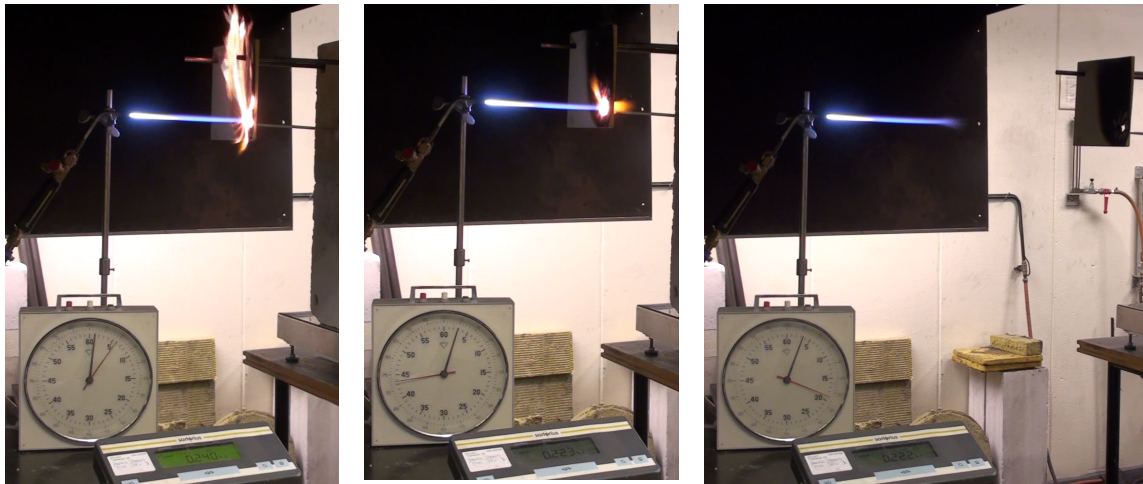
#### **6.1.4 Kort utvärdering av testmetoderna i PAS 95:2011 och VdS 3527en**

Testmetoderna i PAS 95:2011 och VdS 3527en är i princip likadana och innebär att svetslågan ska vara i storleksordningen 30 cm och materialet ska placeras 20 cm från lågans mynning (BSI 2011). Lågan ska vara inställd så att den är precis övergången från orange till blå låga och vara placerad med 90° vinkel mot provet (BSI 2011). Hela uppställningen placeras i ett rum med reducerade syrgasmiljö och lågan appliceras mot materialet i 3 minuter, därefter tas provet bort från lågan och om materialet slocknar inom 1 minut har konfigurationen klarat testet (BSI 2011, Chiti 2009). Det ska i detta sammanhang poängteras att beskrivningen av testmetoden och kriterierna är öppna för tolkning, metoden är inte speciellt detaljerad och exempelvis ges inga riktlinjer på vad som menas med "self-sustained burning" (ska det vara en flamma, räcker det att det ryker etc.?). Uppställningen för testmetoden redovisas i Figur 5



Figur 5 Testuppställning enligt PAS 95:2011 (BSI 2011)

En rad tester genomfördes i brandlabbet på Avdelningen för brandteknik och riskhantering på Lunds tekniska högskola. Dessa tester genomfördes enligt standarderna PAS 95:2011 och VdS 3527en i vanlig luft, dvs 21 % syrgaskoncentration och en del av dem finns också redovisade i Nilsson & van Hees (2013). Testerna visar att MDF passerar testmetoden vid 21 % syrehalt i alla genomförda tester, dvs enligt PAS 95:2011 och VdS 3527en så räcker det med 21 % syrehalt för att förhindra brand i MDF. Trots detta vet vi att MDF brinner. Vanlig träfiberskiva klarar testkriteriet i en del fall, detta är beroende av orienteringen av materialet och framförallt exakt var flammans placeras på materialet. Om flammans placeras så att en kant av materialet någon gång under testet börjar brinna så tenderar materialet att fortsätta att brinna även efter flammans tagits bort. De gånger materialet brann så fortsatte det framförallt att brinna på baksidan av provet, dvs den del av materialet som inte exponerats direkt från flammans. Det är möjligt att om materialet hade varit tjockare (det som användes för träfiberskivan var 10 mm) så hade det inte brunnit igenom materialet och testet hade klarats. Hursomhelst så klarar även träfiberskivan testet i vissa fall och det finns en möjlighet att testet ger svaret att träfiberskiva är tillräckligt skyddat vid 21 % syre.



*Figur 6 Bilder från test V4c med försöksuppställning enligt PAS 95:2011 och VdS 3527en, 21% syrgaskoncentration, t.v. 1 min, mitten 2 min 45 s, t.h. 3 min 20 s (materialet har slocknat och klarar testkriteriet).*

Det kan alltså konstateras att testmetoderna i PAS 95:2011 och VdS 3527en medför att material som vi generellt sett vet brinner och bidrar till en snabb brandutveckling i många rumskonfigurationer, t.ex. ett rum med träspånskiva på väggarna, klarar testet vid vanlig atmosfär. Det är därför ytterst tveksamt att testmetoderna ger en representativ och realistisk beskrivning av erhållen skyddsnivå.

Fördelen med testmetoden specificerad i PAS 95:2011 och VdS 3527en är att materialet placeras i ett rum med reducerad syrgashalt vilket representerar de förhållanden som råder i ett skyddat utrymme.

Testmetoden i sig har en rad nackdelar, vilket visats ovan där material som vi vet brinner ändå klarar specificerat test i normal atmosfär med 21% syre. Identifierade nackdelar är:

- Hänsyn tas inte till att t.ex. anlagd brand kan uppkomma vilket är viktigt för multifunktionella byggnader. En anlagd brand med brännbar vätska innebär en större tändkälla som medför en strålning mot bränslepaket, sådan extern strålning tas inte hänsyn till i testmetoden (Nilsson & van Hees 2013).
- Testmetoden tar dåligt hänsyn till bränslets konfiguration och olika geometrier (Nilsson & van Hees 2013). Exempelvis om bränslepaket är väldigt nära varandra med en luftspalt mellan, såsom kablar på en kabelstege eller lagring i pallställage, finns en stor potential för återstrålning mellan dessa kablar vilket ökar sannolikheten för brandspridning. Vidare tas inte hänsyn till geometrier såsom hörnor i rum osv som även de ger potential för återstrålning (Nilsson & van Hees 2013).
- Tjockleken på provet har betydelse och i VdS 3527en specificeras att tjockleken inte ska överstiga 25 mm. Ökad tjocklek ger längre tid till antändning (Berg & Lindgren 2004) och då testet innebär en applicering av antändningskällan under en begränsad tid kan det innebära att en verklig antändningskälla som pågår under en längre tidsperiod medför att brand sprids även vid den erhållna syrgashalten (Nilsson & van Hees 2013). På samma sätt om materialet som provas är tjockare än materialet som används i den verkliga applikationen så kan antändning också ske vid den erhållna syrgaskoncentrationen (Nilsson & van Hees 2013).
- Var lågan ska placeras på materialet för den vertikala konfigurationen är otydligt i standarderna och visade sig spela stor roll för resultatet.
- Testkriterierna i testmetoden är otydliga och behöver specificeras bättre.
- Det är svårt att praktiskt ställa in lågan och i princip omöjligt att få samma låga vid olika tester.
- Lågan är blå och värmestrålningen är i princip obefintlig. Dessutom är hastigheten på lågan så stor och riktas i 90° vinkel mot materialet att den tenderar att bränna rakt igenom materialet, när detta väl sker innebär det att lågan går rakt igenom materialet och den minimala värmestrålningen medför att brandspridning i princip inte sker för

de tester som genomfördes vid Lunds tekniska högskola. En annan faktor var att materialet förkolnar och isolerar bakomliggande oförbränt bränsle vilket också begränsar brandspridningen.

- Bränslet som används i tändkällan förefaller olämpligt. EN acetylen syrgas flamma har för hög förbränningshastighet och sotar för lite (Nilsson & van Hees 2013).

### **Diskussion avseende hur acceptabel syrgasnivå kan bestämmas samt behov av utveckling av testmetod**

En generell testmetod, för bestämmande av krävd syrgashalt för brandskydd med syrgasreducerad atmosfär, måste täcka in en stor variation av möjliga initierande händelser och efterföljande scenarier för att kunna säga att den erhållna syrekonzentrationen förhindrar brand- och brandspridning (Nilsson & van Hees 2013). Nackdelarna listade ovan medför att testmetoderna i PAS 95:2011 och VdS 3527en inte täcker in tillräckligt många möjliga antändningskällor och efterföljande scenarier.

Antändningskällan skulle behöva vara mer utmanande, förmodligen hade en mer sotande och lägre hastighet utgjort en mer utmanande tändkälla, men detta måste verifieras. Likaså hade scenariot förmodligen blivit mer utmanande om vinkel mellan låga och material hade justerats, t.ex. 45° då potentialen för genombränning av materialet minskar, även detta måste verifieras. Det ska i detta sammanhang poängteras att systemet egentligen inte är avsett att släcka en brand utan istället avsett att förhindra uppkomst av brand, detta innebär att tändkällan som används i testmetoden måste representera de möjliga tändkällor som kan tänkas förekomma i lokalen. Det finns även ett behov av att analysera den tändkälla som idag används för att ta reda på vilka verkliga tändkällor som täcks in av testmetoden, samma sak bör också göras i det fall en annan tändkälla föreslås för metoden. Då dagens testmetod inte förefaller täcka in detta krav rekommenderas i nuläget att genomföra en analys (exempelvis scenarioanalys eller riskanalys) av möjliga tändkällor och hur de beter sig brandtekniskt för att bestämma en lämplig tändkälla för den aktuella applikationen och testa materialet mot denna.

Testmetoden i PAS 95:2011 och VdS 3527en tar som sagt inte hänsyn till olika konfigurationer av bränsle, olika tjocklekar av material och bränslepaketens geometriska förhållanden till varandra. Ett sätt att ta hänsyn till detta är naturligtvis att bygga upp den verkliga konfigurationen och testa för den. Ett annat sätt är att applicera extern strålning för att ta hänsyn till denna typ av parametrar, detta skulle kunna göras genom modifiering av med metoderna specificerade i ISO 5660 (konkalorimeter) eller ISO 12136 (Fire Propagation Apparatus). Om risken för anlagd brand anses vara försumbar och att hänsyn inte behöver tas till detta scenario kan parallell panel test vara ett alternativ där två plattor av materialet placeras nära varandra och antänds mellan så att hänsyn till återstrålning tas, se t.ex. Xin och Kahn (2007). Extern strålning är även ett sätt att kompensera för materialets tjocklek och med ökad extern strålning minskar tjockleken betydelse på antändningstiden (Berg & Lindgren 2004).

Som allmän kritik mot testmetoden specificerad i PAS 95:2011 och VdS 3527en kan sägas att utförande, uppställning och testkriterier måste specificeras och tydliggöras mer detaljerat än vad som görs idag.

Avslutningsvis kan konstateras att aktuella testmetoder i PAS 95:2011 och VdS 3527en har en rad brister. I dagsläget förefaller det finnas två vägar att gå för att avgöra vilken syrgasnivå inom ett skyddat rum som säkerställer en acceptabel brandskyddsnivå:

1. Sänk syrgashalten till inerteringsgränsen, ca 10 % syrgaskonzentration förefaller vara en acceptabel nivå som täcker in de flesta fasta material.
2. Genomför tester på den specifika applikationen för att bestämma acceptabel syrgaskonzentration, dvs geometrier och konfiguration på bränslen, avstånd mellan bränslepaket etc och använd en tändkälla som täcker in de möjliga tändkällor som kan förekomma i det skyddade utrymmet.

Testmetoderna för reducerad syrgasmiljö som brandskydd behöver utvecklas. Om en generell testmetod ska användas som är allmängiltig ses i nuläget tre vägar att gå vidare för utveckling av testmetod:

1. Applicera extern strålning på materialet, t ex med modifierad ISO 5660 eller ISO 12136. Nivån på den externa strålningen som ska appliceras måste avgöras med hänsyn till vilka faktorer som ska täckas in, t ex tändkällans storlek, bränslets konfiguration och geometri osv.
2. Utveckling av parallell panel test och analys enligt punkt 1 för att utreda hur avstånd, längd på material, tjocklek på material, lämplig användningskälla etc ska utformas för att täcka in lämpliga tändkällor och konfigurationer.
3. Utveckling av befintlig testmetod i PAS 95:2011 och VdS 3527en framförallt avseende lämplig tändkälla, konfiguration av bränsle och avstånd mellan bränslepaket och specificering av metod och testkriterier.

### 6.1.5 Slutsats

Reducerad syrgasnivå för brandskydd av känsliga utrymmen i multifunktionella byggnader utgör ett bra skyddsalternativ i de fall syrgashalten kan hållas under ca 10% för fasta material. Detta skulle vara en möjlighet i utrymmen där personer generellt sett inte behöver vistas och där åtgärder såsom luftpaket kan vidtas i de sällsynta fall personer behöver befinna sig i utrymmena. Installation av syrgasreducering som brandskydd i enlighet med PAS 95:2011 och VdS 3527en förefaller åstadkomma en skyddsnivå där brand kan uppkomma och spridas under flertalet konfigurationer och applikationer och erhållna syrgasnivåer förefaller vara alldeles för mycket på osäkra sidan. I de fall syrgasnivåerna inte kan avgöras av inerteringsgränsen (dvs runt 10% för de flesta fasta material) med hänsyn till hälsoaspekter bör acceptabel syrgashalt avgöras av specifika tester för den verkliga applikationen i vilken systemet ska användas.

## 6.2 Standarder för brandskydd av elektrisk utrustning

Avseende skydd av elektrisk utrustning har resurserna för forskning koncentrerats till området med reducerad syrgashalt i avsnitt 6.1 eftersom detta är ett relativt nytt skyddssystem där många aspekter är utforskade. Övriga skyddsmetoder för skydd av elektrisk utrustning är mer beprövade och med hänsyn till detta har fokus legat på att hitta olika standarder för skydd av denna typ av utrymmen. Flertalet standarder har hittats, se NFPA (2011, 2012a, 2012b, 2013) och FM Global (2004, 2006, 2010, 2012a, 2012b, 2012c).

Avseende pyrotekniskt genererade aerosoler (PGA) har ett examensarbete utfört vid Lunds tekniska högskola hittats (Ekström & Nilsson 2009). Resultaten från försöken som genomfördes av Ekström och Nilsson (2009) visar att den PGA som de testade inte har korrosiva egenskaper och att spänningen inte förändras trots långvarig exponering av kretskorten. Sikten i det skyddade utrymmet påverkas negativt och vid utlöst system blir den i princip obefintlig. Detta anses vara dåligt för utrymmande personer men ger ett gott återantändningsskydd (Ekström & Nilsson 2009). Vidare bildades halter av ammoniak som kan vara skadliga för människor samt det konstateras att partikelstorlekarna på aerosolen är så små att de potentiellt kan vara skadliga för en människa, men detta är relativt outrett (Ekström & Nilsson 2009). Systemet rekommenderas inte i utrymmen där personer vistas mer än tillfälligt (Ekström & Nilsson 2009). Vidare konstaterar Ekström och Nilsson (2009) att forcerad ventilation i elskåp kan utgöra ett problem som medför att systemet inte fungerar som tänkt och i ett försök för rumsskydd släcktes inte branden. En NFPA-standard för utformning av skyddssystem med PGA har hittats, se NFPA (2010).

Det finns ett behov av vidare forskning på områdena diskuterade ovan. För traditionella skyddssystem skulle det vara intressant att studera aktiveringstider och tid till det att systemet anses ha effekt. Detta skulle kunna ge ett visst mått på skadans storlek och i det fall skadekriterier finns kan då skyddssystemets påverkan på brandskyddet avgöras, se också Nilsson (2013) för en vidare diskussion.

Ekström och Nilsson (2009) ger i sin rapport också förslag på vidare forskning för PGA vilket bla innefattar korrosionsanalyser, CFD-modellering och påverkan på finmekaniska system såsom hårddiskar.

## 7 Hur påverkas brandens utveckling av tändkällans storlek?

Anlagd brand är ett antagonistiskt hot som dessutom är relativt troligt att det realiseras, runt 15% av bränder är anlagda (Nilsson et al. 2012). En del bränder anlagda med brännbar vätska har fått stora konsekvenser, t.ex. branden i tunnelbanan i Korea 2003 där 192 personer dog (National Emergency Management Agency 2004), andra har fått betydligt mindre konsekvenser såsom branden på Pub i Stockholm (Aftonbladet 1998). Det är av intresse att undersöka vilken andel av möjliga bränder som täcks in i dagens dimensioneringsregler och även av intresse att vidare undersöka hur brandtillväxthastigheten påverkas då brand startas med brännbar vätska.

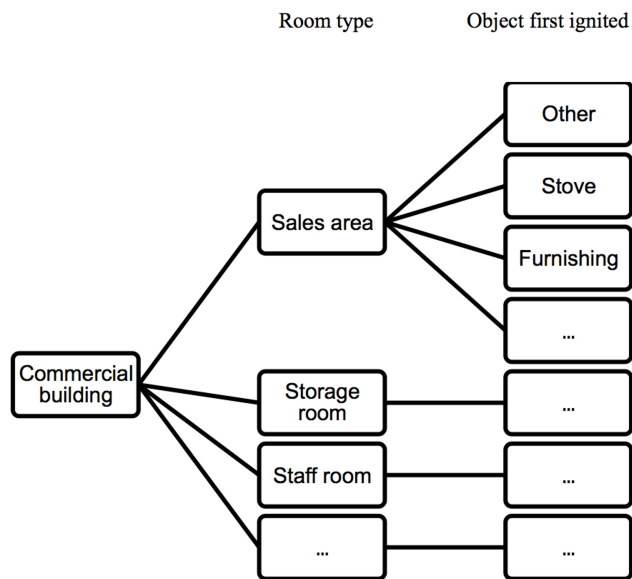
### 7.1 Kvantifiering av brandtillväxthastigheter och effekten av anlagd brand

Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering (Boverket 2011), som Boverkets byggregler (Boverket 2011) hänvisar till, anger en föreskriven brandtillväxthastighet som ska användas vid analytisk dimensionering. För samlingslokaler, vilket multifunktionella byggnader ofta är, anges en brandtillväxthastighet på  $0,047 \text{ kW/s}^2$ . Denna tillväxthastighet är relativt okvantifierad, dvs. hur stor andel bränder som täcks in med denna tillväxthastighet är relativt ovisst.

Med anledning av ovanstående så utvecklades en metod för att kvantifiera brandtillväxthastigheter. Metoden finns beskriven i sin helhet i Nilsson et al. (2014) och en koppling till multifunktionella byggnader görs i Nilsson (2013).

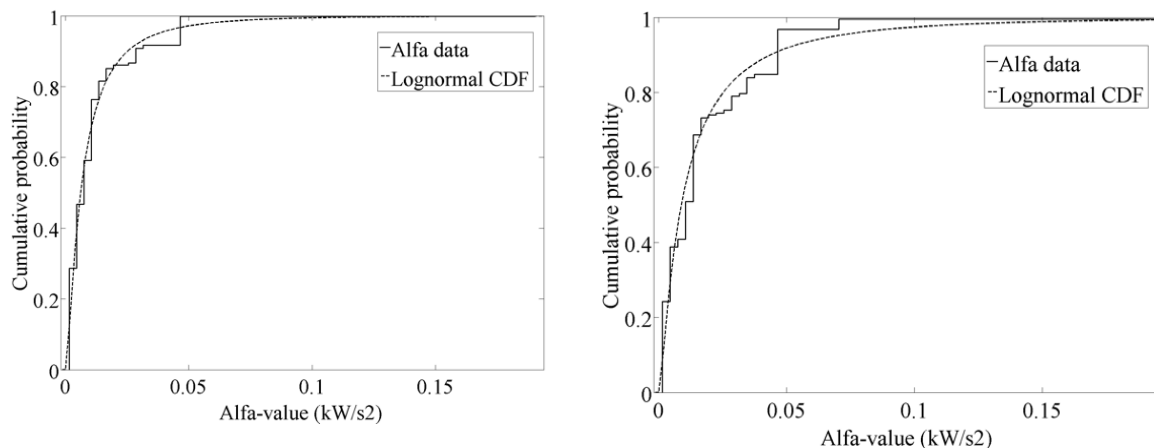
Att kvantifiera brandtillväxthastigheter medför fördelen att projektören kan utföra projekteringen med ett väldefinierat mål, t.ex. 95 % av alla brandtillväxthastigheter ska täckas in i dimensioneringen Nilsson (2013).

Den utvecklade metoden för att kvantifiera brandtillväxthastigheter tar sin utgångspunkt i brandens startobjekt och vad brandtillväxthastigheten är för det specifika startobjektet (Nilsson 2013). I princip används statistik (MSB 2012) avseende frekvenser för olika startobjekt i den specifika typ av byggnad som avses. Därefter används experimentell data för att avgöra lämplig brandtillväxthastighet för respektive startobjekt. De olika brandtillväxthastigheterna delas sedan in i intervall och ett histogram över brandtillväxthastigheter erhålls. Histogrammet är i en diskret sannolikhetsfördelning till vilken en kontinuerlig fördelning anpassas. Figur 7 visar principen för metoden, startutrymme användes för att erhålla en bättre uppskattning av brandtillväxthastigheter för startobjekt som var okända (Nilsson et al. 2014).



Figur 7 Bränderna kategoriseras med avseende på startobjekt och startutrymme (Nilsson et al. 2014).

Metoden applicerades på publika byggnader i Sverige, typ shoppingcenter (Nilsson et al. 2014). En del av resultaten redovisas i Figur 8 och Tabell 6.



Figur 8 Till vänster: uppskattad log-normalfördelning över brandtillväxthastigheter när anlagd brand inte är inkluderat. Till höger: uppskattad log-normalfördelning över brandtillväxthastigheter när anlagd brand är inkluderat. (Nilsson et al. 2014)

Tabell 6 Parametrar för log-normalfördelningar samt percentilvärden (Nilsson et al. 2014)

	$\mu_\alpha$ (Std. Err.)	$\sigma_\alpha$ (Std. Err.)	$E(\alpha)$ (kW/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{95}$ (kW/s <sup>2</sup> )	$\alpha_{99.5}$ (kW/s <sup>2</sup> )	Percentile for $\alpha = 0.047$ kW/s <sup>2</sup>
<b>Accidental fires (arson excl.)</b>	-5.091 (0.0231)	1.100 (0.0163)	0.011	0.038	0.105	97%
<b>All fires (arson incl.)</b>	-4.727 (0.0240)	1.246 (0.0170)	0.019	0.069	0.219	91%

Appliceringen av metoden visar att metoden kan användas för att kvantifiera brandtillväxthastigheter och också visa på effekten av anlagd brand (Nilsson et al. 2014). Exemplet för publika byggnader av typ shoppingcenter visar också att om anlagd brand inkluderas så blir brandtillväxthastigheten betydligt större. Som exempel kan ses att om en brandtillväxthastighet på  $0,047 \text{ kW/s}^2$  används, som är den som föreskrivs i de svenska byggreglerna (Boverket 2011), så täcks 97 % av bränderna in om anlagd brand inte inkluderas men endast 91 % av bränderna om anlagd brand inkluderas.

Styrkan med metoden är att den kan kvantifiera brandtillväxthastigheter och producerar log-normalfördelningar vilket är rimligt (Nilsson et al. 2014). Vidare producerar den värden som stöds av annan litteratur och kan visa på effekten mellan olika brandorsaker (Nilsson et al. 2014). Det finns dock en del utmaningar och osäkerheter såsom att bestämma brandtillväxthastigheter för startobjektet, rumseffekter ignoreras, det är svårt att kvantifiera effekten av brännbara vätskor och det finns osäkerheter i statistiken (Nilsson et al. 2014).

Det ska också nämnas att värdena ovan för de publika byggnaderna är ett exempel på användande av metoden som inte nödvändigtvis representerar verkliga förhållanden, värden bör därför inte användas för dimensionering utan vidare verifiering.

## **7.2 Brännbar vätskas effekt på brandtillväxthastigheten**

I de fall brännbar vätska används för att starta en brand uppstår frågan hur brandtillväxthastigheten påverkas. Exempelvis, om 2 liter brännbar vätska hålls ut över en soffa och denna antänds så kommer den brännbara vätskan snabbt brinna av och sen kommer soffan att fortsätta att brinna. I detta fall är det dock oklart hur soffans brandtillväxthastighet påverkas (Nilsson 2013).

Det endast gjorts begränsade tester på detta fall, Janssens et al. (2012) använde i storleksordningen 60-120 ml brännbar vätska och de redovisade att detta inte påverkade brandtillväxthastigheten nämnvärt jämfört med en gasbrännare. Dock ska det i detta sammanhang påpekas att denna mängd brännbar vätska på intet sätt representerar de mängder som normalt används vid anlagda bränder, vid anlagda bränder kan generellt förväntas större mängd brännbar vätska. Richards (2008) gjorde tester med Molotov cocktails och visade att tillväxthastigheten för dessa var väldigt snabb, antändning av sekundära objekt var dock begränsat till en trätrappa. Trätrappan är inte direkt porös och var svår att antända varför resultaten i detta avseende inte ger speciellt mycket information. Krüger et al. (2013) använde 1 liter brännbar vätska i en rumsbrand där det indikeras en betydligt högre tillväxthastighet än normalt men studien är relativt begränsad och ytterligare forskning behövs (Nilsson 2013).

Som ett resultat av ovanstående kommer ett examensarbete på Lunds tekniska högskola att genomföras under 2014 för att studera effekten av att antända olika startobjekt med brännbar vätska.

# **8 Övriga brandspridningsrelaterade forskningsfrågor**

## **8.1 Funktionsbeteende hos elektrisk utrustning**

Funktionsbeteende hos elektrisk utrustning är viktigt när utrustningen utgör en del av ett säkerhetssystem eller styrsystem. I multifunktionella byggnader kan det t ex vara styrning eller elförsörjning av fläktsystem som är avsett för brandventilation eller styrsystem för driften av transportsystem. Att behålla driften under en brand är viktigt eftersom det kan ha stora konsekvenser för samhället antingen i skador eller i driftbortfall. Området funktionsbeteende av elektrisk utrustning är viktigt inom bl a processindustri och kraftindustri, t ex kärnkraftverk. Inom dessa områden finns mest information att hämta. I Sverige har man forskat mycket kring funktionsbeteende av kablar. Arbetet initierades av kärnkraftindustrin och ledde till information om beteende av kablar vid exponering av både värmestrålning och temperatur (Andersson & van Hees 2000), (Andersson & Persson 2001) (Andersson & van Hees 2001). Ifrån dessa data utvecklades en enkel modell för att

kunna räkna kortslutning av en kabel vid brand baserad på en kritisk temperatur av t ex 180° C (Andersson & van Hees 2005). Denna modell introducerades senare i CFD modellen FDS som xx (Mc Grattan et al) som en del av ett arbete för NRC. Modellen validerades senare av Dreisbach et al (Dreisbach et al 2010) och Janssens (Janssens 2012). Modellen har visat sig att vara användbar trots att den är relativt förenklad men väldigt bra som ingenjörmodell i riskanalyser.

Inom området elektronik och funktionsbeteende används ofta en kritisk temperatur av 80° C. Ny data av bl a Gay (Gay et al 2011) visar att elektronik kanske fungerar vid högre temperatur. Samma författare har studerat funktionsbeteende av elektronik när den utsätts för sot och rök (Gay et al 2013). Även NRC och VTT (Mangs & Keski-Rahkonen 2001) har tidigare publicerat resultat om påverkan av sot på elektronik (Tanaka & Nowlen 1997). Det mesta av detta arbete har genomförts inom kärnkraftindustrin. Arbetet kan dock även användas vid en funktionsbaserad design av en multifunktionell byggnad om det finns krav på detta för att säkerhetsställa driften.

## 8.2 Hur täta är egentligen brandcellsgränser?

Det kan ifrågasättas hur länge en brandtekniskt avskiljande konstruktion i exempelvis EI 60 hindrar en brand från att sprida sig från ett utrymme där en brand uppträder med brandfarliga gaser eller vätskor på grund av t ex en antagonistisk attack. En snabbt uppflammande brand från brandfarlig vätska kan leda till betydligt snabbare temperaturökning än vid de brandförlopp som används i standardiseringssammanhang för provning av byggprodukter.

En brandteknisk avskiljning med lätta byggmaterial som gipsskivor och liknande klarar sannolikt inte heller de övertryck som uppstår vid en snabb temperaturökning vid brand inomhus, om inte särskilda åtgärder vidtas för att hantera problemet. Sådana åtgärder kan vara passiva system, i form av konstruktioner som tål de tryck som uppstår vid antändning och kan motstå brandpåverkan, alternativt en kombination av väggar och aktiva system som exempelvis släcksystem av typ ”explosion suppression”, eller tryckavlastningar.

Vid provning av branddörrar godtas ofta att rök och flammor förekommer på den skyddade sidan, så länge inte flammorna antänder en bomullstuss. Dock innebär detta inte något betryggande skydd mot brandspridning till ett utrymme där det råder explosiv atmosfär eftersom denna lätt kan antändas eller ett utrymme där utrustning finns som är känslig för rök, t ex elektronik eller styrsystem. I dessa fall skyddar kanske en vanlig brandcellsgräns inte tillräckligt. I vanliga byggnader som t ex bostäder är det kanske inte så viktigt. För multifunktionella byggnader är inte bara personskydd ett funktionskrav utan även driftsskydd krävs. I dessa fall behövs kunskap om spridning av gaser mellan brandceller. Dessa problemställningar har varit del av en annan studie finansierad av MSB inom deras studie om brandfarliga varor. Syftet med studien var att undersöka vilket skydd som olika brandtekniska klasser ger mot brand och explosion i brandfarliga gaser och vätskor, samt vilka eventuella tilläggskrav som är lämpliga för att säkerställa att brandcellsgränserna ska upprätthållas. Både tryckökning i utrymmen inomhus och direkt värmepåverkan beaktades. Studien resulterade i ett antal slutsatser där det visade sig att endast lite information är tillgänglig inom området och att tryck och temperatur vid bränder med brandfarliga vätskor vid antagonistiska hot är högre än vad som är fallet vid förlopp som följer standardbrandkurvan (van Hees et al 2013).

## 8.3 Brand- och brandgasspridning mellan oskyddade och skyddade utrymmen

En övergripande litteratursökning genomfördes i LUBsearch, Lunds Universitets sökmotor för vetenskapliga artiklar. Resultaten sammanfattas nedan där kombinationer av sökord redovisas, tillsammans med antalet träffar och antalet relevanta träffar.

Tabell 7 Litteratursökning för sprinklade och osprinklade bränder.

Sökord	Antal träffar	Antal relevanta träffar
Sprinkler, fire, unprotected	6	0
Sprinkler, fire, concealed	6	0
Sprinkler, fire, non-sprinklered	1	0

Det har gjorts en del tester på sprinklers effektivitet i tunnlar, se tex Li & Ingason (2013) och Ingason (2006), dock har inte effekten av brandspridning mellan skyddade och oskyddade utrymmen studerats. I en rapport från Forest Resources Research (Gardner & Whitlock 2005) genomfördes ett antal tester där en brand i ett oskyddat rum läts spridas till en korridor med sprinkler. Testerna visade att branden i korridoren kontrollerades (Gardner & Whitlock 2005) men det ska i detta sammanhang konstateras att korridoren var omöblerad om dock ibland med brännbara ytskikt.

En hel del artiklar finns om sprinklers tillförlitlighet och effektivitet vid jämförelse mellan sprinklade och icke sprinklade byggnader, se tex Frank et al. (2012), Melinek (1993) och Nystedt (2011). Dessa angriper dock inte problemet där sprinklersystemet inte kommer åt brandens bas.

Utifrån den övergripande litteratursökningen finns indikationer på att forskningen på området är ytterst begränsat och för att erhålla information om dessa effekter krävs att experiment och provning genomförs vilket inte ryms inom ramen för detta projekt.

#### **8.4 Hur påverkar tekniska byten brandspridning vid större brandkällor**

I avsnitt 7.2 konstateras att mer information avseende hur t ex brännbar vätska påverkar brandtillväxthastigheten. Detta är den vanligaste formen av större brandkällor och i och med att denna effekt inte är kvantifierad är det heller inte möjligt att utreda hur tekniska byten påverkar brandspridningen vid större brandkällor.

En bedömning är dock att i de fall systemen, t.ex. sprinklersystem, inte dimensionerats för den stora tändkälla eller snabba brandtillväxthastighet som större brandkällor kan medföra så kan det innebära att systemet inte fungerar som avsett och därmed inte kontrollerar branden. I de fall tekniska byten gjorts där t ex ett sprinklersystem installerats istället för brandteknisk avskiljning, och en stor brandkälla används kan det finnas en potential för att skadorna i händelse av brand blir betydligt större än om brandteknisk avskiljning installerats. Detta eftersom det passiva systemet i större utsträckning fungerar ett tag i jämförelse med aktiva system som oftast fallerar tidigt i brandförloppet när de fallerar.

#### **8.5 Dominoeffekter**

Pettersson (2014) utförde ett examensarbete med avseende att prova metoden presenterad i kapitel 4 och att analysera hur väl metoden kan ta hänsyn till dominoeffekter. Avseende dominoeffekter drar Pettersson (2014) slutsatsen att dominoeffekter bör delas upp i två kategorier. Den första är dominoeffekter till följd av att händelsen i sig eskalerar, exempelvis att en explosion efterföljs av en brand. Den andra är dominoeffekter till följd av nätverksberoende som medför konsekvenser i samhället som inte är fysiskt kopplat till händelsen den initierande händelsen.

För att ta hänsyn till dominoeffekter som sker till följd av att händelsen eskalerar anses en möjlighet vara att väga in detta då scenariot kvantifieras enligt figur 3 i Nilsson et al. (2013) och då kan troligtvis metoder från tex processindustrin användas, se avsnitt 5.2.2. Avseende dominoeffekter till följd av nätverksberoende så rekommenderar Pettersson (2014) att detta vägs in då skyddsmål och skadekriterier bestäms i metoden presenterad i kapitel 4. För ytterligare information hänvisas till Pettersson (2014).

I detta sammanhang kan också nämnas att diskussionerna avseende dominoeffekter medförde att SP, Lunds tekniska högskola och MSB sökte och beviljades ett forskningsprojekt på området, projektet benämns CascEff.

## 9 Utrymning

Ur ett utrymningsperspektiv utgör en multifunktionell byggnad ett exempel på det som brukar kallas komplex miljö. Begreppet som sådant är egentligen inte väldefinierat men brukar traditionellt användas för miljöer som är stora, svåröverblickbara och som omfattar en stor grupp människor. En komplex miljö kan även bestå av mindre lokaler men där verksamheten i sig är komplicerad och innehåller försvårande moment t ex inom vissa industriella miljöer (Frantzich & Nilsson, 2009).

Vidare brukar en komplex miljö kännetecknas av att personerna som vistas där normalt inte känner till miljön eller var utrymningsvägar finns och att storleken i sig gör att det kan vara svårt att ha en uppfattning om vad som pågår i en annan del av byggnaden.

Det faktum att det kan vara svårt att få en överblick över händelser inom byggnaden gör att frågor som orienteringsförmåga och faktorer som påverkar denna är väsentliga. Det kan exemplifieras med hur information till personer i byggnaden påverkar deras möjlighet att fysiskt ta sig ut och att hitta optimala vägar ut till det fria. Konsekvensen kan bli att personer kanske måste välja utrymningsvägar de inte känner till sedan tidigare.

Multifunktionella byggnader är vanligen ytmässigt stora vilket leder till att gångavstånden blir stora och att det kan uppstå långvariga kösituationer till följd av att många personer vistas i utrymnena. Kösituationen uppstår när den tillgängliga kapaciteten för utrymning inte är tillräcklig. Ett skäl till bristande kapacitet kan vara att det förutsatta utrymningsförloppet inte i tillräcklig utsträckning beaktat hur människor kan förväntas bete sig eller att det föreligger brister i de organisatoriska förutsättningarna i den multifunktionella byggnaden att hantera en massutrymning.

Till dessa aspekter kan också närvaron av branden läggas vilken dels kan spridas och skapa svårigheter att utrymma genom en lokal eller genom en utrymningsväg och dels att branden kan sätta olika tekniska system ur funktion vilket kan påverka möjligheterna att utrymma. Detta kan leda till att personer som inlett en utrymning kan tvingas att omvärdera sitt beslut att välja en ny lämplig väg ut ur byggnaden. Ett sådant beslut kan i det fallet behöva göras med begränsad mängd information om byggnaden i sig inte är känd sedan tidigare.

Vidare är blandningen av olika personkategorier vanlig i multifunktionella anläggningar. Det kan finnas allt från små barn som är på platsen med sina föräldrar till äldre personer eller personer med olika funktionsnedsättningar. Detta är en försvårande omständighet där kunskapsläget är klart bristfälligt. Att hantera en rad olika personkategorier utgör en dimension av begreppet komplexitet i anläggningarna.

Det finns således en rad aspekter som är relevanta ur ett utrymningsperspektiv för dessa multifunktionella byggnader. Inom ramen för forskningsprojektet har tre frågeställningar valts att undersökas mer i detalj;

- hur påverkas utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet?
- hur agerar personer som utsätts för ökande hot under utrymningsförloppet?
- hur kan byggnadens utrymningssystem anpassas efter det uppkomna hotet och i vilken grad anpassar sig personerna efter detta?

Av dessa har den första frågan undersökts genom fullskaliga utrymningsförsök medan de sista två frågorna har undersökts i en sk virtuell miljö (VR - Virtual Reality).

Slutsatserna från de genomförda försöken redovisas sammanfattande i avsnitt 9.4.

## 9.1 Hur påverkas utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet?

Frågeställningen har undersökts genom fullskaliga oannonserade utrymningsförsök som genomfördes i en biografmiljö. Frågeställningen undersöktes i tre oberoende utrymningsförsök och genomfördes som en del av en större undersökning av nyttan med talade utrymningslarm undersöktes. Förutsättningar och resultat finns mer utförligt redovisat i Holmström & Sävmark (2013). Motiven till att utföra försöken i en biografmiljö är flera men bl a

- att det finns goda möjligheter till upprepade försök med en förhållandevis homogen population och med nya individer i varje försök,
- att det finns tidigare genomförda försök som referens,
- att alla personerna i lokalen har ungefär lika förutsättningar att kunna uppfatta larm, de har sin uppmärksamhet riktad åt ett håll och de är inte involverade i någon speciell aktivitet annat än att de väntar på att föreställningen ska börja,
- att det inte finns personal på platsen.

Utrymningsförsöket upplevs dessutom oftast som ett mindre störningsmoment för de deltagande personerna vilket gör att personerna är intresserade av att fullfölja undersökningen genom att t ex fylla i en enkät efteråt. I de aktuella försöken dokumenterades försöken med i förväg monterade videokameror. Efter varje försök ombads deltagarna att fylla i en enkät med frågor om sina upplevelse av försöken och hur de uppfattade de olika larmen som provades.

### 9.1.1 Genomförande och förutsättningar

Försöken genomfördes på SF-biografen i Lund under hösten 2012. Totalt deltog 202 personer, 90 män och 111 kvinnor, se Tabell 8. Försöken genomfördes i samband med att reklamfilmen avslutades men före spelfilmen inleddes. Personerna satt på sina platser och ett talat utrymningsmeddelande spelades upp i lokalen. Meddelandet föregicks av en varierande tonsignal och meddelandet lästes upp både på svenska och engelska. Hörbarheten var sådan att meddelandet hördes tydligt i hela salongen. Meddelandet hade en fras som innebar att personerna omedelbart skulle lämna lokalen och meddelandet lästes upp med en manlig röst.

I samband med att larmet aktiverades tändes även belysningen i salongen vilket följer den normala proceduren för den aktuella biografen. Meddelandet stängdes av när samtliga personer i salongen hade rest sig upp dvs de hade förberett sig på att inleda utrymningen. Anledningen till att larmet stängdes av vid denna tidpunkt var att alla personer åtminstone skulle ha påbörjat sin utrymning. Mätning av personernas förberedelsetid, definierade som tiden tills en person ställt sig upp, mättes också vid försöken och skulle inte störas av att larmet stängdes av. Eftersom förberedelsetid och förflyttningshastighet varierade mellan olika individer hade några personer redan hunnit lämna lokalen när larmet stängdes av men majoriteten var fortfarande inne i salongen. Försöket avslutades när samtliga personer lämnat salongen.

Tabell 8. Deltagande personer

Försök	Antal män	Antal kvinnor	Total	Medelålder
1	19	26	45	49
2	45	51	97*	23
3	26	34	60	22

Antalet deltagare baseras på antalet inlämnade enkäter. \* En person har ej angett kön.

### 9.1.2 Resultat

I alla fallen stängdes larmet av ca en minut efter det startades. Då hade alla i salongen ställt sig upp och förberett sig på att lämna lokalen. I samtliga försök fortsatte försökspersonerna sin utrymning

även när larmet upphörde att höras. I två av försöken upphörde larmet mitt i en del av det talade meddelandet medan i det sista fallet upphörde det under en annars tyst period.

När larmet tystnade fortsatte utrymningen i samma takt som när larmet hördes. Ingen märkbar förändring uppstod. Ingen av de deltagande personerna kommenterade att larmet tystnade vilket kan tyda på att betydelsen av larmets information avtar efter hand.

## 9.2 Hur agerar personer som utsätts för ökande hot under utrymningsförloppet?

Frågeställningen har undersökts genom experiment i en virtuell miljö (VR - Virtual Reality). Försökspersoner har försatts i en miljö där de under en utrymning exponeras för en gradvis mer hotfull utrymningsmiljö. Bland annat försämras belysningen, ljudeffekter hörs och effekten av brandrök blir synlig. En mer utförlig beskrivning av försöken och dess genomförande och resultat finns beskrivet i Andrée, Frantzich och Nilsson (2014).

Experimenten genomfördes i en VR-anläggning som finns tillgänglig vid Lunds Tekniska Högskola, se Figur 9. Förenklat kan den liknas vid ett rum med 4 x 4 m<sup>2</sup> golvyta och 3 m höjd, med tre väggar på vilka en datoranimerad bild med hjälp av videoprojektorer kan visas. En fjärde projektor visar även en del av bilden på golvet där en försöksperson står under försökets gång. Med hjälp av polariserande glasögon kommer bilden som en försöksperson ser att upplevas som en tre-dimensionell bild och personen får en hög rumslig närvarokänsla. Försökspersonen kan förflytta sig genom den animerade miljön med hjälp av olika styrmedel t ex en handkontroll eller en sk head-tracker som gör att miljön följer försökspersonens huvudrörelser.



Figur 9 Illustrationer från VR-miljöer, rekonstruktion av Pompeji samt interiör från en operationssal.

Nyttan med att utföra försök i en VR-miljö är att en realistisk miljö kan skapas på en plats dit försökspersoner enkelt kan ta sig. Det finns också möjligheter att skapa miljöer som inte finns i den verkliga världen och på så sätt undersöka olika möjliga utformningar innan en fysisk modell skapas. Nackdelen med VR som experimentmetod är att en fysisk miljö trots allt är mer realistisk och att förenklingar i den artificiella miljön är nödvändiga att göra. Som exempel kan nämnas att interaktion med andra individer är svårt att åstadkomma på ett realistiskt sätt. VR passar därför bra för situationer där det kan förväntas att en person vistas på egen hand som exempelvis i samband med utrymning från en hotellkorridor.

Målsättningen med experimenten är att undersöka om personer som valt en utrymningsväg kommer att vända om och återvända om graden av hot under utrymningsförloppet succesivt ökar. De hot som personen utsätts för är

- explosionsljud
- belysningen släcks och ersätts av nödbelysning
- nödbelysningen reduceras till hälften
- rökeffekt reducerar sikten
- röktätheten ökar

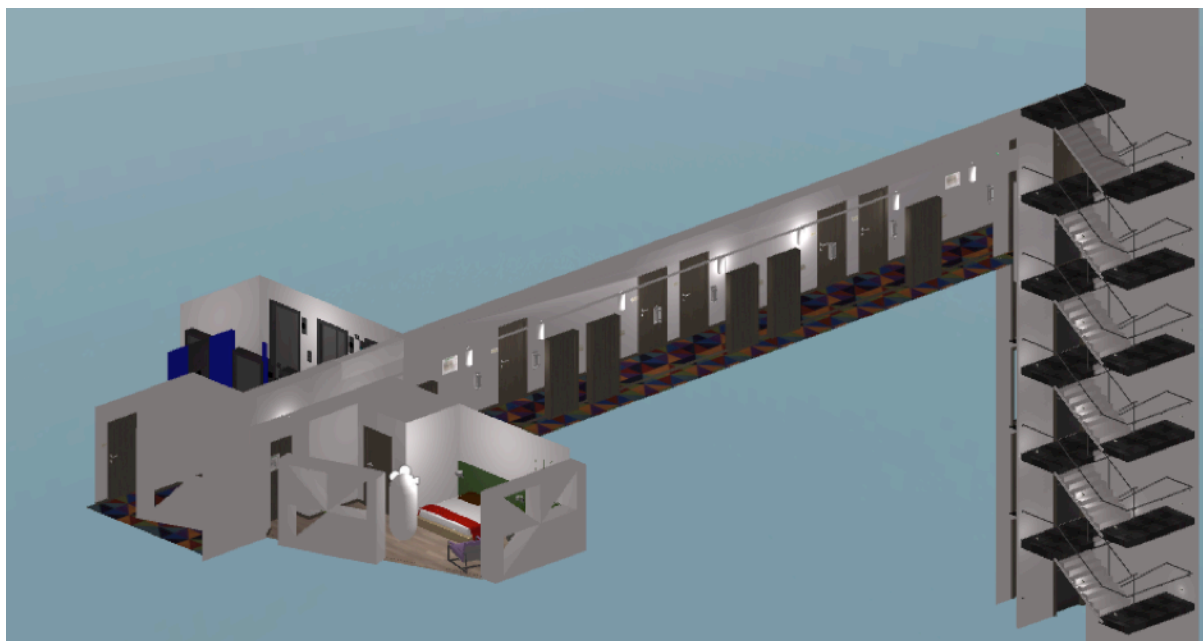
Hoten uppträder ett i taget allteftersom försökspersonen går nedför en trappa. Personen har hela tiden en möjlighet att fortsätta nedför trappan, att gå ut på ett våningsplan eller att vända om och gå upp för trappan igen.

### **9.2.1 Genomförande och förutsättningar**

Försökspersonen får först bekanta sig med utrustningen och informeras om hur förflyttningen sker genom att gå i en virtuell övningsbana. Därefter placeras försökspersonen i den miljö som undersökningen genomförs i. Försökspersonerna får en instruktion om att ta sig till sitt hotellrum på 16:e våningen, gå in i sitt hotellrum och sedan agera som han eller hon skulle gjort i en verklig situation. Den VR-miljö som skapades i projektet är baserad på ett existerande hotell, Figur 13. Det innebär att mått och utseende i korridorer, rum, hissar och lobbyn baseras på den verkliga byggnaden.

Proceduren i VR-miljön är att personen befinner sig i hotellobbyn, går fram till hissen och tar hissen till 16:e våningen till sitt rum. Väl inne i rummet startar byggnadens utrymningslarm efter några sekunder. Larmet är ett talat utrymningslarm som informerar att brand utbrutit och att byggnaden ska utrymmas. Meddelandet informerar också att hissen kan användas för utrymning. Eftersom hissen kan användas för utrymning kommer en del av försökspersonerna först att försöka använda hissen och därefter väljer de att utrymma via trappan eftersom hissen inte stannar vid det aktuella våningsplanet. Personen tar sig fram till utrymningsvägen som utgörs av trappan som leder nedåt, antingen direkt eller efter en väntetid i hisshallen. I trappan initieras sedan hoten ett i taget och läggs till varandra.

När försökspersonen tagit sig genom hela VR-miljön avslutas försöket och försökspersonen får besvara en enkät om sina upplevelser. Hela försöket dokumenteras även med en videokamera som visar försökspersonens vägval mm.



Figur 10 Illustration av VR-modellen av hotellet.

Totalt medverkade 44 personer och av dessa kunde 40 användas eftersom det i resterande fallen var svårt att se vid vilket våningsplan de lämnade trappan. Försökspersonerna rekryterades bland studenter och anställda vid Lunds Tekniska Högskola men majoriteten var studenter. Medelåldern ligger på 25 år och endast tre personer var över 30 år. Av de 40 försökspersonerna valde 20 personer att först försöka använda hissen för utrymningen. De väntar därför först en tid i hisshallen på 16:e våningen och omvärderar sedan beslutet när hissen inte kommer och väljer därefter trappan. Den andra gruppen försökspersoner väljer direkt att utrymma via trappan och överväger inte att ta hissen.

### 9.2.2 Resultat

Av de som gick nedåt i trappan valde ca 10 % att gå ut på ett våningsplan innan förhållandena blev sämre. Det innebär att de inte exponerades för något av de hot som ingick i försöket. De gick antingen ut på våning 15 eller tillbaka in på våning 16 igen, dvs samma våning som de kom från. Helt motsatt beteende uppvisade en fjärdedel av försökspersonerna dvs de gick förbi samtliga hot och genom hela trappan ända till bottenvåningen. Övriga dvs ca 65 % valde att lämna trappan efter att ha exponerats för minst ett hot. Av dem som valde att lämna trappan efter att ha blivit exponerad för minst ett hot valde en klar majoritet att lämna trappan först är rök kommit in i trappan. Explosionsljudet fick inte någon att lämna trappan, Tabell 9.

Tabell 9. Orsak till att försöksperson lämnat trappan av dem som lämnade på våning 1-14.

Orsak	Antal som lämnar trapphuset
Explosionsljud hörs	0
Belysningen slocknar och ersätts av nödbelysning	3
Nödbelysningen halveras	5
Rök uppstår i trapphuset	17

Detta innebär att försökspersoner som exponeras för ett direkt brandhot uppfattar detta som mer allvarligt än mer indirekta effekter från branden. När rök uppstår i trapphuset är det avgörande för flera att trapphuset inte längre är säkert att använda. Från undersökningar efter inträffade bränder (Bryan, 1983) visar det sig också att personer utrymmer under förhållandevis svåra omständigheter och vänder inte förrän röken blir mycket tät.

### **9.3 Hur kan byggnadens utrymningssystem anpassas efter det uppkomna hotet och i vilken grad anpassar sig personerna efter detta?**

Försök i en VR-miljö har genomförts för att besvara frågeställningen. Utgångspunkten är att byggnadens detektionssystem kan utnyttjas för att vägleda personer genom en byggnads okända vägar för utrymning utan att de blir exponerade för en brand och snabbt kan ledas till det fria. En förutsättning för ett sådant system är att de personer som utrymmer litar på att vägledningen ger rätt information samt att informationen som ges tolkas på ett sätt som leder till det önskade resultatet dvs att personer leds till en säkrare plats. Försöken som genomförts finns redovisade i Johansson & Petersson (2013) och analyseras vidare i André, Frantzich & Nilsson (2014).

Vägledningen görs med hjälp av en byggnads normala vägledande markeringar som kompletterats med blinkande lampor som antingen är röda eller gröna. Hypotesen är att personer kan förmås att välja utrymningssväg om dessa är grönmarkerade eftersom grön färg har en symbolisk innebörd av säkerhet (Wickens & Hollands, 2000). Röd färg symboliserar å andra sidan varning eller fara.

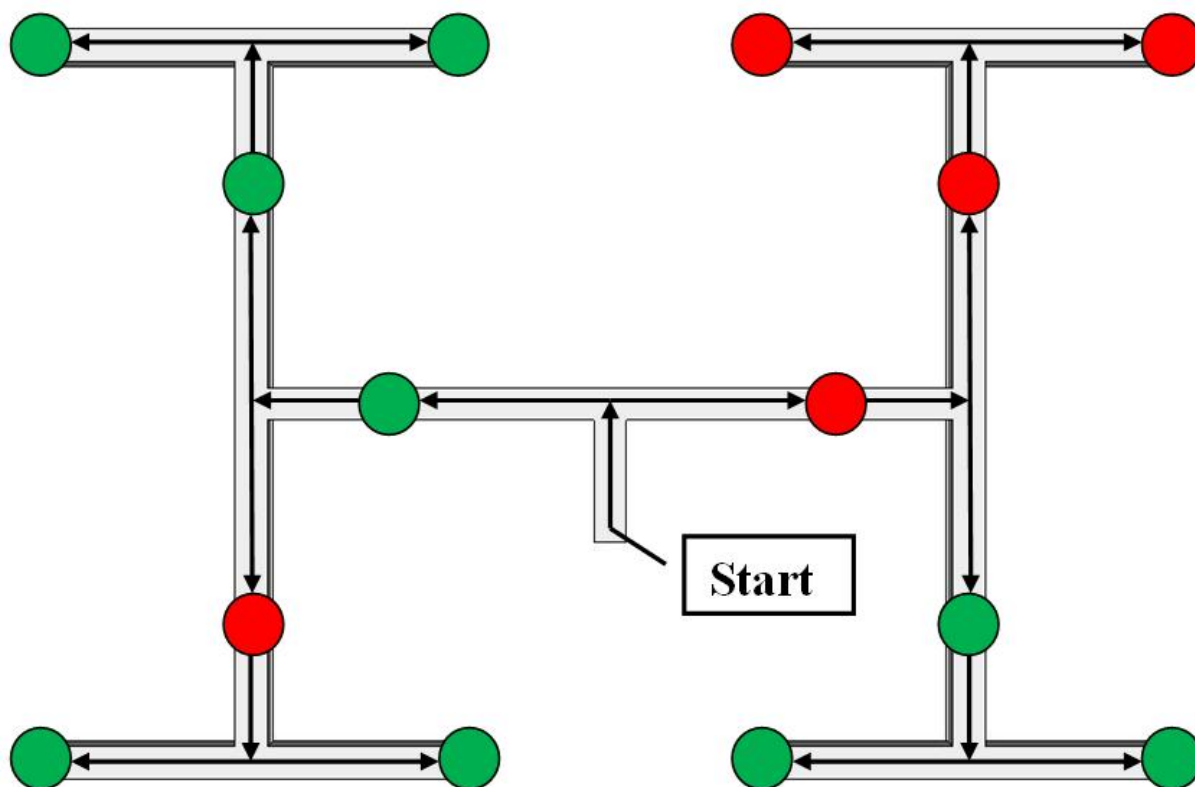
#### **9.3.1 Genomförande och förutsättningar**

Försöken genomfördes i LTHs VR-anläggning, se avsnitt 9.2. Målsättningen med försöken är att se om personer som leds in i ett korridorsystem kan förstå hur en lämplig väg ut ska väljas och om detta val kan ändras om förutsättningarna för beslutet förändras. Utgångspunkten är att personen ifråga kan betraktas som antingen en ensam individ i en utrymningssituation eller om personen utgör den första personen i en grupp. I det senare fallet antas då att efterföljande personer kommer att välja samma alternativ. Denna fråga har dock inte undersökts eftersom samtliga försök är utförda med en ensam individ.

Försöksuppställningen består av ett korridorsystem som skapats i VR, Figur 11. Korridorerna är uppbyggda så att varje försöksperson under försökets gång kommer till tre platser där han eller hon tvingas fatta ett beslut om vägvalet. Vid dessa platser finns vidare utrymningssvägar i två riktningar. Avståndet från platsen där beslutet fattas är 25 m till respektive dörr. Efter varje dörr är det sedan 15 m till efterföljande plats för nästa beslut. Korridoren är ungefär 4 m bred och 3 m hög vilket är en anpassning till VR-kuben som ger en realistisk miljöuppfattning om storleken på det virtuella utrymnet är minst lika stort som kubens mått.

Varje korridorände är försedd med en dörr med en vägledande utrymningsskylt över dörren samt blinkande lampor intill skylten. Det som skiljer alternativen åt är att det finns ett blinkande rött sken åt ena hållet och ett blinkande grönt sken åt andra hållet, Figur 12. Ljusstyrkan för den blinkande effekten justerades så att upplevelsen var att det lyste lika starkt från båda hållen, även om bilderna i Figur 12 inte uppvisar den effekten. Blinkfrekvensen var 1 Hz och illusionen av ljusskenet var gjord för att efterlikna glödlampor som blinkar. Även ljuseffekter på väggarna i närheten av dörrarna förstärkte effekten av ett verkligt ljussken.

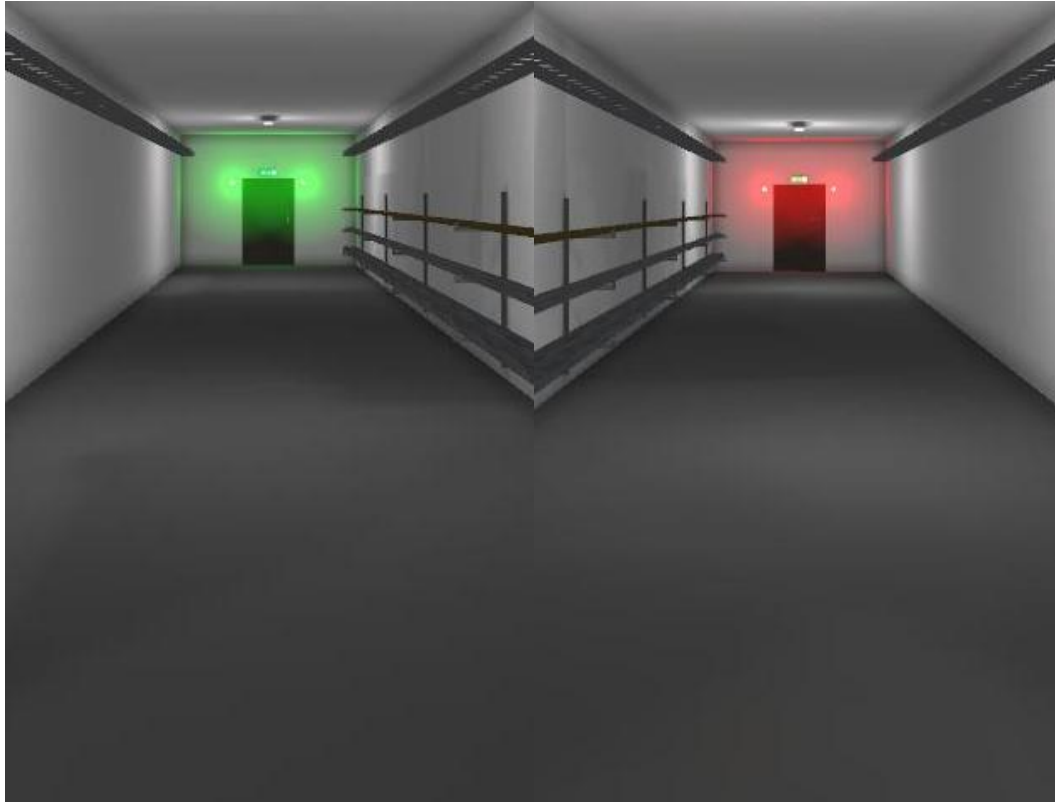
Vid den första beslutspunkten står valet mellan ett grönt och ett rött alternativ. Detsamma gäller vid den andra beslutspunkten. Dock så är placeringen av rött och grönt alternativ olika mellan första och andra beslutspunkten. I första fallet är grönt åt vänster men i andra fallet är grönt åt höger. Motivet till att ha två lika beslutsalternativ bortsett från riktningen för färgerna är att se om försökspersonen medvetet väljer en specifik färg eller om försökspersonen väljer ritning oavsett färgen för utrymningssvägen.



Figur 11 Uppbyggnaden av korridorer till försöksmiljön. Varje färgad cirkel indikerar en dörr i korridoren med blinkande ljus i aktuell färg.

Vid den tredje beslutspunkten är alternativen olika utformade beroende på vilken väg personerna gått för att komma dit. De två beslutsalternativen är dessutom lika utformade dvs de är försedda med blinkande ljus i samma färg. I tre av fallen är färgen på det blinkande ljuset grönt men i det fjärde fallet är belysningen vid båda dörrarna röda. I detta sista fall kan personen enbart komma till beslutspunkten om föregående beslut har varit att välja röda alternativ. Detta kan bero på att personens preferenser är att röd färg indikerar säkerhet.

Det som också skiljer i den sista korridorsträckningen är att färgen för det alternativ som personen väljer att gå mot ändras när personen gått ca 10 m. Om färgen för det blinkande skenet från början var grönt så växlar det till rött. Färgen för det alternativ som inte väljs kommer att bestå hela tiden. Förändringen sker oavsett vilket av de två alternativen som försökspersonen väljer i sista beslutspunkten. Motivet till att skifta färg är att se om personen väljer att förändra valet av utrymningsväg när han eller hon ser att den valda utrymningsvägen får nya förutsättningar.



Figur 12 Illustration av de två beslutsalternativen sedda från platsen där försökspersonen väljer alternativ.

Försökspersonerna rekryteras bland studenter på LTH. Det innebär att medelåldern är ganska låg, i genomsnitt 22 år. Ingen av de deltagande var färgblind. Totalt deltog 40 personer och det var lika många män som kvinnor. Försöket genomfördes med en försöksperson i taget. Försökspersonen får först bekanta sig med utrustningen och får öva sig att förflytta sig i miljön genom att gå i en virtuell övningsbana. Därefter placeras försökspersonen i på startplatsen, se figur 11. Försökspersonen fick en kortare text uppläst som innebar att de skulle föreställa sig att en brand utbrutit och att de skulle ta sig ut.

När försökspersonen kommit till sista dörren avslutades försöket och personen fick fylla i en enkät med frågor kring upplevelsen av försöket och de olika beslutsalternativen.

### 9.3.2 Resultat

En klar majoritet valde att följa de genomgående grönmarkerade alternativen och ändrade sig i sista korridoren när grönt bytte till rött, 35 personer av 40 personer. Av de fem som återstår valde två att gå genom den rödmarkerade dörren i första valsituationen men valde därefter gröna alternativet och ändrade beslutet när grönt bytte till rött i sista korridoren. Det är alltså 37 personer som föredrar det gröna alternativet och som medvetet väljer detta.

De sista tre personerna är svårare att förklara annat än att de hellre föredrar de röda alternativen (två personer) eller väljer att gå endast åt ett håll, en person som genomgående väljer att gå åt vänster. Ingen av dessa tre omvärderar beslutet i sista korridoren när det växlar färg.

Alla försökspersoner uppger i sina enkätsvar att de associerar grönt med säkerhet och rött med fara. Av dem som ändrade beslutet i sista korridoren när färgen ändrade sig (i samtliga fall från grönt till rött) associerade 31 försökspersoner, av de 37 personerna, skiftet till något som har med branden att göra medan sex personer inte gjorde den kopplingen. Närvaron av de blinkande lamporna var mycket

betydelsefulla för vägvalet och en övervägande andel angav i sina enkätsvar att de valde det alternativ de ansåg vara det säkraste.

## 9.4 Slutsats

Forskningsprojektet har gjort det möjligt att undersöka ett antal frågeställningar genom försök. Från dessa försök kan ett antal slutsatser konstateras:

1. Det kan konstateras att personer i en biografmiljö inte avbryter en påbörjad utrymning även om larmsignalen i form av ett talat utrymningslarm upphör att fungera (avsnitt 9.1).
2. Försöken i VR-miljön med hotell visar på liknande resultat som undersökningar från inträffade bränder angående orsakerna till varför personer omvärderar sitt beslut att fortsätta utrymningen längs den valda vägen. Främst är det närvaron av rök i utrymningsvägen som är orsaken till att personer väljer att ändra utrymningsstrategi (avsnitt 9.2).
3. Försöken i korridorkonfigurationen visar att gröna blinkande lampor vid utgångar som används för utrymning kan användas för att vägleda personer som utrymmer till en bestämd plats (avsnitt 9.3).
4. Av totalt 40 försökspersoner i korridorkonfigurationen kan det konstateras att 37 personer väljer att utrymma mot grönt ljus. Dessa 37 försökspersoner omvärderar sitt beslut när den valda utgången, som från början är försedd med grön blinkljus, växlar till rött blinkljus (avsnitt 9.3).

## 10 Bärande konstruktioner

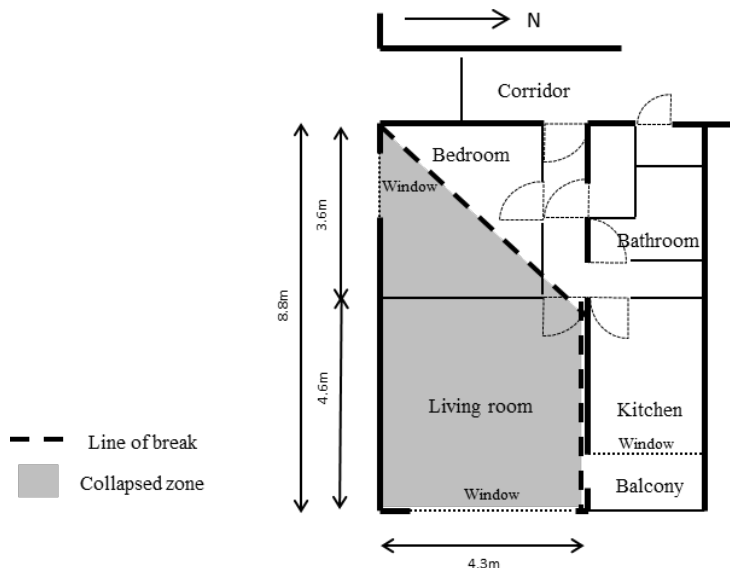
### 10.1 Hur sårbara är multifunktionella byggnader när det gäller explosion?

Hur kan man uppskatta påverkan av en explosion på en byggnad och finns det vägledning (Guidelines) för hur man estimerar risken för en sådan explosion uppstår samt hur man designar en byggnad för att motstå en explosion?

Dessa forskningsfrågor har behandlats i SP rapport 2013:11 (Lange 2013). Nedan återfinns en sammanfattning av rapporten och dess slutsatser.

Denna rapport ger en översikt av internationell statistik kring explosioner samt en diskussion av ett antal större bombdåd för att illustrera såväl samhällets sårbarhet för explosioner som den omfattande skada de kan orsaka. Generellt fann man att antalet explosionsincidenter var låg men att det finns en ökande trend. I fall där explosionen påverkar strukturen orsakar den stor skada, t ex den oproportionerliga kollapsen vid Ronan Point (se Figur 13) eller den fortskridande kollapsen som observerades vid båda Ronan Point och i den federala byggnaden i Oklahoma (se Figur 14).

Omfattande strukturell skala kan ske utan oproportionerlig eller fortskridande kollaps som visades i t ex World Trade Centreexplosionen 1993, Manchesterbombattacken eller i Buncefield. Det är dock viktigt att notera att eftersom fortskridande eller oproportionerlig kollaps inte varit något stort problem har byggreglerna lyckats begränsa den skada en explosion kan orsaka alternativt att de byggnader som utsatts för explosioner inte varit sårbara för just denna typ av kollaps antingen pga byggnadens design eller explosionens storlek.



Figur 13 Ronan Point horn lägenheten innan och efter explosionen. Bilden är inte skalenligt, alla dimensioner är ungefärliga. Omritad från referens (Rasbash et al. 2004)



Figur 14 *Murrah Federal Office Building i Oklahoma City efter bombattacken 1995 (Public Domain photo courtesy of the US Federal Government).*

Rapporten diskuterar den fysiska påverkan av explosioner och hur dessa kan representeras och tas hänsyn till i fysiska modeller. Huvuddelen av skadan från en explosion orsakas av tryckvågen som innehåller större delen av energin som frigörs vid explosionen. Tryckvågen rör sig ut från explosionscentrum och resulterar i en i det närmast momentan ökning av omgivande tryck till värden mycket över atmosfärstryck. Detta kallas ”side-on” övertryck. Övertrycket avklingar snabbt när tryckvågen passerar och det omgivande trycket kan tillfälligt sjunka under atmosfärstryck. Storleken på den högsta ”side-on” övertryck kan oftast beräknas baserat på endast två parametrar; avståndet från explosionskällan och storleken på laddningen.

US Department of Defence har publicerat en sk ”Unified Facilities Criteria” för design av strukturer föra att klara extra belastning. Dokumentet ger detaljerad information angående design av betong och stålstrukturer för explosionslast (US Department of Defence 2012). Enligt detta dokument ingår följande designstrategier när man dimensionerar en byggnad för att motstå påverkan av terrorattacker:

- Maximera skyddsavstånd
- Förhindra byggnadskollaps
- Minimera risken för flygande fragment
- Utnyttjande av en effektiv byggnadslayout
- Begränsning av luftburna gifter
- Utnyttjande av masskommunikation

Designen av byggnader för att motstå explosioner har genomgått en stor utveckling under senare år. Detta är säkert delvis pga utvecklingen och utbudet av både mjukvaror och datorkapacitet som skett inom området på samma sätt som för byggnadskonstruktioners bärförmåga vid brand. Alternativa mekanismer detaljstuderas och används som stöd vid byggnadsdesign samt för att identifiera svagheter i designen som t ex kopplingar som inte är tillräckligt flexibla vid stora skjuvkrafter. Utmaningarna

när en byggnad skall dimensioneras för att tåla en viss explosionslast liknar de som är vanlig vid branddimensionering, t ex osäkerheten i lasten, svårigheten p g a komplexa material och element egenskaper samt beteende under stor skjuvning och kraftig deformation.

## 10.2 Hur viktiga är materialegenskaperna hos betong när man utvärderar brandmotståndet hos betongelement?

Betongpelare och väggmoduler utsätts för stora trycklaster i många platsgjutna betongkonstruktioner, t ex parkeringsgarage.

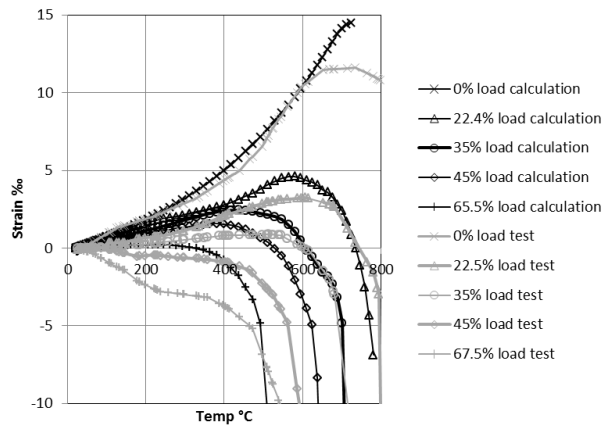
I Eurokod 2 finns en materialmodell för betongs beteende vid hög temperatur men principen för en mer avancerad modell baserad på deformationsbeteendet redovisas också. Deformationen delas där in i i i i fyra komponenter (CEN/TC250 2004), den fria termiska utvidgningen,  $\varepsilon_{th}$ ; den direkta lastberoende deformationen  $\varepsilon_{\sigma}$ ; kryp deformationen,  $\varepsilon_{cr}$ ; och den transient töjningen  $\varepsilon_{tr}$ . Den transient töjningen definieras ibland som “den del av den totala töjningen när man hettar upp tryckbelastad betong som inte kan bestämmas på annat sätt” (Anderberg & Thelandersson 1976). De fyra komponenterna som ingår i den totala töjningen kan ses is ekvation 1:

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{tr} \quad (1)$$

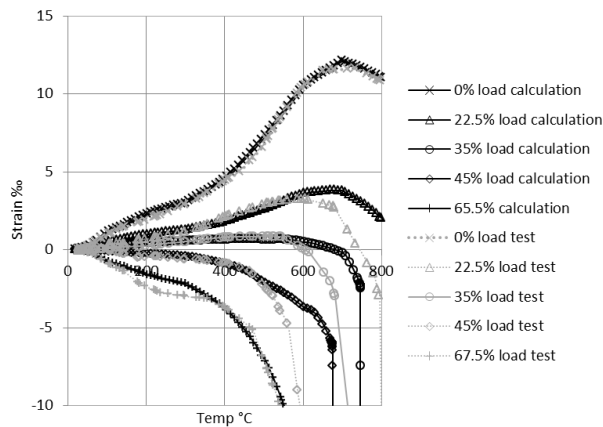
Den termiska utvidgningen är beroende av temperaturen T; den mekaniska deformationen är beroende av spänningen,  $\sigma$ , och temperaturen; krypningen är beroende av spänningen, temperaturen och tiden, t, samt den transienta töjningen är beroende av spänningen och temperaturen. I (Lange & Jansson 2014a, 2014b) behandlas fenomenet transient töjning mer ingående. Detta fenomen inkluderas implicit i materialdatamodellen i Eurokoden vilket är en tydlig förenkling. För att undersöka konsekvenserna av denna förenkling har en fallstudie gjorts där beräkningar baserade på både den den förenklade modellen i Eurokoden och en mer avancerad modell där den transienta töjningen definieras explicit jämförs med experimentella data. Experimenten som valts som referens är provningarna som gjordes av Anderberg och Thelandersson på 70-talet (Anderberg & Thelandersson 1976).

Testerna som används för jämförelsen utfördes på betongcylindrar med höjden 150 mm och diametern 75 mm med ett hål med diametern 10 mm i centrum av cylindrarna. Provkropparna var lastade med konstant last på samma gång som de upphettades med en temperaturhöjninghastighet av 5°C per minut. I Figur 15 visas en jämförelse mellan experimenten vid olika spänningsnivåer och en finitelementberäkning med programvaran Abaqus. Beräkningen är i detta fall baserad på materialmodellen och materialdata från Eurokoden. I jämförelsen kan man se en ganska bra korrelation mellan beräkningarna och experimenten när spänningsnivån är under 25% av tryckhållfastheten vid rumstemperatur men vid högre spänningsnivåer görs en kraftig underskattning av inverkan av den transienta töjningen på resultatet.

För att göra en jämförelse med en mer avancerad beräkningsmodell gjordes samma beräkning om med denna gång med den transienta töjningen definierad explicit enligt Anderbergs och Thelanderssons modell (Anderberg & Thelandersson 1976). I detta fall är man också tvungen att justera materialmodellen i Eurokoden för att inte inkludera effekten av transient töjning även i materialdata vilket gjordes baserat på materialdata från Schneider (Schneider 1982). Resultatet från dessa beräkningar jämfört med experimenten kan ses i Figur 16.



Figur 15 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad töjning hos cylindrar under upphettning. Beräkningar utförda enligt Eurokod 2 där den transienta töjningen är inbakad i materialdatan.



Figur 16 Jämförelse mellan uppmätt och beräknad töjning hos cylindrar under upphettning. Beräkningar utförda med explicit transient töjningsformulering samt materialdata från Schneider.

Jämförelsen mellan de två olika sätten att beräkna visar att modellen som finns i Eurokoden bara stämmer relativt bra med experimenten för låga lastnivåer men att den inte kan reproducera beteendet vid höga lastnivåer. När lastnivån blir högre måste en explicit modell av den transienta töjningen användas om det experimentellt uppmätta beteendet ska reproduceras, se Figur 16.

### 10.3 Vilka faktorer bör beaktas när håldäck dimensioneras för brand?

Flera incidenter de senaste tio åren pekar på potentiella problem med håldäck vid brand. Ett exempel är branden i Rotterdam där branden bröt ut i ett garage under ett hyreshus 2007 (Kleinman & Linssen 2011). Efter endast en kort tids brandexponering spräcktes håldäcken och dess nedre delar föll ned till golvet. Denna typ av brott hade inte observerats tidigare och ledde till omfattande studier av fenomenet i Nederländerna. Några av resultaten publicerades på holländska i ett specialnummer av tidningen Cement 2011. Mer resultat från studierna kan hittas i ett öppet brev från BFBN i Nederländerna daterat november 2009 och i ett uppdaterat brev i juni 2011 (Pielkenrood 2011). Skadorna från branden på håldäckskonstruktionen kan ses i Figur 17 där nedre delen av konstruktionen fallit av.



Figur 17 Skador på håldäcket efter branden i Rotterdam (Van Overbeek et al, 2010)

Den 10 december 2010 utbröt en brand i varuhuset ”Hong Kong” i Vantaa, Finland (Helsinki Times 2010, YLE.fi 2010). Byggnaden som bestod av en stomme av betong och håldäcksbjälklag var från 1986. Ovanför brandcellen observerade räddningstjänsten deformationer och sprickor i golvsystemet. Det trängde upp rök genom dessa sprickor. Efter ungefär en timmas brand skakade hela byggnaden till och räddningsmanskpet fick order om att utrymma. Ungefär 10-15 minuter efter skakningen kollapsade det första håldäckselementet och branden spred sig till andra våningen. Den första kollapsen följdes av flera håldäckskollapser (Lehtinun & Rasmus 2011). Byggnaden var designad för 2 timmars brandmotstånd.



Figur 18 Skador på håldäck i Vantaa, Finland. Den vänstra bilden visar delaminering av den nedersta delen av ett håldäck, den högra bilden visar tomrummet efter kollapsen av håldäckssystemet (Lehtinun & Rasmus 2011).

Enligt den europeiska organisationen för teknisk utvärdering (EOTA) (EOTA 2006a and 2006b), kan brandmotståndet hos prefabricerade byggnadselement och stombyggnadssystem klassas med hjälp av Eurokoden. Klassningen av håldäck kan därför göras antingen genom brandprovning, enkla beräkningsmetoder eller mer avancerade beräkningsmetoder (CEN/TC250 2004).

Brandmotståndsklassen hos element som brandprovas enligt standardiserade metoder är inte per definition representativt för brandmotståndet av dessa element i en riktig struktur. Spänningar och deformationer beror till stor del på upplagens utformning och eventuella uppkomna tvångskrafter från den omgivande strukturen (Acker 2004). Vidare är spännvidden på riktiga konstruktioner i många fall längre än vad som kan testas i majoriteten av brandprovningssugarna som används. Därför baseras ofta certifieringen av dessa produkter på beräkningar.

De förenklade beräkningsmetoderna bygger på reducering av tvärsnittet där man helt enkelt tar bort det lastbärande bidraget från de zoner i tvärsnittet som är över en given temperatur eller så delar man

in materialet i ett antal temperaturzoner med olika hållfasthetsegenskaper. När man använder dessa metoder behöver man inte undersöka inverkan av termisk utvidgning av betongen eller armeringen. Detta är emellertid viktigt när det gäller håldäck eftersom den termiska utvidgningen kan leda till sprickbildning där även effekter från upplagen och hur elementet kan bågna spelar roll. Skjuvspänningar kan också uppkomma i tvärsnittet utefter båda de horisontella axlarna. Den förspända armeringen kommer också att påverkas av temperaturökningen där dess termiska expansion minskar förspänningskraften och den vid höga temperaturer uppnår sträckgränsen. Dessa fenomen är viktiga för böjmotståndet hos håldäck.

Lange et. al. (Lange, Albrektsson & Jansson 2014), diskuterar hur två olika beräkningsmodeller skiljer sig från varandra när det gäller att designa håldäck. De två modellerna är de samma som diskuterades i den föregående forskningsfrågan och finns beskrivna mer i detalj i referens 7 och 8 vilket inkluderar en modell med den transienta krypningen inkluderad implicit i materialegenskaperna eller en mer avancerad modell där den transienta krypningen formuleras explicit.

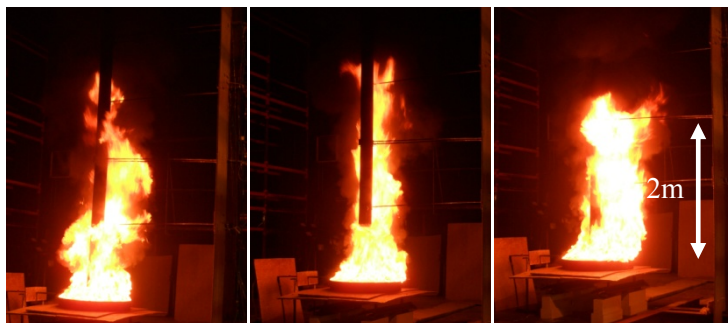
Eftersom valet av matematisk modell påverkar styvheten hos betongen i materialmodellen är det givet att materialmodellen spelar en stor roll då det gäller det beräknade beteendet hos förspänningswirarna då interaktionen mellan stål och betong under förspänning är viktig. Detta stämmer väl med Fellingings slutsats (Fellinger 2004) vilka var att den transienta krypningen påverkar vidhäftningen mellan stålet och betongen.

I (Lange, Albrektsson & Jansson 2014) visas att den matematiska modellen som inkluderar den transienta krypningen som en explicit term fungerar mycket bättre när man jämför mer vissa tester från litteraturen (Andersen & Lauridsen 1999).

#### 10.4 Hur signifikant kan den icke-homogena temperatur-fördelningen bli vid lokal brand och hur kan det utvärderas?

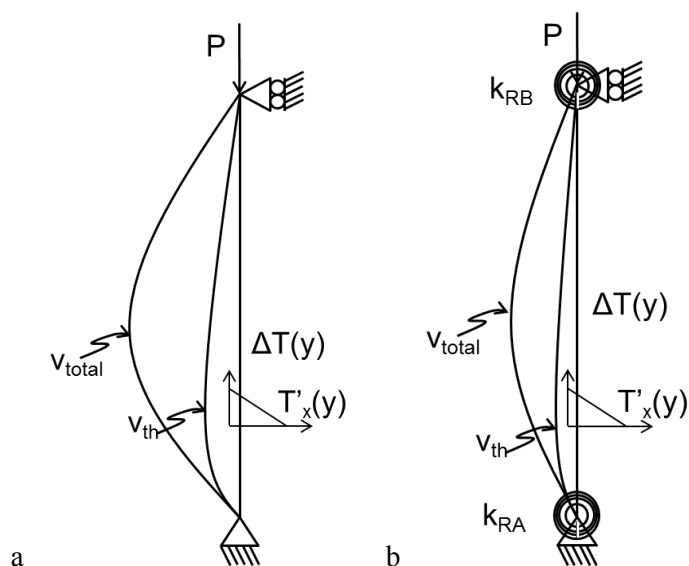
Många multifunktionella byggnader, exempelvis fasadsystemet i den studerade multifunktionella byggnaden, inbegriper stål balkar och pelare i utrymmen med öppen planlösning. Brandutvecklingen i dessa öppna utrymmen skiljer sig markant från de typiska homogena brandförloppen såsom standardbrandkurvan eller de parametriska rumsbränderna. Dessutom, storleken på vissa pelare är sådan att värmepåverkan varierar kraftigt längs pelarens höjd. Hur signifikant kan den icke-homogena temperaturfördelningen bli och hur utvärderar vi det?

En testserie som utfördes på SP illustrerar hur en lokal brand ger upphov till icke-homogen temperaturfördelning både genom pelarens bredd och längs dess höjd (Byström et al 2013, Sjöström et al 2012). I dessa test utsattes en 6 m hög olastad pelare för flera olika brandlaster för att demonstrera effekten av asymmetriska flammor på temperaturfördelningen i stålet. Under brandtesten lutade brandplymen något på grund av icke-avsiktliga ventilationsförhållanden i brandhallen, Figur 19. Den varierande värmepåverkan resulterade i tydliga termiska deformationer på pelaren.



Figur 19 Flammorna från en pölbrand av diesel ( $\varnothing = 1.1 \text{ m}$ )

Effekterna av icke-homogen uppvärmning på stålkonstruktioner studeras i (Lange & Sjöström 2014) med fokus på stålpelare. Två typer av mekaniska randvillkor tas i beaktning, Figur 20, och en analytisk metod för att utvärdera deformationer på stålpelare med varierande temperaturfördelning presenteras. Metoden baseras på etablerade konstruktionstekniska principer och omfattar utvärdering av termiska deformationer givet varierande temperaturfördelning och lösningar till Eulers balkteori för pelare med den termiska deformationen som initial förskjutning. I de fall då pelaren är delvis inspänd inkluderas rotationsmomentet från väggar/tak genom superposition.



Figur 20 Pelardeformationer vid mekanisk last,  $P$ , med en termisk gradient som varierar längs pelarens höjd, a) ledad pelare och, b) delvis inspänd pelare vars ändrar beskrivs av rotationsfjädrar med styvheten  $k_{RA}$  and  $k_{RB}$ .

Som exempel tillämpar vi metodiken på en 4 m lång pelare exponerad från ena sidan av en pölbrand. Pelaren är slank (UK Section 203 x 203 x 46). Tre mekaniska randvillkor beaktas: ledad pelare, en delvis inspänd pelare med samma rotationsstyvhet i golv och tak of  $k_{RA}=k_{RB}=1 \times 10^{10}$  N/mm och en med olika rotationsstyvhet  $k_{RA}=1 \times 10^{10}$  N/mm och  $k_{RB}=1 \times 10^8$  N/mm.

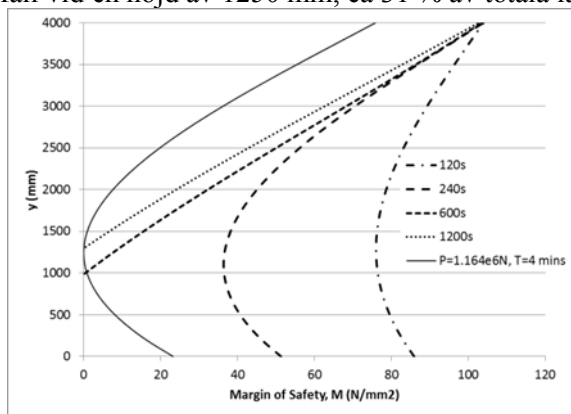
Den godtyckligt valda brandlasten baseras på en cirkulär dieselbrand med 1.9 m i diameter och en brandeffekt på 2 MW. Plymtemperaturen bestäms från den enkla metoden beskriven i Bilaga C till EN 1991-1-2 (CEN/TC250 2002). En enkel FE värmeöverföringsmodell användes för att beräkna temperaturfördelningen i pelaren. De termiska gradienterna och medeltemperaturökningen tvärs pelaren beräknas från dessa värmeöverföringsberäkningar. Resultatet sammanfattas i Tabell 10.

Tabell 10 Termiska gradienter i exemplet.

Tid (s)	Posn	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T'x (°C/mm)
120	A	220	30	20	0.516
240		352	50	20	1.08
600		530	140	40	0.73
1200		550	180	50	0.7
120	B	32.5	20	20	0.04
240		42.5	22	20	0.122
600		65	30	22.5	0.22
1200		83	40	23	0.325

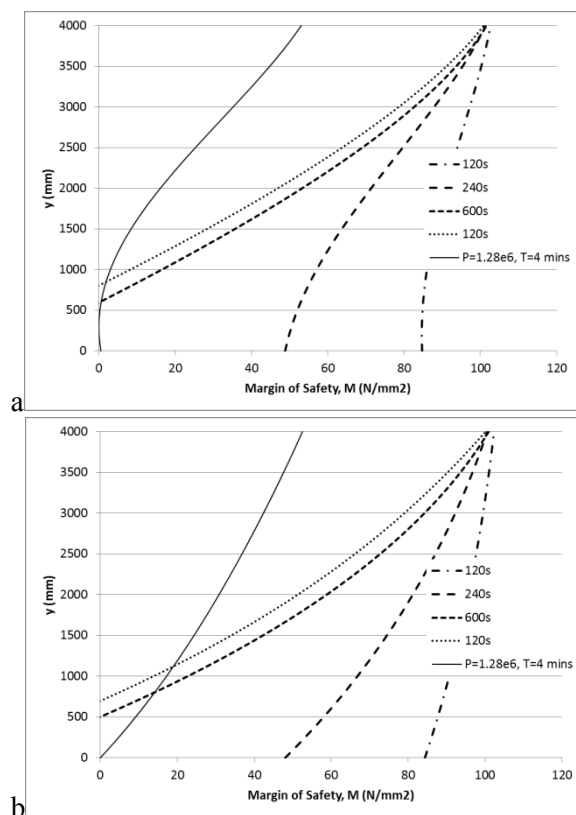
Vi definierar säkerhetsmarginalen som skillnaden mellan flytspänningen i pelarens mest utsatta fiber och den verkliga spänningen i densamma ( $M=\sigma_y(y)-\sigma_{max}(y)$ ). Resultatet för en ledad pelare visas i Figur 21. Den externa mekaniska lasten är 100 kN. Resultaten som presenteras är efter 2, 4, 10 och 20 minuter av brandpåverkan. Pelaren kollapsar mellan 4 och 10 minuter som ett resultat av termisk böjning och mekanisk knäckning från den externa lasten. Figur 21 visar även säkerhetsmarginalen för

pelaren efter 4 minuter under kritisk last för denna tidpunkt ( $P=1164 \text{ kN}$ ). Initial knäckning sker i detta fall vid en höjd av 1250 mm, ca 31 % av totala längden.



Figur 21 Exempel på säkerhetsmarginalen för en ledad pelare med termisk gradient över tvärnittet varierande längs pelaren höjd.

Figur 22a och b visar motsvarande resultat för de delvis inspända pelarna beskrivna ovan. Figur 22a visar fallet med  $k_{RA}=k_{RB}=1 \times 10^{10} \text{ N/mm}$ . Effekten av inspänningen är tydlig och höjden där knäckning sker är lägre, ca 200 mm från golvet. Figur 22b visar fallet med  $k_{RA}=1 \times 10^{10} \text{ N/mm}$  och  $k_{RB}=1 \times 10^8 \text{ N/mm}$ . I detta fall resulterar den högre styvheten i golvet i mycket högre rotationsmoment vilket leder till tryckbrott vid golvnivån. Jämför vi de tre olika fallen får vi en tydlig bild av hur momentet från inspänningen påverkar säkerhetsmarginalen längs pelaren – en ökad inspänning ger lägre termisk böjning och därmed också en mindre mekanisk deformation från extern last. Å andra sidan ökar rotationsmomentet nära en högre inspänning vilket ökar spänningen i pelaren mest belastade fiber, som i exemplet ovan där tryckbrott sker precis vid golvet.



Figur 22 Exempel på säkerhetsmarginalen för delvis inspända pelare med varierande termisk gradient a)  $k_{RA}=k_{RB}=1 \times 10^{10} \text{ N/mm}$ ; och b)  $k_{RA}=1 \times 10^{10} \text{ N/mm}$ ;  $k_{RB}=1 \times 10^8 \text{ N/mm}$

Modellen visar alltså att ledade pelare med en temperaturfördelning som varierar både i tvärsnittet och längs höjden kommer att knäckas ganska nära pelarens halva höjd eftersom man där finner de största momenten. Vid högre temperaturer och gradienter kommer tjockare eller kortare pelare kollapsa nära en ändpunkt på grund av tryckbrott.

Om temperaturfördelningen är omvänd så att de högsta temperaturerna existerar vid toppen av pelaren kommer även brottfallen vara omvända, med tryckbrott vid taket. Om pelaren är delvis inspänd kommer rotationsmomenten från ändarna motverka momentet från den mekaniska lasten. Detta betyder dock att spänningen i pelarens mest utsatta fiber vid golv eller tak (beroende på den relativa storleken på rotationsstyvheten vid ändarna) kan överstiga den temperaturberoende flytspänningen i samma fiber. Vid vilken höjd brottet sker beror både på temperaturfördelningen och relationen mellan rotationsstyvheten vid golv och tak.

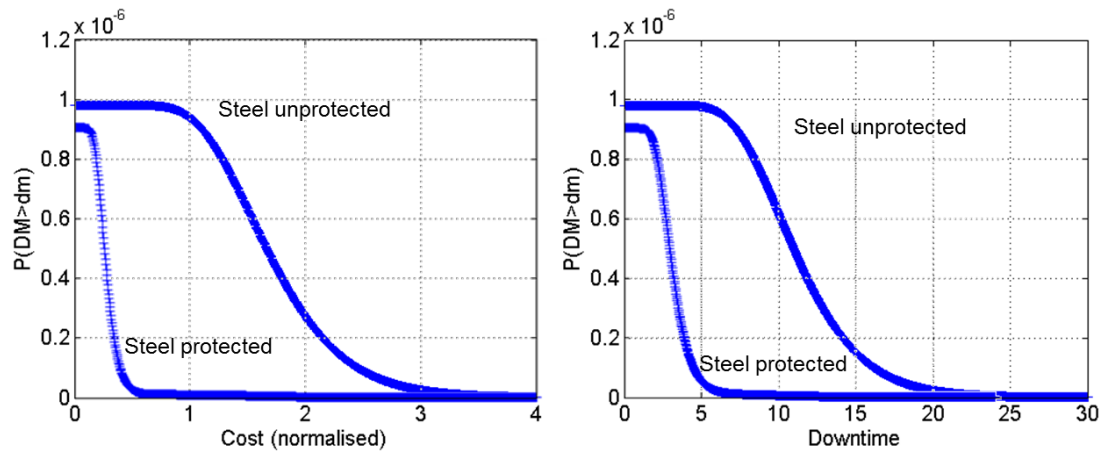
## **10.5 Vilken påverkan på ekonomisk risknivå har en minskning av passivt skydd på balkar och pelare av stål?**

Vid branddimensionering är ett allt vanligare önskemål att minska omfattningen av det passiva brandmotståndet runt balkar eller pelare av stål eller, om möjligt, helt avlägsna det. Vilken påverkan har detta på den ekonomiska risknivån för en verksamhet i en byggnad?

I (Lange, Devaney & Usmani 2014) tillämpas en probabilistisk byggnadsteknisk dimensioneringsmetod, ursprungligen utvecklad för jordbävning, på branddimensionering. Ramverket består av en linjär metodik som baseras på att i tur och ordning finna resultaten av olika analyser: riskanalys; byggnadsteknisk analys; förlustanalys slutligen beslutsfattande baserat på nyckelparametrar såsom omställningstid eller kostnad för reparationer. I artikeln använder enkla kodifierade eller analytiska metoder för att utvärdera byggnadsteknisk påverkan och den efterföljande omställningstiden eller kostnaden från en brand. Bränderna baseras på parametriska bränder med probabilistisk indata framtagna från råden i Eurokod (IMPLEMENTATION OF EUROCODES 2005) och den probabilistiska modellen från *Joint Committee on Structural Safety* (Lungu & Rackwitz 2001).

Den normaliserade kostnaderna och omställningstiden för både en skyddad och en oskyddad stålbalk visas i Figur 23. Det är tydligt att de sannolika förlusterna efter en brand med en skyddad balk är betydligt lägre än om konstruktionen var oskyddad. Sannolikheten för en förlust överstigande byggkostnaden för konstruktionen är  $0.9 \times 10^{-6}$  och  $0.01 \times 10^{-6}$  per år för den oskyddade respektive skyddade balken som exemplifieras i artikeln. Detta är en betydligt mindre sannolik händelse liksom den för en längre omställningstid för verksamhet i den intilliggande konstruktionen. Att använda oskyddat stål ger, intuitivt nog, alltså en mycket högre risk för konstruktionen i detta fall.

När de sammanlagda kostnaderna för balken beaktas kan brandskyddets nytta däremot ifrågasättas. Kostnaden för byggnaden är, enligt bakgrundsreferenser från *Steel Construction Institute* (Hicks et al. 2004), mellan 83 och 108 £/m<sup>2</sup> och kostnaden för brandskyddet mellan 13 och 32 £/m<sup>2</sup>. Baserat på frekvensen av reparationskostnader överstigande de ursprungliga konstruktionskostnaderna kan ägaren spendera endast en procent av byggkostnaden per år för reparationer medan brandskyddet skulle uppgå till så mycket som 38 %. Detta inbegriper naturligtvis inte kostnaderna för inredning och inrättningar. Dessa kommer dock sannolikt kräva betydande kostnader vid en för konstruktionen betydande brandbelastning oberoende av brandskyddet mot stålet. Dessutom antas att konstruktionen uppfyller all andra mål gällande lastbärande förmåga etc.



Figur 23 Exempel på normaliserad probabilistisk årlig reparationskostnad och omställningstid.

## **11 Applicering av metoden för analys av brandsäkerhet i multifunktionella byggnader**

I ett examensarbete av Pettersson (2014) appliceras metoden, redovisad i kapitel 4, för att utreda styrkor och svagheter i metoden.

Problemställning i examensarbetet beaktar metodens praktiska tillämpbarhet, om det behövs mer vägledning av specifika steg av metoden, vilka problem som uppkommer vid tillämpning av metoden. Vidare studeras vilka dominoeffekter som är aktuella och hur metoden kan vidareutvecklas för att på ett så bra sätt som möjligt ta hänsyn till dominoeffekter och när krävs åtgärder och hur påverkar antagonistiska hot risken för dominoeffekter, se också avsnitt 8.5.

Examensarbetet ger förslag på hur risken för antagonistiska hot och hur konsekvenserna av en antagonistisk attack kan reduceras, vidare kopplas multifunktionella byggnaders inverkan på samhället (Pettersson 2014).

Tillämpningen av metoden konstaterar att scenarioanalysen, bör för att inte missa viktiga scenarion, utvärderas av flera inblandade aktörer som diskuterar exponeringar och scenarion för den aktuella multifunktionella byggnaden (Pettersson 2014). Ytterligare en slutsats är att den organisatoriska säkerheten är väldigt viktig för multifunktionella byggnader, dels i förebyggande syfte genom underhåll, men framförallt vid en händelse, speciellt om den är av antagonistisk karaktär eller eskalerande (Pettersson 2014).

Vidare konstaterar Pettersson (2014) att metoden ställer stora krav på användarens kompetens, därav rekommendationen att flera experter deltar i urvalet av scenarier. Pettersson (2014) anger att metoden är en bra hjälp för att identifiera antagonistiska hot samt svaga länkar i byggnaden och att underhållsproblem av brandskyddssystem fångas upp vid en utvärdering. Intervjuerna som behöver genomföras vid en analys av en multifunktionell byggnad har också den positiva effekten att inblandade aktörer blir mer medvetna om svagheter i byggnaden och dess exponering för antagonistiska hot (Pettersson 2014).

För en fullständig redogörelse hänvisas till Pettersson (2014).

## 12 Slutsatser

Syftet med projektet Multibyggt var att stödja den olycksförebyggande verksamheten inom kategorin multifunktionella byggnader för att tillgodose medborgarens behov av en säker och trygg miljö vid antagonistiska hot. Målsättningen var att utveckla en metodik som identifierar risker och analyserar dem.

I projektet genomfördes först en litteraturstudie och en riskidentifiering inom området. Via semistrukturerade intervjuer och fältbesök identifierades ett antal scenarier som var underlag till ett första utkast till metodiken. Metodiken baserades på befintliga metoder som används inom funktionsbaserad dimensionering men anpassades för det specifika fallet där det finns risk för antagonistiska angrepp.

I intervjuer och fältstudier definierades även forskningsfrågor inom områdena brandutveckling, bärförmåga, utrymning och stöd till räddningstjänster. Följande specifika frågor valdes för vidare undersökning och slutsatser för dessa finns i respektive kapitel:

- Inom området brandutveckling detaljstuderades forskningsfrågor som behandlade bl a en släckmetod baserad på nedsatt syrgasnivå, skydd av elektronisk utrustning, tillväxthastigheten vid anlagda bränder och dominoeffekter.
- Inom området bärförmåga behandlades forskningsfrågor kring sårbarhet av byggnader vid explosion, input-data för materialegenskaper hos betong, dimensionering av håldäck, icke-homogena temperatur-fördelningar vid lokal brand och påverkan av en minskning av passivt skydd på balkar och pelare av stål.
- Inom området utrymning behandlades människors agerande vid ökande hot, ändring av utrymningsförloppet om utrymningslarmet avbryts under utrymningsförloppet, anpassning av byggnadens utrymningssystem efter det uppkomna hotet samt anpassning av personerna
- Inom området räddningstjänster påpekades problemen med brist på övergripande syn på säkerhetsproblematiken vid antagonistiska hot i multifunktionella byggnader

I den avslutande delen av projektet applicerades metoden på en relativt nybyggd multifunktionell byggnad och den visade sig vara användbar. Samtidigt påpekades att scenarioanalyser är en viktig del i arbetet som ska genomföras av flera deltagande aktörer. Metoden ställer även höga krav på användarens kompetens och visar att den organisatoriska säkerheten är väldigt viktig. Projektet har även resulterat i en del nya forskningsfrågor för framtiden via intervjuerna och fältstudierna.

Projektets forskning har resulterat i flera delrapporter, vetenskapliga publikationer och konferensbidrag, ett examensarbete och en teknisk licentiatuppsats.

## 13 Referenser

- Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., & Abbasi, S. A. (2010). A New Method for Assessing Domino Effect in Chemical Process Industry. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1-3), 416-426, doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.06.049.
- Aftonbladet. (1998) Mordbrand På Pub-varuhuset. [Online]. Hämtad 24 januari 2013 från <http://www.aftonbladet.se/nyheter/9812/22/pub.html>
- Anderberg, Y.; Thelandersson, S. (1976). Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures 2. Experimental investigation and material behavior model; Lund institute of technology
- Andersen, N.E., Lauridsen, D. H. (1999), Hollow Core Concrete Slabs Basismiddel projekt X52650 part 2, Danish institute of fire technology technical report x 52650
- Andersson, P., van Hees, P. (2000). Performance of cables subject to thermal radiation, 45 pages, SP Report 2000, nr 24, ISBN 91-7848-822-2.
- Andersson, P., Persson, B. (2001). Performance of cables subjected to elevated temperatures, SP Report 2001, nr 36, ISBN 91-7848-884-2.
- Andersson P., van Hees, P. (2001). Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures, ESREL 2001, Turin, September 2001.
- Andersson P., van Hees, P. (2005). Performance of Cables Subjected to Elevated Temperatures, Eighth International Symposium on Fire Safety Science, Beijing China September 2005.
- Andrée, K., Frantzich, H. & Nilsson, D (2014). Utrymning och eskalerande hot, en experimentell undersökning i VR-miljö. Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Arbetskyddsstyrelsen (1993). AFS 1993:3 - arbete i slutet utrymme. Arbetskyddsstyrelsen.
- ASTM International (2012). ASTM standard D2863, 12e1 Standard Test Method for Measuring the Minimum Oxygen Concentration to Support Candle-like Combustion of Plastics (oxygen index). West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Berg P., & Lindgren, A. (2004). Fire prevention and health assessment in hypoxic environment. (Rapport 5144) Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Boverket, (2011a). Boverkets allmänna råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd - BFS 2011:27, BBRAD 1. Karlskrona: Boverket.
- Boverket (2011b). Brandskydd. In Regelsamling för byggande, BBR 2012, Boverkets byggregler, BFS 2011:6, med ändringar t.o.m. BFS 2011:26, (pp. 117-95). Karlskrona: Boverket.
- Brand, A. & Sörqvist M, (2000). Utrymnings säkerhet för rörelsehindrade. (Rapport 5071). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Bryan, J., L. (1983). An examination and analysis of the dynamics of the human behavior in the MGM Grand Hotel fire. National Fire Protection Association, Quincy.
- BSI (2011). PAS 95:2011 Hypoxic Air Fire Prevention Systems: Specification. London, UK: British Standards Institution.
- Byström, A., Sjöström, J., Lange, D., Wickström, U., Veljkovic, M., (2013), Large scale test on a steel column exposed to localized fire, Accepted for publication in the *Journal of Structural Fire Engineering*

- Carman, S. W. (2011). Investigation of an elevated fire - perspectives on the 'z-factor'. In Conference Proceedings, Fire and Materials 2011, 12th International Conference and Exhibition (pp. 159-170). 31 January – 2 February, San Francisco, USA. London: Interscience Communications Limited.
- CEN/TC250, (2002), EN 1991-1-2:2002; Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire
- CEN/TC250, (2004), EN 1992-1-2:2004 Design of concrete structures, Part 1-2: General rules - Structural fire design
- Charsley, E. L., & Schulz, R. A. (1975). An apparatus for the measurement of critical oxygen index incorporating a paramagnetic oxygen analyser. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 8(2), 147-149.
- Chiti, S. (2009). Test Methods for Hypoxic Air Fire Prevention Systems and Overall Environmental Impact of Applications. MSc thesis, Modena: University of Modena.
- Dreisbach, J., Hostikka, S., Nowlen P., McGrattan, K., (2010), Electrical cable failure – experiments and simulation, 12th International Interflam Conference, pp. 1857–1865.
- Ekström, J., & Nilsson, B. (2009). Pyrotekniskt genererade aerosoler - experimentella studier med avseende på funktion och risker rörande människa och teknik (Rapport 5263). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- EOTA, 2006a, ETAG 23, Prefabricated Building Units
- EOTA, 2006b, ETAG 24, Concrete Frame Building Kits
- Fellinger, J.H.H., 2004, Shear and Anchorage Behaviour of Fire Exposed Hollow Core Slabs, Doctoral thesis, TU Delft, ISBN 90-407-2482-2
- FM Global (2004). FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 5-31 - Cables and Bus Bars. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- FM Global (2006). FM Global Property Loss Prevention Data sheet 5-19 - Switchgear and Circuit breakers. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- FM Global (2010). FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 4-9 - Clean Agent Extinguishing Systems. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- FM Global (2012a). FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 5-14 - Telecommunications. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- FM Global (2012b). FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 5-32 - Data Centers and Related Facilities. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- FM Global (2012c). FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 5-4 - Transformers. USA: Factory Mutual Insurance Company.
- Frank, K., Spearpoint, M., & Challands, N. (2012). Uncertainty in estimating the fire control effectiveness of sprinklers from New Zealand fire incident reports. *Fire Technology*, doi: 10.1007/s10694-012-0297-2.
- Fransson, E. (2008). Utrymningsskyltar, vilka faktorer påverkar om en utrymningsskylt är lätt att uppfatta eller ej? (Rapport 5287). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Frantzych, H. (2001). Tid för utrymning vid brand. (Report no P21-365/01). Karlstad: Räddningsverket.
- Frantzych, H., & Nilsson, D. (2009). Evacuation in complex environments - an analysis of evacuation conditions in a nuclear power plant and a tunnel construction site. I 4th Int. Symp. on Human Behaviour in Fire 2009, Robinson College, Cambridge, UK.

- Frantzich, H., & Nilsson, D. (2010). Design of Voice Alarms - the Benefit of Mentioning Fire and the Use of a Synthetic Voice. I K. Wolfram W. F, C. Rogsch, A. Schadschneider, & M. Schreckenberg, *Pedestrian and Evacuation Dynamics* (ss. 135-144). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D. & Frantzich, H., (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety J.* Volume 59, July 2013, Pages 8–21.
- Fruin, J.J. (1971). *Pedestrian planning and design*. Metropolitan association of urban designers and environmental planners Inc. New York.
- Gay, L., Gracia, R., Wizenne, E. (2011). Thermal malfunction criteria of fire safety electrical equipment in nuclear power plants. *Fire Mater.*, 37:151-159, doi: 10.1002/fam.2121.
- Gay L., Gracia R., Mongruel S., Wizenne E., (2013). Effects of cable fire smoke on electronic boards, Draft article, IAFSS proceedings Christchurch 2014. Communication with author.
- Gardner, W. D. & Whitlock, J. A. (2005). Flame spread in corridors - project report (Research Paper No. 32 - Forest Resources Research NSW Department of Primary Industries, Sydney). Beecroft, Australia: Forest Resources Research.
- Gómez-Mares, M., Zárate, L., & Casal, J. (2008). Jet Fires and the Domino Effect. *Fire Safety Journal*, 43(8), 583-588 doi: 10.1016/j.firesaf.2008.01.002.
- Hammarström, R., Axelsson, J., & Reinicke, B. (2006). Fire safety in buses WP1 report: Bus and coach fires in Sweden and Norway. (SP report 2006:26). Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Han, L., Potter, S, Beckett, G, Pringle, G, Welch, S, Koo, S.-H, Wickler, G, Usmani, A, Torero, J.L, Tate, A. (2010). FireGrid: An e-infrastructure for next-generation emergency response support. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Volume 70, Issue 11, November 2010, Pages 1128-1141. DOI: 10.1016/j.jpdc.2010.06.005.
- Helbing, D. (2001) Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics* Vol. 73, Issue 4, pp 1067-1141.
- Helsinki Times (2010). Hong Kong variety shop burns down in Vantaa, Helsinki, 27-Dec-2010.
- Hicks, S.J., Lawson, R.M., Rackham, J.W., Fordham, P. (2004). *Comparative Structure Cost of Modern Commercial Buildings*, second Edition, The Steel Construction Institute, Ascot, Berkshire
- Holmström, J. & Sävmark, E. (2013). Talat utrymningsmeddelande - optimerad utformning utifrån fullskaleförsök. (Report no 5405). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- IMPLEMENTATION OF EUROCODES, (2005). Handbook 5 - Design of Buildings for the Fire Situation, Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007
- Ingason, H. (2006). Model scale tunnel fire tests - sprinkler (Brandforskprojekt 406-021, SP Report 2006:56). Borås, Sweden: SP Swedish National Testing and Research Institute.
- ISO (2002). ISO 5660-1, Reaction-to-fire-tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - part 1: Heat release (cone calorimeter method). Geneva: ISO.
- ISO (2011). ISO 12136 - Reaction to fire tests - Measurement of material properties using a fire propagation apparatus. Geneva: ISO.
- Janssens, M. L., Gomez, C., Huczek, J. P., Overholt, K. J., Ewan, D. M., Hirschler, M. M., et al. (2012). Reducing Uncertainty of Quantifying the Burning rate of Upholstered Furniture (SwRI Project No. 01.15998). San Antonio, TX: Southwest Research Institute.
- Janssens M., Turner S., Tsuchino S. (2012), THIEF model evaluation for cables used in nuclear plants in Japan, 9th AOFST conference – Hefei.

- Jensen, G., Holmberg, J. G., & Gussiås, A. (2006). Hypoxic Air Venting for Protection of Heritage (Report within COST Action C17 project). Norway: Riksantikvaren, Directorate for Cultural Heritage and Crown. ISBN 82-7574-037-1.
- Johansson, J. & Petersson, L. (2013). Utrymning och vägval i Virtual Reality. (Report no 5440). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Johansson, P. & Axelsson, J. (2006). Fire safety in buses - WP2 report: Fire safety review of interior materials in buses. (SP report 2006:59) Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.
- Kleinman, C., & Linssen, J. 2011, Brand en kanaalplaat- vloeren, Cement, vol. 5, pp. 4-5
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). DOMIFFECT (DOMIno eFFECT): User-Friendly Software for Domino Effect Analysis. *Environmental Modelling & Software*, 13(2), 163-177.
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (2001a). An Assessment of the Likelihood of Occurrence, and the Damage Potential of Domino Effect (Chain of Accidents) in a Typical Cluster of Industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(4), 283-306.
- Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (2001b). Estimation of Probabilities and Likely Consequences of a Chain of Accidents (Domino Effect) in Manali Industrial Complex. *Journal of Cleaner Production*, 9(6), 493-508.
- Krüger, S., Deubel, J., Werrel, M., Fettig, I., Raspe, T., & Piechotta, C. (2013). Experimental Studies on the Effect of Fire Accelerant During Living Room Fires. In *Conference Proceedings, Fire and Materials 2013, 13th International Conference and Exhibition* (pp. 159-170). 31 January – 2 February, San Francisco, USA. London: Interscience Communications Limited.
- Kulturrådet (2008) *Kulturen i siffror 2008#6. Nya kulturvanor, svenska kulturvanor i ett 30-årsperspektiv: 1976-2006*. Stockholm: Kulturrådet.
- Lange, D., 2013, A review of blast loading and explosions in the context of multifunctional buildings, SP Arbetsrapport 2013:11
- Lange, D., Albrektsson, J., Jansson, R., 2014, Application of an explicit transient strain concrete model to hollow core slabs in fire, submitted to *Fire Technology* December
- Lange, D., Devaney, S., Usmani, A., 2014, An Application of the PEER PBEE Framework to Structures in Fire, submitted to *Engineering Structures*
- Lange, D., Jansson, R., 2014a, A comparison of an explicit and an implicit transient strain formulation for concrete in fire, submitted to *Fire Technology*
- Lange, D., Jansson, R., 2014b, A comparison of an explicit and an implicit transient strain formulation for concrete in fire, IAFSS 2014, Christchurch
- Lange, D., Sjöström, J., 2014, Mechanical response of a partially restrained column exposed to localised fires, Submitted to *fire safety journal*
- Lehtinun, K., Rasmus, T., 2011, Tavaratalon sortumiseen johtanut tulipalo Vantaalla (in Finnish), Onnettomuustutkintakeskus (accident investigation board)
- Li, Y. Z., & Ingason, H. (2013). Model scale tunnel fire tests with automatic sprinkler. *Fire Safety Journal*, 61, 298-313.
- Little, R. G. (2002). Controlling Cascading Failure: Understanding the Vulnerabilities of Interconnected Infrastructures. *Journal of Urban Technology*, 9(1), 109-123, doi: 10.1080/106307302317379855.
- Lungu, D., Rackwitz, R., 2001. Joint Committee on Structural Safety – Probabilistic Model Code, Part 2: Load models [Online] Available: [http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic\\_Model\\_Code.aspx](http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx).

- Mangs, J., Keski-Rahkonen, O. (2001). Acute effects of smoke from fires on performance of control electronics in NPPs. Paper No. M1804. Transactions - 16th International Conference on structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT), Washington DC.
- Melinek, S. J. (1993). Effectiveness of sprinklers in reducing fire severity. *Fire Safety Journal*, 21(4), 299-311.
- MSB (2012). Informationssystemet IDA. Online, Retrieved April 15, 2013, <http://ida.msb.se> (database). Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).
- Möller, M. & Nygren, G. (2004). Funktionshinderades riskbild i publika lokaler med avseende på utrymning. (Rapport 5143). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- National Emergency Management Agency (2004). Fire in Daegu Subway - Disasters Reports. Online, Retrieved December 19, 2011, [http://eng.nema.go.kr/sub/cms3/3\\_4.asp](http://eng.nema.go.kr/sub/cms3/3_4.asp). NFPA (2008). NFPA 69, standard on explosion prevention systems, 2008 edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- NFPA (2010). NFPA 2010, Standard for Fixed Aerosol Fire-Extinguishing Systems, 2010 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- NFPA (2011). NFPA 70, National Electrical Code, 2011 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- NFPA (2012a). NFPA 2001, Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems, 2012 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- NFPA (2012b). NFPA 76, Standard for the Fire Protection of Telecommunications Facilities. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- NFPA (2013). NFPA 75, Standard for the Fire Protection of Information Technology Equipment, 2013 Edition. Quincy, MA: National Fire Protection Association (NFPA).
- Nilsson, D. (2006). En modell av det inledande utrymningsförloppet. (Rapport 3138). Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Nilsson, M. (2013). Fire safety evaluation of multifunctional buildings - Special emphasis on antagonistic attacks and protection of sensitive areas. Licentiate Thesis, Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Nilsson, M. & van Hees, P. (2012). Delrapport SAFE MULTIBYGG AP 1-4 (Report no 3165). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Nilsson, M., & van Hees, P. (2013). Advantages and Challenges with Using Hypoxic Air Venting as Fire Protection. *Fire and Materials*. doi: 10.1002/fam.2197. (published on-line).
- Nilsson, M., Frantzych, H., & van Hees, P. (2013). Selection and Evaluation of Fire Related Scenarios in Multifunctional Buildings Considering Antagonistic Attacks. *Fire Science Reviews*, 2(3), pp. 1-20. doi: 10.1186/2193-0414-2-3.
- Nilsson, M., Johansson, N., & van Hees, P. (2014). A New Method for Quantifying Fire Growth Rates Using Statistical and Empirical Data – Applied to Determine the Effect of Arson. Accepted for publication in: Proceedings of the 11th International Symposium on Fire Safety Science.
- Nilsson, M., van Hees, P., Frantzych, H., & Andersson, B. (2012). Analysis of Fire Scenarios in Order to Ascertain an Acceptable Safety Level in Multi-Functional Buildings. In Proceedings of the 9th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Hong Kong, China, 20-22 June 2012, Society of Fire Protection Engineers, USA.
- Nystedt, F. (2011). Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings. (Report no 3150). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.

- OECD. (2013) <http://www.oecd-nea.org/jointproj/prisme.html>, Information of the PRISME project, downloaded December 2013.
- Paté-Cornell, M. E. (1996). Uncertainties in Risk Analysis: Six Levels of Treatment. *Reliability Engineering & System Safety*, 54(2), 95-111.
- Pettersson, C. (2014). Brandteknisk analys av multifunktionella byggnader - Fokus på antagonistiska hot och dominoeffekter (Rapport 5449). Lund: Department of Fire Safety Engineering, Lund University.
- Pielkenrood, I., (2011), brief 8 juni met bijlage 16 06 2011, BFBN Betonproducten,
- Rasbash, D.J.; Ramachandran, G.; Kandola, B.; Watts, J.M.; and Law, M.; (2004), Evaluation of fire safety; Johan Wiley and Sons Ltd.; ISBN 0-471-49382-1
- Richards, P. L. E. (2008). Characterising a Design Fire for a Deliberately Lit Fire Scenario. MEFÉ Thesis, Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- Schneider U., (1982), Behaviour of Concrete at High Temperatures; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; Booklet 337; Berlin; ISBN 3-433-00958-9
- Sjöström, J.; Byström, A.; Lange, D. and Wickström, U.; (2012), Thermal exposure to a steel column exposed to localized fires; SP Report 2012: 43
- Sydsvenskan. (2012). Alarmerande att 130 bussar brinner. [Online]. Hämtad 16 januari 2013 från <http://www.sydsvenskan.se/sverige/alarmerande-att-130-bussar-brinner/>
- Tajima Y, Takimoto, K, Nagatani, T (2002). Pattern formation and jamming transition in pedestrian counter flow. *Physica Vol. 313, Iss. 3-4*, pp 709-723.
- Tanaka, T.J., Nowlen, S.P (1997). Effects of smoke on functional circuits, NUREG/CR-6543 SAND97- 2544.
- US Department of Defence; (2012); UFC 4-010-01 Minimum Antiterrorism Standards for Buildings.
- Utne, B., Hokstad, P., & Vatn, J. (2011). A Method for Risk Modeling of Interdependencies in Critical Infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 671-678, doi: 10.1016/j.ress.2010.12.006.
- Van Acker, A., (2004), Research versus Industry, Workshop on: Fire design of concrete structures: What now? What next?, fib Task Group 4.3, Milan, Italy, Dec. 2 - 4
- Van Overbeek, T., Breunese, A., Gisjbers, J., Both, K., Maljaars, J., Noordijk, L., (2010), New Regulations for Hollow Core Slabs After Premature Partial Collapse, *Structures in Fire 2010 (SiF '10)*, Michigan, Kodur and Franssen editors, pp141 - 148
- van Hees, P. (2012). Brandforskansökan "fallstudie av konstruktionsbränder" (Ansökningsnr BF-44/12). Brandforsk Styrelsen för svensk brandforskning.
- van Hees, P., Frantzych, H., & Nilsson, M. (2012). Kartläggning och kvalitativ analys av möjligheter och risker med reducerad syrehalt i brandceller innehållande elektrisk utrustning (Rapport 3162). Lund, Sweden: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University...
- van Hees, P., Johansson, N., Wahlqvist, J. (2011). Swedish PRISME project – Part 2 - Use of test results from PRISME for practical applications in Sweden – LTH Report 3155, Lund University.
- van Hees, P., Wahlqvist, J. (2011). Swedish PRISME project – Part 4 – Results of benchmark exercises at LTH – LTH report 3157, Lund University
- van Hees, P., Husted B., Johansson N. (2013). Brandteknisk avskiljning vid hantering av brandfarliga gaser och vätskor – fas 1, Rapport 3176, Lund, Sweden.

- VdS (2007). VdS 3527en - Guidelines for Inerting and Oxygen Reduction Systems. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH.
- Webber, G.M.B & Hallman, P.J. (1988). Movement under various escape route lighting conditions. In Safety in the Built environment, Ed. Jonathan Sime. E & F.N Spon, London.
- Wickens, C., D. & Hollands, J., G., (2000). Engineering psychology and human performance, 3rd Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Willander, S. (2009). Acceptabel kötid i samband med utrymning. (Report no 5289). Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Xin, Y., & Khan, M. M. (2007). Flammability of Combustible Materials in Reduced Oxygen Environment. Fire Safety Journal, 42(8), 536-547 doi: 10.1016/j.firesaf.2007.04.003.
- YLE.fi, (2010), Hong Kong Vantaa Razed, Vantaa, 24-Dec-2010
- Zimmerman, R., & Restrepo, C. E. (2009). Analyzing Cascading Effects within Infrastructure Sectors for Consequence Reduction. In IEEE Conference on Technologies for Homeland Security.