

Dimensionerande brand: anlagda skolbränder

Lars-Gunnar Klason, Nils Johansson, Petra Andersson
SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

SP Rapport 2010:15
Borås, 2010



Abstract

Typical arson fires have been identified based on previous work conducted within the Swedish Fire Research Board's Special Research Program on Arson to provide input for design fires to be used in the evaluation of different fire protection measures in a sub-project on Active and Passive Fire Protection. The focus of the Special Research Program on Arson is on arson in schools and kindergartens.

The scenarios identified include: garbage or flammable liquid against the façade, a moped or motorcycle against the façade, flammable liquid indoors and fireworks indoors. A literature search has been made looking into fire data on the ignition sources used and suggestions are made for experiments in those cases where data is scarce. The literature survey showed that data is sufficient for all scenarios except fireworks indoors and an experimental setup is therefore suggested to fill this gap.

Key words: Arson, ignition sources, design fires

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2010:15
ISBN 978-91-86319-53-3
ISSN 0284-5172
Borås 2010

Sammanfattning

Baserat på de projekt som har genomförts inom Brandforsks särskilda satsning mot anlagd brand identifieras ett antal antändningskällor och brandscenarier som är typiska för anlagd brand i skolor och förskolor. Scenarierna var: skräp eller brännbar vätska invid fasad, motorcykel/moped utomhus invid fasad, skräp inomhus, brännbar vätska och Molotov cocktail inomhus, fyrverkeri inomhus. En litteraturstudie genomfördes för att hitta information om brandtillväxt m.m. kopplad till dessa antändningskällor.

För ”mindre fordon”, ”brandfarlig vätska”, och ”Molotov cocktail” bedöms det att tillfredställande information erhållits via litteraturstudien för att kunna använda dem för att utvärdera möjligt passivt och aktivt brandskydd. Bensin är den överlägset vanligaste brandfarliga vätskan som används i anlagda bränder och storleken av spillarean, utflytningen och tjockleken beror på mängden vätska, vätskans viskositet, ytspänning och underlagets släthet.

För ”utvändiga bränder” finns det tillgänglig information kring värmeutveckling (engelska Heat Release Rate (HRR)) för enskilda fritt brinnande startföremål, t.ex. skräp och soptunnor, samt information om brandspridning på olika fasader. Det finns även information om HRR, strålning och brandtillväxt av mindre fordon brinnande mot pelare, mellan pelare och mot vägg. Den största delen av värmen, ca 60 %, kommer från motorcykelns plastkropp. För motorcyklar med metallskrov är strålningen och HRR dock betydligt lägre och utgör därför en väldigt liten fara mot omgivningen.

För ”fyrverkeri” hittades inga värden på hur en brand utvecklas i litteraturstudien och försök kommer därför att genomföras.

Innehållsförteckning

Abstract	2
Sammanfattning	3
Innehållsförteckning	4
Förord	6
Inledning	7
1 Dimensionerande bränder	8
1.1 Det tidiga brandförloppet	8
1.2 Bränsle- och ventilationskontrollerad brand	9
1.3 Den fullt utvecklade branden	10
1.4 Brandteknisk dimensionering	10
1.5 Anlagd brand i skolor och förskolor	11
2 Typiska anlagd brand scenarier	12
2.1 Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand	12
2.1.1 Anlagda bränder i skolor och förskolor	12
2.2 Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor?	13
2.2.1 Antändningskällor	13
2.2.2 Start av branden	13
2.2.3 Spridning	13
2.2.4 Byggnadstyp och ålder	14
2.2.5 Brister	14
2.2.6 Översikt viktigaste brandscenarier	14
2.3 Valda scenarier för litteratursökning	15
3 Litteraturstudie	16
3.1 Utvändiga bränder	16
3.1.1 Fire safety assessment of wooden facades	16
3.1.2 Wall Flame Heights with External Radiation	17
3.1.3 Upward Flame Spread on Composite Materials	18
3.1.4 Face Value	18
3.1.5 Initial Fires	18
3.1.6 Heat Release Rate Tests of Plastic Trash Containers	19
3.1.7 Heat Release Rate Characteristics of Some Combustible Fuel Sources in Nuclear Power Plants	20
3.2 Mindre fordon	20
3.2.1 Development and Application of a Large Scale Fire Test Facility	20
3.2.2 The burning behavior of motorcycles	20
3.2.3 Motorcycle Burning Behavior in Free Space	21
3.3 Brandfarlig vätska	21
3.3.1 Flammable and Combustible Liquid Spill/Burn Patterns	22
3.3.2 Liquid Fuel Fire Hazard Characterization	23
3.3.3 Burning Rate of Liquid Fuel on Carpet (Porous Media)	23
3.3.4 Kategorisering av brandfarliga varor med parametern FIGRA	24
3.3.5 Alkoholbaserade vätskor	24
3.4 Molotov cocktail	25
3.4.1 Characterising a design fire for a deliberately lit fire scenario	26
3.5 Fyrverkerier	26

3.5.1	Ability of the fire propagation apparatus to characterise the heat release of energetic materials	27
3.5.2	Burning and air resistance of fireworks stars	27
3.5.3	Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire	27
3.5.4	Räddningschef varnar för ny trend: Fler fyrverkerier mot byggnader	28
3.5.5	Fireworks stand test burn	28
3.5.6	Why control fireworks?	28
3.5.7	The firework disaster in enschede Part 1: Overview & reconstruction	28
3.5.8	The fireworks disaster in enschede Part 2: Safety & pyrotechnics	29
3.5.9	Nightclub fires II	29
3.5.10	Fast emission spectroscopy for a better understanding of pyrotechnic combustion behaviour	29
3.5.11	Fireworks preplanning to ensure safety and diminish liability	29
3.5.12	Firework and their hazards	29
3.5.13	Peru Fireworks tragedy	29
3.6	Sammanfattning litteraturstudie	30
4	Diskussion	31
5	Slutsatser	33
6	Referenser	34
	Appendix 1: Sökord litteraturstudie	36

Förord

Brandforsk inledde 2007 en satsning på forskning angående anlagd brand. Det resulterande forskningsprogrammet har som målsättning att ta ett samlat grepp kring anlagd brand. Fokus är på anlagda bränder i skolor och förskolor men även andra byggnader och anläggningar kommer att beaktas. Målsättningen och förhoppningen är att resultatet av projektet ska leda till färre anlagda bränder med mindre konsekvenser för samhället.

Forskningen som presenteras i denna rapport har bedrivits som en del i Brandforsks särskilda satsning Anlagd Brand. Till projektet och delprojekten i Brandforsks särskilda satsning inom Anlagd Brand är såväl en styrgrupp, med representanter från finansiärerna, som en gemensam referensgrupp knuten.

Satsningen finansieras förutom av Brandforsk också av:

Räddningsverket

Malmö Stad

Svenska Kommun Försäkrings AB

Kommunassurans Syd

Länsförsäkringar

Trygg-Hansa

Göta Lejon

St Eriks försäkring

Stockholmsregionens Försäkrings AB

Förenade Småkommuners Försäkringsbolag

KommuneForsikring

vilket tacksamt erkännes.

Vi vill också tacka Patrick van Hees vid Lunds Tekniska Högskola och Birger Engström vid Brandskyddslaget för deras värdefulla synpunkter på rapporten.

Inledning

Anlagda bränder i byggnader är ett problem för samhället som är förknippat med stora kostnader. Problemet med anlagd brand är speciellt stort för skolbyggnader där runt hälften av alla bränder är anlagda. Antalet anlagda bränder i skolbyggnader ökade under åren 2005-2006 till nära 300 bränder per år och låg på en fortsatt hög nivå under år 2007-2009^{1, 2}. Kostnaderna för dessa bränder är ofta höga. Göteborgs stad, t.ex., har under 2000-talet haft direkta kostnader på mellan 2 och 20 miljoner kronor årligen för anlagda skolbränder¹. Även för andra typer av byggnader är anlagd brand ett problem, och det gäller speciellt flerbostadshus där det sker runt 400 anlagda bränder per år¹.

Forskning om förebyggandet och begränsning av bränder i byggnader har en lång tradition. Dock är brandskyddet i regel inriktat enbart på att skydda liv och inte egendom och speciellt är bygglagstiftningen inriktad på att rädda liv. Boverket kan dock reglera egendomsskydd om det konstateras utifrån statistik, empiriska studier eller samhällskonsekvenser att det finns ett sådant behov³. Detta tillåter en tydligare fokus i byggreglerna på att skydda egendom än tidigare, t ex i fall som anlagd brand. Boverkets byggregler BBR är under revision för närvarande och en ny utgåva är planerad under 2011. Brandavsnittet i BBR, revideras för att ta fram verifierbara funktionskrav och samtidigt förtydliga syften och mål med föreskrifterna. Den nya BBR kommer i än större grad att baseras på funktionsbaserad dimensionering.

Ett första steg i att ta hänsyn till anlagda bränder i brandskyddet är att karakterisera brändernas initiala förlopp samt att även ta fram så kallade dimensionerande bränder. Dimensionerande bränder utgör ett viktigt verktyg vid brandteknisk dimensionering. Denna rapport redovisar resultatet av en litteratursökning efter tillgänglig information om initial brandutveckling av användningskällor som förekommer vid anlagd brand. Målet är att definiera dimensionerande bränder för anlagd brand i skolor samt att på sikt ge riktlinjer för hur dessa ska användas vid brandteknisk dimensionering.

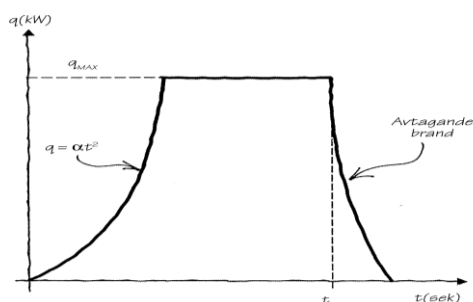
Litteratursökningen har genomförts som en första del i projektet ”Teknik- och riskbaserade metoder för att förhindra och begränsa anlagda bränder” BF 06-06 som är en del av Brandforsk särskilda satsningar mot anlagda bränder⁴. Projektet tar vid där 206-071 ”Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand”¹ och 207-071 ”Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor”⁵ slutar och utgör en viktig pusselbit för att åstadkomma en bred och tvärvetenskaplig ansats såsom avses i Brandforsks särskilda satsning mot Anlagd Brand⁶.

1 Dimensionerande bränder

En dimensionerande brand är de förutsättningar och antagande som görs om brandförloppet från antändning till att branden är släckt⁷. Den dimensionerande branden används ofta för analytisk dimensionering av brandskydd d.v.s. då beräkningar eller kvalitativa resonemang används för att verifiera en särskild brandskyddslösning.

En dimensionerande brand kan bestämmas genom en kombination av småskalig provning och provning i fullskala för det specifika fallet, eller genom analys av tidigare genomförd provning och data⁸. Eftersom sådana provningar är kostsamma och eftersom en stor mängd provningar är nödvändiga för att kunna beskriva samtliga typer av möjliga brandscenarier måste förenklingar göras. Dessutom har man arbetat med uppbyggande av databaser över dimensionerande bränder under många år^{9, 10, 11, 12}.

Den dimensionerande branden förenklas vanligen som en effektutveckling (HRR) över tid. HRR från en brand är ett mått på den potential som finns i att skada människor, miljö och egendom. HRR delas vanligen in i tre faser en växande, en konstant och en avtagande (se Figur 1). I verkligheten består en brand av en rad växande, konstanta och avtagande delar vilka påverkas av flera faktorer⁷. Normalt förenklas dimensionering dock till en HRR likt den i Figur 1.



Figur 1 Principskiss för en dimensionerande brand⁷.

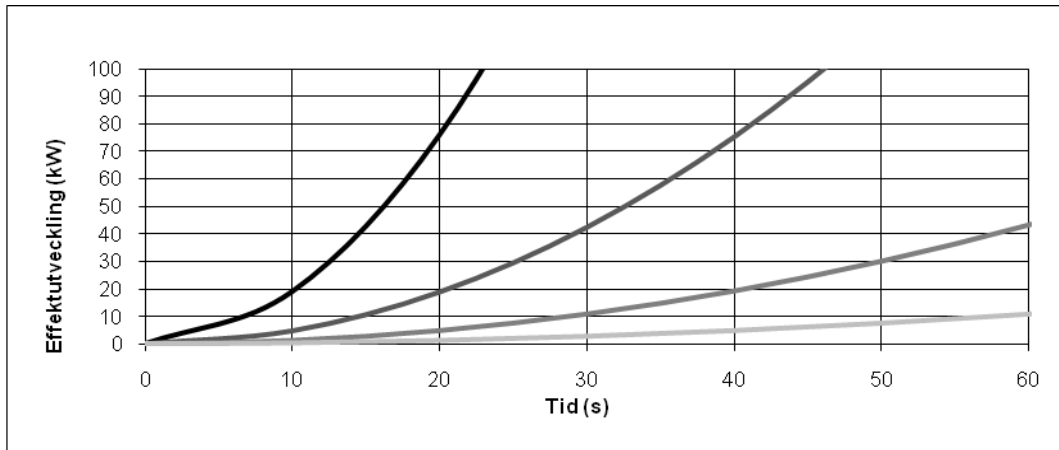
1.1 Det tidiga brandförloppet

En vanligt förekommande metod för att beskriva en tillväxtfasen är genom den s.k. α - t^2 -metoden. National Fire Protection Association (NFPA) i USA har tagit fram ett antal standardiserade sådana kurvor. Metoden utgår ifrån att HRR från en brand tilltar med en speciell faktor (α) och kvadraten på tiden (t).

I annex F till NFPA 204¹³ ges fyra stycken standardiserade värden på brandtillväxt enligt Tabell 1 och Figur 2.

Tabell 1 Standardiserade värden på brandtillväxt.

Tillväxthastighet	α -värde (kW/s ²)
Ultra fast	0,19
Fast	0,047
Medium	0,012
Slow	0,003



Figur 2 Illustration av de fyra standardiserade brandtillväxtkurvorna.

Metoden är enkel och kan vara till nytta vid beskrivning av tillväxten av en brand. Det är dock viktigt att vara medveten om att metoden är utvecklad för att beräkna aktiveringstid för detektorer vilket sker tidigt i ett brandförlopp. Detta gör det tveksamt att använda metoden för större bränder. Enligt Babrauskas¹⁴ finns det lite forskning som stödjer att metoden gäller för bränder som överstiger 100 kW.

Ett annat sätt som kan användas då det brinnande materialet är känt är att använda en HRR-kurva och verkliga förbränningsegenskaper från provningsförsök. I t.ex. Initial Fires¹² och SFPE handboken¹⁵ återfinns sådana data.

1.2 Bränsle- och ventilationskontrollerad brand

När det gäller rumsbränder så kommer brandförloppet att se annorlunda ut jämfört med fritt brinnande objekt. Den inneslutning som ett rum innebär kommer att medföra att brandförloppet kan bli snabbare och HRR kan bli större på grund av bland annat återstrålning från ett varmt brandgaslager. I en rumsbrand så är det även möjligt att övertändning sker, vilket leder till en fullt utvecklad brand⁷.

Om syretillförseln är god till en brand bestäms förbränningshastigheten av hur snabbt bränslet pyrolyseras eller förångas vid bränsleytan, branden är då bränslekontrollerad.

Då syretillförseln är begränsad blir branden ventilationskontrollerad och förbränningshastigheten styrs av syretillgången. Den maximala brandeffekten styrs alltså av massflödet av luft, $\dot{m}_a$, som kommer in i rummet,

$$\dot{m}_a = 0,5 \cdot A_v \sqrt{h_v} \quad (1)$$

där A_v är arean och h_v höjden på öppningar⁷. Med kännedom om massandelen syre i luft och hur mycket energi som kan utvecklas ur ett kilogram syre kan den maximal

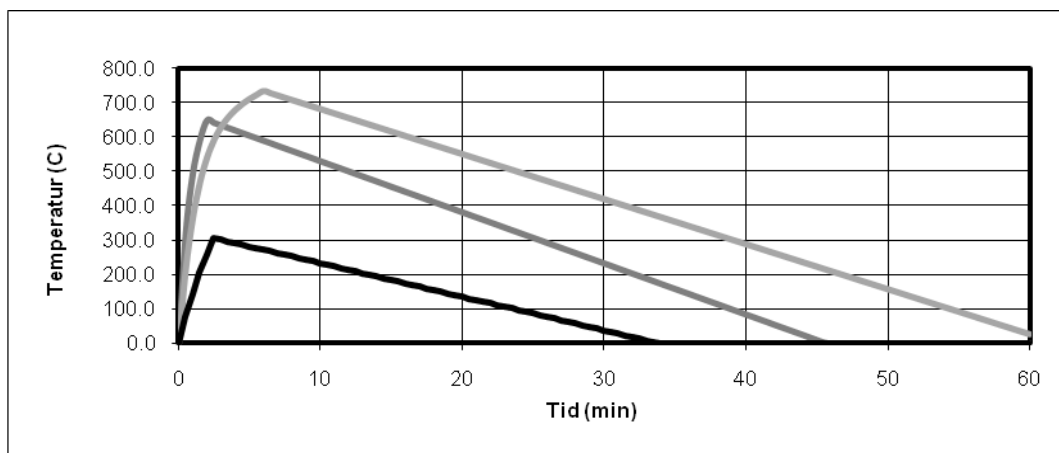
effektutveckling $\dot{Q}_{\max}$ beskrivas som⁷

$$\dot{Q}_{\max} = 1500 \cdot A_v \sqrt{h_v} \quad (2)$$

1.3 Den fullt utvecklade branden

Övertändning brukar definieras som det tillfälle då alla brännbara ytor i ett rum blir involverade i branden. Kännetecken för en övertändning är att värmestrålningen mot golv från brandgaslagret överstiger 20 kW/m^2 , brandgastemperaturen överstiger 600°C och att flammor slår ut genom rumsöppningar. Övertändning är en övergångsfas mellan det tidiga brandförloppet och den fullt utvecklade branden⁷.

För att beskriva temperaturen vid en fullt utvecklad rumsbrand finns det några olika metoder. De europagemensamma dimensioneringsreglerna för konstruktioner heter Eurocode och är en svensk standard¹⁶. I dessa finns en metod för att beräkna temperaturen under ett helt brandförlopp med information om ventilationsöppningar (t.ex. dörrar och fönster) samt brandbelastningen. I Figur 3 illustreras tre stycken temperatur-tid kurvor beräknade enligt Eurocode. De skiljer sig åt eftersom brandbelastningen och storleken på öppningarna är olika.



Figur 3 Exempel på temperatur-tid kurvor för ett rum beräknade med Eurocode.

Vid provning av byggnadsmaterial och byggnadselement används en provningsmetod enligt ISO standard 834¹⁷. Materialet som skall provas placeras i en ugn där temperaturen varierar över tiden enligt den föreskrivna kurvan.

1.4 Brandteknisk dimensionering

Den dimensionerande branden används ofta för analytisk dimensionering av brandskydd d.v.s. då beräkningar eller kvalitativa resonemang används för att verifiera en särskild brandskyddslösning.

Den dimensionerande branden används i en scenarioanalys. I scenarioanalysen är det inte enbart tillväxthastigheten och varigheten som är intressant utan även bränslets energi-innehåll, sotinnehåll, vart branden startar, ventilationsförhållanden, etc. Även hur aktiva system fungerar tas med i brandscenerierna⁷.

Scenarioanalysen kan vara deterministisk eller probabilistisk. I den deterministiska analysen görs inte någon betraktelse av hur sannolika olika brandscenerier är, det görs istället i samband med valet av brandscenerier, t.ex. genom att sannolika eller representativa brandscenerier studeras. Ett par brandscenerier analyseras för att förhoppningsvis visa att inga oacceptabla konsekvenser uppstår om scenarierna inträffar. Svårigheterna med en sådan deterministisk analys är att hitta de brandscenerier som skall undersökas. De får inte vara sådana att byggnaden dimensioneras för onödigt osannolika händelser. De får inte heller vara så lindriga att byggnaden får ett alltför undermåligt brandskydd⁷.

Genom att ta med en sannolikhet för de olika brandscenarierna i analysen kan osäkerheterna kring dem behandlas mer djupgående än i en deterministisk analys. Detta tillvägagångssätt kallas probabilistisk analys. Varje brandscenario presenteras då med en beskrivning av dess sannolikhet och konsekvens. I den probabilistiska analysen tas fler scenarier med för att reducera risken att ett viktigt scenario missas. Oavsett om en deterministisk eller probabilistisk metod används förekommer alltid osäkerheter vid verifiering av brandskydd som måste hanteras⁷.

1.5 Anlagd brand i skolor och förskolor

För att utvärdera brandsäkerheten i en skola eller förskola med avseende på anlagd brand är det alltså nödvändigt att ta fram en dimensionerande brand. Den dimensionerande branden är rimligen det startföremål som används av anläggaren. Denna brand är intressant för att kunna avgöra om vidare brand- och brandgasspridning är möjlig för en specifik skola och vilka passiva samt aktiva tekniska åtgärder som är lämpligast att vidta.

Mot bakgrund av beskrivningen av dimensionerande brand i avsnitt 1.1-1.3 bedöms det viktigt att erhålla information i litteraturstudien om vilka startföremål (material) som förekommer vid anlagda bränder, var dessa föremål placeras, hur de tillväxer initialt och vilken maximal HRR de kan ge initialt. Hela förloppet beror sedan på rumsutformning, ventilation etc.

2 Typiska anlagd brand scenarier

Två projekt har tidigare genomförts inom Brandforsks särskilda satsning mot anlagda bränder som är av speciellt intresse för detta projekt; 206-071 ”Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand” och 207-071 ”Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor”. Nedan sammanfattas de båda projektens resultat.

2.1 Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand

I projektet studerades statistik från tre olika källor; Räddningsverket (nuvarande Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB), Försäkrings AB Göta Lejon och Försäkringsförbundet. Data som inkluderades var Räddningsverkets data från räddningstjänstens insatsrapporter, Försäkringsförbundets statistik över skadeutfall samt den detaljerade statistiken som förts av det kommunala bolaget Göta Lejon.

En viktig slutsats i rapporten är att statistiken från Göteborg/Göta Lejon visar att de anlagda skolbränderna i verkligheten är fler än vad som rapporteras av Räddningsverket. Statistiken visar att det existerar tydliga skillnader mellan olika kommuner gällande anlagd brand. Detta är även uppenbart då statistik jämförs från Brottsförebyggande rådet (Brå) och MSB jämförs.

De objekt utanför byggnader där anlagd brand utgör en betydande del av bränderna är speciellt bränder i bilar, brännbar vätska och avfallsbehållare som t.ex. soptunna, papperskorg och containers.

2.1.1 Anlagda bränder i skolor och förskolor

Baserat på Räddningsverkets statistik konstaterar Blomqvist och Johansson att antalet anlagda bränder i skolor och förskolor ökat från 120 stycken anlagda skolbränder och 16 stycken anlagda förskolebränder 1998 till 198 respektive 43 stycken anlagda bränder 2007. Andelen anlagda bränder i skolor ligger relativt konstant på 50 % medan andelen anlagda bränder i förskolor har ökat under tidsperioden 1998-2007. Dock är det statistiska underlaget ganska litet så det går inte med säkerhet att säga att detta är en verklig trend.

De flesta anlagda bränderna i skolor inträffar kring lunchtid. Däremot inträffar de mest kostsamma anlagda bränderna klockan 19.00-07.00, d.v.s. kvälls- och nattetid. De vanligaste identifierade startutrymmena vid anlagda skolbränder är badrum/toalett, trapphus eller mot utsida av byggnaden. För anlagda bränder i förskolor tyder studerad statistik på att dessa anläggs utanför byggnaden, vanligtvis i olika typer av avfallsbehållare såsom containers, soptunnor och papperskorgar.

De kostsamma bränder som startar inomhus har ofta anlagts med fyrverkerier eller med brännbar vätska. För kostsamma anlagda bränder utomhus har ofta stora antändningskällor som t.ex. bilar och mopeder antänds mot fasader, men även här förekommer brännbar vätska

De två dyraste bränderna i Göteborg under 2006 orsakades av att en stulen bil antändes mot skolans fasad. I det ena fallet ställdes bilen mot entrén med skärmtak på en envånings förskola med träfasad och i det andra fallet stod bilen vid en träfasad på en envånings motionsbyggnad. På förskolan hade man även krossat rutor. Skadorna på förskolan blev omfattande beroende på kanaler i de prefabricerade byggelementen som gav en större rökspridning i konstruktionen med en kostsam sanering som följde. Branden vid motionsanläggningen blev mycket kostsam p.g.a. avsaknad av detektorer på vinden och larm-

överföring samt avsaknad av brandcellsindelning. Den dyraste branden 2007 skedde även den på en envåningsbyggnad med träfasad. Den anlades antagligen på trädäcket i en innerhörna med entré och skärmtak med brännbar vätska.

Det stora flertalet av bränderna i Göteborg från 2006-2008 har anlagts utifrån eller genom att man har brutit sig in på något sätt. Författarna drar därför slutsatsen att ett steg i att förhindra anlagda bränder är att försvåra att man kan ta sig in i byggnaderna eller kasta in brinnande föremål genom luckor, ventiler och brevinkast. Dessutom bör man inte bygga på ett sätt som innebär att en förövare kan arbeta ostört på ett lugnt och skyddat läge.

I de mest kostsamma bränderna har stora antändningskällor i form av bilar använts. Författarna konstaterar att det är väldigt svårt att med byggnadstekniska lösningar förhindra skador från en så pass stor brand. En lösning som de föreslår är att se till att det inte går att köra fram bilar till fasaden och entrén.

Rapporten påpekar att brandcellsindelningen är viktig samt att undvika riskkonstruktioner såsom envåningsbyggnader med skärmtak, takkonstruktion av trä samt träfasad. Vidare konstaterar man att nyttan med snabba detektionslösningar tydligt ses i Göta Lejons statistik.

2.2 Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd brand i skolor?

I projektet genomfördes ett antal fallstudier på inträffade skolbränder och en enkät sändes till brandutredare för att få mer information kring möjliga brandscenarier inom området anlagda skolbränder. Studien baseras på ca 60 fall som inträffat under tiden till projektets start och under projektets gång samt enkätsvar från 14 brandutredare.

2.2.1 Antändningskällor

Vanligt förekommande antändningskällor utomhus är olika former av skräp (t.ex. papper och trä), brännbara vätskor samt olika typer av föremål/fordon t.ex. lådor, möbler, containers, mopeder och bilar. Inomhus är vanliga antändningskällor fyrverkerier, papperskorgar samt Molotov cocktails eller vätskor som kastas in via krossat fönster.

2.2.2 Start av branden

Utomhus startar branden vanligtvis vid/mot fasaden, vid entréer, nischer eller skärmtak där gärningsmannen kan tänkas vara svår att upptäcka. Inomhus startar branden i korridorer, på toaletter, i klasslokaler eller i lärarrum.

De bränder som innebär de största kostnaderna inträffar nästan alltid efter skoltid dvs. kvällar, nätter och helger. Det är alltså viktigt att satsa på åtgärder för att förhindra bränder som kan inträffa efter skoltid, dvs. bränder anlagda utomhus och via att kasta in brännbara vätskor via t.ex. fönster.

2.2.3 Spridning

Vanliga spridningssätt är spridning från fasad till vinden, spridning på vind som saknar sektionering, spridning från fasaden in i byggnaden, spridning från vinden till lokalerna nedanför vinden, samt spridning på grund av att brandcellsgränser inte fungerat tillräckligt bra. Dock är spridning från en brand inomhus mindre vanlig om brandcells-

indelning är bra och brandcellsgränserna korrekt utförda. Spridning beror självklart också på vilka aktiva system som finns i byggnaden, som t.ex. detektion eller sprinklers.

2.2.4 Byggnadstyp och ålder

Baserat på enkäten konstaterar författarna att de flesta bränderna inträffar i byggnader som är byggda före 1980. Dock görs ingen jämförelse med hur stor del av byggnadsbeståndet generellt som är från den tiden. Många av de studerade bränderna får ett snabbt spridningsförlopp p.g.a. brännbara fasader. Att många skolbyggnader är uppförda i trä är något som framkommer både i enkäten och i fallstudierna.

2.2.5 Brister

Både enkäten och fallstudierna visar att tekniska brister som dåligt utförda brandcellsgränser (genomföringar, ej stängda dörrar), dålig konstruktion (takfot, vindar, fasadmaterial, ytskikt), avsaknad av detektionssystem eller automatlarm samt ventilations-system som sprider rök och brand existerar. Andra brister som belyses är dåligt inbrottskydd, dåligt systematiskt brandskyddsarbete (SBA), dålig belysning, dålig insyn, skräp runt och inne i skolor samt avsaknad av vuxennärvaro under rasterna. I vissa fall användes fel släcktaktik av räddningstjänsten vid insatsen t.ex. vid vindsbränder

Värt att notera är att problem med detektion, vindar, vindsektionering, skräp, inbrott, dåliga brandcellsgränser och belysning fortfarande existerar då detta påpekades redan i slutet av 80-talet i en rapport från Brandforsk¹⁸.

2.2.6 Översikt viktigaste brandscenarier

Författarna anser att dessa scenarier är de främst förekommande vad gäller anlagda bränder enligt både fallstudierna och enkäten.

Brand 1 – Utomhus vid fasad

- Tändkälla: Skräp eller brandfarlig vätska med en effekt som varierande mellan 20 och 500 kW.
- Plats: Intill fasad (ofta träfasad) där takfot ger enkel tillgång för brandgaserna till vinden. Spridning sker då via ventilationsöppningar till vinden. Sedan sker rätt ofta spridning på vinden och till underliggande lokaler. En möjlig spridningsväg är även via fasaden in i byggnad på grund att man ofta inte har lika bra brandmotstånd från utsidan till insidan som från insidan till utsidan

Brand 2 – Inomhus

- Tändkälla: Skräp med en effekt som varierande mellan 20 och 200 kW
- Plats: Korridorer eller toaletter.
Spridningen sker då både via dåliga brandcellsgränser och/eller ventilationssystem

Brand 3 – Inomhus

- Tändkälla: Brännbar vätska t.ex. Molotov cocktail med en effekt mellan 100 och 500 kW
- Plats: I klasslokalen eller samlingsrum, i regel med fönster el. dyl. som gör att föremål kan kastas in utifrån.
Spridningen sker då både via dåliga brandcellsgränser och/eller ventilationssystemet.

De effektutvecklingar som anges i rapporten är uppskattningar och grundar sig på de startföremål/antändningskällor som utifrån fallstudien ansetts vara vanligt förekommande. Någon djupare studie av vilken effekt som dessa föremål avger vid brand görs inte i rapporten

2.3 Valda scenarier för litteratursökning

I både fallstudie- och brandstatistikprojektet uppges skräp, brännbar vätska och soptunnor vara vanligt förekommande antändningskällor vid anlagd brand utomhus. Alla dessa scenarier är viktiga eftersom brandskyddet inte är dimensionerat för skydd mot brand utifrån utan endast skydd mot brand som uppstår av misstag som t.ex. elfel och då företrädesvis inomhus och en litteratursökning görs därför på brandutveckling för bränder utomhus.

Vidare har, enligt statistikstudien, en stor del av de dyra bränderna anlagts med större antändningsobjekt, t.ex. bilar och motorcyklar/mopeder, vilka placerats längs en fasad. Av dessa två är mopeder/motorcyklar betydligt svårare att begränsa framkomligheten för och kommer därför också innefattas i litteratursökningen.

Inomhus har de mest kostsamma bränderna anlagts med fyrverkerier, skräp och brännbar vätska. Som scenarier för fortsatt litteratursökning väljs brandfarlig vätska inomhus och fyrverkerier. Skräp inomhus behandlas inte vidare eftersom det anses vara ett scenario som omfattas av traditionell brandteknisk projektering. Ett specialfall av brandfarlig vätska inomhus som behandlas separat är Molotov cocktails.

Scenarierna sammanfattas i Tabell 2, samtliga dessa scenarier är bränder som vanligen inte fångas upp vid traditionell brandteknisk projektering av skolbyggnader. Det är därför viktigt att studera dessa. Bränder som vanligen används vid dimensionering av brandskydd är ”normala” rumsbränder där t.ex. den lösa inredningen brinner. Detta är inte intressant i projektet eftersom problematiken kring dem bedöms vara välutredd sedan tidigare.

Tabell 2 Valda brandscenarier

<u>Brand 1 – Utomhus vid fasad</u> Tändkälla: Skräp/brännbar vätska Plats: Intill fasad
<u>Brand 2 – Utomhus vid fasad</u> Tändkälla: Motorcykel/moped Plats: Intill fasad
<u>Brand 3 – Inomhus</u> Tändkälla: Brännbar vätska & Molotov cocktail Plats: Klasslokal/Samlingslokal med fönster
<u>Brand 4 – Inomhus</u> Tändkälla: Fyrverkeri Plats: Via fönster/brevinkast

3 Litteraturstudie

En litteratursökning har genomförts i syfte att ta fram mer information om brandtillväxten för de antändningskällor som är karakteristiska för anlagda bränder. Litteratursökningen har huvudsakligen gjorts i databasen Compendex vilken samlar vetenskapliga artiklar i alla ingenjörsciens discipliner. Vid utvärderingen av de träffar som erhöles gjordes först en genomgång utifrån titlar, sedan en vidare genomgång av utvalda abstrakt för att avgöra vilka träffar som är relevanta för projektet. Nedan redovisas resultatet av litteratursökningen för utvändiga bränder, mindre fordon, brandfarlig vätska och fyrverkerier.

3.1 Utvändiga bränder

Syftet med denna litteratursökning har varit att hitta information om bränder på utsidan av en byggnad. Information om typ av startföremål och metoder för att modellera en sådan brand och dess rökspridning in i byggnaden har speciellt varit intressant. Litteratursökningen genomfördes i januari 2010 och kan ses i Appendix 1.

De flesta träffar som erhöles behandlade förbränningshastigheter och pyrolys av olika material. Träffar som rörde flammor ut genom fönster och flamspridning mellan våningar via fönster erhöles också. Dessa har dock inte ansetts vara relevanta för projektet.

Totalt erhöles 8 träffar, varav 7 var unika, som ansågs relevanta att gå vidare med i litteraturstudien. Utöver dessa gjordes en litteratursökning på containerbränder, dock utan några relevanta träffar.

3.1.1 Fire safety assessment of wooden facades

Källa: Fire and Materials, 2002, 26: 7–27, Hakkarainen, T., Oksanen, T.¹⁹.

VTT har i ett nordiskt forskningsprojekt testat olika träfasaders brandegenskaper. Fasaderna provades genom att studera två stycken brandscenarier, en liten brand som skulle motsvara en brand utomhus invid fasaden och en brand som skulle motsvara lågorna som slår ut genom ett fönster från en övertänd lokal i samma byggnad. Det första brandscenariet anses vara mest relevant för detta projekt och redovisas kortfattat nedan.

Artikeln redovisar resultat från försök i mellanskala och i fullskala. I mellanskala gjordes 29 försök med olika material, ytbehandlingar och strukturer på ytan. I de flesta fall var försöksytan målad med latexfärg men i några fall även med flamskyddande färg.

Den vertikala försöksytan var 1,2 meter bred och 2,9 meter hög. Som antändningskälla användes en propanbrännare med en effekt på 100 kW. Flamhöjden från den var 0,6 m och strålningen mot försöksytan var 40 kW/m². Exponeringstiden med brännaren varierade med hur försöksytan reagerade. Försöken stoppades 30 minuter efter att försöket startat eller då hela flammor spridits över hela försöksytans längd. Sambandet mellan flamhöjd och HRR uppskattades från experimentella data till ekvation (3).

$$X_f \approx 0,28 \times HRR + 8 \quad (3)$$

Där X_f är flamhöjden i cm och HRR mäts i kW. Max-HRR för olika material och varierade mellan 87-378 kW.

Spridningen längs ytan mätes genom att registrerar tiden då flamfronten nått vissa punkter. Tiden varierade kraftigt mellan olika material och ytbeläggningar. Flamspridningen på målad plywood till 240 cm tog t.ex. 6 minuter och 40 sekunder medan det

för andra material tog upp mot 30 minuter eller så avstannade flamspridning innan den nått 150 cm.

I fullskaleförsöket studerades sex olika fasadstrukturer, fem med två våningar och en med tre våningar. Försöksytan för tvåvåningsfallen var 4,2 meter bred och 5,6 meter hög, för trevåningsfallet var ytan 4,2 meter bred och 8,1 meter hög. Samma brännare som i mellanskaleförsöket användes för fallet med tvåvåningar. I trevåningsförsöket användes två brännare med total effekt på 200 kW. Exponeringstiden med brännaren var 30 minuter och försöket fortsatte tills dessa att flammorna slocknade eller att flamfronten nått toppen på försöksytan.

Spridningen längs ytan mättes genom att registrera tiden då flamfronten nått vissa punkter. Tiden varierade kraftigt mellan olika material och ytbeläggningar. Flamspridningen på målad plywood till 240 cm tog t.ex. 9 minuter och 50 sekunder och nästan 52 minuter till att flamfronten gått över hela fasaden (510 cm), medan det för andra fasadstrukturer enbart spred sig upp till 2 meter. Strålningen mot fasaden från flammorna vid vissa tidpunkter redovisas för denna del i artikeln.

Artikeln mynnar ut i att ett antal kriterier som kan användas vid provning av brännbara fasader. Ingen diskussion förs om varför 100 respektive 200 kW väljs som initial brand och hur den kan tänkas tillväxa. Artikeln bedöms dock kunna vara lämplig senare i projektet då passiva system skall studera och utvärderas.

3.1.2 Wall Flame Heights with External Radiation

Källa: Fire Technology, August 1991, Tu, K. M., Quintiere, J. G.²⁰.

Tu och Quintiere beskriver i en artikel i *Fire Technology* problemet med vertikal brandspridning längs t.ex. en ytterväg. I artikeln presenteras ett samband, som bygger på resultat från experimentella försök, mellan flamhöjd och effektutveckling.

I artikeln redovisa resultat från försök där Akrylplast (PMMA) och gran (Douglas fir) utsattes för strålning på mellan 18 till 34 kW/m². Försöksytorna var 28,5 cm breda och 29,5 cm höga. Massavbrinning, flamhöjd och strålning mättes. Författarna jämför sina resultat med en formel för flamhöjd vid bränder på väggar som tagits fram tidigare av Delichatsios, se ekvation (4)

$$X_f = 4,65 \left(\frac{Q}{c_p T_\infty \rho_\infty g^{1/2}} \right) \quad (4)$$

Författarna kommer fram till att det finns en korrelation mellan flamhöjden av den brinnande väggen och effektutvecklingen från branden. De kommer även fram till att det finns en skillnad på cirka 35 % mellan deras uppmätta resultat och Delichatsios uttryck.

Det nämns inget om hur stor en initial utvändig brand kan vara eller varför de använt en infallande strålning på mellan 18 till 34 kW/m².

3.1.3 Upward Flame Spread on Composite Materials

Källa: Fire Safety Journal 32, 1999, Ohlemiller, T.J., Cleary, T.G.²¹.

I en artikel i Fire Safety Journal från 1999 testas tre stycken modeller för vertikal brand-spridning på ett komposit material bestående av vinylester och glas. Resultaten från modellerna jämfördes sedan mot experiment. De tre modellerna för flamspridning benämns i artikeln som Cleary and Quintiere model, Mitler's model och Model of Brehob and Kulkarni. Dessa modeller är inte framtagna för komposit material.

I artikeln presenteras ett försök som genomförts. En 0,38 meter bred och 1,22 meter lång yta av kompositmaterialet utsattes för en uniform strålning från en yta som var 325 till 600°C varm samtidigt som en metanbrännare på 6 kW tändes vid botten av försöksytan. Hastigheten på flamfronten mättes som funktion av infallande strålning och värme-effekten från brännaren.

Utifrån de genomförda försöken dras slutsatsen att de studerade modellerna är tillräckliga och i viss mån konservativa för att förutse brandtillväxten i det aktuella komposit-materialet.

Testerna av materialet och de resultat som presenteras bedöms inte vara intressant för detta projekt eftersom de behandlar flamspridning i ett specifikt material som ej bedöms vara vanligt förekommande i svenska skolor. Dock kan de utvärderade modellerna för brandspridning var intressant för senare delprojekt inom projektet.

3.1.4 Face Value

Källa: Fire Prevention and Engineers Journals, 2006, Jones, P.²².

I en artikel i *Fire Prevention and Engineers Journals* från 2006 beskrivs ett utvändigt fasadsystem som kan användas för skolbyggnader. I den korta artikeln beskrivs problemet med utvändiga bränder och fördelarna med det aktuella fasadsystemet tas upp. Någon beskrivning av hur fasadbränderna ser ut förekommer dock inte.

3.1.5 Initial Fires

Källa: Rapport från LTH, ISSN 1102-8246¹².

Inte i någon av de artiklar som hittats i litteraturstudien så har specifik information kring brandtillväxt och maximala brandeffekter för utvändiga bränder intill fasad hittats. Därför har det istället ansetts nödvändigt att studera dessa egenskaper hos enskilda fritt brinnande objekt som förekommer som startföremål vid anlagda skolbränder.

När det gäller HRR från bränder så återges en sammanställning i rapporten Initial Fires. Från fallstudierna kan läsas att vanligt förekommande antändningsobjekt utomhus är diverse skräp och papperskorgar. Maxeffekterna för dessa läses ur Initial Fires och kan ses i Tabell 3.

Tabell 3 Exempel på brandeffekter baserade på resultat från fallstudien.

Material	Maxeffekt (kW)	Tid till maxeffekt (s)	Uppskattad brandtillväxt (kW/s ²)
12 mjölk kartonger i en 6,6 liters behållare	80	120	0,006
En påse med skräp (halm och gräs), totalt 4,1 kg	350	120	0,024
En påse med papper, totalt 1,17 kg.	120	60	0,033
Två påsar med papper, totalt 2,34 kg.	290	120	0,020
Tre påsar med papper, totalt 3,51 kg.	350	60	0,097

Brandtillväxten i tabellen har approximerats som en $\alpha \cdot t^2$ kurva utifrån maxeffekt och tid till maxeffekt. Brandtillväxten varierar mellan 0,005 till 0,1 kW/s² och maxeffekten mellan 100 och 500 kW. Värdena på maxeffekt är i linje med de värden som nämns i fallstudierapporten⁵.

Dessa värden gäller dock för fritt brinnande föremål som inte står intill en vägg. För sådana fall är det svårare att få tag på information. Det finns dock uttryck²³ för hur massflöde och flamhöjd påverkas av närheten till en vägg, ekvation (5);

$$\dot{m}_{p_wall} = 0,045 \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (5)$$

Där $\dot{m}_p$ är massflödet vid höjden z över brandkällan med effektutvecklingen Q . Flamhöjden för en brand intill en vägg kommer rimligen bli något längre eftersom inte lika mycket luft kommer kunna tränga in i plymen d.v.s. en del av förbränningen måste ske längre från brandkällan. Uttrycket ovan och likande uttryck för flamhöjd kan ge en bra approximation, men anses inte vara tillräckligt specifika för projektets ändamål.

3.1.6 Heat Release Rate Tests of Plastic Trash Containers

Källa: Stroup, D.W., Madrzykowski, D., NIST, 2003²⁴.

I rapporten utförs två experiment för att karaktärisera de potentiella riskerna för antändning av två nominellt 136 L soptunnor tillverkade av högdensitetspolyeten (HDPE) fyllda med skräp. I Sverige används vanligen en soptunna på 140 L, och vilka är tillverkade av HDPE. I artikeln mäts HRR som funktion av tiden från antändning, med en Oxygen Consumption (OC) kalorimeter. Dessutom mäts det totala värmeflödet på en plats ca 1 m från soptunnans mittpunkt. Maxeffekt och maximalt infallande strålning uppmäts till 300 kW och 5 kW/m² i det första testet och 150 kW och strax under 2 kW/m² i det andra testet. Anledningen till att det andra testet uppvisar lägre värden är att soptunnan smälter och välter under testets gång. Test ett varar i ca 800 sekunder och test två i 900 sekunder. Vid båda testen fylldes soptunnan med 10 kg av diverse brännbart material som kan tänkas hittas på en byggarbetsplats; trä, sågspån, kartong, papper och koppar, plastfolie och papperspåsar från en snabbmatsrestaurang. Värdena på maxeffekt stämmer bra överens med de som anges i Initial Fires och fallstudierapporten.

3.1.7 Heat Release Rate Characteristics of Some Combustible Fuel Sources in Nuclear Power Plants

Källa: Lee, B.T., NBSIR 85-3195, (1985)²⁵.

Rapporten beskriver diverse faromoment som kan uppkomma i ett kärnkraftverk. Däremot bedrivs inga egna experiment utan hänvisningar görs till känd litteratur. HRR för kabelbrand, vätskespill, och papperskorgbrand beskrivs. Ur rapporten framgår det att packningstätheten är en betydande brandegenskap för papperskorgsbränder. Maxeffekter uppskattades till:

125 liter PE-soptunna: 350 kW efter 2 min

6.6 liter papperskorg: 50 kW efter 4 min

Värdena på maxeffekt stämmer bra överens med dem som anges i Initial Fires och fallstudierapporten.

3.2 Mindre fordon

I de mest kostsamma bränderna har stora antändningskällor i form av bilar, mopeder och motorcyklar använts^{1 5}. Det går enkelt att begränsa framkomligheten för bilar till fasaden genom att använda olika typer av hinder. Motorcyklar och mopeder har dock lättare för att komma fram förbi hinder, och innefattas därför i en litteratursökning för att undersöka dess HRR och brandtillväxt. Litteraturstudien gav tre träffar i Google Scholar och kan ses i Appendix 1.

3.2.1 Development and Application of a Large Scale Fire Test Facility

Källa: Tsai, M., Report D8805401, 2006²⁶.

I en del av rapporten görs fullskaliga försök för att mäta flamhöjd och HRR av fristående motorcyklar. Flamhöjden för en motorcykel är ca 2,8-3,5 meter och HRR uppmäts till 1-1,2 MW efter 73 sekunder varav den konvektiva delen utgör ca 40-50%. Den största delen av värmen, 62 %, kommer från plastkroppen som är gjord i Polypropen, PP. Tillväxtkurvan, i MW, motsvarar NFPA92B Ultra fast, ekvation (6);

$$\dot{Q} = 0,0001878t^2 \quad (6)$$

Denna tillväxtkurva är giltig även då 3 motorcyklar placeras bredvid varandra och antänds. Relationen mellan antal motorcyklar och HRR ges av ekvation (7)

$$\dot{Q} = 0,5e^{0,69n} \quad (7)$$

där n är antalet motorcyklar.

3.2.2 The burning behavior of motorcycles

Källa: Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 23, No. 1, pp. 9-18
Lin, C.-Y., 2000²⁷.

Artikeln behandlar brinnegenskaper för 50cc och 125cc motorcyklar/vespor. Totalt genomförs sju fullskaliga försök vilka fördelas mellan fritt brinnande och brinnande i en tvåvånings arkad mot en kolumn, mellan två kolumner, samt mot en vägg. Som antändningskälla används 200 ml paraffin vilket antänds under motorcykeln. Under försökens gång mäts flamhöjd, strålningsflöde, och temperatur. HRR beräknas utifrån

uppgifter om flamhöjden. Slutligen mäts även HRR för motorcykelns plastskrov och sittdyna med en OC kalorimeter. Resultaten kan ses i Tabell 4.

Tabell 4 Uppmätta och beräknade värden av en motorcykel.

Försök	Temp. 3 m ovan [°C]	Strålning 3 m ovan 0,7 m bakom [kW/m ²]	Strålning 1 m ovan 1,2 m bredvid [kW/m ²]	Max HRR [kW]	Tid till max HRR [min]	Flamhöjd [m]
Fritt 125cc	352	61	$0,8 \times 10^{-3}$	1230	6,5	3,8
Fritt 50cc	-	58	$0,6 \times 10^{-3}$	1294	4	4,1
Fritt metall-MC	-	0,0001	$0,01 \times 10^{-3}$	62	2	-
Mot pelare 125cc	303	67	$0,5 \times 10^{-3}$	-	-	-
Mellan pelare 125cc	160	28	$1,1 \times 10^{-3}$	~900	6,5	-
Mot vägg 125cc	421	46	$0,3 \times 10^{-3}$	-	-	-
Plastskrov	-	-	-	1268	1,7	<0,3

Som synes uppnås en temperatur på ca 300-400°C på ett avstånd 3 m ovan motorcykeln, en HRR på ca 1300 kW samt en strålning på 30-70 kW/m² på ett avstånd av 3 m ovanför och 0,7 m bakom motorcykeln. Faktorer som påverkar brandegenskaperna är i hög grad vindstyrkan men även motorcykelns position. Den strålning som uppmäts på väggar och tak är tillräckligt hög för att antända brännbart material, t.ex. trä, och branden kan därför spridas. För motorcyklar med metallskrov är strålningen och HRR dock betydligt lägre och utgör därför en väldigt liten fara mot omgivningen. Den största delen av HRR kommer från plastskrovet, vilka uppvisar ett HRR på 1268 kW uppmätt med en OC kalorimeter.

3.2.3 Motorcycle Burning Behavior in Free Space

Källa: Chang, B-L., Report D8705010, 2000²⁸.

Rapporten beskriver fullskaliga försök där fristående motorcyklar antänds och temperaturen, HRR, och flamhöjd studeras. Max-HRR mäts till 1 MW, flamhöjd till 3-4 meter, och maxtemperatur till 850 °C.

3.3 Brandfarlig vätska

I de genomförda fallstudierna och statistikstudierna av anlagda bränder i skolor^{1, 5} anges brännbar vätska som ett viktigt scenario för såväl invändiga som utvändiga bränder.

Syftet med denna litteratursökning har varit att hitta information om bränder vilka startar genom att en brandfarlig vätska hålls ut på omkringliggande brännbara objekt. Ett specialfall som behandlas separat i nästa avsnitt (se 3.4) är Molotov cocktails.

Litteratursökningen har gjorts i databasen Compendex och Science Direct under januari 2010 och kan ses i Appendix 1. Utöver detta användes sedan tidigare känd litteratur. Litteratursökningen resulterade i 5 träffar.

3.3.1 Flammable and Combustible Liquid Spill/Burn Patterns

Källa: National Institute of Justice, NIJ Report 604-00, 2001²⁹.

Rapportens syftar till att förutsäga mängden flytande bränsle som krävs för att skapa ett brännmönster av en viss storlek. Fullskaliga experiment genomfördes där bensin och fotogen av olika mängder antändes på vinylgolv, träparkettgolv, samt på två olika heltäckningsmattor vilka lagts ovanpå ett parkettgolv. Experimenten utfördes fritt brinnande under en huv i en labblokal och tar därmed ej hänsyn till effekter som rummets uppvärmning eller strålning från det varma brandgaslagret. En metod tas fram för att förutspå hur stor mängd brännbar vätska som krävs för att ge ett visst brännmönster. Brännmönstrets area korrelerar med mängden utspild vätska. Egenskaper som påverkar hur stor utspridningen blir är bränslets densitet, viskositet, ytkrafter samt krafter mellan luften, bränslet och golvet. Vid beräkning av tjockleken tas ej hänsyn till bränslets avdunstning, inträngning, eller den del av bränslet som breder ut sig i gliporna mellan parkettgolvet.

I experimenten användes bensin och fotogen som brännbar vätska i följande mängder; 250 ml, 500 ml och 1000 ml. Det brännbara materialet bestod av vinylgolv, träparkett samt två olika heltäckningsmattor; polyolefin med polypropylene-uppbackning samt en nylonmatta. Testytorna var av storleken 300 x 300 mm, och i de fall heltäckningsmattor användes lades dessa ovanpå parkettgolvet. Den brännbara vätskan hälldes ut mitt på golvet över respektive golv/heltäckningsmatta från en höjd av 510 mm ovanför golvet och tilläts att spridas ut under 60 sekunder. Bränslets tjocklek beräknades genom vetskap om dess area och volym. Antändning skedde via en elektrisk tändsticka som var placerad i mitten av den brandfarliga vätskan. Golven tilläts brinna till dess att de slocknade medan heltäckningsmattorna släcktes efter ca 30 minuter. Alla experiment upprepades 3-4 gånger. HRR togs fram genom användning av en OC-kalirometer.

Slutsatser som kan dras från artikeln är att den brännbara vätskans area kan förutspås och dess tjocklek räknas fram. Spillradien kan räknas ut genom ekvation (8)

$$R(t) = 1,05 \left[\frac{\sigma V}{\mu_1} \right]^{1/4} t^{1/4} \quad (8)$$

där:

R = spillradie [m], t = tiden [s], V = spillvolym [m³], σ = ytspänning [N/m] och μ = kinematisk viskositet [m²/s].

Vid experimenten fanns svårigheter med att antända fotogen vilket gjorde att de flesta experimenten gjordes med bensin. I alla utom ett scenario blev bensinens brännarea identisk med spillarean. Max-HRR för bränslet på en golvyta kan approximeras till 1/4-1/8 av en pölbrands max-HRR av samma diameter. För heltäckningsmattorna kan max-HRR anses likvärdig med en pölbrands max-HRR för samma bränslediameter. Pölbränders HRR kan därför vara användbara för brandmodellering och brandscenarier där brännbar vätska har hållits ut över heltäckningsmattor. Resultatet från experimenten kan ses i Tabell 5. Artikeln behandlade dock inte utflytandet av vätska på olika material som ju blir en väldigt viktig faktor, större än effektvariationen p.g.a. olika underlag.

Tabell 5 Resultat av brandeffekter av brännbar vätska på heltäckningsmatta och golv.

Vätska	Material	Max HRR(kW)	Tid till maxeffekt (s)	Uppskattad brandtillväxt (kW/s ²)
Bensin, 1000 ml	Trägolv	770	18	2,38
Bensin, 500 ml	Trägolv	320	20	0,80
Bensin, 250 ml	Trägolv	110	18	0,34
Bensin, 1000 ml	Vinylgolv	590	18	1,82
Bensin, 500 ml	Vinylgolv	310	18	0,96
Bensin, 250 ml	Vinylgolv	180	20	0,45
Bensin, 1000 ml	Matta 1	460	25	0,74
Bensin, 500 ml	Matta 1	230	25	0,37
Bensin, 250 ml	Matta 1	130	25	0,21
Bensin, 1000 ml	Matta 2	180	45	0,09
Bensin, 500 ml	Matta 2	110	50	0,04
Bensin, 250 ml	Matta 2	60	50	0,02

Brandtillväxten varierar mellan 0,02 till 2,4 kW/s² och max HRR till mellan 50 och 800 kW.

3.3.2 Liquid Fuel Fire Hazard Characterization

Källa: Gottuk, D.T., Flammable and Combustible Liquid Symposium, Chicago, Illinois, September 21-22, 2004³⁰.

Gottuk genomför praktiska experiment på flygbränslet JP-4 och JP-8 för att studera hur HRR och flamspridningshastigheten påverkas av pölbrandens storlek. Experimenten genomförs på ett betonggolv i en stor laborationshall under en huv. Testerna får brinna fritt och rummets geometri påverkar ej resultaten. De experimentella data visar att flamspridningshastigheten och brandintensiteten som funktion av bränsledjupet sjunker drastiskt för tunna skikt jämfört med pölbränder med betydligt större bränsledjup. Resultaten visar även att flammhöjden blir betydligt lägre i tunna bränsleskikt men också att de traditionella beräkningsmodellerna ger rätt resultat om uppmätt brandeffekt används som indata. Den uppmätta effekten för JP-5 bränder i tunna skikt är vid de aktuella försöken 20 - 25% av den effekt som erhålls med tjocka bränsleskikt.

3.3.3 Burning Rate of Liquid Fuel on Carpet (Porous Media)

Källa: Ma, T., Olenick, S.T., et al., Fire Technology, 40, 227-246, 2004³¹.

I denna studie härleds en värme- och masstransportbalans för att analysera förbränningen av brännbar vätska på mattan. Därefter utförs flera småskaliga tester för att validera teorin. Teorin är giltig för poolbränder mellanliggande i storlek (5-20 cm i diameter). Den experimentella utrustningen bestod av en cirkulär panna (105 cm) och en våg som mätte massavbrinningshastigheten. Varierande mängder av bränslen (heptan, fotogen och metanol) spilldes ut och antändes på en heltäckningsmatta, som tilläts brinna fritt.

I artikeln beskrivs de kapillära krafterna spela en stor roll i masstransporten av bränsle upp längs fibrerna till branden. Författaren menar dock att kapillärkrafterna i sig enbart har marginell effekt på massavbrinningshastigheten. Istället domineras processen av energibalansen.

Man menar att en heltäckningsmatta/nopprig matta fungerar främst som ett isolerings-

material, som blockerar värmeförlusten till djupet av poolen, vilket i sin tur ökar massavbränningshastigheten. Mattans isolerande egenskaper gör att en utspild brännbar vätska kommer bete sig likt en pölbrand. Detta är huvudorsaken till att bränder vilka sker på en heltäckningsmatta blir större än de vilka utvecklas på vanligt golv. Maximum Burning Rate Ratio (MBRR) är ett användbart begrepp för att kvantifiera denna ökning. MBRR är proportionerligt mot den maximala massavbränningshastigheten dividerat med den minimala massavbränningshastigheten.

Randvillkoren spelar en viktig roll i massa brinnhastigheten av bränslet, speciellt vid en initial brand. Författaren menar att vid beräkning av HRR av en initial brand bör inversen av MBRR användas, då den minimala massavbränningshastigheten ger den energi som krävs att förånga bränslet. Ovanstående analys är giltig för pool bränder av medelstorlek (dvs 5-20 cm i diameter), när konvektion är det dominerande färdmedlet för värmeöverföring.

3.3.4 Kategorisering av brandfarliga varor med parametern FIGRA

Källa: Beckman, U., Lunds Universitet, 2008³².

I rapporten studeras brandtillväxt utifrån parametern FIGRA (Fire Growth RATE) för en rad brandfarliga varor (lacknafta, Hammarlack, Karlsons universalklister), samt ett antal ej brandfarliga varor (frigolit, leksaker och chips). De varor som kategoriseras som brandfarliga visade en mycket snabb brandtillväxt och höga FIGRA-värden jämfört de varor vilka kategoriseras som ej brandfarliga. Resultatet kan ses i Tabell 6.

Tabell 6 Beräknade Max-HRR och FIGRA-värden för olika varor.

Försök	Max-HRR [kW]	Tid [s]	FIGRA [W/s]
Lacknafta (0,25 l)	2000	124	12500
Lacknafta (1 l PE-HD)	1850	103	14500
Lacknafta (1 l PET)	3100	76	19500
Lacknafta (5 l)	1850	192	8000
Hammarlack	1200	310	3900
Karlsons klister	550	73	7200
Frigolit	145	134	1060
Leksaker	130	118	1120
Chips	225	108	1980

3.3.5 Alkoholbaserade vätskor

För alkoholbaserade vätskor saknas specifik information kring brandtillväxt och maximal HRR för situationer där dessa vätskor hålls ut och antänds på omkringliggande objekt. Därav studeras pölbränders max-HRR för alkoholbaserade vätskor och dessa värden jämförs sedan med petroleumbaserade vätskor, t.ex. bensin. I Enclosure fire dynamics²³ ges följande uttryck för HRR:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A_f \chi \Delta H_c \quad (9)$$

där $\dot{m}''$ massavbränningshastighet [kg/m² s]
 A_f pölbranden area [m²]
 χ förbränningseffektivitet
 ΔH_c fullständiga förbränningsvärmens [MJ/kg]

Massavbränningshastighet kan beräknas via data från Babrauskas handbok¹⁵ enligt

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-k\beta D}) \quad (10)$$

Där $\dot{m}_{\infty}''$ och $k\beta$ är materialegenskaper och finns tabulerade. Om man antar att den potentiella gärningsmannen medför brännbar vätska i storleksordningen en eller några liter kan HRR beräknas. Vätskan som sprids över en horisontell yta flyter ut och generera ett tunt bränsleskikt. Vi kan här anta att spillytan är 1 m² stor och att tjockleken av skiktet är 1 mm tjockt för en liter vätska. För två liter vätska antas tjockleken av skiktet öka till 2 mm, d.v.s. vi antar att spillytan på 1 m² är konstant. Detta antagande byggs på Guttaks forskning vilket har uppskattat att tjockleken för ett mindre vätskespill (<95 l) kommer ligga på mellan 0,7 – 2,8 mm³⁰. Således kan vårt antagande ses som rimligt. Vidare genererar tunna skikt ett HRR som är ca ¼ av det HRR som erhålls vid tjocka bränsleskikt³⁰. I Tabell 7 ses resultatet av HRR.

Tabell 7 Beräkning av HRR för alkoholbaserade och petroleumbaserade vätskor.

Bränsle	Metanol	Etanol	Bensin	Fotogen
$\dot{m}_{\infty}''$	0.017	0.015	0.055	0,039
$k\beta$	-	-	2,1	3,5
D	1,13	1,13	1,13	1,13
$\dot{m}''$	0,025	0,015	0,050	0,038
A_f	1	1	1	1
χ	0,8	0,8	0,7	0,7
ΔH_c	20,0	26,8	43,7	43,2
$\dot{Q}_{pool}$	270	320	1530	1160
$\dot{Q}_{tunnt_skikt}$	67,5	80	383	290

Som synes uppvisar alkoholbaserade vätskor betydligt lägre HRR än petroleumbaserade vätskor.

3.4 Molotov cocktail

Syftet med denna litteratursökning har varit att hitta information om bränder som startar genom en Molotov cocktail. Information om typ av startföremål och metoder för att modellera en sådan brand och dess rökspridning i en byggnad har speciellt varit intressant.

Litteratursökningen har gjorts i databasen Compendex. Litteratursökningen genomfördes i januari 2010. Sökningen gav inga träffar som ansågs relevanta att gå vidare med i litteraturstudien. Utöver detta gjordes även sökningar i Science Direct och Google Scholar.

Vid sidan av litteratursökningen har en rapport från Nya Zeeland som rör Molotov cocktails studerats (se nedan). Denna har varit känd sedan tidigare och påträffades inte i litteraturstudien. De resultat som beskrivs i den har inte publicerats i någon tidskrift. Däremot lades resultaten fram på en internationell brandkonferens anordnad av IAFSS under 2008³³.

3.4.1 Characterising a design fire for a deliberately lit fire scenario

Källa: Richards, P.L.E., University of Canterbury, 2008³⁴.

Enligt rapporten så är bensin den överlägset vanligaste brandfarliga vätskan som används i anlagda bränder. I rapporten undersöks statistik från både USA och Nya Zeeland. Statistiken från USA visar att bensin är nästan fem gånger vanligare än något annan brandfarlig vätska.

Rapporten beskriver flera utförda försök där tre storlekar på Molotov cocktails innehållande bensin genomfördes. Tester gjordes även i ett utrymme som skulle representera en trappuppgång. Data i Tabell 8 är hämtad från de Nya Zeeländska försöken.

Tabell 8 Maxeffekt, tid till maxeffekt och uppskattad brandförsök.

Vätska	Maxeffekt (kW)	Tid till maxeffekt (s)	Uppskattad brandtillväxt (kW/s ²)
Bensin, 350 ml	350 / 375	10 / 8	3,5 / 5,9
Bensin, 750 ml	700 / 900	12 / 10	4,9 / 9,0
Bensin, 1000 ml	900 / 1250	15 / 10	4 / 12,5

De uppskattade brandtillväxterna överstiger det som definieras som ”ultra-fast” enligt NFPA204M¹³. Försöken med Molotov cocktails visade brandtillväxten inte kan anses följa en α -T² kurva. I stället presenteras ett linjärt samband för brandtillväxt i rapporten, se ekvation (11).

$$t_{pk} = 11 + V / 700 \quad (11)$$

där t_{pk} – tid till maximal effektutveckling.
V – volymen på bränslet

Detta linjära samband bedöms vara rimligt att använda för att beskriva brandtillväxten. Den maximal HRR beror på mängden vätska men bedöms variera mellan 300-1300 kW

3.5 Fyrverkerier

Syftet med denna litteratursökning har varit att hitta information om bränder som startar genom en fyrverkeripjäs. Information om typ av startföremål och metoder för att modellera en sådan brand och dess rökspridning i en byggnad har speciellt varit intressant. Litteratursökningen har gjorts i databaserna Compendex, Google Scholar samt Science Direct under januari 2010. och sökningen kan ses i Appendix 1. Vidare fördes diskussioner med räddningstjänsten i Borås, Fyrverkerimästarna, Panda fyrverkerier, Hansson PyroTech och Unique Pyrotechnic. Information söktes även på Building and Fire Research Laboratory (BFRL). Totalt erhöles 13 träffar.

3.5.1 Ability of the fire propagation apparatus to characterise the heat release of energetic materials

Källa: Buteaym H, et. al, Journal of Hazardous Materials 166 (2009)³⁵.

Syftet med denna artikel är att presentera en analys av förmågan att uppskatta HRR av ett energetiskt material. Ett av energetiska materials särdrag är att de tillhandahåller sitt eget syre och förbrukar inte lika mycket av luftens syre vid förbränning. HRR undersöks med två kalorimetriska metoder; en som mäter den uppmätta syreförbrukningen (engelska Oxygen Consumption = OC) och en bygger på genereringen av koldioxid (engelska Carbon Dioxide Generation = CDG). De initiala resultaten där rökpulver förbrändes uppvisar stora skillnader (varierar mellan 44-56 %) mellan de olika kalorimetriska metoderna. OC kalorimetern underskattar den faktiska konsumtionen av syre p.g.a. blandningen tillhandahåller sitt oxidationsmaterial. De parametrar som ändrar HRR mest anses vara energikonstanter samt koncentrationen av syre. En rättelsefaktor utvecklas som dels räknar fram nya energikonstanter men även tar hänsyn till det syre som det energetiska materialet tillhandahåller själv.

I artikeln används två olika pulver; ett bestående av 30 % stärkelse, 30 % laktos och 40 % KNO₃ och ett bestående av 25 % stärkelse, 25 % laktos och 50 % KNO₃. Massan av varje prov vägde 50 gram. Maxeffekten för det första provet blev 8 kW och för det andra 22.5 kW.

3.5.2 Burning and air resistance of fireworks stars

Källa: Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 67, No. 1, 2006, Ooki, Y.³⁶.

I artikeln undersöks brinntider och luftmotstånd av stjärnfyrverkerier. Brinntiderna bestämdes med hjälp av en höghastighetskamera. Den genomsnittliga linjära brinnhastighet av stjärnorna på en testyta var 3 till 6 mm s⁻¹. Den genomsnittliga brinntiden stod i proportion till medeldiameter av samma typ av stjärna. Vid avfyring mot himlen var brann fyrverkerierna 1,6 gånger längre jämfört med tiden på testytan.

3.5.3 Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire

Källa: NIST NCSTAR 2: Vol. I, Grosshandler, W., et al., 2005³⁷.

Rapporten utreder en brand som inträffade på en nattklubb då ett band använde sig av pyroteknikpjäser på scenen. Pyroteknikpjäserna antände ett polyuretanskumisolerings och elden spred sig snabbt längs väggar och tak ovanför dansgolvet. I rapporten görs en rad olika försök; ett där en pyroteknikpjäs antänds parallellt längs en vägg, och ett antal försök där pyroteknikpjäser placeras 1,5 meter från väggen och med en 45° lutning mot olika väggmaterial och antänds. Resultatet kan ses i Tabell 9. Den betydligt högre temperaturen för polyuretanskumförsöket beror på att detta material antänds. Antändning sker ej vid försök mot gips- och träväggar. Pyroteknikpjäserna varade i 16 s.

Tabell 9 Maxtemperatur och strålning för pyroteknikpjäser.

Försök	Max temp [°C]	Max Strålning [kW/m ²]
1 pyroteknikpjäs parallellt längs vägg	100	2,4
2 pyroteknikpjäser 1,5 m från vägg, 45° mot vägg	56	1,2
1 pyroteknikpjäs 1,5 m från vägg, 45° mot vägg av polyuretanskum	980	-

3.5.4 **Räddningschef varnar för ny trend: Fler fyrverkerier mot byggnader**

Källa: Borås Tidning, Håkan Rosenqvist, 2009-12-28³⁸.

I artikeln beskrivs de effekter en raket kan orsaka då den exploderar inomhus. En raket skjuts under ordnade former in i en övningsbyggnad och antänder brännbart material nästan omedelbart. Efter några minuter var rummet övertänt.

3.5.5 **Fireworks stand test burn**

Källa: Fire Technology, 37, 2001, Lynam, D.³⁹.

Artikeln rapporterar värmefflux, temperatur och HRR då ca 450 kg fyrverkeripjäser antänds i en övningsbyggnad. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.6 **Why control fireworks?**

Källa: Fire Prevention, n 200, p 16-22, Jun 1987⁴⁰.

Artikeln beskriver kortfattat ett antal olyckor som inträffat p.g.a. fyrverkerier och konstaterar att ett regelverk eller lagändringar måste upprättas. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet

3.5.7 **The firework disaster in enschede Part 1: Overview & reconstruction**

Källa: Science and Technology of Energetic Materials, v 63, 2002
Weerheijm, J., et al.,⁴¹.

År 2000 inträffade en stor fyrverkeriolycka i bolaget SE Fyrverkeriers lokaler i staden Enschede i Holland. 22 människor dödades och över 700 skadades. Observationer och fakta om olyckan beskrivs i rapporten. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.8 The fireworks disaster in enschede

Part 2: Safety & pyrotechnics

Källa: Science and Technology of Energetic Materials, v 63, 2002
Weerheijm, J., et al.,⁴¹.

Denna rapport behandlar det mest troliga händelseförloppet av olyckan i Enschede och de lärdomar som kan dras om lagring av pyroteknik. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.9 Nightclub fires II

Källa: Canadian Consulting Engineer, v 45, n 3, 2004, Tracey, S. A.⁴².

Artikeln beskriver ett antal fall där fyrverkerier orsakat olyckor på nattklubbar. Det påpekas att rummets innehåll och materials flamspridningshastighet påverkar hur snabbt branden sprider sig.

3.5.10 Fast emission spectroscopy for a better understanding of pyrotechnic combustion behaviour

Källa: Pyrotechnics 30, 2005, No. 1, Weiser, V., Eisenreich, N.⁴³.

Artikeln beskriver hur spektroskopi kan bidra till förståelse av förbränning av energetiska material. Temperaturer på uppåt 2000 K uppnås under korta perioder. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.11 Fireworks preplanning to ensure safety and diminish liability

Källa: Fire Engineering, 2000, Vol. 153 Issue 6, Riggs, J. A.⁴⁴.

Artikeln ger en rad rekommendationer för att minska risken för olyckor. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.12 Firework and their hazards

Källa: Fire Engineering, 1995, Vol. 148, Issue 6, Poulton, T. J.⁴⁵.

Artikeln beskriver att en vanlig raket består av ca 25-50 % pyrotekniskt material och beskriver de vanligaste beståndsdelarna av en raket. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.5.13 Peru Fireworks tragedy

Källa: Fire International, n 194, p 12, 2002, Chuqisengo, M.⁴⁶.

Artikeln beskriver ett olycksförhållande där en felriktad fyrverkeripjäs skapade en kedjereaktion av explosioner och en massiv brand. Artikeln anses ha begränsat intresse för projektet.

3.6 Sammanfattning litteraturstudie

En litteratursökning har genomförts i syfte att ta fram mer information om brandtillväxt, HRR, och förbränningsprodukter för de bränder som är karakteristiska för anlagda bränder. Litteraturstudien innefattade utvändiga bränder, mindre fordon, brandfarlig vätska och fyrverkerier.

För utvändiga bränder saknades specifik information kring brandtillväxt och maximala brandeffekter. Därför har det istället ansetts nödvändigt att studera dessa egenskaper hos enskilda fritt brinnande objekt som förekommer som startföremål vid anlagda skolbränder. Brandtillväxten för dessa varierar mellan 0,005 till 0,1 kW/s² och maxeffekten mellan 100 och 500 kW.

För mindre fordon finns information tillgänglig för motorcyklar antända mot pelare, mellan pelare, mot vägg samt fritt brinnande. Utöver fysisk placering av motorcykeln påverkar även vindförhållande i hög grad HRR och temperatur²⁷. Max-HRR mäts till ca 1-1,3 MW, flammhöjd till 3-4 meter och maxtemperatur till 850°C, brandtillväxten är ultra fast enligt NFPA92B^{13 26 28}. Strålningen och temperatur tre meter ovan motorcykeln mättes till 30-70 kW/m² och 300-400°C²⁸. Den största delen av värmen, 62 %, kommer från plastkroppen. Motorcyklar med metallskrov har dock betydligt lägre strålningen och HRR och utgör en liten fara mot omgivningen

Angående brännbar vätska och Molotov cocktails finns statistik som visar att bensin är den överlägset vanligaste brandfarliga vätskan som används i anlagda bränder. Enligt statistiken är bensin nästa fem gånger vanligare än något annan brandfarlig vätska³⁴. Max-HRR och brandtillväxt för bensin ges till 50-800 kW och 0,02-2,4 kW/s². För Molotov cocktails är max-HRR 300-1300 kW och ges av ett linjärt tillväxtsamband. Alkoholbaserade vätskor uppvisar betydligt lägre HRR än petroleumbaserade vätskor.

Spillarean, utflytning och tjockleken för en brännbar vätska beror på mängden vätska, vätskans viskositet, ytspänning och underlagets släthet^{29 47}. För släta ytor fås HRR på en fjärdedel till en åttondel av de värden som uppmäts vid fristående pölbränder av samma vätska och diameter. När brännbar vätska antänds på heltäckningsmattor uppnås likvärdiga HRR jämfört med fristående pölbränder.

Inga relevanta experimentella försök har hittats för fyrverkerier. Buteaym et al.³⁵ pekar på att HRR underskattas ifall mätningar görs via en OC-kalorimeter, då denna inte tar hänsyn till det faktum att pyrotekniska material tillhandahåller sitt eget syre. Rapporten från Grosshandler tyder på att pyroteknikpjäser kan antända vissa material, som t.ex. polyuretanskum³⁷. Dock behövs mer information då experimentell data från fyrverkerier helt saknas och pyroteknikpjäser kommer i olika storlekar och former.

4 Diskussion

Statistik visar vilka startföremål som förekommer vid utvändiga bränder. Ett vanligt förekommande scenario är att t.ex. en papperskorg alternativt något annat brännbart material samlas intill en fasad tänds på. Branden kan spridas till en brännbar fasad och via takfoten in till vinden. Litteraturstudien har visat att det går att hitta information om brandtillväxt, effektutveckling och förbränningsprodukter av papperskorgar, soptunnor etc då de är fritt brinnande. Dock är det så att när brinnande material placeras intill en vägg växer flamman. När väl branden har tagit sig i fasaden så finns det dokumenterade försök som tas upp i litteraturstudien liksom modeller som beskriver detta. Hur branden tillväxer och sprids på en fasad beror mycket på vilket fasadmateriel det är, vilken ytbehandling som förekommer och även hur strukturen på ytan är. De försöksdata som finns tillgängliga vad avser soptunnor ger en maxeffekt på 300-350 kW för en HDPE respektive PE soptunna²⁴²⁵. Dessa var båda av storleken hushåll. Antagligen är det mer vanligt med mer containerliknande soptunnor.

I de mest kostsamma bränderna har stora antändningskällor i form av bilar, mopeder och motorcyklar använts¹⁵. Rapporten fokuserar i detta fallet på motorcyklar och mopeder då dessa är mer mobila, jämfört med bilar, och inte begränsas i lika hög mån av hinder och upphöjningar. De fullskaliga försöksdata som finns tillgängliga tyder på en max-HRR på 1000-1300 kW, en flammhöjd på 3-4 m, och en strålning på 30-70 W/m² på ett avstånd av 3 m ovanför brandhärden och 0,7 m bakom motorcykeln²⁶²⁷. Brandtillväxtkurvan motsvarar NFPA92B Ultra fast och temperaturen ligger på ca 300-400°C på ett avstånd av 3 m ovan motorcykeln²⁶²⁷. Den strålning som uppmäts på väggar och tak är tillräckligt hög för att antända brännbart material, t.ex. trä, och branden kan därför spridas. Den största delen av värmen, ca 60 %, kommer från motorcykelns plastkropp. För motorcyklar med metallskrov är strålningen och HRR dock betydligt lägre och utgör därför en liten fara mot omgivningen²⁷. Befintlig litteratur anses vara tillräcklig och inga experimentella försök bör genomföras.

Brandfarlig vätska är ett scenario av anlagd brand som förekommit både i fallstudierna och i statistiken. Statistiken från USA visar att bensin är nästa fem gånger vanligare än något annan brandfarlig vätska³⁴. Scenariot kan dock te sig annorlunda beroende på var den brandfarliga vätskan hålls ut. Hur stor spillarean, utflytningen och tjockleken blir i praktiken beror på mängden vätska, vätskans viskositet, ytspänning och underlagets släthet²⁹⁴⁸. För släta ytor fås HRR på en fjärdedel till en åttondel av de värden som uppmäts vid fristående pölbränder av samma vätska och diameter. Detta beror på att en minskad tjocklek av bränsleskiktet dramatiskt sänker HRR då randeffekterna och värmeförluster mot golvet ökar. När brännbar vätska antänds på heltäckningsmattor uppnås likvärdiga HRR jämfört med fristående pölbränder eftersom mattan isolerar bensinen och därmed minskar värmeförlusterna. Befintlig litteratur ger en bra bild över förloppen och anses vara tillräckligt för att skapa en dimensionerande brand. Dock saknas information om t.ex. brännbar vätska som kastas mot en fasad.

Den omfattande rapport från Nya Zeeland³⁴ som studerats ger en bra uppfattning om hur en inledande brand kan se ut då Molotov cocktail kastas in i ett rum. Trots att det enbart rör sig om en rapport på universitets webbsidan så har en serie prover utförts vilket gör att det resultat som presenteras anses vara tillräckligt för att kunna skapa en dimensionerande brand som kan användas för att studera effekterna av olika tekniska brandskyddsåtgärder. Resultaten från denna rapport kan användas tillsammans med de resultat som framkommit över hur underlaget påverkar HRR.

Inga relevanta experimentella försök har hittats för fyrverkerier. Buteaym et al.³⁵ pekar på att HRR underskattas ifall mätningar görs via en OC-kalorimeter, då denna inte tar hän-

syn till det faktum att pyrotekniska material tillhandahåller sitt eget syre. Rapporten från Grosshandler tyder på att pyroteknikpjäser kan antända vissa material, som t.ex. polyuretanskum³⁷. Dock behövs mer information då experimentell data från fyrverkerier helt saknas och pyroteknikpjäser förekommer i olika storlekar och former. Parallellt med litteratursökningen kontaktades och diskuterades fyrverkeriers HRR med räddningsverket⁴⁹, Panda Fyrverkerier⁵⁰, Unique Pyrotechnic⁵¹, Hansson PyroTech⁵² och Fyrverkerimästarna; dock utan resultat. Försök behöver därför göras för att karakterisera förmågan att antända andra material i ett rum hos en fyrverkeripjäs.

Trenden går mot allt större fyrverkeripjäser, det bedöms dock som rimligt att man karakteriserar några mindre pjäser som är i den storleken att de kan tänkas stoppas in genom en brevlåda eller ett ventilationssystem. Eftersom det är svårt att mäta effektutvecklingen med OC och det är ett ganska snabbt förlopp med risk för skador rekommenderas en annorlunda metod. Raketen stoppas i ett perforerat rör som är slutet i ena änden. En bit ifrån röret placeras ett plattermoelement som mäter den värme som avges. Denna värme kan sedan jämföras med den värmepåverkan med vilken man normalt provar olika typer av byggnadsmaterial. En annan möjlighet är att utföra experiment likt det räddningstjänsten gjorde för Borås Tidning^{38 49}, d.v.s. att under kontrollerade former skjuta in en raket in i en övningsbyggnad för att studera och videofilma brandförloppet.

5 Slutsatser

I rapporten har följande dimensionerande bränder för anlagda skolbränder studerats:

- Utvändiga bränder
- Mindre fordon
- Brandfarlig vätska
- Molotov cocktails
- Fyrverkerier

Samtliga dessa bränder fångas vanligen inte upp vid traditionell brandteknisk projektering av skolbyggnader. Information kring brandtillväxt, HRR och förbränningsprodukter från dessa bränder har eftersökts i en litteraturstudie.

För ”mindre fordon”, ”brandfarlig vätska” och ”Molotov cocktail” bedöms det att tillfredställande information erhållits via litteraturstudien, se Tabell 10, för att kunna använda dem för att utvärdera möjligt passivt och aktivt brandskydd.

Tabell 10 Resultat av litteraturstudien för brandfarlig vätska och Molotov cocktail.

	Max effekt (kW)	Tillväxt	Material
Brandfarlig vätska	50-800	0,02-2,4 kW/s ²	Bensin på brännbart golv material
Molotov cocktail	300-1300	Linjärt tillväxtsamband	Bensin
Mindre fordon	1000-1300 kW	0,19 kW/s ²	Motorcykel med plastschro (PP)

För ”utvändiga bränder” finns det tillgänglig information om HRR för enskilda fritt brinnande startföremål samt information om brandspridning på olika fasader. Dock kan det vara intressant att mäta upp brandeffekten på en typisk skolsöptunna. Det finns även information kring HRR, strålning och brandtillväxt av mindre fordon brinnande mot pelare, mellan pelare och mot vägg. Den största delen av värmen, ca 60 %, kommer från motorcykelns plastskropp. För motorcyklar med metallskropp är strålningen och HRR dock betydligt lägre och utgör därför en väldigt liten fara mot omgivningen.

För ”fyrverkeri” har inga värden på hur en brand utvecklas hittats i litteraturstudien och försök behöver därför göras. Eftersom det är svårt att mäta effektutvecklingen med OC och det är ett ganska snabbt förlopp med risk för att skador rekommenderas en annorlunda metod. Raketen stoppas i ett perforerat rör som är slutet i ena änden. En bit ifrån röret placeras ett platttermoelement som mäter den värme som avges. Denna värme kan sedan jämföras med den värmepåverkan med vilken man normalt provar olika typer av byggnadsmaterial. För testen bör raketer väljas som är så pass små att det är möjligt att stoppa in dem genom en större brevlåda eller ventilationsöppning men samtidigt så stora att de utgör en antändningsrisk.

6 Referenser

- 1 Blomqvist, P., Johansson, H., Brandstatistik – Vad vet vi om anlagd brand, SP rapport
2008:48, Borås, 2009
- 2 [http://www.msb.se/sv/Start1/Nyheter-fran-MSB/Nyheter/Preliminar-statistik-for-
3 skolbrander-2009/](http://www.msb.se/sv/Start1/Nyheter-fran-MSB/Nyheter/Preliminar-statistik-for-skolbrander-2009/) [Hämtad 23/3 2010]
- 4 [http://www.boverket.se/Global/Bygga_o_forvalta/Dokument/Bygga_nytt/Brandskydd/Framtidens%20
5 brandregler/Alla%20r%C3%A4ttsutredningar%2020070509.pdf](http://www.boverket.se/Global/Bygga_o_forvalta/Dokument/Bygga_nytt/Brandskydd/Framtidens%20brandregler/Alla%20r%C3%A4ttsutredningar%2020070509.pdf) [Hämtad 24/2 2010]
- 6 <http://www.anlagdbrand.se/sv/Sidor/default.aspx> [Hämtad 24/2 2010]
- 7 van Hees, P. Johansson, N., Fallstudier – Vilka tekniska faktorer spelar en roll vid anlagd
8 brand i skolor?, Rapport 3148. Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2010
- 9 Simonson, M. ”Anlagd brand – ett stort samhällsproblem. Brandforsk förstudie.” SP Rapport
10 2007:21, ISSN 0284-5172, Borås, 2007.
- 11 Brandskyddshandboken. Rapport 3134. Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lund, 2005
- 12 Design of Detection Systems. Section Four, Chapter 1. SFPE Handbook of Fire Protection
13 Engineering. Third edition. Society of Fire Protection Engineers. 2002
- 14 Data base for Design Fires – Brandforsk Project 327-021
- 15 Dimensionerande bränder i avgränsade utrymmen, 2004,
16 http://www.svbf.se/A1_Omoss/Dok/BF_rapporter_omr_3.asp
- 17 Hansson, K., Utvärdering av metoder för val av dimensionerande brandscenarier, Report
18 5220, Lund 2007
- 19 Särndqvist, S., Initial Fires, 1993, Department of Fire Safety Engineering, Lund University,
20 Lund
- 21 Standard för Smoke and Heat Venting. NFPA 204. Annex F. National Fire Protection
22 Association, 2007
- 23 Appendix: the T2 Fire and Its Tenuous Relation To Reality. Babrauskas, Vytenis. Journal of
24 Fire Protection Engineering. Vol. 8, issue 2. 1996
- 25 SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Third edition. Society of Fire Protection
26 Engineers. 2002
- 27 Eurocode 1: Laster på Bärverk – Del 1-2: Allmänna laster – Termisk och mekanisk verkan av
28 brand. SS-EN 1991-1-2, 2002
- 29 Fire Resistans Tests. Elements of Building Constructions. ISO 834 International Standards
30 Organisation
- 31 Strandberg, L., Förstudie till Brandforsks projekt H42, Utvärdering av förebyggande tekniska
och sociala åtgärder mot anlagda bränder främst i bostadsområden och skolor
- Fire and Materials, 2002, 26: 7–27, Fire safety assessment of wooden facades, Hakkarainen,
T., Oksanen, T.
- Fire Technology, August 1991, Wall Flame Heights with External Radiation, Tu, K. M.,
Quintiere, J. G.
- Fire Safety Journal 32, 1999, Upward Flame Spread on Composite Materials, Ohlemiller,
T.J., Cleary, T.G.
- Fire Prevention and Engineers Journals, 2006, Face Value, Jones, P.
- Karlsson, B., Enclosure fire dynamics, 2000
- Stroup, D.W., Madrzykowski, D., NIST, 2003
- Lee, B.T., NBSIR 85-3195, 1985
- Tsai, M., Development and Application of a Large Scale Fire Test Facility, Report
D8805401, 2006
- Lin, C.-Y., The burning behavior of motorcycles, Journal of the Chinese Institute of
Engineers, Vol. 23, No. 1, pp. 9-18, 2000
- Chang, B-L., Motorcycle Burning Behavior in Free Space, Report D8705010, 2000
- National Institute of Justice, NIJ Report 604-00, 2001
- Gottuk, D.T., Liquid Fuel Fire Hazard Characterization, Flammable and Combustible Liquid
Symposium, Chicago, Illinois, September 21-22, 2004
- Fire Technology, 40, 227-246, 2004, Burning Rate of Liquid Fuel on Carpet (Porous Media),
Ma, T., Olenick, S.T., et al.

- 32 Beckman, U., Kategorisering av brandfarliga varor med parametern FIGRA, Lunds Tekniska
Universitet, 2008
- 33 Richards, P.L.E., Design Fires for Deliberately Lit Fire Scenarios in which Bottled Petrol is
used as the Accelerant, 2008, International Association for Fire Safety Science/
DOI:10.3801/IAFSS.FSS.9-1017
- 34 Richards, P.L.E., Characterising a design fire for a deliberately lit fire scenario, University of
Canterbury, 2008
- 35 Journal of Hazardous Materials 166 (2009) 916-924, Ability of the fire propagation apparatus
to characterise the heat release of energetic materials, Buteaym H, et. al,
- 36 Sci. Tech. Energetic Materials, Vol. 67, No. 1, 2006, Burning and air resistance of fireworks
stars, Ooki, Y.
- 37 Grosshandler, W., et al., Report of the Technical Investigation of the Station Nightclub Fire,
NIST NCSTAR 2: Vol. I, 2005
- 38 Rosenqvist, H., Räddningschef varnar för ny trend: Fler fyrverkerier mot byggnader, Borås
Tidning, 2009-12-28
- 39 Fire Technology, 37, 2001, Lynam, D., Fireworks stand test burn
- 40 Fire Prevention, n 200, p 16-22, Jun 1987, Why control Fireworks?
- 41 Science and Technology of Energetic Materials, v 63, 2002, The firework disaster in
enschede, Weerheijm, J., et al.
- 42 Canadian Consulting Engineer, v 45, n 3, 2004, Tracey, S. A.
- 43 Pyrotechnics 30, 2005, No. 1, Fast emission spectroscopy for a better understanding of
pyrotechnic combustion behaviour, Weiser, V., Eisenreich, N.
- 44 Fire Engineering, 2000, Vol. 153 Issue 6, Firework preplanning to ensure safety and diminish
liability, Riggs, J. A.
- 45 Fire Engineering, 1995, Vol. 148, Issue 6, Firework and their hazards, Poulton, T. J.
- 46 Fire International, n 194, p 12, 2002, Peru Fireworks Tragedy, Chuqisengo, M.
- 47 Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och västkor (FOA-handboken), Försvarets
Forskningsanstalt, Stockholm, 1995
- 48 Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och västkor (FOA-handboken), Försvarets
Forskningsanstalt, Stockholm, 1995
- 49 Wahlbeck, K., Chef för Södra Älvsborgs räddningstjänstförbund
- 50 Siitam, A., Marknads- och försäljningschef Hanssons Fyrverkerier
- 51 Hultgren, J., Chef för Unique Pyrotechnic
- 52 Alenfelt, P., Hansson PyroTech

Appendix 1: Sökord litteraturstudie

Tabell 11 Resultat av litteratursökning för utvändiga bränder.

Nr.	Sökord	Antal träffar	Relevanta träffar
1	fire + external + outside	40	0
2	fire + external + facade	4	2
3	fire + external + cfd	18	0
4	fire + external + heat release	81	2
5	fire + external + school	104	0
6	fire + external + arson	2	0
7	fire + outside + facade	3	2
8	fire + outside + cfd	16	0
9	fire + outside + arson	1	0
10	fire + outside + heat release	21	1
11	fire + outside + school	25	1
	Totalt:	315	8

Tabell 12 Resultatet av litteratursökning för mindre bränder.

Nr.	Sökord	Antal träffar	Relevanta träffar
1	Motorcycle HRR	173	3

Tabell 13 Resultatet av litteratursökning för brandfarlig vätska.

Nr.	Sökord	Antal träffar	Relevanta träffar
1	arson + oil	5	0
2	arson + pool + fire	3	1
3	arson + gasoline	7	0
4	arson + liquid	15	1
	Totalt:	315	2

Tabell 14 Resultat av litteratursökning Molotov cocktails.

Nr.	Sökord	Antal träffar	Relevanta träffar
1	molotov cocktail	0	0
2	accelerate + fire + heat release	30	0
3	accelerate + fire + cfd	11	0
4	accelerate + fire + arson	11	0
5	accelerate + fire + deliberately	2	0
6	accelerate + fire + school	86	0
	Totalt	96	0

Tabell 15 wResultat av litteratursökning fyrverkerier.

Nr.	Sökord	Antal träffar	Relevanta träffar
1	Fireworks + arson	1	0
2	Fireworks + deliberately	0	0
3	Fireworks + hrr	0	0
4	Fireworks + heat release	0	0
5	Fireworks + fire	42	2
6	Pyrotechnic + arson	0	0
7	Pyrotechnic + deliberately	1	0
8	Pyrotechnic + heat release	50	1
9	Pyrotechnic + hrr	0	0
10	Pyrotechnic + fire	176	7
	Totalt	270	10