

Haukur Ingason  
Anders Lönnermark

**Brandbelastning och  
brandscenarier för  
järnvägstunnelar**

SP Arbetsrapport 2004:30  
SP Brandteknik  
Borås 2004

## Abstract

The report contains a short description of the Runehamar tests and a proposal to design fires for railway tunnels. A summary of fires in railway tunnels is presented as well as investigation of fire behaviour in railway wagons. Based on the information given in the report, a proposal to design fires is given and the temperature load. Requirements for fire protection of interior materials of railway cars are also presented.

Key words: fire load, fire scenario, heat release rate, train coach, tunnel

**SP Sveriges Provnings- och  
Forskningsinstitut**  
SP AR 2004:30  
Borås 2004

**SP Swedish National Testing and  
Research Institute**  
SP Technical Notes 2004:30

Postal address:  
Box 857,  
SE-501 15 BORÅS, Sweden  
Telephone: +46 33 16 50 00

Telefax: +46 33 13 55 02  
E-mail: [info@sp.se](mailto:info@sp.se)

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Beskrivning av Runehamarförsöken</b>	<b>8</b>
2.1	Brandeffekt	9
2.2	Gastemperatur	9
2.3	Brandbekämpning	10
2.4	Jämförelse med brand i passagerarvagn	11
<b>3</b>	<b>Brandutveckling i järnvägstunnlar</b>	<b>12</b>
3.1	Relevanta bränder i järnvägstunnlar	12
3.2	Uppmätta brandeffekter från spårfordon	15
3.3	Uppmätta taktemperaturer	19
3.4	Modellskaletförsök	21
<b>4</b>	<b>Dimensionerande bränder</b>	<b>26</b>
4.1	Tidigare brandscenarier	26
4.2	Nytt beräkningssätt	29
<b>5</b>	<b>Brandkrav för tåg</b>	<b>33</b>
5.1	Brandkrav SJ	33
5.2	prEN 45545	34
<b>6</b>	<b>Förslag till dimensionerande brandscenarier</b>	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>37</b>

## Förord

SP Brandteknik initierade och genomförde i samarbete med SPs systerorganisationer i Norge (SINTEF) och Holland (TNO) fullskaliga brandförsök i Runehamar tunneln hösten 2003. Försöken ingick som en del i det projekt som presenteras i denna rapport. Banverket var en av delfinansierarna för dessa försök. Andra finansiärer för Runehamarförsöken var Vägverket, Räddningsverket, BRANDFORSK och EU-kommissionen via EU-projektet UPTUN. Ett antal industriella sponsorer deltog i försöken. Dessa var PROMAT International och Gerco i Holland som närmast branden skyddade tunneltaket mot den höga värmebelastningen och B I G Innovation i Tyskland/Tempest i USA som medverkade med fläktar för att åstadkomma långsgående flöde i tunneln. Norska vägverket, som äger Runehamartunneln, bidrog genom att låna tunneln till försök och genom hjälp vid bedömning av rasrisker. Vi vill tacka alla dessa företag och institutioner för deras medverkan i Runehamarförsöken.

Vi vill också tacka Jesper Axelsson vid SP Brandteknik. Kapitel 5 kring Brandkrav för tåg bygger delvis på tidigare arbete utfört av honom i samband med framtagandet av brandkrav för Botniabanan.

## Sammanfattning

En sammanställning av gammal och ny kunskap avseende brandutveckling i spårbundna fordon redovisas i rapporten. I rapporten beskrivs också ett förslag till dimensionerande brandlast och brandscenarier för järnvägstunnlar. Underlaget för valet av brandscenarierna hämtades från tidigare brandförsök och från inträffade bränder i järnvägstunnlar. Tre olika brandscenarier som kan användas vid funktionsbaserad dimensionering av utrymningssäkerhet i järnvägstunnlar med passagerartåg. Förslaget omfattar inte transport av farligt gods eller brand i lok.

Rapporten beskriver de försök som har gjorts på uppdrag av bl a Banverket i Runehamartunneln 2003. En brand i en passagerarvagn (stålvagn) betes sig annorlunda jämfört med en brand i det gods som användes i Runehamartunneln. En fullt utvecklad brand i en passagerarvagn av stål är betydligt mer lik en rumsbrand än en öppen ställagebrand som utsätts för högt ventilationsflöde som den i Runehamar. En passagerarvagn i aluminium utan brandavskiljande funktion skulle kunna brinna under liknande förhållanden (taket brinner bort) men mängden brännbart material per kvadratmeter är betydligt lägre. En brand i en passagerarvagn (stål) blir inte lika känslig för ventilationshastigheten som en öppen brand. Runehamarförsöken kan jämföras med konsekvenserna av en brand i en godsvagn med relativt öppen last (d v s inte stålcontainer) eller vid en brand där en långtradare transporteras på en godsvagn.

De temperaturnivåer som uppmättes i Runehamarförsöken (1200 – 1365 °C ) har inte observerats i andra fullskaleförsök som har gjorts med passagerarvagnar i tunnlar. Fullskaliga försök med spårbundna fordon visar att högsta uppmätta taktemperaturen ligger mellan 650 – 1060 °C . Tills vidare föreslås en HC-kurva som en lämplig tid-temperatur kurva för tågtunnlar. Den högsta taktemperaturen blir då 1100 °C. Brandvaraktigheten bör bestämmas av den energimängd som finns för hela tågsättet och inte ifrån enskild vagn.



# 1 Inledning

Syftet med projektet var att föreslå dimensionerande brandlast och brandscenarier för järnvägstunnlar samt att presentera resultat från fullskaliga brandförsök i Norge. Underlaget för att bestämma brandscenarierna hämtas från dessa brandförsök, tidigare brandförsök och från inträffade bränder. En sammanställning av gammal och ny kunskap avseende brandutveckling i spårbundna fordon redovisas.

Målsättningen är att ge bättre underlag för att utveckla säkerhetskoncept för järnvägstunnlar, vilket i sin förlängning kan leda till ökad säkerhet för resenärer och personal. Resultatet från projektet kan implementeras i gällande regelverk, ge bättre indata till riskanalyser samt användas vid projekteringen av pågående projekt och insatsplanering för räddningstjänsten.

De bränder som har inträffat i Europa de senaste åren både i väg- och spårtunnlar visar att problemen är mycket mer komplicerade än man tidigare har trott och potentialen för allvarliga konsekvenser är stor. Räddningstjänstens begränsade möjligheter till en effektiv insats har också uppenbarats. Efterspelet efter varje olycka kräver mycket stora insatser, inte minst från myndighetshåll. Denna typ av olyckor inträffar emellertid mycket sällan i järnvägstunnlar på grund av den höga säkerhet som för övrigt präglar järnvägstrafik. Riskerna är också relativt små jämfört med andra typer av transportsystem såsom biltunnlar, men på grund av det höga antalet resenärer så kan konsekvenserna bli katastrofala om branden får möjlighet att utvecklas. Därför finns det behov av att bättre förstå vilka konsekvenser en brand i en järnvägstunnel kan få. Behovet av denna kunskap är stor både för projektörer och för de som författar regelverken.

I dag dimensioneras järnvägstunnlar för en brand i en passagerarvagn (15 MW) och man antar att temperaturutveckling för bärande system och installationer är oberoende av brandens storlek eller placering. Det finns behov av att studera andra brandscenarier, speciellt med tanke på hur branden kan spridas mellan flera vagnar. En kvalitativ bedömning av riskerna för brandspridning mellan vagnarna bör därför genomföras och hur man kan begränsa densamma. Brandens uppkomst och initiella brandspridning har inte undersökts i denna rapport.

Temperaturen i taket och därmed den termiska påverkan på omgivningen kommer att variera mycket beroende på var branden startar och hur den utvecklas. Den mest kritiska punkten när det gäller bärförmågan eller risk för spjälkning behöver inte vara direkt ovanför den punkt där branden startar. Den kan likaväl uppstå bortom den plats där branden började. Därför finns det ett behov av att utreda i vilken mån man kan ge differentierade brandkrav när det gäller tunnelns bärande huvudsystem, inredning och installationer.

Det finns ett behov av ytterligare insatser för analys av brandscenarier och temperaturutveckling i järnvägstunnlar som kan implementeras i gällande regelverk. Banverket arbetar med riskanalyser i tunnelsäkerhetsfrågorna, vilket ställer höga krav på kvalitén på indata till analyserna. Ökat urval av realistiska brandscenarier förbättrar riskanalysens resultat. För att uppnå det så krävs ytterligare insatser med hjälp av fullskaliga experiment i tunnlar. Därför innefattar projektet även fullskaleförsök genomförda i en tunnel i Norge våren 2003, med fokusering på temperatur och brandutveckling i vägtunnlar.

## 2 Beskrivning av Runehamarförsöken

Runehamarförsöken genomfördes under ledning av SP Brandteknik i samarbete med SPs systerorganisationer i Norge (SINTEF) och i Holland (TNO). Resultaten från försöken presenterades för första gången vid ett symposium i Borås 2003 och finns beskrivna i mer detalj i referenserna [1, 2, 3, 4].

Runehamartunneln är en ungefär 1600 m lång övergiven vägtunnel, som ägs av Norska Vägverket och den lämpade sig väl för att genomföra de aktuella försöken. I tunneln byggdes en simulerad långtradartrailer upp med hjälp av ställage i stål. I tre av försöken användes pallar med olika blandningar av trä, wellpapp och plast och i ett av försöket användes möbler. I samtliga fall var andelen plast knappt 20 % och lastens vikt varierade mellan ungefär 3 till 10 ton. I tabell 1 ges mer detaljerad information kring försöken.

Tabell 1 Fyra olika uppsättningar av gods användes i brandförsöken.

Försök	Gods	Total vikt
1	Träpallar (82 %) och plastpallar (18%) <sup>a)</sup>	10 ton
2	Träpallar (82%) och madrasser (18%)	6.3 ton
3	Möbler (82% trä och 18% plast) och 10 lastbilsdäck	8,5 ton
4	Plastmuggar (19 %) i pappkartonger på träpallar (81%)	2,8 ton

a) anger viktprocent av den totala vikten

Trailerlasten var 10 m lång, 2,6 m bred och 4,5 m hög. Bredden och höjden motsvarar maximalt tillåtna mått medan verkliga trailers kan vara längre. Lasten var täckt med ett polyesterkapell. Berget vid brandplatsen var skyddat med Promatect T skivor på en sträcka av 75 m. Tunneltvärsnittet var ungefär 47 m<sup>2</sup> utan skydd och 32 m<sup>2</sup> med skydd och takhöjden var 5,8 m utan skydd och 5 m med skydd.



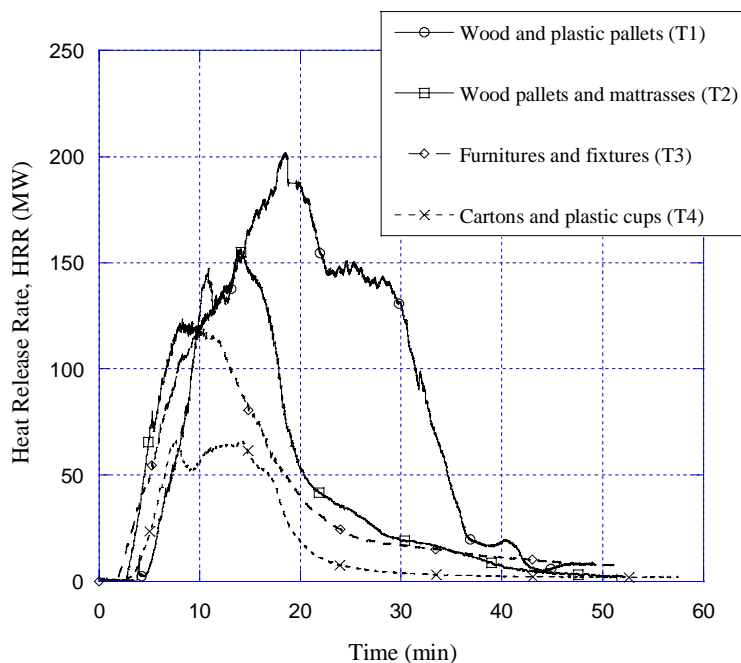
Figur 1 Bilder från försöksuppställningen.



Två mobila fläktar stod i tunnelmynningen och gav tillsammans en lufthastighet på drygt 3 m/s genom tunneln. Fläktarna användes för att styra luftflödet och på det sättet göra det möjligt att mäta den avgivna brandeffekten. Lufthastigheten hade valts för att ge så lite rök som möjligt uppströms om branden (s.k. backlayering) samtidigt som säkerheten för försökspersonalen tillgodosågs. Godset tändes med två små standardtändkällor vid uppströmsgaveln på lasten. När branden var som intensivast sjönk vindhastigheten inne i tunneln ner till ungefär 1,5 – 2,5 m/s på grund av det mottryck som branden genererade.

## 2.1 Brandeffekt

Brandeffekten beräknades enligt samma principer som SP Brandteknik använder i huvar och annan utrustning, d v s baserad på mängd förbrukad syre och producerad koldioxid. Dessa gaser är också intressanta vid bedömning av påverkan på människor i tunneln. Utöver dessa mättes även vattenhalten i brandgaserna, koncentration av kolmonoxid och HCN (vätecyanid) och i två försök även isocyanater. Brandeffekten i första försöket (träpallar och plastpallar) var högre än 200 MW. För tre av de nu genomförda försöken var effekten högre än 120 MW. Tillväxthastigheten var relativt linjär från 5 MW upp till 100 MW. Den varierade från 17 MW/minut till 29 MW/minut där den var snabbast i andra försöket med polyuret看 madrasser och träpallar. I figur 2 visas uppmätta brandeffekter från försöken. Det anmärkningsvärda är att det handlar om en blandning av trä och plast, ett långt ifrån ovanligt gods på våra vägar. Dessutom är lasten inte på något vis extremt stor eftersom långtradare både kan vara längre och transportera mer last.

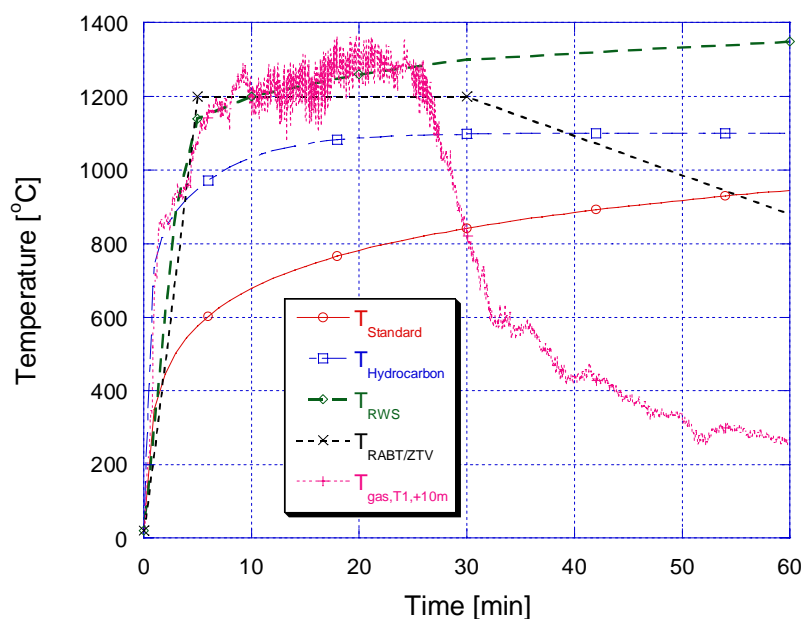


Figur 2 Uppmätta brandeffekter i Runehamarförsöken [1].

## 2.2 Gastemperatur

Gastemperaturer mättes både uppströms och nedströms branden. De hade syftet att studera backlayering, värmebelastning på konstruktionen respektive flamlängd. Framför allt temperaturerna nära taket i närheten av godset är värda speciell uppmärksamhet. I det

första försöket nådde de en bra bit över 1350 °C och även i de övriga försöken nådde gastemperaturerna upp till mellan 1250 °C och 1300 °C. Det motsvarar en infallande värmestrålning mot taket som är omkring 300 – 400 kW/m<sup>2</sup> och vilket ger enormt hög värmebelastning mot konstruktionen. I försöken uppmättes värmestrålning mot vägbanan 10 m nedströms trailern på 250 kW/m<sup>2</sup>. De flesta brännbara material antänder inom någon eller några minuter om de utsätts för värmestrålning på 20 – 25 kW/m<sup>2</sup>. Skyddet klarade temperaturpåverkan vid första försöket bra medan berget nedströms skyddet blev kraftigt bortskalat på grund av temperaturerna i taket. Gastemperaturen i taket strax bortom skyddet låg på ungefär 600 – 800°C i första försöket men den avtog ganska snabbt, ner mot ungefär 250 °C på avståndet 250 m ifrån branden. De uppmätta gastemperaturerna ligger över vad vi förväntade och långt över de 1100 °C, som anges som maximal temperatur enligt den s.k. HC-kurvan, en temperatur-tid-kurva som ofta används vid dimensionering av tunnlar. De temperaturnivåerna som uppmättes återges bäst av den holländska RWS-kurvan även om den initiala temperaturen var högre jämfört med RWS-kurvan och temperaturerna låg på en hög nivå under en kortare tid (10 – 25 minuter jämfört med 110 minuter). I figur 3 jämförs uppmätt gastemperatur i första försöket med olika standardbrandkurvor.



Figur 3 Uppmätt gastemperatur i första försöket jämfört med olika standardbrandkurvor [2].

### 2.3 Brandbekämpning

I försöken studerades även strålningspåverkan på eventuell räddningspersonal uppströms av branden respektive brandspridningen nedströms branden. En eventuell räddningsinsats nedströms branden under de första 30 – 40 minuterna hade varit omöjlig. När branden var som intensivast låg strålningsnivåerna uppströms branden, på ett avstånd mellan 20 m – 25 m från brandens centrum, över de gränser som en rökdykare skulle klara av utan extra skydd. Trots att rökdykarna hade haft vinden i ryggen så hade de fått problem att spruta vatten på långtradaren under en period på 10 – 20 minuter. Det är inte heller säkert att de hade kunnat släcka branden på det avståndet vid lägre strålningsnivåer. Kunskapen kring hur mycket vatten som krävs för att släcka denna typ av bränder är mycket begränsad. Teoretiska beräkningar indikerar att det krävs minst 1250 L/minut för att kontrollera en

100 MW brand. Det finns stort behov av att dimensionera vilken släckkapacitet räddningstjänsten behöver vid denna typ av bränder.

I försöken uppnåddes ingen 'backlayering' av röken vid lufthastigheter över 2,7 m/s och vid hastigheter mellan 1,5 m/s till 2 m/s uppmättes en backlayering som var över 100 m. Beroende på försök uppmättes flamlängder mellan 40 till 100 m och allt brännbart material nedströms branden på ett avstånd mellan 20 till 60 m antändes. Det visar att branden skulle kunna spridas vidare i de tunnlar som har motsvarande förhållanden. Tunnelvärsnittets betydelse för resultaten har inte undersökts systematiskt men tunnelvärsnitt större än det i Runehamartunneln ger förmodligen gynnsammare resultat.

När det gäller den utrymningsmiljö nedströms branden som uppstod under försöken, så visar beräkningar baserade på mätdata 460 m från branden att ingen oskyddad person hade överlevt någon av bränderna. Tiden till att någon förlorar medvetande nedströms brand varierade mellan 2 till 6 minuter från det att röken nådde fram till den plats de befann sig. I försöket med madrasser, där det bildades mycket cyanid (HCN), skulle personer ha förlorat medvetandet efter endast 2 minuter från det att röken kom fram. I övriga fall var det drygt 6 minuter.

## 2.4 Jämförelse med brand i passagerarvagn

Det finns onekligen olikheter mellan en brand i en passagerarvagn (stålvagn) och det gods som användes i Runehamar tunneln. En fullt utvecklad brand i en passagerarvagn av stål är betydligt mer lik en rumsbrand. Branden i Runehamartunneln är mer lik en öppen ställagebrand som utsätts för högt ventilationsflöde. En passagerarvagn i aluminium eller vagnkonstruktion med låg brandavskiljande funktion skulle kunna brinna under liknande förhållanden (taket brinner bort) men mängden brännbart material per kvadratmeter är betydligt lägre. En tysk IC/ICE tågsvagn som är 3 m bred och 26 m lång eller en X2000 vagn har en brandbelastning som kan variera mellan 0,8 – 1,2 GJ/m<sup>2</sup> (golvarea) medan brandbelastningen för godset i Runehamarförsöken varierade mellan 2,2 – 7,9 GJ/m<sup>2</sup>. Godset i Runehamarförsöken hade god tillgång till syre (2 -3 m/s) och det bränsle som frigjordes förbrändes under relativt goda förhållanden. En brand i en passagerarvagn (stål) blir inte lika känslig för ventilationshastigheten som en öppen brand. Runehamarförsöken kan däremot jämföras med konsekvenserna av en brand i en godsvagn med relativt öppen last (d v s inte stålcontainer) eller vid en brand där en långtradare transporteras på en godsvagn.

De temperaturnivåer som uppmättes i Runehamar försöken (1200 – 1365 °C ) har inte observerats i andra fullskaleförsök som har gjorts med spårbundna fordon i tunnlar. Fullskaliga försök med spårbundna fordon visar att högsta uppmätta taktemperaturen ligger mellan 650 °C – 1060 °C. Bränslets geometriska utformning, typ och ventilationsflöde kan förklara denna skillnad mellan Runehamarförsöken och tidigare försök med spårbundna fordon.

I följande avsnitt redovisas de försök och de bränder som har inträffat eller genomförts för vagnar som transporteras på det allmänna järnvägsnätet.

## 3 Brandutveckling i järnvägstunnlar

I följande avsnitt sammanställs den kunskap som finns i dag när det gäller bränder i järnvägstunnlar. Sammanställningen används som underlag för förslag till dimensionerande brandbelastning och brandscenarier.

### 3.1 Relevanta bränder i järnvägstunnlar

I tabell 2 finns en sammanställning av inträffade bränder i järnvägstunnlar. Bränder som har inträffat i tunnelbanetåg eller pendeltåg redovisas inte i tabellen. I vissa fall saknas information om tunnelns längd, brandorsak eller konsekvenser och då indikeras det med ett streck (-). Tabellen gör inte anspråk på att vara komplett. Det kan säkert finnas ytterligare bränder som inte är med i tabellen, men rapporteringen av inträffade bränder förbättras hela tiden vilket kan påverka tabellens innehåll. Trots denna begränsning ger den dock en relativt bra överblick över vilka typer av bränder som kan förekomma i järnvägstunnlar och en viss indikation av frekvensen.

I tabellen redovisas 19 bränder/brandtillbud i järnvägstunnlar sedan 1921. En brand som utvecklas i ett passagerartåg inne i en tunnel kan få mycket allvarliga konsekvenser, men endast fåtal sådana bränder har inträffat. Det stora flertalet av de mer besvärliga bränderna (höga brandeffekter, lång varaktighet och svårsläckta bränder) i järnvägstunnlar har inträffat i godståg. Hittills har inga personer omkommit i bränder med godståg. Förklaringen till detta är den höga brandbelastningen som ofta resulterar i svårhanterliga bränder samt att antalet personer som finns på tågen är begränsad. Det förekommer också ett antal bränder som endast blir en mindre incident (brandtillbud). I värsta fall blir det en kraftig rökutveckling och antalet skadade är begränsad. Risken för att en liten brand skall övergå till en fullt utvecklat brand finns dock alltid så länge det finns brännbart material i tågen. Eventuell brandutveckling beror då helt och hållet på omständigheterna och hur människor reagerar.

Antalet tunnlar och tunnelarnas längd ökar hela tiden vilket tillsammans med andra faktorer såsom trafiktäthet, hastigheter, etc. också kan påverka frekvensen av bränder i järnvägstunnlar.

Tabell 2 Dokumenterade bränder i järnvägstunnlar sedan 1921.

Plats/land	År	Längd (km)	Orsak	Konsekvenser
Batignolles tunnel/Frankrike	1921	1	Kollision mellan två tåg	En brand utbröt efter kollisionen. Över 28 döda därav omkom några vid kollisionen.
Torre tunnel/Spanien	1944	-	-	-
Penmanshield/UK	1949	-	-	-
Simplon tunnel/Switzerland	1969	19,8	Brand i lok	Kraftig rökutveckling men inga skadade
Wranduk tunnel/Yugoslavia	1971		Tekniskt fel i diesellok	34 döda och 120 skadade
Crozet tunnel/Frankrike	1971	0,226	-	2 döda, 200 skadade
Lötschberg tunnel/Switzerland	1972	-	-	3 skadade
Hokuriku/Japan	1972	13,9	Brand i restaurangvagn kunde inte släckas	30 döda och 690 skadade, många räddade med hjälp av andra tåg
Summit/ UK	1984	3	Godståg-vagnar med 800 ton bensin spårade ur	inga skadade men branden pågick i flera dygn
Unnamed tunnel/Kina	1991	-	-	15 passagerare döda (?)
Eurotunnel/UK	1996	50	Brand i lastbilar på tåg	30 skadade, 10 utbrända lastbilar
Exilles Tunnel Italien	1997	2,1	Brand i godståg med personbilar – öppen backlucka på en av personbilarna orsakade friktion med elledning	13 vagnar med 156 personbilar och lok involverade i branden, inga skadade
Gueizhou tunnel/Kina	1998	0,8	-	över 80 döda
Leinebusch/Tyskland	1999	1,74	Brand i godståg (urspårning på grund av tekniskt fel)	11 vagnar fanns kvar inne i tunneln involverade i branden, resten kördes ut; 13 vagnar plus lok
Schipol airport tunnel/Holland	2001	-	-	Inga skadade
Baltimore Howard Street tunnel	2001	2,6	Brand i godståg orsakat av tekniskt fel. Farligt gods involverat	Ett antal vagnar involverade i branden. Inga skadade.
Tunnel Nodo di Napoli/Italien	2002	-	Anlagd brand på passagerartåg	Inga skadade
Genova Nervi-Pisa Centrale; - Genova Nervi/Frankrike	2002	23,2	Brand i lok på ett passagerartåg (tekniskt fel)	Inga skadade – brand släckt med handbrandsläckare
Mornay tunnel Frankrike	2003	2,6	-	Inga skadade

Bengtson [5] redovisar statistik från bränder i tåg som har inträffat på hela järnvägsnätet i Europa från 1935 till 1985, se tabell 3.

Tabell 3 Statistik från bränder i tåg som har inträffat på hela järnvägsnätet i Europa från 1935 till 1985. BR=Storbritannien, DB=Danmark, NS=Norge, PKP=Polen, RENFE=Spanien, SJ=Sverige, SNCB=Belgien, SNCF=Frankrike.

Railway	Cause of fire						Total Number of Incidents
	Electrical		Inattention or carelessness		Other		
	No. of Incidents	Percent. of total	No. of Incidents	Percent. of Total	No. of Incidents	Percent. of total	
BR <sup>1</sup>	247	23.7	0	0	794	76.3	1041
DB <sup>2</sup>	86	25.4	176	52.1	76	22.5	338
NS <sup>2</sup>	15	9.2	84	51.5	64	29.3	163
PKP <sup>2</sup>	47	25.7	104	56.8	32	17.5	183
RENFE	43	47.3	12	13.2	36	39.5	91
SJ <sup>2</sup>	54	36.0	28	18.7	68	45.4	150
SNCB <sup>3</sup>	19	24.3	27	34.7	32	41.0	78
SNCF <sup>3</sup>	11	17.0	41	62.0	14	21.0	66

1. Includes minor fires

2. Only fires which damaged at least 15 % of vehicle

3. Only fires which damaged more than 50 % of vehicle

Den vanligaste orsaken till bränder i järnvägstunnlar är tekniska fel på tågen (bromssystem, urspårning, elektriska fel, läckage, etc.) men det förekommer också andra orsaker (till exempel anlagda bränder och ovarsamhet). Bengtsson redovisar också hur en typisk brand i passagerartåg kan utvecklas:

- Branden startar under ett säte eller i en bädd orsakad av ovarsamhet vid rökning,
- övertändningsförhållanden kan nås inom 5 minuter. Temperaturer uppemot 900 °C - 1000 °C kan uppnås vid taket,
- efter ytterligare några minuter brinner undertak av plast (glasfiberarmerad polyester) igenom eller aluminiumtak smälter,
- härefter passerar flammor och heta gaser in i undertaksutrymmet som ofta används för eldragning,
- stora mängder rök bildas,
- fönsterglas kollapsar och branden kan spridas till angränsande vagnar,
- moderna tåg uppbyggda av aluminium kan kollapsa helt efter ca 10 minuter,

Mycket av den information som anges ovan överensstämmer bra med de observationer som har gjorts i EUREKA-försöken i Norge [6].

## 3.2 Uppmätta brandeffekter från spårfordon

Det finns väldigt lite information om uppmätta brandeffekter fram till början av nittitalet. Då genomfördes ett antal fullskaliga brandförsök med järnvägsvagnar i Norge 1991-1992. Dessa försök finns redovisade i EUREKA rapporten [6]. Försök gjordes med olika typer av inredningsmaterial, både av högsta brandtekniska klass ("future design"), en brandteknisk klass som kanske är vanligast idag ("latest design") och lägre brandteknisk klass ("former design"). I samtliga försök så låg temperaturen inne i tunneln mellan 1 °C – 5 °C före tändning. Fukthalten inne i tunneln uppmättes till 90 – 100 % RF. Lufthastigheten inne i tunneln låg mellan 0 - 0,5 m/s förutom i försöket med två halvvagnar (se tabell 3) då hastigheten låg omkring 3 - 4 m/s i början av försöket. Tiden från att vagnarna placerades inne i tunneln och fram till antändning varierade. Den höga fukthalten inne i tunneln har sannolikt påverkat fukthalten i inredningsmaterialet i vagnarna men hur mycket det i sin tur har påverkat brandförloppet är inte känt. I tabell 3 ges en sammanställning av de försök som gjordes med järnvägsvagnar i EUREKA projektet.

Tabell 4 Sammanställning av brandförsök med järnvägsvagnar som genomfördes i EUREKAs försöksprogram. Obs: Numrering av försöken här överensstämmer inte med försöksnumreringen i EUREKA.  $Q_{max}$ =högsta uppmätta brandeffekt i MW

nr	Vagn	Beskrivning av vagn	Inredning/säten/golv	Energi (GJ)	$Q_{max}$ (MW)	Tid till $Q_{max}$ (min)	Varaktighet (min)	Kommentarer
1	F5St	En halv stålvagn (13 m lång)	Tak-väggar: glasfiber Säten: "Latest design" Golv : "former design"	15,4	Ej uppmätt	Enligt tempmätning i tunneln: 25 min	Ca 110	Vagnen utbränd och alla fönster borta
2	F6St	En halv stålvagn (13 m lång)	Tak-väggar: PF glasfiber Säten: "Future design" Golv : "former design"	12,1	Ej uppmätt	Branden tog sig inte.	-	Fönster nära tändkälla sönder men annars intakt. Vagnen mest sotig
3	F2Al (Aluminium) – F7 (steel)	Två halvvagnar ihopkopplade (F2Al=6.8 m, F7=8.7 m)	Vagn F2Al:latest design Vagn F7:former design	F2Al: 14,6 F7: 42,8	43	53	Ca 120	Branden spreds från F2Al till F7 efter ungefär 40 minuter
4	F2St	En hel ICE, 26 m lång stålvagn	Typiskt modernt ICE tåg ICE=Inter City Express	63	19	80	Ca 140	Vagnen helt utbränd och fönster har fallit bort ur ramen
5	F1St	En hel IC, 26 m lång stålvagn	Typiskt modernt IC tåg med "former design" IC=Inter City	77	13	25	Ca 180	Vagnen helt utbränd och fönster har fallit bort ur ramen

Baserat på försöken i tabell 4 har de parametrar som är viktiga för brandutvecklingshastigheten i tågvarnarna rangordnats:

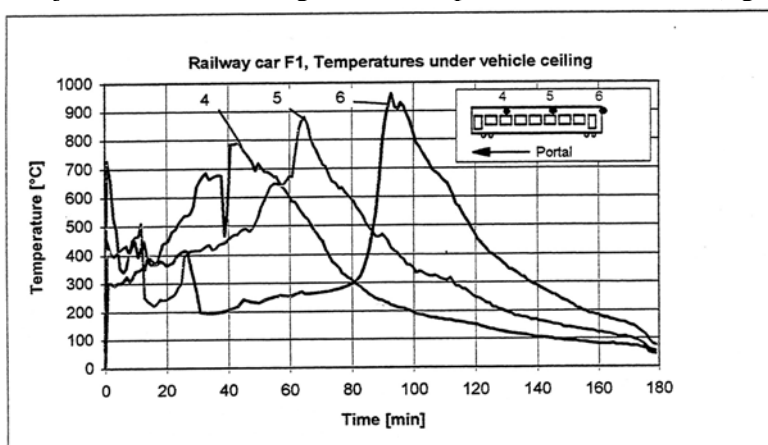
1. Brandtekniska egenskaper hos fönsterglasen och hur de sitter i fönsterramen.
2. Brandtekniska egenskaper hos beklädnadsmaterial (vägg, tak och golv) och säten i vagnen samt mängd och placering.
3. Typen av vagnkonstruktion (stål eller aluminium).
4. Storlek och placering på brandkälla.
5. Dörröppningar och eventuella öppningar i taket.
6. Fukthalten i materialet.
7. Eventuellt bagage.

Alla dessa parametrar bidrar på olika sätt till brandutvecklingshastigheten och de gäller endast för de fall då branden utvecklas från en relativt liten brand till en fullt utvecklad brand. De tändkällor som användes i försöken var relativt kraftiga och kan därför ha en viss betydelse för den initiella brandutvecklingen. Tändkällan bestod oftast av isopropanol (mellan 0.4 kg till 6.2 kg) som hölls i två till fyra mindre baljor. De placerades antingen ungefär 50 cm över golv där man hade tagit bort en rad med säten eller placerades mot eller i befintliga säten. I vissa återantändningsförsök la man till träpinnar för att öka den initiella brandspridningshastigheten.

Den parameter som har störst betydelse är brandtekniska kvalitén på fönsterglasen och hur de sitter i fönsterramen. I några försök kunde man observera hur gummilister som fönsterglaset satt i började brinna. Fönsterglaset kan då ramla ur ramen om inte glaset innan dess spricker av värmen. Så länge fönstren är intakta så utvecklas inte branden inne i vagnen (på grund av syrebrist) förutsatt att det inte finns andra öppningar såsom dörrar eller takluckor. Mer moderna vagnar kan dock ha en annan infästning av fönster än som användes i försöken. Branden blir som intensivast i den del av vagnen där fönstren har gått sönder och temperaturen i brandområdet ligger då omkring 700°C – 900 °C.

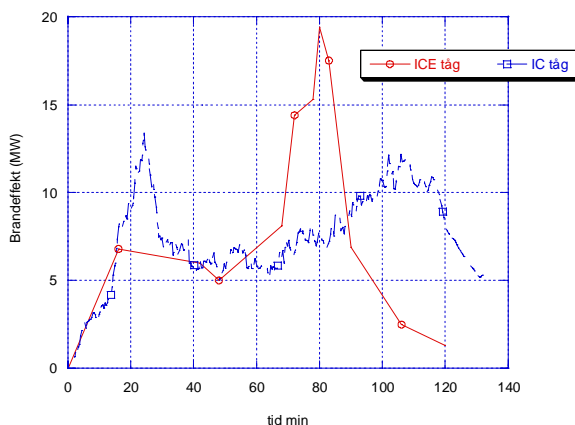
Resterande delar av vagnen blir rökfyllda och syrenivån sjunker ner till nivåer under 13 % vilket gör att ingen förbränning sker i den delen av vagnen. En öppen dörr i den andra änden av vagnen skulle kunna påverka hur fort syrenivån sjunker. Temperaturen i det området ligger omkring 200 – 400 °C. När ytterligare fönster går sönder tillförs syre, varpå brandområdet breddas och temperaturen höjs (i det området). Samtidigt börjar brännbart material i den del av vagnen som har deltagit längst i branden att förbrukas och därmed minskas också brandeffekten. För att den totala brandeffekten ska öka eller behållas på ungefär samma nivå krävs att fler fönster går sönder eller ramlar ur ramen.

Hela denna process kan förklaras av figur 4 som visar hur taktemperaturen inne i vagnen i försök 5 utvecklades. Branden anlades längst till vänster i vagnen. Den enda öppning som fanns var halvöppet fönster längst till vänster. Strax efter tändning uppstod en kraftig ökning av temperaturmätare nr 4 (720 °C) eftersom flammorna från tändkällan (6,2 kg isopropanol) bredde ut sig längs med taket. Brandens intensitet minskar igen när brandkällan börjar ta slut men det registreras inte på brandeffektkurvan (figur 2).



Figur 4 Taktemperaturen i försök nr 5, se tabell 4.

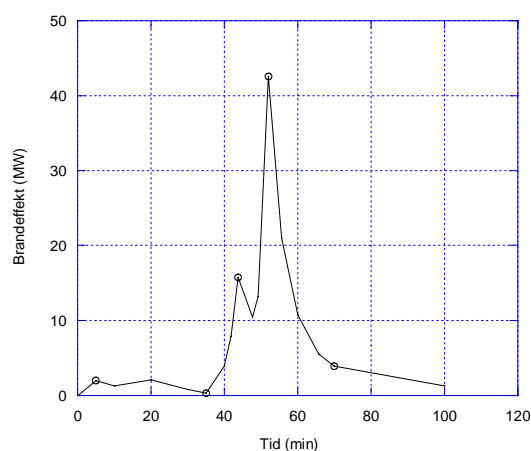




Figur 5 Uppmätt brandeffekt (MW) i försök 4 och 5, se tabell 4.

Allt eftersom branden får fäste i säten och beklädnad, samtidigt som fönster börjar gå sönder eller ramla ur, börjar branden förflyttas från vänster till höger i vagnen (se ritningen i diagrammet i figur 4). Följer man temperaturmätare 5 och 6 så kan man se detta. I figur 5 visas den uppmätta brandeffekten från försök 4 och 5. Det som kännetecknar dessa brandeffektkurvor är den utdragna brandspridningen inne i vagnen. De högsta brandeffekterna inträffar först efter 15 – 20 minuter och sedan igen efter 80 – 100 minuter. Högsta brandeffekten ligger på 13 MW i försök 5 och 19 MW i försök 4. Vagnen blir aldrig helt övertänd samtidigt (lågorna som slår ut genom fönstren) utan brandeffekten styrs av hur glasfönstren håller emot. Att materialet i vagnarna har varit fuktigt har också haft en viss betydelse men dock inte så stor som inverkan av fönstren. Tidigare förslag om dimensionerande bränder [8], där man föreslår högsta brandeffekt på 15 MW för tåg, bygger på medelvärdesbildning av de högst uppmätta brandeffekterna. I det förslag till dimensionerande brandeffekt för en passagerarvagn i stål och som presenteras i kapitel 6 förslås att öka den högsta brandeffekten till 20 MW. Anledningen är den nya kunskap som presenteras här om fönsternas betydelse. Det råder stor osäkerhet om hur branden kan utvecklas om fönsterna skadas vid en eventuell olycka (t ex kollision eller urspårning) vilket kan ge utrymme för högre brandeffekter än som uppmättes i försöken.

I försök 3 blev brandeffekten betydligt högre (43 MW), se figur 6, jämfört med försök 4 och 5. Syftet med försöket var att undersöka risken för brandspridning från första vagnen till den andra. Två halvvagnar med en dubbel gummibälga och en sluss användes (två dörrar med brandhärdat glas). Den ena halvan (F2Al-aluminiumvagn) var ett modernt ICE tåg med en brandbelastning på 14,6 GJ. Beklädnad och säten var av "latest design". Den andra halvan (F7-stålvagn) hade betydligt högre brandbelastning, 42,8 GJ, och beklädnad och säten var av "former design". Branden anlades på motsvarande sätt som i andra försök förutom att den placerades nära dörren till slussen i F2Al vagnen. Här krävdes tre antändningsförsök och efter varje försök utökades antalet träpinnar för att öka brandbelastningen.



Figur 6 Uppmätt brandeffekt från försök 3, se tabell 4.

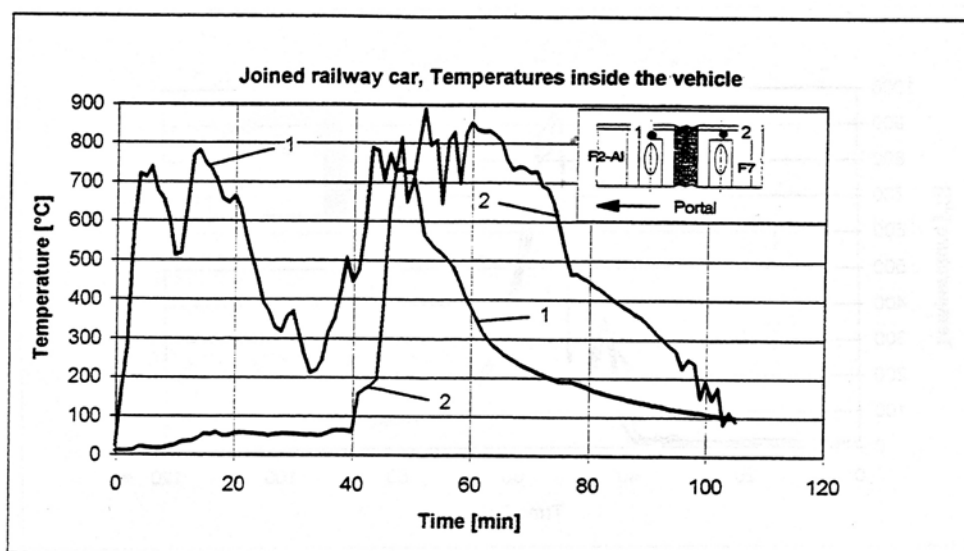


Figure 6.12-6: Temperature development inside the vehicle

Figur 7 Taktemperaturer i försök 3, se tabell 4.

Efter tredje antändningsförsöket spreds branden från F2A1 till F7 via gummibälgen och genom hål i taket (aluminium smälter). Detta inträffade efter ungefär 40-45 minuter från tändning. Enligt den beskrivning som finns i rapporten så övertändes hela F7 vagnhalvan kort efter att branden spreds (ca 48 minuter, vilket stämmer bra med brandeffektkurvan i figur 6). I figur 7 visas taktemperaturer i F2A1 och F7. Där ser man ungefär när branden spreds till F7. Innan branden spreds vidare var brandeffekten i F2A1 väldigt låg (ca 2 MW) eftersom fönstren var intakta väldigt länge. Först efter 43 minuter ramlar ett fönster ifrån F2A1. En kort stund därefter, d v s efter 50 minuter från tändning, rapporteras att en fullt utvecklad brand pågår både i F2A1 och F7. På endast 7 minuter utvecklas branden från en relativt liten brand till en fullt utvecklad brand med mycket höga brandeffekter. Orsaken är att vagnarna har förvärmats och när det frigjorda bränslet får tillgång till syre går fönsterna sönder relativt snabbt. Försöket visar också att brandeffekten kan bli väldigt hög (43 MW) om alla fönster går sönder på kort tid.

I försöket med ”future design”, dvs försök 2 i tabell 4, utvecklades inte branden i vagnen, vilket måste ha med materialvalet att göra (övriga förutsättningar var desamma i försöket). Däremot utvecklades bränderna ungefär likartad för ”latest” design och ”former” design (försök 1, 4, 5). Detta visar att valet av brandteknisk klass har en betydelse för brandutvecklingen.

I flera av försöken gjordes mer än ett försök att tända. Tändkällan var relativt stor, 6,2 kg isopropanol i fyra små baljor (42,6 cm x 42,6 cm). De placerades 50 cm över golv där man hade tagit bort en rad med säten. Brandkällan var oftast placerad vid den första sätesraden. När inte branden tog sig så ökade man mängden isopropanol och la till träpinnar (170 eller 370 stycken beroende på försök) för att öka brandbelastningen vid tändkällan. Tändkällans storlek har därför en stor betydelse för om branden kommer att utvecklas eller inte. Det är först och främst takmaterialet som blir utsatt för de initiala lågorna. Om branden anläggs där det eventuellt kan finnas bagage så kan branden utvecklas väldigt snabbt.

Inverkan av vagnkonstruktionen är också tydlig. En aluminiumkonstruktion smälter ner vid ungefär 660 °C, vilket ökar risken för vidare brandspridning genom taket samtidigt som branden i vagnen lättare kan bli intensivare på grund av lufttillförsel. En styrande parameter är alltså lufttillförseln till det brännbara materialet i vagnarna. Genom att brandisolera vagnkonstruktionen kan den brandavskiljande funktionen förbättras.

Det finns inga försök rapporterade med fler än en vagn. Försök 3 visar exempel på brandspridning mellan två halvagnar men det ger ganska begränsad information. I en verklig brand där branden riskerar att spridas mellan flera vagnar och där räddningstjänsten inte kommer åt branden kommer branden att fortsätta igenom hela tågsättet. I nästa avsnitt beskrivs kort ett försök som SP Brandteknik har gjort med vagnar i modellskala där branden har spridits mellan två vagnar. Frågan är hur man hanterar den totala brandeffektutvecklingen. Ska man addera bidraget från varje vagn eller ska man räkna med att när branden sprids till nästa vagn så har brandeffekten i första vagnen halverats. Detta är en svår fråga och kräver en noggrann analys.

Försök med bränder i lok har inte genomförts. Däremot finns i rapporten ”Räddningsinsatser vid tunnelbränder” [7] ett brandscenario beskrivit för lok. Den högsta brandeffekten är 25 MW och den inträffar efter 6 minuter från tändning ( $t^2$ -kurva). I de försök som genomfördes i EUREKA-projektet fanns ingen transformatorolja i vagnarna som användes. Detta kan påverka brandutvecklingen i vagnarna. Deutsche Bahn AG [9] använder 12 MW för elektriskt drivna lok och 20 MW för diesellok.

### 3.3 Uppmätta taktemperaturer

I EUREKA-försöken uppmättes de högsta uppmätta gastemperaturer i taket ovanför vagnarna och dessa låg mellan 650 °C – 1060 °C beroende på typ av vagn. I alla utom ett försök var ventilationshastigheten låg, mindre än 1 – 1,5 m/s. Det finns inga korrelationer mellan uppmätt taktemperatur i tunnel försök och brandeffekt. Det går att beräkna teoretiska taktemperaturer förutsatt att det inte finns någon längsventilation.

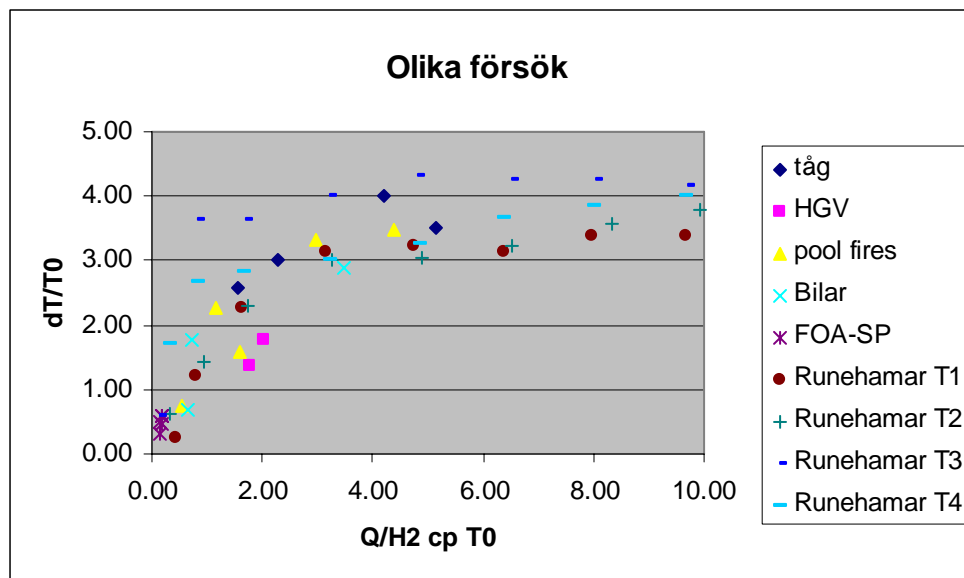
Det finns en möjlighet att korrelera taktemperaturen med brandeffekten om vi förutsätter att det finns ett samband mellan totala energin och lokala temperaturstegringen i luftmassan i plymen.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p \Delta T_{\max} \quad (1)$$

där  $\dot{m}$  är luftmassan i plymen uppe vid taket,  $c_p$  är luftens värmekapacitet i kJ/kg/K och  $\Delta T_{\max}$  är den högsta uppmätta temperaturen i tunneltaket. I en tunnel med en etablerad längsventilation ( $>1,5 - 2$  m/s) så kan man anta att  $\dot{m}$  är kopplad till totala luftflödet inne i tunneln. Om man antar att längsventilationen inte har en dominerande inverkan på taktemperaturen så kan man formulera om ekvation (1) på sådant sätt att endast parametrarna  $\dot{Q}$ ,  $H$  och  $\Delta T_{\max}$  blir bestämmande:

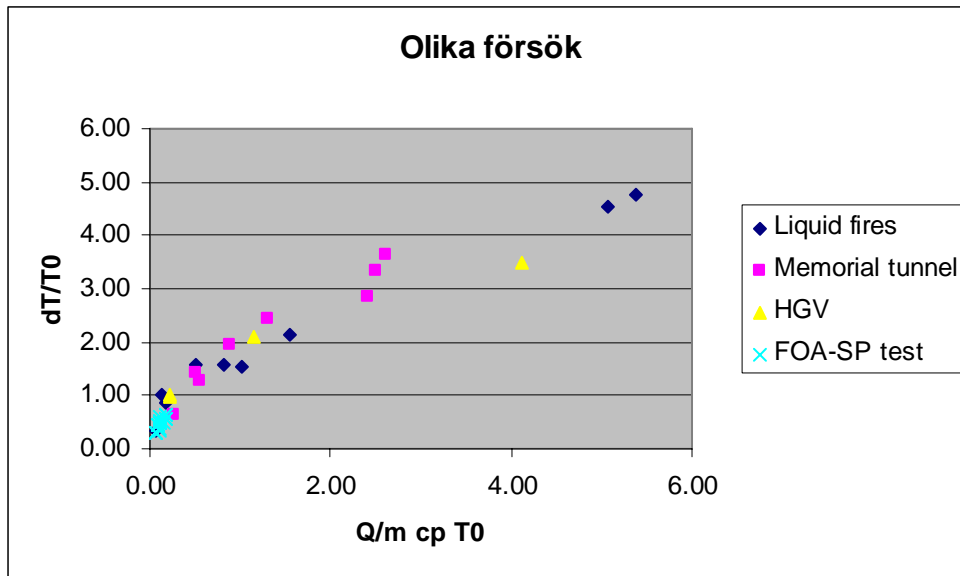
$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = k \frac{\dot{Q}}{H^2 c_p T_0} \quad (2)$$

Koefficienten bestäms av experimentell data och har enheten  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Resultaten från ett antal fullskaleförsök med tåg, bilar, vätskebränder och småskaleförsök har plottats i figur 8.



Figur 8 Högsta taktemperaturhöjning  $\Delta T_{\max}$  som funktion av brandeffekten  $\dot{Q}$  (kW) och tunneltakhöjden  $H$  (m).  $T_0$  är starttemperaturen vid respektive försök i Kelvin. Brandeffekten varierar från 30 kW till 203 MW och takhöjden från 1 m till 5,5 m. Tunnelbredden varierar från 2 m till 9 m.

Runehammarförsöken [2] har också plottats enligt samma ekvation och resultaten visas i figur 8. Även om luftflödet var högt i Runehammarförsöken, 2 - 3 m/s, så ligger temperaturerna på ungefär samma nivå som i fallet utan ventilation. Anledningen är den att i Runehammarförsöken så är plymflödet så dominerande (kort avstånd mellan tak och överkant gods i kombination med enormt låg densitet i plymen) och därmed kan inte ventilationen inverka i lika hög grad som i en brand som står på vägbanan. I tunnlar med etablerad längsventilation så kan man använda ekvation (1) direkt. Resultaten visas i figur 9.



Figur 9 Högsta taktemperaturhöjning  $\Delta T_{\max}$  i Runehamarförsöken som funktion av brandeffekten  $\dot{Q}$  (kW) och massflödet i tunneln  $\dot{m} = \eta \rho u A$ .  $T_0$  är starttemperaturen vid respektive försök i Kelvin. Brandeffekten varierar från 30 kW till 100 MW och takhöjden från 1 m till 7,8 m.

Luftflödet i tunneln kan beräknas som  $\dot{m} = \eta \rho u A$  där  $\eta$  är flödeskoefficient satt till 0.817,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) är densitet,  $u$  är längsventilation (m/s) och  $A$  är tvärsnittsarea (m<sup>2</sup>). Om man plottar resultaten från Runehamarförsöken i samma diagram som i figur 9 så överensstämmer inte resultaten med övriga data. De försök som redovisas i figur 9 har ett relativt långt avstånd mellan taket och överkant bränsle och därför påverkas temperaturen i högre grad jämfört med när bränslet ligger relativt nära taket.

### 3.4 Modellskaletförsök

På uppdrag av BRANDFORSK har SP Brandteknik genomfört modellskaletförsök i skala 1:10 med tågagnar. Bakgrunden är att man har misstänkt att brandeffekterna från EUREKA-försöken har varit för låga på grund av den fuktiga miljön eller att brandgaserna som omger tåget kan påverka brandeffekten. Det har även funnits en misstanke att fönstren kan ha en avgörande roll för brandutvecklingen. Dessutom så ville man se om man teoretiskt kan beräkna brandeffekten i en övertänd vagn med det enkla uttrycket:

$$\dot{Q}_{\max} = 1500A\sqrt{h} \quad (3)$$

där  $A$  är öppningsarea (m<sup>2</sup>),  $h$  är öppningarnas höjd (m) och  $\dot{Q}_{\max}$  brandeffekten i kW.

Det som väckte frågan om brandeffekten i EUREKA vagnarna var den bild som visas i figur 10. Det är en övertänd vagn som började brinna i Borås sommaren 2000. Branden var sannolikt anlagd eftersom tåget stod parkerat och övergivet på en avskild plats. Brandeffekten kan teoretiskt beräknas enligt ekvation (1) till 30 – 40 MW, vilket inte

överensstämmer med de siffror som man erhållit från EUREKA-försöken (förutom i försök 3 där hela vagnen blev övertänd).



foto Thomas Karlsson

Figur 10 En fullt utvecklad brand i tåg (anlagd) som inträffade i Borås 2000.

Det måste tilläggas att den brandtekniska kvalitén på denna typ av tåg som visas i figur 10 inte är jämförbar med mer moderna tågtyper så som X2000. Det finns andra fall förutom den i Borås där man har sett att vagnarna blivit helt övertända, se figur 11, som visar olyckan i Åsta i Norge 1999. Det finns också fall där brandutvecklingen mer har liknat brandutvecklingen i ICE och IC tågen från EUREKA-tunnelförsöken. En brand som uppstod när ett tåg (kustpilen) kolliderade med en traktor nära Kalmar visar liknande brandutveckling som i EUREKA-försöken. Hela vagnen blev inte övertänd utan branden spreds från ena änden på vagnen till den andra på ungefär samma sätt som har beskrivits tidigare.

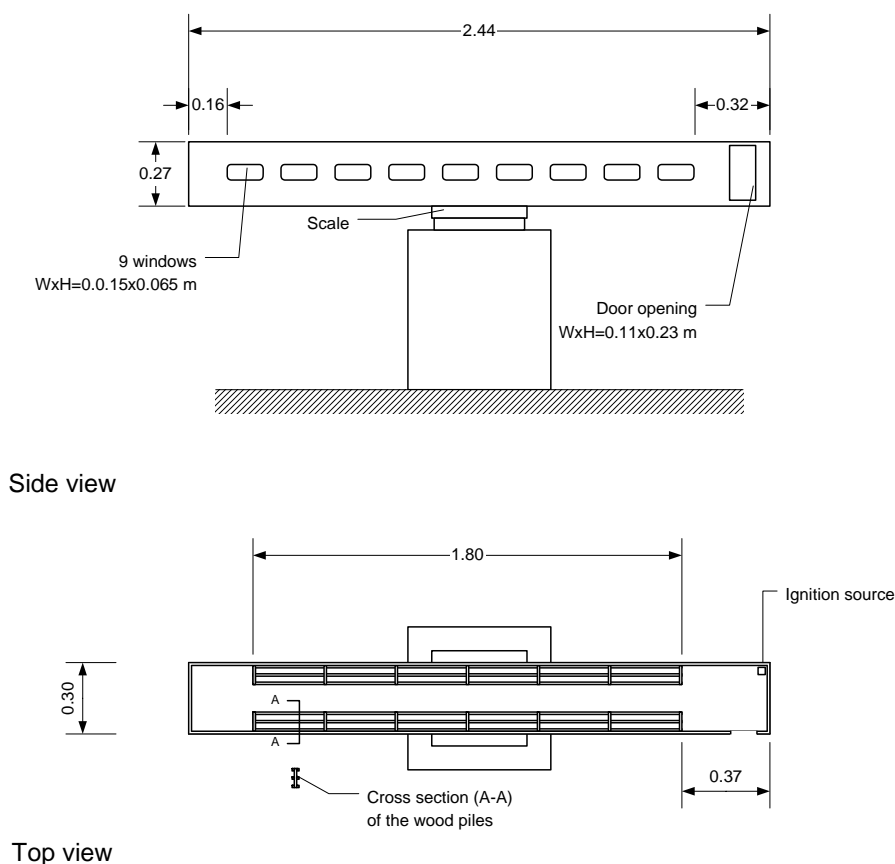


Figur 11 En brand i ett tåg utanför Åsta i Norge 1999.

Fyra modellskaletförsök genomfördes för att undersöka vilka brandeffekter som teoretiskt kan uppnås när en vagn blir helt övertänd. Modellen byggdes i skala 1:10 (samma geometriska mått som en X2000-vagn). Försök gjordes med brännbart material (termiskt trögt material (3,5 mm plywoodskivor) och termiskt snabbt material (korrigerad kartong))

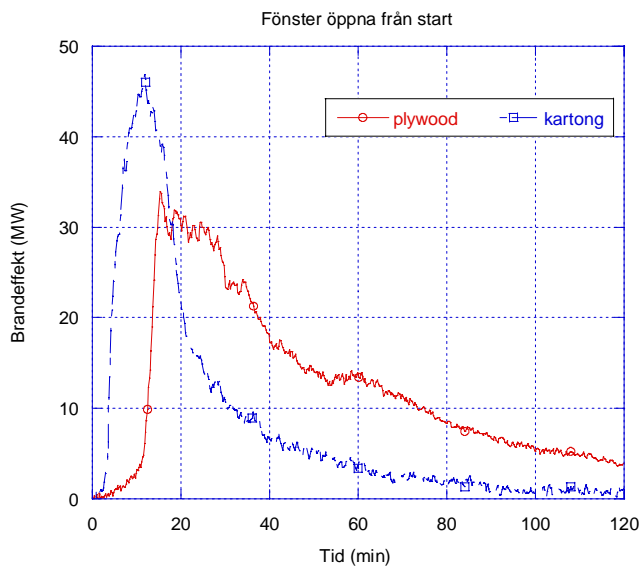
på väggar, tak och golv. Dessutom placerades träpinnar i vagnarna för att motsvara brandbelastningen från sätena. Den totala brandbelastningen motsvarade ungefär den i EUREKA-försöken och ett X2000 tåg (60 - 90 GJ).

Först gjordes två försök med alla fönster öppna och med plywood eller kartong på väggar, tak och golv. Sedan gjordes två försök där fönstren (9 på varje sida) var helt stängda från början samt kartong eller plywood på väggar, tak eller golv. Efter ett tag så öppnades totalt 8 fönster, 4 på varje sida, och till slut så öppnades resterande 10 fönster, fem på varje sida. Syftet var att se om man kunde iaktta de effekter som har beskrivits tidigare. Figur 12 visar modellvagnen (X2000) placerad på en våg. Brandeffekten uppmättes också i ett huvssystem på SP Brandteknik.

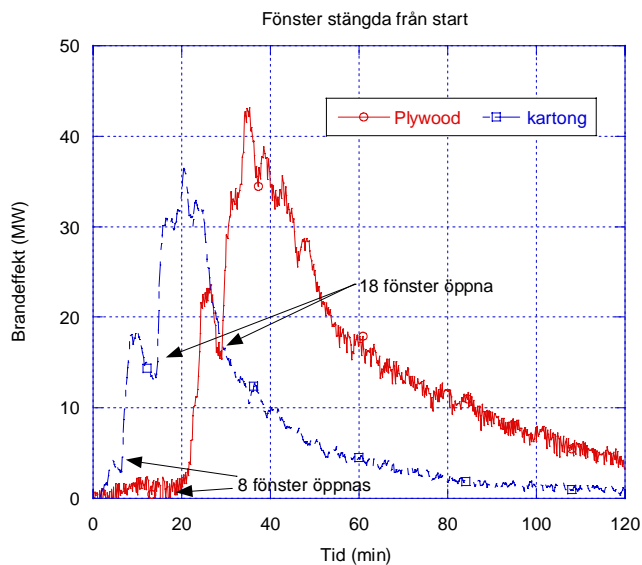


Figur 12 Försöksuppställning av en tågagn som har ungefär samma geometri som en X2000 vagn.

I figur 13 och 14 visas resultaten från försöken. Resultaten har blivit "översatta" till fullskala. Enligt ekvation (3) så borde den teoretiska brandeffekten bli ungefär 27 MW. Om vi ser på resultaten i figur 11 så har vi uppmätt högst brandeffekt på 33 MW respektive 46 MW. Anledningen till denna skillnad är att ekvation (3) bygger på det antagandet att allt syre som sugts in igenom öppningarna på vagnen förbrukas i branden och att det inte blir något överskott av bränsle som åker ut. I det verkliga fallet så finns det överskott med bränsle som förbränns utanför fönsteröppningen. Därför blir det en skillnad i resultaten. Ekvation (3) kan därför endast användas om man lägger till en koefficient som tar hänsyn till detta.



Figur 13 Uppmätta brandeffekter från försök med modelltågsvagn och två olika inredningsmaterial i väggar och tak. Värdena är baserade på försök i skala 1:10.



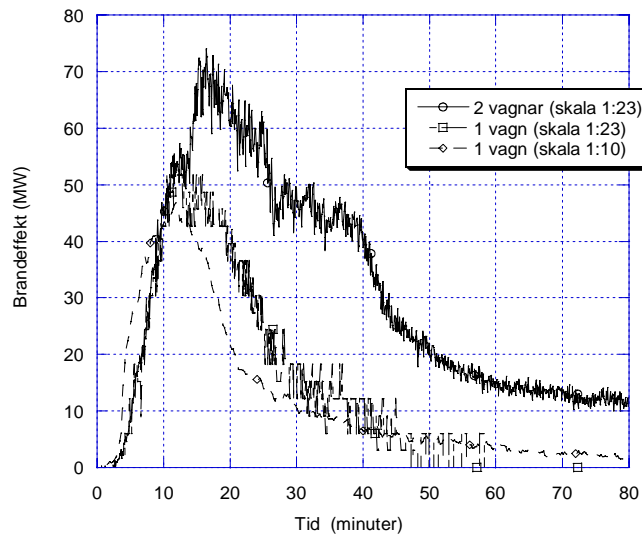
Figur 14 Här ser man inverkan av fönstren på brandutvecklingen.

I figur 14 så ser man tydligt vad som händer när fönstren öppnas. Innan första 8 fönstren öppnas (4 på varje sida) så begränsas branden i storlek. Syrenivån sjunker i mitten av vagnen ner under 13 %. När de första 8 fönstren öppnas (4 på varje sida) så ökar brandeffekten igen. Efter ett tag så börjar branden avta i det tidigt brandhärjade området eftersom bränslet börjar ta slut där. När ytterligare 10 fönster öppnas (5 på varje sida) så ökar brandeffekten igen. I försöket med kartong på väggar och tak så blir den högsta brandeffekten inte lika hög som i försöket med alla fönster öppna från början. Förklaringen är den att kartongmaterialet inom det tidigare brandhärjade området börjar ta slut innan ytterligare fönster öppnas. I fallet med plywood så inträffar inte detta utan



när alla fönstren är öppna så uppnås lite högre brandeffekt i senare fallet. Förklaringen är att det tar längre tid att förbruka plywooden jämfört med kartongerna. Trots de begränsningar som modellförsök alltid innebär, visar dessa modellförsök att fönsterarrangemanget och inredningsmaterialet har en stor betydelse för brandutvecklingen i tågagnar.

Det gjordes också försök i skala 1:23 där två vagnar användes inne i en tunnel. Först antändes den ena vagnen och branden fick spridas vidare till nästa vagn. Lufthastigheten inne i tunneln motsvarade 2 m/s. Alla fönster var öppna samtidigt och även dörrar mellan vagnarna. I figur 15 visas brandutvecklingen (översatt till fullskala) både i första vagnen (baserat på vågmätning) och den totala brandeffekten i båda vagnarna (baserat på syrgasförbrukning).



Figur 15 Försök med två vagnar i skala 1:23 och en längsventilation på 2 m/s. Försöket med en vagn i skala 1:10 visas för jämförelse (ingen längsventilation).

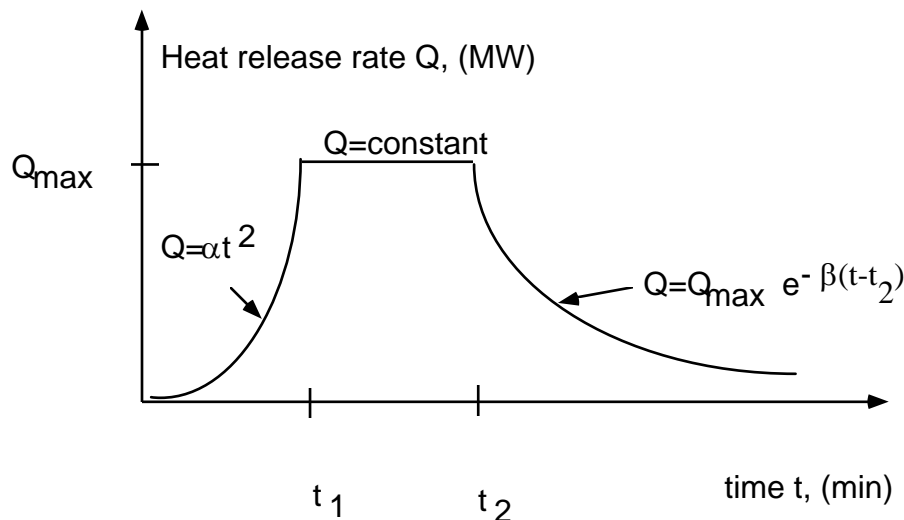
Modellförsöken indikerar högsta möjliga brandeffekter. De kan endast ge en indikation på vilka nivåer man kan hamna på om man utgår från ett värsta brandscenario. Om t ex alla fönster skulle slås ut vid en kollision så kan brandeffekten teoretiskt bli så hög som visas i figur 15.

## 4 Dimensionerande bränder

Teknisk brandskyddsutrustning bör dimensioneras med hänsyn till den brandbelastning som kan förekomma i tunneln. Man måste ta hänsyn till två aspekter; (1) sannolikheten för att en viss brandbelastning kan förekomma och (2) den avgivna brandeffekten och brandgastemperaturen som brandbelastningen kan utveckla. Den avgivna brandeffekten används för att dimensionera ventilationssystemet och brandgastemperaturen används för att bestämma konstruktionens bärförmåga. De resultat som presenteras i figur 8 och 9 kan användas för att ge ett samband mellan brandeffekt och taktemperatur. Resultaten kan endast användas vid liknande förhållanden som försöken anger. Med det menas typ av bränsle, avstånd mellan tak och det brinnande objektet och ventilationsförhållanden.

### 4.1 Tidigare brandscenarier

Ingason [8] har beskrivit dimensionerande bränder i tunnlar. Brandeffekten ökar som funktion av tiden i kvadrat multiplicerad med en fordonsberoende konstant. I figur 16 visas hur den dimensionerande kurvan ser ut.



Figur 16 Dimensionerande brandeffektkurva enligt förslag från Ingason [8].

När det gäller brandtillväxten så råder det fortfarande osäkerhet eftersom försöksunderlaget är begränsat. Brandtillväxthastigheten för spårbundna fordon kan hämtas från Tabell . Brandeffekten  $\dot{Q}$  ges som  $\dot{Q} = \alpha t^2$  där  $\alpha$  anger brandtillväxthastigheten och  $t$  är tiden i sekunder. Tillväxthastigheten antas vara  $0,01 \text{ kW/s}^2$  för tågagn i stål och  $0,3 \text{ kW/s}^2$  för tunnelbanevagn i aluminium. Tiden  $t_1$  bestäms av  $\dot{Q}_{\max}$  enligt tabell 5 och ekv (4) och  $t_2$  bestäms av den totala energimängden, se ekv (5).

$$t_1 = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{\alpha}} \quad (4)$$

där  $\dot{Q}_{\max}$  bestäms från tabell 5 eller från ekv (3). Det värde som är högre ska användas.

$$t_2 = \frac{\chi E_{tot}}{\dot{Q}_{max}} + \frac{2}{3} t_1 - \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

där  $E_{tot}$  är den totala brandbelastningen i kJ och  $\chi$  är förbränningseffektiviteten. I Tabell 5 anges värden för  $\dot{Q}_{max}$  som är baserade på Eureka försöken. I vissa fall vill man försöka uppskatta vilken max effekt som kan uppnås för olika tågtyper. Det går att göra en grov uppskattning av  $\dot{Q}_{max}$  för olika typer av stålvagnar eller vagnar där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod genom att använda ekv (6). Aluminiumvagnar eller vagnar med dålig brandavskiljande funktion kan smälta och då gäller inte denna ekvation. För att beräkna den teoretiskt högsta brandeffekten ( $\dot{Q}_{max}$ ) för vagnar som är konstruerade av stål eller vagnar där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod så kan man använda ekvation (6). Den ger  $\dot{Q}_{max}$  för hela tågvaggen eller för den del av vagnen där fönstren är sönder:

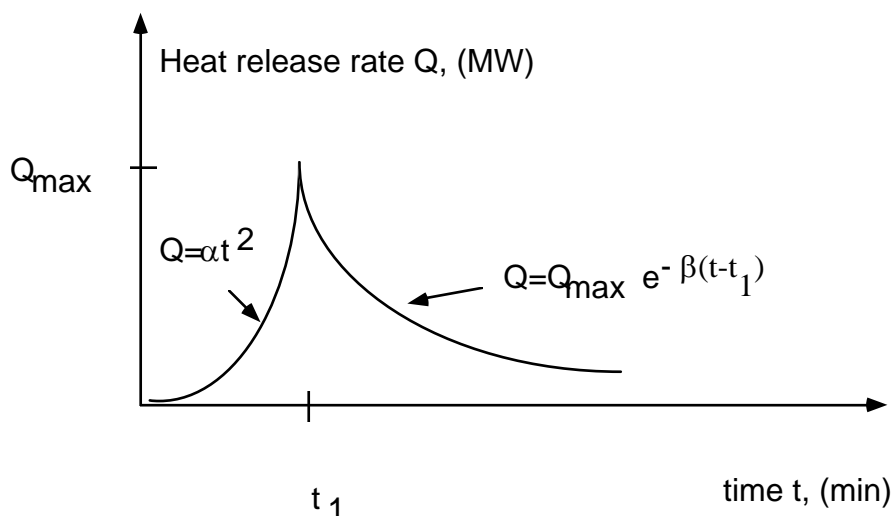
$$\dot{Q}_{max} = \lambda \cdot 1,5 \cdot A_w \sqrt{h} \quad (6)$$

$A_w$  är den total öppningsarean och  $h$  är fönstertyornas medelhöjd i m.  $\lambda$  uppmättes mellan 1,2 till 1,7 i modellskaletförsöken (1:10) som redovisades tidigare. En typisk brand där man kan försöka uppskatta  $\dot{Q}_{max}$  med ekv (6) visas i figur 10.

Tabell 5 Dimensionerande bränder i spårbundna tunnlar enligt Ingason [8].

Fordonstyp	$\dot{Q}_{max}$ (MW)	$\alpha$ (kW/s <sup>2</sup> )	$\beta$ (s <sup>-1</sup> )
Tågsvagn	15	0.01	0.001
Tunnelbanevagn (alumin)	35	0.3	0.001

Ingason föreslog att om  $t_1$  blir större än  $t_2$  enligt ekv (4) och (5) så ska den dimensionerande brandkurvan erhålla den form som visas i figur 17.



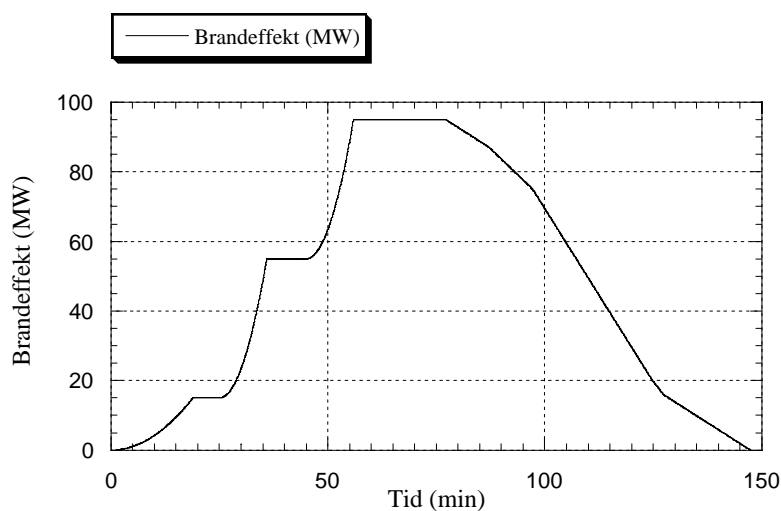
Figur 17 Dimensionerande brand om  $t_1$  blir större än  $t_2$ .

Om  $t_1 > t_2$  så kommer  $\dot{Q}_{\max}$  att bli lägre än det värde som angivits i Tabell 5. Vi får räkna om  $\dot{Q}_{\max}$  enligt följande ekvation:

$$\dot{Q}_{\max} = \chi \beta E_{\text{tot}} \left( 1 - \frac{\beta^{3/2}}{6} \sqrt{\frac{\chi E_{\text{tot}}}{\alpha}} \right)^2 \quad (7)$$

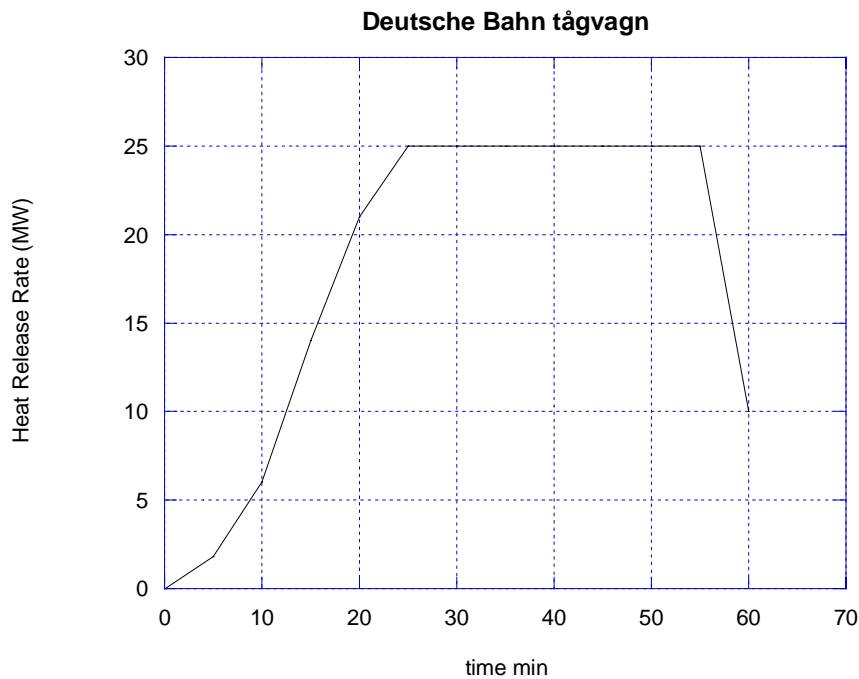
Materialet som presenteras här ger oss indikation på vilka brandeffekter som kan förväntas om en vagn brinner. I verkligheten kan branden spridas mellan vagnarna vilket gör att brandeffekten kan bli betydligt högre än angivet här, se avsnitt 3.3. Då får man försöka göra en uppskattning hur fort branden kan spridas mellan vagnarna. Nedan ges ett exempel på en sådan uppskattning.

Om vi antar att branden sker i en tåg vagn och sprids till flera vagnar så kan resultatet bli som visas i figur 17. Resultatet är baserat på angivna värden i tabell 5 plus att vi har antagit att när branden sprids från första vagnen till de andra två bredvid, så växer den dubbelt så fort jämfört med den första vagnen. Anledningen till detta är att branden i första vagnen successivt värmer upp vagnarna som ligger bortom branden. Även ventilationen kan påverka och skynda på brandspridningen. Vi har antagit att InterCity Express-vagnar är involverade i branden. Antändningen antas ske i mitten av tågsättet vilket innebär att branden sprids samtidigt till två vagnar. Denna kurva återspeglar det "värsta" scenariot i tåg tunnelar. Här har vi inte tagit någon hänsyn till att branden kan påverkas av det släckningsarbete som räddningstjänsten eventuellt kan utföra.



Figur 17 Brandeffekt i fem vagnar förutsatt att branden startar i mittenvagnen och där branden sprids lika fort åt bägge håll.

De tyska järnvägarna (Deutsche Bahn AG [9]) har föreslagit en brandeffekt kurva för en brinnande passagerarvagn. Kurvan ska användas vid beräkning av rök och toxisk miljö vid utrymningsfasen. Kurvan visas i figur 18. De har också angett dimensionerande värde för stängda frakttåg (containrar) på 8 MW, 52,4 MW för öppna frakttåg med långtradar och 11,5 MW för transport av bilar.



Figur 18 Förslag från Deutsche Bahn AG på brandeffektkurva för tysk passagerarvagn.

## 4.2 Nytt beräkningsätt

Nyligen har Ingason [10] publicerat ett nytt sätt att beskriva brandeffektkurvor. Hela brandförloppet beskrivs med en enda ekvation där input är brandbelastning, högsta brandeffekt och varaktighet. Genom kurvanpassning kan man ta fram dimensionerande bränder på motsvarande sätt som beskrivs i avsnitt 4.1. Fördelen är att brandförloppet beskrivs med ett enda matematiskt uttryck och att kurvorna ser mer realistiska ut.

Följande matematiska uttryck kan användas för brandeffektkurvan:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t / t_2} (1 - e^{-k \cdot t / t_2})^{n-1} \quad (8)$$

där  $\dot{Q}_{\max}$  är maximum brandeffekt (kW) och  $t_2$  är en fiktiv brandvaraktighet i (s) som är funktion av  $n$  och  $k$ . Denna ekvation har modifierats och bygger på ekvation framtagen av Numajiri and Furukawa [11]. De olika parametrarna  $n$ ,  $r$  och  $k$  påverkar formen på kurvan på olika sätt. Variabeln  $n$  kallas för ”retard index”,  $k$  kallas för ”time width coefficient” och  $r$  kallas för ”amplitude coefficient”. För att kunna använda ekvation (8), på sådant sätt att  $\dot{Q}(t_{\max})$  blir lika med  $\dot{Q}_{\max}$  vid  $t_{\max}$ , så har vi utvecklat ett följande samband mellan  $r$  och  $n$ :

$$r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n} \quad (9)$$

Om vi integrerar ekvation (8) från  $t=0$  till  $t=\infty$ , så finner vi ett samband mellan totala energivärdet  $E_{tot}$ , brandvaraktigheten,  $t_2$ , högsta brandeffekten,  $\dot{Q}_{max}$ , och parametrarna  $n$  och  $k$ :

$$E_{tot} = \frac{\dot{Q}_{max} \cdot r \cdot t_2}{k} \quad (10)$$

Det innebär att vi kan beräkna den fiktiva brandvaraktigheten  $t_2$ , om vi antar lämpliga värden för de andra parametrarna:

$$t_2 = \frac{E_{tot} \cdot k}{\dot{Q}_{max} \cdot r} \quad (11)$$

Denna fiktiva brandvaraktighet kommer att bero på valet av  $n$  och  $k$ . Genom att derivera ekvation (8) så kan man bestämma tiden  $t_{max}$ :

$$t_{max} = \frac{\ln[n] \cdot t_2}{k} \quad (12)$$

Med den information som erhålles med hjälp av ekvation 8-12 så kan vi bestämma en brandeffektkurva för bränslekontrollerade bränder. De parametrar som är bestämmande här är  $E_{tot}$ ,  $\dot{Q}_{max}$  samt  $n$ . Vid anpassning av kurvan till försöksresultat så kan man variera parametern  $n$  eftersom  $E_{tot}$  och  $\dot{Q}_{max}$  kan i flesta fall antas eller beräknas. Ekvation (8) kan användas för bränslekontrollerade bränder. Exempel på sådana är bränder i långtradarlastar, brand i aluminiumvagn där branden går igenom taket eller bilbrand.

En brand i en tågagn med stålskal eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod blir kontrollerad av syretillförseln genom fönster och dörrar. Försök visar att denna typ av bränder uppnår ett ventilationskontrollerad tillstånd och följer en annorlunda brandeffektkurva än det som kan beskrivas med hjälp av ekvation (8). Istället kan man uppnå en brandeffektkurva som liknar den som visas i figur 16, med en konstant period. Det går att beskriva detta matematiskt genom att summera två kurvor av den typ som beskrivs av ekvation (8). Här måste man anpassa parametrarna  $n$ ,  $r$  och  $k$  för att få en kurva som är användbar för vårt ändamål. Om vi antar en brandeffektkurva som liknar den som beskrivs i figur 16, så kan vi använda följande kurva:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} (n_1 \cdot r_1 \cdot e^{-k_1 t/t_2} (1 - e^{-k_1 t/t_2})^{n_1-1} + n_2 \cdot r_2 \cdot e^{-k_2 t/t_2} (1 - e^{-k_2 t/t_2})^{n_2-1}) \quad (13)$$

Om vi integrerar ekvation (13) från  $t=0$  till  $t=\infty$ , så finner vi ett samband mellan totala energivärdet  $E_{tot}$ , den fiktiva brandvaraktigheten,  $t_2$ , högsta brandeffekten,  $\dot{Q}_{max}$ , och parametrarna  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $k_1$  och  $k_2$ :

$$t_2 = \frac{E_{tot}}{\dot{Q}_{max} \left( \frac{r_1}{k_1} + \frac{r_2}{k_2} \right)} \quad (14)$$

En kurvanpassning med hjälp av parametrarna  $n$ ,  $r$  och  $k$  ( $n_1=5,47$ ,  $n_2=16,3$ ,  $r_1=2,33$ ,  $r_2=1,82$ ,  $k_1=10$ ,  $k_2=7$ ) ger en följande kurva:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} (12,745 \cdot e^{-10t/t_2} (1 - e^{-10t/t_2})^{4,47} + 29,67 \cdot e^{-7t/t_2} (1 - e^{-7t/t_2})^{15,3}) \quad (15)$$

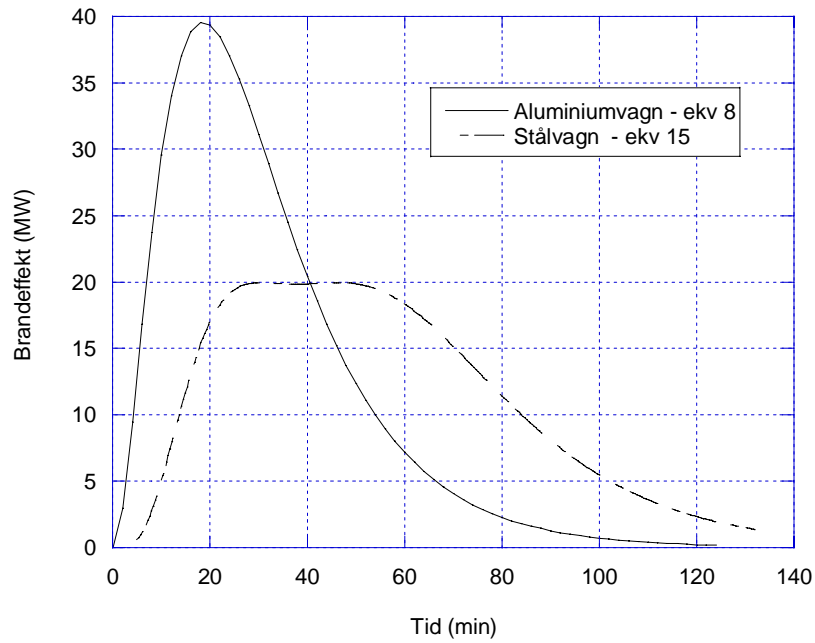
Ekvationer (8) – (15) kan användas för beräkning av dimensionerande brandeffektkurvor för passagerarvagnar med aluminium konstruktioner (ekv 8) där inga speciella åtgärder har gjorts för den brandavskiljande funktionen eller passagerarvagnar med stålkonstruktioner (ekv 15).

Vi kan ge två olika exempel på hur dessa kurvor kan användas med hjälp av ekvationer (8) – (15). I första exemplet antar vi en brand som startar i en passagerarvagn som är byggd i aluminium och utan någon brandavskiljande isolering. Det innebär att branden kan tränga igenom taket och därmed utvecklas fortare jämfört med om det vore en stålvagn. Vi antar att högsta brandeffekten kan bli 40 MW, energiinnehållet i vagnen är 90 GJ och vi antar  $n=3$  och  $k=8$ . Valet av  $k$  och  $n$  påverkar beräkningen av  $t_2$  och lägre  $n$  resulterar i snabbare initialt brandförlopp och högre  $n$  i långsammare brandförlopp. Med hjälp av ekvationer (9) – (11) så blir  $t_2=135$  minuter och enligt ekvation (12) inträffar högsta brandeffekten  $t_{\max}$  efter 18,5 minuter.

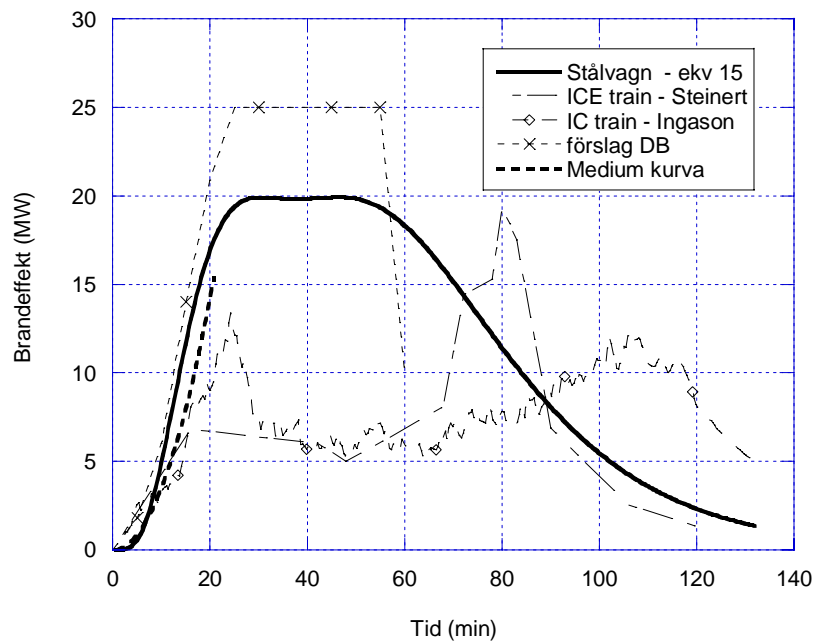
Andra exemplet gäller en stålvagn där fönsterrutornas hållbarhet styr brandutvecklingen. Om vi antar att samma brand, som antogs ovan, hade inträffat i en stålvagn så kan vi använda ekvation (14) och (15) istället. Här antar vi högsta brandeffekt på 20 MW och samma energiinnehåll 90 GJ. Det är ett högre värde än de 15 MW som har använts tidigare för motsvarande vagnar. Ekvation (13) ger  $t_2=152$  minuter och högsta brandeffekten inträffar efter ungefär 20 minuter (uppskattad från grafen i figur 19). Använd **inte** ekv 12 för att beräkna  $t_{\max}$  här eftersom den gäller endast för bränslekontrollerade bränder. Båda exemplen visas i figur 19.

I figur 20 så har resultatet från det andra exemplet jämförts med försöken med stålvagnar i Eureka 499 och med den föreslagna DB kurvan. Jämförelse har även gjorts med den mediumkurva upp till 15 MW som finns i tabell 13, d v s den kurva som används ofta i dag vid dimensionering av tunnlar i Sverige.

Det är viktigt vid dimensionering av tunnlar att använda dessa kurvor med försiktighet. Det är många parametrar som kan påverka brandförloppet och det finns inga absoluta sanningar när det gäller brandutvecklingen i vagnarna. Ekvationerna får betraktas som ett verktyg för ingenjörer som behöver beskriva ett helt brandförlopp med enkla matematiska uttryck.



Figur 19 Exempel på hur brandeffektkurvor kan tas fram med hjälp av ekv (8) – (15).



Figur 20 Stålvagn (exempel), Eureka 499, DB förslag och medium upp till 15 MW.



## 5 Brandkrav för tåg

I Sverige har inte funnits några generella brandkrav på tåg. Brandkraven specificeras snarare vid varje upphandling av kunden alternativt tillverkaren som ställer egna krav. Arbete pågår dock för att harmonisera kraven och skapa en gemensam standard för brandkrav som skall gälla i EU. Standarden kommer att heta EN 45545 och delar av den är redan klara som prEN 45545 [12].

### 5.1 Brandkrav SJ

SJ har ställt upp ett antal krav på material och komponenter för en ombyggnad av tåg under 2001. Enligt uppgift [13] kommer de att tillämpas så länge ingen EN-norm finns på plats. Motiven för kraven är följande: Om inte obrännbarhet kan uppnås, skall materialen vara svårantändliga och självslocknande för att minska risken för brand och spridning av brand. Om möjligt skall materialen ej droppa eller avge särskilt giftiga gaser (t ex från halogener) vid förbränning. Krav på brandmotstånd följer den befintliga del 3 av prEN 45545. Metoder och krav visas i tabell 4 nedan.

Tabell 4. Provningsmetoder och krav enligt SJ

Material	Testmetod	Krav
Komplett tågsäte	BS 5852 [14]	se nedan
Invändiga väggar och tak	UIC 564-2, app. 4	Class A
Rullgardiner, textilier	UIC 564-2, app. 5	Class A
Skummaterial	UIC 564-2, app. 8	Class A
Kablar	UIC 564-2, app. 9, IEC 332	Class A
Övergångar	UIC 564-2, app. 10, A or B	Class A
Golvbeläggning	UIC 564-2, app. 12	Class A
Gummitätningar	UIC 564-2, app. 6	Class A
Belysningsarmaturer	DIN 4102	B1 or B2

Material med lägre klass än A i UIC 564-2 tillåts endast i små mängder.

En kort förklaring av metoderna:

**BS 5852** Det kompletta sätet testas med tändkälla nr 7 (125 g träribbstapel) på och under sätet. Tilläggstest utförs så att sits och rygg slitsas upp med ett kryss, 150 mm x 150 mm i mitten. Kravet är att ingen låga eller glödande antändning får ske enligt definition enligt standarden. Test på textilier och skum enskilt enligt UIC 564-2 app. 5 och 8 är ej obligatoriskt.

**UIC 564-2** Småskaliga flamtest i olika varianter.

**DIN 4102** Småskaligt flamtest, flamma i 45 ° vinkel mot vertikal provkropp.

## 5.2 prEN 45545

Inom den Europeiska standardiseringen, CEN/ CENELEC, pågår ett arbete att för skapa harmoniserade brandkrav för tåg i Europa med målet att skydda passagerare och personal. Den harmoniserade standarden heter nu prEN 45545 och behandlar alla brandsäkerhetsområden från småskaliga materialkrav till struktur- och stabilitetskrav för hela vagnar. Standarden består av sju delar, varav flera redan är klara;

- part 1 : General
- part 2 : Requirement for fire behaviour of materials and components
- part 3 : Fire resistance requirements for fire barriers and partitions
- part 4 : Fire safety requirements for railway rolling stock design
- part 5 : Fire safety requirements for electrical equipment including that of trolley buses, track guided buses and magnetic levitation vehicles
- part 6 : Fire control and management systems
- part 7 : Fire safety requirements for flammable liquid and flammable gas installations

Under skapandet av del 2 av standarden som behandlar inredningsmaterial och komponenter insåg man att det finns inga gemensamma provningsnormer att referera till och att hela frågan om produkters brandsäkerhet på tåg är ofullständigt utredd. Därför bildades, på CENs anmodan, projektet FIRESTARR [15] (Fire Standardisation Research of Railway vehicles). Ett konsortium bestående av SP Brandteknik och 10 andra partners runt om i Europa skapades för att utföra forskning inom det här området.

Den statistiska analysen av bränder i europeiska tåg indikerade att anlagda bränder, oftast i säten, utgjorde den största risken och valet av testmetoder för ytskikt och möbelprodukter gjordes med detta i åtanke. Småskaliga metoder valdes främst från existerande standarder inom ISO och CEN. De storskaliga provningarna utvecklades enligt definierade brandscenarier och involverade prov av säten och strukturella material i en ventilerad tågupé (10 m<sup>3</sup>). Elektriska produkter förutom kablar utvärderades på ett liknande sätt som säten fast med andra metoder.

Alla testdata lades in i en databas och analyserades statistiskt med avseende på fem riskparametrar relaterade till de kritiska faktorerna i målen ovan; antändning (I), flamspridning (F), värmeeffekt (R), röktäthet (S) och toxicitet hos brandgaser (T). Analysen visade t ex vilka metoder som gav samma information och därmed kunde vissa metoder elimineras. Den gav också information om vilka nivåer som var lämpliga för klassifikationskriterier. Kriterierna validerades i flera fall via storskaliga provningar i en ventilerad tågupé med mätning av bl a värmeeffekt och rökutveckling.

Ett förslag på klassificeringsprinciper relaterade till operationskategorier och risknivåer definierade av CEN har utvecklats baserat på provningarna. Förslaget vidareutvecklas nu av CEN som tar det slutgiltiga beslutet om metoder och kriterier.

## 6 Förslag till dimensionerande brandscenarier

Det finns anledning till att öka den högsta brandeffekten från 15 MW till 20 MW för en passagerarvagn av stål eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod. De försök som presenteras i denna rapport visa att brandutvecklingen och speciellt den högsta brandeffekten styrs till stor del av när fönsterna går sönder eller ramlar ur vagnarna. Vid en urspårning eller kollision kan flera fönster förstöras innan branden blir fullt utvecklad, vilket i sin tur kan påverka brandutvecklingen. Även i fallet när alla dörrar på tåget öppnas kan ha en viss betydelse för brandutvecklingen. Om alla fönster är öppna eller förstörs i en passagerarvagn av stål kan de högsta brandeffekterna bli betydligt högre än 15 MW, kanske så mycket som 30 MW – 45 MW. Det är dock osannolikt att alla fönster är öppna eller ramlar ur vagnarna vid en kollision eller urspårning. Vagnar med fönster som har dåligt brandmotstånd kan också ramla ur vid relativt låga temperaturer. I EUREKA försöken var alla fönster av god kvalitet och intakta vid försökets början. Den högsta brandeffekten uppmättes till 13 MW respektive 19 MW i försöken med moderna stålvagnar. På grund av den osäkerhet som kan råda när det gäller antalet fönster som är intakta efter en olycka, och deras kvalitet eftersom det ställs inga brandtekniska krav på fönsterna, föreslår vi att välja det högsta uppmätta värdet, d v s 19 MW, istället för medelvärdet 15 MW som har använts tidigare för stålvagnar. Av praktiska skäl kan man runda av upp till 20 MW. Motsvarande värde för en aluminiumvagn utan brandavskiljande isolering eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod är 40 MW. Om branden kan spridas mellan flera vagnar kan brandeffekten bli mellan 40 MW – 70 MW beroende på lufthastighet och slussarnas utformning.

Nedan ges förslag till tre olika brandscenarier som kan användas vid funktionsbaserad dimensionering av utrymnings säkerhet och konstruktioner i tågtunnlar med passagerartåg:

- i) En modern passagerarvagn av stål, eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod, och som uppfyller de högsta brandkraven i avsnitt 5.  $\dot{Q}_{\max} = 20 \text{ MW}$  och  $\dot{Q}(t)$  beräknas enligt ekvation (15). Motsvarande värde för en vagn av aluminium utan brandavskiljande isolering, eller kompositmaterial, eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod, är  $\dot{Q}_{\max} = 40 \text{ MW}$ . Ekvation (8) användas för beräkning av  $\dot{Q}(t)$ .
- ii) Passagerarvagn av stål, eller vagn där vagnkonstruktionen har motsvarande brandavskiljande funktion under samma tidsperiod, och där fönsternas brandmotstånd eller fönsterinfästningen inte kan garanteras.  $\dot{Q}_{\max}$  beräknas enligt ekvation (6) och  $\dot{Q}(t)$  beräknas enligt ekvation (15).
- iii) Där det finns risk för att branden sprids mellan flera passagerarvagnar.  $\dot{Q}_{\max}$  mellan 40 – 70 MW och  $\dot{Q}(t)$  beräknas enligt ekvation (8).

En lämplig metod att beräkna temperaturpåverkan på tunneltakkonstruktionen är med hjälp av ekvation (1) och (2) förutsatt att man gör en regressionsanalys av den data som visas i figur 8 och 9. Det krävs dock mer förståelse och analys av tillgänglig data med

avseende på inverkan av ventilationen, bränslehöjden, tvärsnittsarean och takhöjden innan ett sådant förslag kan läggas fram.

Tills vidare föreslås en HC-kurva [16] som en lämplig tid-temperatur kurva för tågtunnlar. Den högsta taktemperaturen blir då 1100 °C. Den fiktiv brandvaraktigheten  $t_2$  bör bestämmas av den energimängd som finns för hela tågsättet och inte ifrån enskild vagn.

## 7 Referenser

- 1 Ingason, H. och Lönnermark, A., "Large-scale Fire Tests in the Runehamar tunnel - Heat Release Rate (HRR)", In *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, (H. Ingason, Ed.) SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, SP Report 2004:05, Sweden, 2003.
- 2 Lönnermark, A. och Ingason, H., "Large Scale Fire Tests in the Runehamar Tunnel - Gas Temperature and Radiation", In *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, (H. Ingason, Ed.) SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2003.
- 3 Lemaire, T., "Runehamar Tunnel Fire Tests: Radiation, Fire Spread and Back Layering", In *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2003.
- 4 Brandt, A., "Presentation of test result from large scale fire tests at the Runehamar tunnel", In *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, (H. Ingason, Ed.) SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 2003.
- 5 Bengtson, S., Brandskydd i underjordsanläggningar, forskningsbehov, slutrapport 1990-09-10, Brandskyddslaget AB.
- 6 EUREKA 499, Fires in Transport Tunnels: Report on Full-Scale Test. EUREKA-Project EU499:FIRETUN Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. D-40213 Dusseldorf 1995.
- 7 Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. och Ingason, H., Räddningsinsatser vid tunnelbränder, Probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i spårtunnel, FoU Rapport SRV, P21-391/01.
- 8 Ingason, H., "Design Fires in Tunnels", Conference Proceedings of Asiaflam 95, Hong Kong 15<sup>th</sup> - 16<sup>th</sup> of March 1995, Interscience Communications Limited.
- 9 Ergebnisbericht zur Beurteilung von Branden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG; Deutsche Bahn AG, DB Station & Service, Fachstelle Brandschutz, Frankfurt am Main, September 2000.
- 10 Ingason, H., "Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF)", *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, 31-47, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003.
- 11 Numajiri, F. och Furukawa, K., Short Communication: Mathematical Expression of Heat Release Rate Curve and Proposal of "Burning Index", *Fire and Materials*, Vol. 22, 39-42 (1998).

- 
- 12 Draft European Standard prEN 45545 – Railway applications - Fire protection on railway vehicles, CEN/CENELEC Central Secretariat, Brussels, November 2002 (working draft).
  - 13 Personlig kommunikation mellan Jesper Axelsson SP och Erica Ängfors, Traintech AB, juni 2001
  - 14 British Standard fire tests for furniture, Part 2. Methods of test for ignitability of upholstered composites for seating by flaming sources. BS 5852: 1990.
  - 15 FIRESTARR – Evaluation of test methods for the fire behaviour of material used in railway vehicles, SMT4-CT97-2164, April 2001.
  - 16 EN 1363-2, "Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures", First ed., 1999-09-24, European Committee for Standardization, 1999.