

Haukur Ingason
Anders Lönnermark

**Brandbelastning och
brandscenarier för vägtunnlar**

SP Arbetsrapport 2004:32
SP Brandteknik
Borås 2004

Abstract

The report contains a short description of the Runehamar tests and a proposal to design fires for road tunnels. A summary of fires in road tunnels is presented as well as investigation of fire behaviour in road vehicles. Based on the information given in the report, a proposal to design fires is given.

Key words: Road tunnels, fire load, heat release rate, large scale tests

**SP Sveriges Provnings- och
Forskningsinstitut**
SP AR 2004:32
Borås 2004

**SP Swedish National Testing and
Research Institute**
SP Technical Notes 2004:32

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

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Beskrivning av Runehamarförsöken	8
2.1	Brandeffekt	9
2.2	Gastemperatur	9
2.3	Brandbekämpning	11
3	Brandutveckling i vägtunnlar	14
3.1	Statistik och brandorsak	14
3.2	Inträffade bränder	15
3.3	Genomförda fullskaleförsök	18
3.4	Uppmätta gastemperaturer i taket	21
4	Dimensionerande bränder	24
4.1	Tidigare brandscenarier	24
4.2	Nytt beräkningssätt	26
4.3	SRV studie kring räddningsinsatser i vägtunnlar	27
4.4	Inverkan av lufthastighet på brandtillväxten	29
5	Diskussion	31
6	Förslag till dimensionerande brandscenarier	33
7	Referenser	34

Förord

SP Brandteknik initierade och genomförde i samarbete med SPs systerorganisationer i Norge (SINTEF) och Holland (TNO) fullskaliga brandförsök i Runehamartunneln hösten 2003. Försöken ingick som en del i det projekt som presenteras i denna rapport. Vägverket var en av delfinansierarna för dessa försök. Andra finansiärer för Runehamarförsöken var Banverket, 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.

Sammanfattning

Rapporten beskriver de försök som har gjorts i Runehamartunneln 2003 på uppdrag av bl a Vägverket. En sammanställning av gammal och ny kunskap avseende brandutveckling i vägtunnlar redovisas också i rapporten. Den beskriver också olika förslag till dimensionerande brandlast och brandscenarier för vägtunnlar. Underlaget för valet av brandscenierna hämtades från tidigare fullskaliga brandförsök, modellförsök, Runehamarförsöken och från inträffade bränder i vägtunnlar. Tre olika brandscenarier som kan användas vid funktionsbaserad dimensionering av utrymningsssäkerhet i vägtunnlar med olika trafiksituationer föreslås. Förslaget omfattar inte transport av farligt gods genom vägtunnlar och förutsätter begränsad brandspridning mellan fordonen.

Runehamarförsöken bekräftar de farhågor man har haft angående brandutvecklingen i långtradarlaster. Försöken visar att man kan erhålla maxeffekter mellan 70 MW – 200 MW i gods som inte tidigare har klassats som farligt gods. Dessutom finns det långtradarare som är betydligt längre än den långtradarattrapp som användes i Runehamarförsöken. Brandbelastningen varierade mellan 67 GJ – 240 GJ i försöken, vilket kan anses som en normal brandbelastning för denna typ av transport. Därför finns det anledning att se över de dimensioneringsvärden som används för vägtunnlar idag. Långtradararnas betydelse för brandsäkerheten i vägtunnlar har därmed fått ny fokus.

Det finns anledning att föreslå nya dimensionerande brandeffektkurvor som tar hänsyn till brandtillväxthastigheten och de höga maxbrandeffekter som uppmättes i Runehamarförsöken. I avsnitt 6 föreslås tre olika brandscenarier, där var och en beror på vilken typ av trafik som kan förväntas trafikera tunneln.

De höga gastemperaturerna som uppmättes i Runehamarförsöken (1280 °C - 1360 °C) har väckt stor förundran och har skapat en ny debatt kring vilka tid-temperaturkurvor som ska användas vid dimensionering av vägtunnlar. Ska man ha en RWS-kurva, en HC-kurva, eller en ISO-kruva? Det finns all anledning att se över det sätt man använder dessa kurvor på idag. En mer ingenjörsmässig metod vore att beräkna temperaturpåverkan på takkonstruktionen som funktion av tiden och brandeffektutveckling, takhöjd och lufthastighet. 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. Här behövs systematiska försök i modellskala där man undersöker betydelsen av dessa parametrar för taktemperaturerna.

1 Inledning

Stora tunnelbränder med allvarliga konsekvenser i Europa har ytterligare satt personsäkerheten i vägtunnlar i fokus. På senare tid har över sextio personer omkommit vid bränder i vägtunnlar i Europa. I flera fall har de ekonomiska konsekvenserna för tunnelägarna varit enorma. Efterspelet till varje olycka kräver mycket stora insatser inte minst från myndighetshåll. I Vägverkets FoU plan från 2002 påpekas vikten av bättre kunskap kring personsäkerhet i tunnlar (kapitel 7.4 Tunnlar SVT:10) och kring dimensionering av tunnlar (SVT:11). I dagsläget finns regler i Tunnel 99 som beskriver den brandbelastning som en tunnel ska dimensioneras för men det finns behov av att implementera ny kunskap in i reglerna. Dessutom finns formuleringar som säger att ventilationen ska dimensioneras för en viss brandbelastning och att utrymning ska utformas på ett tillfredsställande sätt. Formuleringarna är vaga, eftersom det saknas bättre kunskap kring brandutveckling och spridning av värme, rök och toxiska gaser i vägtunnlar samt inverkan av ventilationssystemet på brand- och rökutvecklingen. Kunskapsbristen är störst för stora fordon, typ långtradare. Det har utan tvekan varit den fordonstyp som har bidragit mest till omfattningen av tunnelbränderna i Europa de senaste åren. Därför finns det ett mycket stort behov av bättre kunskap kring brandutvecklingen och brandspridningen i denna typ av fordon.

Brandlaster i vägtunnlar varierar mycket beroende på typ av tunnel och trafikintensitet. Vägtunnlar utanför storstäderna har en betydligt lägre trafikintensitet jämfört med tunnlar inne i storstäderna. Detta gör att trafiksituationen kan bli annorlunda och det i sin tur kräver andra säkerhetsåtgärder och därmed annan dimensionering. I vissa tunnlar kan konsekvenserna av en eventuell brand bli mycket omfattande på grund av för hög brandbelastning. Det visar inte minst de tunnelolyckor som har inträffat i Europa de senaste åren (Eurotunneln, Mont Blanc, Tauern, St:Gotthard). I många av dessa fall har bränderna blivit ventilationskontrollerade vilket kan innebära brandeffekter mellan 150 - 350 MW beroende på tunneltvärsnitt och ventilationshastighet. Därför krävs mer kunskap dels om en förväntad brands storlek samt om hur brand sprids mellan fordon i en brandsituation.

Det råder också stor osäkerhet kring vilka brandlaster som skall användas vid dimensionering av bärande konstruktioner i tunnlar (SVT:11). Det finns ett antal standardiserade brandkurvor för dimensionering men man ska vara medveten om att den mest tillämpliga brandkurvan, ISO 834 är framtagen för att efterlikna en brand i ett rum. Det konventionella sättet att använda temperatur-tid-kurvor för att beskriva påverkan på konstruktionen kan behöva kompletteras med andra parametrar, exempelvis ventilation, tunneltvärsnitt och typen av bränsle.

Syftet med projektet som beskrivs i denna rapport är, i enlighet med den beskrivning som finns i SVT:10, att öka kunskapen om brandbelastning, ventilation och utrymningsfrågor genom fullskaleförsök i en vägtunnel och genom erfarenheter från datasimuleringar och inträffade bränder. Det finns ett behov av ytterligare insatser för analys av brandscenarioer och temperaturutveckling i vägtunnlar som kan implementeras i Tunnel 99. Vägverket har delfinansierat de fullskaliga brandförsök som genomfördes i Runehamar tunneln i Norge 2003, och som beskrivs i mer detalj i kapitel 2. Underlaget för att bestämma brandscenarioerna hämtas från dessa brandförsök, tidigare brandförsök och från inträffade bränder i tunnlar. En sammanställning av gammal och ny kunskap avseende brandutveckling i fordon kommer att redovisas i kapitel 3.

2 Beskrivning av Runehamarförsöken

Runehamar försöken 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%) ^{a)}	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 m² utan skydd och 32 m² med skydd och takhöjden var 5.8 m utan skydd och 5 m med skydd.

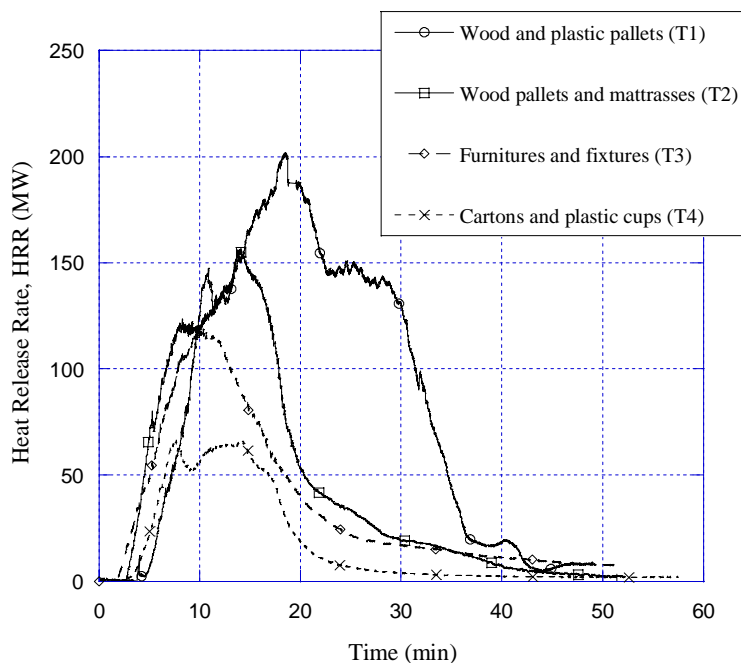


Figur 1 Bilder från försöksuppställning som användes i Runehamar försöken.

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 HCN (vätecyanid), kolmonoxid 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 polyuretan 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.

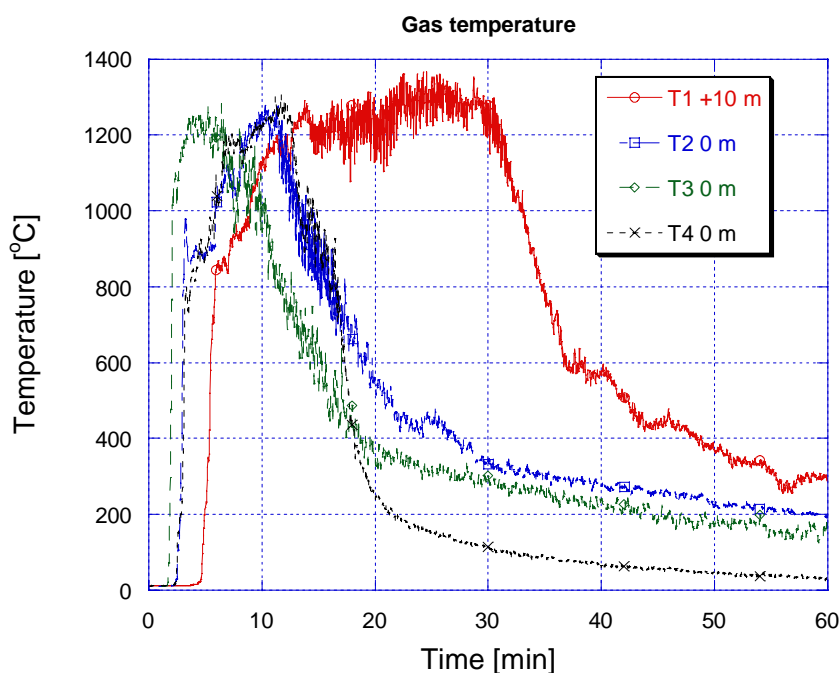


Figur 2 Uppmätta brandeffekter i Runehammar försöken [1].

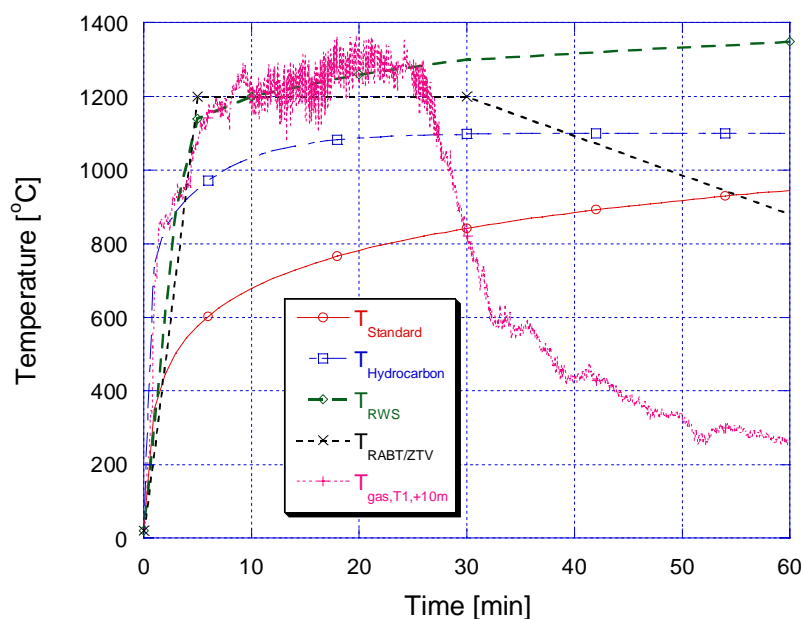
2.2 Gastemperatur

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/m² och vilket ger enormt hög värmebelastning mot konstruktionen. I försöken uppmättes värmestrålning mot vägbanan 10 m nedströms trailern på 250 kW/m². De flesta brännbara material antänder inom någon eller några minuter om de utsätts för värmestrålning på 20 – 25 kW/m². 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 visas de uppmätta temperaturerna i alla fyra försöken i Runehamar [2]. I figur 4 jämförs uppmätt gastemperatur i första försöket (T1) med olika standardbrandkurvor.



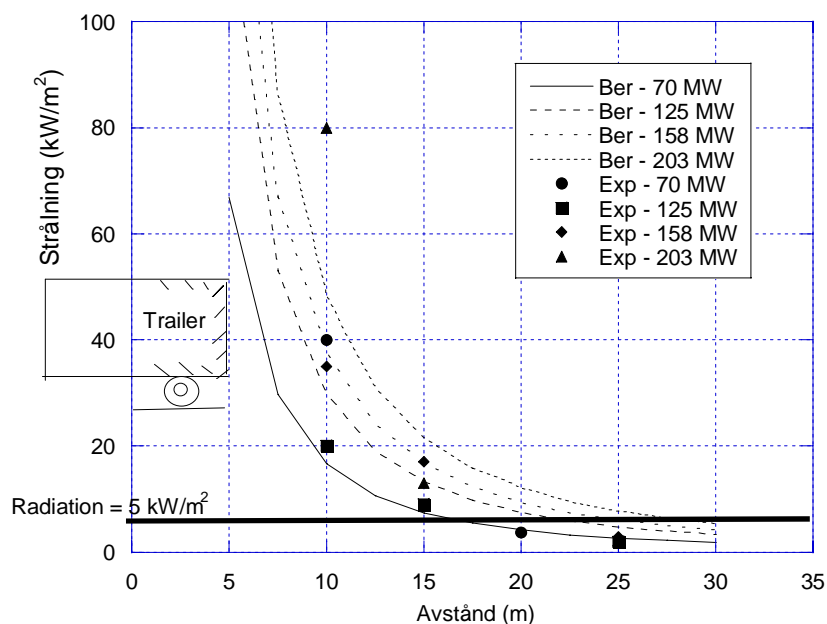
Figur 3 Uppmätt taktemperatur i Runehamarförsöken [2].



Figur 4 Uppmätt gastemperatur i första försöket (T1) jämfört med olika standardbrandkurvor [2].

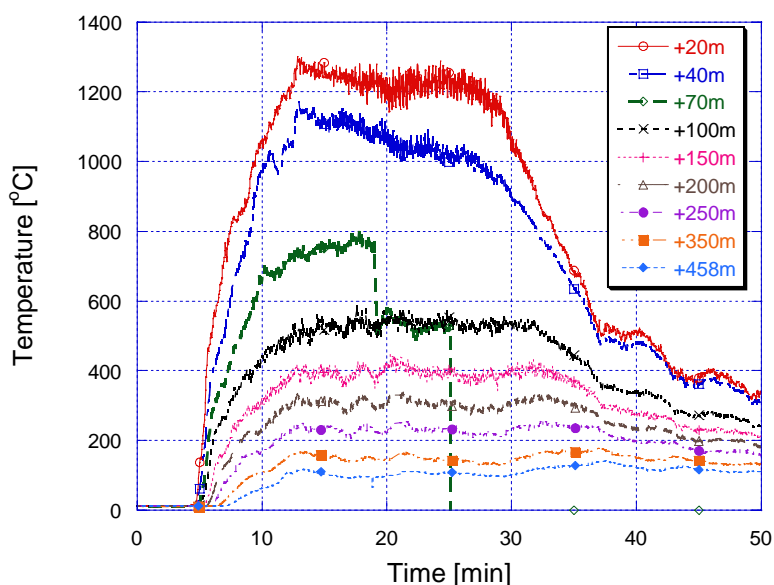
2.3 Brandbekämpning

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 – 25 m från brandens centrum, över de gränser som en rökdykare skulle klara av utan extra skydd (5 kW/m^2), se figur 5. För jämförelse finns beräknade värden som bygger på en enkel modell för strålning, se referens [5]. 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.



Figur 5 Beräknade (Ber) och experimentella (Exp) strålningsnivåer uppströms Runehamar bränderna som funktion av maximal brandeffekt och avstånd från brandens centrum [5].

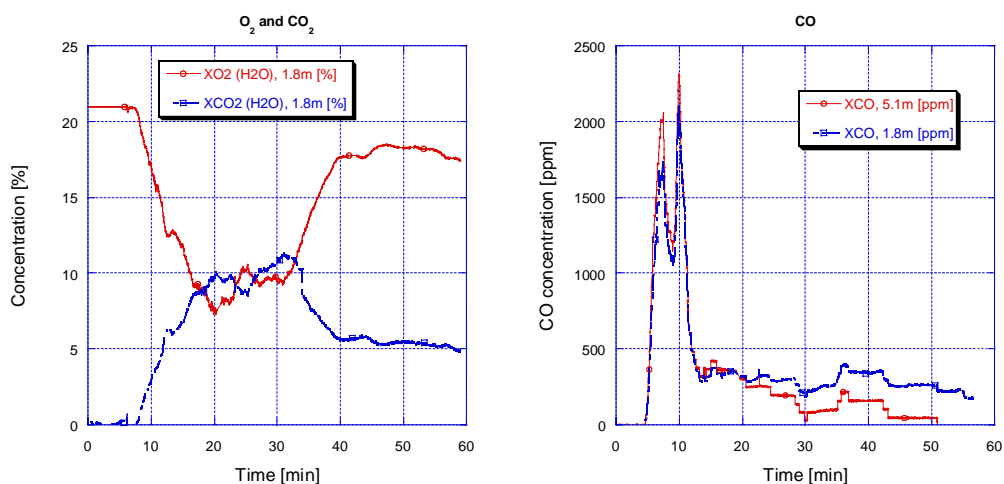
I försöken uppnåddes ingen 'backlayering' av röken vid lufthastigheter över 2,7 m/s. Vid hastigheter mellan 1,5 m/s till 2 m/s uppmättes däremot en backlayering som var över 100 m. Beroende på försök så uppmättes flamlängder mellan 40 till 100 m och allt brännbart material nedströms branden på ett avstånd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



Figur 6 Temperaturfördelningen nedströms branden i försök T1.

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), så förlorade de medvetandet efter endast 2 minuter från det att röken kom fram. I övriga fall var det drygt 6 minuter. Gastemperaturen nedströms branden sjunker fort men den är fortfarande ganska hög 458 m från branden, eller drygt hundra grader, se figur 6. I figur 7 visas vilka nivåer på syrehalt, koldioxidhalt och karbonmonoxidhalt uppmättes i första försöket (T1).



Figur 7 Uppmätta gaskoncentrationer vid mätstationen 458 m nedströms branden i första försöket (T1) med trä och plastpallar. Till vänster visas syrehalten (O₂) som funktion av tid och koldioxidhalten (CO₂) 1,8 m över vägbanan och till höger visas karbonmonoxidhalten (CO) på två olika höjder över vägbanan, 1,8 m och 5,1 m.

3 Brandutveckling i vägtunnlar

Det finns flera faktorer som har spelat en avgörande roll vid de tunnelbränder som har inträffat i Europiska vägtunnlar. Brandens utveckling i dessa olyckor har varierat beroende på flera faktorer. Gemensamma nämnare har varit betydelsen av brandbelastningen och ventilationen för brandutvecklingen. I flera av bränderna spelade lasten i långtradare en viktig roll för utgången. Huvudorsaken till detta är att långtradare innehåller mycket brännbart gods och att branden sprider sig snabbt på grund av den långsgående ventilationen. Detta innebär stora problem vid evakuerings- och släckningsarbete eftersom räddningspersonalen har svårt att närma sig branden. Stora skador har också uppstått på tunnelkonstruktionerna eftersom betongen har spjälkat i stor omfattning. I följande avsnitt sammanställs den kunskap som finns kring brandscenarioer i vägtunnlar i dag.

3.1 Statistik och brandorsak

En granskning av ett antal stora brandolyckor och brandförsök i vägtunnlar har utförts för att kunna ta fram förslag till brandscenarioer för vägtunnlar. I följande avsnitt redovisas inträffade bränder och statistik som finns tillgänglig för vägtunnlar till dags dato. Underlaget bygger delvis på en litteraturstudie som Ingason m fl [6] genomförde 1997 kring bränder i tunnlar samt ny information som har tillkommit sedan 1997. I litteraturstudien genomfördes en analys av inträffade olyckor i tunnlar där det framkommer bland annat att:

- i många fall tog det över 30 minuter att starta släckningsarbetet (typ långtradarbränder)
- det tog över 30 minuter innan branden var släckt (typ långtradarbränder)
- långa sträckor med hela tunneltvärsnittet var rökfyllt
- siktlängden var nära noll i röken i flesta av de undersökta fallen
- röken tenderade att transporteras åt ett håll, i de flesta fall på grund av den naturliga ventilationen i tunneln
- skadorna var relativt begränsade i tunneln. Tunnlarna kunde återanvändas efter reparation

Trots de katastrofbränder som har inträffat i vägtunnlar sedan studien genomfördes 1997 så gäller slutsatserna fortfarande men de måste modifieras speciellt när det gäller insatstiderna samt storleken och varaktigheten på bränderna. Räddningstjänsten har i många av fallen inte haft någon möjlighet att påverka brandutvecklingen.

De främsta orsakerna till bränder i vägtunnlar är:

- i) överhettning kombinerad med läckage eller elfel (vanligast för personbilar),
- ii) bränder som börjar i motorutrymme eller
- iii) kollision (många av de stora brandolyckorna startar med kollision).

Bränder som börjar i däck är oftast orsakade av överhettade bromsar (enligt fransk statistik 60 - 70 % av alla bränder i stora fordon [7]) eller varmgång i lager. Bränder kan också orsakas av tekniska fel i den utrustning som finns i tunneln eller på grund av underhållsarbeten.

Det inträffar i storleksordningen lika många bränder per fordonskilometer på det allmänna vägnätet som i tunnlar (inkluderar ej bränder i teknikrum i tunnlar). Statistik från Japan [8] visar att det inträffar i storleksordningen en brand per 10 miljoner fordonskilometer i tunnlar. I denna statistik skiljer man inte på stora eller små bränder

(stora eller små fordon). Motsvarande siffra, dvs en brand per 10 miljoner fordonskilometer, gäller för Elbtunneln i Hamburg som är 3,3 km lång [9]. Det är känt att omkring 30 % av dessa bränder är i stora fordon, medan stora fordon bara står för 15 % av trafikvolymen. Antalet stora fordon i olika tunnlar i Europa kan variera från 9 % upp till 55 % [7] (t ex Frejustunneln mellan Frankrike och Italien har 55 %). I Frankrike [10] räknar man med 0,8 bränder per 10 miljoner fordonskilometer för stora fordon, vilket dock inte inkluderar tankbilar. Haack och Meyeroltmanns redovisar en bra sammanfattning över inträffade bränder i vägtunnlar baserad på data från Frankrike [7]. EU kommissionen räknar med en ökning i långtradartrafiken med 40 – 60 % de närmaste 10 åren [11].

Tabell 2 Antal bränder per fordonskilometer för olika typer av fordon i Frankrike [7].

Typ av brand		Antal bränder per 10 miljoner (107) fordonskilometer
Personbilar	bränder av betydelse	0,1-0,2
Lastbilar utan farligt gods	bränder av betydelse	0,8
	bränder med skada på tunneln som följd	0,1
	mycket allvarliga bränder	0,01 - 0,03
Lastbilar med farligt gods	bränder av betydelse	0,2
	bränder där farligt gods var involverat	0,03

En överblick över sannolikheter för att en brand inträffar för olika fordonstyper ges i tabell 3.2. Den är baserad på data från 26 olika tunnlar i Frankrike där man grovt delat upp tabellen i olika kategorier beroende på brandens inverkan på tunneln. Sannolikheten för en brand med lastbil utan farligt gods (här menar man vanlig långträdare) verkar stämma bra med den statistik som angavs tidigare d v s en brand per 10 miljoner fordonskilometer.

Det är lastbilar utan farligt gods som ger högst sannolikhet för bränder av betydelse. Brand av betydelse definieras inte specifikt av Haack och Meyeroltmanns [7] men antagligen menas bränder som man har kunnat släcka innan skadan blev för omfattande. Den tolkningen kan man göra eftersom brand i personbil sällan ger skador på tunnelkonstruktionen men rökutvecklingen kan bli tillräckligt omfattande för att stoppa trafiken. I så fall är det ett mindre saneringsarbete som krävs efteråt. Inte oväntat är det alltså de stora fordonen (långträdarna) som ger skador på tunnlarna. ”Bränder med skada på tunneln” är de bränder som är mindre än 20 MW (antagligen uppskattad värde). ”Mycket allvarliga bränder” är de som har gett högre brandeffekt än 20 MW. Haack och Meyeroltmanns [7] påpekar också att landsvägstunnlar tenderar att ge högre antal bränder än innerstadstunnlar. Risken för att en brand ska inträffa verkar öka hos tunnlar som ligger efter en lång uppförbacke eller har en brant lutning (brand i motorutrymme på grund av hög belastning på motorn). Detta gäller också dem som ligger efter en lång nedförbacke (brand på grund av hög belastning på bromsar). Nya tunnlar tenderar också att ha högre brandfrekvens enligt Haack och Meyeroltmanns [7]. Frekvensen sjunker när förarna blir mer bekanta med den nya tunneln.

3.2 Inträffade bränder

I en litteraturstudie på uppdrag åt Vägverket [12] redovisas en sammanställning och analys av alla stora brandolyckor i vägtunnlar fram till 1997. Denna litteraturstudie har kompletterats [5], se tabell 3, och sammanfattar 29 brandolyckor i vägtunnlar som kan betraktas som allvarliga.

Tabell 3 Sammanställning av allvarliga olyckor med brand i vägtunnlar fram till 2003 [5].

År	Tunnel	Plats och land	Fordon vid brandens ursprung	Förmodad brandsorsak	Rapporterad varaktighet	Konsekvenser för		
						Människor	Fordon	Tunnel
1949	Holland L = 2 550 m	New York USA	1 lastbil lastad med 11 ton koldisulfid	Last föll av lastbil	4 h	66 (rökförgiftade)	10 lastbilar 13 bilar	Allvarlig skada 200 m
1968	Moorfleet L = 343 m	Hamburg Tyskland	1 lastbil med släp (14 t med plastpåsar)	låsning av bromsar	1 h 30 min	inga	1 släpvagn	Allvarlig skada 34 m
1974	Chesapeake Bay	USA			4 h	1 skadad	Tankbil	
1975	Guadarrama L = 3 330 m	Guadarrama Spanien	1 lastbil lastad med tankar med tallharts	okänd	2 h 45 min	inga	1 lastbil	Allvarlig skada 210 m
1976	B6 L=430 m	Paris	1 lastbil med 16 ton polyester	okänd	1 h	12 skadade	1 lastbil	skada 150 m
1978	Valsen L = 770 m	Velsen Holland	2 lastbilar och 4 bilar	front-back kollision	1 h 20 min	5 döda 5 skadade	2 lastbilar 4 bilar	Allvarlig skada 30 m
1979	Nihonzaka L = 2 045 m	Shizuoka Japan	4 lastbilar och 2 bilar	front-back kollision	4 dagar	7 döda 2 skadade	127 fordon	Allvarlig skada 1100 m
1980	Sakai	Japan	10 fordon	okänd	3 h		10 fordon	
1980	Kajiwara	Japan	1 lastbil (4 t) med 3600 l färgburkar och 1 lastbil (10 t)	kollision mot vägg och overturn	okänd	1 död	2 lastbilar	Allvarlig skada 280 m
1982	Caldecott L = 1 083 m	Oakland USA	1 lastbil och 1 personvagn 33 000 liter bensin	front-back kollision	2 h 40 min	7 döda 2 skadade	3 lastbilar 1 mini-buss 4 bilar	Allvarlig skada 580 m
1983	Fréjus L = 12 868 m	Modane Frankrike-Italien	1 lastbil lastad med plast-material	Växellådan gick sönder	1 h 50 min	inga	1 lastbil	Allvarlig skada 200 m
1984	Felbertauern L=5130	Österrike	1 buss	bromsar	1 h 30 min	inga	1 buss	skada tak och utrustning 100 m
1984	Gotthard L = 16 321 m	Goeschenen Schweiz	1 lastbil med plastrullar	Brand i motor	24 min	inga	1 lastbil	Allvarlig skada 30 m
1986	L'Arme L=1100 m	Frankrike		Kollision		3 döda 5 skadade		
1987	Gumefens L = 340 m	Bern Schweiz	1 lastbil	Masskrock på hal vägbana	2 h	2 döda	2 lastbilar 1 van	Liten skada
1993	Serra Ripoli L=442 m	Bologne Italien	Personbil och lastbil med pappersrullar	fordon körde okontrollerat och krockade	2 h 30 min	4 döda + skadade	4 lastbilar 11 personbilar	allvarlig skada på beklädnad
1993	Frejus L=12870 m	Frankrike	1 långträdare	Motorbrand	2 h	inga	1 lastbil	
1993	Hovden L=1283 m	Norge	Lastbil	Kollision	2 h	5 skadade	Lastbil med polyeten	
1994	Gotthard L=16321 m	Goeschenen Schweiz	1 lastbil med trailer lastad med cyklar packade i kartonger och plast	friktion i däck	2 h	inga	1 lastbil plus släp	allvarlig skada i tak, utrustning skadad 50 m, tunnel stängd i 2,5 dagar
1994	Huguenot L=4000 m	Sydafrika			1 h	1 död 28 skadade	buss	
1995	Pfänder L=6719 m	Österrike	1 lastbil, 1 minibuss och 1 personbil	kollision	1 h	3 döda vid kollision	1 lastbil 1 mini-buss 1 person-bil	allvarlig skada i tak och utrustning, tunnel stängd 2,5 dagar
1996	Isola delle Femmine L=150 m	Sicilien Italien	1 tankbil med gasvätska och minibuss	halt väglag, kollision	okänd	5 döda i brand 20 skadade	1 tankbil 1 buss 18 personbilar	beklädnad skadad och belysning

År	Tunnel	Plats och land	Fordon vid brandens ursprung	Förmodad brandorsak	Rapporterad varaktighet	Människor	Fordon	Tunnlar
1996	Eurotunnel L=50 000 m	England-Frankrike	1 långtradare	Misstankar om anlagd brand	2 h 30 min	30 rökskadade	10 lastbilar	Allvarlig skada på tunneltak
1996	Ekebergs-tunnel L=	Norge	1 buss	Motorfel	1 h	Inga skadade	1 buss	Lokala skador
1997	St:Gothard L=16321 m	Schweiz	1 långtradare lastad med personbilar	Brand i motor	1 h 20 min	Inga skadade	1 lastbil	Allvarlig skada 100 m och rökfylld tunnel 1000 m
1999	Mont Blanc L=11 600 m	Frankrike-Italien	Brand startar i en lastbil	Orsak ej känd	50 h	39 döda	23 lastbilar 1 mindre lastbil 9 personbilar 1 motorcykel	Allvarlig skada 900 m, tunneln avstängd under flera år
1999	Tauern L=6400 m	Österrike	Seriekrock på grund av underhållsarbete	Brand på grund av läckande färger och lacker	15 h	12 döda	16 lastbilar 24 personbilar	
2000	Seljstads-tunnel L=1279 m	Norge	Seriekrock		1- 2 h	4 rökskadade	1 dragbil 5 personbilar	
2001	St. Gotthard L=16322	Schweiz	Kollision mellan två långtradare	Brand uppstod på grund av kollisionen	4 h	11 döda	13 lastbilar 10 personbilar	

Dessa olyckor har medfört en stor risk för de människor som har befunnit sig inne i tunneln och för de som har bekämpat branden (risk för ras). Bränderna har producerat stora mängder rök, värme, giftiga gaser och en kraftig reducering av siktförhållandena. Människor som har befunnit sig inne i tunneln har drabbats av kvävning, förgiftning, brännskador eller i värsta fall omkommit. I vissa av dessa olyckor har det inte klagjorts om människor har dött på grund av själva olyckan eller i branden. Bränderna har i många fall förorsakat stora skador på utrustning inne i tunneln (belysning, ventilation, kommunikationsledning, elkablar). De har också skadat den bärande tunnelkonstruktionen. Det har mest varit spjälkskador, överhettning av armeringsjärn samt kollaps av undertak eller ventilationssystem. Bränderna har lett till stora skador på de inblandade fordonen (oftast utbrända) och deras gods. Tunnlarna har oftast tvingats stänga en kortare tid efter branden, och i några fall flera månader eller år.

I omkring 50 % av fallen i tabell 3 har 1-2 tunga fordon (långtradare, tankbil) varit inblandat i olyckorna. I omkring 20 % av fallen har över 10 stora fordon (lastbilar) förbrukats i branden. Antalet fordon varierar kraftigt, allt från 1 fordon till 127 fordon (inklusive personbilar). Det här visar att tunga fordon som långtradare är involverade i de flesta stora olyckorna, vilket inte är någon tillfällighet eftersom de utgör en stor andel av brandbelastningen. I samtliga fall där människor har omkommit har tunga fordon (lastbilar, tankbil) varit involverade och i minst ett fall en buss.

Brandeffekten i de olyckor som presenteras i tabell 3 varierade mellan 10 MW och 400 MW. I de flesta av fallen har bränderna inte bedömts vara större än 20 - 30 MW och i några fall har bränderna uppskattas till 50 - 100 MW. I tabell 4, finns en mer detaljerad information angående brandvaraktighet och högsta brandeffekt i några av dessa stora olyckor i vägtunnlar som anges i tabell 3. Tabell 4 visar att den högsta brandeffekten kan ha varierat mellan 300 – 400 MW i åtminstone tre av dessa bränder och brandvaraktigheten varierade från fåtal timmar upp till över 13 timmar.

Högsta taktemperaturen vid brandhärden i de olyckor som anges i tabell 3 kan förväntas ligga runt 900 - 1300 °C. I EUREKA 499 uppmättes taktemperaturer för vägfordon mellan 220 – 970 °C [14]. I försök med bensenbränder i tunnlar har man mätt

temperaturer upp till 1360 °C. I Runehamarförsöken med lufthastighet på 2 – 3 m/s uppmättes maximala taktemperaturer mellan 1280 - 1365 °C [2] vid en brandeffekt mellan 100– 200 MW. Bränslet bestod av trä och plastmaterial staplat på en långtradarställning som skulle motsvara en långtradarare.

I över 50 % av fallen angivna i tabell 3 var brandvaraktigheten lika med eller längre än 2 timmar. Brandvaraktigheten kunde variera allt från 24 min till 4 dagar. I omkring 25 % av fallen var brandvaraktigheten mellan 2 och 4 timmar. Brandens intensitet varierade dock kraftigt under denna period. Räddningstjänstens påverkan på brandvaraktigheten är svårbedömd.

På senare år har ett antal större brandkatastrofer i vägtunnlar inträffat. Detta gäller först och främst bränderna i Mont Blanc-tunneln, Tauertunneln i Österrike och S:t Gotthardtunnel i Schweiz. I tabell 4 ges en uppskattning av de brandeffekter som kan ha utvecklats i några av de katastrofbränder som har inträffat i vägtunnlar sedan 1996 [13]. I tabellen redovisas även en uppskattning på den total energi som utvecklades i de fordon som blev involverade i bränderna. Brandvaraktigheten är svår att uppskatta i denna typ av bränder men en uppskattning som bygger på integrering av den totala energin och högsta möjliga brandeffekt redovisas i tabellen. Den kan skilja sig ifrån den rapporterade brandvaraktigheten när räddningstjänsten bedömde att situationen var under kontroll.

Tabell 4 En uppskattning av brandeffekt, energi och varaktighet från ett antal katastrofbränder som har inträffat i vägtunnlar sedan 1996 [13, 5].

Olycka, år	Antal fordon och fordonstyp	Tvär-snittsarea på tunnel (m ²)	Uppskattad total energi, Q _{tot} (GJ)	Uppskattad högsta brandeffekt \dot{Q}_{max} (MW)	Uppskattad tid till högst brand effekt	Uppskattad brandvaraktighet (glödbrand ej inkluderat)	Antal omkomna
Kanaltunnel, 1996	10 långtradarare	45	2200	370	1 h	2.5 h (släckt)	0
Mont Blanc, 1999	15 långtradar, 9 mindre fordon *	50	5000 - 7000	300 – 380	2 – 3 h	9 – 13 h (franska sidan) (rapport :50 h totalt)	39
Tauern, 1999	16 långtradar, 24 mindre fordon	45	4000 – 4500	300 – 400	2 – 3 h	7 – 10 h (rapport: 15 h)	12
S:t Gotthard, 2001	13 långtradar 10 mindre fordon	41	-	>100	-	4 h	11

Obs: De uppskattningar som anges i tabellen bygger på begränsad information från de enskilda olyckorna och bör därför inte betraktas som exakta. De ger en uppfattning om storleksordning. De behöver uppdateras allt eftersom ny och noggrannare information blir tillgänglig.

* berör endast fordonen på den franska sidan. Det fanns ytterligare 8 långtradarare på den italienska sidan som brann.

3.3 Genomförda fullskaleförsök

Förutom Runehamarförsöken [1, 2, 3, 4] som presenteras i kapitel 2 har ett antal fullskaleförsök genomförts tidigare där brandeffekter har uppmätts från brinnande fordon, både inne i en tunnel och utanför. Den mest omfattande försöksserien genomfördes i en övergiven transporttunnel i Norge [14]. Försöken, som har fått benämningen EUREKA EU499, genomfördes 1990 - 1992. Både personbilar och långtradarare (HGV) användes i försöken. Tunneln var 2,3 km lång, öppen i ena ändan och med ett schakt i borta ändan.

Tunneltvärnsnittet varierade längs tunneln men var i medel 5-7 m bred och ungefär 5-6 m hög. Andra viktiga försök är försöken i 2nd Benelux-tunneln i Holland 2002 [15]. Tunneln var 840 m lång med ett tunneltvärnsnitt på 50 m². Både personbilar och lastbilar med träpallar användes i försöken. I Tabell 5 finns en sammanställning av uppmätta brandeffekter ifrån olika fullskaleförsök genomförda i vägtunnlar.

Tabell 5 Sammanställning av fullskaleförsök med fordon i och utanför tunnlar [5].

Typ av fordon, försök, test nr, u=längsventilation m/s	Total energi, Q_{tot} (GJ)	Max brandeffekt \dot{Q}_{max} (MW)	Tid till \dot{Q}_{max} , (t_{max}) (min)	Rapport
Personbilar				
Tre försök med personbilar tillverkade i slutet av 1970-talet	4	1,5, 1,8 och 2	12, 10 och 14	Mangs och Keski-Rahkonen [16]
Renault Espace J11-II tillverkad 1988, EUREKA 499, u= 0,4 m/s	7	6	8	Steinert [17]
Citroën BX, 1986	5	4,3	15	Shipp och Spearpoint [18]
Austin Maestro, 1982	ET	8,5	16	Shipp och Spearpoint [18]
Opel Kadett 1990 ; Second Benelux-försöken, försök 6 och 7, u = 0 och 6 m/s	ET	4,8 och 4,7	11 och 38	Lemair m fl [15]
Försök med två bilar tillverkade på 80- och 90-talen (Renault 5 (R5), Renault 18 (R18), Se nedan b) vilka bilar som ingick i grupperna Small Cars (SC) och Large Cars (LC) i referensen.	2,1, 3,1, 4,1 och 6,7 R5, R18, SC och LC	3,5, 2,1, 4,1 och 8,3 R5, R18, SC och LC	10, 29, 26 och 25 R5, R18, SC och LC	Joyeux [19]
Försök med en bil (Trabant, Austin och Citroen)	3,1, 3,2 och 8	3,7, 1,7 och 4,6	11, 27, 17	Steinert [20]
Försök med två bilar tillverkade på 80- och 90-talen (Peugeot 305 (P), Renault (R5), Citroen BX (C), BMW (B), Se nedan c) vilka bilar som ingick i grupperna Small Cars (SC) och Large Cars (LC) i referensen.	8,5, 7,9, 8,4 och ET C+P, SC+LC, SC+LC, B+R5	1,7, 7,5, 8,3 och 10 C+P, SC+LC, SC+LC, B+R5	ET, 13, ET, ET C+P, SC+LC, SC+LC, B+R5	Joyeux [19]
Försök med två bilar (Polo+Trabant, Peugeot+Trabant, Citroen+Trabant, Jetta+Ascona)	5,4, 5,6, 7,7 och 10	5,6, 6,2, 7,1 och 8,4	29, 40, 20 och 55	Steinert [20]
Försök med tre bilar (Golf + Trabant+Fiesta)	ET	8,9	33	Steinert [20]
Buss				
En 25-35 år gammal 12 m lång skolbuss (Volvo) med 40 säten, EUREKA 499, u=0,3 m/s	41	29	8	Ingason m fl [21]
En buss i Shimizutunneln, u=3-4 m/s	ET	30 a)	7	Kunikane m fl [22]
Långtradare				
Långtradarlast med totalt 10,9 ton, trä- 82% och plastpallar 18%, Runehamar försöken, försök 1, u=3 m/s	240	203	18	Ingason och Lönnemark [1]
Långtradarlast med totalt 6,8 ton, träpallar 82% och PUR-madrasser 18%, Runehamar försöken, försök 2, u=3 m/s	129	158	14	Ingason och Lönnemark [1]
En Leyland DAF 310ATi – långtradare med 2 ton möbler, EUREKA 499, u= 3-6 m/s	87	128	18	Grant och Drysdale [23]
Långtradarlast med totalt 8,5 ton möbler, tillbehör och gummidäck, Runehamar försöken, försök 3, u=3 m/s	152	125	10	Ingason och Lönnemark [1]
Långtradarlast med totalt 2,8 ton, wellpappkartonger 81% med plastmuggar 19%, Runehamar försöken, försök 4, u=3 m/s	67	70,5	8	Ingason och Lönnemark [1]
Långtradarlast med 72 träpallar, Second Benelux-försöken, försök 14, u=1-2 m/s	19	26	12	Lemair m fl [15]
Långtradarlast med 36 träpallar, Second Benelux-försöken, försök 8, 9 och 10, u=0, 4-6 m/s och 6 m/s	10	13, 19 och 16	16, 8 och 8	Lemair m fl [15]
Simulerad lastbilslast, EUREKA 499, u=0,7 m/s	65	17	15	Ingason m fl [21]

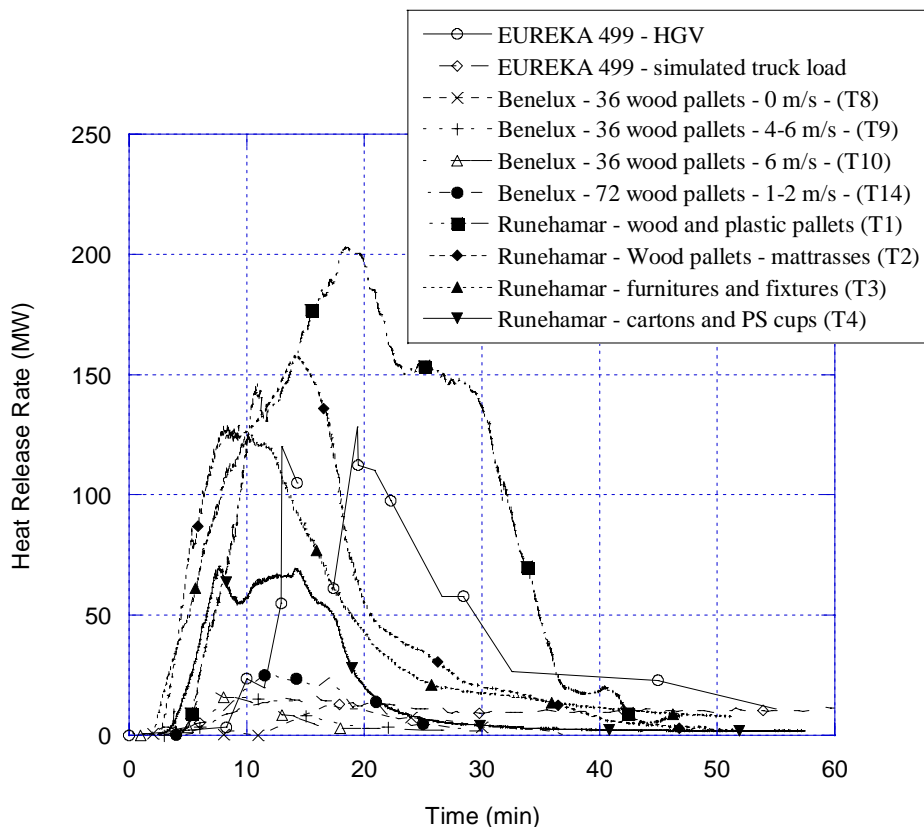
ET=Ej tillgänglig **a**) värde framräknat utifrån uppmätt konvektiv brandeffekt **b**) Small Car (SC) innehåller bilar så som Peugeot 106, Renault Twingo-Clio, Citroen Saxo, Ford Fiesta, Opel Corsa, Fiat Punto, WW Polo **c**) Large Car (LC) innehåller bilar så som Peugeot 406, Renault Laguna, Citroen Xantia, Ford Mondeo, Opel Vectra, Fiat Tempra, WW Passat

I tabell 6 ges en enklare sammanställning av de värden som anges i tabell 5. Det är en väldigt stor spridning i resultaten, speciellt för långtradare. Förklaringen till detta är den enorma variation som kan finnas i lasten på en långtradare. Även tiden till högsta uppmätta brandeffekt varierar kraftigt.

Tabell 6 Tid till det att maximum brandeffekt uppnås [5].

	Högsta brandeffekt (MW)	Tid till max brandeffekt (min)
1-3 Personbilar	1,5 - 10	8 – 55
Buss	29 - 30	7 - 8
Långtradare	13 - 203	8 - 18

I figur 8 visas alla uppmätta brandeffekter för långtradare som är angivna i tabell 5. Figuren ger en bra överblick över den variation som kan förekomma vid bränder i långtradare. Det är värt att notera att tillväxthastigheten blir relativt linjär när branden börjar växa. Det viktigaste när det gäller utrymningsproblematiken är inte bara hur stor branden blir utan också vilken tillväxthastighet den har. Varaktigheten för denna typ av bränder överstiger nästan aldrig en timme beroende på att försöken involverar enstaka fordon med begränsad mängd bränsle (gods). Tillväxthastigheten verkar väldigt beroende på ventilationshastigheten. Från tabell 7 så kan man uppskatta ökningen i tillväxthastigheten med faktor 3,5 och 5,5. I försök 9 är ökningen 5,5 och i försök 10 är den 3,5. När det gäller brandutvecklingen i långtradare så får man ta hänsyn till detta. I Runehamarförsöken genomfördes alla försöken vid samma lufthastighet; 3 m/s.



Figur 8 Uppmätta brandeffekter hos långtradare i olika fullskaleserier med långtradarlast [1, 14, 15].

Tabell 7 Linjär tillväxthastighet hämtad från Benelux- [15] och Runehamarförsöken [1].

Försök	Längs- ventilationsh astighet (m/s)	Intervall för bestämning av linjär tillväxthastighet (MW)	Linjär tillväxthastighet (MW/min)
Benelux – försök 8 – 36 träpallar	0	0 - 13	2,6
Benelux – försök 9 – 36 träpallar	4-6	3,5 - 19	14,4
Benelux – försök 10 – 36 träpallar	6	3,5 - 16	9
Benelux – försök 14 – 72 träpallar	1-2	5 - 26	3,6
Runehamar – försök 1 – 360 träpallar och 74 plastpallar (tot vikt 11 ton)	3	5 - 100	20,5
Runehamar – försök 2 – 216 träpallar och 240 PUR-madrasser (tot vikt 7 ton)	3	5 - 100	29
Runehamar – försök 3 – möbler, tillbehör och däck (8,5 ton)	3	5 - 100	17
Runehamar – försök 4 – 600 pappkartonger med totalt 18000 PS-muggar (2,8 ton)	3	5 - 70	17,7

3.4 Uppmätta gastemperaturer i taket

I EUREKA försöken [14] uppmättes gastemperaturer mellan 200 °C – 970 °C i taket ovanför de vägfordon som användes i försöken. De lägsta temperaturerna uppnåddes i försök med personbilar och de högsta i försöket med en långtradare (HGV). Lufthastigheten varierade mellan 0,3 m/s till 6 m/s i dessa försök. I Runehamarförsöken var de högsta taktemperaturerna ovanför branden betydligt högre än de som uppmättes i EUREKA försöken, eller 1280 °C – 1360 °C [2].

En genomgång av litteraturen visar att det inte finns några korrelationer mellan uppmätt gastemperatur (°C) i tunneltaket och brandeffekt (MW). Därför finns det behov av att utveckla ett sådant samband. I följande visas hur ett sådant samband skulle kunna se ut. Det enklaste sättet är att försöka korrelera taktemperaturen genom att förutsätta att det finns ett samband mellan totala energin som utvecklas i branden och lokala temperaturstegringen i luftmassan i plymen.

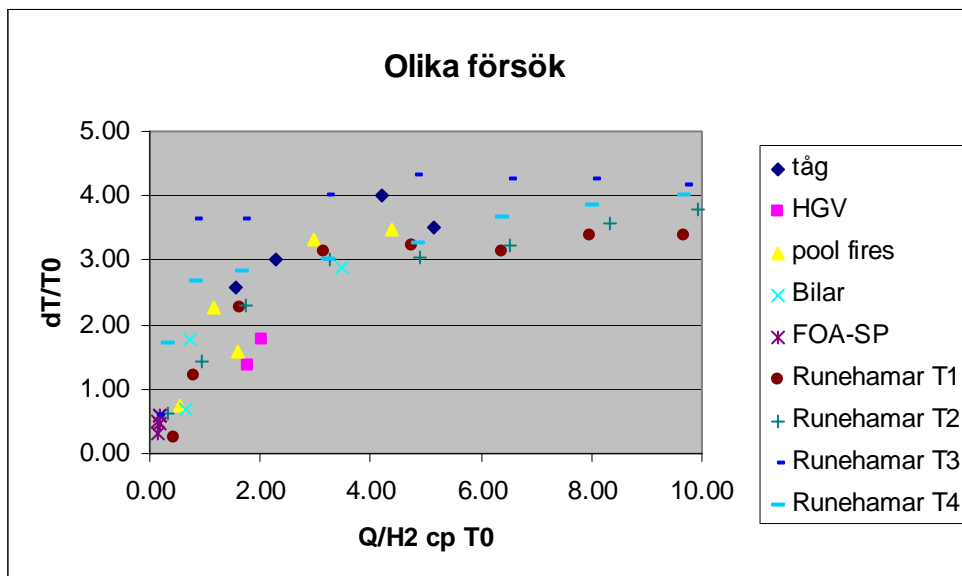
$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T_{\max} \quad (1)$$

där \dot{m} är luftmassan i plymen uppe vid taket, c_p är luftens värmekapacitet i kJ/kg/K och ΔT_{\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 ΔT_{\max} blir bestämmande:

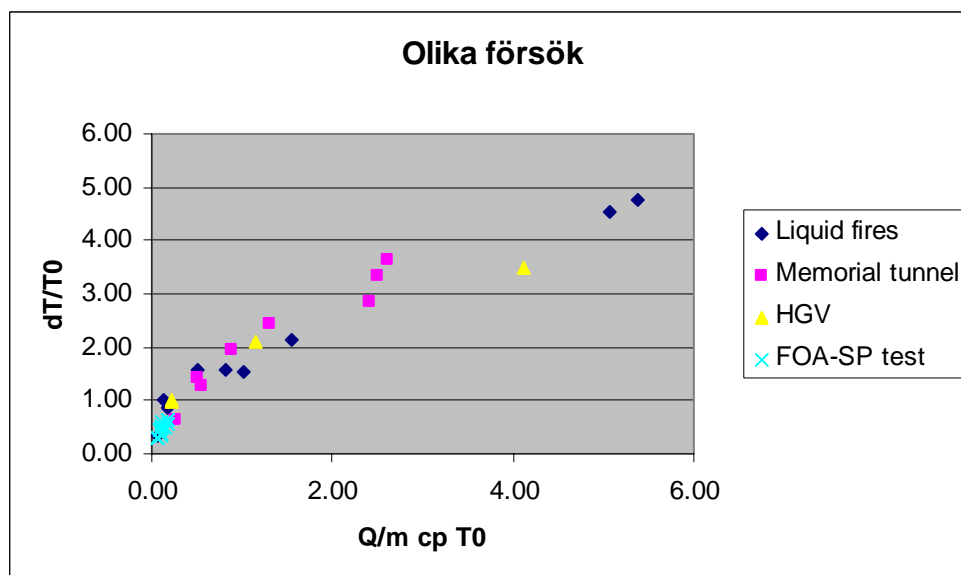
$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_0} = k \frac{\dot{Q}}{H^2 c_p T_0} \quad (2)$$

Koefficienten k bestäms av experimental data och har enheten $\text{m}^2 \text{s/kg}$. Resultaten från ett antal fullskaleförsök med tåg, bilar, vätskebränder och småskaleförsök har plottas i figur 9.



Figur 9 Högsta taktemperaturhöjning ΔT_{\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.

Runehamar försöken [2] har också plottas enligt samma ekvation och resultaten visas i figur 9. Även om luftflödet var högt i Runehamarförsöken, 2 - 3 m/s, så ligger temperaturerna på ungefär samma nivå som i fallet utan ventilation. Anledningen är den att i Runehamar försöken 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 10.



Figur 10 Högsta taktemperaturhöjning ΔT_{\max} i samband med brandförsök 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 $m = \eta \rho u A$ där η är flödeskoefficient satt till 0,817, ρ (kg/m^3) är densitet, u är längsventilation (m/s) och A är tvärsnittsarea (m^2). Om man plottar resultaten från Runehamarförsöken i samma diagram som i figur 10 så överensstämmer inte resultaten med övriga data. De försök som redovisas i figur 10 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.

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 utrymnings- och insatssäkerheten och brandgastemperaturen används för att bestämma konstruktionens bärförmåga.

4.1 Tidigare brandscenarier

Det finns i dag många olika rekommendationer när det gäller dimensionerande brandeffekt i vägtunnlar. I tabell 3.7 redovisas dimensionerande brandeffekter för PIARC [24], de franska reglerna [25] och NFPA reglerna i USA [26]. Värdena anges i MW, vilket betyder den högsta brandeffekten som de tekniska systemen ska klara av. I de flesta fall utgår man ifrån brand i enskilda fordon och inte en blandning av flera.

Tabell 8 Dimensionerande brandeffekt enligt olika regelverk.

Typ av fordon	PIARC [24]	Franska regler [25]	NFPA [26]
1 liten personbil	2,5	2,5	-
1 stor personbil	5	5	5
2-3 personbilar	8	8	-
Skåpbil (van)	15	15	-
Buss	20	20	20
Långtradare	20-30	30	20-30
Tankbil	100	200	100

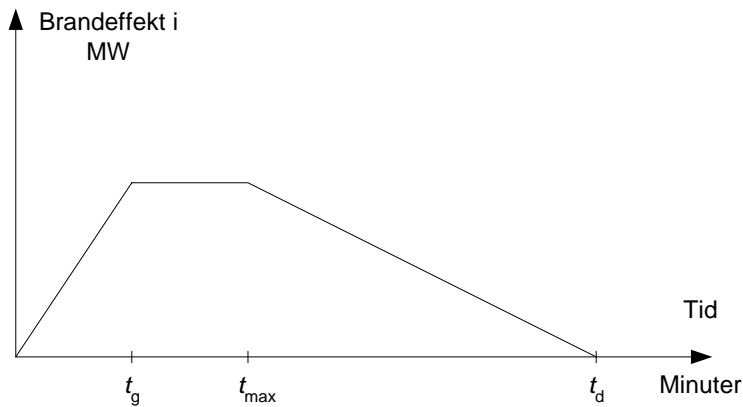
I tabell 9 ges ett franskt förslag till dimensionerande bränder för ventilationssystemet. I samma tabell finns även dimensionerande ventilationsflöden och kritisk lufthastighet [25]. Det är tydligt att dessa värden inte alltid överensstämmer med de värden som är uppmätta ifrån försök. Detta gäller speciellt långtradare. Högsta dimensionerande värde är 30 MW medan åtminstone 5 fullskaliga försök med långtradarlast visar brandeffekter över 70 MW.

Tabell 9 Franskt förslag till dimensionerande bränder för ventilationssystemet och kritisk lufthastighet.

Tunnel och trafiksituation	Typ av fordon	Dimensionerande brand (MW)	Dimensionerande ventilationsflöde (m ³ /s)	Dimensionerande kritisk lufthastighet (m/s)
takhöjd $\leq 2,7$ m	2-3 personbilar	8	30	2
$2,7$ m < takhöjd $\leq 3,5$ m	1 skåpbil	15	50	2.5
takhöjd > 3,5 m - inget farligt gods	1 långtradare	30	80	3
takhöjd > 3,5 m - farligt gods	1 tankbil	200	300	4

Om man ska göra avancerade beräkningar (CFD) så kan man använda följande brandeffektkurvor enligt ett franskt förslag [25], se figur 11:

- linjär ökning från 0 till maxvärde enligt tabell 10 under tiden t_g ,
 - konstant värde under tiden t_{max} (tiden där t_g slutar och fram till t_{max})
 - linjärt avtagande från max till 0 under tiden t_d (se figur 11)
- där t_g , t_{max} och t_d anges enligt tabell 10 [25].

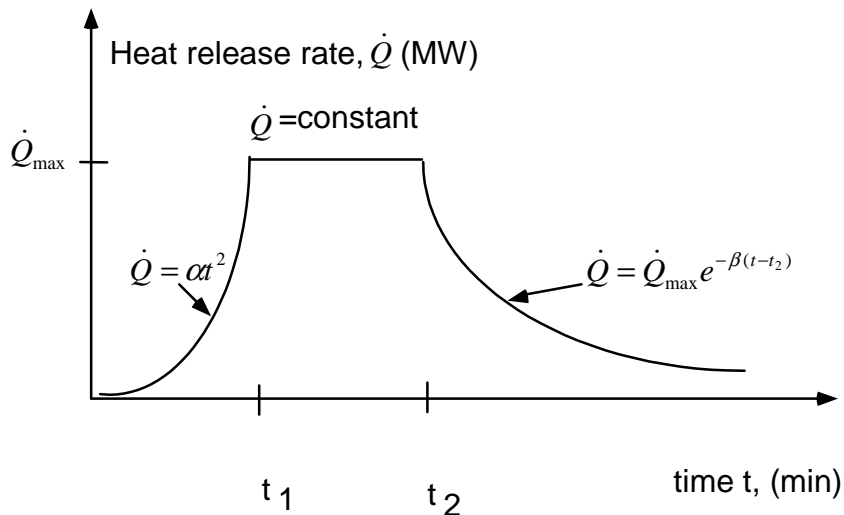


Figur 11 Franskt förslag angående dimensionerande brandeffektkurva för vägtnunnlar [25].

Tabell 10 Brandeffektkurva för CFD beräkningar enligt Franskt förslag [25].

Tunnel och trafiksituation	t_g (min)	t_{max} (min)	t_d (min)	frigjord energi (GJ)
takhöjd $\leq 2,7$ m	5	20	20	15
$2,7$ m < takhöjd $\leq 3,5$ m	5	30	20	40
takhöjd > 3,5 m - inget farligt gods	10	60	30	150
takhöjd > 3,5 m - farligt gods	10	60	30	1000

Ingason [27] har beskrivit dimensionerande bränder lite annorlunda än vad som anges i Tabell 10. Brandeffekten ökar som funktion av tiden i kvadrat multiplicerad med en fordonsberoende konstant. I figur 12 och 13 visas hur den dimensionerande kurvan ser ut.



Figur 12 Dimensionerande brandeffektkurva enligt förslag från Ingason [27].

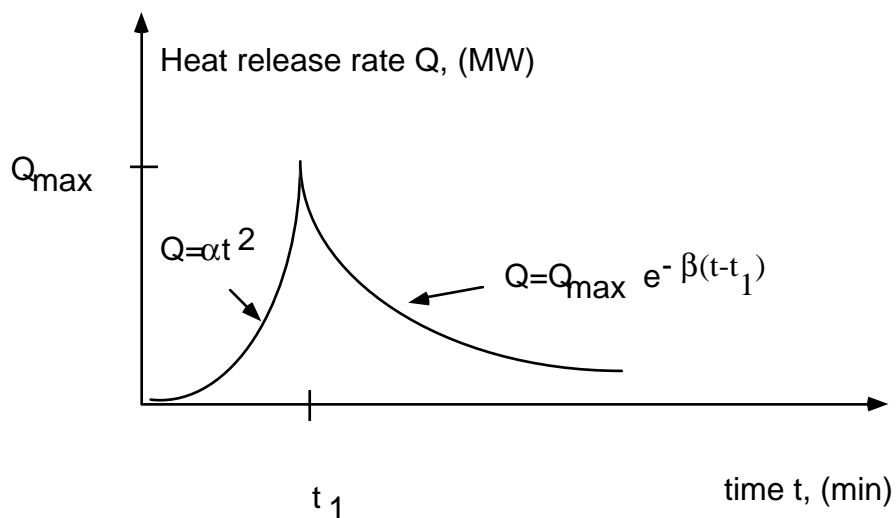
När det gäller brandtillväxten så råder det fortfarande osäkerhet eftersom försöksunderlaget är begränsat. Brandtillväxthastigheten för fordon kan hämtas från Tabell 11. Brandeffekten \dot{Q} ges som $\dot{Q} = \alpha t^2$ där α anger brandtillväxthastigheten och t är tiden i sekunder. Tillväxthastigheten antas vara $0,01 \text{ kW/s}^2$ för personbil och $0,1 \text{ kW/s}^2$ för buss. Tiden t_1 bestäms av ekv (3)

$$t_1 = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{\alpha}} \quad (3)$$

där \dot{Q}_{\max} och α bestäms från tabell 11 och t_2 bestäms av ekv (4).

$$t_2 = \frac{\chi E_{\text{tot}}}{\dot{Q}_{\max}} + \frac{2}{3}t_1 - \frac{1}{\beta} \quad (4)$$

där E_{tot} är den totala brandbelastningen i kJ och χ är förbränningseffektiviteten. Om t_2 är mindre än t_1 , ska dimensionerande brandeffektkurva följa den som visas i figur 13.



Figur 13 Dimensionerande brand om t_1 blir större än t_2 .

Tabell 11 Dimensionerande bränder i vägtnullar enligt Ingason [27].

Fordonstyp	\dot{Q}_{\max} (MW)	α (kW/s ²)	β (s ⁻¹)
Bil	4	0,01	0,001
Buss	30	0,1	0,0007
Lastbil*	15 - 130	-	-

* baseras på två försök i EUREKA projektet

Det har tillkommit mycket ny information sedan detta förslag togs fram 1995. Därför behöver dessa dimensionerande kurvor modifieras med hänsyn till den nya information som har tillkommit.

4.2 Nytt beräkningsätt

Nyligen har Ingason [28] publicerat ett nytt sätt att beskriva brandeffektkurvor. Hela brandförloppet beskrivs med en enda ekvation där inputparametrar består av 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:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1} \quad (5)$$

där \dot{Q}_{\max} är maximum brandeffekt (kW) och t är tiden i (s). Denna ekvation bygger på ekvation framtagen av Numajiri and Furukawa [29]. 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 (5), 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 :

$$r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n} \quad (6)$$

Om vi integrerar ekvation (5) från $t=0$ till $t=\infty$, så finner vi ett samband mellan totala energivärdet E_{tot} , högsta brandeffekten, \dot{Q}_{\max} , och parametrarna r och k :

$$E_{\text{tot}} = \frac{\dot{Q}_{\max} \cdot r}{k} \quad (7)$$

Det innebär att vi kan beräkna k som funktion av n om vi använder ekv. (6) och (7):

$$k = \frac{\dot{Q}_{\max}}{E_{\text{tot}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n} \quad (8)$$

Genom att derivera ekvation (5) så kan man bestämma tiden t_{\max} :

$$t_{\max} = \frac{\ln[n]}{k} \quad (9)$$

Med den information som erhålles med hjälp av ekvation 5-9 kan vi bestämma en brandeffektkurva för bränslekontrollerade bränder. De parametrar som är bestämmande här är E_{tot} , \dot{Q}_{\max} samt n . Parametern n har en stor inverkan på brandens initialfas (tiden fram till det att kurvan kraftigt stiger) och även, men dock i betydligt mindre grad, lutningen på brandtillväxten. Låga värden på n resulterar i en snabb initialfas och höga värden i relativt långsam initialfas. Det som påverkar brandtillväxthastigheten (lutningen på kurvan) mest är parametern k . I Runehamarförsöken, som genomfördes vid 2 – 3 m/s, varierade n mellan 4 och 8, där $n=8$ i försök T1, $n=6$ i försök T2, $n=4$ i försök T3 och $n=6$ i försök T4.

4.3 SRV studie kring räddningsinsatser i vägtunnlar

I en studie kring räddningsinsatser i vägtunnlar har SP Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Stockholms Brandförsvaret och BBm fireconsulting på uppdrag av Räddningsverket (SRV) tagit fram sju olika brandscenarier för vägtunnlar [5]. Målet med projektet var att beskriva den miljö som räddningspersonalen kan komma att möta vid en räddningsinsats i vägtunnlar. Trafikanterna antogs befinna sig i någon form av utrymningssituation vid räddningstjänstens ankomst. För att kunna göra denna analys antogs sju olika scenarier som ansågs vara representativa för majoriteten av de situationer som kunde tänkas uppstå i en vägtunnel. Syftet var framför allt att göra en

konsekvensanalys av tänkbara scenarier men utan inslag av sannolikheter för scenarierna. Brandeffektkurvorna antogs följa ekvation (5) där värdena för n , r respektive k som användes i studien återges i tabell 12 för de sju olika scenarierna. Brandeffektkurvorna presenteras i figur 14.

Tabell 12 Antagna värden för beräkning av de sju brandscenierna enligt ekvation (5) som användes för utrymningsberäkningar i SRV studien kring räddningsinsatser i vägtunnlar [5].

Brand-scenario nr	Typ av fordon	Max brand-effekt, \dot{Q}_{\max} (MW)	Tid till max brand-effekt (min)	Energi (GJ)	n	r	k x 10 ⁻³
1	2 personbilar	8	10	14,4	2,1	2,04	1,13
2	Buss	25	12	52,5	2,0	2,0	0,95
3	Lastbil och en buss	75	11	75	5	2,44	2,44
4	Långtradare med relativt låg fritt exponerad godsytta och bulkdensitet	100	12,8	150	3,2	2,28	1,52
5	Långtradare med relativt hög fritt exponerad godsytta och bulkdensitet	150	13	225	3,2	2,28	1,52
6	Upphinnande olycka (långtradare+buss +6 personbilar	175	15	367	2,6	2,17	1,04
7	Tankbil	200	8	1500	1,1	1,27	0,17

Enligt referens [5] antogs **brandsenario 1** representera en brand som uppstår på grund av en kollision mellan två personbilar. Ett litet bensinläckage på vägbanan antänds och branden sprids till den ena bilen. Slutligen involveras båda bilarna i branden och högsta brandeffekten antas bli 8 MW.

Brandsenario 2 antas representera en brand i en buss utan passagerare som börjar brinna på grund av t ex oljeläckage i motorutrymmet. Brandförloppet är relativt snabbt i början men avstannar på 25 MW då den börjar långsamt avtar.

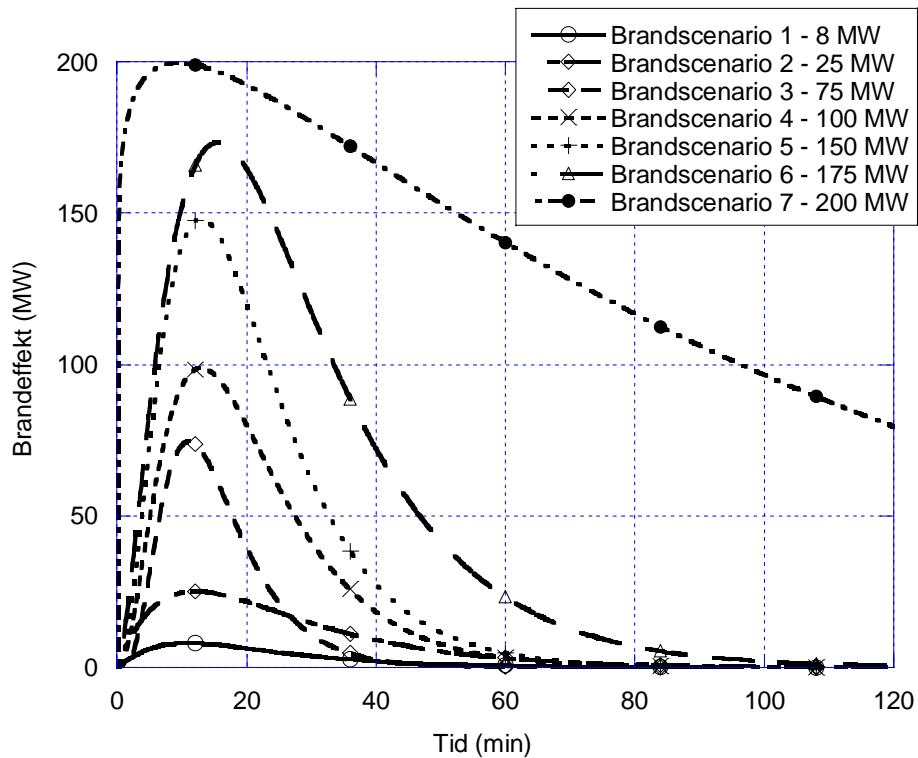
Brandsenario 3 antas representera en kollision mellan en buss som är utan passagerare och en mindre lastbil som är lastad med flyttgods. Effektutvecklingen når maximalt 75 MW men förloppet är inledningsvis något långsammare jämfört med de tidigare två. Detta ska illustrera att det sker en brandspridning mellan fordonen.

Brandscenarier 4 och 5 antas representera brand i en långtradare med olika godstyper. Branden initieras på grund av plötsligt oljeläckage i motorutrymmet under färd och när långtradaren stannar så utvecklas branden snabbt i motorutrymmet och branden sprids från motorutrymmet till lasten ganska omgående. Brandutvecklingen från det att branden sprids till godset bygger på försöken i Runehamartunneln [1, 2]. Runehamarförsöken visar tydligt samband mellan högsta uppmätta brandeffekt (\dot{Q}_{\max}) och godsets fritt exponerade area (yta) och brandeffekt per godsytta (MW/m²). Godsets bulkdensitet har betydelse för brandens varaktighet. I tabell 11 finns två scenarier, brandsenario 4 och 5, där man gör en skillnad mellan ett gods med relativt låg exponerad godsytta och hög exponerad godsytta. Även bulkdensiteten ingår som en parameter för att variera varaktigheten och därmed energiinnehållet.

Brandsenario 6 representerar en brand som utvecklas på grund av kollision mellan personbil och långtradare. Branden sprids till en buss och 5 andra personbilar.

Brandutvecklingshastigheten blir ungefär den samma som i brandscenario 5 förutom att högsta effekten blir 175 MW.

Brandscenario 7 representerar en tankbil med bensin som välter och där bensinen som läcker ut antänds. Branden sprids inte till andra fordon.



Figur 14 De brandscenarier som användes i SRV studien kring räddningsinsatser i vägtunnlar [5].

Ingen hänsyn har tagits till det faktum att initialbrandens utveckling eller tändkällans storlek kan variera kraftigt. Bränderna kan starta på väldigt olika sätt och avsikten här är inte att studera initialförloppen. Det bör dock påpekas att initialbrandförloppet har stor betydelse för reaktionen hos de utrymmande trafikanterna och insatsmöjligheterna för räddningstjänsten.

4.4 Inverkan av lufthastighet på brandtillväxten

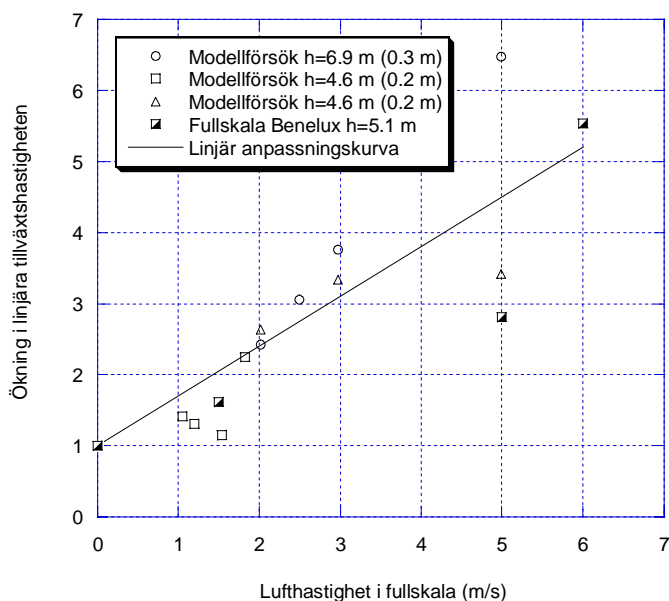
I SRV studien [5] diskuteras problematiken med inverkan av lufthastigheten på brandtillväxten. En av slutsatserna från studien är nämligen att lufthastigheten påverkar brandtillväxt och brandspridning och att brandtillväxtshastigheten är en mycket viktig parameter vid dimensionering av personsäkerhet i tunnlar. Försök har nämligen visat att brandtillväxtshastigheten i långtradare med kapell eller annat brännbart regn- och vindskydd ökar när lufthastigheten ökar i tunneln. Carvel m fl [30] har kvantifierat med hjälp av statistiska metoder i kombination med ett fåtal försök hur mycket denna ökning kan bli. Det har funnits ett stort behov av att verifiera deras resultat. Enligt deras resultat så skulle brandtillväxten i en långtradare öka fem gånger vid en lufthastighet på 3 m/s och tio gånger vid en lufthastighet på 10 m/s. Carvel m fl [30] har också gjort undersökningar av lufthastighetens inverkan på personbilar och vätskebränder. Analysen visade att

lufthastigheten inte nämnvärt påverkar brandeffekten hos personbilar och att den tenderar att minska den högsta brandeffekten vid vätskebränder.

I SRV rapporten [5] finns resultat från modellförsök som har genomförts vid SP i skala 1:23 presenterade och även data från nyligen genomförda fullskaleförsök i Benelux-tunneln [15]. Modellförsöken genomfördes med träribbstaplar (motsvarande en brandbelastning hos en långtradare) vid olika lufthastigheter och tunneltakhöjder. Bränderna, som i modellskalan bestod av träribbstaplar och i fullskaleförsöken bestod av träpallar, visar efter initialförloppet en tydlig tendens till linjär tillväxthastighet som varierar beroende på lufthastigheten. I modellförsöken användes två olika takhöjder 0,3 m och 0,2 m (motsvarar en takhöjd på 6,9 m respektive 4,6 m i fullskala) och flertalet lufthastigheter: 0,2; 0,25; 0,3; 0,42; 0,52; 0,62 och 1,04 m/s (motsvarar 1; 1,2; 1,4; 2; 2,5; 3 och 5 m/s i fullskala). I figur 15 visas ökningen i den linjära tillväxthastigheten (linjära tillväxthastigheten för varje lufthastighet är normerad mot linjära tillväxthastigheten utan ventilation) vid olika lufthastigheter i fullskala. Lufthastigheten för modellskalan har anpassats till fullskala. Den linjära anpassningskurvan som visas i figur 15 har följande form [5]:

$$\gamma = 1 + 0,7u \quad (10)$$

där γ ger ökningen som funktion av lufthastigheten i tunneln. Enligt figur 15 så är ökningen vid 3 m/s ungefär tre gånger tillväxthastigheten vid normal ventilation och vid 6 m/s ungefär fem gånger. Enligt ekvation (10) så är ökningen vid 10 m/s ungefär åtta gånger vilket är lite lägre jämfört med Carvel resultat (tio gånger). Ekvation (10) gäller endast upp till de provade lufthastigheterna, d v s 6 m/s och för laster som inte är vindskyddade. Det krävs också fler fullskaliga försök för att etablera ett mer tillförlitligt samband upp till 6 m/s.



Figur 11 Ökningen i den linjära tillväxthastigheten vid olika lufthastigheter (modell och fullskala) [5].

5 Diskussion

Runehamarförsöken bekräftar de farhågor vi har haft angående brandutvecklingen i långtradarlaster. Försöken visa att vi kan erhålla maxeffekter mellan 70 MW – 200 MW i gods som normalt inte klassas som farligt gods. Dessutom finns det långtradarare som är betydligt längre än den långtradaratrapp som användes i Runehamarförsöken. Brandbelastningen varierade mellan 67 GJ – 240 GJ, vilket är en normal brandbelastning för denna typ av transport. Därför finns det anledning att se över de dimensioneringsvärden som används för vägtunnlar idag. Långtradararnas betydelse för brandsäkerheten i vägtunnlar har därmed fått ny fokus.

I den studie som presenterades av Räddningsverket [5] för räddningsinsatser i vägtunnlar diskuteras detta problem utförligt. Inom projektet har bränder av olika storlekar studerats, inte bara sådana som kan få katastrofala följder, utan allt från den lilla branden med ett par personbilar (8 MW) till brand i en tankbil (200 MW). Utseendet på de brandscenarier som innehåller en långtradarare, bygger till stor del på resultaten från brandförsöken som genomfördes i Runehamartunneln 2003 [1,2]. Brandscenarierna är inte bara definierade som maxeffekt utan av en brandeffektkurva som beror av tiden. Anledningen till detta är att tillväxthastigheten är mycket viktig för förutsättningarna vid en utrymning och resultatet vid en räddningsinsats.

En av slutsatserna från SRV-projektet [5] är att det uppstår problem med att utrymma nedströms en olycka i en vägtunnel som är 50 m² – 90 m² vid en brand som utvecklar sig snabbt upp till 75 MW - 100 MW. Däremot klarar vi utan större problem utrymnings- och räddningsinsatserna för mindre bränder än så. Den relativt höga brandpåverkan som har påvisats var kritisk i projektet förutsätter att personerna snabbt påbörjar sin utrymning. Det har också konstaterats att lufthastigheten ökar brandtillväxthastigheten och att brandtillväxthastigheten är en mycket viktig parameter vid dimensionering av personsäkerhet i tunnlar. Därför bör dagens tekniska föreskrifter ta hänsyn till detta, inte bara dimensionerande maxeffekt. Resultaten visar också att ett större tunneltvärsnitt innebär gynnsammare förhållanden men skillnaden var mindre än vad som först antagits och att låg lufthastighet leder till långsammare brandförlopp vilket i sin tur leder till gynnsammare konsekvens vid utrymningen [5].

Enligt SRV studien så är svårigheterna vid en räddningsinsats genom röken (nedströms en olycka) så stora för de största bränderna (75 MW – 200 MW) att en insats genom röken i praktiken nog är omöjlig. I dessa situationer bör insatsen inriktas på att angripa branden från andra sidan d v s med vinden i ryggen (2,5 m/s - 3 m/s). Värmestrålningen från branden kommer dock sannolikt att göra det mycket svårt att komma tillräckligt nära för att genomföra en effektiv släckinsats och det skulle behöva utvecklas metoder för att skydda brandpersonalen mot värmestrålningen.

Det finns anledning att föreslå nya dimensionerande brandeffektkurvor som tar hänsyn till brandtillväxthastigheten och de höga maxbrandeffekter som uppmättes i Runehamarförsöken. I avsnitt 6 föreslås tre olika brandscenarier, där var och en beror på vilken typ av trafik som kan förväntas trafikera tunneln.

De höga gastemperaturerna som uppmättes i Runehamarförsöken (1280 °C - 1360 °C) har väckt stor förundran och har skapat en ny debatt kring vilka temperatur-tid-kurvor som ska användas vid dimensionering av vägtunnlar. Ska man ha en RWS kurva, en HC kurva, eller en ISO kruva? Det finns all anledning att se över det sätt man använder dessa kurvor idag. En mer ingenjörsmässig metod vore att beräkna temperaturpåverkan på takkonstruktionen med hjälp av ekvation (1) och (2). Ett samband mellan taktemperaturen som funktion av tiden och brandeffektutveckling, takhöjd och lufthastighet är nödvändigt

för att kunna utveckla ett funktionsbaserad dimensioneringsförfarande. 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. Här behövs systematiska försök i modellskala där man undersöker betydelsen av dessa parametrar på taktemperaturerna.

6 Förslag till dimensionerande brandscenarier

Nedan ges förslag till tre olika brandscenarier som kan användas vid funktionsbaserad dimensionering av utrymningssäkerhet i vägtunnlar. Förslaget omfattar inte transport av farligt gods och förutsätter begränsad brandspridning mellan fordonen:

- i) I tunnlar med enbart persontrafik, d v s endast personbilar, skåpbilar och bussar (ej långträdare), föreslås $\dot{Q}_{\max} = 50$ MW. Dimensionerande brandbelastning föreslås vara $E_{\text{tot}} = 75$ GJ. $\dot{Q}(t)$ beräknas enligt ekvation (5) där ett lämpligt värde på n används.
- ii) I tunnlar med både persontrafik och långtradartrafik med låg sannolikhet för köbildning föreslås $\dot{Q}_{\max} = 100$ MW. Dimensionerande brandbelastning föreslås vara $E_{\text{tot}} = 150$ GJ. $\dot{Q}(t)$ beräknas enligt ekvation (5) där ett lämpligt värde på n används.
- iii) I tunnlar med både persontrafik och långtradartrafik men med hög sannolikhet för köbildning föreslås $\dot{Q}_{\max} = 150$ MW. Dimensionerande brandbelastning föreslås vara $E_{\text{tot}} = 250$ GJ. $\dot{Q}(t)$ beräknas enligt ekvation (5) där ett lämpligt värde på n används.

Valet på n kommer i huvudsak att påverka brandkurvans initialfas d v s tiden fram till det att kurvan kraftigt stiger.

En lämplig metod att beräkna temperaturpåverkan på takkonstruktionen är med hjälp av ekvation (1) och (2) förutsatt att man gör en regressionsanalys av den data som finns från fullskaliga försök med fordon. Det krävs dock mer förståelse och analys med hjälp av modellförsök innan ett sådant förslag kan läggas fram. Inverkan av ventilationen, bränslehöjden, tvärsnittsarean och takhöjden behöver analyseras i en sådan studie.

7 Referenser

- 1 Ingason, H. och Lönnemark, 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, Sweden, 2003.
- 2 Lönnemark, 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 Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnemark, A., Frantzich, H. och Hasselrot, K., Räddningsinsats i vägtunnlar, FoU rapport SRV 2005.
- 6 Ingason, H., Bengtson, S., och Hiort, F., Brand och brandskydd i undermarksanläggningar, Litteraturstudie, SP rapport 1997:41.
- 7 Haack, A och Meyeroltmanns, W, Fire Risk, PIARC, World Road Association, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Second Draft - October 1996.
- 8 Satoh, K och Miyazaki, S, "A Numerical Study of Large Fires in Tunnels", Report of Fire Research Institute of Japan, No. 68(1989).
- 9 Gunther, "10 Jahre Brandschutz im Hamburger Elbtunnel", Brandschutz 7, 1985.
- 10 CETU, kommentarer till Ringen projektet, Juni 1996.
- 11 Thamm, B., The New EU Directive on road tunnel Safety, Proceedings of the International Seminar on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Sweden, 20-21 November 2003, SP Report 2004:05.
- 12 Ingason, H., "Förstudie avseende allmän teknisk beskrivning för brandsäkerhet i tunnlar", Uppdrag åt Vägverket 1997-06-26.
- 13 Ingason, H., "Fire Spread in Catastrophic Tunnel Fires", Proceedings of the International Seminar on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Sweden, 20-21 November 2003, SP Report 2004:05.
- 14 EUREKA 499, Fires in Transport Tunnels: Report on Full-Scale Test. EUREKA-Project EU499:FIRETUN Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. D-40213 Dusseldorf 1995.
- 15 Lemair, A., Van De Leur, P.H.E. och Kenyon, Y.M., Safety Proef: TNO Metingen Beneluxtunnel Meetrapport, TNO-Rapport, 2002-CVB-R05572.
- 16 Mangs, J. och Keski-Rahkonen, O. "Characterization of the Fire Behavior of a Burning Passenger Car", Fire Safety Journal, Vol. 23, 37-49, 1994.
- 17 Steinert, C., "Smoke and Heat Production in Tunnel Fires", p 123-137, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, held on October 10-11th, 1994 at the Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås, Sweden.
- 18 Shipp, M. och Spearpoint, M., "Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles", Fire and Materials, Vol. 19, p.143-151, 1995.

-
19. Joyeux, D., "Natural Fires in Closed Car Parks", Car fire tests, INC-96/294d-DJ/NB, 1997.
 20. Steinert, C., "Experimentelle Untersuchungen zum Abbrand-und Feuerubersprungsverhalten von Personenkraftwagen", vfdb-Zeitschrift, Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 4/2000, pp 163-172.
 21. Ingason, H., Gustavsson, S. och Dahlberg, M., "Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires", SP Report 1994:08, Swedish National Testing and Research Institute.
 22. Kunikane, Y., Kawabata, N., Ishikawa, T., Takekuni, K. och Shimoda, A., "Thermal fumes and smoke induced by bus fire accident in large cross sectional tunnel", The Fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference Nov., 17-21, 2002, Nagoya, Japan.
 23. Grant, G.B. och Drysdale, D.D., "Estimating Heat Release Rates from Large-scale Tunnel Fires", Fire Safety Science, Proceedings of the Fifth International Symposium, pp. 1213-1224.
 24. PIARC, "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", 05.05 B-1999.
 25. Lacroix, D., "New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels", 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, 6-8 October 1997.
 26. NFPA Standard 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges and other limited Access Highways 2001 edition
 27. Ingason, H., "Design Fires in Tunnels", Conference Proceedings of Asiaflam 95, Hong Kong 15th - 16th of March 1995, Interscience Communications Limited.
 28. Ingason, H., "Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF)", International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 31-47, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003.
 29. 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).
 30. Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W. och Drysdale, D. D., "Variation of Heat Release Rate With Forced Longitudinal Ventilation for Vehicle Fires in Tunnels", *Fire Safety Journal*, **36**, 6, 569-596, 2001.