LUND UNIVERSITY

Räddningsinsatser i vägtunnlar

Ingason, Haukur; Bergqvist, Anders; Lönnermark, Anders; Frantzich, Håkan; Hasselrot, Kjell

2005

Link to publication

Citation for published version (APA):
Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnermark, A., Frantzich, H., & Hasselrot, K. (2005). *Räddningsinsatser i vägtunnlar*. Räddningsverket.

Total number of authors:
5

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Räddningsinsatser i vägtunnlar

RÄDDNINGS
VERKET

Denna rapport ingår i Räddningsverkets serie av forsknings- och utvecklingsrapporter.
I serien ingår rapporter skrivna av såväl externa författare som av verkets anställda.
Rapporterna kan vara kunskapssammanställningar, idéskrifter eller av karaktären tillämpad forskning.
Rapporten redovisar inte alltid Räddningsverkets ståndpunkt i innehåll och förslag.

2005 Räddningsverket, Karlstad
Avdelningen för stöd till räddningsinsatser
ISBN 91-7253-256-4

Beställningsnummer P21-459/05
2005 års utgåva

Omslagsfoto: Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Räddningsinsatser i vägtunnlar

Haukur Ingason

Anders Bergqvist

Anders Lönnermark

Håkan Frantzich

Kjell Hasselrot

Räddningsverkets kontaktperson:

Sören Lundström, Enheten för utveckling av räddningsinsatser
Telefon 054-13 53 36

Förord

Räddningsverket har finansierat ett projekt med syfte att studera insatsproblematiken vid brandolyckor i tunnlar. Målet med projektet har varit att det skall ge räddningstjänsten underlag för planering och bedömning av räddningsinsatser i befintliga tunnlar. Resultatet från projektet skall kunna användas av kommuner (räddningstjänst), myndigheter (Räddningsverket, Boverket, Vägverket och Banverket) och ingenjörer (konsulter inom brand och risk) för att bedöma riskerna med befintliga och planerade tunnlar utifrån ett brand- och räddninsinsatsperspektiv. I ett tidigare projekt som genomfördes på uppdrag av Räddningsverket har samma projektgrupp som genomfört det projekt som redovisas här gett förslag på insatskoncept för järnvägstunnlar. Projektet redovisas i en SRV rapport ”Räddningsinsatser vid tunnelbränder - Probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i spårtunnel” FoU rapport P21-391/01.

Projektgruppen består av Haukur Ingason, projektledare och Anders Lönnermark från SP Sveriges Provnings och Forskningsinstitut, Håkan Frantzich på Brandteknik vid Lunds tekniska högskola (LTH), Anders Bergqvist på Brandförsvaret i Stockholm samt Kjell Hasselrot på BBm fireconsulting. Samordnare ifrån Räddningsverket var Sören Lundström.

Projektet berör räddningstjänstens insatssituation vid olyckor i vägtunnlar där gruppen har fokuserat på att:

- utforska brandmiljön i olika vägtunnlar vid olika typer av bränder
- utrymningssituationen i vägtunnlar
- räddningstjänstens åtgärder vid räddningsinsatser vid bränder i vägtunnlar.

En referensgrupp har varit knuten till projektet. Den bestod av:

Bernt Freiholtz	Vägverket
Per Andersson	Vägverket (ers.)
Beatrice Lysholm Magnusson	Motormännens riksförbund
Lena Bergön	Räddningstjänsten Storgöteborg
Jeanette Stenman	Banverket
Katarina Kieksi	Banverket (f o m 2004)
Anders Wallin	Svenska brandförsvarsföreningen
Arne Brodin	Swepro Enginering
Anders Lejdeborn	Arbetsmiljöinspektionen
Bo Wahlström	Brandskyddslaget

Vi vill tacka för deras synpunkter och ett gott samarbete.

Innehållsförteckning

Förord **3**
Summary **7**
Sammanfattning **9**
Nomenklatur **12**

1 Inledning **14**
1.1 Bakgrund 14
1.2 Mål och syfte 15
1.3 Metod och avgränsningar 15
1.4 Dispositionsbeskrivning 16

2 Olika tunnel- och ventilationstyper **17**
2.1 Tunneltyper 17
2.2 Ventilationssystem 19

3 Brandscenarier **21**
3.1 Statistik och brandorsak 21
3.2 Inträffade bränder 24
3.3 Genomförda fullskaleförsök 25
3.4 Dimensionerande brandeffekt – genomgång av olika rekommendationer 29
3.5 Föreslagna brandscenarier för beräkning av utrymning och bedömning av räddningsinsats 31
3.6 Inverkan av vind på brandtillväxten 35

4 Utrymning vid bränder i vägtunnlar **38**
4.1 Introduktion 38
4.1.1 Beteende i samband med brand 38
4.1.2 Reaktionstid 39
4.1.3 Förflyttning i tunneln 40
4.2 Identifiering av utrymningsväg i tunnel 40
4.3 Analys av utrymning i vägtunnel 42
4.4 Beskrivning av utrymningsscenarierna 44
4.5 Förutsättningar för analysen 45
4.6 Resultat av känslighetsanalysen 48
4.6.1 Brandscenario 1 48
4.6.2 Brandscenario 2 48
4.6.3 Brandscenario 3 49
4.6.4 Brandscenario 4 50
4.6.5 Brandscenario 5 51
4.6.6 Brandscenario 6 och 7 53
4.6.7 Analys av stillastående bilist 53
4.7 Diskussion 55
4.7.1 Brandscenario 1 och 2 55
4.7.2 Brandscenario 3 och 4 55
4.7.3 Brandscenario 5, 6 och 7 56

4.7.4 Reaktionstid ... 56
4.7.5 Lufthastighet ... 56
4.7.6 Tunneltvärsnitt ... 57
4.7.7 Stillastående bilist ... 57
4.7.8 Validitet och reliabilitet ... 58

5 Räddningsinsats vid bränder i vägtunnlar ... 59
5.1 Inledning ... 59
5.2 Beskrivning av begreppet taktik för räddningsinsatser ... 60
5.3 Tunnlar och bränder i tunnlar utifrån räddningstjänstperspektivet 61
5.4 Räddningsinsatser vid bränder i tunnlar ... 62
5.4.1 Räddningstjänstens tillgängliga metoder för att hantera en räddningsinsats ... 63
5.4.2 Överblick över skadeplatsen ... 64
5.4.3 Styrning av luftflödet i tunneln ... 65
5.4.4 Stora och komplicerade objekt ... 66
5.4.5 Arbete i rökfyllda tunnlar ... 66
5.4.6 Brandsläckningskapacitet ... 68
5.4.7 Andra speciella moment som måste hanteras under räddningsinsatsen ... 71
5.5 Modell av rökdykarinsats ... 72
5.5.1 Modellstruktur ... 73
5.5.2 Rökdykares förflyttningshastighet ... 74
5.5.3 Rökdykning i varm miljö ... 76
5.5.4 Slanghantering ... 80
5.5.5 Känslighetsanalys ... 81
5.5.6 Insats uppströms branden ... 83

6 Beslutsstöd vid räddningsinsatser ... 85
6.1 Inledning ... 85
6.2 Räddningsinsats vid brand i dubbelrörstunnel ... 86
6.2.1 Brand i en buss (brandscenario 2 – 25 MW) ... 86
6.2.2 Brand i långtradare (brandscenario 4 – 100 MW) ... 92
6.2.3 Brand i långtradare (brandscenario 5 – 150 MW) ... 95
6.3 Räddningsinsats vid brand i enkelrörstunnel ... 98
6.3.1 Brand i buss ... 98
6.4 Alternativa angreppssätt för att förbättra möjligheterna till livräddning vid omfattande bränder ... 102

7 Diskussion ... 104
8 Slutsatser ... 109
9 Forskningsbehov ... 111
10 Referenser ... 113

Bilaga 1 - Allvarliga olyckor med brand i vägtunnlar
Bilaga 2 - Beräkningsmodell för utrymning av vägtunnel
Bilaga 3 - Redovisning av beräkningsmodeller för brandmiljön i tunneln
Bilaga 4 - Struktur på modell för rökdykarinsats i vägtunnel
Bilaga 5 - Beräkning av avstånd till kritisk strålningsnivå

Rescue operations in road tunnels

Summary

Experience from major fires in road tunnels shows that rescue work when tackling large fires in tunnels will be a problem for the Swedish fire and rescue services. The problems are mostly due to the fact that the number of exits is limited, and that smoke from a fire cannot be ventilated away vertically, but instead fills the tunnel. Most of the tunnels in use today have longitudinal ventilation. This means that, in many cases, the fire and rescue services cannot obtain an overall picture of the site of the fire, with their work being particularly difficult if approaching from downstream of the fire. There is therefore a lack of information, which is needed in order to decide how to tackle the fire. The fire and rescue services face an unknown, smoke-filled tunnel from which victims must escape and the fire and rescue services must assist this escape.

Work in the National Board of Civil Defence, Rescue and Fire Services' 'Rescue Work in Tunnel Fires' project has shown that the fire and rescue services must be well prepared and must, if the action is to be effective, have carefully planned in advance how to tackle such situations. The results from the project show that conditions vary widely, depending on what is involved in a tunnel fire. This affects conditions both for those caught in the fire and trying to escape, and for the fire and rescue services. In turn, this means that different scenarios require different methods of attack.

The project has investigated several factors, with the objective of producing results that can be applied to information available to decide how to respond to an accident. The results, and the described procedures, should also form an important part of strategic planning and overall safety concepts. Some of the main results are summarised below. The scenarios that were investigated, and the results from them, should be seen as examples, illustrating the approaches for risk analysis and planning for a tunnel. To these must be added the actual conditions in each individual case.

Fire development

The project has investigated fires of different sizes: not only those that can have catastrophic consequences, but everything from a small fire involving a couple of cars (which can produce a maximum output of about 8 MW) to a fire involving a tanker, which can have a maximum output of about 200 MW. This resulted in seven different fire scenarios, which were then used to simulate evacuation from the tunnel and entry to the tunnel by fire-fighters wearing breathing apparatus. The structure of the fire scenarios, involving a heavy goods vehicle, is largely based on the results of the fire trials which SP carried out in the Runehamar tunnel in 2003 in collaboration with TNO in the Netherlands and SINTEF in Norway. The scenarios are defined not only in terms of maximum heat release rate, but also in terms of an output curve as a function of time. This is because the growth rate is very important in determining the conditions for escape and the outcome of rescue work. Air velocity affects the spread and growth of the fire, and this has also been allowed for in the models.

Evacuation

It can be noted, from analysis of the evacuation process, that a fire that grows quickly and reaches an output of 75 - 100 MW will cause problems in escaping from the tunnel. With such a relatively high heat release rate, it is essential that those caught in or near the fire start to get away from it as soon as possible. In the analyses, this means that the fire will not have reached its maximum output before evacuation has finished, and that conditions improve as people get further away from the fire. If they do not start to escape from the fire area as quickly as is assumed in the analysis, the consequences will become more serious.

In general, it can be noted that higher air velocities increase the rate of growth of a fire, and that this rate of growth is a very important parameter when planning for safety of individuals in tunnels. It can also be noted that a greater tunnel cross-sectional area improves conditions, although the differences is less than was first assumed. A low air velocity means that the fire grows more slowly, which in turn improves conditions for evacuation. If we instead consider conditions for survival in a smoke-filled tunnel without evacuation, we find that conditions are the opposite: i.e. that a higher air velocity improves the chances of those in the tunnel. But as the objective of dealing with all accident situations is that persons in or near the fire should escape, the low air velocity scenario is preferable.

Simulations have also been made of the situation with no evacuation, and with persons at various places between the fire and an exit. A similar situation as for the evacuation scenario could be observed, i.e. that persons could survive the two smaller fires (8 MW and 25 MW) in the tunnel, but would not be able to survive the somewhat larger fires. However, conditions can become critical even with a coach fire (25 MW) if exposure times increase.

Use of breathing apparatus

The simulations of the use of breathing apparatus when tackling the smallest fire (8 MW) show that this does not present any problems. In all the cases, the fire-fighters could reach the fire and probably also successfully extinguish it. The time taken could vary, depending on circumstances and on whether conditions were favourable when the first fire-fighters reached the fire.

Things start to get more difficult in the case of a coach fire (fire scenario no. 2, 25 MW), but a successful outcome can be achieved if no time is lost. The use of IR vision equipment also improves conditions.

The difficulties in attempting to tackle the largest fires (fire scenarios nos. 4-7, 100-200 MW) are so severe that it is practically impossible to attempt to tackle the fire through the smoke.

The availability of IR vision equipment seems to be decisive for fire-fighters' ability to work in a smoke-filled tunnel, and this is particularly the case for the more serious fires. In the case of small fires, conditions are likely to be sufficiently good for fire-fighters with breathing apparatus to be able to mount a successful operation even without IR vision equipment.

It has become clear during the work that the methods used by fire-fighters with breathing apparatus are not necessarily suitable for tackling a tunnel fire, and it may be necessary to develop new methods of working.

In the case of larger fires, thermal radiation from the fire will probably make it very difficult to get sufficiently close to the fire to be able to extinguish it successfully, and it will be necessary to develop methods of protecting fire-fighters from the heat.

Sammanfattning

Erfarenheten från stora brandolyckor i vägtunnlar visar att räddningsinsatser vid omfattande bränder i tunnlar kommer att innebära problem för svensk räddningstjänst. Problemen beror till stor del på att det är begränsat med utgångar (ingångar) och att röken vid en brand inte kan ventileras bort vertikalt, utan tunneln kommer att fyllas med rök. Flertalet av de tunnlar som finns i bruk i dag ventileras med hjälp av längsventilation. Detta gör att räddningstjänsten i många fall inte har någon överblick över olycksplatsen, speciellt nedströms branden. Detta leder till att det saknas information att basera besluten på. Det är i denna rökfyllda, okända tunnel, som människor skall utrymma och räddningstjänsten skall genomföra sin räddningsinsats.

Arbetet inom Räddningsverkets projekt ”Räddningsinsatser vid tunnelbränder” har visat att räddningstjänsten måste vara väl förberedd och måste, om insatsen skall kunna genomföras på ett effektivt sätt, ha planerat en räddningsinsats av denna typ noggrant i förväg. Resultaten från projektet visar att förhållandena varierar kraftigt beroende på vad som är involverat i en eventuell tunnelbrand. Detta påverkar förutsättningarna både för trafikanter som skall utrymma från tunnel och för räddningspersonalen. Detta leder i sin tur att de olika scenarierna kräver olika angreppssätt.

Projektet har belyst flera faktorer och målet har varit att resultaten tillsammans med tillgänglig information skall ge beslutsunderlag vid en olycka. Resultaten och de redovisade procedurerna bör också vara en viktig del av framtagande av insatsplaner och säkerhetskoncept. Några av de utmärkande resultaten sammanfattas nedan. De studerade scenarierna och resultaten från dessa bör ses som exempel, som visar på tankegångar när det gäller riskanalys och insatsplanering för en tunnel. I ett verkligt fall måste hänsyn tas till förutsättningarna i det specifika fallet.

Brandscenarier

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 (med maxeffekten 8 MW) till brand i en tankbil (med maxeffekten 200 MW). Detta ledde fram till sju olika brandscenarier, vilka sedan har använts vid simuleringen av utrymning respektive rökdykning. Utseendet på de brandscenarier, som innehåller en långtradare, bygger till viss del på resultaten från brandförsöken, som SP genomförde i Runehamartunneln 2003. 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. Lufthastigheten påverkar brandspridning och brandtillväxt och detta har också tagits hänsyn till i modellerna.

Utrymning

Från analyserna av utrymningsförloppet nedströms branden kan det konstateras att en brand som utvecklar sig snabbt och som leder till en brandeffekt kring 75 MW - 100 MW innebär att det uppstår problem med att utrymma tunneln. Denna relativt höga brandpåverkan förutsätter att personerna snabbt påbörjar sin utrymning. I analyserna innebär detta att branden inte nått upp till den maximala effekten när

utrymningen är avslutat och att förhållandena blir bättre ju längre från branden bilisterna kommer. Om bilisterna inte påbörjar sin utrymning så snabbt som förutsatts i analysen kommer konsekvensen att öka.

Generellt kan det konstateras att lufthastigheten ökar brandtillväxtshastigheten och att brandtillväxtshastigheten är en mycket viktig parameter vid dimensionering av personsäkerhet i tunnlar. Det kan också konstateras 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. Om man istället betraktar möjligheten att vistas i den rökfyllda tunneln utan att utrymma blir förhållandet det omvända, d.v.s. att en högre lufthastighet kan ge bättre förhållanden för de som vistas i tunneln. Men eftersom målsättningen för all olyckshantering är att bilister som befinner sig i en brandsituation ska utrymma är en låg lufthastighet att föredra.

Beräkningar då ingen utrymning skedde och med bilister på några olika platser mellan branden och utrymningsvägen har genomförts. En liknande tendens som vid utrymningen kunde observeras d v s att det kunde gå att överleva i tunneln vid de två mindre bränderna (8 MW och 25 MW) men att det i praktiken var omöjligt vid de lite större bränderna. Men även vid en bussbrand (25 MW) kan det bli kritiskt vid längre exponeringstider.

Räddningsinsats

I de flesta kommuner kommer man troligen att endast ha resurser för att inledningsvis kunna använda maximalt fyra brandmän till släckning, vilket innebär två till fyra samtidiga strålrör för brandsläckningsinsatsen. Innebörden av detta blir att man troligen endast kommer att ha resurser för att maximalt släcka en buss alternativt en skåpbilsbrand (brandscenario 2, 25 MW). Blir bränderna mer omfattande kommer värmestrålningen att begränsa möjligheterna till att komma nära branden, vilket kommer att innebära att kastlängden för släckvattnet blir längre och mindre vatten kommer att komma i kontakt med det material som brinner. Resultaten av släckförsökens effekt försämras kraftigt ju längre från branden som insatspersonalen befinner sig.

I många fall kommer räddningstjänsten att vara tvungen att använda sig av rökdykare, speciellt då arbete behöver genomföras i en toxisk och en varm miljö nedströms branden. Arbetet är en stor belastning för den personal som är iblandad. Kapaciteten på dessa rökdykare blir begränsad, vilket exemplifieras nedan.

Rökdykarinsatsen vid den minsta branden (8 MW) är inte något stort problem även om den sker i röken på nedströmssidan. I samtliga undersökta fall kan rökdykarna nå branden och troligen också genomföra en lyckad släckinsats. Beroende på förutsättningarna kommer det att ta lite olika lång tid men utgången är ganska given.

För brand i buss (brandscenario 2, 25 MW) ökar svårigheterna att genomföra insatsen genom röken. Men med en tidseffektiv insats visar det sig att framgång kan nås. Används dessutom IR-hjälpmedel ökar möjligheterna till en lyckad insats. Detta förutsätter dock att IR-hjälpmedel är en effektiv metod att öka rökdykarnas förflyttningshastighet i tunneln så de snabbare kan göra en effektiv insats.

För de största bränderna (brandscenarierna 3-7, 75 MW – 200 MW) är svårigheterna så stora att en insats genom röken och i praktiken nog är omöjligt. I dessa situationer bör insatsen inriktas på att angripa branden från andra sidan dvs med vinden i ryggen. Värmestrålningen från branden kommer sannolikhet 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.

Att generellt utrusta rökdykarna med IR-hjälpmedel verkar vara avgörande för deras förmåga att genomföra en insats i en rökfylld tunnel. Detta kan speciellt konstateras för de lite allvarligare bränderna. För små bränder är miljön tillräckligt god för att rökdykarna ska kunna genomföra en lyckad insats även utan IR-hjälpmedel. Effekten av IR-hjälpmedel är, som konstaterats ovan, under förutsättning att förflyttningshastigheten kan öka.

Projektet har påvisat att gränsen för vilka bränder som säkerheten i tunnlar klarar av att hantera är någonstans mellan 75 MW och 100 MW. Blir bränderna större än detta kommer utrymningen att få svårt att hinna genomföras och räddningsinsatsen kommer inte att kunna påverka olycksförloppet.

Påbörjas inte utrymningen omgående efter det att branden har startat så kommer möjligheterna till överlevnad för trafikanterna att försämras drastiskt.

Nyckelord: vägtunnlar, räddningsinsats, evakuering, utrymning, släckning

Nomenklatur

A	Area [m^2]
C	Koncentration [kg/m^3]
c_p	Värmekapacitet [kJ/kg/K respektive J/kg/K]
D_h	Hydraulisk diameter [m]
f	Areaökningsfaktor
f_{eff}	Del av kroppen som är mottaglig för strålning
F	Fractional dose
E_{tot}	Totala energiinnehållet (GJ)
ΔH	Effektiva förbränningsentalpin [MJ/kg]
I_{rad}	Infallande stålning [W/m^2]
k	*se ekv 3.1*
L	Längd, avstånd [m]
m	Massa [kg]
n	*se ekv 3.1*
M	Molmassa [kg/kmol]
	Värmeproduktion i kroppen (ekv 5.1) [W/m^2]
p	Tryck [Pa]
P	Perimeter [m]
q	Vattenflöde [L/min]
Q	Energi [MJ]
$\dot{Q}$	Effekt [kW respektive MW]
$\dot{Q}''$	Strålning, värmeflöde [kW/m^2]
r	*se ekv 3.1*
r_0	Stökiometrisk förbränningskoefficient
R_a	*se ekv 5.3*
R_c	Värmemotstånd i kläder [Km^2/W]
Re	Ångmotstånd i klädsel [Pam^2/W]
S	Siktlängd [m]
t	Tid [s respektive min]
T	Temperatur [ºC]
u	Hastighet [m/s]
V	Volym [m^3]
V_{CO2}	Korrigering av andningsfrekvens map CO_2
x	Sträcka [m]

X	Molfraktion [mol/mol]
	Gaskoncentration [vol-%]
Y	Massfraktion [kg/kg]
	Utbyte [kg/kg bränsle]

Grekiska symboler

α	Tillväxthastighet [kW/s^2]
β	se figur 3.3 [s^{-1}]
γ	Ökning som funktion av lufthastighet [-]
ρ	Densitet [kg/m^3]
η	Lufthastighetspåverkan normerad mot standardfallet 3 m/s [-]
τ	Tidsförskjutning pga brandgasernas transport [s]
χ	Förbränningseffektivitet [-]

Förkortningar

FED	Fractional Effective Dose (Effektiv fraktionsdos)
FID	Fractional Incapacitation Dose (fraktionsdos för merdvetslöshet)
HRR	Heat Release Rate (utvecklad brandeffekt)

Förklaringar

Uppströms branden	Är i förhållande till flödesriktningen på luften i tunneln. Avser området som befinner sig från branden och mot luftens flödesriktning.
Nedströms branden	Avser området som befinner sig från branden och med luftens flödesriktning. Det är i denna sistnämnda riktning som merparten av brandgaserna förflyttar sig.
Backlayering	Avser det fenomenet där brandgaserna förflyttar sig mot flödesriktningen i tunnel. Storleken på hur lång backlayeringen blir styrs bland annat av storleken på branden och hur stor luftflödet är i tunneln.
Rödykning	Inträngande i tät brandrök, vanligen inomhus, för att rädda liv eller bekämpa brand eller liknande. Denna insats kan behöva göras i farlig miljö med giftig rök, hög temperatur och hög värmestrålningsnivå, vilket innebär att personalen som utför den, kan behöva vara utrustade med skyddsutrustning bestående av värmeskydd och separat andningsluft.
Räddningsinsats	De insatser som kommunen ansvarar för vid olyckor och överhängande fara för olyckor för att hindra och begränsa skador på människor, egendom och miljön

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Under senare tid har det byggts ett flertal vägtunnlar i Sverige och ytterligare är under projektering eller byggnation. Exempel på sådana är Öresundsförbindelsen, Södra och Norra Länken i Stockholm och Götatunneln i Göteborg. Dessutom finns det redan idag ett stort antal vägtunnlar i drift för vilka det saknas insatsplaner.

Det har under de senare åren inträffat ett antal olyckor med brand i vägtunnlar i Europa vilka resulterat i långvariga brandförlopp och svår insatsmiljö. Förutsättningarna till självräddning, det vill säga utrymning av de personer som befinner sig i tunneln vid brandstarten, är också mer ogynnsamma jämfört med motsvarande förutsättningar i byggnader. Självräddning innebär att man som trafikant inte kan räkna med att räddningstjänsten skall komma och rädda personen ifråga utan man måste som trafikant själv fatta beslutet att utrymma och genomföra utrymningen innan räddningstjänsten påbörjat sin insats. Miljön är inte alltid anpassad för utrymning på samma sätt som i byggnader. Det gör att utrymningen försvåras och möjligheterna för räddningstjänsten att göra livräddande insatser begränsas.

Trots detta utgörs räddningstjänstens primära insats av att försöka rädda liv och hjälpa till att utrymma de personer som befinner sig i tunneln. Det beslutsunderlag som räddningsledaren då har till förfogande är tämligen magert vad avser bland annat utrymningssituationen. Det är svårt att veta hur många personer som befinner sig i tunneln och hur dessa på bästa sätt kan hjälpas ut.

I samband med projekteringen av dessa tunnlar och den efterföljande insatsplaneringen uppstår problem eftersom det råder en ganska osäker syn på hur dimensioneringen av utrymningssäkerheten skall göras. Det får till följd att räddningstjänstens möjlighet att planera för olyckor i tunnlar också är mycket begränsad. Det finns idag ganska lite information tillgänglig som ger en total bild över hur utrymningssituationen kan te sig för trafikanter som tvingas utrymma i en vägtunnel.

Vid flera av de olyckor där branden blivit kraftig har också ett stort antal personer omkommit. Vad orsakar att dessa trafikanter inte hinner ta sig i säkerhet i tid? Är det omöjligt att hinna utrymma eftersom brandförloppen är så snabba eller finns det en möjlighet att klara sig? Kunskapen om hur personer beter sig vid tunnelbränder är förhållandevis liten och behöver utvecklas för att framtida bränder skall innebära färre omkomna eller helst inga alls. En viktig fråga är hur den enskilda trafikanten upplever situationen och hur denne fattar sitt beslut att utrymma. Tiden som åtgår för detta måste förmodligen vara kort men frågan är hur lång tid det tar och vad påverkar tiden som trafikanten behöver för att fatta ett korrekt beslut. Vid branden i Mont Blanctunnel återfanns de flesta omkomna, 27 personer, i sina egna bilar. De hade alltså inte uppfattat faran i tid eller beslutade sig av någon anledning för att inte lämna sin bil.

Vid all projektering kommer frågan om avstånd mellan utrymningsvägar upp. Innebörden av detta är att man förutsätter att utrymningsvägarna är kända och möjliga att hitta och att de därför kommer att användas. Vid tunnelbranden i Tauerntunneln har flertalet överlevande sprungit ut ur tunneln. Där fanns visserligen inga utrymningsvägar men frågan är om närvaron av dessa hade ändrat utgången eftersom förloppet var så snabbt och tidsmarginalen mellan att överleva och omkomma var så liten. I branden i S:t Gotthardtunneln hittades människor omkomna i sina bilar och sådana som hade passerat utrymningsvägar. Vid branden

i Mont Blanc försökte två personer stänga in sig i en räddningskammare men omkom på grund av det utdragna förloppet. En viktig aspekt borde i detta sammanhang vara att undersöka hur eventuella utrymningsvägar eller räddningskammare skall vara utformade för att trafikanterna skall ha nytta av dessa.

1.2 Mål och syfte

Målet med projektet är att beskriva den miljö som räddningspersonalen kan komma att möta vid en räddningsinsats i tunnlar som används för vägtransport. Trafikanterna kommer troligen att befinna sig i någon form av utrymningssituation vid räddningstjänstens ankomst. Projektet har som syfte att beskriva denna situation för fallet att brand som leder till utrymning inträffat i en vägtunnel. Det finns en rad faktorer som kan komma att påverka utrymningsbeteendet hos trafikanterna. Dessa faktorer identifieras och ingår i bedömningsunderlaget för resultatet. Detta skall leda fram till ett antal utvalda scenarier lämpliga för att beskriva förhållandena i en tunnel vid en viss typ av brand. Ambitionsnivån för projektet är att göra en konsekvensanalys av tänkbara scenarier *men utan inslag av sannolikheter för scenarierna*.

1.3 Metod och avgränsningar

Både beräkningar och fullskaliga brandförsök i tunnel används för att beskriva ett troligt utrymningsförlopp utifrån en given brandsituation. De brandscenarier som används baseras delvis på fullskaliga brandförsök som har genomförts i Runehamar tunneln [1, 2] och delvis på andra genomförda fullskaliga försök [3]. En sammanställning ges av den kunskap, som finns angående brandutveckling i vägtunnlar.

Utrymningsförloppet förutsätts vara kontrollerat av dels mänskligt beteende, dels brandprodukterna påverkan på människans fysiska tillstånd. Utrymningssituationen beskrivs med tanke på de bilister och övriga trafikanter som kan finnas i en tunnel. Trafikanterna kommer troligen att befinna sig i någon form av utrymningssituation vid räddningstjänstens ankomst. Den miljö som räddningspersonalen kan komma att möta vid en räddningsinsats i tunnlar som används för vägtransport beskrivs. För att undersöka tänkbara scenarier finns en rad faktorer som kan komma att påverka utrymningsbeteendet hos trafikanterna. Dessa faktorer identifieras och ingår i bedömningsunderlaget för resultatet.

För att kunna beskriva förutsättningarna för utrymningssituationen i samband med räddningsinsatsen har erfarenheter från inträffade olyckor studerats. Experimentella resultat från övningar och forskning samt erfarenheter från andra områden avseende utrymning ingår i underlaget. Eftersom flertalet tunnlar är försedda med utrymningsvägar har användningen, utformningen och exponeringen av dessa speciellt studeras.

I det tidigare projektet om räddningsinsats i spårtunnlar [4] användes en utrymningsmodell som bl.a. beräknade tid till medvetslöshet för utrymmande personer. Modellen baserades på förflyttning i rökexponerad miljö och personernas uthållighet influerades av den toxiska exponeringen av denna rök. Dessutom påverkades bl.a. gånghastighet av den för platsen aktuella siktsträckan. En liknande modell för vägtunnlar har utvecklats för att studera utrymningsförloppet vid brand i vägtunnel. Denna blir dock något mer komplex eftersom trafikanter i bil förväntas vara mer oberoende av varandra jämfört med tågresenärer.

För att kunna planera för en insats i en vägtunnel när en brand startat måste det finnas större kunskap om vilka faktorer som påverkar trafikanternas beteende och agerande i utrymningssituationen. Med denna kunskap kan man sedan skapa olika scenarier som kan användas för att bedöma hur en insats skall planeras. Med tunnel avses både enkelrörstunnel och dubbelrörstunnel. De faktorer som kan tänkas påverka är bland annat

- typ av tunnel (enkel/dubbel rör)
- trafikantsammansättning (sociala roller, familjer eller enskilda resenärer)
- funktionshinder
- tidigare erfarenheter
- väderlek vid olyckan/tidpunkt på året för olyckan
- geografisk placering av tunneln (tätort eller landbygd, avstånd till räddningstjänst)
- tidpunkt för branden (rusningstrafik)
- avstånd till utrymningsväg/säker plats
- ledningscentral (SOS, trafikcentral)
- belysning och information i tunneln
- val av utrymningsriktning
- hur påverkas trafikanter av branden i tunneln (skiktning av röken eller jämnt fördelad rök)
- brandens placering i tunneln
- brandens storlek
- brandens tillväxthastighet

Uppräkningen har inte för avsikt att vara komplett eller i någon prioritetsordning utan skall försöka spegla de olika typer av faktorer som kan komma att påverka situationen. Det verktyg som har använts i projektet kan inte behandla alla dessa faktorer utan en bedömning av vilka som är viktigast måste göras i förväg för att få ett enkelt hjälpmedel för planering.

1.4 Dispositionsbeskrivning

Rapporten börjar med (avsnitt 2) beskrivning av olika tunnel- och ventilationstyper där exempel ges på respektive typ. Avsnitt 3 ger bakgrundsbeskrivningen till de brandscenarier som tas fram och används i de utrymningsberäkningar som presenteras i avsnitt 4. Utrymningsberäkningarna bygger på en teoretisk modell som beroende på den brandmiljö trafikanten utsätts för kan beräkna tiden tills trafikanterna förlorar medvetandet. Räddningstjänstens insatskapacitet och taktik diskuteras grundligt i avsnitt 5. I avsnitt 6 ges exempel på teoretiska insatsscenarier där resultaten från övriga avsnitt integreras för att på så realistiskt sätt beskriva olika insatssituationer i vägtunnlar. Slutligen så diskuteras resultaten i avsnitt 7 och slutsatser från projektet redovisas i avsnitt 8. Framtida forskningsbehov har också identifierats och återges i avsnitt 9.

2 Olika tunnel- och ventilationstyper

Vägtunnlar kan se ut på många olika sätt. Det kan t.ex. skilja mycket mellan tunnlar i stadsmiljö och landsbygdstunnlar. Trafiksituation och trafikpolitiska beslut styr valet av tunneltyp. I detta avsnitt ges en kortfattat beskrivning av de vanligaste tunnel- och ventilationstyperna.

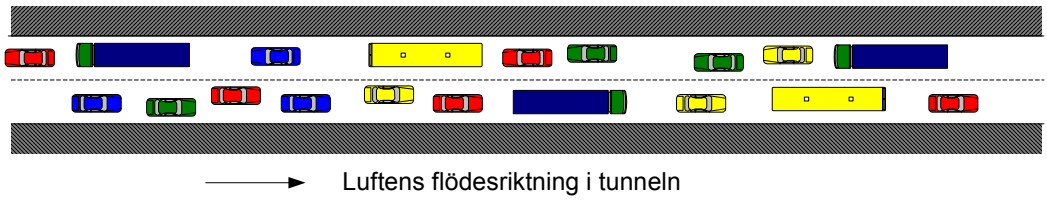
2.1 Tunneltyper

För att renodla beräkningar och analyser i denna rapport har några representativa tunneltyper valts ut. Dessa sammanfattas i tabell 2.1 och beskrivs i figurerna 2.1 – 2.3. Det som har varierats är antal tunnelrör, tunnelrörens tvärsnittsarea och typ av ventilation. Det finns andra tunneltyper än de som presenteras i tabell 2.1 men de som finns där är de mest vanliga i Sverige.

Tabell 2.1 Sammanställning av tunneltyper använda i undersökning.

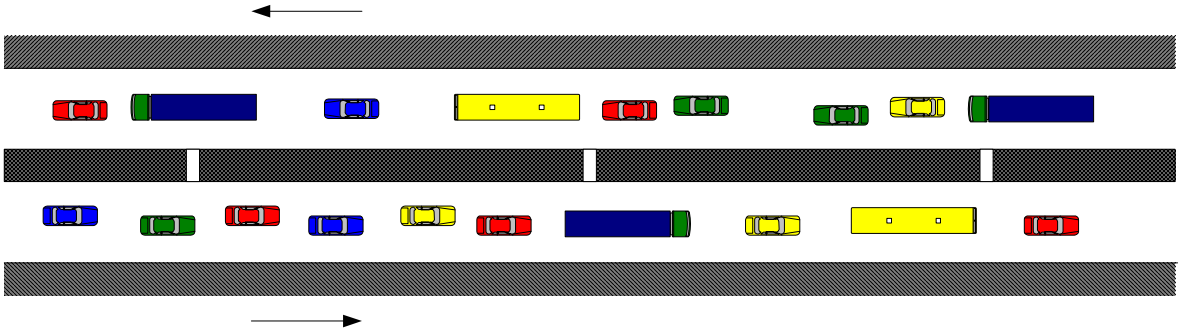
Tunnel-typ	**Beskrivning**	**Tvärsnitts-area [m^2]**	**Ventilation**	**Exempel**
1	Enkelrörstunnel med dubbelriktad trafik	50	Längsventilation	Muskötunneln
2	Dubbelrörstunnel med enkelriktad trafik (en-filig)	50	Längsventilation	
3	Dubbelrörstunnel – enkelriktad trafik (flerfilig)	90	Längsventilation	Södra Länken, Lundbytunneln (se figur 2.4)

Vägtunnlar kan utformas som enkelrörstunnlar med trafik i båda riktningarna, se figur 2.1. Detta skapar normalt relativt svåra möjligheter att bygga utrymningsvägar och därmed även angreppsvägar för räddningsinsatsen. Vad som ytterligare försvårar en utrymning och en räddningsinsats är att dessa tunnlar ofta inte har ett ventilationssystem som kan hantera brandröken och underlätta en utrymning eller en räddningsinsats.



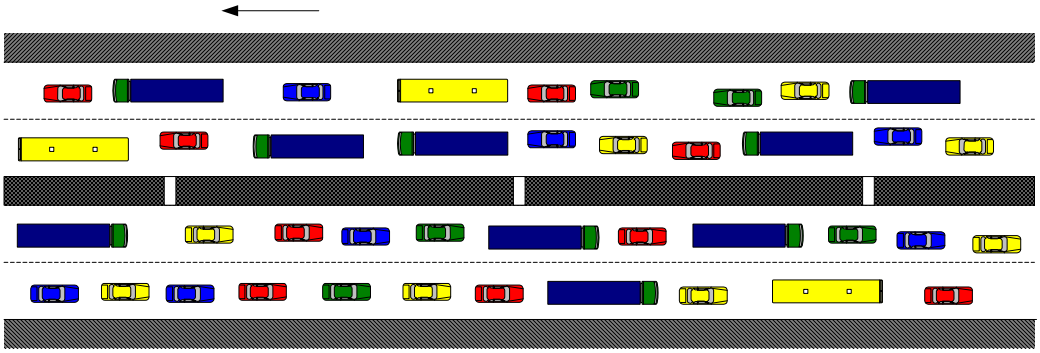
Figur 2.1 Tunneltyp 1: enkelrörstunnel med dubbelriktad trafik. Tunneltvärsnitt: 50 m^2.

Vägtunnlar utformas ofta som dubbelrörstunnlar, med enkelriktad trafik i varje tunnelrör, se figur 2.2. Denna typ av utformning skapar relativt goda möjligheter att förbinda de båda tunnelrören med varandra och på så sätt skapa utrymningsvägar och möjliga angreppsvägar för en räddningsinsats. De flesta av dessa dubbelrörstunnlar är utrustade med ventilationssystem för att i händelse av brand kunna få brandgaserna att ventileras bort i tunnelns körriktning, så att människorna uppströms brandplatsen kan utrymma ur det drabbade tunnelröret utan att påverkas av brandgaserna.



Figur 2.2 Tunneltyp 2: Dubbelrörstunnel med enkelriktad trafik (en-filig). Tunneltvärsnitt på 50 m^2.

Dubbelrörstunnlarna är ofta flerfiliga och i denna rapport har en flerfilig dubbelrörstunnel med tunneltvärsnittet 90 m^2 (se figur 2.3) använts i vissa beräkningar.



Figur 2.3 Tunneltyp 3: Dubbelrörstunnel – enkelriktad trafik (flerfilig).Tunneltvärsnitt på 90 m^2.

Figur 2.4 Lundbytunneln på Hisingen i Göteborg, ett exempel på flerfilig dubbelrörstunnel.

De olika tunneltyperna används i beräkningarna för utrymning respektive räddningsinsatser. Detta beskrivs ytterligare i kommande avsnitt.

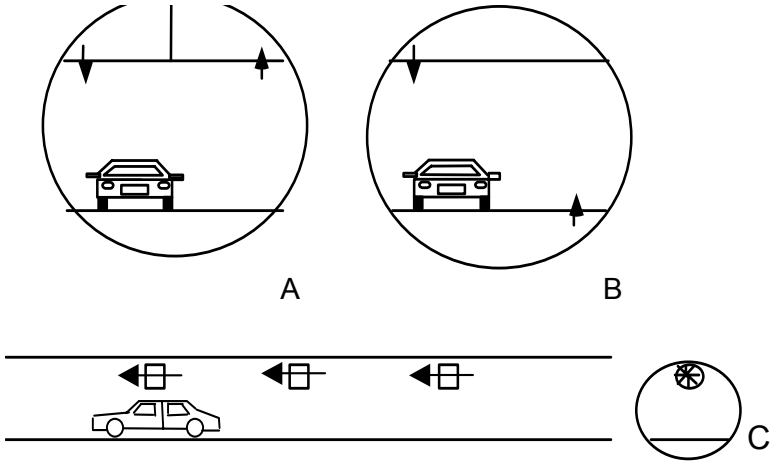
2.2 Ventilationssystem

Målsättningen med ett ventilationssystem i vägtunnlar är att:

- upprätthålla bra luftkvalitet vid normala trafikförhållanden
- i händelse av en brand möjliggöra utrymning genom att kontrollera brandgasspridningen
- underlätta insatsen för räddningstjänsten
- begränsa skador på konstruktion och utrustning

Det finns olika ventilationssystem för vägtunnlar. De vanligaste är (se figur 2.5):

- Halv tvärventilation (A)
- Full tvärventilation (B)
- Längsventilation (C)
- Naturlig ventilation



Figur 2.5 Exempel på olika ventilationssystem i vägtunnlar. A - halv tvärventilation (observera: normal operation=enbart tilluft, vid brand=enbart frånluft), B - full tvärventilation (tilluft=frånluft både vid normal operation och vid brand), C - längsventilation (impulsfläktar som skapar jämt längsgåendeflöde över hela tvärsnittet).

Längsventilationssystem är förmånligast eftersom det har liten påverkan på övrig byggnation typ schakt. Valet begränsas först och främst av tunnelns längd eftersom den påverkar utspädningsgraden av utsläppen från bilarna, speciellt i stadsmiljö. Längsventilationssystemet är väldigt enkelt i sin konstruktion och mycket effektivt förutsatt att ingen trafikant befinner sig nedströms branden. Längsventilationssystem är bäst lämpade i tunnlar med enkelriktad trafik där kolvverkan från trafiken kan utnyttjas. Det ställer också mindre krav på att systemet måste reagera snabbt i händelse av en brand. Den kritiska lufthastighet som krävs för att styra brandgaserna varierar från 2.5 - 3 m/s beroende på brandens storlek, tunnelns takhöjd och tunnelns lutning. Vid en olyckshändelse hinner fordonen nedströms branden köra ut ur tunneln innan situationen blir kritisk. Det är dock inte fallet om branden startar längs bak eller mitt i en bilkö. Då finns risk att brandgaser tvingas över stillastående fordon nedströms branden.

Tvärventilationen kan användas där begränsningar med längsventilationen finns. Detta gäller först och främst tunnlar med dubbelriktad trafik i stadsmiljö, i tunnlar där det finns risk för köbildning och i långa tunnlar. Tilluft och frånluft distribueras längs tunneln genom öppningar i tak- och golvnivå. Vid halv tvärventilation (semi-transverse) finns i normalläget endast tilluft via öppningar i tak. Vid brand däremot ändras systemet automatiskt för att suga ut brandgaser genom öppningar i tak (tilluft via tunnelmynningar). Tvärventilation är betydligt dyrare än längsventilation och mer komplex eftersom de kräver stora horisontella kanalsystem och ventilationstorn med fläktar.

Endast naturlig ventilation kan accepteras i korta tunnlar. I Frankrike rekommenderas ej användning av ventilationssystem i tunnlar som är längre än 300 m i stadsmiljö, 500 m utanför städer och 800 m utanför städer med låg trafik. Det finns ingen möjlighet till kontroll av brandgaserna med naturlig ventilation. Spridningen av brandgaserna kommer att styras av kolvverkan från trafiken, meteorologiska förhållanden utanför tunneln (vind) och tunnelns längd och lutning.

3 Brandscenarier

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 längsgående 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 för stor omfattning. I följande avsnitt sammanställs den kunskap som finns kring brandscenarier 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 brandscenarier för vägtunnlar. I följande avsnitt redovisas inträffade bränder och statistik som finns tillgänglig för vägtunnlar tills dags dato. Underlaget bygger delvis på en litteraturstudie som Ingason m.fl. [5] 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 och 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 [6]) eller varmgång i lager. Bränder kan också orsakas av tekniska fel i den utrustning som finns i tunneln eller på grund av underhållsarbeten. På det allmänna vägnätet finns statistik från USA

för 1988 - 1992 som visar fördelningen mellan olika antändningsorsaker [7]. Statistiken visas i tabell 3.1 där det framgår att mekaniska fel, läckage eller bromsfel är de vanligaste orsakerna.

Tabell 3.1 Brandorsak i fordon enligt USA statistisk för 1988-1992 [7]

Ignition factor	**Number of fires**	**Percent**
Part failure, leak, or break	95 400	21,9 %
Incendiary or suspicious	73 760	16,9 %
Short circuit or ground fault	68 370	15,7 %
Backfire[1)]	50 800	11,6 %
Other electrical failure	19 520	4,5 %
Mechanical failure or malfunction, unable to classify further	15 200	3,5 %
Lack or maintenance or worn out	11 940	2,7 %
Unclassified mechanical or malfunction	11 920	2,7 %
Fuel spilled or released accidentally	11 810	2,7 %
Abandoned or discarded material[2)]	9 420	2,2 %
Property too close to[3)]	8 690	2,0 %
Collision, overturn, or knockdown	7 990	1,8 %
Unclassified ignition factor	7 570	1,7 %
Combustible too close to heat	7 550	1,7 %
Design deficiency[4)]	6 630	1,5 %
Other known	29 950	6,9 %
Total	**436 500**	**100,0 %**

Source: 1988 - 1992 NFIRS and NFPA Survey. Fires are rounded off to the nearest ten. Sums may not equal due to rounding.

1) Ignitions outside the combustion chamber are included. Fires originating as a result of hot catalytic converters are excluded.

2) Discarded cigarettes, cigars, and the like are included.

3) Exposure fires are included.

4) Catalytic converters are included.

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 % [6] (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 [6]. EU kommissionen räknar med en ökning i långtradartrafiken med 40 – 60 % de närmaste 10 åren [11].

Tabell 3.2 Antal bränder per fordonskilometer för olika typer av fordon i Frankrike [6].

Typ av brand		**Antal bränder per 10 miljoner (107) fordons-kilometer**
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 långtradare) 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 [6] 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 (långtradarna) 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 [6] 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 uppförsbacke eller har en brant lutning (brand i motorutrymme på grund av hög belastning på motorn). Detta gäller också dem som ligger efter en lång nedförsbacke (brand på grund av hög belastning på bromsar). Nya tunnlar tenderar också att ha högre brandfrekvens enligt Haack och Meyeroltmanns [6]. 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, se tabell B1 i Bilaga 1, och sammanfattar 29 brandolyckor i vägtunnlar som kan betraktas som allvarliga.

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 klargjorts 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. Dessa tunnlar har oftast tvingats stänga en kortare tid efter branden, och i några fall flera månader eller år.

I omkring 50 % av fallen i tabell B1 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 B1 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 ett fall, Kanaltunnelbranden, har man rapporterat en högsta brandeffekt på 360 MW.

Högsta taktemperaturen vid brandhärden i de olyckor som anges i tabell B1 kan förväntas ligga runt 900 - 1300 °C. I EUREKA 499 uppmättes taktemperaturer för vägfordon mellan 220 – 970 ^{o}C [3]. I försök med bensinbränder i tunnlar har man mätt temperaturer upp till 1360 ^{o}C. I Runehamarförsöken med lufthastighet på 2 – 3 m/s uppmättes maximala taktemperaturer mellan 1280 - 1365 ºC [2] vid en brandeffekt mellan 100– 200 MW. Bränslet bestod av trä och plastmaterial staplat på en långtradarställning som skulle motsvara en långtradare.

I över 50 % av fallen angivna i tabell B1 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, Tauerntunneln i Österrike och S:t Gotthardtunnel i Schweiz. I tabell 3.3 ges en uppskattning av de brandeffekter som kan ha utvecklas 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 3.3 En uppskattning av brandeffekt, energi och varaktighet från ett antal katastrofbränder som har inträffat i vägtunnlar sedan 1996 [13].

Olycka, år	**Antal fordon och fordonstyp**	**Tvär-snittsarea på tunnel (m^2)**	**Uppskattad total energi, Qtot (GJ)**	**Upp-skattad högsta brand-effekt $\dot{Q}_{max}$ (MW)**	**Upp-skattad tid till högst brand effekt**	**Uppskattad brandvar-aktighet (glödbrand ej inkluderat)**	**Antal omkomna**
Kanaltunnel, 1996	10 långtradare	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 långtradare, 24 mindre fordon	45	4000 – 4500	300 – 400	2 – 3 h	7 – 10 h (rapport: 15 h)	12
S:t Gotthard, 2001	13 långtradare 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 långtradare på den italienska sidan som brann.

3.3 Genomförda fullskaleförsök

Ett antal fullskaleförsök har genomförts 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 [3]. Försöken, som har fått benämningen EUREKA EU499, genomfördes 1990 - 1992. Både personbilar och långtradare (HGV) användes i försöken. Tunneln var 2,3 km lång, öppen i ena ändan och med ett schakt i bortre ändan. Tunneltvärsnittet varierade längs tunneln men var i medel 5-7 m bred och ungefär 5-6 m hög. Andra viktiga försök är försöken i 2nd Benlux-tunneln i Holland 2002 [14]. Tunneln var 840 m lång med tunneltvärsnitt på 50 m^2. Både personbilar och lastbilar med träpallar användes i försöken.

I Runehamartunneln i Norge genomfördes under 2003 fyra storskaliga brandförsök, som ingick som en del i projektet som presenteras här. Runehamartunneln är en 1,6 km lång biltunnel (används inte längre för trafik) med tvärsnittsarea på ungefär 47 m^2. På grund av det skydd som monterades inne i tunneln vid brandplatsen så var tunneltvärsnittet 32 m^2 på en sträcka på 75 m vid brandplatsen som var 1 km från den mynning där fläktarna stod. Takhöjden var 5.8 m utan skydd och 5 m med skydd.

Tabell 3.4 Sammanställning av fullskaleförsök med fordon i och utanför tunnlar.

Typ av fordon, försök, test nr, u=längsventilation m/s	**Total energi, E_{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 [15]
Renault Espace J11-II tillverkad 1988, EUREKA 499, u= 0,4 m/s	7	6	8	Steinert [16]
Citroën BX, 1986	5	4,3	15	Shipp och Spearpoint [17]
Austin Maestro, 1982	ET	8,5	16	Shipp och Spearpoint [17]
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 [14]
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 [18]
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 [19]
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 [18]
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 [19]
Försök med tre bilar (Golf + Trabant+Fiesta)	ET	8,9	33	Steinert [19]
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 [20]
En buss i Shimizutunneln, u=3-4 m/s	ET	30 a)	7	Kunikane m fl [21]
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 Lönnermark [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 Lönnermark [1]
En Leyland DAF 310ATi – långtradare med 2 ton möbler, EUREKA 499, u= 3-6 m/s	87	128	18	Grant och Drysdale [22]
Långtradarlast med totalt 8,5 ton möbler, tillbehör och gummidäck, **Runehamar** försöken, försök 3, u=3 m/s	152	125	10	Ingason och Lönnermark [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 Lönnermark [1]
Långtradarlast med 72 träpallar, Second Benelux-försöken, försök 14, u=1-2 m/s	19	26	12	Lemair m fl [14]
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 [14]
Simulerad lastbilslast, EUREKA 499, u=0,7 m/s	65	17	15	Ingason m fl [20]

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

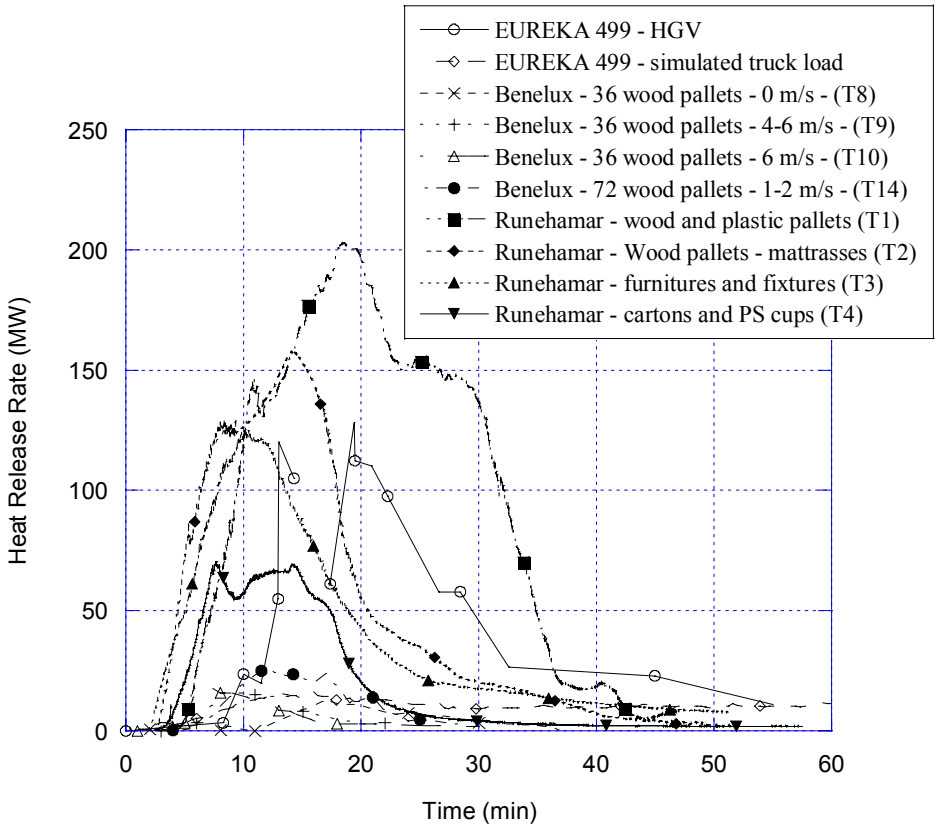
Två mobila fläktar stod i tunnelmynningen och gav tillsammans en lufthastighet på drygt 3 m/s genom tunneln. Fläktarna användes för att styra luftflödet och på det sättet göra det möjligt att mäta den avgivna brandeffekten. Lufthastigheten hade valts för att ge så lite rök som möjligt uppströms om branden (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 lufthastigheten inne i tunneln ner till ungefär 1,5 – 2,5 m/s på grund av det mottryck som branden genererade. 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 uppmättes en temperatur på 1360 °C och även i de övriga försöken nådde gastemperaturerna upp till mellan 1250 °C och 1300 °C. 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 ºC i första försöket men den avtog ganska snabbt, ner mot ungefär 250 ºC på avståndet 250 m ifrån branden. Värmestrålningen uppströms branden uppmättes på olika avstånd från branden. Resultaten redovisas i avsnitt 5.5.3. Ytterligare information kring Runehamarförsöken kan hämtas från referenserna 1 och 2.

I tabell 3.4 redovisas brandeffekter uppmätta i fullskaleförsök med enskilda fordon både inne i en tunnel och utanför. I tabell 3.5 ges en sammanställning av de värden som anges i tabell 3.4. 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 3.5 Tid till det att maximum brandeffekt uppnås.

	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 3.1 ges en sammanställning av alla uppmätta brandeffekter för långtradare som är angivna i tabell 3.4. Figuren ger en bra överblick över den variation som kan förekomma vid bränder i långtradare. Det är värt att notera att tillväxtshastigheten blir relativt linjär när branden börjar växa. Det viktigaste när det gäller utrymningsproblematiken är inte bara hur stor branden blir utan också vilken tillväxtshastighet 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). Tillväxtshastigheten verkar väldigt beroende på ventilationshastigheten. I tabell 3.6 så kan man uppskatta ökningen i tillväxthastigheten med faktor 3,5 och 5,5. I försök 9 så 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 Runehamar försöken så genomfördes alla försöken vid samma lufthastighet; 3 m/s.



Figur 3.1 Uppmätta brandeffekter hos långtradare i olika fullskaleserier [1, 3, 14].

Tabell 3.6 Linjär tillväxtshastighet hämtad från Benelux- [14] och Runehamarförsöken [1].

Försök	**Längs-ventilations hastighet (m/s)**	**Intervall för bestämning av linjär tillväxts-hastighet (MW)**	**Linjär tillväxts-hastighet (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 totalt18000 PS-muggar (2,8 ton)	3	5 - 70	17,7

3.4 Dimensionerande brandeffekt – genomgång av olika rekommendationer

Det finns i dag många olika rekommendationer när det gäller dimensionerande brandeffekt i vägtunnlar. I tabell 3.7 redovisas dimensionerande brandeffekter för PIARC [23], de franska reglerna [24] och NFPA reglerna i USA [25]. 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 3.7 Dimensionerande brandeffekt enligt olika regelverk.

Typ av fordon	**PIARC [23]**	**Franska regler [24]**	**NFPA [25]**
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 3.8 ges ett franskt förslag till dimensionerande bränder för ventilationssystemet. I samma tabell finns även dimensionerande ventilationsflöden och kritisk lufthastighet [24]. 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.

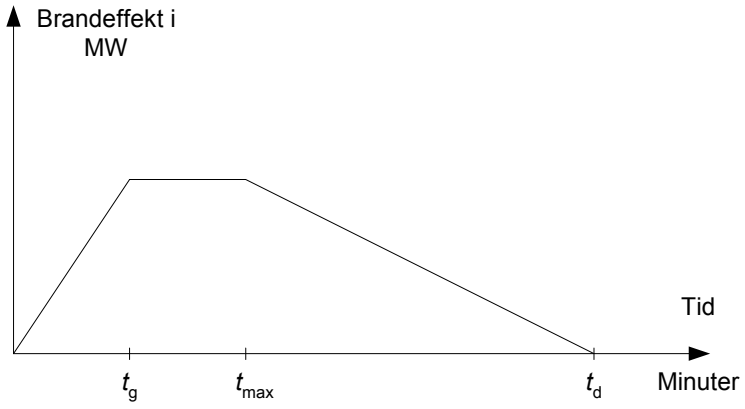
Tabell 3.8 Franskt förslag till dimensionerande bränder för ventilationssystemet och kritisk lufthastighet.

Tunnel och trafiksituation	**Typ av fordon**	**Dimen-sionerande brand (MW)**	**Dimensio-nerande ventilations-flöde (m^3/s)**	**Dimen-sionerande 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 [24], se figur 3.2:

- linjär ökning från 0 till maxvärde enligt tabell 3.9 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 3.2)

där t_g, t_{max} och t_d anges enligt tabell 3.9 [24].



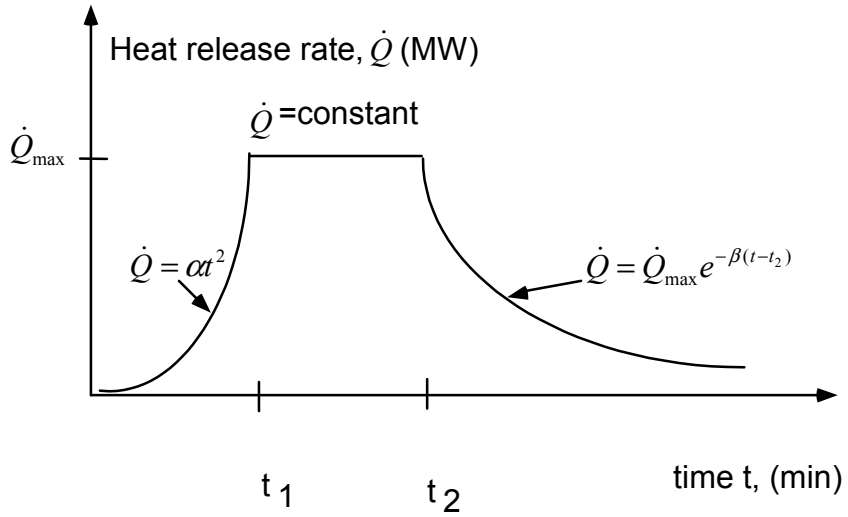
Figur 3.2 Franskt förslag angående dimensionerande brandeffektkurva för vägtunnlar [24].

Tabell 3.9 Brandeffektkurva för CFD beräkningar enligt Franskt förslag [24].

Tunnel och trafiksituation	**t_g (min)**	**t_{max} (min)**	**t_d (min)**	**frigjord energi (GJ)**
takhöjd ≤ 2,7 m	5	20	20	15
2,7 m < takhöjd ≤ 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 [26] har beskrivit dimensionerande bränder lite annorlunda än vad som anges i Tabell 3.9. Brandeffekten ökar som funktion av tiden i kvadrat multiplicerad med en fordonsberoende konstant. I figur 3.3 visas hur den dimensionerande kurvan ser ut.

När det gäller brandtillväxten så råder det fortfarande osäkerhet eftersom försöksunderlaget är begränsat. Brandtillväxthastigheten för personbil och buss kan hämtas från tabell 3.10.



Figur 3.3 Dimensionerande brandeffektkurva enligt förslag från Ingason [26].

Brandeffekten $\dot{Q}$ ges som $\dot{Q} = \alpha t^2$ där α anger brandtillväxthastigheten och t är tiden i sekunder. Tillväxthastigheten är 0,01 kW/s^2 för personbil och 0,1 kW/s^2 för buss. Kunskap om brandtillväxthastigheter för andra fordonstyper saknas. En tankbilsbrand kan antas uppnå sitt maxvärde ganska omedelbart medan en skåpbil antagligen ligger någonstans i mellan en personbil och en buss. En långtradare kan ha ett α–värde som ligger någonstans mellan 0,02 och 2 kW/s^2. Tiden t_1 bestäms av $\dot{Q}_{max}$ enligt tabell 3.10 och t_2 bestäms av den totala energimängden.

Tabell 3.10 Dimensionerande bränder i vägtunnlar enligt Ingason [26].

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.

3.5 Föreslagna brandscenarier för beräkning av utrymning och bedömning av räddningsinsats

Baserat på den information som presenterats i tidigare avsnitt så har sju olika scenarier tagits fram som kommer att användas i analysen av utrymnings- och räddningsinsatssituationen för vägtunnlar. Resultaten från dessa beräkningar presenteras i avsnitt 4 och 5. De föreslagna scenarierna anges i tabell 3.11. Formen

på brandeffektkurvan följer ett nytt förslag som bygger på en mer renodlad matematisk beskrivning som överensstämmer bra med det naturliga brandförloppet i fordonsbränder. Detta bygger på det arbete som Ingason [13] har presenterat för brandutveckling av stora bränder i tunnlar. Därmed undviker man de mer förvända strukturer på brandeffektkurvorna som presenterades tidigare.

Brandscenario 1 representerar 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 blir 8 MW. Brandscenario 2 representerar 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. Brandscenario 3 representerar 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.

Tabell 3.11 De brandscenarier som används i analysen av utrymnings- och insatssituationen för vägtunnlar i avsnitt 4 och 5.

Brand-scenario nr	**Typ av fordon**	**Max brandeffekt $\dot{Q}_{max}$ (MW)**	**Tid till max brandeffekt (min)**	**E_{tot} (GJ)**
1	2 personbilar	8	10	14,4
2	Buss	25	12	52.5
3	Lastbil och en buss	75	11	75
4	Långtradare med relativt låg fritt exponerad godsyta och bulkdensitet	100	12,8	150
5	Långtradare med relativt hög fritt exponerad godsyta och bulkdensitet	150	13	225
6	Upphinnande olycka (långtradare+buss +6 personbilar	175	15	367
7	tankbil	200	8	1500

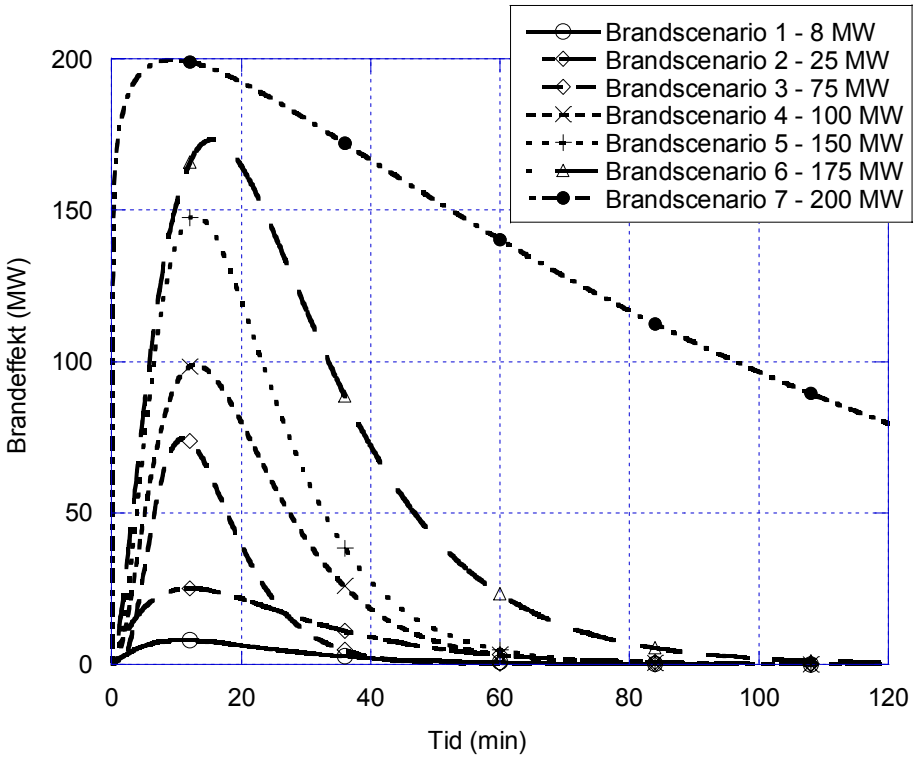
Brandscenarier 4 och 5 representerar brand i en långtradare med olika godstyper. Branden initieras på grund av plötsligt oljeläckage i motorutrymmet under färd och när långtradaren stannar så utvecklas branden snabbt i motorutrymmet och branden sprids från motorutrymmet till lasten ganska omgående. Brandutvecklingen från det att branden sprids till godset bygger på försöken i Runehamar. Försöken i Runehamar visar tydligt samband mellan högsta uppmätta brandeffekt ($\dot{Q}_{max}$) och godsets fritt exponerade area (yta) och brandeffekt per godsyta (MW/m^2). Godsets bulkdensitet har betydelse för brandens varaktighet. I tabell 3.11 föreslås två scenarier, brandscenario 4 och 5, där man gör en skillnad mellan ett gods med relativt låg exponerad godsyta och hög exponerad godsyta. Även bulkdensiteten ingår som en parameter för att variera varaktigheten och därmed energiinnehållet. Brandscenario 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. Alla fordonen som är inblandade i olyckan ger inte högsta brandeffekt samtidigt vilket förklara varför man inte kan lägga ihop de högsta brandeffekterna från varje fordon (150 + 25 + 8 + 8 + 8 = 199 MW). Bandscenario 7 representerar en tankbil med bensin som välter och där bensinen som läcker ut antänds. Branden sprids inte till andra fordon.

Följande matematiska utryck används för att representera de olika brandeffektkurvorna:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1} \tag{3.1}$$

där $\dot{Q}_{\max}$ är maximum brandeffekt (kW) och t är tiden i (s). Denna ekvation har modifierats och bygger på ekvation framtagen av Numajiri and Furukawa [27].



Figur 3.4 Brandscenarier 1 - 7 enligt tabell 3.12.

De olika parametrarna *n*, *r* och *k* i ekvation (3.1) påverkar formen på kurvan på olika sätt. Variabeln *n* kallas för ”retard index”, *k* kallas för ”time width coefficient” och *r* kallas för ”amplitude coeffcient”. För att kunna använda ekvation (3.1), på sådant sätt att $\dot{Q}(t=t_{\max})$ blir lika med $\dot{Q}_{\max}$, så har vi utvecklat ett följande samband mellan *r* och *n*:

$$r = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n} \tag{3.2}$$

Om vi integrerar ekvation (3.1) från t=0 till $t=\infty$, kombinerad med ekvation (3.2), så finner vi ett samband mellan k och totala energivärdet E_{tot}, högsta brandeffekten, $\dot{Q}_{max}$, och n :

$$k = \frac{\dot{Q}_{max}}{E_{tot}} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{1-n} \tag{3.3}$$

Med den information som erhålles med hjälp av ekvation 3.1 – 3.3 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.

I tabell 3.12 anges värden på *n, r* och *k* för olika scenarier där tiden är i sekunder och effekten i kW. Brandeffektskurvorna presenteras i figur 3.4. I redovisningen här tas ingen hänsyn 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. För de scenarier som innehåller långtradare (4 – 6) har n valts lika med 3,2 och 2,6.

Tabell 3.12 Indata för beräkning av de brandscenarier som använts för utrymningsberäkningar i vägtunnlar med hjälp av ekv (3.1).

Brand-scenario nr	**Typ av fordon**	**E_{tot} (GJ)**	**Max brandeffekt, $\dot{Q}_{max}$ (MW)**	**n**	**r** ekv (3.2)	**k** (ekv 3.3) x 10^{-3}
1	2 personbilar	14,4	8	2,1	2,04	1,13
2	Buss	52.5	25	2,0	2,0	0,95
3	Lastbil och en buss	75	75	5	2,44	2,44
4	Långtradare med relativt låg fritt exponerad godsyta och bulkdensitet	150	100	3,2	2,28	1,52
5	Långtradare med relativt hög fritt exponerad godsyta och bulkdensitet	225	150	3,2	2,28	1,52
6	Upphinnande olycka (långtradare+buss +6 personbilar	367	175	2,6	2,17	1,04
7	tankbil	1500	200	1,1	1,27	0,17

3.6 Inverkan av vind på brandtillväxten

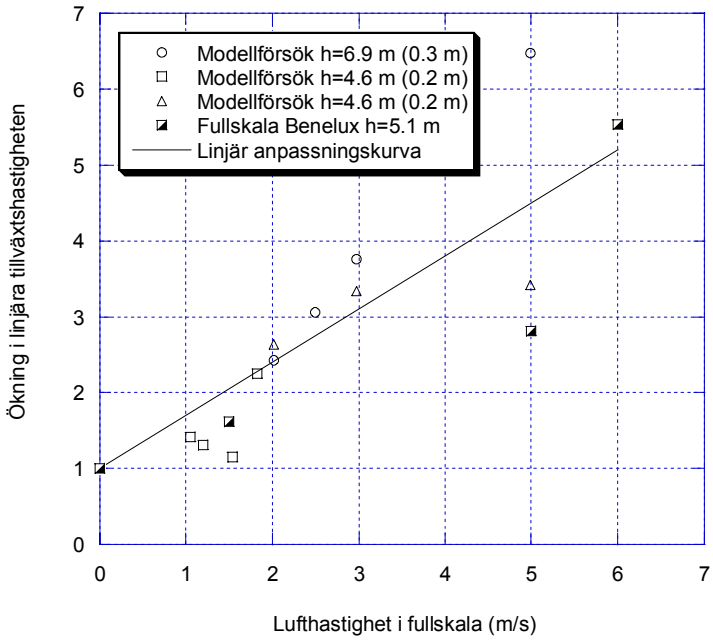
Försök har visat att brandtillväxtshastigheten i långtradare med kapell eller annat brännbart regn- och vindskydd ökar när lufthastigheten ökar i tunneln. Carvel m fl [28] har kvantifierat med hjälp av statistiska metoder i kombination med ett fåtal försök hur mycket denna ökning kan bli. Det har funnits 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 [28] har också gjort undersökningar av vindens inverkan på personbilar och vätskebränder. Analysen visade att vind inte påverkar nämnvärt brandeffekten hos personbilar och att den tenderar att minska den högsta brandeffekten vid vätskebränder.

För att undersöka tillförlitligheten i resultaten från Carvel m.fl. [28] genomfördes en analys av de modellförsök som SP har genomfört i skala 1:23 och även data från nyligen genomförda fullskaleförsök i Benelux-tunneln [14]. 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 tillväxtshastighet. 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 3.5 visas ökningen i den linjära tillväxtshastigheten (linjära tillväxthastigheten för varje lufthastighet är normerad mot linjära tillväxtshastigheten utan ventilation) vid olika lufthastigheter i fullskala. Lufthastigheten för modellskalan har anpassats till fullskala.

Den linjära anpassningskurvan som visas i figur 3.16 har följande form:

$$\gamma = 1 + 0{,}7u \tag{3.4}$$

där γ ger ökningen som funktion av lufthastigheten i tunneln. Enligt figur 3.5 så är ökningen vid 3 m/s ungefär tre gånger tillväxtshastigheten vid normal ventilation och vid 6 m ungefär fem gånger. Enligt ekvation (3.4) så är ökningen vid 10 m/s ungefär åtta gånger vilket är lite lägre jämfört med Carvel resultat (tio gånger). Ekvation (3.4) 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. Överensstämmelsen med Carvels resultat måste dock anses som tillfredställande för vårt ändamål.



Figur 3.5 Ökningen i den linjära tillväxtshastigheten vid olika lufthastigheter (modell och fullskala).

De brandscenarier som delvis bygger på Runehamarförsöken, dvs scenarier 4 - 6, behöver modifieras med hänsyn till inverkan av ventilationen för andra lufthastigheter än 3 m/s. För att anpassa de brandscenarier som finns framtagna vid 3 m/s så kan man normalisera ekv (3.4) för 3 m/s. Då blir ekvationen

$$\frac{\gamma}{\gamma_{3m/s}} = \eta = 0{,}3225 + 0{,}2258u \qquad (3.5)$$

Här är $\gamma_{3m/s} = 1 + 0{,}7 \cdot 3 = 3{,}1$ (dvs ökning med faktor 3,1 vid 3 m/s) och sätter vi in u = 3 m/s i ekv (3.4) så blir $\eta = 1$. Därmed förutsätter vi att ökningen på grund av lufthastigheten vid 3 m/s är inbakat i försöksresultaten från Runehamar för scenarier 4 - 6.

För att korrigera brandeffektkurvorna för brandscenarier 4 - 6 så antas att det går att multiplicera de framtagna kurvorna med η på sådant sätt att tillväxtshastigheten ändras men inte den högsta brandeffekten (modellförsök gjord på SP indikerar att högsta brandeffekten inte påverkas nämnvärt av lufthastigheten om träribbstabeln inte är underventilerad från början). För att göra det så kan man multiplicera k i tabell 3.12 med η, se ekv (3.6). Konsekvensen blir den att avsvalningsperioden förändras i tid och form jämfört med tidigare. Det innebär att den totala integrerade energin blir fel. I utrymningsberäkningarna i avsnitt 4 så undersöker vi endast

effekterna av förändrad tillväxthastighet i utrymningsberäkningarna vilket betyder att avsvalningsfasen inte används i beräkningarna. Ekv (3.2) blir då:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-\eta \cdot k \cdot t} (1 - e^{-\eta \cdot k \cdot t})^{n-1} \qquad (3.5)$$

Ekvationer (3.4) – (3.5) behöver undersökas och verifieras ytterligare eftersom de bygger på antagandet om linjär tillväxtshastighet och är till stor del baserad på modellförsök med träribbstablar som är direkt exponerade av luften som strömmar förbi. Ekvation (3.3) är inte vetenskapligt underbyggda för andra typer av fordon än långtradarlaster med brännbart regn- och vindskydd som försvinner tidigt i branden. För att undersöka hur ventilationen kan principiellt påverka utrymningssituation anses de dock vara tillräcklig noggranna. Av praktiska skäl så har ekvation (3.5) även använts för scenarier än 1-3 och 7 i avsnitt 4.

4 Utrymning vid bränder i vägtunnlar

4.1 Introduktion

Om en brand skulle uppstå i en tunnel blir det i flera fall nödvändigt för dem som befinner sig där att utrymma tunneln. Bilister som tvingas stanna i tunneln måste därför göras medvetna om att de ska utrymma och de måste också ges möjligheter att fysiskt sätta sig i säkerhet. Detta ställer krav på att tunneln ska utformas med installationer som gör det möjligt för bilisterna att bli informerade om branden. Exempel på installationer kan vara detektionssystem med tavlor som informerar bilisterna. Kraven innebär också att tunneln måste utformas på ett sätt som gör det möjligt att utrymma på ett säkert sätt. Det kan innebära att det måste finnas utrymningsvägar i tunneln som leder till en säker plats. Möjligheterna för bilisterna att utrymma på ett säkert sätt beror alltså på ovanstående faktorer samt hur branden vid det aktuella tillfället utvecklar sig. För räddningstjänsten som ska göra en insats finns det därför stora osäkerheter kring konsekvensen av en olycka. Detta leder i sin tur till osäkerhet kring val av taktik och insatsstrategi. Detta behandlas i ett senare avsnitt.

I detta avsnitt görs en beskrivning av hur ett utrymningsförlopp kan se ut och vilka faktorer som är viktiga för utgången. Dessutom redovisas resultat från utrymningsförsök där utrymningsvägar med olika utseende provats. I avsnittet redovisas också en enkel utrymningsmodell som används för att analysera inverkan av olika variabler på möjligheterna att utrymma säkert. Modellen kan användas för att beskriva hur långt från branden en grupp med bilister hinner förflytta sig innan branden gör det omöjligt att fortsätta utrymningen. Denna känslighetsanalys utgår från de brandscenarier som introducerades i föregående avsnitt.

4.1.1 Beteende i samband med brand

Generellt sett är personers beteende förnuftigt i en utrymningssituation. De aktiviteter som personerna gör i en sådan situation är visserligen inte alldeles effektivt utförda eller helt rationella men det är ovanligt med fullständigt irrationellt beteende. Det finns mycket forskning om det mänskliga beteendet i samband med brand vilket underbygger påståendet. Canter [29, 30], Sime [31] och Frantzich [32] redovisar allmänt om mänskligt beteende och experimentella resultat. I dessa referenser finns hänvisning till vidare läsning.

Kunskapen om hur människor beter sig gör det möjligt att förutsäga hur personer kan förväntas bete sig i samband med att det brinner i en tunnel. Bilen som bilisterna sitter i, upplevs som en känd och familjär miljö medan utanför är det mer okänd mark. Det betyder att personer är mer villiga att stanna kvar i den välkända och trygga miljön än att omedelbart lämna bilen för att utrymma. Detta beteende kan antas vara mer påtagligt i en tunnelmiljö jämfört med i en byggnad. I en byggnad befinner sig personen redan i den kanske inte helt välkända miljön, medan en vägtunnel är en plats som människor i princip aldrig vistas i utom när de sitter i bilen. Vägtunneln är alltså en mycket okänd och ovan miljö för en bilist som lämnat bilen. Det krävs därför ett tydligt tecken på att allt inte är som det ska för att förmå en bilist att lämna bilen och bege sig ut i tunneln. Det kan därför vara rimligt att anta att bilisterna inte omedelbart lämnar sina fordon när en kösituation uppstår utan det krävs mer signaler eller tecken som indikerar att en brand inträffat för att

personerna ska lämna sina fordon. En bilists beslutsfattande påverkas också av hur andra personer beter sig. Om en person beslutar sig för att lämna sin bil är det också troligt att fler bilister gör samma sak. Då har det blivit legitimt att ”rätt beteende” är att lämna bilen. Personen riskerar då inte längre att göra fel.

Norén och Winér [33] utvärderade nio utrymningsförsök som genomfördes i en Holländsk tunnel. Det framgick mycket tydligt att majoriteten av bilisterna satt kvar i sina bilar även om det fanns rök i tunneln. Röken i dessa försök var visserligen konstgjord och inte så tjock men innehöll luktämnen av gasol vilket ändå inte fick bilisterna att lämna fordonen. Försöken utgör inte något belägg för att situationen alltid blir på detta sätt men visar att det kan finnas en ganska stor benägenhet hos bilisterna att inte göra något alls och istället vänta på att den uppkomna situationen ska lösas upp. Den vanliga orsaken till att det bildas köer i tunnlar är ju inte brand utan att trafiksituationen gör att det uppstår köer. Det förmodade resonemanget hos bilisterna blir då att det är värre att lämna sin bil i tunneln, som kan orsaka ytterligare trafikproblem, eftersom det troligen inte brinner jämfört med att anta att det brinner och därför överge fordonet.

För att underlätta beslutsfattandet för bilisterna är det en fördel om det finns information om den inträffade branden. Detta kan ske på en rad olika sätt. Det finns inga enhetliga väginformationstavlor utan varje tunnel har i princip sitt sätt att utforma denna information på. Just informationstavlor har blivit vanliga men det finns andra sätt att informera på, t ex via bilradio och med hjälp av belysningsförändring i tunneln.

Erfarenheter från några av de värre tunnelolyckorna förstärker vikten av att ge information till bilisterna. I branden i Mont Blanc-tunneln hittade räddningsmanskapet omkomna bilister sittandes i sina bilar med säkerhetsbältena fastspända. Detta vittnar om att de inte observerat faran i tid utan dröjt för länge med att fatta beslut om att lämna bilen. Om dessa fått hjälp att fatta rätt beslut finns möjligheten att de skulle kunna ha hunnit utrymma.

Det finns också en koppling mellan brandförloppet och den tid som finns tillgänglig för att besluta sig att utrymma. Vid mindre bränder är inte behovet av en verkligt snabb utrymning lika påtaglig som i fallet med snabba och stora bränder. Vid branden i Ekebergstunneln i Oslo 1996 finns det dokumenterat att flera personer går omkring i tunnel och tittar på branden istället för att utrymma [34]. Det är i inledningsskedet ingen större fara och personerna har uppenbarligen uppfattat situationen som tunnelbrand.

4.1.2 Reaktionstid

En fråga som är aktuell vid en säkerhetsgranskning är hur lång tid det tar innan bilisterna lämnar sina bilar. Det finns olika teorier om detta och dataunderlaget från försök är ganska magert för utrymning av vägtunnlar. Dock finns resultat från Norén och Winér [33] som kan användas för vissa situationer. De tider som redovisas är förhållandevis långa, i storleksordningen flera minuter, innan alla bilisterna lämnat sina bilar. Detta har troligen också att göra med hur försöken var upplagda och att branden inte uppfattades som speciellt allvarlig. Men det finns inget som tyder på att utrymningen skulle starta momentant i samband med att branden börjar. Det är också ganska troligt att bilisternas reaktionstid, d v s tiden som passerar innan de påbörjar sin utrymning, beskrivs som en fördelning av olika tiden främst beroende på var i tunneln de befinner sig. Bilister som är nära branden kommer troligen att påbörja sin utrymning tidigare än de som står längre bak i kön.

Variationen kan också bero på andra faktorer t ex den enskilda bilistens tidigare erfarenhet av bränder.

En annan viktig faktor som kan påverka reaktionstiden är från vilket håll som brandgaserna kommer mot en bilist. Vanligen antas det att brandgaserna kommer framifrån mot den kö av bilister som bildats. Men branden kan också uppstå bakom kön av bilister i samband med en upphinnandeolycka. Brandgaserna kommer då bakifrån och bilisterna ser inte detta direkt vilket kan innebära längre reaktionstider.

4.1.3 Förflyttning i tunneln

När bilisterna väl har kommit ut i tunneln ska de förflytta sig till en säker plats. Det innebär att de ska söka sig till tunnelmynningen eller till en utrymningsväg inne i tunneln. Förflyttningen kommer med all sannolikhet att ske i vindriktningen bort från branden och brandgaserna. Det kan tänkas att vissa personer försöker passera branden för att komma uppströms och på det viset få en bättre utrymningssituation men för lite större bränder kommer denna möjlighet att begränsas ganska tidigt.

Ett troligt beteende i samband med att bilisterna lämnat sina bilar är att de stannar upp en tid och tar kontakt med varandra för att komma fram till ett gemensamt beslut att fortsätta utrymningen mot en utrymningsväg. Denna tvekanstid diskuteras också av Norén och Winér [33]. I de försök som refereras är tvekanstiden också i storleksordningen flera minuter. Faran från branden bedömdes uppenbarligen inte av de inblandade som speciellt allvarlig mot bakgrund av denna tid.

Tanken är att bilister som utrymmer ska välja att gå mot en utrymningsväg inne i tunneln om sådana finns. Utrymningsvägar kan finnas om tunneln består av minst två parallella tunnelrör och utgörs av tvärförbindelser mellan dessa. Om utrymningsvägar saknas i tunneln återstår endast för bilisterna att bege sig mot tunnelns mynning.

Men även i fallet då det finns utrymningsvägar uppstår frågan om utrymningsvägarna verkligen kommer att användas. Erfarenheter från inträffade bränder belyser problemet och många som utrymmer försöker ta sig mot tunnelmynningen istället eftersom den utgör en känd väg ut.

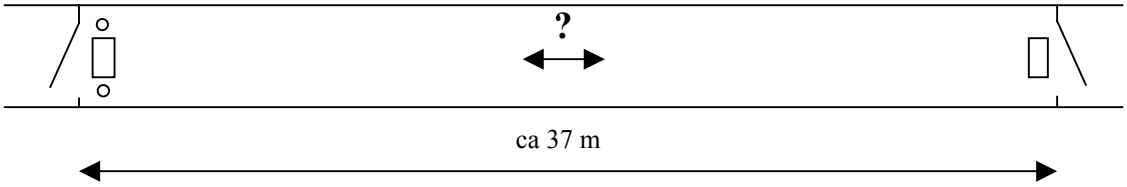
För att öka säkerheten vid utrymning av dubbelrörstunnlar är det önskvärt att bilisterna använde de utrymningsvägar som finns i tunneln. Frågan som uppstår är hur dessa bör vara utformade för att på bästa sätt vara mer attraktiva för en utrymmande bilist jämfört med att fortsätta mot tunnelmynningen. För att försöka besvara denna fråga genomfördes ett antal försök med olika utformade utrymningsvägar. Försöken har genomförts som en separat del av det föreliggande projektet och redovisas i Frantzich [35]. En kort sammanfattning av resultaten följer nedan.

4.2 Identifiering av utrymningsväg i tunnel

Försöken har utgått från tanken att utrymningsvägar som utformas på ett sätt som gör att de lättare uppmärksammas som utrymningsvägar också väljs i större utsträckning. De ordinarie markeringarna vid utrymningsvägarna som användes i försöken kompletterades med blinkande ljus eller blixtljus. Ljusets färg varierades också mellan försöken där grönt och orange ljus provades. Figur 4.1 visar hur en ordinarie utrymningsmarkering kompletterats med blixtljus.

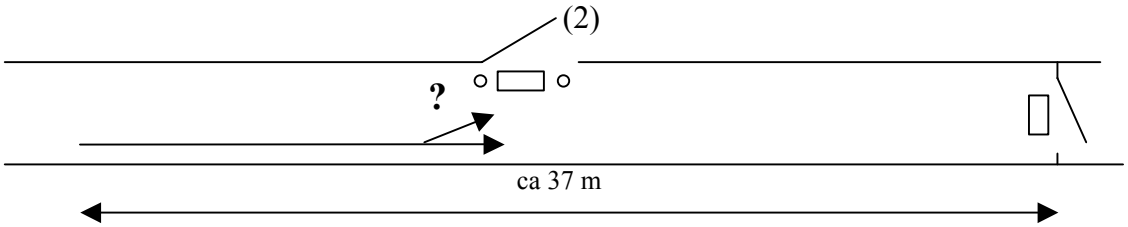
Figur 4.1 Genomlyst utrymningsskylt med kompletterande blixtljus.

Totalt åtta olika kombinationer med ljus undersöktes och två olika försökssituationer ingick i försöket. Den första situationen innebar att en försöksperson placerades i en valsituation och fick där välja mellan två utrymningsvägar, figur 4.2. Personen stod från början på en plats mellan dem och markeringarna vid den ena av utrymningsvägarna försågs med en förbättrad märkning. Avståndet till de två alternativen varierades också. Det som undersöktes var om den förbättrade märkningen innebar att fler försökspersoner valde den vägen.



Figur 4.2 Beslutssituationen i den första delen av försöken.

Den andra försökssituationen liknade mer en tunnelsituation, figur 4.3. I ena änden av en korridor fanns en synlig utrymningsväg (1). Försökspersonen började då gå mot den utgången. Efter en sträcka i korridoren blev en annan utrymningsväg (2) synlig. Den andra utrymningsvägen kunde då symbolisera en utrymningsväg till en tvärförbindelse. Frågan var om försökspersonen valde att fortsätta till den från början valda utgången eller om personen istället bytte strategi och valde den nya utgången. Det kunde antas att den första utgången uppenbart ledde till en säker plats medan den andra utgången utgjordes av en dörr i väggen.



Figur 4.3 Beslutssituationen i den andra delen av försöken

De utgångar som hade försetts med en förbättrad markering i form av blinkande eller blixtrande lampor valdes i större utsträckning av försökspersonerna. Effekt var speciellt påtaglig i den andra försökssituationen. Utgångar markerade med gröna lampor eller blixtljus valdes i större utsträckning än de som hade orange färg i ljusskenet. Detta är troligen kopplat till att grön färg associerades med säkerhet.

Det som kan vara intressant att undersöka är vilken färg som skulle ge störst effekt på valet av utrymningsväg. Det kan hävdas att grönt associeras till säkerhet men också blå färg skulle kunna associeras till räddning eller liknande eftersom räddningstjänsten har blått blinkande ljus på bilarna Mc Clintock [36]. Denna ståndpunkt är visserligen dåligt belagd och den strider mot den teoretiska grunden för hur färger uppfattas. Även orange skulle kunna innebära ett visst mått av säkerhet. I samband med försöken undersöktes därför attityden till olika färger för att se om vissa färger var förknippade med en viss symbolisk innebörd. I undersökningen visade det sig att grön färg överlägset hade den högsta kopplingen till innebörden säkerhet. Röd färg var nästan lika starkt förknippad med fara. Övriga färger var mer neutrala och blå färg hade inte någon egentlig symbolisk innebörd. Slutsatsen bör därför vara att grönt ljus bör användas om blinkande eller annat uppmärksamhetsljus ska användas i samband med utrymning.

4.3 Analys av utrymning i vägtunnel

För att kunna säga något om hur ett utrymningsförlopp kan se ut för olika brandscenarier behövs någon form av matematisk modell. Ett flertal sådana finns tillgängliga för att beräkna utrymningstider mm. I det aktuella projektet passade inte någon befintlig utrymningsmodell eftersom kopplingen mellan utrymning och brandgasexponering skulle undersökas. En enkel modell utvecklades därför för att kunna göra en känslighetsanalys av utrymningsförloppet. Modellen är i grunden uppbyggd på ett liknande sätt som den tågutrymningsmodell som användes i Bergqvist m.fl. [4]. Den innebär att personer som utrymmer genom tunneln exponeras för brandgaser och värmeeffekten från branden. Möjligheten att utrymma säkert till en tunnelmynning eller till en utrymningsväg i tunneln är då beroende på hur personerna klarar av att vistas i denna miljö.

Som indata till modellen anges var bilisterna är i tunneln när branden startar, deras reaktionstid (dvs tiden mellan det att branden startar och att bilisten påbörjar sin utrymning), lufthastighet i tunneln, tvärsnittsarea för tunneln och en beskrivning av brandförloppet. En rad variabler hålls konstanta vid alla simuleringen för att minska på den totala osäkerheten, t ex produktion av sotpartiklar, giftiga gaser som CO och CO_2, parametrar i den toxiska modellen samt temperaturen innan branden startar.

Modellen beräknar hur långt från branden de bilister som utrymmer hinner i tunneln. Förutsättningen är att bilisten inledningsvis sitter i sin bil. En kö med bilister kan simuleras samtidigt. Efter en viss tid upptäcks branden. Bilisten lämnar sin bil och börjar utrymma mot närmaste utrymningsväg. Utrymningsvägen kan utgöras av en utrymningsväg i tunneln eller av tunnelmynningen.

Under hela utrymningsförloppet i tunneln påverkas bilisten av brandgasernas giftighet, av den förhöjda temperaturen och värmestrålningen från branden. Det betyder att varje bilist ackumulerar en viss dos ’giftighet’ i kroppen. När denna dos överskrider ett gränsvärde för hur mycket varje bilist tål antas det att bilisten blir medvetslös. Metoden att uppskatta den giftiga dosen som varje bilist exponeras för under förloppet kallas för Fractional Effective Dose, FED och finns beskriven i

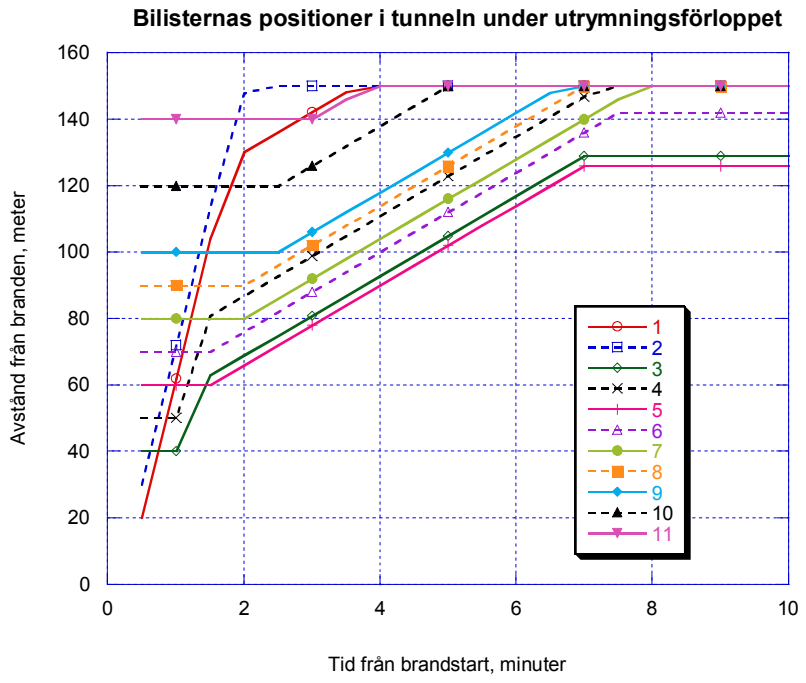
Purser [37]. Under utrymningsförloppet kommer bilisten också i många fall att utrymma genom täta brandgaser. Det betyder att gånghastigheten reduceras till följd av den dåliga sikten.

Samtliga dessa komponenter: dålig sikt, giftiga brandgaser, hög temperatur och värmestrålning har kombinerats till utrymningsmodellen som ger en indikation om möjligheten att överleva vid olika brandförlopp. Modellen har använts för att genomföra en rad känslighetsanalyser för att identifiera vilka variabler som påverkar utrymningen och i vilken omfattning. Modellen ger en rad resultat om förhållandena vid utrymningen t.ex.

- hur långt varje bilist kan förflytta sig från branden
- siktförhållandena under utrymningen för respektive bilist
- ackumulerad dos giftiga gaser för respektive bilist
- ackumulerad värmemängd (strålning och temperatur) för respektive bilist
- temperatur och strålningsnivåer under förloppet för respektive bilist

I bilaga B2 finns en detaljerad beskrivning av vilka delar som ingår i beräkningarna. Den teoretiska beskrivningen av de ingående komponenterna i modellen beskrivs inte i denna rapport.

Figur 4.4 visar ett exempel på hur långt elva bilister som från början sitter i en bilkö kan förflytta sig när en brand inträffar. Scenariot kan liknas det som visas i figur 4.7. Första bilisten sitter i sin bil ca 20 m från branden och den sista ca 140 m från branden. Avståndet är 150 m mellan branden och första utrymningsväg nedströms branden vilket då innebär att den sista bilisten i kön endast behöver gå 10 m för att komma till en säker plats. I exemplet klarar sig alla hela vägen fram till utgången utom bilisterna tre, fem och sex. Total utrymningstid är ca åtta minuter (för sista bilist).



Figur 4.4 Utrymningssträcka för de 11 bilisterna baserat på beräkningsmodellen. Förutsättningen i figuren är att brandscenario 5 (150 MW lastbilsbrand) inträffat i en tunnel med 50 m^2 tvärsnitt, 2 m/s lufthastighet, grunduppsättning bilister och maximalt 150 m till närmaste nödutgång.

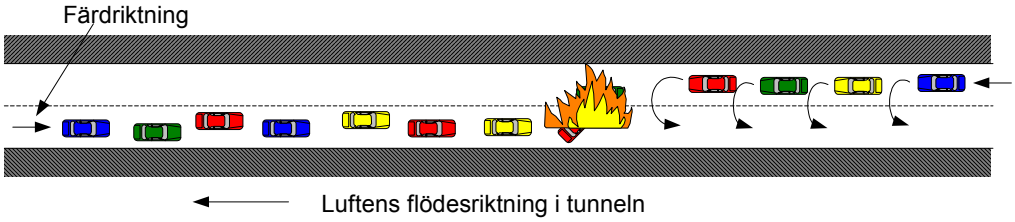
4.4 Beskrivning av utrymningsscenarierna

I avsnitt 2 introducerades tre typtunnlar;

- 1) enkelrörstunnel med dubbelriktad trafik
- 2) dubbelrörstunnel med enkelriktad trafik (en-filig)
- 3) dubbelrörstunnel med enkelriktad trafik (fler-filig)

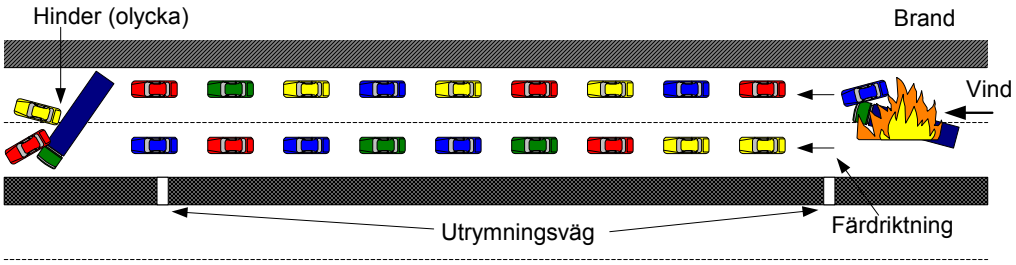
Dessa utgör grunden för den analys av utrymningsförloppet som redovisas i detta avsnitt.

För bilisterna i den dubbelriktade enkelrörstunneln, typtunnel 1, kommer bilarna i ena körfältet att tvingas stanna p.g.a. en olycka som ger upphov till branden. De bilister som drabbas är de som kör mot vindriktningen, se figur 4.5. När de stannat har de små möjligheter att vända sina bilar och köra ut igen. Bilisterna på andra sidan branden har större möjligheter att vända eftersom de kan vända i en tryggare miljö då brandgaserna sprids åt motsatta hållet. Det blir alltså en kö med bilar som påverkas av branden och dessa bilister tvingas utrymma genom den brandgasfyllda tunneln till mynningen.



Figur 4.5 Tunneltyp 1 (ett tunnelrör med dubbelriktad trafik, se tabell 2.1). Tunneltvärsnittet är 50 m^2. Bilister till höger vänder och kör ut.

I tunneltyp 2 och 3 kan en kösituation som medför att bilister tvingas utrymma genom brandgaserna endast uppstå om det sker en så kallad upphinnandeolycka vilken i sin tur medför att en brand utbryter, figur 4.6. Skillnaden mellan tunneltyp 2 och 3 är storleken på tunneltvärsnittet och därmed antalet filer i tunneln. Upphinnandeolyckan inträffar då en kö bildats i tunneln. Kön kan exempelvis vara orsakad av att en olycka inträffat vilken tvingar bilisterna efter att stanna. Bilar som befinner sig framför olyckan kan fortsätta att köra ut och omfattas inte av problemet. Bilister som kommer körande mot olyckan måste sakta in. I denna situation kan det inträffa ytterligare en krock där branden uppstår. De bilister som då drabbas är de som befinner sig mellan den första krocken och den andra där som branden utbrutit. Eftersom vindriktningen ofta är densamma som färdriktningen i tunneln kommer brandgaser att strömma över dem som sitter i bilarna mellan de två olyckorna. Det som är ytterligare problematiskt är att branden i detta fall är belägen bakom bilisterna vilket försvårar upptäckten. Det kan innebära att tiden innan bilisterna påbörjar sin utrymning är längre i detta fall. Detta har dock inte kunnat konstateras i några verkliga fall och detta har heller inte analyserats speciellt i känslighetsanalysen.



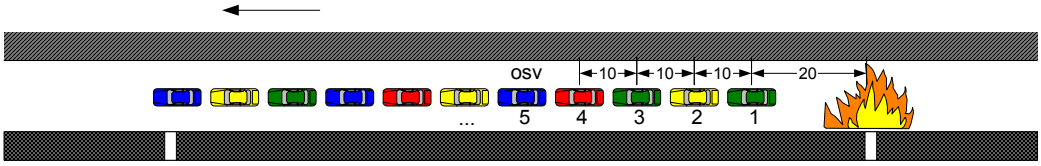
Figur 4.6 Tunneltyp 3 (två tunnelrör med enkelriktad trafik i två filer, se tabell 2.1). Tunneltvärsnittet är 90 m^2.

4.5 Förutsättningar för analysen

I huvudsak har beräkningarna genomförts på de tre tunneltyper som presenterades i avsnitt 2 och som förtydligades i föregående avsnitt. Det betyder att två tunnelstorlekar och både dubbelrörstunnel och enkelrörstunnel undersökts. Utrymningsanalysen kan dock förenklas till ett enda beräkningsfall som karakteriseras av att bilister i en bilkö utrymmer undan brandgaser. Alla tre

tunneltyperna kan således betraktas på samma sätt. Skillnaden mellan tunneltyp 1 och de övriga två är att i de senare fallen kommer brandgaserna bakifrån. Skillnaden mellan tunneltyp 2 och 3 är enbart tvärsnittsarean och antalet inblandade bilar. Men eftersom antalet personer i varje bil inte är en förutsättning för analysen kan dessa två tunneltyper likställas med avseende på detta. Skillnader i resultatet med avseende på tvärsnittsareans betydelse undersöks dock. Skillnaden mellan beräkningsfallen blir i praktiken begränsade till dem som styrs av tunnelns utformning och brandförloppet. Givetvis påverkas också resultatet av egenskaperna för de bilister som utsätts för branden men analyssituationen är likartad för alla tre tunneltyperna.

I de beräkningar som presenteras nedan finns det en grunduppställning med bilister, se figur 4.7 och tabell 4.1. Uppsättningen bilister definieras med ett avstånd från branden där de befinner sig från början av förloppet samt av en reaktionstid innan de lämnar sina bilar. Det antas att det sitter en bilist i varje bil och att det inte sker någon interaktion mellan bilisterna när de kommer ut i tunneln. Antalet bilister i varje bil har ingen inverkan på resultatet som presenteras i rapporten men är givetvis viktig när en säkerhetsvärdering av en vägtunnel ska göras. I tunneltyp 3 finns det två filer med bilister men dessa behandlas av samma skäl bara som en bilist per avstånd från branden i grunduppställningen enligt nedan.



Figur 4.7 Fördelning av bilister i standarduppsättningen.

Avstånden mellan bilarna är något längre än vad som kan förväntas gälla för en verklig kösituation. En undersökning om avstånd mellan köande bilar har gjorts och i genomsnitt är avståndet närmare 6 m men varierar givetvis med biltypen. Trots detta har avståndet 10 m valts för enkelhets skull i analysen. Bilisterna har numrerats för att lättare kunna identifieras i resultatsammanställningen. Bilist ett är den som inledningsvis är placerad närmast branden följt av nummer två och så vidare.

Bilisternas reaktionstid innan de väljer att lämna sina bilar är en mycket osäker variabel. Reaktionstiden är här definierad som tiden mellan branden startat och bilisten påbörjar sin förflyttning till en utrymningsväg. Den innehåller alltså den period som i inledningen benämndes tvekanstid. Vanligen är det naturliga beteendet att inte lämna bilen och istället vänta på information. Detta diskuterades i inledningen till avsnittet. I antagandet om de använda reaktionstiderna ligger det faktum att brandförloppet i alla sju bränderna är ganska snabbt och detta skulle innebär att personerna ganska fort fattar beslut om att utrymma. Branden är mycket påtaglig och genererar en stor mängd brandgas och hög strålningsintensitet. Att det brinner torde vara mycket tydligt. Detta är motivet till att de använda tiderna är mycket kortare jämfört med dem som exempelvis presenteras av Norén och Winér [33]. Även fördelningen av bilisternas reaktionstid har undersökts i känslighetsanalysen.

Tabell 4.1 Beskrivning av bilister som ingår i grunduppställningen.

Bilist nummer	Inledande avstånd från branden, meter	Tid innan utrymningen påbörjas, sekunder.
1	20	40
2	30	40
3	40	60
4	50	60
5	60	90
6	70	90
7	80	120
8	90	120
9	100	150
10	120	150
11	140	180

Den tunnel som beräkningarna genomförts på är tänkt att följa svenska normer. Det betyder att det i normalfallet är 150 m mellan utrymningsvägarna. Detta avstånd baseras på rekommendationen i Vägverkets tekniska beskrivning för vägtunnlar, Tunnel 99, om minsta avstånd mellan insatsvägar för räddningstjänsten.

Branden inträffar alltid utanför en av utrymningsvägarna och blockerar därför denna.

Möjligheterna att utrymma har analyserats med avseende på variablerna i tabell 4.2. I analysen undersöks inte alla möjliga kombinationer av värden utan de som bedömdes som de viktigaste. För att få en grov uppskattning av möjligheterna att överleva i en tunnel görs också beräkningar för det fall som en bilist väljer att inte utrymma. Dessa beräkningar ska främst ge information om möjligheterna att rädda dessa bilister vid en eventuell räddningsinsats. Dessa resultat redovisas därför separat från de fem brandscenarierna.

Tabell 4.2 Förutsättningar för känslighetsanalysen.

Variabel	Undersökta värden
Brandförlopp	Samtliga sju brandscenarier (se tabell 3.11) undersöks.
Tunnelns tvärsnittsarea	Två areor undersöks; 50 m2 och 90 m2.
Längsta gångavstånd till närmaste utrymningsväg	Sex olika avstånd undersöks; 75, 100, 150, 200, 300, 450 m. I normalfallet är det 150 m mellan utrymningsvägarna vilket är samma maximala avstånd som till närmaste utrymningsväg.
Lufthastighet	Tre olika lufthastigheter undersöks; 1; 2 och 5 m/s.
Bilisternas reaktionstid	Utgångspunkten är tider enligt tabell 4.1 Dessa kan ökas med en faktor 1,5, 2 eller 3.
Avståndet mellan branden och de följande bilarna	Utgångspunkten är avstånd enligt tabell 4.1. En samtidig minskning med 15 m för respektive avstånd undersöks.

Det bör speciellt påpekas att brandeffekten i de scenarier som undersöks är direkt beroende på vilken lufthastighet som råder i tunneln. I avsnitt 3.5 introducerades de sju brandscenarierna med tillhörande effektutvecklingar. Men de brandscenarier som bygger på resultaten från Runehamar försöken, d.v.s. brandscenario 4, 5 och delvis 6, är framtagna då lufthastigheten är 3 m/s. I känslighetsanalysen som presenteras i följande avsnitt kommer lufthastigheten att varieras för alla brandscenarierna (ett antagande som inte är helt korrekt för brandscenario 1 - 3 och 7) enligt ekvation 3.5, vilket innebär att också brandeffekten kommer att vara olika beroende på vilken lufthastighet som råder i det aktuella fallet.

Om lufthastigheten är lägre än 3 m/s kommer också brandutvecklingshastigheten att vara lägre. Omvänt skulle också gälla om lufthastigheten var över 3 m/s men eftersom det främst är tillväxttakten för branden som påverkas av lufthastigheten sätts en begränsning på brandeffekten som gör att den inte överstiger vad som antagits i avsnitt 3.5.

4.6 Resultat av känslighetsanalysen

4.6.1 Brandscenario 1

I praktiken utgör inte den lilla personbilsbranden något större hot mot bilisterna. Oavsett tunneltyp, lufthastighet eller andra kombinationer av variablerna ovan så kommer alla bilisterna att hinna fram till en utrymningsväg innan kriterierna då utrymning inte längre är möjlig uppnåtts.

4.6.2 Brandscenario 2

I detta scenario antas att branden utbrutit i en buss. Brandeffekten är maximalt 25 MW vilket dock inte utgör någon större fara för bilisterna som ska utrymma. I normalfallet kommer inte några bilister att hindras från att nå en utrymningsväg. De enda fall då någon bilist riskerar att drabbas av konsekvensen från bussbranden är om bilisten inledningsvis är mycket närmare branden än de 20 m som antagits. Då kommer den första bilisten att hindras från att utrymma och detta är då p.g.a. att värmestrålningen är så hög i och med att avståndet mellan branden och bilisten är så kort. I praktiken behöver det dock inte vara ett problem eftersom det finns möjligheter att hinna undan och ta skydd av t ex andra fordon mm. Detta resultat uppkommer för alla de provade lufthastigheterna. Tabell 4.3 redovisar de beräkningsfall som undersökts och vad de får för konsekvens. Resultatet anges som de bilister som inte hinner sätta sig i säkerhet och i vissa fall också vad det beror på.

Tabell 4.3 Resultat från utrymningssimuleringar med brandscenario 2 (bussbrand).

Brand	Tvär-snitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Förutsättning	Bilist som ej når utrymningsväg
2	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1	-
2	90	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1	-
2	50	1, 2, 5	200	enl tabell 4.1	-
2	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1 men ×1,5 reaktionstid	-
2	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	-
2	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1 men -15 m på avståndet	1 (pga värme-strålning)
2	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid och -15 m på avståndet	1 (pga värme-strålning)
2	50	1, 2, 5	300	enl tabell 4.1	-
2	50	1, 2, 5	300	enl tabell 4.1 men ×1,5 reaktionstid	-
2	50	1, 2, 5	450	enl tabell 4.1 men ×1,5 reaktionstid	-
2	50	1, 2, 5	450	enl tabell 4.1 men ×3 reaktionstid	-

Den totala utrymningstiden varierar mellan knappt 10 minuter för de mer gynnsamma fallen till ca 13 minuter när reaktionstiden är längre. Om dessutom avståndet mellan utrymningsvägarna i tunneln ökar från 150 m så kommer också utrymningstiden att öka. Med ett avstånd på 300 m kommer utrymningstiden att hamna kring 20 minuter.

Den bilist som i några fall inte kan sätta sig i säkerhet hindra p.g.a. den höga värmestrålningen från branden. Detta inträffar när avståndet mellan första bilist och branden är litet.

4.6.3 Brandscenario 3

Detta scenario karakteriseras av att både en buss och en mindre lastbil börjar brinna. 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. En mindre del av resultaten redovisas i tabell 4.4 eftersom skillnaden gentemot tidigare scenario inte var så stor. De fall då lufthastigheten är hög samtidigt som tunneltvärsnittet är litet och bilisterna reagerar långsammare än i grunduppställningen leder till att bilister inte når utrymningsvägen.

Tabell 4.4 Resultat från utrymningssimuleringar med brandscenario 3 (buss- och lastbilsbrand).

Brand	Tvär-snitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Förutsättning	Bilist som ej når utrymningsväg
3	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1	-
3	90	5	150	enl tabell 4.1	-
3	50	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1 men ×1,5 reaktionstid	-
3	50	1, 2	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	-
3	50	5	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	3 (nästan framme)
3	50	5	300	enl tabell 4.1	-

Det är sannolikt att den gynnsamma situationen till stor del beror på att brandförloppet relativt övriga brandscenarier är långsammare. En mindre analys med ett något snabbare brandförlopp fast i övrigt lika förutsättningar indikerar en ytterligare allvarligare situation med större konsekvens. Detta tillsammans med informationen i tabellen ovan indikerar att gränsen för när utrymningen kan börja bli problematisk närmar sig. För att undersöka detta närmare genomförs simuleringar med en ytterligare något allvarligare brand, brandscenario 4, vilket redovisas i följande avsnitt.

4.6.4 Brandscenario 4

Branden i detta scenario ökar i omfattning på ett sätt som är snabbare jämfört med tidigare scenario men långsammare än det som följer. Det innebär att både tillväxthastighet och maximal brandeffekt ligger mellan brandscenarierna 3 och 5. Det som brinner i detta fall är en långtradare.

Tabell 4.5 Resultat från utrymningssimuleringar med brandscenario 4 (långtradare).

Brand	Tvär-snitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Förutsättning	Bilist som ej når utrymningsväg
4	50	1, 2	150	enl tabell 4.1	-
4	50	5	150	enl tabell 4.1	1, 3-6
4	90	1, 2, 5	150	enl tabell 4.1	-
4	50	2	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	1-7
4	90	2	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	-
4	50	1	150	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	-
4	50	5	100	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	1-3 (2 och 3 nästan framme)
4	50	5	75	enl tabell 4.1 men ×2 reaktionstid	-

Resultatet i detta fall indikerar att det kan förväntas bli svårt att utrymma tunneln innan kritiska förhållanden inträffar. Speciellt gäller detta för det mindre tunneltvärsnittet och för det fall då lufthastigheten är hög. Den höga lufthastigheten påverkar ju brandförloppet så att effektökningen är snabbare. Just den snabbare effektökningen verkar vara väl så allvarlig som den maximala brandeffekten.

Den totala utrymningstiden för bilisterna är i storleksordningen 5-9 minuter med ordinarie reaktionstid. Utrymningstiden ökar ett par minuter när reaktionstiden antas vara dubbelt så lång som i grunduppsättningen i tabell 4.1. Denna utrymningstid leder fram till att brandförloppet fortfarande är i tillväxtfasen då utrymningen är avklarad. Brandeffekten varierar då, beroende på förutsättningarna i scenariot, mellan grovt uppskattat 40 MW och 80 MW. Detta konstaterade är ytterligare ett skäl till att betrakta just tillväxthastigheten för brandförloppet som viktig för utgången av ett utrymningsförlopp.

4.6.5 Brandscenario 5

Scenariot förutsätter en förhållandevis omfattande brand och det leder också till stora konsekvenser. I princip kommer nästan alla fall med en lufthastighet över 1 m/s att resultera i bilister som inte når fram till en utrymningsväg. För scenariot med en lufthastighet på 1 m/s är brandförloppet lindrigare jämfört med beskrivningen i avsnitt 3.5.

För att öka möjligheterna att hinna sätta sig i säkerhet kan det maximala gångavståndet minskas. Beräkningarna visar att den gynnsamma situationen dock främst gäller för det större tunneltvärsnittet, i beräkningen antaget till 90 m^2.

Tabell 4.6 Resultat från utrymningssimuleringar med brandscenario 5 (långtradare).

Brand	Tvär-snitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Förutsättning	Bilist som ej når utrymningsväg
5	50	1	150	enl tabell 4.1	-
5	50	2	150	enl tabell 4.1	3, 5-6 (6 nästan framme)
5	50	5	150	enl tabell 4.1	1-9
5	90	1	150	enl tabell 4.1	-
5	90	2	150	enl tabell 4.1	-
5	90	5	150	enl tabell 4.1	3 och 5
5	50	1, 2, 5	75	enl tabell 4.1[1]	-
5	50	1, 2	75	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	-
5	50	5	75	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	1-2
5	90	1, 2, 5	75	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	-
5	50	1, 2	100	enl tabell 4.1[1]	-
5	50	5	100	enl tabell 4.1[1]	3
5	50	1	100	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	-
5	50	2	100	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	1-3 (2 och 3 nästan framme)
5	50	5	100	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	1-5 (4 och 5 nästan framme)
5	90	1, 2, 5	100	enl tabell 4.1[1] men ×1,5 reaktionstid	-

[1] Beräkning har gjorts för det antal bilister som befinner sig mellan branden och utgången vilket är färre än elva.

Tabell 4.6 redovisar konsekvensen för de beräkningsfall som undersökts. Resultatet anges liksom för scenario 2 som de bilister som inte hinner sätta sig i säkerhet. En intressant iakttagelse är att de situationer som innebär att bilister inte når en utrymningsväg sker i ett tidigt skede i brandförloppet. Medvetslöshet inträffar för brandscenario 5 mellan 4-8 minuter efter det att branden startat. Det är alltså i brandförloppets tillväxtfas som kriterierna för säker utrymning överskrids. Orsaken till att bilister inte når utrymningsvägen är i alla fall att de andats in för mycket giftig brandgas.

Den totala utrymningstiden för bilisterna i dessa beräkningsfall varierar mellan ca 5 minuter till 10 minuter. De kortare tiderna gäller för situationer då det är ett kort avstånd mellan utrymningsvägarna. Tiderna gäller endast för de bilister som når en utrymningsväg.

4.6.6 Brandscenario 6 och 7

Ett mindre antal beräkningar har också gjorts för brandscenarierna 6 och 7. Anledningen till att dessa behandlas mer översiktligt är att konsekvensen för bilisterna som utrymmer liknar de som gäller för scenario 5 men ytterligare något allvarligare. För att bilisterna ska hinna utrymma till närmaste utrymningsväg måste tunnelns tvärsnitt vara stor samtidigt som lufthastigheten ska vara låg. Då finns möjligheten att bilisterna hinner sätta sig i säkerhet.

Tabell 4.7 Resultat från utrymningssimuleringar med brandscenario 6 och 7.

Brand	Tvär-snitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Förutsättning	Bilist som ej når utrymningsväg
6	50	1	150	enl tabell 4.1	-
6	50	2	150	enl tabell 4.1	1-7
6	50	5	150	enl tabell 4.1	1-9
6	90	1	150	enl tabell 4.1	-
6	90	2	150	enl tabell 4.1	1, 3-5
6	90	5	150	enl tabell 4.1	1-6
7	90	2	150	enl tabell 4.1	1-11

I brandscenario 6 finns det bilister som hinner utrymma innan kritiska förhållanden inträffar. Den totala utrymningstiden för dessa bilister är mellan 5 och 10 minuter. Den längre tiden gäller för scenarier med lufthastigheten 1 m/s vilket innebär att även de som har lång väg att gå hinner till utrymningsvägen även om det tar tid. Den kortare tiden gäller för bilister i övriga fall men som inledningsvis befinner sig nära branden.

4.6.7 Analys av stillastående bilist

I alla de fall som hittills analyserats har det förutsatts att bilisterna lämnar sina bilar och beger sig mot en utrymningsväg. Men vid flera av de inträffade tunnelbränderna har flera bilister stannat kvar i sina bilar och omkommit innan de påbörjat sin utrymning. Det kan troligen antas att det vid en tunnelolycka finns bilister som inte går mot en utrymningsväg utan av någon anledning blir kvar inne i tunneln.

Ur ett räddningstjänstperspektiv finns det därför ett intresse av att undersöka om dessa bilister kan överleva en tunnelbrand utan att utrymma till en säker plats och hur länge det går att överleva. En sådan analys har därför också gjorts som ett komplement till ovanstående.

Tabell 4.8 Resultat från beräkningar med en stillastående bilist.

Brand	Tvärsnitt, m^2	Luft-hastighet, m/s	Avstånd, m	Överlever	Anmärkning
2	50	1	70	nej	Hög värmedos vid 20 minuter. Medvetslös pga giftighet vid 35 minuter. Dödlig dos pga giftighet vid 60 minuter.
2	50	2 och 5	70	ja[1]	Hög värmedos vid 20 minuter. Lindrigare vid 5 m/s
2	50	1, 2 & 5	150	ja	
3	50	1	70	nej	Dödliga förhållanden inom 20 minuter
3	50	2	70	nej	Hög värmedos vid 10 minuter. Medvetslös pga giftighet vid ca 25 minuter.
3	50	5	70	ja1	Hög värmedos vid 10 minuter.
3	50	1	150	nej	Dödliga förhållanden inom 20 minuter
3	50	2	150	nej	Hög värmedos vid 15 minuter. Medvetslös pga giftighet vid ca 25 minuter.
3	50	5	150	ja1	Hög värmedos vid 18 minuter.
5	50	1, 2	70, 150	nej	Hög värmedos efter ca 5-7 minuter, medvetslös ca 10 minuter. Något längre tider för 150 m
5	50	5	70, 150	osäkert	Hög värmedos efter 5 minuter. Hög temperatur. Nära medverslöshet pga giftighet. Något längre tider för 150 m
5	90	1	70	nej	Medvetslös efter 20 minuter.
5	90	2, 5	70	osäkert	Hög värmedos vid ca 10 minuter medvetslös ca 20 minuter. Hög temperatur.

[1] Om bilisten skyddar sig mot hög temperatur.

I princip har samma modell använts som för utrymningsanalysen men med de undantagen att endast en bilist undersöks i taget och att denna bilist står stilla. Beräkningar har gjorts för ett mindre antal brandscenarier för att främst få en uppfattning om vilka förhållanden som råder vid olika platser i tunneln. Ett viktigt antagande som görs är att den exponerade bilisten inte skyddas av föremål i tunneln som t ex andra bilar eller den egna bilen. Detta skulle kunna reducera exponeringen från värmestrålning från flammor.

Beräkningar har gjorts för brandscenarierna 2, 3 och 5 dvs bränder från bussbranden till branden i långtradaren. Det innebär att brandeffekterna som provats ligger mellan 25 MW och 150 MW. I tabell 4.8 redovisas de olika beräkningskombinationer som gjorts tillsammans med en bedömning om det är rimligt att anta att bilisten har en möjlighet att överleva. Vilket framgår av tabellen är det mycket osäkert om en bilist som inte väljer att utrymma kommer att klara sig om brandförloppet är mycket kraftigt (brand 3 eller 5). Temperaturen och strålningsnivån i tunneln blir mycket snabbt kritisk och passerar vad människan klarar redan efter mindre än 10 minuter. Temperaturen 120 °C passeras efter ca 5-10 minuter vilket riskerar att leda till brännskador i andningsvägar. Även andra värmeskador uppstår vid denna temperatur och däröver Purser [37]. Kan personen skydda sig mot den höga temperaturen finns ytterligare några minuter att tjäna men miljön i tunneln är inte lämplig att vistas i.

För den mindre bussbranden är möjligheterna förhållandevis goda att överleva såvida inte lufthastigheten är låg. En låg lufthastighet innebär höga koncentrationer av giftiga produkter i röken. Den variabel som är kritisk är temperaturen i brandgaserna och uppvärmningen av den mänskliga kroppen. I detta fall finns det goda chanser att överleva om personen kan skydda sig från den höga temperaturen och värmestrålningen. Temperaturen i brandgasen varierar mellan ca 50 – 120 °C vilket leder till en uppvärmning men den ger inga eller små brännskador i andningsvägar etc.

4.7 Diskussion

4.7.1 Brandscenario 1 och 2

I princip hinner alla bilister att sätta sig i säkerhet i en utrymningsväg eller liknande vid de mindre bränderna, personbilsbranden och den lilla bussbranden. Det betyder att nästan oavsett vilka andra förhållanden som gäller så kommer de att hinna utrymma till tunnelmynningen eller till en utrymningsväg utan att ta skada. Den enda situation då det är farligt för bilisterna är om de redan inledningsvis är väldigt nära branden. Detta undersöktes genom att minska avstånden mellan bilisterna och brandkällan. Bilisterna kommer då att utsättas för en hög strålningsintensitet tidigt i förloppet. Men eftersom de är så nära brandkällan redan då branden börjar kan det kanske också vara rimligt att anta att de påbörjar sin utrymning lite tidigare än vad som är antaget i analysen och på det viset kan rädda sig. Det räcker att komma några meter längre bort för att strålningsnivåerna ska ha sjunkit till tolerabla nivåer.

Även om bilisterna i detta fall skulle undgå att upptäcka en utrymningsväg kan de fortsätta i den brandgasfyllda tunneln flera hundra meter och ändå kunna sätta sig i säkerhet. I känslighetsanalysen undersöktes fallet att bilisterna inte hittar ut förrän vid den tredje utgången, d.v.s. 450 m från branden. Även i det fallet kunde alla bilisterna sätta sig i säkerhet.

Slutsatserna gällande de mindre bränderna gäller också för båda tunnelstorlekarna. Generellt kan det konstateras att ett större tunneltvärsnitt innebär gynnsammare förhållanden men skillnaden var mindre än vad som först antagits. Den största delen av beräkningarna i den fortsatta känslighetsanalysen är därför i huvudsak utförd med den mindre tunneln med tvärsnitt på 50 m^2.

4.7.2 Brandscenario 3 och 4

Vid en analys av betydligt allvarligare brandscenarier (brandscenarierna 3 och 4) börjar gränsen för när alla bilister inte längre hinner ut innan kritiska förhållanden

inträffar uppnås. Det krävs en brand som utvecklar sig snabbt och som leder till en brandeffekt kring 75 MW - 100 MW för att det ska bli problem med att utrymma tunneln. Trenden med allvarligare konsekvenser för det mindre tvärsnittet gäller vidare också de större brandscenarierna.

Vad som också framkommer vid analysen av dessa två brandscenarier är att utrymningsförloppet är avslutat innan branden når sin maximala effekt. Detta innebär egentligen att den maximala brandeffekten inte är så betydelsefull som hur snabbt förloppet sker. Det finns alltså indikationer på att just tillväxthastigheten skulle kunna vara mer betydelsefull jämfört med hur högt brandeffekten når. Detta är något som bör noteras i samband med vidare analyser.

Ökande allvarlighet i brandförloppet leder till än värre konsekvenser vilket redogörs för i följande avsnitt.

4.7.3 Brandscenario 5, 6 och 7

Utfallet av utrymningen är betydligt sämre för de tre stora bränderna som har en maximal brandeffekt på mellan 150 MW och 200 MW. Det är bara i ett fåtal fall som alla bilisterna klarar sig vid dessa bränder. I de flesta fall är det endast bilister som redan från början befinner sig långt från branden som klarar sig eller de som mycket tidigt inser faran och börjar utrymma tidigt.

I flera fall orsakas möjligheterna att inte hinna sätta sig i säkerhet pga för hög kroppstemperatur. Men även strålningsnivån gör ofta att personerna inte hinner komma tillräckligt långt från branden innan kritiska nivåer överskrids.

4.7.4 Reaktionstid

Givetvis är tiden som passerar innan bilisterna påbörjar sin utrymning mycket viktig. Detta är dock mest påtagligt för de större bränderna. Ju snabbare bilisterna hinner uppfatta faran och sätta sig i säkerhet desto större är möjligheten att hinna komma till en säker plats.

För de två mindre bränderna kommer bilisterna att hinna sätta sig i säkerhet även om de reagerar väldigt långsamt eller har långt att gå. Bränderna producerar helt enkelt inte tillräckligt med giftig brandgas för att detta ska vara ett hinder.

I praktiken alla bilister går genom tät brandgas (sikt 0,5 - 1 m).

4.7.5 Lufthastighet

Vilket kan förväntas så har lufthastigheten en viss inverkan på konsekvensen vid en utrymning. I de beräkningar som gjort påverkar lufthastigheten hur snabbt branden accelererar. Det betyder att ju mer det blåser desto snabbare blir brandförloppet. Det innebär för utrymningens skull att låg lufthastighet leder till långsammare brandförlopp vilket i sin tur leder till gynnsammare konsekvens vid utrymningen. En väsentlig anledning till detta resultat är att utrymningsförloppet pågår just som branden är i tillväxtfasen. Detta är speciellt tydligt för de mer allvarliga brandförloppen t ex brandscenario 5.

Om man istället betraktar möjligheten att vistas i den rökfyllda tunneln utan att utrymma blir förhållandet det omvända. Då är det mer gynnsamt om lufthastigheten är hög eftersom det innebär att röken späds ut. Då är inte tillväxtfasen av branden lika betydelsefull eftersom ingen utrymning sker. Då är det

hela brandförloppet och ackumuleringen av bl a toxiska produkter och värmeexponeringen som styr möjligheten att överleva.

Men eftersom målsättningen för all olyckshantering är att bilister som befinner sig i en brandsituation ska utrymma är en låg lufthastighet att föredra. Brandförloppet är då troligen är mindre allvarligt än med en högre lufthastighet även om koncentrationerna av de giftiga komponenterna i röken är högre.

4.7.6 Tunneltvärsnitt

Om branden inträffar i en tunnel med ett stort tvärsnitt innebär detta en mer gynnsam situation för utrymningen. Skillnaden i resultat mellan en tunnel med litet tvärsnitt (50 m^2) eller ett stort tvärsnitt (90 m^2) är kanske inte så stor som man skulle kunna förmoda. För mindre brandförlopp (brandscenario 1, 2 och 3) har tvärsnittets storlek ingen betydelse eftersom förhållandena för utrymning är goda oavsett. Däremot för allvarliga bränder finns en skillnad i konsekvens av utrymningsförloppet som är beroende på tvärsnittets storlek. Då kan storleken på tunneln vara avgörande för om alla bilister hinner ut eller inte.

Ytterligare en faktor som bör beaktas i sammanhanget är hur brandförloppet påverkas av tunnelns tvärsnitt. Detta har dock inte undersökts men det kan förmodas att ett mindre tvärsnitt kan leda till något snabbare brandförlopp eftersom återstrålning från varm rök och flammor nära branden mot bränslet ökar.

4.7.7 Stillastående bilist

Vid några av de inträffade bränderna i vägtunnlar har det visat sig att bilister suttit kvar för länge och därmed omkommit. Vid branden i Seljestadstunneln [38] i Norge var det fyra personer som utrymde genom röken men som tvingades att stanna upp då de inte så vart de skulle gå men som lyckligtvis överlevde. Detta tyder på att det kan finnas en möjlighet för räddningstjänsten att göra en insats i den rökfyllda tunneln för att rädda personer som av någon anledning inte kunnat utrymma hela vägen fram till en utrymningsväg eller till mynningen.

Därför genomfördes några beräkningar för fallet då ingen utrymning skedde och med bilister på några olika platser mellan branden och utrymningsvägen. En liknande tendens som vid utrymningen kunde observeras d v s att det kunde gå att överleva i tunneln vid de två mindre bränderna men att det i praktiken var omöjligt vid de lite större bränderna. Men även vid en bussbrand kan det bli kritiskt vid längre exponeringstider.

Givetvis är det betydelsefullt var den aktuella bilisten befinner sig. Ju närmare branden bilisten är desto större risk utsätts han eller hon för. Men beräkningarna är mest gjorda för att få en uppfattning om möjligheten att vistas i den rökfyllda tunneln.

4.7.8 Validitet och reliabilitet

När beräkningar genomförs med modeller ställs alltid frågan om modellernas giltighet (validitet) och deras förmåga att räkna rätt (reliabilitet). I detta avsnitt görs dock endast en bedömning av utrymningsmodellen. Modellen är förhållandevis enkel i sin konstruktion och därigenom tämligen grov i uppskattningen av hur troligt det är att utrymningen genomförs så som modellen predikterar.

Underliggande antaganden om toxisk påverkan och påverkan av andra egenskaper som branden producerar (värmestrålning och förhöjd temperatur) är väl beskrivna i litteraturen. Däremot är själva förflyttningsmodellen enkel på det viset att det inte förekommer någon interaktion mellan de enskilda bilisterna. Detta beteende borde ingå i en mer detaljerad analys. Men med tanke på att modellen främst är tänkt för en känslighetsanalys och inte för att i detalj beskriva enskilda händelser kan det antas att validiteten är tillräcklig. Reliabiliteten kan inte bedömas då inga andra modeller ingått i analysen.

5 Räddningsinsats vid bränder i vägtunnlar

5.1 Inledning

Vid utformningen av säkerheten kring tunnlar runt om i världen studeras de olika möjliga säkerhetslösningarna mycket noga och generellt genomförs omfattande riskanalyser. Det genomförs bland annat beräkningar för de olika dimensionerande olyckshändelserna med dess konsekvenser och det genomförs mycket noggranna analyser av hur de drabbade människorna kommer att bete sig vid olyckorna. Den kunskap som kommer ut av dessa studier och analyser används för att utforma och dimensionerna säkerhetslösningarna vid de aktuella tunnlarna.

Vad som däremot saknas i de flesta analyser är en utförlig beskrivning av den aktiva och konsekvensreducerande åtgärd som skall utföras när olyckan inträffar, dessa åtgärder som normalt skall utföras av den lokala räddningstjänsten. Räddningstjänsten skall utföra en räddningsinsats vid händelse av en olycka, vilket kan och bör ses som en integrerad del av tunnelns säkerhetskoncept. Denna del av säkerhetskonceptet tycks generellt vara mycket dåligt analyserad och ytterst få analyser finns officiellt att tillgå, till skillnad från de flesta andra delarna av säkerhetskoncepten i tunnelmiljöer. Erfarenheter visar att de säkerhetsansvariga för utformningen av dagens tunnlar i många fall förutsätter att den kommunala räddningstjänsten kan hantera de aktuella olyckshändelserna på ett snabbt, säkert och effektivt sätt. Det verkar också som om den kommunala räddningstjänsten inte reagerar eller agerar med att upplysa de säkerhetsansvariga att räddningstjänsten planeras för en uppgift de inte är dimensionerande för. Räddningstjänsten skall hantera en uppgift som man inte är dimensionerad för, inte har aktuella arbetsmetoder för att hantera eller inte har resurser för att genomföra personell och materiell utveckling för att hantera. Det verkar helt enkelt som om det inte finns en tillräcklig kommunikation mellan de säkerhetsansvariga för tunnelutformningen och den kommunala räddningstjänsten.

Kommunen skall enligt 1kap. 1§ lagen (2003:778) om skydd mot olyckor [39] utföra en räddningsinsats vid en olycka och enligt 1kap. 3§ i samma lagstiftning skall räddningstjänsten planeras och organiseras så att den kan genomföras på ett effektivt sätt. För att en räddningsinsats vid en brand i en tunnel skall kunna fungera effektivt så bör den ses som en integrerad del av tunnelns säkerhetskoncept. För att detta skall fungera så bör den kommunala räddningstjänsten vara delaktiga i utformningen av detta säkerhetskoncept.

Bristen på kommunikation (förståelse?) mellan de olika parterna i utformningen av säkerheten i svenska tunnlar kan delvis bero på att den kommunala räddningstjänsten faktiskt har två roller i detta skede. En roll är att vara myndighet och deltaga i arbetet med att tillförsäkra samhället att utformningen av tunneln uppfyller de riktlinjer och den praxis som innebär att den blir tillräckligt säker för den enskilde att nyttja. Den andra rollen är att vara den organisation som tillhandahåller samhällets resurs av olyckshanterande och konsekvensreducerande räddningsinsatser vid olyckor. Det framkommer inte tillräckligt klart att den kommunala räddningstjänsten faktisk har båda dessa roller, vilket gör att det tycks som om räddningstjänsten och tunnelägaren pratar förbi varandra då vid utformningen av säkerhetskoncept.

Tunnelägaren har ett stort ansvar vid olyckor, även för att det skall kunna genomföras en räddningsinsats för att rädda människor och begränsa skadorna vid en olycka. Vid tolkning av den nuvarande lagstiftningen [39] kan man anse [40] att objektsinnehavaren eller objektsägaren har relativt stora skyldigheter att skapa förutsättningar för att en räddningsinsats ska kunna genomföras komplicerade byggnadsverk. Det är i samverkan med den lokala räddningstjänsten som tunnelägaren kan arbeta fram en lösning på hur räddningsinsatsen kan integreras med den övriga säkerheten i tunneln.

5.2 Beskrivning av begreppet taktik för räddningsinsatser

En räddningsinsats kan enkelt sägas bestå av följande olika delar.

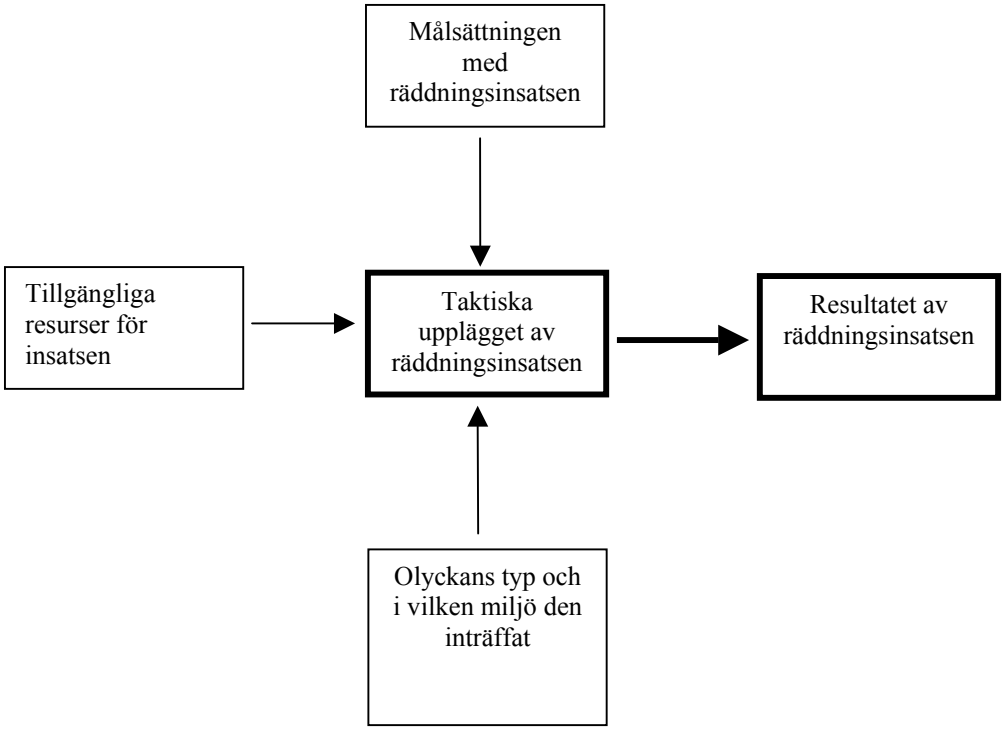
1. Arbetsmetoderna eller åtgärderna som räddningsstyrkorna är tränade och utrustade för att utföra, där resultatet av de enskilda arbetsmetoderna till stor del bygger på personalens förmåga att hantera utrustningen vid den aktuella olyckan på ett effektivt sätt.
2. Samordningen eller koordineringen av de olika enskilda metoderna, så att de tillsammans blir en väl genomförd helhet av åtgärder, en räddningsinsats.
3. Valet av taktik för att effektivt uppfylla målsättningen med räddningsinsatsen.

Taktik vid räddningsinsatser är ett väl diskuterat ämne och där Svensson [41] presenterar terminologin som används i detta avsnitt. De flesta resonemang och rapporter som producerats kring ämnet är relativt teoretiska och går inte in på specifika taktiska mönster för hur olika räddningsinsatser kan eller bör utformas.

Taktik vid räddningsinsatser kan på ett relativt enkelt sätt beskrivas som att det är räddningsledarens löpande prioritering av vilka resurser och vilka åtgärder som skall användas för att insatsen på effektivast sätt skall nå målsättningen.

Den taktiska inriktningen kommer att påverkas kraftigt av vad det är för typ av olycka som är aktuell, i vilken miljö som olyckan inträffar och med vilka konsekvenser som olyckan har fått eller håller på att få, mot vilken målsättning som räddningsinsats skall arbeta och av vilka resurser som är tillgängliga för att genomföra räddningsinsatsen. Det taktiska upplägget på räddningsinsatsen kommer att påverkas mycket av kompetensen på den personal som är tillgänglig för räddningsinsatsen. Alla dessa olika delar kommer att tillsammans att påverka den taktiska utformningen av räddningsinsatsen, se figur 5.1.

En räddningsinsats vid en brand i en lägenhet bör utformas på ett sätt och en räddningsinsats vid en brand i en lada på ett annat sätt. Detta beror dels på vilken målsättning som de olika insatserna har, men även på vad olika arbetsmetoderna är anpassade för typ av brand och för typ av miljö. Utifrån detta resonemang så blir det relativt klart att en räddningsinsats vid en brand i en kabeltunnel kommer att, eller bör, utformas olika i jämförelse med en insats mot en personbilsbrand i en vägtunnel. Den enklaste skillnaden att se mellan dessa två insatser är att insatsen i vägtunneln är inriktad mot att främst rädda människor och det är inte insatsen i kabeltunneln. Det finns också en hel rad övriga skillnader som bör styra att insatserna utformas på olika sätt.



Figur 5.1 Taktik för räddningsinsatser (allmän beskrivning).

5.3 Tunnlar och bränder i tunnlar utifrån räddningstjänstperspektivet

Ur samhällets och räddningstjänstens perspektiv är det viktigaste att olyckor inte inträffar, vilket innebär att de säkerhetsmässigt viktigaste åtgärderna är de minskar sannolikheten för att olyckor inträffar. Då arbete med att minska sannolikheter för olyckor generellt inte innebär att det inte går att utesluta att olyckor kommer att inträffa, samtidigt som olyckor i tunnlar kan ge stora konsekvenser, så bör tunnlar vara anpassade för att olyckor kan inträffa. För räddningstjänsten är de viktigaste konsekvensreducerande åtgärderna att det är korta avstånd och enkla vägar för de utrymmande att förflytta sig till säker miljö, att räddningspersonalen snabbt kan komma nära branden i säker miljö och att branden inte snabbt kan utveckla sig till alltför hög brandeffekt innan en brandsläckningsinsats har kunnat påbörjas. Dessa olika förutsättningar kan uppnås på olika sätt, men det måste ske ett övergripande säkerhetsarbete där man identifierar alla ingående betydande parametrar och får dem att samverka, vilket kan skapa förutsättningar för en hög säkerhet i tunneln.

Storleken på branden i en vägtunnel kommer att till mycket stor del inverka på räddningstjänstens möjligheter att genomföra en effektiv räddningsinsats. Vid insatser i vägtunnlar bör man vara anpassad för att hantera bränder av den storlek som kan bli aktuella att bekämpa. Det är viktigt då många människor kan vara inblandade och bli offer vid bränder i vägtunnlar.

Att utforma ett ventilationssystem med längsgående ventilation i tunnelröret innebär att det är överhängande risk att en stor grupp människor befinner sig i röken nedströms branden vid en ventilation. Utformas en ventilationssystemet på ett annat sätt, exempelvis som en vertikal brandventilation där röken sugs ur

tunnelröret i närheten av branden, så kallad tvärventilation (se avsnitt 2.2), är det viktig att systemet är dimensionerat för att hantera den brandeffekt och de mängder brandrök som kommer att utvecklas av branden. Dessa olika system kommer troligen att påverka konsekvenserna av en olycka, vilket också innebär att de måste vara styrande för utformningen av räddningsinsatsen.

En personbilsbrand i en dubbelrörstunnel kommer med största sannolikhet inte att vara dimensionerande för en normal brandsläckningsinsats, då effektutvecklingen och dess konsekvenser, troligen kan hanteras av en räddningsstyrka. Vid en dubbelrörstunnel kommer troligen röken att ventileras bort och brandsläckningen kan påbörjas i rökfri miljö. Samma brand i en enkelrörstunneln kan däremot ställa till stora svårigheter vid en släckning. Detta beror bland annat på om röken i enkelrörstunneln kan ventileras bort . Utan möjligheter för brandventilation kan branden i enkelrörstunneln medföra att rökutvecklingen tvingar fram en avancerad rökdykaroperation innan släckinsatsen kan påbörjas. Detta kommer på ett påtagligt sätt att försvåra räddningsinsatsen.

De kriterier som troligen kommer att vara dimensionerande för en räddningsinsats vid en brand i en tunnel kommer att vara:

1. hur mycket folk som insatspersonalen måste assistera ut till säker miljö
2. hur stor branden är och därmed vilken temperatur och strålningsnivå som kommer att påverka insatspersonalen
3. hur lång sträcka som insatspersonalen måste förflytta sig i rökfylld miljö.

Då lastbilstrafiken generellt ökar i Europa, se avsnitt 3, så kan detta också innebära att frekvensen av bränder i lastbilar också ökar. Detta borde också innebära att antalet omfattande bränder i tunnlar också ökar.

Många tunnlar har dimensionerats för att hantera bränder i lastbilar på endast upp till 20 – 30 MW [42]. Bränder av denna storlek kommer att ge en hög strålningsnivå både från röken och själva flammorna. Långtradarbränder, se tabell 3.3 och tabell 3.4, kan bli betydligt större och vid dessa brandeffekter kommer troligen strålningsnivåerna innebär ett stort problem för räddningstjänsten. Vid en brand i en lastbil lastad med 10 ton trä- och lastpallar så medförde denna brand en strålningsnivå på 13 kW/m^2, vid ett avstånd på 10 meter uppströms branden, se tabell 5.4. Vid denna strålningsnivå kommer det troligen att bli stora problem att släcka en fordonsbrand.

5.4 Räddningsinsatser vid bränder i tunnlar

Säkerheten i tunnlar beror av många olika faktorer och egenskaper. Själva designen på tunneln och vad som trafikerar tunneln kommer att inverka mycket. Utrymningsvägar och angreppsmöjligheter för den kommunala räddningstjänsten är endast delar av denna säkerhet, men de är de avgörande delarna av säkerheten som måste fungera tillfredsställande då en omfattande brand inträffar i tunneln. För att detta skall kunna fungera på ett effektivt sätt bör både utrymningen och räddningsinsatsen vara utformad och avpassad efter den tunneldesign och tunnelmiljö som är aktuell i det specifika fallet. Då tunnlar kan vara utformade på olika sätt är det här viktigt att insatsen dimensioneras med hänsyn taget till de kriterier som nämns i avsnitt 5.3.

Dagens kommunala räddningstjänst har utvecklat en rad metoder för att hantera olika typer av olyckor. Generellt kan man troligen säga att ju vanligare olyckorna är desto mer utvecklade är metoderna att hantera dom. I detta perspektivet är det viktigt att vara medveten att omfattande bränder i tunnlar är lyckligtvis inte så vanligt förekommande. Detta har troligen givit som följd att den kommunala räddningstjänsten varken har speciellt utformade metoder eller utrustning för att hantera omfattande bränder i tunnelmiljö.

5.4.1 Räddningstjänstens tillgängliga metoder för att hantera en räddningsinsats

Den kommunala räddningstjänsten i Sverige har i princip ett antal taktiska inriktningar att arbeta efter för att hantera bränder i tunnlar. Inom varje taktisk inriktning kan man använda sig av ett stort antal arbetsmetoder för att nå målet med insatsen. Valet av arbetsmetoder kan bland annat avgöras av kompetensen på personalen, tillgång till teknisk utrustning, storleken på branden eller typen av tunneln som det brinner i. Räddningstjänstens normala arbetsmetoder används har utvecklats och anpassats efter de vanligare olyckorna som inträffar i samhället. Vid omfattande bränder i tunnlar kommer dessa metoder troligen inte att fungera effektivt och sannolikt är att det blir nödvändigt att använda sig av andra metoder än de som är avpassade efter lägenhetsbränder eller vanliga trafikolyckor. De ödesdigra olyckorna ibland annat Mont Blanc tunneln och Tauerntunneln [43] visar på räddningstjänsten metoder är avpassade efter att branden är begränsad och att räddningstjänsten har enkel tillgänglighet till branden. De aktuella taktiska inriktningarna vid räddningsinsatser vid bränder i tunnlar är att [4]:

1. underlätta för att de drabbade snabbt ska komma ut ur tunneln
2. livrädda de drabbade människorna genom att aktivt ta ut dem ur farlig miljö
3. släcka branden och på så sätt undanröja hotet mot de drabbade människorna i tunneln,
4. ventilera tunneln för att trycka röken i en bestämd riktning från branden med syfte att underlätta livräddning, utrymning eller brandsläckning,
5. ett aktivt omhändertagande av utrymmande i säker miljö eller på utsidan av tunneln.

Många räddningsinsatser är inte renodlade i det taktiska upplägget, vilket innebär att man vid en insats troligen kommer att kombinera dessa olika inriktningar till ett lämpligt mönster vid varje specifik olycka.

De tänkbara arbetsmetoder som räddningstjänsten kan använda vid inom dessa taktiska inriktningar är följande.

1. Insatser in en den rökfria tunneln i syfte att orientera sig om läget och skapa underlag för beslut. Denna insats måste genomföras omgående, vara snabb och effektiv, då den inte bör fördröja övriga delen av räddningsinsatsen.
2. Rökdykarinsats in i den rökfyllda delen av tunneln.
3. Brandsläckning. Brandsläckningen kommer troligen att ställa till en stort problem och kan med troligen genomföras på en rad olika sätt, varav de nedan är exempel på möjliga och tänkbara tekniker.
   - Brandsläckning med ordinära brandsläckningsstrålrör.
   - Brandsläckning med bärbara vattenkanoner.

- Brandsläckning med fordonsmonterade vattenkanoner.
- Brandsläckning med fläktar med vatteninjektering i luftströmmen
- Brandsläckning genom att det brinnande föremålet förflyttas ut ur tunneln.
- Brandsläckning med fjärrstyrd obemannad släckutrustning

4. En insats in i tunneln för att vägvisa människor, det vill säga att de drabbade kan förflytta sig själva ut ur tunneln.
5. En insats in i tunneln för att bära ut människor ut ur tunneln, det som normalt kallas livräddning.
6. En insats in i tunneln för att undsätta människor och underlätta överlevnad på plats i tunneln.
7. Ventilation av tunneln för att kontrollera flödet av och riktningen på röken i tunneln. Ventilationen kan genomföras med antingen fast monterade fläktar i tunneln eller mobila fläktar som placeras på avsedd plats. Avsikten med ventilationen kan vara att:
   - ventilera för att säkerställa befintligt flödet i tunnelröret och därmed underlätta utrymningen och räddningsinsatsen
   - ventilera för att starta ett flöde i tunneln så att man kan skapa en möjlig utrymningssituation och en möjlig angreppsväg för räddningspersonalen
   - ventilera för att vända flödet av röken i tunneln och underlätta en livräddning för människor som befinner sig i röken nedströms brandplatsen.
   - en släckinsats från säker miljö för att begränsa konsekvenserna av branden
8. Avancerat akut omhändertagande i säker miljö vid olycksplatsen. Denna metod kommer troligen att vara mycket resurskrävande om antalet skadade människor är stort.

Dessa ovanstående metoder kombineras tillsammans för att bilda en genomförbar insats. Både brandsläckning och livräddning av drabbade människor förutsätter många gånger att personalen som utför arbete samtidigt genomför en rökdykarinsats. De olika metoderna har alla som främsta syfta att livrädda människor och de utgör olika och viktiga metoder för att en effektiv insats skall kunna genomföras. Anledningen till att man många gånger inte tänker på flera av dessa metoder som livräddningsmetoder är troligen att de flesta bränder sker i betydligt mindre komplicerade lokaler och där betydligt färre människor är inblandade. I dessa bränder så blir det inte lika uppenbart att exempelvis information troligen är en av de viktigaste delmålsättningarna inledningsvis av en insats och att snabbt bära ut de människorna man hittar först inte är den mest effektiva livräddningsinsatsen.

5.4.2 Överblick över skadeplatsen

Det är svårt att få överblick olycksscenariot, då olycksplatsen vid en tunnelbrand är mycket svåröverskådlig. Detta medför att det råder en stor brist på information om vad som sker på olycksplatsen, vilket ger svårigheter för att bestämma hur

räddningsinsatsen skall genomföras. Detta kan innebära att mycket viktig tid förloras i en informationsbrist.

Bristen på överblick vid en olycka måste hanteras och lösas. En effektiv metod är att övervakningsutrustning installeras i tunneln tillsammans med att det finns en väl genomtänkt kommunikation och ett användargränssnitt gentemot den kommunala räddningstjänsten, så att denna information går att använda som ett beslutstöd under insatsen.

Finns det ingen utrustning för att underlätta informationsinhämtningen måste räddningsstyrkan själva lösa detta problem. Det förslås i detta arbete att informationsinhämtning skall vara den omedelbara åtgärd som räddningsstyrkan påbörjar insatsen med. Denna åtgärd måste vara snabb och effektiv och på ett effektivt sätt kunna rapportera lägesbilden över skadeplatsen. Idag är detta en arbetsmetod som behöver utvecklas, speciellt då svenska rutiner kring rökdykararbete verkar minska effektiviteten för arbete i tunnlar, utan att öka säkerheten för brandpersonalen under insatsen. Kombinationer av snabba insatser med fordon eller till fots, med orienteringshjälpmedel som IR-sikt och lyslinor som man lägger ut efter sig utan brandslang skulle i framtiden behöva studeras djupare.

Att ha en aktuell information som underlag för besluten om inriktningen på räddningsinsatsen och valet av arbetsmetoder är avgörande är speciellt viktigt för att man skall göra en riskbedömning [43] under insatsen.

5.4.3 Styrning av luftflödet i tunneln

Räddningspersonalen måste tillsammans med de tunnelansvariga veta hur brandgaserna skall styras för att underlätta utrymningen, livräddningen och brandsläckningsinsatsen.

Då ventilation troligen kommer att bli den enda effektiva metoden vid en rad allvarliga tunnelbränder så bör kunskaperna om hur räddningstjänsten ventilerar tunnlar vid en brand förbättras och standardrutiner måste tas fram. Det som påverkar förutsättningarna för att kunna styra flödet av luft i tunneln är förhållandet mellan kapaciteten på den fläkt som kan skapa luftflöde i förhållande till det tryckfall som är aktuellt i det specifika fallet. Detta tryckfall kan förenklat sägas bero av tryckfallet på grund av friktionen mot tunnelväggarna, stötförluster vid eventuella areaökningar och areaminskningar, tryckfallet över branden, tryckfallet på grund av fordon som står i tunneln, vindpåverkan mot tunnelmynningarna och det naturliga flödet i tunneln enligt Kumm m.fl. [46]. Det saknas idag generellt möjligheter och kunskaper hur en räddningstjänst skall kunna ventilera en tunnel vid en brand. Det har påbörjats ett antal olika initiativ för att försöka ta fram underlag [44, 45, 46] för hur dessa insatser skall genomföras.

Ingason och Romanov [44] har tagit fram enkla modeller för att beräkna sluthastigheter och tid till att vända flöden i tunnlar med hjälp av mobila fläktar. Resultaten har jämförts med försök och CFD beräkningar. Beräkningar visa att brandens termik kan bli en betydelsefull parameter för att bedöma om fläkten klarar uppgiften. I Runehamar tunneln så användes mobila fläktar för att åstadkomma luftflöde i tunneln [1]. Erfarenheten från försöken visar att branden kan påverka lufthastigheten inne i tunneln avsevärt. I försöken så sjönk lufthastigheten, när branden var som intensivast, från drygt 3 m/s ner till ungefär 2 m/s på grund av det mottryck som branden genererade.

Tekniken med mobila fläktar för ventilering av tunnlar verkar fungera så bra att det borde vara värt att gå vidare med mer och noggrannare studier för att ta fram bättre

underlag för den kommunala räddningstjänsten. Ingasons resultat ger förhoppningar på att detta skulle kunna utvecklas till användbara arbetsmetoder för räddningsinsatser i tunnlar. Dessa resultat skall endast ses som en vägvisning då relevansen för dem vid en ventilation av en vägtunneln inte är studerade. Påverkan kan vara betydlig av de hinder, i form av fordon, som finns i tunneln.

5.4.4 Stora och komplicerade objekt

Tunnlar kan innebära stora och omfattande objekt, med långa och komplicerade vägar att förflytta sig ifrån säker miljö, ibland utomhus och ibland inne i tunnelsystemet, till platsen för livräddningen eller brandsläckningen.

Här behövs det undersökas möjligheter för räddningstjänsten att snabbt ta sig fram till en säker plats i närheten av branden och de drabbade. Internationellt har detta lösts på olika sätt i långa enkelrörstunnlar, med alltifrån speciella räddningsbilar till speciella tågset för tunnelinsatser, men även speciellt utformade räddningstunnlar som byggs parallellt med huvudtunnlarna. I dubbelrörstunnlar behöver normalt detta inte bli ett avgörande problem då man i de flesta fall bör kunna skapa relativt täta anslutningsvägar mellan de olika tunnelrören.

5.4.5 Arbete i rökfyllda tunnlar

När tunneln är fylld med brandgaser måste ett angrepp in i tunneln utföras med skyddsutrustning. Detta begränsar avsevärt möjligheterna att agera och att förflytta sig längre sträckor i tunneln.

Då man i vardagligt tal pratar om rökdykning, menar man vanligtvis de arbetsmetoder avpassade för att rädda människoliv och att bekämpa bränder vid normala byggnadsbränder. Rökdykarinsatser är ett samlingsnamn på alla arbetsmetoder som innebär att man arbetar med branddräkt och andningsapparat inne i brandrök. Dessa arbetsmetoder har definitivt sina begränsningar i tunnelmiljö. Idag saknas djupare kunskap om kapaciteten och begränsningarna på dessa olika arbetsmetoder. Dessa kunskaper bör tas fram då de är av avgörande karaktär då man planerar för insatser i tunnlar. För att kunna bestämma rökdykarnas förflyttningshastighet i tunneln har en genomgång av några redovisade försök studerats. Två försöksserier redovisas nedan och sammanfattas i tabell 5.1.

Lennmalm [47] redovisar försök med rökdykarinsats i olika miljöer främst industrilokaler. Insatshastigheten varierar mellan 1 - 30 m/min med flertalet försök mellan 2-10 m/min. Insatsen gäller rökdykning med vattenfylld slang men utan rök. Dålig sikt simulerades dock genom att rökdykarna fick ha visiret på ansiktsmasten övertäckt med en tunn plastfilm.

Bergqvist m.fl. [4] genomförde tester för att studera hur lång räckvidd en rökdykarinsats har i tunnelmiljö. Totalt tre olika övningar genomfördes.

Försöken genomfördes i en tunnel med rökdykarinsatser med olika förutsättningar. Samtliga tre fall gäller insats i tunnel.

Övning 1: Rökdykning i konströk med slang som dock inte vattenfylldes

Övning 2: Insats utan rök men med slang som vattenfylldes successivt

Övning 3: Insats utan rök och utan slangutläggning

I övning 1 observeras en genomsnittshastighet på 4,3 m/min men där den sista sträckan tar väldigt lång tid. En mer representativ genomsnittshastighet kan

beräknas till mellan 5 och 8 m/min om inte den sista sträckan medräknas. Genomsnittshastigheten inkluderar att rökdykarna stannar till för att koppla ihop nya slanglängder.

Troligen är siktsträckan ganska kort. Konströkens nivå sjunker ju längre in i tunneln rökdykarna går och vid ca 100 m är den nere vid golvet. Gånghastigheten verkar dock inte sjunka efter 100 m utan ökar snarare, om än marginellt. Som längst kommer rökdykarna, flera par, ca 180 m in i tunneln. Därefter avbryts övningen.

I övning 2 finns ingen rök och gånghastigheten ligger då kring 60 m/min när rökdykarna lägger ut slang med vatten och förflyttar sig i tunneln. Sikten är god och begränsningen ligger i att slangen är fylld med vatten och hindrar förflyttning. Den genomsnittliga förflyttningshastigheten som även inkluderar tid att koppla ihop nya slangar blir lägre och i den aktuella övningen uppmättes en genomsnittshastighet på 18 m/min.

I övning 3 går rökdykarna utan slang i rökfri miljö och gånghastigheten ligger kring 80 m/min.

Tabell 5.1 Sammanfattning av genomsnittlig förflyttningshastighet och beräknad teoretisk maximal gångsträcka med rökdykargrupper i tunnelmiljö.

Övning	**Testupplägg**	**Genomsnittlig förflyttnings-hastighet (m/min)**	**Teoretisk maximal inträngningssträcka (m)[a]**	**Ref**
1	Rökfylld tunnel, ej vattenfylld slang	5-8 (4,3[b])	58	[4]
2	Ej rökfylld tunnel, slangdragning med vattenfylld slang	60 (18[c])	243	[4]
3	Ej rökfylld tunnel, ej slangdragning	80	1080	[4]
-	Tester genomförda i industrimiljö	6d	80	[47]

[a] Bygger på luftförråd med 1600 liter luft (2400 att tillgå på grund av säkerhet) och en luftförbrukning på 62 liter per minut och reträttmöjlighet.

[b] Genomsnitt för hela övningen.

[c] Genomsnitt för hela övningen och inkluderar även tiden att koppla ihop slangar.

[d] Slangkopplingsmoment genomfördes ej.

Både rök (bristen på sikt) och vattenfylld slang minskar rökdykarnas gånghastighet. Gånghastigheten i en tunnel kan annars antas vara något högre jämfört med i en industrilokal. Anledningen är att förhållandena inte ändras så mycket vid förflyttningen framåt och att risken att ramla ner i hål i golvet är lägre.

Genomsnittshastigheten i Bergqvists m fl [4] försök i en rökfylld tunnel varierade mellan 5 och 8 m/min men då hade rökdykarna ingen vattenfylld slang att dra på. Skillnaden mellan förflyttningshastighet med och utan utläggning av vattenfylld slang är ca 25 % när arbetet sker i en rökfri miljö (jämför övning 2 och 3 i tabellen ovan). Frågan är då hur stor skillnaden är mellan att förflytta sig med en vattenfylld

slang och en som inte fylls med vatten. Troligen är skillnaden mindre mellan att gå med och utan slang.

Det kan då vara rimligt att anta en gånghastighet på ca 6-7 m/min som en första skattning om förutsättningarna är rökfylld tunnel och att förflyttningen sker med vatten i slangen. I princip föreligger ingen skillnad mot resultaten redovisade av Lennmalm [47]. Antagandet att förflyttningen går snabbare i en tunnel är då felaktig eller så finns det andra faktorer som gör att hastigheten inte är högre. En faktor som skulle kunna inverka är att miljön är mer osäker på grund av det långa avståndet in i tunneln. Detta skulle kunna göra att en rökdykare är mindre benägen att gå så fort i tunnelmiljön.

För att få bättre uppfattning om vilken kapacitet en rökdykarinsats har och hur inverkande faktorer påverkar denna kapacitet så har en modell som beskriver en rökdykningsinsats tagits fram, se avsnitt 5.5 och bilaga 4.

5.4.6 Brandsläckningskapacitet

Att genomföra en brandsläckningsinsats som skall ge ett önskat släckresultat kan bli mycket komplicerat. Vid tidigare beskrivna bränder, se avsnitt 3, visar det sig att de bränder som inträffar i lastbilar och bussar kan bli relativt omfattande och medföra höga temperaturer, hög värmestrålning och kraftig brandrök. Är tunneln ventilerad så kan troligen räddningstjänsten nå brandplatsen utan att behöva passera genom alltför omfattande rök och värme. Det visar sig ändå att strålningsvärmen vid brandplatsen kommer att bli avsevärd. Denna strålningsvärme kommer att sätta stor begränsning på möjligheterna att kunna stanna på platsen så länge att det hinner bli ett släckresultat och att därmed strålningsvärmen minskar.

Skulle det däremot vara så att det saknas ventilation i tunneln kommer en räddningsinsats att vara mycket beroende av valet av angreppsväg, då det endast är det naturliga draget i tunneln som styr röken. Dessa förhållanden kommer också med största sannolikhet att innebära att röken förflyttar sig åt i båda riktningarna från branden på grund av litet luftflöde i tunneln. För en räddningsinsats blir följden av detta att man kommer att få avancera genom brandgaserna oberoende från vilken sida som man angriper branden.

Det troliga är att brandpersonalen använder vatten för att försöka att släcka branden. Andra släckmetoder är inte utvecklade eller utbredda för närvarande. Hur mycket vatten behövs då påföras branden för att det skall bli ett släckresultat? Det är en fråga som är viktig att hantera, då mängden vatten representerar ett visst antal strålrör under en viss tidsperiod. Dessa strålrör representerar i sin tur ett visst antal brandmän i arbete i en svår miljö.

För att få ett övergripande begrepp om mängden vatten som behövs för att få ett släckresultat på en fordonsbrand i en tunneln så används här Ingason m fl [42] och Särdqvists [47] arbeten, som utgår ifrån släckvattenbehovet för bränder som inträffar i byggnader som ej är bostadshus. Släckningseffekten baseras på att vattnet träffar ytan där pyrolysen sker. Vid dessa bränder hade brandpersonalen en enkel tillgång till branden. Här skall särskilt påpekas att en fordonsbrand är mycket svårsläckt varför följande förenklingar skall ses som en absolut miniminivå i släckvattenbehov. Bedömningarna om släckvattenbehov baseras på att behovet är styrt av bränsleytans storlek enligt Särdqvist [47].

$$q = 61A^{0,57} \qquad (5.1)$$

där q är vattenflödet i L/min och A är bränsleytan i m^2.

Tabell 5.2 Absolut minsta släckvattenflöde för att hantera en fordonsbrand [42].

Fordonstyp	**Bränsleyta, A (m^2)**	**Brandeffekt (MW)**	**Minsta släckvattenbehov, q (L/min)**	**Tid för att kontrollera branden, t (min)**
Personbil	10	5	226	6
Skåpbil	35	15	462	12
Buss	35	25	462	12
Lastbil	200	100	1250	30
Lastbil	200	150	1250	30

För att få släckeffekt på branden så måste släckvattnet nå brandhärden, vilket speciellt vid fordonsbränder innebär att insatspersonalen måste komma alldeles inpå fordonet, då det vid fordonsbränder är mycket svårt att komma åt brandhärden som pyrolyserar.

Denna släckvatteninsats behöver sedan upprätthållas under en ansenlig tid för att släckresultat skall erhållas. Enligt Ingason m fl [42] behöver man cirka 30 minuter med minst ovanstående släckvattensmängd för att kontrollera en lastbilsbrand, se tabell 5.2. Detta antagande bygger på att tiden för att kontrollera branden är beroende av bränsleytans storlek enligt Särdqvist [47]:

$$t = 1{,}88A^{0{,}52} \qquad (5.2)$$

där t är tiden i minuter och A bränsleyta i m^2.

I en arbetstunnel i anslutning till Södra Länken i Stockholm genomfördes kastlängstester [48] för den aktuella släckutrustning som vanligen används vid brandsläckning vid svensk räddningstjänst. Två olika typer av strålrör användes, Fogfighter och TFT strålrör, som är två olika produktnamn över strålrör som används av de flesta räddningstjänster i Sverige. Strålrören matades med vatten via 25 meter smalslang med en diameter på 38 mm som var kopplad direkt trycksidan på vattenpumpen i en brandbil. En stationär vattenkanon användes också i försöket. Denna kopplades med en 25 meter grovslang på 63 mm kopplad direkt på trycksidan på vattenpumpen i en brandbil. Tunneln var ca 5,5 m i takhöjd och lutade ungefär 6%. För att simulera en fri höjd på 4,5 m (europeisk vägstandard för fri höjd) placerades ett hinder horisontellt 4 m över vägbanan. Genom tunnelns lutning motsvarar detta 4,5 m över en rak tunnels vägbana. Vattnet samlades upp i ett kärl med en yta på 1 m^2. Kärlet placerades så att avståndet mellan strålröret och kärlet blev det maximala där vattnet från strålröret nådde fram till kärlet. Tabell 5.3 visar resultaten från detta försök.

Det visade sig att det var mycket svårt att sikta in sig på uppsamlingsytan på grund av den dåliga sikt som blev på grund av vattnet. Om TFT- röret skall användas bör inte längre slanglängder än 25 meter mellan pumpen och strålröret användas, då trycket och flödet sjunker alltför mycket vid längre slangutläggningar. Vid de längsta kastlängderna så var kastvinkeln på vattenstrålen så flack att endast en mindre mängd vatten träffade målet som var beläget på 2 meters höjd.

Tabell 5.3 Maximal kastlängd i tunnelmiljö med den kommunala räddningstjänstens strålrör.

Strålrör	Pumptryck (bar)	Flöde i slang (L/min)	Maximalt möjligt avstånd till branden (m)	Vattenflödet i strålen som träffar målet (L/min)
Fogfighter (300 L/min)	5	320	27	40
Fogfighter (300 L/min)	10	431	32	17
TFT-rör (1300 L/min)	5	702	20	26
TFT-rör (1300 L/min)	10	946	35	58
Vattenkanon (1000 L/min)	5		-	-
Vattenkanon (1000 L/min)	10		-	-

Tabell 5.4 Teoretisk beräknad mängd vatten som träffar branden (förutsätter ett linjärt samband och bygger på resultat enligt tabell 5.3). Värdena är givna i L/min.

Strålrör	Avståndet är 10 meter	Avståndet är 15 meter	Avståndet är 20 meter	Avståndet är 25 meter	Avståndet är 30 meter
Fogfighter (10 bars tryck)	302	237	173	108	44
TFT-strålrör * (10 bars tryck)	696	571	446	321	196

* 1300 L/min

Tabell 5.5 Behov av antalet strålrör för att effektivt bekämpa en fordonsbrand i en tunnel (baserat på resultaten angivna i tabell 5.2, 5.3 och 5.4).

Strålrör och avstånd till branden	Personbil	Skåpbil och buss	Lastbil och långtradare
Fogfighter, 10 meter	1	2	5
Fogfighter, 15 meter	1	2	6
Fogfighter, 20 meter	2	3	8
Fogfighter, 25 meter	3	5	12
Fogfighter, 30 meter	6	11	29
TFT strålrör*, 10 meter	1	1	2
TFT strålrör*, 20 meter	1	2	3
TFT strålrör*, 30 meter	2	3	7

* 1300 L/min

Vattenkanonen gick ej att använda i tunnelmiljö på grund av att elevationsvinkeln på strålröret ej gick att sänka tillräckligt mycket och följaktligen sprutade allt

vatten i tunneltaket. Antar man att vattnet som träffar brandarean är en linjär funktion av avståndet mellan strålröret och brandarean så innebär detta att mängden vatten som träffar branden är enligt tabell 5.4.

Rökdykarna är skyddade för att kunna arbeta i giftig rök och i hög temperatur, men kan inte hantera höga temperaturer och höga värmestrålningsnivåer under en lång tid. Persson [49] visade i sina experiment att brandmän klarar att hantera en värmestrålning på 5 kW/m^2 i minst sju minuter.

Den kommunala räddningstjänsten kommer att få stora problem med att bekämpa en fullt utvecklad brand med stor effektutveckling, se avsnitt 5.5.3 och 5.5.4. Brandpersonalen behöver komma tillräckligt nära för att nå fram med släckvattnet och för att börja bekämpa lågorna. Lyckas inte detta kommer de inte att kontrollera branden och inte heller successivt minska effektutvecklingen från branden. Det som hindrar brandpersonalen att komma nära är värmestrålningen från branden och från brandgaserna i backlayeringen. Brandgaserna bör gå att hantera och minska genom att med hjälp av fläktar skapa ett större luftflöde, men värmestrålningen från branden och den mindre backlayeringen, som troligen ändå kommer att vara kvar, kan bli svår nog att hantera. För att hantera värmestrålningen bör det utvecklas någon form av möjlighet för att vid dessa typer av bränder ha möjlighet att skydda sig mot värmestrålningen.

Summerar man ovanstående resonemang så framträder en bild som innebär att den kommunala räddningstjänsten kommer att få stora problem med att hantera en fullt utvecklad brand med större effektutveckling. Brandpersonalen behöver komma tillräckligt nära för att nå fram med släckvattnet och för att börja bekämpa lågorna. Detta är nödvändigt för att minska strålningsvärmen så att de kan avancera närmare fordonet och få fram släckvatten till brandhärden. Lyckas inte detta kommer de inte att kontrollera branden och inte heller successivt minska effektutvecklingen från branden.

5.4.7 Andra speciella moment som måste hanteras under räddningsinsatsen

<u>Transport av släckvatten till brandsläckningen</u>

Transport av släckvatten in till den plats där brandsläckningen skall genomföras. Ett mycket svårt moment att hantera om det inte är förberett i utformningen av tunneln. Utformningen av vattenförsörjningen är kritisk för att en släckinsats skall kunna få ett lyckat resultat. Kan inte brandfordon användas i tunneln så måste vattentransporten vara förberedd med fasta permanenta system. Behovet av vatten är omfattande och beror på storleken på branden. Enligt tabell 5.3 kommer en personbilsbrand att behöva minst 226 L/min, medan en lastbilsbrand 1250 L/min.

Vid en lastbilsbrand på 158 MW ger figur 5.5 en beräknad kritisk strålningsnivå för att möjliggöra en brandsläckningsinsats på cirka 25 meters avstånd från branden. Vid en omfattande släckinsats med Fogfighter strålrör skulle detta enligt tabell 5.5 medföra ett behov av tolv stycken strålrör för att hantera branden på 25 meters avstånd. Tolv strålrör kommer enligt tabell 5.3 att förbruka totalt cirka 5000 L/min. Enligt tabell 5.2 behöver denna släckinsats pågå i 30 minuter för att kontrollera branden.

Underlättande av utrymning och genomförande av livräddning

Räddningstjänsten kan behöva hantera en omfattande utrymnings- och livräddningssituation med mycket människor inblandade och måste vara förberedda på detta. Ser man på resultatet från avsnitt 4 så inser man att vid olyckor med mer omfattande bränder så kommer många människor att vara kvar i tunneln och vara i behov av en livräddande insats för att inte dö i den giftiga röken. Vid mindre omfattande bränder är risken överhängande att människor finns kvar inne i den rökfyllda tunneln, men oförmögna att orientera sig och hitta ut.

Riskbedömning under pågående insats

Det är mycket svårt att bedöma riskerna som räddningspersonalen utsätter sig för om de skall göra en insats in i tunneln. Riskerna kan utgöras av allt från förgiftning på grund av ett luftstopp på en brandmans andningsapparat, till att det rasar ned stenblock från det värmepåverkade tunneltaket. En räddningsinsats vid en brand i en tunnel kommer att innebära omfattande och långa rökdykarinsatser i okänd miljö, vilket innebär stora risker. Vid varje räddningsinsats är det av största vikt att den ansvarige räddningsledaren gör en väl genomtänkt riskbedömning av arbetet. Vid rökdykning är det direkt uttalat att räddningsledaren skall se till att de risker som rökdykare utsätts för är rimliga med tanke på vad som kan uppnås med insatsen .

Kommunikation mellan de olika organisatoriska delarna av insatsen

Det måste finnas en tryggad kommunikation mellan personalen som befinner sig i säker miljö och den del av insatspersonalen som genomför en invändig rökdykarinsats. För att radiokommunikationen skall fungera vid en räddningsinsats i en tunnel måste denna vara välplanerad och förberedd.

5.5 Modell av rökdykarinsats

För att få en uppfattning om vilken kapacitet en räddningstjänst har för att göra en insats i en tunnel finns några alternativa metoder. Den mest påtagliga metoden är att genomföra fullskaliga försök och prova hur länge en grupp rökdykare klarar av olika situationer. Problemet med denna metod är att den är mycket resurskrävande och av praktiska skäl kan enbart några få situationer undersökas. Den andra metoden innebär att en modell skapas som beskriver hur en rökdykarinsats går till. Denna modell kan sedan användas för att undersöka en rad olika situationer, även sådana som skulle innebära fara för rökdykarens liv. Problemet med att modellera räddningsinsatsen är att kunna beskriva insatsen i generella termer d v s är modellen en bra beskrivning av en verklig situation? Detta brukar kallas för modellens validitetsproblem. Att använda modeller blir alltid en förenkling av verkligheten och det gäller att minska denna skillnad mellan modell och verklighet. I följande avsnitt beskrivs en modell som används för att jämföra olika rökdykarsituationer som alla är relevanta vid en insats i en tunnel. Modellen används också för att uppskatta rökdykarnas insatsmöjligheter i den rökfyllda tunneln (nedströms branden) i de fyra beräkningsfallen i avsnitt 6.

Rökdykarmodellen beskriver hur nära en grupp med rökdykare kan komma en brand som inträffat i en tunnel. Insatsen kan antingen göras från mynningen eller från en insatsväg i tunneln. Det betyder att såväl enkelrörstunnlar som dubbelrörstunnlar kan undersökas.

En insats kännetecknas högst troligen av dålig sikt, svåra kommunikationsmöjligheter, ökande temperatur och strålningsintensitet och begränsad tid för avancemang in i tunneln. Dessutom går en del resurser åt för att

bara transportera rökdykarna till en aktuell plats i tunneln. Det innebär att ju längre in rökdykarna kommer desto kortare blir den kvarvarande tiden som kan användas för att avancera ytterligare.

Det innebär att det finns en kritisk längd som ett oändligt antal rökdykargrupper kan avancera in i en tunnel. Vid denna längd kommer rökdykarna att förbruka all tillgänglig tid enbart genom att förflytta sig in i tunneln och ändå ha resurser kvar för att säkert kunna ta sig ut igen. Den kritiska längden beror då på hur rökdykargruppen väljer att använda tiden som finns till förfogande samt hur denna beräknas. Det ska nämnas redan nu att det är egentligen inte enbart den enskilde rökdykaren som har detta val utan det styrs av faktorer som t ex utbildning och formella regler för rökdykning. Faktorer som den enskilde rökdykaren delvis kan påverka är gånghastighet och fysisk tålighet mot exempelvis värme.

5.5.1 Modellstruktur

För att, med en enkel beräkningsmodell, kunna bestämma hur långt in en rökdykarinsats kan ske måste den kunna beskrivas i kvantitativa termer och förenklas. Vidare måste de arbetsuppgifter som rökdykargruppen utför kunna specificeras.

I modellen för rökdykarinsatsen arbetar ett rökdykarpar antingen med

- att förflytta sig in i tunneln och lägga ut slang eller
- när de kommit till slangens slut, koppla ett grenrör och förbereda för nästa slanglängd.

Det betyder att uppgifter som livräddning inte ingår utan syftet med modellarbetet är att undersöka vilka faktorer som gör att insatsen kommer att lyckas. Med lyckas avses att rökdykarna kommer fram till branden och har möjlighet att göra en insats. Modellen kommer därför inte att fullt ut kunna beskriva hur rökdykarna i alla situationer arbetar. Figur B3.1 i bilaga 3 illustrerar modellens struktur. En väsentlig förutsättning gäller antalet tillgängliga rökdykargrupper. I modellen antas att det finns tillräckligt med övriga resurser så att när en rökdykargrupp är förbrukad kan en ny fortsätta där den föregående slutade. Det ställer ganska stora krav på den omkringliggande organisationen om det ska fungera i en verklig situation men för syftet med modellen är denna förenkling acceptabel.

Rökdykningen kommer att genomföras i en tunnel där en brand utbrutit. Insatsen sker i flera fall mot luftriktningen vilket betyder att insatsen sker i en rökfylld miljö. Begränsad sikt och förhöjd temperatur gör då att insatsen försvåras.

I modellen antas det att varje rökdykare har en konstant aktionstid, normalt 30 minuter. Denna baseras på normalförbrukning av den luft som finns i lufttuberna. Aktionstiden kan förkortas ytterligare om temperaturen eller strålningsnivån gör att kroppstemperaturen ökar mer än vad som är tillåtet. En acceptabel ökning av den normala kroppstemperaturen är ca 2,5 grader.

De aktiviteter som rökdykarna i huvudsak utför är att lägga ut slang och förbereda för nästa slanglängd. Andra aktiviteter kan vara att kommunicera med rökdykarledaren eller med varandra. Dessa aktiviteter antas vara inkluderade i den tid det tar att koppla grenröret efter en utlagd slanglängd.

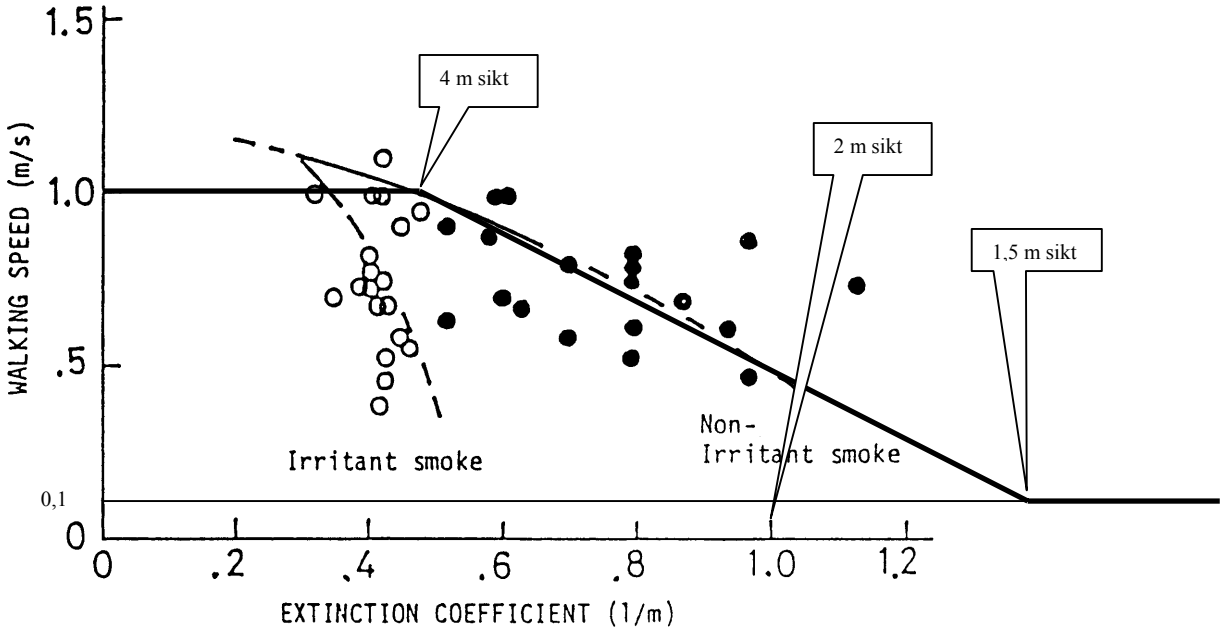
Modellen gör det också möjligt att låta flera rökdykargrupper hjälpas åt med en uppgift, dock inte samtidigt. Det kan exemplifieras med att flera grupper drar ut en slang men bara en liten sträcka per grupp. Detsamma gäller för momentet att koppla ett grenrör. Det kan tyckas vara mindre motiverat att låta flera grupper dela

på momentet att koppla ett grenrör, antingen är det kopplat och klart eller inte. Men det kan antas att en rökdykargrupp kan förbereda så att kommande grupp kan avsluta kopplingsmomentet på kortare tid än om de skulle genomföra momentet helt på egen hand.

5.5.2 Rökdykares förflyttningshastighet

En rökdykargrupps insatshastighet är mycket beroende på den fysiska miljön. I dålig sikt och med värmebelastning kan inte gruppen avancera med mycket mer än några meter i minuten. I avsnitt 5.4.5 redovisas några försök från litteraturen som använts som underlag för att bestämma rökdykargruppens hastighet. Det förutsätts att gruppen måste avancera mot branden med en vattenfylld slang.

Gånghastigheten bör också vara högre när det inte är så tät rök i tunneln. Då kan rökdykarna använda handlampor om ordinarie belysning saknas. Ofta finns det dock belysning i tunnlar. En rimlig lägsta gånghastighet är därför den som beskrivs ovan. Försök som Jin m.fl. [50] utfört tyder på att gånghastigheten kan förväntas öka när sikten är bättre än ca 1,5 m (extrapolering av data). Ett förhållande mellan röktäthet och gånghastighet kan då beskrivas som heldragen linje i figur 5.2.



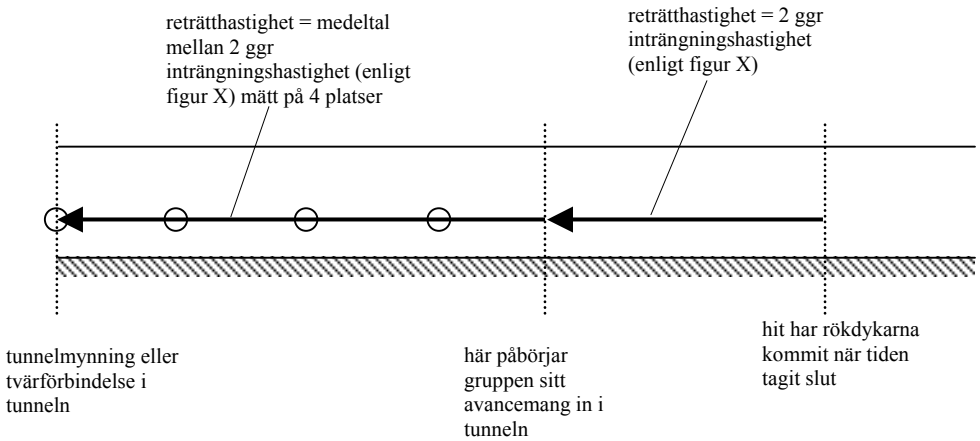
Figur 5.2 Gånghastighet som funktion av röktäthet för rökdykare som samtidigt lägger ut slang.

I figur 5.2 anges också ungefärlig siktsträcka. Grundhastigheten 1,0 m/s baseras på försöken av Bergqvist m.fl. [4] där slangdragning utan rök sker med ca 60 m/min. Lägsta gånghastigheten 0,1 m/s motsvaras av 6 m/min. Skillnaden i gånghastighet är ganska stor mellan fallen med och utan rök. Om sikten kan förbättras t ex m h a värmekameror kommer troligen gånghastigheten och därmed också förflyttningsavståndet in i tunneln att öka. Inverkan av att använda sådana undersöks också i känslighetsanalysen i avsnitt 5.5.5. För dessa fall antas att gånghastigheten in i tunneln är oberoende av närvaron av brandgas, d.v.s. 1 m/s enligt försök redovisade i avsnitt 5.4.5.

I hela ovanstående resonemang gäller att extern värme (hög temperatur och strålning) inte utgör någon belastning. Rökdykning i varm miljö behandlas i avsnitt 5.5.3.

En rökdykargrupp som ska förflytta sig in i tunneln utefter en sträcka som en tidigare grupp redan passerat kan antas förflytta sig snabbare. Detta är ett rimligt antagande eftersom den gruppen inte i samma utsträckning hindras av att miljön är okänd och heller inte behöver vara så fokuserad på att lägga ut ny slang. De ska i princip bara förflytta sig in till förra rökdykargruppens plats. Denna hastighet beräknas som en medelhastighet baserad på förutsättningarna på fyra platser i tunneln, jämnt fördelade mellan tunnelmynningen eller insatsvägens plats och främsta rökdykargruppens plats, se figur 5.3. Detta leder till att hastigheten blir något högre jämfört med när första rökdykargrupp avancerar in i tunneln.

När rökdykarna ska återvända efter att tiden förbrukats antas att gånghastigheten är den dubbla jämfört med när de avancerar in i tunneln utmed motsvarande sträcka, dock maximalt 1 m/s. Detta antagande görs eftersom det då finns en slang att följa och att miljön är relativt känd då det finns andra rökdykare längre in i tunneln. Det gäller också bara för sträckan mellan rökdykarfronten och den punkt där den aktuella rökdykargruppen inledde sitt arbete. Resterande reträttväg går de lite snabbare. Då baseras gånghastigheten på ett genomsnitt av beräknad utgångshastighet för fyra platser längs reträttvägen, se figur 5.3.



Figur 5.3 Beskrivning av hur rökdykarnas utgångshastighet beräknas. Tvärsnitt av tunnelrör sett från sidan.

Under förflyttningen in i tunneln lägger rökdykargruppen ut en slanglängd eller en del av en slanglängd. När en hel slang är helt utlagd är nästa moment att koppla grenröret. Detta håller rökdykargruppen på med tills kvarvarande tid är slut eller att de blivit färdiga med kopplingsarbetet. Beroende på om det finns tid kvar så kan de antingen påbörja utläggning av en ny slang eller så får de gå ut. Om rökdykargruppen inte hinner koppla färdigt ett grenrör kan nästa rökdykargrupp ta vid och avsluta arbetet. De får då tillgodoräkna sig den tid som förra gruppen använde för det momentet. Om flera grupper arbetar med ett och samma grenrör får de tillgodoräkna sig en effektivitetsvinst på 30 sekunder. Denna antas bero på att kopplingsmomentet kan göras snabbare om nästa grupp vet att det är den uppgiften de ska inleda med. I normalfallet tar det 4,5 minuter att koppla ett nytt grenrör. Denna tid baseras på försök som genomförts av Stockolms brandförsvar. Vid dessa försök noterades en stor spridning mellan olika gruppers förmåga att koppla nya

grenrör. Variationen i tid att koppla ihop två slangar varierade mellan 2 minuter till 8 minuter och 45 sekunder [51]. Från försök som Bergqvist m.fl. [4] redovisar ges tider på fördröjningen när en ny slanglängd ska kopplas. Tre sådana tillfällen redovisas och genomsnittstiden för dessa var ca 6,5 minuter per tillfälle (mellan 3 minuter och 20 sekunder och 8 minuter och 35 sekunder). Tiden att förbereda ett nytt avancemang kommer troligen att variera avsevärt mellan såväl olika rökdykare som olika räddningstjänster. Denna osäkerhet kommer att undersökas i en känslighetsanalys.

5.5.3 Rökdykning i varm miljö

För att göra rökdykarmodellen mer realistisk bör det finnas med en interaktion mellan rökdykargruppens aktionstid och den omgivande miljön uttryckt som förhöjd temperatur och värmestrålning. Det finns undersökningar som visar att tillgänglig rökdykartid minskar om värmeexponeringen ökar [52, 53]. Detta är ett rimligt antagande. Frågan är hur länge kan en rökdykare arbeta vid en given exponering och hur beräknas den värmedos som en rökdykare kan tolerera innan kapaciteten är uttömd? Det är troligen också så att aktionstiden är mycket beroende på vilka personer som rökdyker. Två personer kan vara olika benägna att hushålla med luft i utsatt miljö.

För att på något sätt kunna uppskatta hur lång tid som en rökdykare kan vistas i en brandmiljö kan en enkel uppvärmningsmodell användas. Modellen baseras på arbete som utförts av Fanger [54] och som sedan bearbetats vidare av Danielsson [53]. Uppvärmningen av rökdykarens kropp kan grovt förenklas till uppvärmning av ett system med koncentrerad massa, även om kriterier för sådan ej helt uppfylls. Anledningen till valet av en så enkel modell är bristen på data för brandmän som utsätts för hög temperatur och värmestrålning. Några av de undersökningar som studerats finns i Lundström m.fl. [55] och Holmér m.fl. [56] men variationen i vad som anses vara kritisk nivå är stor mellan de olika rapporterna. Det finns också skillnader i vad som definierar den kritiska händelsen; smärta, värmeutmattning, obehag och liknande. Det gör att det inte finns en entydig definition på vad som är gränsvärdet för en rökdykares kapacitet. I Persson [49] anges kritiska strålningsnivåer för brandmän som bara utsätts för värmestrålning utan någon förhöjd temperatur. Den kritiska nivån anges subjektivt när smärta uppstått. I Danielsson anges beräknade värden för toleranstider för värmeutmattning för olika arbetsbelastning. En jämförelse mellan dessa beräkningar och de i litteraturen redovisade resultaten visar på stora skillnader. Värmeutmattning bedöms inträffa när kroppstemperaturen ökat med 2,5 °C. Det rimliga är kanske att anta att vid låg strålningsnivå är det värmeutmattning till följd av exponering av förhöjd temperatur och värmestrålning som utgör kriteriet för vad som är kritiskt. Vid höga strålningsnivåer är det istället smärta till följd av värmestrålningen som anger gränsen för vad som är kritiskt. Detta skulle då gälla för den begränsade exponeringstid som är aktuell i detta fall.

Detta antagande används som utgångspunkt för att bestämma tiden när en rökdykare inte längre kan fortsätta sitt arbete. Kriteriet för när smärta utgör gränssättningen har valts till 5 kW/m^2 efter de data som Persson [49] redovisat. Över denna nivå minskar den tolerabla tiden markant. Strålningsnivån vid dessa försök varierade mellan 3,4 kW/m^2 och 17,0 kW/m^2. Vid den högsta strålningsnivån var tiden till smärta knappt två minuter.

Beräkning av tiden tills en rökdykare drabbas av värmeutmattning kan bestämmas genom att ställa upp en värmebalans för kroppen. Enkelt uttryck kan den skrivas som

värmestrålning + konvektion + ledning + producerad värme = kylning via svettning + värmelagring i kroppen (ökning av kroppstemperaturen)

Av dessa har inte värmeledningen någon dominerande ställning för värmeupptagningen i kroppen och dess bidrag försummas därför. För brännskador är den dock betydelsefull. Uttryckt som en ekvation kan värmebalansen skrivas som

$$fA\left(I_{rad} f_{eff} \frac{R_a}{R_c} + \frac{T_g - T}{R_c} + 0 + \frac{M}{f}\right) = fA\frac{p_s - p_a}{R_e} + mc_p \Delta T \Delta t \qquad (5.3)$$

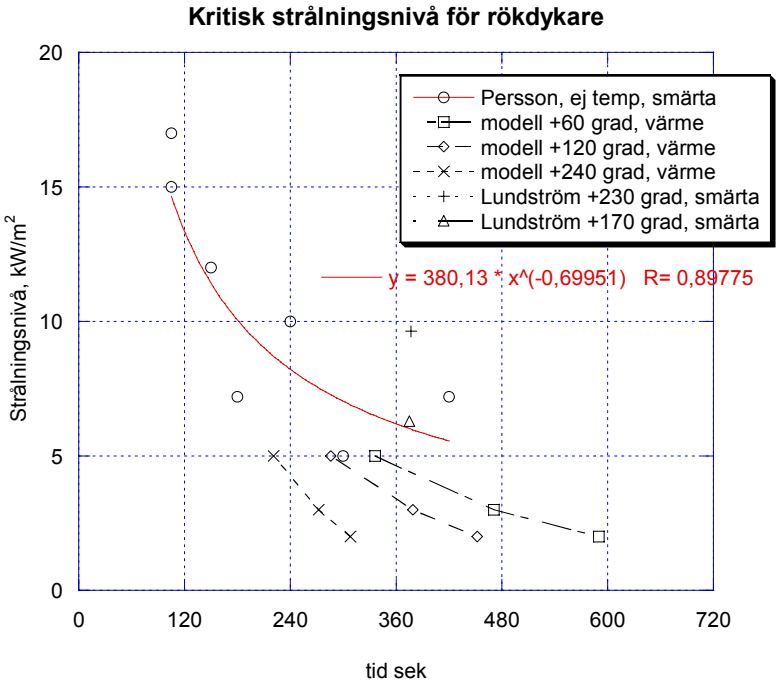
Ekvationen som beskriver ökningen av kroppstemperaturen är egentligen en differentialekvation. Men eftersom den sökta ökningen av kroppstemperaturen är liten, bara 2,5 °C kan ovanstående förenkling göras och tiden beräknas i ett steg. Skillnaden mellan att lösa differentialekvationen med numeriska metoder och ovanstående förenkling är mindre än en procent uttryckt i kritisk tid. Den förenklade beräkningen kan därför användas i rökdykarmodellen för att bestämma en kritisk tid för rökdykarinsatsen. De ingående variablerna presenteras i tabell 5.6.

Tabell 5.6 Värden på parametrar använda i rökdykarmodellen.

Variabel	**Beskrivning**	**Antaget värde**
f	Faktor pga areaökning när kläder tas på, -	1,3
A	Kroppsyta, m^2	1,85 m^2
I_{rad}	Infallande strålningsnivå, W/m^2	beror av miljön
f_{eff}	Del av kroppsytan som är mottaglig för strålning, -	0,71
R_a/R_c	Andel av strålning som ej absorberas i kläderna, -	0,15
R_c	Värmemotstånd i kläderna, Km^2/W	0,465 Km^2/W
T_g	Brandgastemperatur, °C	beror av miljön
T	Kroppsmedeltemperaturen, °C	37 °C
M	Värmeproduktion i kroppen, W/m^2	300 W/m^2
p_s	Vattenångans partialtryck vid huden, Pa. Antaget mättnadsångtryck vid 100 % RF och 36 °C	5940 Pa
p_a	Vattenångans partialtryck i omgivningen, Pa. Antaget årsmedelångtyck.	700 Pa
R_e	Klädselns ångmotstånd, Pam^2/W	75 Pam^2/W
m	Kroppsmassa, kg	75 kg
c_p	Kroppens värmekapacitet, J/kg/K	3480 J/kg/K
ΔT	Ökning av kroppstemperatur, °C	2,5 °C
Δt	Tid till värmeutmattning, s	beräknas

För en noggrannare beskrivning av variablerna hänvisas till Danielsson [53] och Fanger [54]. Vissa av variablerna är ganska osäkra eftersom det finns lite data som styrker antagandena. Det gäller främst ångtrycken och de olika motstånden. Men som en första skattning av värdena duger de angivna.

Figur 5.4 redovisar några av de resultat som diskuterats ovan samt beräkningsresultat med värmeutmattningsmodellen, ekv (5.3). Beräkningar redovisas för tre olika temperaturnivåer. En regressionslinje för värdena som Persson redovisar är också inritad.



Figur 5.4 Kritisk strålningsnivå för rökdykare i olika temperaturmiljöer och exponeringstider [49, 55].

I rökdykarmodellen antas det att exponeringen för värmestrålning och förhöjd temperatur påverkar rökdykaren under den tid de vistas i tunneln. Det sker däremot ingen påverkan av gånghastigheten till följd av att det är varmt i tunneln utan gånghastigheten styrs enbart av siktförhållandena. Vid insatsen påverkas rökdykargruppen av den värme som branden producerar. Vid varje plats som gruppen arbetar vid kan rådande temperatur, sikt och värmestrålning bestämmas. De beräkningsmetoder som används för att bestämma detta redovisas i Bilaga 3. Dessa modeller beräknar temperaturen som ett genomsnittsvärde för hela tvärsnittet. Ingen hänsyn tas, vid beräkningen av temperaturen, till att brandgaserna eventuellt kan skikta sig vilket troligen inträffar nära branden.

Beroende på hur långt från branden rökdykargruppen befinner sig kommer påverkan av branden att utformas lite olika. När gruppen är närmare branden än 50 meter antas det att värmestrålning direkt från brandens flammor träffar rökdykaren. På längre avstånd antas att denna flamstrålning absorberas av brandgaserna som då täcker hela tunnelns tvärsnitt. Detta sker i verkligheten inte momentant vid 50 meter utan det sker en gradvis försämring av sikten. Men för att förenkla modellen görs ändå detta antagande. Det visar sig i beräkningarna att antagandet inte är betydelsefullt. Strålningsnivån från brandens flammor avtar mycket snabbt med

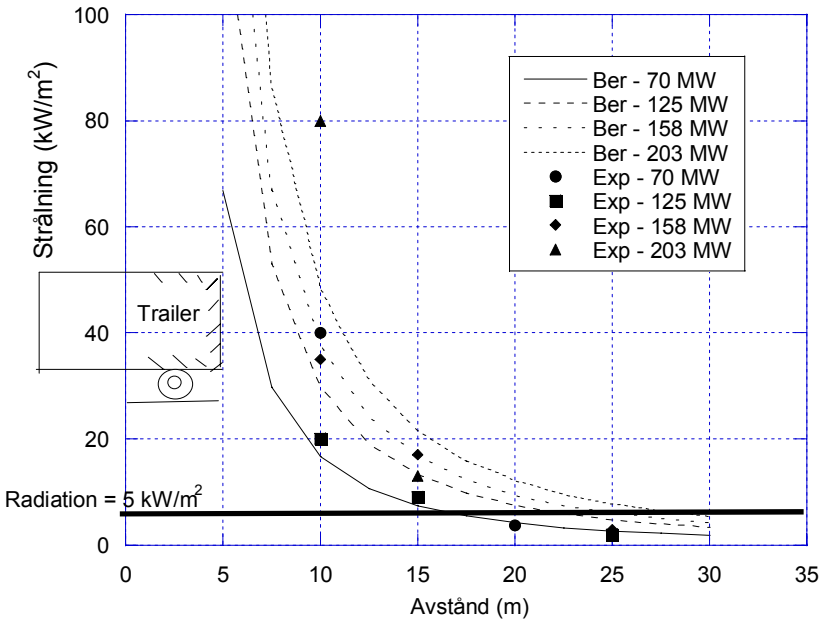
ökande avstånd. Strålningsnvån beräknas enligt ekvation 5.4.

$$\dot{Q}''_{rad,in} = \frac{0{,}3\dot{Q}_{comb}}{4\pi L^2} \qquad (5.4)$$

där $\dot{Q}_{comb}$ är brandeffekten (kW) och L (m) anger avståndet mellan brandens centrum och rökdykaren.

Värmestrålning från de varma brandgaserna påverkar rökdykaren under hela insatsen. Även i detta fall görs några förenklingar. Det antas att emissionsfaktorn från den varma gasen är 1,0. Synfaktorn mellan den infallande strålningen (både från varm gas och flammor) och rökdykaren beräknas inte explicit utan anges som en reduktionsfaktor, f_{eff}, i uppvärmningsmodellen då inte hela kroppens area utsätts för strålningen.

Om de maximala brandeffekterna från de fyra försöken i Runehamartunneln sätts in i ekvation (5.4) kan strålningen på olika avstånd från branden beräknas. Resultatet av en sådan beräkning har jämförts med resultaten från Runehamar försöken (se tabell 5.7). Överänsstämmelsen är mycket god mellan beräknade värden och uppmätta. Observera att avstånden i figuren är beräknande från brandens centrum medan i tabell 5.7 är avstånden angivna från gaveln på uppställningen (ungefär 5 m från centrum).



Figur 5.5 Beräknade (Ber) och experimentella (Exp) strålningsnivåer uppströms Runehamar bränderna som funktion av maximal brandeffekt och avstånd från brandens centrum.

Tabell 5.7 Strålningsnivåer på olika avstånd från branden (från uppströms gavel på uppställningen, d v s inte från brandens centrum) beräknande med ekvation (5.4) med maxvärde på brandeffekten för respektive försök i Runehamartunnel är använd.

Brandens utformning	**Effektutveckling (peak) HRR (MW)**	**Högsta strålningsnivå på 5 meter uppströms branden** $\dot{Q}''$ **(kW/m²)**	**Högsta strålningsnivå på 10 meter uppströms branden** $\dot{Q}''$ **(kW/m²)**	**Högsta strålningsnivå på 20 meter uppströms branden** $\dot{Q}''$ **(kW/m²)**
Träpallar och plastpallar, 10,9 ton	203	80	13	2,2
Träpallar och madrasser, 6,8 ton	158	35	17	2,9
Möbler, 8,5 ton Lastbilsdäck 0,8 ton	125	20	9	2
Kartonger med plastmuggar på träpallar, 2,8 ton	70	40	(-)	3,8 {15 m}

Det skiljer inte mycket mellan beräknande och de uppmätta värdena, och med tanke på att ventilationen gjorde att flammorna lutade nedströms och att godset i några fall föll uppström är den enkla ekvationen användbar.

5.5.4 Slanghantering

Rökdykare som avancerar in i en tunnel gör det i steg som motsvarar en slanglängd. När en slang är helt utlagd ska ett grenrör kopplas på innan nästa slanglängd kan läggas ut. Dessutom ska en extra vattenfylld slang monteras som rökdykarna har med sig som skydd vid den fortsatta utläggningen av ny slang. När grenröret är kopplat måste en bakomvarande rökdykare släppa på vattnet fram till det nyligen monterade grenröret. Därefter fylls slangen de ska ha med sig för eget skydd. Nu kan rökdykargruppen fortsätta att lägga ut nästa tomma slang. Lite beroende på hur räddningstjänsten organiserar en rökdykarinsats tar det olika lång tid att avancera framåt från det att föregående slanglängd är utdragen. Ovanstående resonemang förutsätter att rökdykarna har med sig ett grenrör samt en eller två tomma manöverslangar med munstycke förutom den matarslang de dra ut och den manöverslang de redan har med som skydd för sin insats. Den ovan beskrivna proceduren har några svagheter som är orsakade av några praktiska aspekter. Rökdykarna kan inte bära med sig hur mycket tom slang som helst in i tunneln. Det kan innebära att de måste återvända innan de nått sin maximala aktionstid. Det finns inte heller obegränsat med andra rökdykare som kan hjälpa till att släppa på vatten i utlagd slang. Även detta kan vara ett skäl för rökdykarna att återvända tidigare.

5.5.5 Känslighetsanalys

Allmänt

Grundförutsättningen är att de sju brandförloppen som redovisas i avsnitt 3 utgör den yttre miljön *nedströms* branden. För dessa förlopp provas en rad kombinationer av rökdykarinsatser med varierande förutsättningar. För att förbättra förståelsen har ett utgångsscenario skapats. Detta förutsätter att insatsen sker mot vindriktningen (nedströms branden) och genomförs då i en rökfylld tunnel. Möjligheten att göra en insats från uppströmssidan diskuteras också kortfattat.

Insatserna genomförs i utgångsscenariot från en insatsväg inne i tunneln som är 150 m från branden. Utgångspunkten är att branden inträffat utanför en tvärförbindelse och avståndet till nästa tvärförbindelse, som också är insatsväg, är 150 m. Situationen kan också gälla för en insats i en enkelrörstunnel men där insatsen sker från mynningen. Branden antas då vara 150 meter in i tunneln.

Varje rökdykare har en aktionstid på 30 minuter vilket baseras på den förmodade mängden luft som varje rökdykare har och en normal förbrukning av luft. Rökdykarna har med sig slang i längder om 50 m och ett grenrör kopplas i normalfallet på 4,5 minuter varefter ny slang kan läggas ut. Räddningsstyrkan kan inleda sin insats från tunnelmynningen eller från en förbindelsegång 15 minuter efter det att branden startat. Totalt finns det tre rökdykargrupper tillgängliga för själva avancemanget i tunneln. För den verkliga insatsen krävs sedan ytterligare grupper för att trygga säkerheten för dessa tre men det ligger utanför modellen. Tunneln som studeras har ett tvärsnitt på 50 m^2 och en takhöjd på 7 m. Lufthastigheten i tunneln är i utgångsscenariot 2 m/s.

Förutsättningar

För varje brand av de sju brandscenarierna har 16 scenarier beräknats. De scenarier som studerats är:

Tabell 5.8 Översikt över scenarier för rökdykarinsats.

Scenario	Förändring jämfört med utgångsscenario		Scenario	Förändring jämfört med utgångsscenario
1	Inga		9	Insatslängd 500 m
2	Lufthastighet 5 m/s		10	Insatslängd 500 m och lufthastighet 5 m/s
3	Kopplingstid 7 minuter		11	Insatslängd 500 m och IR-hjälpmedel
4	Kopplingstid 2 minuter		12	Insatslängd 500 m, lufthastighet 5 m/s och IR-hjälpmedel
5	Kopplingstid 8 min, 45 sek		13	Tunneltvärsnitt 90 m^2
6	Kopplingstid 8 min, 45 sek och lufthastighet 5 m/s		14	Tunneltvärsnitt 90 m^2 och 5 m/s
7	Insatslängd 250 m		15	Insatstid[a] 20 minuter
8	Insatslängd 250 m och lufthastighet 5 m/s		16	Insatstid[a] 10 minuter

[a] Med insatstid avses den tid som går mellan det att branden startat och rökdykningen kan inledas från mynningen eller förbindelsegången.

Resultatet av beräkningen anger om och hur långt rökdykargrupperna kommit i sin strävan att nå branden. Dessutom anges vilka miljöförutsättningar som insatsen sker i dvs om det är möjligt att göra en släckinsats efter förflyttningen i tunneln.

Resultat brandscenario 1 (8 MW)

Med detta brandförlopp finns det stora möjligheter att kunna göra en lyckad insats även om insatsen sker genom brandgaserna. Förutsättningen är att två personbilar fattat eld. Det är förhållandevis enkelt för rökdykarna att ta sig fram till brandkällan och sikten är ofta flera meter vilket gör att rökdykarna kan gå förhållandevis fort även utan IR-hjälpmedel. För fallen då branden är 150 m från insatsvägen tar det mellan 12-30 minuter för 1-2 rökdykargrupper att komma fram till branden. Skillnaden i tid beror främst på hur lång tid det tar att koppla ihop två slangar. Arbetsmiljön är förhållandevis lätt att vistas i för rökdykarna och temperaturen når sällan över 50 °C. Det betyder att den kritiska parametern är luftmängden som rökdykaren har med sig.

Om avståndet mellan insatsvägen och branden ökar till 500 m krävs det att alla tre rökdykarna hjälps åt. Det tar då närmare en timma från insatsens början innan alla nått fram. Om rökdykarna förses med IR-hjälpmedel går det lite snabbare att komma fram till branden men det är inte så stor skillnad mot att inte ha dessa hjälpmedel pga den goda miljön.

Från de genomförda beräkningarna kan det konstateras att insatstidens längd inte är så viktig i sammanhanget. Eftersom brandförloppet redan nått sin maximala effekt när insatsen sker är det egentligen bättre att vänta eftersom arbetsmiljön förbättras i och med att brandeffekten är avtagande vid insatsen. Denna slutsats bygger dock på kännedom om brandförloppet.

Skillnader i resultaten beroende på om tunneln har 50 m^2 eller 90 m^2 var inte stor. För den större arean tog det ca 12 minuter för en rökdykargrupp att nå branden medan för den mindre arean krävdes det två grupper och det tog ca 20 minuter i utgångsfallet.

Resultat brandscenario 2 (25 MW)

I detta fall antas att branden utbrutit i en mindre lastbil eller en buss. Branden utvecklar en högre effekt jämfört med brand 1. Det betyder att svårigheterna att göra en insats genom brandgaserna ökar. I normalfallet klarar de tre rökdykarna av att avancera fram till ca 10 m från branden och det tar ca 30 minuter. Med ökad tid för att koppla ihop slangar når de inte ens så långt, bara 100 m. Om tiden är kortare, scenario 4 enligt tabell 5.6 når de hela vägen fram på under 30 minuter.

För det större tunneltvärsnittet, scenario 13, är förhållandena bättre och rökdykarna är framme vid branden efter ca en halvtimmas insats.

Om rökdykarna däremot utrustas med IR-hjälpmedel är skillnaden avsevärd. Då kommer redan den första rökdykargruppen att nå målet och på lite drygt 10 minuter. Detta visar på siktens betydelse för insatsen. Ett liknande resultat kan konstateras för scenarierna 7, 11 och 12. I det första av dessa når rökdykarna ca 150 m in i tunneln dvs de har ca 100 m kvar till branden. Om rökdykarna utrustas med IR-hjälpmedel kan de göra en insats i en 500 m lång tunnel och nå branden. Detta tar ca 50 minuter men de når hela vägen fram. I detta fall ska det nämnas att branden i praktiken slocknat efter denna tid och miljön är god.

Skillnader observeras också för olika lufthastigheter. Om lufthastigheten är 5 m/s ökar möjligheterna att göra en insats. Detta beror på att brandförloppet är snabbare d.v.s. mindre bränsle finns kvar när räddningsinsatsen inleds. Resultatet beror på

hur brandmodellen beskrivits i analysen och resultaten är förenade med en viss osäkerhet, se vidare diskussionsavsnittet.

Resultat brandscenario 3 (75 MW)

I detta fall växer branden till 75 MW vilket är en förhållandevis stor brand och som innebär stora svårigheter att genomföra en insats. I utgångsfallet, scenario 1 enligt tabell 5.8, kommer rökdykarna bara en kort sträcka in i tunneln, ca 60 m. Därefter är luften förbrukad och rökdykarna exponeras för mycket av branden. Problemet är också här att för mycket tid går åt för att förflytta sig. Om förflyttningshastigheten kan öka hinner rökdykarna att arbeta sig in i tunneln så att de når branden utan att drabbas av värmeutmattning. Det krävs i så fall att gånghastigheten är högre t ex om IR-hjälpmedel används.

Utan sådan utrustning finns det inga möjligheter att nå branden annat än att vänta så att brandeffekten minskar. Temperaturen under förloppet ligger kring 150 °C och strålningsnivån kring 3 kW/m^2 vilket i sig inte är så höga nivåer men exponeringstiden är lång.

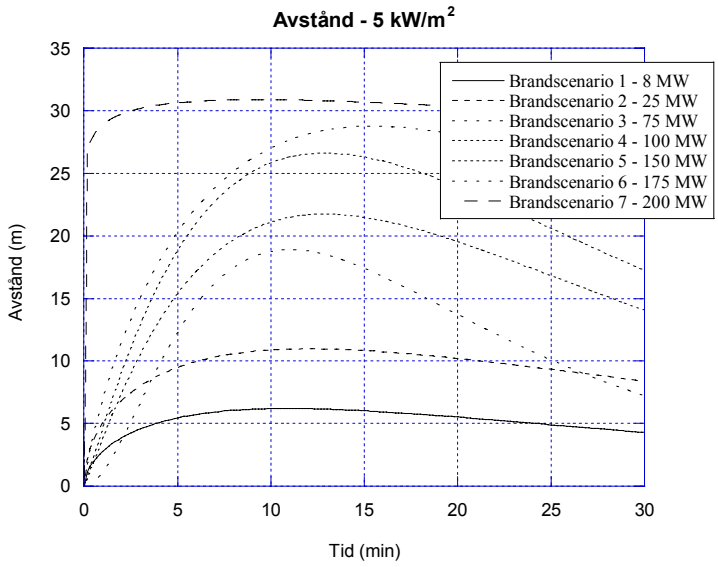
Resultat brandscenarierna 4-7 (100 MW - 200 MW)

För dessa scenarier är det inte möjligt att göra någon insats enligt de förutsättningar som gäller för analysen, tabell 5.6. Temperaturen och strålningsnivån är helt enkelt för höga. Vid insatsens början ligger temperaturen 150 m från branden på ca 200°C för det lindrigaste scenariot d.v.s. brandscenario 4. Närmare branden ökar denna. I utgångsfallet för brandscenario 4 klarar de tre rökdykarna av att förflytta sig 50 m in i tunneln. Detta sker inom loppet av 10 minuter från insatsens början. För det större tvärsnittet, scenario klarar de av att nå ca 60 m in i tunneln och de kan arbeta något längre, ca 15 minuter, innan rökdykningen är omöjlig att bedrivas vidare. Förhållandena är ännu värre för brandscenarierna 5, 6 och 7.

5.5.6 Insats uppströms branden

Insatsen uppströms branden styrs till stor del av strålningsnivån från brandkällan, förutsatt att man har kritisk lufthastighet inne i tunneln (ingen backlayering), kombinerad med kastlängden på strålrören. I figur 5.6 visas det beräknade avståndet till 5 kW/m^2 strålningsnivån för de olika brandscenarierna som funktion av tiden. I bilaga 5 redovisas en teoretisk modell som beräknar avståndet till den kritiska strålningsnivån som funktion av brandeffekten.

Om man antar att tiden från brandens start till rökdykningen kan inledas är ca 10 minuter och att kopplingstiden är ca 7 minuter så kan rökdykarna stå ungefär 5 – 10 m från branden för brandscenario 1 och 2 (8 och 25 MW), ungefär 15 m för brandscenario 3 (75 MW), ungefär 20 m för brandscenario 4 (100 MW), ungefär 25 m för brandscenario 5 (150 MW) och ungefär 30 m för brandscenario 6 och 7 (175 och 200 MW). Dessa värden kan jämföras med tabell 5.4 och 5.5 som visa vattenbehovet för respektive avstånd och typ av fordon. Det är uppenbart att för de stora bränderna (>100 MW) så kommer vattenbehovet att vara avsevärt för att klara uppgiften. Samtidigt så inser man att ju längre tid branden pågår innan släckningsinsatsen börjar dessto större möjlighet att bekämpa den på grund av att branden börjar avta när bränslet börjar ta slut. Däremot om det finns risk att branden sprids vidare till andra fordon nedströms branden så kommer uppgiften för räddningstjänsten att bli mycket svår. Branden har då hunnit spridas innan de påbörjar sin släckningsinsats.



Figur 5.6 Kritiskt avstånd på grund av strålningsvärme (5 kW/m^2) för de olika brandscenarierna som definierats i avsnitt 3.

6 Beslutsstöd vid räddningsinsatser

6.1 Inledning

Den kommunala räddningstjänstens aktiviteter under en insats är beroende av hur den aktuella olyckssituationen ser ut när räddningstjänsten kommer fram till tunneln och hur händelseförloppet utvecklas under tiden efter ankomsten. Det finns därför inga generella metoder som alltid kan användas vid en tunnelbrand, utan hur räddningsinsatsen planeras och genomförs är starkt beroende på omständigheterna vid den specifika olyckan. I avsnitt 5 presenterades olika taktiska inriktningar och arbetsmetoder som kan vara aktuella att använda, men därmed inte sagt att alla dessa är möjliga eller ens lämpliga vid alla tunnelbränder.

För att genomföra räddningsinsatser i så komplexa anläggningar som vägtunnlar så måste dessa insatser vara väl förberedda. En insatsplanering bör hantera både de dimensionerande skadefallen och de övriga skadefall som är tänkbara att inträffa i tunneln.

Insatsplaneringsarbetet bör bestå av:

- konsekvensbeskrivning av de olika olyckorna,
- framtagandet av arbetsrutiner för både objektspersonal och räddningspersonalen vid olyckor
- slutligen produktionen av en insatsplan för att underlätta vid genomförandet av räddningsinsatsen.

För att underlätta vid en sådan planering bör de olika olycksscenarier undersökas med avseende på brandförlopp, utrymningsförlopp och på hur räddningsinsatsen skall genomföras.

Brandförloppet kan beskrivas i termer av utvecklad brandeffekt (se avsnitt 3), spridning av brandgaser, temperaturfördelning, koncentrationer av giftiga gaser, värmestrålning och sikt på olika platser i tunneln (bilaga 3). Eftersom branden är en dynamisk process måste hela förloppet med dess termer dessutom kunna beskrivas som funktioner av tiden.

Utrymningsförloppet beskriver hur de bilister som inledningsvis befinner sig i tunneln utrymmer efter brandstarten (se avsnitt 4). Under själva utrymningsförloppet påverkas dessa bilister av brandförloppet vilket innebär att det finns en koppling mellan möjligheterna att utrymma och exempelvis sikten i tunneln och temperaturfördelningen. På samma sätt som för brandförloppet är utrymningsförloppet också dynamiskt.

Slutligen bör också själva räddningsinsatsen beskrivas (se avsnitt 5). För att kunna genomföra detta så måste händelserna analyseras och räddningstjänstens möjligheter inventeras och studeras, samt att en kvalificerad bedömning av rimligheten med de tänkta möjligheterna måste göras. Utifrån detta kan den aktuella kommunala räddningstjänsten ta fram sina möjligheter att agera vid en brand i en tunnel. Denna kan komma till uttryck i en uppskattning av möjligheten att göra olika typer av räddningsinsatser t ex att genomföra en rökdykningsinsats i den rökfyllda tunneln för att eventuellt kunna livrädda bilister som av någon anledning inte hunnit utrymma. På samma sätt som för brandförloppet och

utrymningsförloppet är också räddningsinsatsen dynamisk. Uppmärksamma att räddningsinsatsen inte startar samtidigt som två övriga förloppen eftersom det tar en viss tid att larma och förbereda en insats.

Insatsplaneringen bör leda fram till genomarbetade handlingsalternativ som kan användas vid olika typer av olyckshändelser. Det är viktigt att insatsplaneringen berör hela räddningsinsatsproblemet och speciellt det taktiska upplägget av insatsen.

För att visa på möjligheterna att genomföra en planering av insatsen kommer i de följande fyra avsnitten olika scenarier att presenteras vilka ger en indikation på hur situationen kan utvecklas i samband med brand. Scenarierna är inte på något sätt representativa för tunnelbränder utan utgör istället fyra olika typfall som kan vara aktuella att planera mot. För varje scenario görs beräkningar för brand, utrymning och räddningsinsats, som är relevanta för de fyra förloppen. Dessa beräkningar ligger sedan till grund för den taktiska bedömning som insatsplaneringen gör i vart och ett av fallen. Det ska dock poängteras att insatsplenringen i dessa fyra fall är väl förtrogen med hur bland annat brandförlopp utvecklas. Detta är troligen inte överensstämmande med verkligheten och följden blir att detta är en av de största källorna till osäkerhet vid en verklig räddningsinsats. Det skall också påpekas att i samtliga scenarier bygger på antagandet om räddningsinsatsens genomförande på att olyckan sker i storstadsmiljö och med de räddningsresurser som finns tillgängliga i dessa områden. Tidsgränserna för hur snabbt räddningsstyrkorna anländer bygger på att det tar maximalt tio minuter att nå objektet. Förflyttningshastigheterna för insatspersonal bygger på de försök som presenteras i Bergqvist m.fl. [4].

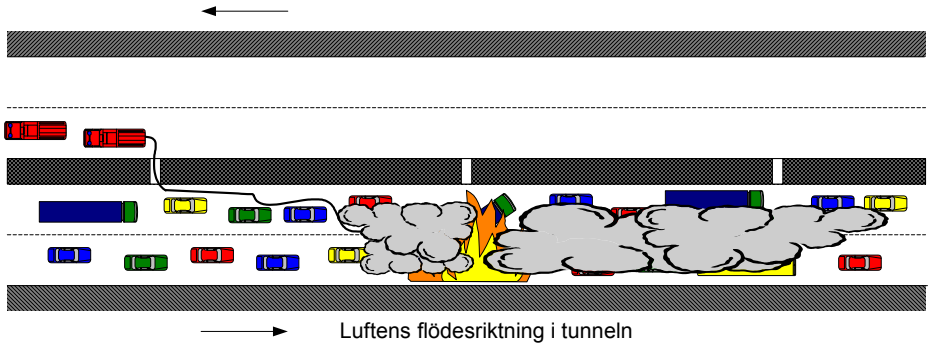
I redovisningen tas ingen hänsyn till det faktum att larmet till räddningstjänsten kan fördröjas, att trafiksituationen kring tunneln avsevärt kan fördröja insatsen och att en stor fördröjning kan ske under de olika moment som ingår i insatsen. Detta innebär också att värdena som presentera kring räddningsinsatsen skall ses som mycket osäkra och skall egentligen bara ge en tidsomfattning på de olika momenten om alla momenten i dessa fungerar utan några som helst fördröjningar.

I de analyser som görs för räddningsinsatsen nedströms branden (med tredje insatsgruppen) beaktas inte den effekt som eventuella rökdykare uppströms branden har på förloppet. Det antas alltså att brandeffekten helt följer de kurvor som redovisas i figur 3.4.

6.2 Räddningsinsats vid brand i dubbelrörstunnel

6.2.1 Brand i en buss (brandscenario 2 – 25 MW)

Det första scenariot beskriver en utrymning och räddningsinsats vid en brand i en buss, figur 6.1. Brandförloppet följer beskrivningen enligt brandscenario 2, se avsnitt 3.5. Branden uppstår i en dubbelrörstunnel med ett tvärsnitt på 90 m^2. Tunnel är utrustad med längsventilation, se avsnitt 5.3 och lufthastigheten är 2 m/s i detta aktuella fall. Tunneln är utförd med tvärgående förbindelsevägar mellan de två tunnelrören var 150:e meter. Branden inträffar precis utanför en sådan förbindelseväg.



Figur 6.1 Exempel på en räddningsinsats vid en brand i en dubbelrörstunnel med ett tvärsnitt på 90 m^2. Tunnel är utrustad med längsventilation och flödesriktningen är den samma som trafikriktningen. Tunneln är utförd med tvärgående förbindelsevägar mellan de två tunnelrören var 150:e meter och branden antas inträffa utanför en sådan förbindelseväg.

Då branden bryter ut så skall trafiken i det drabbade tunnelröret stoppas uppströms brandplatsen. Den fasta ventilationen i tunneln skall försäkra att ingen brandrök påverkar de människor som håller på att utrymma uppströms brandplatsen. Nedströms brandplatsen kommer all trafik i det drabbade röret att utan hinder hinna köra ut innan tunneln fylls med rök. I både det friska och det drabbade tunnelröret skall tillfartstrafiken till tunneln stängas av. Stockholms brandförsvar har erfarenheter från inträffade bränder som visar att denna avstängning bör utgöras av ett fysiskt hinder som stoppar fordon från att köra in i tunneln annars så kommer fordonen inte att hindras från att köra ned i tunneln.

Räddningstjänsten skall använda sig av det friska tunnelröret och via tvärgående förbindelsegångar mellan rören och påbörja sin insats mot det drabbade tunnelröret. Framkörningen till tunnelöppningen kan fördröjas av trafiksituationen utanför tunneln som påverkas av både trafikavstängningen och eventuell rökutveckling från det drabbade tunnelröret. Räddningsfordonen kommer att köra med trafikriktningen ned i det friska tunnelröret ifrån närmaste påfartsväg. Det är viktigt att det finns effektiva tillfartsvägar för räddningsfordonen till dessa tunnelöppningar så att inte insatsen fördröjs. Framkörningen till skadeplatsen sker via det friska tunnelröret till den närmaste förbindelsegången uppströms branden.

I detta scenario så brinner det direkt utanför en förbindelsegången, vilket medför att insatsen påbörjas 150 meter uppströms från branden. Vid framkomst möter räddningspersonalen några av de drabbade som påbörjat utrymningen till det friska tunnelröret.

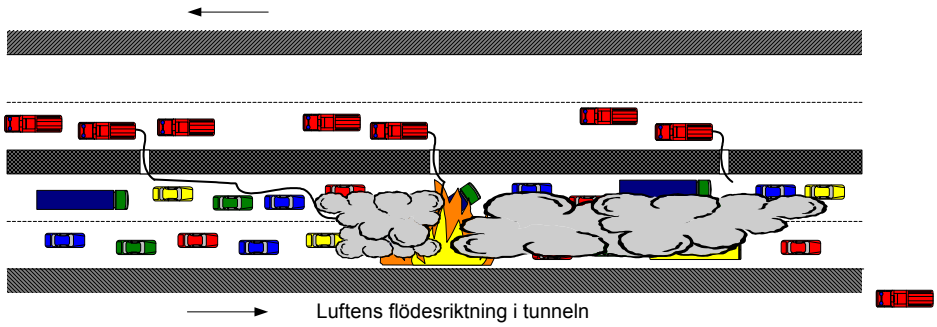
En brandsläckningsinsats förbereds genom slangutläggning i det drabbade tunnelröret. Då slangutläggning är klar avancerar insatspersonalen fram mot branden. Då personalen närmar sig brandplatsen ökar strålningsintensiteten, se tabell 6.1, och vid ett avstånd på 10 meter från branden påbörjas släckningen. Rökdykare som gör en insats uppströms branden avancerar med vinden i ryggen. Möjligheten att komma åt branden begränsas av den maximala strålningsintensiteten som rökdykaren kan arbeta i. Denna maximala strålningen uppgår till 5 kW/m^2 ungefär 10 m från brandens centrum.

Branden i bussen är så omfattande att det enda strålrör som insatspersonalen drar med sig fram inte är tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen, se tabell 5.6. För

att förstärka denna släckinsats så skickas ytterligare en släckgrupp med ett strålrör fram mot branden. Då dessa båda grupper bekämpar branden är vattenflödet tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen. Denna insats fortsätter till dess att branden har dämpats och eftersläckningen kan inledas.

Samtidigt som brandsläckningsinsatsen pågår så sätts en insats in för att utrymma det drabbade tunnelröret på människor som befinner sig uppströms från brandplatsen.

Beroende på omfattningen på branden så bör andra och tredje anlända enhet förstärka den första släckinsatsen eller att påbörja en genomsökning av tunneln nedströms brandplatsen. Denna genomsökning har till syfte att livrädda de människorna som eventuellt kan befinna sig i röken samt undanröja hotet för brandspridning till eventuella fordon i röken nedströms branden.



Figur 6.2 Exempel på en räddningsinsats vid en brand i en dubbelrörstunnel (90 m^2) med kösituation ned- och uppströms branden. Tunnel är utrustad med längsventilation (som kan även vända luftflödet) och flödesriktningen är den samma som trafikriktningen. Tunneln är utförd med tvärgående förbindelsevägar mellan de två tunnelrören och branden antas inträffa utanför en förbindelseväg.

Om dubbelrörstunneln, som visas i figur 6.2, är byggd i en storstadsmiljö kan det vara möjligt att det är en kö och stillastående trafik i tunneln. Vid en brand med en kösituation i tunneln är säkerhetskonceptet satt ur funktion. Säkerhetskonceptet förutsätter att det aldrig får vara kö i tunneln. Vid en brand kommer röken att ventileras från branden i trafikens riktning. Bilarna nedströms branden kommer inte att ha möjlighet att köra ut ur tunneln, vilket innebär att det sitter ett antal människor kvar i röken nedströms branden. En del hinner troligen att utrymma till det parallella tunnelröret, men troligen inte alla. Möjligheterna för överlevnad kommer att påverkas av hur snabbt bilisterna påbörjar utrymningen, se nedan. Helt plötsligt står tunneloperatören och den kommunala räddningstjänsten inför problemet att behöva hantera folk som finns kvar i röken nedströms branden.

De bilister som ska utrymma från det drabbade tunnelröret nedströms branden har i detta fall 150 m som längst att gå för att nå samma utgång. I förutsättningarna antas att bilisterna kan beskrivas enligt förutsättningarna i tabell 4.1 vilket då innebär att den första bilisten som har längst att gå befinner sig 130 m från utgången. Reaktionstiderna för bilisterna redovisas i samma tabell. Beräkningar görs också på hur länge bilister som av någon anledning inte utrymmer för att kunna bedöma deras möjligheter att överleva tills en rökdykarinsats når dem. Förutsättningarna att överleva utan att utrymma beräknas för fyra platser, 30 m, 70 m, 100 m och 150 m från branden.

Samtliga bilister som utrymmer klarar att ta sig till den första utrymningsvägen nedströms branden. De utrymmer alla genom röken men ackumulerar inte tillräckligt med värme eller giftiga gaser för att hindras från att nå en säker plats. Temperaturen under utrymningsförloppet uppgår maximalt till strax under 50°C för den mest utsatta bilisten och den infallande strålningsnivån från flammor och rök uppgår maximalt till 0,5 kW/m^2. Bilister som utrymmer under dessa förutsättningar har alltså goda chanser att överleva branden.

Bilister som inte utrymmer får enbart problem om de inledningsvis är nära branden. Beräkningar för avstånden 70 m, 100 m och 150 m uppvisar inte några kritiska nivåer för vad människan kan klara av. Vid 30 m från branden blir värmedosen för en person kritisk. Däremot är inte röken tillräckligt giftig utan det finns goda chanser att överleva.

Räddningstjänsten kan få indikationer på att det finns kvar människor nedströms branden på en hel rad olika sätt. Pågår en utrymning ur förbindelsegångarna nedströms branden kan detta vara en indikation på att människor befinner sig i den rökfyllda delen av tunneln. Om utrymning pågår nedströms branden kan räddningsinsatsen behöva utföra en rökdykarinsats för att underlätta utrymningen och genomföra en livräddning av de människor som eventuellt finns kvar nedströms branden.

I detta beskrivna scenario så skulle innebörden av detta bli att de den andra eller tredje räddningsenhet som anländer till skadeplatsen skulle sättas in på denna rökdykarinsats. Detta betyder att en rökdykningsinsats mot branden på nedströms sidan inleds 150 m från branden. Målsättningen med denna rökdykarinsats är främst att livrädda människor som är kvar i röken. Om det inte finns människor kvar i röken kan de också användas för att förhindra brandspridning till fordonen som befinner sig i detta område.

Rökdykargrupperna kan i detta fall redan efter 15 minuter inleda en rökdykningsinsats för att livrädda personer som inte utrymt. Det förutsätts att de i normalläget inte har tillgång till IR-hjälpmedel för att orientera sig i röken. Rökdykarna ska under sin förflyttning också lägga ut slang och koppla ihop olika slanglängder vilket förbrukar tid. I beräkningarna antas att det tar 4,5 minuter att förbereda en ny slanglängd när den tidigare rullats ut. Det antas också att rökdykarna använder slanglängder om 50 m. Totalt finns det tre rökdykargrupper som kan avancera in mot branden och det förutsätts finnas understödjande rökdykare som fyller på som skyddsgrupper.

Rökdykare som ska försöka göra en räddningsinsats i den rökfyllda tunneln kommer att möta ganska stora svårigheter, främst på grund av den dåliga sikten. Den nedsatta sikten gör att gånghastigheten för rökdykarna är låg vilket gör att det tar tid för dem att nå branden. Temperaturen under förloppet är låg och utgör inte något problem. Totalt behövs tre rökdykargrupper för att nå fram till branden.

Resultat av en känslighetsanalys

För att undersöka konsekvensen av bilister som väntar längre med att utrymma gjordes också beräkningar där reaktionstiden ökades med en faktor två jämfört med tiderna i tabell 4.1. Bilisten som inledningsvis är närmast utgången når utrymningsvägen först vilket är ca 6 minuter efter branden startat. Bilisten som inledningsvis befinner sig närmast branden kommer fram sist till utrymningsvägen, ca 13 minuter efter branden startat. Samtliga bilister når utrymningsvägen.

Rökdykarinsatsen förbättras också avsevärt om rökdykarna använder IR-kamera. I det fallet kommer den första rökdykargruppen att nå fram till branden redan efter lite drygt 10 minuter efter insatsen startat d.v.s. ca 25 minuter efter branden startat.

Tabell 6.1 Översiktlig jämförelse mellan utvecklingen av branden, utrymningen och räddningsinsatsen (brandscenario 2 – bussbrand).

Tid (minuter)	**Brandförloppet**	**Utrymningsförloppet**	**Räddningsinsatsen**	
			Ej kö i tunnel	**Kö i tunnel**
0	Branden startar	Bilister stannar	Räddningstjänsten larmas	Räddningstjänsten larmas
0,5	Rök cirka 50 meter nedströms från branden	Bilist nedströms närmast branden börjar utrymma		
1	Rök cirka 120 meter nedströms från branden	Bilister 40 och 50 m nedströms från branden börjar utrymma		
1,5	Rök hela vägen fram till utrymningsvägen som finns 150 meter nedströms från branden	Bilister 60 och 70 m nedströms från branden börjar utrymma		
2,5		Bilist 30 m från nedströms branden når utrymningsvägen		
3	Rök ca 350 meter nedströms från branden.	Bilist 140 m nedströms från branden börjar utrymma		
4		Bilist 140 m nedströms från branden når utrymningsvägen Utrymmande personer börjar komma ut i det friska tunnelröret nedströms branden.		
5		Bilist 20 m nedströms från branden når utrymningsvägen		
9		Sista bilist nedströms från branden når utrymningsvägen		
10			Räddningsstyrkorna anländer till det friska tunnelrörets öppning.	Räddningsstyrkorna anländer till det friska tunnelrörets öppning.
15			Första och andra räddningsstyrka anländer till förbindelsegången närmast uppströms från branden.	Första och andra räddningsstyrka anländer till förbindelsegången närmast uppströms från branden. Tredje räddningsstyrka anländer till

Tid (minuter)	Brandförloppet	Utrymningsförloppet	Räddningsinsatsen	
			Ej kö i tunnel	**Kö i tunnel**
				förbindelsegången närmast nedströms från branden. Rökdykarinsats påbörjas.
20	Kritisk strålningsnivå (5kW/m^2) cirka 10 m uppströms från branden			
23			Första insatsgruppen påbörjar sin släckning på ett avstånd av cirka 10 meter uppströms branden.	Första insatsgruppen påbörjar sin släckning på ett avstånd av cirka 10 meter uppströms branden. Första rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 100 m nedströms branden
25			Andra insatsgruppen påbörjar sin förstärkning av släckningen uppströms branden.	Andra insatsgruppen påbörjar sin förstärkning av släckningen uppströms branden.
30	Kritisk strålningsnivå vid cirka 8 m uppströms från branden			
33			Släckningen av branden lyckas dämpa brandutvecklingen och eftersläckning inleds.	Släckningen av branden lyckas dämpa brandutvecklingen och eftersläckning inleds.
35		Bilist som inte utrymmer från 30 m drabbas av värmeutmattning		Andra rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 50 m nedströms branden.
40				Tredje rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) klara att avancera från 50 m nedströms branden.
42			Branden är dämpad och under kontroll. Eftersläckning inleds.	Branden är dämpad och under kontroll. Eftersläckning inleds.
45				Tredje rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 30 m nedströms branden.

6.2.2 Brand i långtradare (brandscenario 4 – 100 MW)

Förutsättningarna i detta andra scenario är liknande de som presenterades i föregående avsnitt förutom att brandförloppet är i detta fallet mycket allvarligare.

I detta scenario brinner det i en långtradare där den maximala brandeffekten är 100 MW. Denna brandeffekt uppnås cirka 13 minuter efter brandstart. Brandförloppet följer beskrivningen enligt brandscenario 4, se avsnitt 2.5. Branden uppstår i en dubbelrörstunnel med ett tvärsnitt på 90 m^2. Tunnel är utrustad med längsventilation, se avsnitt 5.3 och lufthastigheten är 2 m/s i detta aktuella fall. Tunneln är utförd med tvärgående förbindelsevägar mellan de två tunnelrören var 150:e meter. Branden inträffar precis utanför en av dessa tvärgående förbindelser.

Samma förutsättningar för räddningsinsatsen som i avsnitt 6.2.1 är aktuell även i detta scenario och att det är ett kösituation i tunneln och bilar med människor befinner sig i röken nedströms branden (se t.ex. figur 6.2).

Samtliga bilister som utrymmer kommer att kunna ta sig till den närmaste utrymningsvägen nedströms branden. De utrymmer alla genom röken men ackumulerar inte tillräckligt med värme eller giftiga gaser för att hindras från att nå en säker plats. Brandeffekten har nått upp till ca 40 MW när den sista bilisten når utrymningsvägen. Temperaturen under utrymningsförloppet uppgår maximalt till ca 130 °C för den mest utsatta bilisten och den infallande strålningsnivån från flammor och rök uppgår maximalt till 2 kW/m^2. Bilister som utrymmer under dessa förutsättningar har alltså goda chanser att överleva branden.

Bilister som inte utrymmer får problem redan ganska tidigt. Redan efter ca 10 - 13 minuter drabbas de av värmeutmattning. Miljön är under förloppet väl över vad som kan anses vara tolerabelt för en person med temperaturer mellan 150 °C till över 250 °C beroende på var personen befinner sig. Möjligen kan en person som befinner sig 150 m från branden kunna överleva även om det är tveksamt men för bilister närmare branden är chanserna små att överleva. Främst är det värme i form av hög temperatur och kraftig värmestrålning som gör situationen svår att klara av.

Vid framkomst möter räddningspersonalen några av de drabbade som påbörjat utrymningen till det friska tunnelröret både uppströms och nedströms branden.

På grundval av detta så beslutar den ansvarige räddningsledaren att inledningsvis påbörja en släckinsats från förbindelsevägen 150 meter uppströms brand för att sedan sätta in en rökdykarinsats för att söka efter människor som eventuellt befinner sig i röken nedströms branden

Då slangutläggning vid förbindelsegången 150 meter uppströms branden är klar avancerar insatspersonalen fram mot branden. Då personalen närmar sig brandplatsen ökar strålningsintensiteten, se tabell 6.2, och vid ett avstånd på 20 meter från branden påbörjas släckningen på grund av värmestrålningen från branden som hindrar insatspersonalen från att förflytta sig närmare branden.

Branden i långtradaren är så omfattande att det enda strålrör som insatspersonalen drar med sig fram inte är tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen, se tabell 5.6. För att förstärka denna släckinsats så skickas ytterligare en släckgrupp med ett strålrör fram mot branden. Dessa två strålrör är inte heller tillräckliga för att dämpa utvecklingen på branden utan den brinner obehindrat. Totalt skulle det vid denna brandeffekt behövas minst 8 stycken strålrör för att få någon dämpning på branden. Dessa åtta strålrör skulle behöva bekämpa branden under 30 minuter för att få kontroll på branden, se tabell 5.3. Innebörden blir att branden successivt minskar beroende på att bränslet brinner ut, utan att släckinsatsen lyckats dämpa branden.

I detta scenario så sätts den andra eller tredje räddningsenhet som anländer till skadeplatsen på in för en rökdykarinsats från tvärförbindelsen 150 m nedströms branden.

Tabell 6.2 Översiktlig jämförelse mellan utvecklingen av branden, utrymningen och räddningsinsatsen.

Tid (minuter)	**Brandförloppet**	**Utrymningsförloppet**	**Räddningsinsatsen**
0	Branden startar	Bilister stannar	Räddningstjänsten larmas
0,5	Rök cirka 50 meter nedströms från branden	Bilist nedströms närmast branden börjar utrymma	
1	Rök cirka 120 meter nedströms från branden	Bilister 40 och 50 m nedströms från branden börjar utrymma	
1,5	Rök hela vägen fram till utrymningsvägen som finns 150 meter nedströms från branden	Bilister 60 och 70 m nedströms från branden börjar utrymma	
2,5		Bilist 20 m från nedströms branden når utrymningsvägen	
3	Rök ca 350 meter nedströms från branden.	Bilist 140 m nedströms från branden börjar utrymma	
4		Bilist 140 m nedströms från branden når utrymningsvägen Utrymmande personer börjar komma ut i det friska tunnelröret nedströms branden.	
7		Sista bilist (80 och 100 meter från branden) nedströms når utrymningsvägen	
10	Kritisk strålningsnivå vid cirka 20 m uppströms från branden	Bilist som inte utrymmer från 30 m och 70 m drabbas av värmeutmattning	Räddningsstyrkorna anländer till det friska tunnelrörets öppning.
11		Bilist som inte utrymmer från 100 m drabbas av värmeutmattning	
13		Bilist som inte utrymmer från 150 m drabbas av värmeutmattning	
15			Första och andra räddningsstyrka anländer till förbindelsegången närmast uppströms från branden. Tredje räddningsstyrkan anländer till förbindelsegången 150 meter nedströms branden och försöker påbörjar en rökdykarinsats.

Tid (minuter)	Brandförloppet	Utrymningsförloppet	Räddningsinsatsen
19	Maximal temperatur cirka 270 °C och värmestrålning cirka 13 kW/m^2 på ett avstånd av 30 meter nedströms från branden.		Första rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 120 m nedströms branden
20	Maximal temperatur cirka 150 °C och värmestrålning cirka 2 kW/m^2 på ett avstånd av 150 meter nedströms från branden Den ritiska strålningsnivå fortfarande vid cirka 20 m uppströms från branden		
23			Första insatsgruppen påbörjar sin släckning på ett avstånd av cirka 20 meter från branden. Andra rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 100 m nedströms branden
28			Tredje rökdykargrupp (i tredjeräddningsstyrkan) kommer inte närmare än 100 m nedströms branden
30	Kritisk strålningsnivå vid cirka 15 m uppströms från branden		Andra insatsgruppen påbörjar sin förstärkning av släckningen på ett avstånd av cirka 15 meter från branden.
35		Bilister som inte utrymmer från 30 m, 70 m och 100 m blir medvetslösa på grund av giftig rök.	
38		Bilister som inte utrymmer från 150 m blir medvetslösa på grund av giftig rök.	

Rökdykareinsatsen är i praktiken omöjlig att genomföra nedströms branden. Tre rökdykargrupper når som närmast 100 m från branden och därifrån kan inte någon effektiv insats genomföras. Temperaturen är mellan 150° och 180°C under rökdykarförloppet. Brandeffekten ligger mellan 75 och 100 MW när insatsen sker och är avtagande på grund av att bränslet till branden håller på att ta slut. Denna minskning av branden förutsätter att branden inte sprider sig till de fordon som befinner sig nedströms branden.

Resultat av en känslighetsanalys

Även i detta fall undersöktes konsekvensen av vad som sker de bilister som väntar längre med att utrymma. Reaktionstiden ökades med en faktor två jämfört med tiderna i tabell 4.1. Bilisten som inledningsvis är närmast utgången når utrymningsvägen först vilket är ca 6 minuter efter branden startat. Bilisten som inledningsvis befinner sig närmast branden kommer fram sist till utrymningsvägen, ca 12 minuter efter branden startat. Samtliga bilister når utrymningsvägen.

Rökdykarinsatsen förbättras också avsevärt om rökdykarna använder IR-hjälpmedel. I detta fall kommer den tredje rökdykargruppen att nå fram till branden men det sker först efter ca 25-30 minuter efter branden startat. Temperaturen för dessa rökdykare ligger kring 200 °C – 250 °C i slutfasen. Värmestrålningen ökar då ganska kraftigt med minskande avstånd till branden även om brandeffekten håller på att minska.

I dessa omfattande bränder är risken för brandspridning nedströms branden överhängande. Är situationen som i detta scenario aktuell där det är en bilkö nedströms branden kommer med stor sannolikhet branden att sprida sig och inte avta enligt denna beskrivna brandkurva utan få ett vidare förlopp tills bränslet som finns är slut. I detta beskrivna scenario tas inte denna utveckling med.

6.2.3 Brand i långtradare (brandscenario 5 – 150 MW)

Förutsättningarna i detta andra scenario är liknande de som presenterades i de två föregående avsnitten förutom att brandförloppet är i detta fall ytterligare allvarligare.

I detta scenario brinner det i en långtradare där den maximala brandeffekten är 150 MW. Denna brandeffekt uppnås cirka 13 minuter efter brandstart. Brandförloppet följer beskrivningen enligt brandscenario 5, se avsnitt 3.5. Branden uppstår i en dubbelrörstunnel med ett tvärsnitt på 90 m^2. Tunnel är utrustad med longitudinell ventilation, se avsnitt 5.3 och lufthastigheten är 2 m/s i detta aktuella fall. Tunneln är utförd med tvärgående förbindelsevägar mellan de två tunnelrören var 150:e meter. Branden inträffar precis utanför en av dessa tvärgående förbindelser.

Samma förutsättningar för räddningsinsatsen som i avsnitt 6.2.1 är aktuell även i detta scenario och att det är ett kösituation i tunneln och bilar med människor befinner sig i röken nedströms branden (se figur 6.2).

I utgångsfallet kommer samtliga bilister som utrymmer att kunna ta sig till den närmaste utrymningsvägen nedströms branden. Förhållandena är värre jämfört med föregående scenario. Men liksom för tidigare scenarier sker utrymningen medan branden håller på att tillta. Detta har en gynnsam inverkan på utrymningsförloppet vilket visas i känslighetsanalysen nedan. Bilister som utrymmer under dessa förutsättningar har möjlighet att överleva branden.

Bilister som inte utrymmer får problem redan ganska tidigt. Redan efter ca 6 minuter drabbas de av värmeutmattning. Därefter förvärras miljön mycket snabbt och det är i praktiken omöjligt att vistas i tunneln ens direkt utanför utrymningsvägen till det intilliggande tunnelröret.

Vid framkomst möter räddningspersonalen några av de drabbade som påbörjat utrymningen till det friska tunnelröret både uppströms och nedströms branden.

På grundval av detta så beslutar den ansvarige räddningsledaren att inledningsvis påbörja en släckinsats från förbindelsevägen 150 meter uppströms brand för att

sedan sätta in en rökdykarinsats för att söka efter människor som eventuellt befinner sig i röken nedströms branden

Då slangutläggning vid förbindelsegången 150 meter uppströms branden är klar avancerar insatspersonalen fram mot branden. Då personalen närmar sig brandplatsen ökar strålningsintensiteten, se tabell 6.3, och vid ett avstånd på 25 meter från branden påbörjas släckningen på grund av värmestrålningen från branden som hindrar insatspersonalen från att förflytta sig närmare branden.

Branden i långtradaren är så omfattande att det enda strålrör som insatspersonalen drar med sig fram inte är tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen, se tabell 5.6. För att förstärka denna släckinsats så skickas ytterligare en släckgrupp med ett strålrör fram mot branden. Dessa två strålrör är inte heller tillräckliga för att dämpa utvecklingen på branden utan den brinner obehindrat. Totalt skulle det vid denna brandeffekt behövas minst 12 stycken strålrör för att få någon dämpning på branden. Dessa tolv strålrör skulle behöva bekämpa branden under 30 minuter för att få kontroll på branden, se tabell 5.3. Innebörden blir att branden successivt minskar beroende på att bränslet brinner ut, utan att släckinsatsen lyckats dämpa branden.

I detta scenario så sätts den andra räddningsenhet som anländer till skadeplatsen på in för en rökdykarinsats från tvärförbindelsen 150 m nedströms branden.

Rökdykareinsatsen är också i detta fall i praktiken omöjlig att genomföra nedströms branden. Tre rökdykargrupper når som närmast 100 m från branden.

Resultat av en känslighetsanalys

När bilisternas reaktionstid ökas med en faktor två kommer flera av bilisterna att hindras från att nå den närmaste utrymningsvägen. I och med att de påbörjar sin utrymning så sent kommer de att påverkas allvarligt av branden. De fem första bilisterna når inte utrymningsvägen medan de som inledningsvis befinner sig längre från branden kan nå utrymningsvägen ca 6 - 9 minuter efter branden startat. De som inte hinner ut kommer med all sannolikhet att omkomma då branden hela tiden ökar i intensitet. Resultatet av dessa beräkningar indikerar också att personer längre från branden nu börjar få svårigheter med utrymningen. Detta har dock inte undersökts närmare.

Rökdykarinsatsen med IR-hjälpmedel innebär en mindre förbättring jämfört med tidigare. Även med dessa hjälpmedel når rökdykarna inte hela vägen fram till branden utan stannar ca 50 m från branden. Det är dessutom tveksamt om de kommer ens så långt med tanke på brandmiljön. Modellering av dessa mer omfattande scenarier är förenade med större osäkerhet.

I dessa omfattande bränder är risken för brandspridning nedströms branden överhängande. Är situationen som i detta scenario aktuell där det är en bilkö nedströms branden kommer med stor sannolikhet branden att sprida sig och inte avta enligt denna beskrivna brandkurva utan få ett vidare förlopp tills bränslet som finns är slut. I detta beskrivna scenario tas inte denna utveckling med.

Tabell 6.3 Översiktlig jämförelse mellan utvecklingen av branden, utrymningen och räddningsinsatsen.

Tid (minuter)	**Brandförloppet**	**Utrymningsförloppet**	**Räddningsinsatsen**
0	Branden startar	Bilister stannar	Räddningstjänsten larmas
0,5	Rök cirka 50 meter nedströms från branden	Bilist nedströms närmast branden börjar utrymma	
1	Rök cirka 120 meter nedströms från branden	Bilister 40 och 50 m nedströms från branden börjar utrymma	
1,5	Rök hela vägen fram till utrymningsvägen som finns 150 meter nedströms från branden	Bilister 60 och 70 m nedströms från branden börjar utrymma	
2,5		Bilist 20 m från nedströms branden når utrymningsvägen	
3	Rök ca 350 meter nedströms från branden.	Bilist 140 m nedströms från branden börjar utrymma	
4		Bilist 140 m nedströms från branden når utrymningsvägen Utrymmande personer börjar komma ut i det friska tunnelröret nedströms branden.	
7		Bilist som inte utrymmer från 30 m, 70 m, och 100 m drabbas av värmeutmattning	
8		Sista bilisterna (60 och 80 meter från branden) nedströms når utrymningsvägen	
10	Kritisk strålningsnivå vid cirka 25 m uppströms från branden	Bilist som inte utrymmer från 150 m drabbas av värmeutmattning	Räddningsstyrkorna anländer till det friska tunnelrörets öppning.
15			Första och andra räddningsstyrka anländer till förbindelsegången närmast uppströms från branden. Tredje räddningsstyrkan anländer till förbindelsegången 150 meter nedströms branden och försöker påbörjar en rökdykarinsats.
17	Maximal temperatur cirka 400°C och värmestrålning cirka 25 kW/m^2 på ett avstånd av 30 meter		Första rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 120 m nedströms branden

Tid (minuter)	Brandförloppet	Utrymningsförloppet	Räddningsinsatsen
	nedströms från branden.		
20	Maximal temperatur cirka 220°C och värmestrålning cirka 3 kW/m^2 på ett avstånd av 150 meter nedströms från branden Kritisk strålningsnivå vid cirka 25 m uppströms från branden		
23			Första insatsgruppen påbörjar sin släckning på ett avstånd av cirka 20 meter från branden. Andra rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) 100 m nedströms branden.
28			Tredje rökdykargrupp (i tredje räddningsstyrkan) kommer inte närmare än 100 m nedströms branden.
30	Kritisk strålningsnivå vid cirka 15 m uppströms från branden		Andra insatsgruppen påbörjar sin förstärkning av släckningen på ett avstånd av cirka 15 meter från branden.
35		Bilister som inte utrymmer från 30 m, 70 m och 100 m blir medvetslösa på grund av giftig rök.	
38		Bilister som inte utrymmer från 150 m blir medvetslösa på grund av giftig rök.	

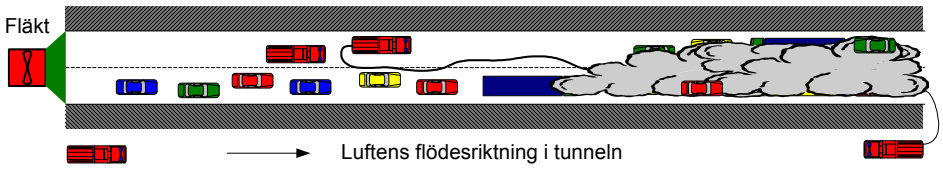
6.3 Räddningsinsats vid brand i enkelrörstunnel

6.3.1 Brand i buss

Detta fjärde scenario beskriver en utrymning och räddningsinsats vid en brand i en buss med en maximal brandeffekt på 25 MW, figur 3.13. Brandförloppet följer beskrivningen enligt brandscenario 2, se avsnitt 3.5. Branden uppstår i en enkelrörstunnel med ett tvärsnitt på 50 m^2. Tunnel är inte utrustad med fast ventilation. Luftriktning och hastigheten är beroende på yttre omständigheter som bland annat den rådande vindriktningen i om rådet utanför tunneln. I analysen antas det därför att utrymning sker nedströms branden. Räddningsinsats sker både från uppström och nedströms branden. Detta förutsätter att en bestämd flödesriktning finns i tunneln och att denna flödesriktning kan bibehållas under hela insatsen. För att säkerställa detta bör mobila fläktar användas under insatsen, se figur 6.3.

Skulle en fast ventilation vara tillgänglig i tunneln kan det vara mycket svårt att bestämma hur denna skall användas då det med största sannolikhet finns fordon i tunneln på båda sidorna av brandplatsen. Detta innebär att luftflödet i tunneln initialt under räddningsinsatsen kommer att styras av den naturliga ventilationen i tunneln och den riktning som denna har i det aktuella fallet.

Branden inträffar 500 m från närmaste mynning, figur 6.3. Även om avståndet från branden till mynningen är mycket längre i detta fall görs utrymningsanalysen med lika förutsättningar som i tidigare fall, det vill säga med elva bilister som köar vid branden, enligt tabell 4.1. I övrigt är förutsättningarna för detta fall lika med tidigare.



Figur 6.3 Exempel på en räddningsinsats vid en brand i en enkelrörstunnel med dubbelriktad trafik. Tunneltvärsnittet är 50 m^2 och tunneln är utrustad med längsventilation men inga utrymningsvägar.

Då branden bryter ut så stoppas trafiken i tunnelröret av olyckan på båda sidorna av branden. Tunnelmynningarna stängs för att förhindra fler fordon att åka in i tunneln.

Samtliga bilister som befinner sig nedströms branden utrymmer och klarar att ta sig till tunnelmynningen nedströms branden. Temperaturen under utrymningsförloppet uppgår maximalt till ca 60°C för den mest utsatta bilisten och den infallande strålningsnivån från flammor och rök uppgår maximalt till 1 kW/m^2. Bilister som utrymmer under dessa förutsättningar har alltså goda chanser att överleva branden även om det tar nästan 40 minuter för den sista att nå mynningen.

Bilister som inte utrymmer får enbart problem om de inledningsvis är nära (30 m) branden. Beräkningar för avstånden 100 m, 150 m, 200m och 400m uppvisar inte några kritiska nivåer för vad människan kan klara av. Vid 30 m från branden blir värmedosen för en person kritisk. Däremot är inte röken tillräckligt giftig utan det finns goda chanser att överleva.

Räddningstjänsten kommer att angripa branden från båda tunnelöppningarna. Detta är viktigt då den aktuella flödesriktningen och därmed rökspridningen i tunneln är oklar, se figur 6.3.

Framkörningen till tunnelöppningen kan fördröjas av trafiksituationen utanför tunneln som påverkas av både trafikavstängningen och eventuell rökutveckling från tunnelröret. Det är även här viktigt att det finns effektiva tillfartsvägar för räddningsfordonen till dessa tunnelöppningar så att inte insatsen fördröjs.

Är det ingen klar och tydlig luftström i tunneln kommer röken att drivas med luftströmmen som bildas av branden och röken kommer i värsta fall att fylla tunneln i båda riktningarna från branden. I detta scenario så kommer det att finnas en naturlig luftström och denna kommer att behöva förstärkas i samband med att räddningsinsatsen tar sig in i tunnelröret på den sida av branden som uppströms branden i förhållande till vindriktningen. Detta kommer att behöva göras med en

mobil fläkt med tillräckligt stor kapacitet för att kunna kontrollera flödet i tunneln, se avsnitt 5.4.3.

Räddningsfordonen kommer att köra med trafikriktningen ned i tunnelröret. Framkörningen till skadeplatsen i tunnelröret kommer troligen bli krånglig då det med största sannolikhet kommer att råda kaos i tunnelröret, då bilar har stannat och försöker vända.

Vid tunnelöppningen etableras räddningsstyrkan sin mobila fläkt för att säkerställa luftens naturliga flödesriktning i tunneln.

Under framkörningen i tunneln kommer räddningspersonalen att möta några av de drabbade som påbörjat utrymningen mot tunnelöppningen.

Räddningsfordonen stannar 50 meter uppströms från branden. En brandsläckningsinsats förbereds genom slangutläggning i det drabbade tunnelröret. Då slangutläggning är klar avancerar insatspersonalen fram mot branden. Då personalen närmar sig brandplatsen ökar strålningsintensiteten, se tabell 6.4, och vid ett avstånd på 10 meter från branden påbörjas släckningen. Rökdykare som gör en insats uppströms branden avancerar med vinden i ryggen. Möjligheten att komma åt branden begränsas av den maximala strålningsintensiteten som rökdykaren kan arbeta i. Denna maximala strålning uppgår till 5 kW/m^2.

Branden i bussen är så omfattande att det enda strålrör som insatspersonalen drar med sig fram inte är tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen, se tabell 5.6. För att förstärka denna släckinsats så skickas ytterligare en släckgrupp med ett strålrör fram mot branden. Då dessa båda grupper bekämpar branden är vattenflödet tillräckligt för att dämpa brandutvecklingen. Denna insats fortsätter till dess att branden har dämpats och eftersläckningen kan inledas. Tidsåtgången för att bekämpa denna brand blir, enligt tabell 5.2, 12 minuter.

Samtidigt som brandsläckningsinsatsen pågår så sätts en insats in för att utrymma det drabbade tunnelröret på människor som befinner sig uppströms från brandplatsen.

Räddningstjänsten kan få indikationer på att det finns kvar människor nedströms branden på en hel rad olika sätt. Vid en brand i en enkelrörstunnel kan man räkna med att det befinner människor på båda sidor branden. Pågår en utrymning ur tunnelröret nedströms branden kan detta också vara en förstärkning för att människor befinner sig i den rökfyllda delen av tunneln. Vid en brand i en enkelrörstunnel så bör en rökdykarinsats genomföras för att underlätta utrymningen och genomföra en livräddning av de människor som eventuellt finns kvar i den rökfyllda tunneln nedströms branden.

I detta beskrivna scenario så skulle innebörden av detta bli att de den första räddningsstyrka som anländer till den rökfyllda tunnelöppningen nedströms branden omgående sätter igång med denna rökdykarinsats. Målsättningen med denna rökdykarinsats är främst att livrädda människor som är kvar i röken. Om det inte finns människor kvar i röken kan de också användas för att förhindra brandspridning till fordonen som befinner sig i detta område.

Det förutsätts att de i normalläget inte har tillgång till IR-hjälpmedel för att orientera sig i röken. Rökdykarna ska under sin förflyttning också lägga ut slang och koppla ihop olika slanglängder vilket förbrukar tid. I beräkningarna antas att det tar 4,5 minuter att förbereda en ny slanglängd när den tidigare rullats ut. Det antas också att rökdykarna använder slanglängder om 50 m. Totalt finns det tre rökdykargrupper som kan avancera in mot branden och det förutsätts finnas understödjande rökdykare som fyller på som skyddsgrupper.

Rökdykare som ska försöka göra en räddningsinsats i den rökfyllda tunneln kommer att möta ganska stora svårigheter. De kommer inte att kunna tränga längre in i tunneln än 150 m, främst på grund av den nedsatta sikten som gör att gånghastigheten för rökdykarna är låg. Temperaturen under förloppet är låg och utgör inte något problem, men de kommer inte i närheten av branden

Tabell 6.4 Översiktlig jämförelse mellan utvecklingen av branden, utrymningen och räddningsinsatsen.

Tid (minuter)	**Brandförloppet**	**Utrymningsförloppet**	**Räddningsinsatsen**
0	Branden startar	Bilister stannar	Räddningstjänsten larmas
0,5	Rök cirka 50 meter nedströms från branden	Bilist nedströms närmast branden börjar utrymma	
1	Rök cirka 120 meter nedströms från branden	Bilister 40 och 50 m nedströms från branden börjar utrymma	
1,5	Rök hela vägen fram till utrymningsvägen som finns 150 meter nedströms från branden	Bilister 60 och 70 m nedströms från branden börjar utrymma	
3	Rök ca 350 meter nedströms från branden.	Bilist 140 m nedströms från branden börjar utrymma	
10			Räddningsstyrkorna anländer till tunnelrörens öppningar
15	Maximal temperatur cirka 130°C och värmestrålning cirka 4 kW/m^2 på ett avstånd av 30 meter nedströms från branden.	Bilist som inte utrymmer från 30 m drabbas av värmeutmattning	Första räddningsstyrka anländer till brandplatsen närmast uppströms från branden. Rödykarinsats utförd av andra räddningsstyrkan inleds från tunnelöppningen nedströms branden.
17			Första insatsgruppen påbörjar sin släckning på ett avstånd av cirka 10 meter från branden.
20	Maximal temperatur cirka 80°C och värmestrålning cirka 1 kW/m^2 på ett avstånd av 100 meter nedströms från branden Kritisk strålningsnivå vid cirka 10 m uppströms från branden		Tredje räddningsstyrkan anländer till tunnelrörets öppning uppströms branden.
23			Första rökdykargrupp (i andra räddningsstyrkan) 450 m nedströms branden
25			Tredje räddningsstyrka anländer till brandplatsen närmast uppströms från

Tid (minuter)	Brandförloppet	Utrymningsförloppet	Räddningsinsatsen
			branden.
27			Tredje insatsgruppen påbörjar sin förstärkning av släckningen på ett avstånd av cirka 10 meter från branden.
30	Kritisk strålningsnivå vid cirka 8 m uppströms från branden	Bilist som inte utrymmer från 100 m drabbas av värmeutmattning	
33		Bilist som inledningsvis var 140 m från branden når mynningen.	
35			Första rökdykargrupp (i andra räddningsstyrkan) 400 m nedströms branden.
39			Branden är dämpad och under kontroll. Eftersläckning inleds.
40		Bilist som inledningsvis var 20 m från branden når mynningen.	
45			Andra rökdykargrupp (i andra räddningsstyrkan) 350 m nedströms branden. Tredje rökdykargruppen kommer inte längre.

Resultat av en känslighetsanalys

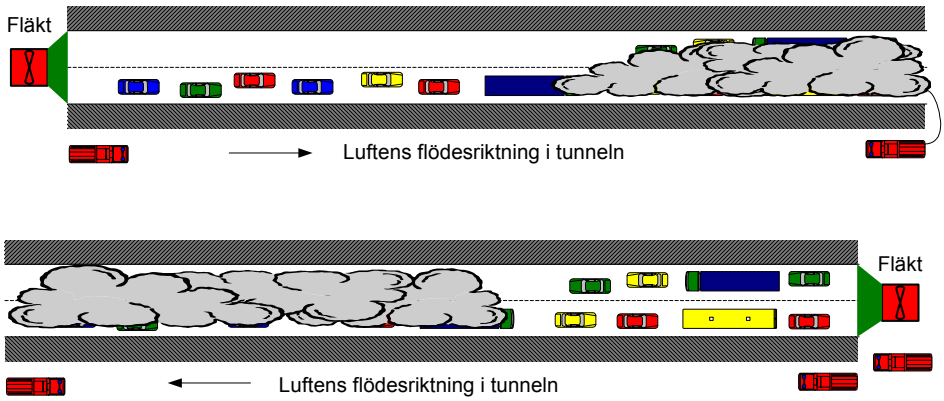
Liksom för tidigare beräkningsfall görs en känslighetsanalys med avseende på bilisternas reaktionstid. Även om den ökar med en faktor två kommer alla bilisterna att kunna utrymma på ett säkert sätt även om det sker i en rökfylld miljö. I detta fall tar det ytterligare några minuter för bilisterna att nå mynningen.

Rökdykarinsatsen förbättras avsevärt om rökdykarna använder IR-hjälpmedel. Med sådan utrustning kommer man att kunna ta sig hela vägen, genom röken, fram till branden. Det krävs att alla rökdykargrupperna hjälps åt men de når branden efter ca en timma.

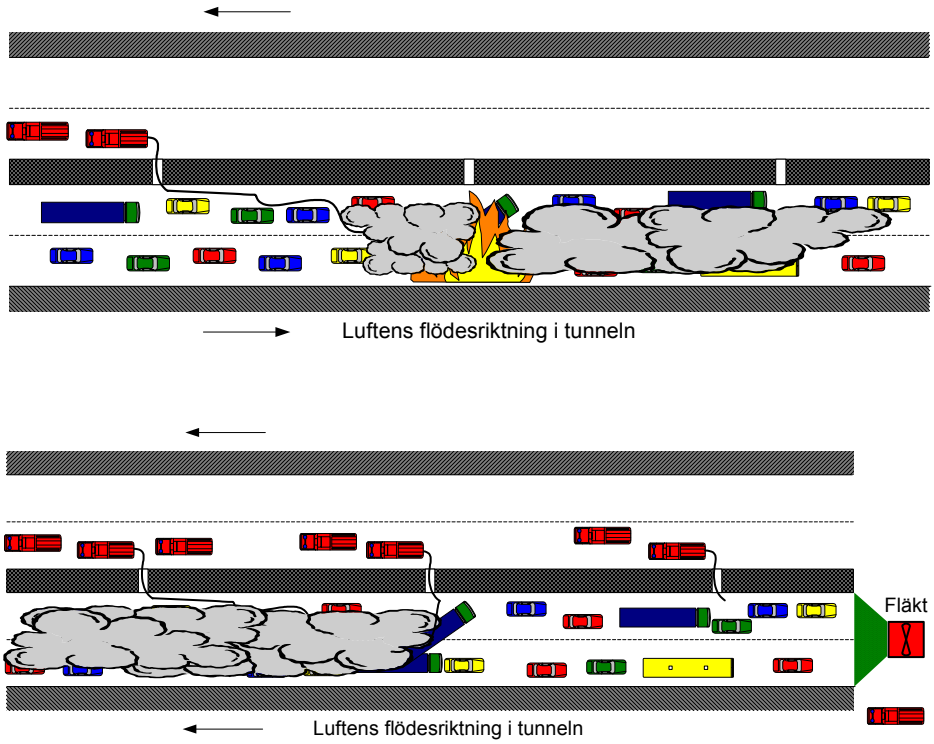
6.4 Alternativa angreppssätt för att förbättra möjligheterna till livräddning vid omfattande bränder

Vid en omfattande brand såsom branden i bussen i brandscenario 2 och långtradaren i brandscenario 4 visat att nuvarande metoder med att genomföra konventionella brandsläckningsinsatser och rökdykarinsatser i praktiken inte verkar vara tillräckliga för att begränsa konsekvenserna av branden. Finns det människor kvar nedströms från branden så är det i princip omöjligt att genomföra

livräddningsinsats av alla dessa människor. Detta innebär att alternativa metoder för att hantera olyckan måste användas. Vid räddningsinsatsen vid branden i Tauerntunneln (35) användes en metod där tunneln efter misslyckade släckförsök utrymdes på människor och fordon uppströms branden, varpå flödesriktningen på luften i tunneln vändes. Denna metod beskrivs i avsnitt 5.4.1 och visas även i figur 6.4 och 6.5. Målsättningen med denna metod är förbättra miljön för eventuellt överlevande i den rökfyllda tunneln, men också att undanröja möjligheterna för en brandspridning till fordonen som befinner sig i röken nedströms branden. Resultaten som beskrivs i avsnitt 5.4.3 belägger resultaten från Tauerntunneln och tyder på att denna metod skulle vara möjlig att genomföra vid en räddningsinsats.



Figur 6.4 Exempel på en räddningsinsats vid en brand i en enkelrörstunnel med dubbelriktad trafik där röken vänds med hjälp av mobila fläktar.



Figur 6.5 Exempel på en räddningsinsats vid en brand i en dubbelrörstunnel där röken vänds med hjälp av fast fläktar eller mobila fläktar.

7 Diskussion

I föreliggande rapport har sju olycksscenarier använts för att visa på skillnader och förslag på angreppssätt och procedur för dessa utvalda fall. Det finns även andra tänkbara scenarier, men tanken är att de valda scenarierna skall täcka in de viktigaste och de vanligaste olyckstyperna och därmed kunna utgöra ett viktigt underlag för säkerhetsarbetet och planeringen av räddningsinsats för en tunnel. Resultaten från projektet visar att förhållandena varierar kraftigt beroende på vad som är involverat i en eventuell tunnelbrand. Detta påverkar förutsättningarna både för trafikanter som skall utrymma från tunnel och för räddningspersonalen som skall hantera konsekvenserna av olyckan.

Erfarenheter från inträffade bränder visar att långtradare är inblandade i de flesta allvarliga olyckorna. Anledningen till detta är den stora brandbelastningen godset utgör. Statistik visar att sannolikheten för dessa allvarliga bränder är låg, men trafikintensiteten ökar hela tiden och andelen transporter med tunga fordon ökar också. EU-kommisionen räknar med en ökning av långtradartrafiken med 40 – 60 % de närmaste 10 åren. Detta innebär att även om risken för bränder, som involverar flera långtradare, är betydligt lägre än andra typer av olyckor i tunnlar, kan riskerna öka i framtiden. Dessutom är konsekvenserna så stora att man inte kan bortse från denna typ av olycka. Genomförda brandförsök med simulerad långtradarlast visar att vanligt gods (olika blandningar av trä, papp och plast) kan ge betydligt högre brandeffekter än man tidigare har antagit. Fyra försök genomfördes i Runehamartunneln i Norge och de maximala brandeffekterna låg mellan 70 och ungefär 200 MW. Hänsyn har tagits till detta vid utformandet av de utvalda scenarierna, men naturligtvis har även andra mer frekventa olyckor med lägre effekt inkluderats.

För att räddningstjänsten skall ha en möjlighet till att genomföra en effektiv och säker insats, måste den ses som en integrerad del av tunnelns säkerhetskoncept, där den kommunala räddningstjänsten bör vara delaktig i utformningen av säkerhetskonceptet för den aktuella tunneln.

Beroende på hur olyckan ser ut, utformningen av den specifika tunneln och räddningstjänstens tillgängliga resurser, så kommer räddningsinsatsen att utformas på olika sätt. De kriterier som troligen kommer att vara dimensionerande för en räddningsinsats vid en brand i en tunnel kommer är:

- hur mycket drabbade trafikanter som insatspersonalen måste assistera ut till säker miljö
- hur stor branden är och därmed vilken temperatur och strålningsnivå som kommer att påverka insatspersonalen
- hur lång sträcka som insatspersonalen måste förflytta sig i rökfylld miljö.

Den initiala målsättningen med de flesta räddningsinsatser kommer troligen att vara att försöka släcka branden. Avsikten med detta är att försöka undanröja det hot som branden innebär mot de människor som finns kvar i det drabbade tunnelröret och mot tunnelkonstruktionen. Vad som har visat sig i detta projekt är att genomförandet av brandsläckning enligt den planering som är aktuell i många dubbelrörstunnlar, det vill säga att brandpersonalen bekämpar branden i rökfri miljö uppströms brandplatsen, troligen inte kommer att fungera vid en fullt utvecklad långtradar- eller tankbilsbrand. Är inte räddningspersonalen medvetna om den omfattande strålningsvärme som denna typ av brand medför kan följden bli att man genomför en insats som inte ger förväntat resultat, samtidigt som man inte

har resurser till att parallellt med detta använda andra metoder för att begränsa konsekvenserna av olyckan. Konsekvenserna av detta blir att räddningsinsatsen inte når de förväntade resultatet och att olyckan därmed får större konsekvenser än som varit nödvändigt. Projektet belyser den stora vikt som måste fästas vid att planera för denna typ av avancerade och svåra räddningsinsatser. Målet har varit att resultaten, tillsammans med tillgänglig information, skall ge beslutsunderlag vid en olycka. Resultaten och de redovisade procedurerna bör också vara en viktig del av framtagande av insatsplaner och säkerhetskoncept. Några av de intressanta resultaten sammanfattas nedan. De är uppdelade i tre olika områden; brandscenarier, utrymning och räddningsinsatsen.

Brandscenarier

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 (med maxeffekten 8 MW) till brand i en tankbil (med maxeffekten 200 MW). Detta ledde fram till sju olika brandscenarier, vilka sedan har använts vid simuleringen av utrymning respektive rökdykning. Utseendet på de brandscenarier, som innehåller en långtradare, bygger till viss del på resultaten från brandförsöken, som SP genomförde i Runehamartunneln 2003. 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. Lufthastigheten påverkar brandspridning och brandtillväxt och detta har också tagits hänsyn till i modellerna.

Utrymning

Analyserna av utrymningsförloppet indikerar att det finns goda möjligheter för bilisterna att hinna sätta sig i säkerhet om brandförloppet utvecklas upp till det som motsvaras av brandscenario 3 (75 MW). Detta kan tyckas vara en hög brandpåverkan på bilisterna men i nästan samtliga fall hinner bilisterna att utrymma innan branden når sin högsta nivå. Det är alltså inga 75 MW som utvecklas under utrymningsförloppet. *Konstaterandet gäller dock under förutsättning att bilisterna snabbt påbörjar sin utrymning*. Om bilisterna inte påbörjar sin utrymning så snabbt som förutsatts i analysen kommer konsekvensen att öka eftersom utrymningen då sker i ett senare skede i brandförloppet med större påfrestning som följd. Av detta kan man dra slutsatsen att tillväxten på branden får större påverkan på utrymningen än den maximalt utvecklade effekten av branden.

Att försöka beskriva hur personer beter sig vid olika brandscenarier borde därför vara en prioriterad uppgift att undersöka för att på det viset hitta metoder att minska osäkerheten för bilisterna i ett inledningsskede.

En analys gjordes också för bilister som inte utrymde och dessa klarade sig mycket sämre jämfört med dem som utrymmer. Detta pekar ytterligare på vikten att effektivt initiera en utrymning om det börjar brinna i en tunnel.

Lufthastighetens betydelse för utrymningsförloppet har visat sig vara betydelsefull. Analysresultat för utrymningen baseras dock på de förutsättningar som antagits men det bör utredas om dessa verkligen är relevanta och korrekt beskrivna. Resultatens validitet beror på detta och en fördjupning i området är nödvändig.

Räddningsinsatsen

De områden som vi har specialstuderat i detta projekt är brandsläckningsinsatsen och rökdykarinsatsen vid en brand i en tunnel.

En räddningsinsats vid en brand i tunnel innebär att följande inriktningar kombineras till ett lämpligt mönster för att passa varje specifik olycka.

- Underlätta för de drabbade så att de snabbt ska komma ut ur tunneln.
- Livrädda de drabbade människorna genom att aktivt ta ut dem ur farlig miljö.
- Släcka branden och på så sätt undanröja hotet mot de drabbade människorna i tunneln.
- Ventilera tunneln för att trycka röken i en bestämd riktning från branden med syfte att underlätta livräddning, utrymning eller brandsläckning.
- Ett aktivt omhändertagande av utrymmande i säker miljö eller på utsidan av tunneln.

För att släcka en brand måste det släckmedel som används komma i kontakt med det material som brinner. Vid släckning av bränder i fordon innebär detta i de flesta fall att insatspersonalen måste vara mycket nära fordonet som det brinner i. Vid bränder utvecklas det mycket värmestrålning. Värmestrålningen kommer att begränsa insatspersonalens möjligheter att komma nära branden, vilket försämrar möjligheterna till släckning.

När vatten används för att släcka bränder kommer begränsningen i kastlängden att minska mängden som träffar branden. Detta innebär att ju längre från branden man står ju mindre vatten kommer att träffa branden.

I de flesta kommuner kommer man troligen att endast ha resurser för att inledningsvis kunna använda maximalt fyra brandmän till släckning, vilket innebär två till fyra samtidiga strålrör för denna brandsläckningsinsats. Innebörden av detta blir att man troligen endats kommer att ha resurser för att maximalt släcka en buss alternativt en skåpbilsbrand (brandscenario 2, 25 MW). Blir bränderna mer omfattande kommer värmestrålningen att begränsa möjligheterna till att komma nära branden, vilket kommer att innebära att kastlängden för släckvattnet blir längre och mindre vatten kommer att komma i kontakt med det material som brinner. Resultaten av släckförsökens effekt försämras kraftigt ju längre från branden som insatspersonalen befinner sig.

Vid flera av ovan nämnda inriktningar på räddningsinsatsen kommer räddningstjänsten att vara tvungen att använda sig av rökdykare, då arbetet skall genomföras i en toxisk och en varm miljö (nedströms branden). Arbetet är en stor belastning för den personal som är iblandad. Kapaciteten på dessa rökdykare blir begränsad, vilket illustreras i följande text.

Analyserna visa att rökdykarinsatsen vid den minsta branden (8 MW) inte är något stort problem även om den sker i röken på nedströmssidan av branden. I samtliga undersökta fall kan rökdykarna nå branden och troligen också genomföra en lyckad släckinsats, även från nedströmssidan. Beroende på förutsättningarna kommer det att ta lite olika lång tid men utgången är ganska given.

För brand i buss (brandscenario 2, 25 MW) ökar svårigheterna att genomföra insatsen genom röken nedströms branden. Men med en tidseffektiv insats visar det sig att framgång kan nås. Används dessutom IR-hjälpmedel ökar möjligheterna till en lyckad insats. Detta förutsätter dock att IR-hjälpmedel är en effektiv metod för

att öka rökdykarnas förflyttningshastighet i tunneln, så att de snabbare kan göra en effektiv insats.

För de största bränderna (brandscenarierna 3-7, 75 MW – 200 MW) är svårigheterna så stora att en insats genom röken och i praktiken nog är omöjligt. I dessa situationer bör insatsen inriktas på att angripa branden från andra sidan d v s med vinden i ryggen.

Att generellt utrusta rökdykarna med IR-hjälpmedel verkar vara avgörande för deras förmåga att genomföra en insats i en rökfylld tunnel, under förutsättning av detta ökar förflyttningshastigheten på rökdykarna. Detta kan speciellt konstateras för de lite allvarligare bränderna. För små bränder är miljön tillräckligt god för att rökdykarna ska kunna genomföra en lyckad insats även utan IR-hjälpmedel.

Ett problem när det gäller beräkningarna med modellen för rökdykning är att möjligheten att genomföra en lyckad insats ökar med ökande insatstid. Detta beror på att om räddningstjänsten inleder sin insats först i ett senare skede har brandeffekten hunnit börja minska enligt de antagna brandeffektskurvorna. Detta är endast fallet om branden inte sprider sig till flera närstående fordon, vilket dock är en trolig utveckling, men som inte har hanterats i detta projekt.

Det har under arbetets gång visat sig att de rökdykarmetoder som finns idag inte helt säkert är lämpliga för att angripa en brand i en tunnel och nya arbetsformer behöver utvecklas.

Vid bränder i tunnlar där många människor finns kvar i den rökfyllda delen av tunneln, exempelvis vid bränder i dubbelrörstunnlar där trafiken står stilla och köer har bildats eller i enkelrörstunnlar, kan de tidigare beskrivna metoderna vara otillräckliga, samtidigt som de drabbade trafikanterna måste undsättas. Detta gäller speciellt om bränderna är mer omfattande (brandscenario 3-7, 75-200 MW). I dessa fallen måste räddningsinsatsen troligen genomföras genom att styra röken så att den försvinner från de människor som är utsatta. Denna inriktning på räddningsinsatsen är inte direkt belyst i vårt arbete, men bör ses som en utvecklingsmöjlighet som kan vara tillämpbar, men som måste studeras betydligt mer då den innebär mycket svåra praktiska problem vid genomförandet.

För större bränder kommer värmestrålningen från branden sannolikhet 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.

En generell slutsats är att brandeffekten stiger kraftigt och utvecklar sig snabbt efter de första cirka 5 – 10 minuter av branden. Skall den kommunala räddningstjänsten hantera tider från larm till påbörjad släckinsats på maximalt cirka 10 minuter, måste mycket göras för att effektivisera insatser vid bränder i tunnlar och samtidigt som tunnlarna behöver utrustas med snabbare brandlarmsystem. Räddningsinsatser vid denna typ av olyckor kommer att behöva vara mycket väl planerade för att kunna genomföras på ett effektivt sätt för att få skadebegränsande effekt innan det är för sent. Informationsinhämtningen är en viktig och kritisk del av insatsen. Dessutom måste det vara korta avstånd och enkla vägar för de utrymmande att förflytta sig till säker miljö. Det är också viktigt att räddningspersonalen kan komma nära branden i säker miljö och att branden inte snabbt kan utveckla sig till alltför stora effektutvecklingar innan en brandsläckningsinsats har kunnat påbörjas.

Mycket av ovanstående måste planeras tillsammans med tunnelägaren, som har det övergripande säkerhetsansvaret för tunneln och dessutom ofta sitter inne med information som kan vara avgörande för en lyckad räddningsinsats. Tunnelägaren

har ett stort ansvar vid olyckor, även för att det skall kunna genomföras en räddningsinsats för att rädda människor och begränsa skadorna vid en olycka.

Projektet har påvisat att gränsen för vilka bränder som säkerheten i tunnlar klarar av att hantera är någonstans mellan 75 MW och 100 MW. Blir bränderna större än detta kommer utrymningen att få svårt att hinna genomföras och räddningsinsatsen kommer inte att kunna påverka olycksförloppet.

Påbörjas inte utrymningen omgående efter det att branden har startat så kommer möjligheterna till överlevnad för trafikanterna att försämras drastiskt.

8 Slutsatser

Följande slutsatser bygger på det arbetsmaterial som presenteras i rapporten.

Brandförloppet:

- Brandtillväxtshastigheten är en mycket viktig parameter vid dimensionering av personsäkerhet i tunnlar
- Lufthastigheten påverkar brandtillväxt och brandspridning
- En långtradare kan uppnå brandeffekt på 100 – 200 MW inom 10 – 15 minuter.
- Värmestrålningen från en långtradarbrand uppströms branden kan bli ett problem vid insats

Utrymning nedströms branden:

- I princip hinner alla bilister att sätta sig i säkerhet vid de mindre bränderna, d.v.s. upp till ca en buss tillsammans med en mindre lastbil (8 MW – 75 MW).
- För att utrymningen ska vara tillfredsställande krävs att bilisterna mycket snabbt görs medvetna om att de måste utrymma och att detta verkligen sker.
- Generellt kan det konstateras att ett större tunneltvärsnitt innebär gynnsammare förhållanden men skillnaden var mindre än vad som först antagits.
- Det krävs en brand som utvecklar sig snabbt och som leder till en brandeffekt kring 75 MW och däröver för att det ska bli problem med att utrymma tunneln.
- Lufthastigheten ökar brandtillväxtshastigheten. Det innebär för utrymningens skull att låg lufthastighet leder till långsammare brandförlopp vilket i sin tur leder till gynnsammare konsekvens vid utrymningen. Om man istället betraktar möjligheten att vistas i den rökfyllda tunneln utan att utrymma blir förhållandet det omvända. Men eftersom målsättningen för all olyckshantering är att bilister som befinner sig i en brandsituation ska utrymma är en låg lufthastighet att föredra.
- Beräkningar då ingen utrymning skedde och med bilister på några olika platser mellan branden och utrymningsvägen genomfördes. Det går att överleva i tunneln vid den minsta branden (8 MW) men därefter ökar svårigheterna att överleva. Även vid en bussbrand (25 MW) kan det bli kritiskt vid längre exponeringstider.

Räddningsinsats:

- Rökdykarinsatser vid den minsta branden (8 MW) kommer vara möjliga att genomföra, även nedströms branden.
- Brandsläckningsinsatser vid den minsta branden (8 MW) kommer inte att orsaka några svårigheter om branden uppstår i en dubbelrörstunnel. Om branden uppstår i en enkelrörstunneln kommer släckinsatsen att behöva föregås av en rökdykarinsats, men enligt ovanstående innebär det att brandsläckningen även är möjlig att genomföra vid dessa tunnlar.
- Brand i en buss (25 MW) kommer att innebär vissa svårigheter att genomföra insatsen i en rökfylld miljö. Men med en tidseffektiv insats visar det sig att framgång kan nås. Används dessutom IR-hjälpmedel ökar möjligheterna till en lyckad insats.
- Brandsläckning vid branden i bussen (25 MW) kommer att kräva vatten från minst två strålrör för att effektivt bekämpa branden. Detta innebär att två olika insatsgrupper behöver samtidigt sättas in för att genomföra insatsen. Om branden uppstår i en enkelrörstunneln kommer släckinsatsen att behöva föregås av en rökdykarinsats, vilket innebär att denna brand kan vara svår att bekämpa vid dessa tunnlar.
- För de största bränderna (75 MW – 200 MW) är svårigheterna så stora att en insats genom röken i praktiken nog är omöjligt.
- Vid en brand på 75 MW kommer värmestrålningen från branden att försvåra släckinsatsen och medföra att den måste påbörjas på minst 15 – 20 meters avstånd från branden. Detta innebär att behövs minst åtta strålrör för att bekämpa branden och att detta behöver pågå effektivt i 20 – 30 minuter för att ge resultat.
- För större bränder (>100 MW) kommer värmestrålningen uppströms från branden sannolikt att göra det mycket svårt att komma tillräckligt nära för att genomföra en effektiv brandsläckningsinsats.
- Det har under arbetets gång visat sig att de rökdykarmetoder som finns idag inte säkert är lämpliga för att angripa en brand i en tunnel och nya arbetsformer kan behöva utvecklas.

9 Forskningsbehov

Den kunskap som presenteras i rapporten behöver kompletteras med ny kunskap. Nedan ges lista på olika forskningsområden som är relevanta att arbeta med i framtiden.

Rökdykning vid tunnelbränder

- Rökdykningen som arbetsmetod behöver utvecklas för att anpassas för olika tunnelmiljöer.
- Bättre kunskap kring rökdykarnas uthållighet vid rökdykning i tunnlar behövs. En studie där man systematiskt går igenom olika moment för att klargöra var gränserna går för både rökdykning och släckmöjligheter behöver kompletteras.
- Förbättrade beräkningsmodeller för att bedöma rökdykararbete behöver utvecklas.
- Det behöver utvecklas teknik för att underlätta rökdykararbetet. I detta projekt har vi specifikt sett att IR tekniken skulle kunna förbättra möjligheterna. Den kunskap och erfarenhet som i dag finns om rökdykning med IR behöver kompletteras när det gäller insatser i tunnlar. Här behövs mer kunskap kring effekten av IR-hjälm och vad är det specifikt som kan förbättras när en rökdykare använder IR-hjälpmedel vid en insats i en tunnel. Även andra hjälpmedel behöver utvecklas för detta arbete

Utrymning vid tunnelbränder

- Undersöka effekterna av system för varseblivning. Hur bra effekt får man genom exempelvis dynamiska väginformationstavlor i en tunnel? Vilka åtgärder har bäst effekt det vill säga innebär att reaktionstiden är kortast?
- Bättre kunskap kring gånghastigheter i olika tunnelmiljöer för utrymmande behövs.
- Förbättrade beräkningsmodeller för utrymning

Brandbekämpning vid tunnelbränder

- Det finns stort behov av ny kunskap kring dimensionerande släckkapacitet för långtradar- och bussbränder. De resultat som presenteras i rapporten bygger till stor del på teoretiska antaganden och behöver kompletteras med experimentella data i modell- och fullskala.
- Det behöver utvecklas nya brandsläckningsmetoder för att kunna hantera omfattande bränder.

Brandförloppet

- Lufthastighetens inverkan på brandförloppet. Hur påverkas möjligheterna att utrymma och att göra en insats under olika lufthastighetsförhållanden?
- Inverkan av ventilationen på brandspridningen behöver kompletteras med fullskaliga försök.
- Det finns behov av att undersöka vilka möjligheter som finns för att lindra konsekvenserna vid en tunnelbrand. Exempel på sådana åtgärder är evakuering av brandgaser samt installation av sprinkler- eller vattendimmasystem och detektionssystem.

Genomförande av räddningsinsatser vid bränder i tunnlar

- Det bör ske en mer utvecklad integration mellan analys av brandförlopp, utrymning och räddningsinsats för att förbättra möjligheterna att planera och genomföra räddningsinsatser.
- Ledningsmetoder och ledningsstöd för att kunna genomföra dessa komplicerade räddningsinsatser behöver utvecklas.
- Framtida utveckling av säkerheten i tunnlar måste anpassas för att kunna integreras med en räddningsinsats vid en olycka i en tunnel.
- Det behöver utvecklas metoder och verktyg för att göra riskbedömningar under pågående insats.
- Utveckling av utbildningsverktyg för räddningspersonalen, exempelvis simulatorer. Det finns behov av att ta fram taktiksimulatorer, spel och så vidare för att kunna träna olika taktiska tekniker och ledning av insatspersonal.

10 Referenser

1. Ingason, H. och Lönnermark, A., “Large Scale Fire Tests in the Runehamar tunnel – Heat Release Rate”, Proceedings of the International Seminar on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Sweden, 20-21 November 2003, SP Report 2004:05.

2. Lönnermark, A. och Ingason, H., “Large Scale Fire Tests in the Runehamar tunnel – Temperature and Radiation”, Proceedings of the International Seminar on Catastrophic Tunnel Fires, Borås, Sweden, 20-21 November 2003, SP Report 2004:05.

3. “Fires in Transport Tunnels: Report on full-scale tests“, EUREKA-Project EU499; Firetun, Studiengesellschaft Stahlanwendung elV. D-40213 Dusseldorf, 1995.

4. Bergqvist A., Frantzich H., Hasselrot K. och Ingason, H. Räddningsinsatser vid tunnelbränder. Räddningsverket, SRV rapport P21-391/01, 2001.

5. Ingason, H., Bengtson, S. och Hiort, F., Brand och brandskydd i undermarksanläggningar, Litteraturstudie, SP rapport 1997:41.

6. Haack, A. och Meyeroltmanns, W., Fire Risk, PIARC, World Road Association, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Second Draft - October 1996.

7. 1988-1992 NFIRS and FFPA Survey.

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 Lemair, A., Van De Leur, P.H.E. och Kenyon, Y.M., Safety Proef: TNO Metingen Beneluxtunnel Meetrapport, TNO-Rapport, 2002-CVB-R05572.

15. Mangs, J. och Keski-Rahkonen, O. ”Characterization of the Fire Behavior of a Burning Passenger Car”, Fire Safety Journal, Vol. 23, 37-49, 1994.

16. 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.

17. Shipp, M. och Spearpoint, M., “Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles”, Fire and Materials, Vol. 19, p.143-151, 1995.

18. Joyeux, D., “Natural Fires in Closed Car Parks”, Car fire tests, INC-96/294d-DJ/NB, 1997.

19. Steinert, C., “Experimentelle Untersuchhungen zum Abbrand-und Feueruberspringsverhalten von Personenkraftwagen“, vfdb-Zeitschrift, Forschung, Technik und Management im Brandschutz, 4/2000, pp 163-172.

20. Ingason, H., Gustavsson, S. och Dahlberg, M., “Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires”, SP Report 1994:08, Swedish National Testing and Research Institute.

21. 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.

22. 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.

23. PIARC, “Fire and Smoke Control in Road Tunnels”, 05.05 B-1999.

24. 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.

25. NFPA Standard 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges and other limited Access Highways 2001 edition

26. Ingason, H., ”Design Fires in Tunnels”, Conference Proceedings of Asiaflam 95, Hong Kong 15th - 16th of March 1995, Interscience Communications Limited.

27. 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).

28. 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.

29. Canter, D., "Fires and Human Behaviour," J Wiley & Sons, Chichester, 1980.

30. Canter, D., "Fires and Human Behaviour," Fulton Publ, London, 1990.

31. Sime, J. D., "Safety in the built environment," E. & F. N. Spon, London, 1988.

32. Frantzich, H., "Tid för utrymning vid brand", Räddningsverket, Rapport P21-365/01, Karlstad, 2000.

33. Norén, A. och Winér, J., "Modelling crowd evacuation from road and train tunnels - Data and design for faster evacuation", Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Report 5127, Lund, Sweden, 2003.

34. Skarra, N., "Bussbrannen i Ekebergtunnelen 21.8.1996", Statens vegvesen, Oslo, 1997.

35. Frantzich, H., "Val av utrymningsväg i tunnel - Resultat från en experimentell undersökning", Lund University, Report 3128, Lund, Sweden, 2004.

36. McClintock, T., Shields, T. J., Reinhardt-Rutland, A. H. och Leslie, J. C., "A Behavioural Solution to the Learned Irrelevance of Emergency Exit Signage", 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, 23-33, London, 26-28 March, 2001.

37. Purser, D. A., "Toxicity Assessment of Combustion Products". In *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (P. J. DiNenno, Ed.), National Fire Protection Association, 2-85 -- 2-146, Quincy, Massachussetts, USA, 1995

38. Brann i kjoretoyer i Seljestadtunnelen på E 134 i Odda kommune 14 juli 200. Granskningsrapport Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern, Saksnr. 00/2054-2/HKM.

39. Lag om skydd mot olyckor, SFS 2003:778, 2003.

40. Samtal med Key Hedström, jurist på Räddningsverket, angående den praktiska tillämpningen av 41§ av räddningstjänstlagen SFS 1986:1102.

41. Svensson S. “The operational problem of fire control”, PhD-thesis, Report LUTVDG/TVBB-1025-SE, Lund University, 2002.

42. Ingason, H., Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. och Lundström, S. “Planning for manual firefighting and rescue in tunnels”, Proceedings of the fourth international conference on Safety in rail and in road tunnels, Madrid 2-6/11, 2001.

43. Bergqvist, A. “Branden i Tauerntunneln”, SRV rapport, 1999.

44. Ingason, H. och B., Wahlström, "Trial of mobile fan for smoke ventilation in a railway tunnel", Fourth International Conference on Tunnel Fires, 151 - 160, Basel, Switzerland, 2-4 December, 2002.

45. Ingason, H. och Romanov, L., “Use of mobile fans in tunnels”. SP report 2002:06. SP Swedish National Testing and Research Institute. 2002.

46. Kumm, M., Nyman, H. och Hasselrot, K., ”Försök med mobila fläktar i Masthamnstunneln”, Stockholm. Forskningsrapport MdH Ist 2003:3, Mälardalens högskola, 2003.

47. Särdqvist, S., “Demand for extinguishing media in manual firefighting”, PhD-thesis, Report LUTVDG/(TVBB-1021), Lund University.

48. Kastlängstester genomförda av Anders Bergqvist och Ulf Lundström, Stockholms brandförsvar, i Södra Länken juli 2003.

49. Persson, H., “Basic equipment for the use of foam as an extinguishing medium; Experimental results and recommendations as a basis determinations of design capacity and performance”, SP report 1990:36, Swedish National Testing and Research Institute, 1990.

50. Jin T. och Yamada, T. Irritating effects of fire smoke on visibility. Fire Science and Technology, Vol 5, sid 79-90, 1985.

51 BBM fireconsulting. Test av rökdykargruppens förmåga vid insats i tunnelmiljö, Masthamnstunneln 2003-11-12, Stockholm, 2003

52. Bergh, U., Danielsson, U., Gavhed, D., Holmér, I., Smolander, J. och Bern, M., ”Rökdykning. Studier av Människa och miljö - Metod och teknik”, Rapport P21-249/98, Räddningsverket, Karlstad, 1998.

53. Danielsson, U., ”Människans fysiska tålighet vid brand, värmeupplagring – brännskada”, Rapport C 54055-H1, Försvarets forskningsanstalt, Stockholm, 1984.

54. Fanger, PO. “Thermal comfort”, Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

55. Lundström, S., Svensson, S. och Särdqvist, S., ”Släckförsök vid brand i stor lokal”, Rapport P21-328/00, Räddningsverket, Karlstad, 2000.

56. Holmér, I., Gavhed, D., Karlsson, E., Kuklane, K. och Nilsson, H., ”Belastningsstudier av rökdykning vid extrem värmebelastning”, Rapport P21-202/97, Räddningsverket, Karlstad, 1997.

Bilaga 1 Allvarliga olyckor med brand i vägtunnlar

Tabell B1.1 Sammanställning av allvarliga olyckor med brand i vägtunnlar framtill 2003.

						Konsekvenser för		
År	Tunnel	Plats och land	Fordon vid brandens ursprung	Förmodad brandorsak	Rapporterad varaktighet	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 (rökför-giftade)	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 1personvagn 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

År	Tunnel	Plats och land	Fordon vid brandens ursprung	Förmodad brandorsak	Rapporterad varaktighet	Människor	Fordon	Tunnlar
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 långtradare	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 2.5dagar
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	Sicilen 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
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:Gotthard 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 avstäng 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	Seljestads-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	

Bilaga 2 Beräkningsmodell för utrymning av vägtunnel

Modellen som används för känslighetsanalysen i avsnitt 4 är uppbyggd kring förutsättningarna att det finns bilister som sitter i sina bilar och att det finns en kö med bilar. Vidare antas det att branden startar vid starten av förloppet. Bilisterna i respektive bil påbörjar sin förflyttning efter en viss fördröjningstid från det att branden har startat. Fördröjningstiden är individuell för bilisterna i respektive bil. Det antas att det finns en bilist i varje bil i kön men det finns inget som hindrar att fler bilister placeras i varje bil.

Bilisterna förflyttar sig helt oberoende av varandra och det finns ingen samverkan mellan dem. Det antas också att det finns tillräckligt med utrymme att inte kösituationer uppstår i tunneln utan förflyttningstiden styrs endast av bilisternas gånghastighet. Varje bilist, eller grupp av bilister från en och samma bil, förflyttar sig sedan mot en utgång eller utrymningsväg så länge som inte kriterierna för medvetslöshet har uppnåtts. Utöver medvetslöshet finns kriterier som avbryter utrymningsförloppet om temperaturen eller värmestrålningen mot en bilist blir för hög. De miljövariabler som påverkar utrymningen är:

- temperatur i röken
- koncentration av koloxid
- koncentration av koldioxid
- koncentration av syre
- siktsträcka

Som kriterier för när utrymningen inte kan fortsätta har följande gränsvärden använts

- Ackumulerad dos CO i kombination med låg syrenivå, FED_{CO}, som överstiger 1,0 (medvetslöshet)
- Ackumulerad dos CO2, FED_{CO2}, som överstiger 1,0 (medvetslöshet)
- Ackumulerad dos värme, FED_{temp}, som överstiger 1,0 (värmeutmattning)
- Lokal brandgastemperatur som överstiger 120 °C (akuta brännskador)
- Lokal strålningsintensitet som överstiger 5 kW/m^2 (akuta brännskador)

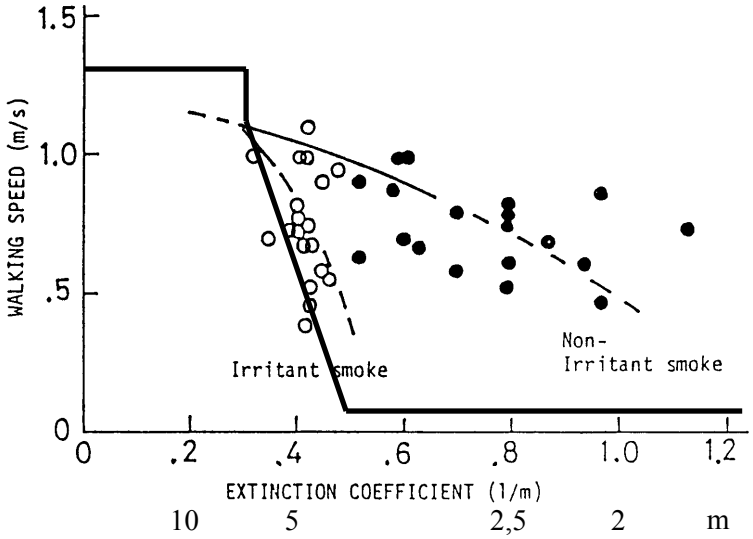
Det finns inga synergieffekter mellan dessa kriterier annat än att koncentrationen av CO_2 påverkar takten som CO tas upp i kroppen. När halten av CO_2 ökar så ökar också andningsfrekvensen vilket leder till en snabbare upptagning av CO. Allteftersom bilisten förflyttar sig i tunneln utsätts den för påverkan från branden. Effekten av branden bygger upp en dos av miljöparametrarna som i vissa fall uppnår en kritisk nivå. I modellen undersöks när nivån för medvetslöshet inträffat. Om den kritiska gränsen överskrids får det till följd att bilisten inte längre kan fortsätta sin utrymning. Beräkning av exponering baseras på beskrivningen i Purser (1995).

Beräkningen sker i tidssteg om vardera 30 sekunder. För varje tidssteg adderas den fraktionsdos av till exempel koloxidpåverkan som beräknas under tidssteget till den dittills erhållna dosen. Doserna ackumuleras hela tiden tills något gränsvärde eventuellt uppnås.

En förenkling som görs är att brandgaserna antas vara helt omblandade och att temperaturen vid en given plats i tunneln är lika över hela tunneltvärsnittet. Detta är inte helt riktigt och speciellt nära branden finns det en tydlig vertikal uppdelning med en varm region nära taket och lägre temperatur nära golvet. Det betyder att temperaturen som personen exponeras för underskattas nära branden.

Värmestrålning mot bilisterna antas ske via såväl strålning från de varma brandgaserna och från flammorna från branden. När värmestrålning passerar genom brandgaser absorberas energin vilket innebär att strålningen från flammorna avtar. Denna absorption sker förhållandevis fort dvs avklingningen sker effektivt. Men som tidigare just beskrivits finns det inte så mycket brandgaser närmast branden pga att den skiktar sig. Det är därför rimligt att anta att strålningen från flammorna i praktiken inte avklingar så snabbt eftersom det inte finns något som absorberar energin. Därför bidrar värmestrålningen från brandens flammor till den totala strålningsintensiteten som träffar en bilist så länge som bilisten är närmare branden än 50 meter.

Gånghastigheten för bilisterna påverkas enbart av den begränsande sikten. Hastigheten antas följa det samband som indikeras av den heldragna linjen i figur B1.1. Experiment, Jin & Yamada (1985), har påvisat ett tydligt samband mellan siktsträcka och gånghastighet. Det kan också antas att brandgaserna i en tunnelbrand är just irriterande. Den lägre nivån för gånghastigheten, som är oberoende av siktsträckan kan antas vara likvärdig med förflyttning i mörker. Från försök av Frantzich & Nilsson (2003) kan en lägsta hastighet på 0,2 m/s användas. Det kan förmodas att gånghastigheten också skulle kunna påverkas om bilisten var mycket påverkad av giftiga eller irriterande gaser men detta har inte ingått i modellen. Den låga gånghastigheten i täta brandgaser kan till viss del sägas beakta detta.



Figur B1.1. Gånghastighet i relation till röktäthet och siktsträcka, Jin & Yamada (1985). Röktätheten förutsätts vara beräknad med hjälp av den naturliga logaritmen. Siffrorna under figuren anger ungefärlig siktsträcka.

Algoritm

En förenklad beräkningsgång har följande struktur vilken upprepas för varje tidssteg. När beräkningen för bilist ett är klar sker samma beräkning för bilist två och så vidare.

Inledning

Läs in data om bilisterna. Genomför följande beräkningar för samtliga tidssteg. Tidsstegets längd betecknas med t och skall vara angiven i minuter. Aktuell plats i tunneln anges som avståndet L, mätt från branden.

Exponering

Beräkna brandeffekt för den plats där bilisten befinner sig och för aktuell tidpunkt.

Beräkna brandgastemperatur (T_{gas}) för den plats där bilisten befinner sig och för aktuell tidpunkt.

Beräkna gaskoncentrationer (CO, CO_2, O_2) för den plats där bilisten befinner sig och för aktuell tidpunkt.

Beräkna sikt och röktäthet för den plats där bilisten befinner sig och för aktuell tidpunkt.

Beräkna värmestrålningen från brandgaser och flamma ($\dot{q}''_{rad}$)för den plats där bilisten befinner sig och för aktuell tidpunkt. Värmestrålningen från flamman påverkar endast om L < 50 m.

Påverkan till medvetslöshet per tidssteg

Beräkna fraktionsdos för medvetslöshet för CO, CO_2, O_2, temperatur: F_{CO}, F_{CO2}, F_{O2}, F_{temp} för aktuellt tidssteg Δt.

$$\Delta F_{CO} = \frac{K(koncCO^{1,036})\Delta t}{30} \tag{B2.1}$$

med kritisk karboxylhemoglobinhalt på 30 % och $K = 8,2925 * 10^{-4}$

$$\Delta F_{CO2} = \frac{1}{e^{(6,1623-0,5189\,koncCO_2)}}\Delta t \tag{B2.2}$$

$$\Delta F_{O2} = \frac{1}{e^{8,13-0,54(20,9-koncO2)}}\Delta t \tag{B2.3}$$

$$\Delta F_{temp} = \frac{1}{e^{5,18-0,0273T_{gas}}}\Delta t \tag{B2.4}$$

om brandgastemperaturen är över 37 °C.

Beräkna total fraktionsdos för medvetslöshet (FID) för CO kombinerat med korrigering för förhöjd andningsfrekvens orsakad av inandning av CO_2, V_{CO_2}. Sänkt syrehalt bidrar också till dosen.

$$\Delta FID = \Delta F_{CO} \cdot V_{CO2} + \Delta F_{O2} \tag{B2.5}$$

med

$$V_{CO_2} = \frac{e^{2,0004+0,1903\,koncCO_2}}{7,1} \tag{B2.6}$$

Gånghastighet

Bestäm gånghastigheten från heldragen linje i figur B 1.1.

Beräkna förflyttningssträcka till nästa tidssteg, ΔL, såvida inte medvetslöshet inträffat.

Lagring av ackumulerade värden

Beräkna

$$FID_{aktuellt\ tidssteg} = \Delta FID + FID_{föreg\ tidssteg} \tag{B2.7}$$

$$F_{temp,\ aktuellt\ tidssteg} = \Delta F_{temp} + F_{temp,\ föreg\ tidssteg} \tag{B2.8}$$

$$F_{CO_2,\ aktuellt\ tidssteg} = \Delta F_{CO_2} + F_{CO_2,\ föreg\ tidssteg} \tag{B2.9}$$

$$L_{aktuellt\ tidssteg} = \Delta L + L_{föreg\ tidssteg} \qquad \text{(B2.10)}$$

Kontrollera om medvetslöshet inträffat vilket hindrar fortsatt utrymning. Medvetslöshet inträffar om

- $FID > 1{,}0$
- Ackumulerad dos: $F_{temp} > 1{,}0$
- Ackumulerad dos: $F_{CO_2} > 1{,}0$

Kontrollera om akuta lokala parametrar överskrids vilket leder till att fortsatt utrymning hindras.

- $T_{gas} > 120$ °C
- $\dot{Q}''_{rad} > 5$ kW/m^2
- $koncO_2 < 8{,}7$ vol%

Bilisten har nått en utrymningsväg (säker plats) om L är större än avståndet mellan utgångarna minskat med avståndet mellan bilistens inledande position och brandens position, dvs det avstånd som bilisten måste gå för att nå den närmaste utgången.

Upprepa för alla följande tidssteg (normalt 120 tidssteg dvs 60 minuter) för aktuell bilist.

Upprepa sedan ovanstående procedur för följande bilist tills alla bilister är beräknade.

Bilaga 3 Redovisning av beräkningsmodeller för brandmiljön i tunneln

Nedan ges en beskrivning av de endimnesionella modeller som har utvecklats för beräkning av brandgastemperaturer, gaskoncentrationer och röktäthet vid olika tidpunkter och olika avstånd nedströms branden. Eftersom det finns många osäkerheter i utrymningsberäkningarna har modellen gjorts så enkel som möjligt. Brandgaserna antas följa luftriktningen och en fullständig omblandning av brandgaserna nedströms branden antas ske redan vid brandplatsen (ingen skiktning av röken, se figur B3.1. Detta är ett konservativt antagande eftersom röken kan skiktas, speciellt i närheten av branden. Skiktningen av röken bestäms av avståndet från branden, lufthastigheten och brandens storlek. För att göra en mer noggrann beräkning som tar hänsyn till skiktningen krävs en beräkning med hjälp av betydligt mer avancerade modeller.

Figur B3.1 Principiell bild över hur det antas att brandgaserna blandas upp fullständigt nedströms branden.

Beräkning av brandgastemperatur

Om en fullständig uppblandning av brandgaserna antas, se figur B3.1, kommer brandgastemperaturen närmast branden (x=0) att kunna beräknas enligt följande ekvation:

$$T_{avg,x=0}(\tau) = T_a + 0.7 \cdot \frac{Q(\tau)}{\dot{m}_a c_p} \qquad \text{(B3.1)}$$

där $\dot{m}_a = \rho_0 u A$ är massflödet till branden. Taktemperaturerna närmast branden kommer i flesta fall att vara betydligt högre än det medelvärde som beräknas fram med hjälp av ekvation (B3.1). Brandgastemperaturen kommer att sjunka med avståndet x från branden och tiden t enligt följande ekvation:

$$T_g(x,t) = T_0 + \left[T_{g,0}(\tau) - T_0\right] e^{-\frac{hPx}{\rho_0 u A C_p}} \qquad \text{(B3.2)}$$

där $\tau = t - \frac{x}{u}$ är en tidsförskjutning (i sekunder) på grund av att brandgasernas transporttid. Med andra ord; t - τ motsvarar den tid det tar att transportera en förändring som inträffar vid brandplatsen

sträckan x inne i tunneln. Den lumpade värmeförlustkoefficienten h (konvektion + strålning) för utsprängda tunnlar antas vara lika med 0.03 kW/m^2 K och C_p är 1 kJ/kg K för luft.

Beräkning av gaskoncentrationer

Gaskoncentrationerna som funktion av tid och avstånd från branden kan beräknas för syre (O_2), koldioxid (CO_2) och kolmonoxid (CO). Genom att anta att brandgaserna blandas upp fullständigt vid brandplatsen så kan gaskoncentrationen beräknas enligt följande ekvationer:

$$X_{O2}(t,x) = \left[X_\infty - \frac{1}{13100} \frac{M_a}{M_{O2}} \frac{Q(\tau)}{\rho_0 uA} \right] \cdot 100 \qquad \text{(B3.3)}$$

$$X_{CO_2}(t,x) = \left[Y_{CO_2} \frac{M_a}{M_{CO_2}} \frac{Q(\tau)}{\Delta H \rho_0 uA} \right] \cdot 100 \qquad \text{(B3.4)}$$

$$X_{CO}(t,x) = \left[Y_{C0} \frac{M_a}{M_{CO}} \frac{Q(\tau)}{\Delta H \rho_0 uA} \right] \cdot 1E6 \qquad \text{(B3.5)}$$

där $Q(\tau)$ bestäms av scenario och tidsperiod. Tidsförskjutningen $\tau = t - \frac{x}{u}$ bestäms för varje tid och avstånd x. Andra parametrar är molvikt (g/mol) M_{O2}=32 , M_a=29 och M_{CO}=28 g/mol. Δ H är det effektiva förbränningsvärdet och Y_{co} är mängden CO per g bränsle som förbränns. Y_{co} ligger i storleksordningen 0,01 - 0,05 g/g för mängd olika material under välventilerade förhållanden, (se Tewarson, Fire Protection Engineering Handbook, First Editon 1, 1-186). I rapporten så används Yco=0.05 g/g och Yco_2=2.5 g/g.

Beräkning av röktäthet och siktlängd

Siktlängden i röken kan beräknas genom att anta att andelen rök som bildas per gram bränsle är relativt konstant under branden. Rökkoncentrationen, C_s (kg/m^3) som funktion av tid och avstånd kan då beräknas med hjälp av följande ekvation:

$$C_s(t,x) = Y_s \frac{Q(\tau)}{\Delta HuA} \qquad \text{(B3.6)}$$

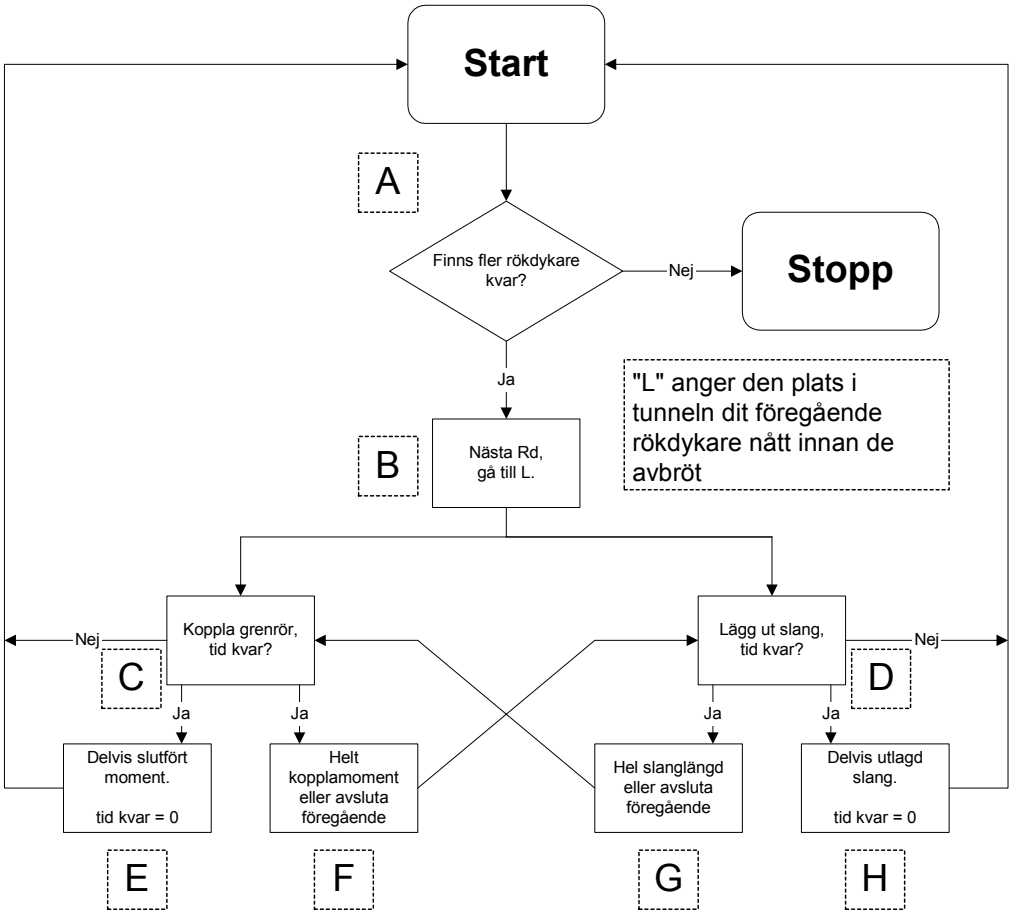
där Y_s är mängden rök som bildas per g bränsle som förbränns (se Tewarson, Fire Protection

Engineering Handbook, First Edition, 1-186) och $\tau = t - \frac{x}{u}$. Y_s kan i många fall antas till 7.5 % (g rök/g bränsle). Det finns även möjlighet att uttrycka C_s i siktlängd med hjälp av följande ekvation:

$$V = 0.87 \frac{uA\Delta H}{Q(\tau)3300Y_s} \qquad \text{(B3.7)}$$

Denna ekvation ger siktlängden i meter på olika avstånd inne i tunneln vid olika tidpunkter. Den har tagits fram med hjälp av diagrammet i Tewarson, sidorna 1-194, där sedan en representativ linje har dragits genom en skara datapunkter för olika ljuskällor. I denna rapport används Y_s=0,09.

Bilaga 4 Struktur på modell för rökdykarinsats i vägtunnel



Förklaring till rökdykarmodellen.

A. Finns fler rökdykargrupper att tillgå? Om ja, fortsätt då till (B) och i annat fall till Stopp.

B. Ny rökdykargrupp förflyttar sig till platsen där föregående rökdykargrupp avslutat (anges med L i figuren). Beroende på vad föregående grupp avslutat med väljer ny rökdykargrupp antingen att koppla ett grenrör (C) eller att lägga ut slang (D).

C. Uppgiften är att koppla ett grenrör, antingen att börja koppla ett nytt grenrör eller fortsätta på ett kopplingsmoment som föregående grupp påbörjade. Beroende på hur mycket tid som rökdykargruppen har kvar hinner de antingen avsluta momentet (F) eller så får nästa rökdykargrupp fortsätta (E). Om all tid förbrukas med att arbeta med kopplingsmomentet är nästa åtgärd att gå ut. I annat fall fortsätter gruppen med att lägga ut ny slang och avancera vidare in i tunneln.

D. Uppgiften är att lägga ut slang, antingen att börja med en ny slanglängd eller fortsätta på en slanglängd som föregående grupp började lägga ut. Beroende på hur mycket tid som rökdykargruppen har kvar hinner de antingen avsluta momentet (G) eller så får nästa rökdykargrupp fortsätta (H). Om all tid förbrukas under utläggningen av slangen är nästa åtgärd att gå ut även om inte all slang lagts ut. Om hela slanglängden lagts ut och det finns tid kvar blir nästa moment att börja koppla på ett nytt grenrör.

Bilaga 5 Beräkning av avstånd till kritisk strålningsnivå

Brandeffekten beskrivs av ekvation (3.1):

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1} \qquad \text{(B5.1)}$$

där r ges av ekvation (3.2) och k av ekvation (3.3). Värmestrålningen bestäms av ekv (5.4):

$$\dot{Q}''_{rad,in} = \frac{0{,}3\dot{Q}_{comb}}{4\pi L^2} \qquad \text{(B5.2)}$$

Genom att kombinera ekvation (B5.1) och (B5.2) så kan vi lösa ut avståndet X till den kritiska strålningsnivån $\dot{Q}''_{rad,kritisk}$:

$$X = \sqrt{\frac{0{,}3 \cdot \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r}{4 \cdot \pi \cdot \dot{Q}''_{rad,kritisk}}} \cdot e^{-\frac{k \cdot t}{2}} \left(1 - e^{-k \cdot t}\right)^{\frac{n-1}{2}} \qquad \text{(B5.3)}$$

Denna ekvation har plottats i figur 5.6 där avståndet X plottas som funktion av tiden t och där $\dot{Q}''_{rad,kritisk}$ =5 kW/m^2. I ekvation (B5.3) så anges $\dot{Q}''_{rad,kritisk}$ i kW/m^2, konstanterna n, r och k hämtas från tabell 3.12 och tiden t anges i sekunder.

Räddningsverket, 651 80 Karlstad
Telefon 054-13 50 00, fax 054-13 56 00. www.raddningsverket.se

Beställningsnummer P21-459/05. Fax 054-13 56 05
ISBN 91-7253-256-4