

RAPPORT

REPORT

Vägverket
Katarina Kieksi
Avd för Bro och Tunnel
781 87 BORLÄNGE

Handläggare, enhet / *Handled by, department*
Haukur Ingason, Fire Technology
Tel +46 (0)33 16 51 97

Datum / *Date*
2000-12-07

Beteckning / *Reference*
P009559

Sida / *Page*
1 (13)

Dimensionering av tunnlar - brandaspekter

1 Uppdrag

SP-Brandteknik har fått i uppdrag av Vägverket (VV) att göra en litteraturinventering kring bränder i tunnlar. Enligt VV ska litteraturstudien sammanställa dagens kunskapsläge genom att sammanfatta känd FoU och föreslå de områden där nya forskningsinsatser krävs. De områden som har ingått i studien är:

- a) Brandlaster i vägtunnlar
- b) Bärförmåga vid brand
- c) Datorverktyg för dimensionering
- d) Materialval i tekniska system
- e) Brandgasventilation
- f) Brandbekämpning

2 Sammanfattning

SP- Brandteknik genomförde 1997 en litteraturstudie kring bränder i tunnlar på uppdrag av Vägverket [1]. I den litteraturstudie som presenteras här har vi koncentrerat kunskapssökningen från 1997 och fram till i dag. Det har hänt mycket sedan 1997, kanske inte så mycket inom forskningen, men desto mer vad gäller brandkatastrofer i tunnlar. Brandkatastrofer är viktiga för att ta fram nya forskningsområden. De visar tydligt var det brister i säkerheten. De områden där ytterligare forskning behövs är först och främst:

- brandspridning mellan fordon i tunnlar
- inverkan av ventilation på brandspridning i tunnlar
- ta fram en optimal lufthastighet för längsventilation med hänsyn till 'backlayering' och risk för brandspridning mellan fordon
- grundläggande forskning kring spjälkning av betong
- ta fram teoretiska modeller för tid-brandgastemperaturkurvor för tunnlar
- använda resultaten från FIPEC projektet för att ta fram provningsmetoder för kablar i tunnlar
- ta fram bättre underlag för att bestämma dimensionerande ventilationsflöden för evakuering av rök i tunnlar
- undersöka hur lång tid det tar att reversera fläktar i tunnlar.

3 Beskrivning av olika områden

3.1 Brandlaster

Brandlaster i vägtunnlar varierar mycket beroende på typ av tunnel och placering. Vägtunnlar utanför storstäderna har en betydligt lägre trafikintensitet jämfört med tunnlar inne i storstäderna. Detta gör att trafiksituationen kan bli annorlunda och det i sin tur kräver annan typ av säkerhetsåtgärder. I en storstadstunnel kan tunneln vara full med olika typer av fordon på grund av köbildning. Brandbelastningen kan bestå av personbilar, skåpbilar, bussar, lastbilar, långtradare eller tankbilar. Brandbelastningen för enskilt fordon kan variera alltifrån 5000 MJ till 300 000 MJ. Tillsammans kan brandbelastningen variera från några GJ till tiotals GJ (1000 MJ=GJ). Konsekvenserna av en eventuell brand kan bli mycket omfattande på grund av den höga brandbelastningen. Därför är trafikintensiteten en mycket viktig parameter i dimensioneringsprocessen av tunnlar när det gäller brand. Trots detta finns det inga försök genomförda som fokuserar på riskerna kring en sådan trafiksituation. Det finns endast ett fåtal genomförda fullskaleförsök i tunnlar och de visar endast hur snabbt branden kan utvecklas i enskilt fordon och inte hur den kan spridas mellan fordonen. De mest omfattande är EUREKA [2,3] försöken i Norge (1991-92) och Memorial [4] tunnelförsöken i USA (1992-95). Försök med vanliga personbilar, dock ej i tunnlar, redovisas i följande referenser [5,6,7].

I referens [1,8] redogjordes för de försök som har genomförts med olika brandlaster i tunnlar. Inga ytterligare försök har genomförts i tunnlar sedan dess. Däremot har de brandkatastrofer som inträffats de senaste fyra åren visat vilka oerhörda konsekvenser en brand kan få i en tunnel.

Antalet försök som har genomförts i tunnlar för varje typ av fordon är begränsad vilket gör det svårt att dra några långtgående slutsatser angående brandutvecklingshastigheten. Däremot finns det försök genomförda med bussar [9,10] under garagetak med sprinkler där branden kunde spridas mellan bussarna. Försöken visade att branden spreds mellan fordonen på grund av den höga strålningsintensiteten från taket. Samma sak kan inträffa i en tunnel om fordonen står nära varandra. Även om en brand i ett enskilt större fordon (skåpbil, buss, långtradare) kan skapa farlig miljö inne i tunneln så är konsekvenserna oftast hanterbara för räddningstjänsten och/eller tunneloperatörer. De utrymmande har en rimlig chans att ta sig ut ur tunneln via utrymningsvägar i närområdet eller via tunnelmynningen. I flesta fall har de möjlighet att släcka branden innan den blir för stor. Undantaget är en brand i tankbil eller gasoltransport.

Problemen uppstår om branden börjar spridas mellan fordonen inne i tunnelarna. Speciellt farligt kan det blir om långtradare och bussar är inblandade eftersom de har oftast relativt hög brandbelastning. De producerar också mycket giftiga gaser och rök vilket kan leda till att människor omkommer. Om branden skulle spridas mellan fordonen så kan situationen inne i tunneln bli kritisk för de utrymmande inom ett fåtal minuter. Räddningstjänsten kan inte börja bekämpa branden förr än efter 20 - 30 minuter från att de får larm. Då är det oftast för sent för de utrymmande. De måste ta sig ut ur tunneln på egen hand vilket kan leda till stora problem eftersom alla trafikanter inte är medvetna om det.

De tekniska system som kan vara till hjälp för de utrymmande i det skedet är handbrandsläckare, nödtelefoner, belysning, utrymningsvägar och ventilationen.

Om branden utvecklas snabbt kommer konstruktionen att tidigt utsättas för höga temperaturer i taket (800 - 1000 °C) och problem med spjälkning eller ras är relativt begränsade i det skedet. Det är först efter drygt 30 minuter som man kan börja få problem med stabiliteten av konstruktionen. Hittills har erfarenheten visat att detta inte är något akut problem. När räddningstjänsten börjar släckningsarbetet efter 30 minuter eller mer kan de framkalla ett nytt problem då de sprutar vatten på de varma tunnelväggarna. Betongen kan delvis explodera på grund av att kraftiga temperaturskillnader som kan uppstå i betongen. Eftersom detta inträffar först efter att utrymningsfasen är över drabbar detta endast räddningstjänsten i deras släckningsarbete. Problemet är nära besläktat med spjälkningsfenomenet eftersom det handlar om kraftiga temperaturgradienter i betongen eller bergmaterialet.

Att branden kan spridas mellan fordonen har de senaste brandkatastroferna tydligt visat. Det gör att bränderna blir mycket intensivare än man tidigare trott och de blir också mer långvariga på grund av den höga brandbelastningen. Det gör att man får omvärdera varaktigheten när det gäller tid-brandgastemperaturkurvor för dimensionering av tunnlar. Eftersom räddningstjänsten inte alltid klarar av att bekämpa bränder i högtrafikerade tunnlar så kan brandvaraktigheten bli uppemot tiotals timmar. I några av de brandkatastrofer som inträffat nyligen har bränderna blivit ventilationskontrollerade vilket kan innebära brandeffekter mellan 150 - 350 MW beroende på tunneltvärsnitt och ventilationshastighet [11, 12]. En grov uppskattning som vi har gjort visar att brandbelastningen i dessa olyckor kan ha varierat mellan 1 – 6 GJ. En överslagsberäkning visar att detta motsvarar minst en brandvaraktighet mellan 2 till 12 timmar förutsatt att branden är ventilationskontrollerad hela tiden. Antagligen har brandvaraktigheten varit betydligt längre eftersom bränderna varierar i intensitet under denna period. Men detta visar att tunnelkonstruktionerna utsätts för enorma påfrestningar och reparationsarbetet blir mycket dyrt. Brandgastemperaturerna har antagligen varierat mellan 1000 – 1200 °C under en längre period, kanske flera timmar. Det som har gjort att så pass höga temperaturer har uppstått är att tunnelväggarna har värmts upp successivt vilket betyder mindre värmeförluster och därav högre brandgastemperaturer. De höga temperaturerna har antagligen inte uppstått förrän efter någon eller några timmar. Räddningstjänsten hade mycket små möjligheter att bekämpa branden i det skede när bränderna var som intensivast. De fick avvakta tills branden började avta och brandgastemperaturerna sjunka. I det skede när de fick branden under kontroll så var det mesta bortbrunnet.

En bättre kunskap kring hur brand sprids från det ena fordonet till nästa är därför viktig. Utan en sådan kunskap är det svårt och bedöma vilka brandvaraktigheter man kan förvänta sig i tunnarna. Detta är också viktigt med hänsyn till de brandgastemperaturer som redovisas i figur 3.3-1 i Tunnel 99. Det kan alltså bli aktuellt med högre brandvaraktigheter än vad som redovisas i figur 3.3-1. Tunnlar där det finns risk för köbildningar eller tunnlar med mycket hög trafikintensitet måste kanske beaktas speciellt. En framtagning av statistiskt underlag för en bedömning av brandbelastningen i sådana tunnlar i kombination med bedömning av risken för brandspridning mellan fordonen borde övervägas.

Inverkan av ventilationen på brandspridningen är också mycket viktig. Den snabba brandutvecklingen har överraskat trafikanterna och ventilationen har haft en avgörande roll i den snabba brandspridningen. Den gör att flammorna följer ventilationsriktningen och ökar strålningsintensiteten mot närliggande fordon. Branden intensifieras också på grund av ventilationen. Det kan röra sig om en faktor

2 - 3 gånger den normala brandeffekten. Kunskapen kring varför bränderna utvecklas så fort när ventilationen startar är mycket viktig eftersom många brandgaskontrollsystem i tunnlar bygger på principen att längsventilationen ska styra rökgaserna åt ett visst håll. Därför är det viktigt och veta om det finns någon optimal lufthastighet i tunneln dvs en lägsta lufthastighet som krävs för att både hålla tillbaka brandgaserna (backlayering) men som samtidigt inte ökar risken för att branden sprids snabbt mellan fordonen. I dag finns inte någon övre gräns för lufthastigheterna i tunnelarna i händelse av en brand. De senaste brandkatastroferna visar tydligt att det inte är lämpligt att köra full ventilation i alla lägen. Genom t ex skalförsök så kan man undersöka var gränserna går för att branden sprids från det ena fordonet till det nästa vid olika lufthastigheter.

3.2 Bärförmåga vid brand

Sviktande bärförmåga har inte visats sig vara något akut problem i de senaste brandkatastroferna trots den långa brandvaraktigheten. Den främsta förklaringen är kanske att de tunnlar som har varit involverade är bergtunnlar klädda med betong. Det var dock ytterst nära att Eurotunneln skulle rasa men de klarade sig på grund av relativt fast berg ovanför betongelementen där branden var som intensivast. Vad vi vet så har inte räddningstjänsten haft några problem med rasande föremål från taket i dessa tunnelkatastrofer. Dessutom går det att reparera tunnelarna efteråt men det kostar mycket pengar.

Det mest akuta problemet är spjälkningen av betongen [13,14,15]. Hittills har spjälkningen dock inte lett till någon kollaps av konstruktionerna men reparationskostnaderna är höga. Kunskapsluckan är fortfarande mycket stor när det gäller spjälkning av betong. Det krävs betydligt mer grundläggande forskning för att bättre förstå fenomenen bakom spjälkningen. De försök som har gjorts med tunnelement [16] visar tydligt att problemet finns men försöken har inte kunnat ge svar på varför spjälkningen uppstår. Inverkan av olika tekniska lösningar på spjälkningsrisken så som isolering eller genom att blanda in polypropylenfibrer i betongen vid gjutning är lite känt. Här krävs mer forskning för att få svar på kostnad nytta av olika åtgärder. Trots att problemet har uppstått i samband med nybyggda tunnlar och i samband med de senaste tunnelolyckorna har ingen forskning påbörjats inom området. Konsekvenserna av spjälkningen måste stå i rimlig proportion till investeringen för att lösa problemet.

Ett av grundkoncepten när det gäller branddimensionering av bärande konstruktioner i tunnlar är tid-temperatur kurvan. De kurvor som har presenterats i litteraturen och som används i Tunnel 99 (ISO, HC, RWS) bygger till stor del på antaganden för brand i vanliga byggnadskonstruktioner. ISO kurvan är t ex framtagen för byggnader med sex omslutande ytor och ventilationsöppningar på väggarna (rumsbrand). Den termiska trögheten i väggarna i kombination med en brandbelastningen och ventilationsöppningarna skapar denna tid-temperatur kurva. I tunnlar så gäller inte samma förutsättningar. Vanligtvis har man långsgående ventilation som kylar brandgaserna och omslutande ytor har en annan geometrisk utformning (rör i stället för rum). Eureka försöken visade t ex helt andra tid-temperatur kurvor än vad som används i tunnlar i dag. De brandkatastrofer som har inträffat visar också att väggarnas uppvärmningsfas har en stor betydelse för vilka brandgastemperaturer som kan uppnås i tunnelarna. Därför finns det ett behov av att göra en mer grundläggande teoretisk modell som är anpassad till tunnelproblematiken. Inverkan av ventilationen, inverkan av tunnelkonstruktionens geometriska utformning och tunnelkonstruktionens termiska

tröghet måste beaktas. Genom en sådan modell så kan en alternativ dimensionering med realistisk brandbelastning göras för tunnlar med olika trafikintensitet.

Motsvarande dimensioneringsförfarande finns för vanliga byggnader, den så kallade "naturliga" branden där hänsyn till brandbelastning och ventilationsförhållanden görs.

3.3 Datorverktyg

Beräkningsmodeller för brandgasspridning brukar delas upp i zonmodeller och CFD modeller där CFD står för Computational Fluid Dynamics. I referens [1,8] finns en sammanställning av olika beräkningsverktyg för dimensionering av brandskydd. I dagens dimensionering av vägtunnlar används alltmer avancerade datorprogram (CFD) för att beräkna strömningsförhållandena i händelse av en brand. CFD programmen [17,18,19,20,21,22] kan beräkna kritiska lufthastigheter för att hindra att röken sprids uppströms branden eller ventilationsflöden som krävs för att evakuera röken från tunneln. Resultaten används som underlag för att bestämma avstånd mellan utrymningsvägar, ventilationssystem och temperaturer i konstruktionen. Dessa program är utprovade och har en hög grad av tillförlitlighet. Det stora problemet med CFD programmen är bristen på tillförlitliga indata till beräkningarna. Resultaten från CFD beräkningarna kommer att vara helt och hållet beroende på valet av indata. Den viktigaste indatan är brandutvecklingshastigheten i de fordon som förväntas trafikera tunnarna. Någon inverkan av ventilation eller extern strålning på brandutvecklingshastigheten tas inte med i beräkningarna. Det gör att eventuell brandspridning mellan fordonen inte kan simuleras. Det får man i så fall bestämma i förväg.

Trots pedagogiskt presenterade resultat i form av färgplottar och diagram så är det mycket svårt för beslutsfattare att bedöma rimligheten i dessa beräkningar. De får förlita sig helt och hållet på de som genomför beräkningarna. Problemet är bara att de som genomför dessa beräkningar inte alltid har tillräcklig kunskap om brand för att bedöma rimligheten i resultaten. Det är mycket lätt att göra fel när man använder CFD speciellt när det gäller valet av olika randvillkor. Dessutom finns mycket begränsad med information kring brandutvecklingshastigheter i litteraturen [2,3,5,6,7,23,24]. Genom fler försök med realistiska fordon i tunnlar så kan denna kunskapsbrist förbättras. Någon form av lämplighetskrav för att genomföra denna typ av beräkningar (CFD) borde diskuteras.

Zonmodellerna kan vara tvåzons- eller flerzonsmodeller. Zonmodellerna har det gemensamt att de bygger på att brandrummet delas in i en till tre kontrollvolym; det övre varma rökgaslagret, det undre kalla skiktet med opåverkad luft, samt i vissa fall brandplymen som en separat zon. Vissa program kan koppla ihop flera brandrum, så kallade flerzonsmodeller. Indata består i allmänhet av rummets geometri, öppningars storlek, brandeffekt som ett konstant värde eller tidsberoende och fysikaliska egenskaper hos bränsle och omslutande ytor. Zonmodeller är ganska lätta att använda vilket kan vara en nackdel om de används av personer utan tillräckliga bakgrundskunskaper. Det mest avancerade fler-zonsmodellen för tunnlar är FASIT [25]. Programmet kan beräkna massflöde, brandgasspridning, temperaturfördelning, gaskoncentrationfördelning och gashastighetsfördelning både i längsled och över tvärsnittet. Det finns ett behov av validering av denna typ av program innan de används i dimensioneringssammanhang.

Det finns också ett behov av enkla endimensionella beräkningsmodeller för dimensionering av tunnlar. Genom överslagsberäkningar kan man lättare undersöka rimligheten i CFD beräkningarna.

Det finns stort behov av en sammanställning av alla endimensionella modeller som finns i litteraturen eller som har utvecklats i samband med projektering av tunnlar i Sverige.

3.4 Materialval

När det gäller kablar i tunnlar så finns inte mycket forskning genomförd förutom FIPEC [26] projektet och FRS plenum projektet [27]. Erfarenheten från bränder i tunnlar indikerar att kablar inte är tillräckligt bra skyddade. I många fall monteras de i kapellrännor i tak vilket gör att de utsätts för hög värmebelastning i tidigt skede av branden. Den lämpligaste lösningen utifrån brandteknisk synvinkel är att lägga kablar i kabelrännor i vägbanan för att skydda de från höga temperaturer. Det finns exempel där relativt små bränder har slagit ut de säkerhetssystem eftersom kablar har monterats i tak [28]. Det kan vara alltifrån videokameror till impulsfläktar. Kablar som fanns i Eurotunneln hade rätt så hög brandklass och de bidrog inte speciellt mycket till brandspridningen. Däremot hade delar försvunnit efter branden på grund av den höga värmebelastningen. Det visar att kablar kommer att skadas oavsett vilken brandklass de uppfyller. Frågan är bara när?

När det gäller giftigheten från olika kabelprovningar så har SP Brandteknik [29] visat att flamskyddsmedel fördröjer produktionen av saltsyra, kolmonoxid, rök och värme vid brand. Däremot är den totala mängden som produceras ungefär den samma som i icke flamskyddsbehandlade kablar. Kablarnas brandspridning är mycket beroende av scenarioalet (vertikal eller horisontell montering) medan kablarnas antändlighet inte är lika beroende av scenarioalet [29].

Det finns ingen organisation som bedriver forskning kring kablar i tunnlar i dag. Behovet finns dock. I FIPEC projektet genomfördes försök som skulle kunna efterlikna förhållandena i tunnlar. Där föreslogs till och med speciella scenarier (T1,T2,T3) som kan efterlikna förhållandena i tunnlar. Målet med FIPEC projektet var dock betydligt mer generellt vad gäller brandspridning i kablar:

- Utveckla och modifiera kabel-brandprovningar baserade på nuvarande IEC metoder genom att implementera brandeffektmätningar och rökproduktion mätningar som tillåter tydligare skillnader mellan olika kablar.
- Utveckla småskaliga brandmetoder för kablar.
- Utveckla modeller mellan de småskaliga metoderna och de fullskaliga metoderna.
- Utveckla beräkningsmodeller för modellering av kabelbränder i verkliga scenarier.
- Validering av modellerna.

De viktigaste slutsatserna från FIPEC projektet är:

- Vissa typer av kablar visade sig kunna ge höga halter av klorider och fluorider när de brinner. De kan leda till stora korrosionsproblem i tunnlar efter branden.
- De kablar som hade låg brandklass visade benägenhet till väldigt snabb vertikal flamspridning. Vissa kablar kunde spridas med en hastighet uppemot 2 meter per min eller mer.

- Monteringen av kablarna visade sig vara mycket viktig. Där är avståndet mellan enskilda kablar i en kabelstege speciellt viktigt. Det kritiska avståndet tenderade att vara ungefär en kabeldiameter.
- Relativt stor skillnad mellan vertikal och horisontell flamspridning i kablarna. Skillnaden kunde vara en faktor 3 - 6 gånger den horisontella flamspridningen.
- Ventilationen kan påverka flamspridningen. I vissa scenarier kan den påskynda flamspridningen och i andra fall kan den hämma den. Ventilationen visade sig vara en viktig parameter för brandspridningen.
- Det är tre komponenter som är viktiga när det gäller brandspridning i kablar; det är mantelmaterialet, fyllningsmassan och isoleringsmaterialet till kablarna.
- Ett fullgott brandskydd i kablar kräver att alla dessa komponenter eller material har en hög brandklassning.
- CFD-modeller kan användas för att modellera kabelbränder i verkliga scenarier eller vid utredningar där kablar kan ha varit inblandade
- Metoderna för brandteknisk dimensionering kan användas med hjälp av modellerna

I Norge har man gjort en del försök med olika inklädningsmaterial [30,31,32] för skydd av PE-skum som används som frostskydd i tunnlar. Försök har gjorts både i liten skala och i fullskala. Det material som har provats är sprutbetong med och utan stålfiberarmering, lättbetong, brandskyddsmålning, stålfolie, stålskivor, aluminiumvalv, glasfiberduk, promatekt och sprinkleranläggningar. Oskyddad PE-skum visade sig ha mycket dåliga brandegenskaper [30]. Produktionen av värme och giftiga brandgaser var mycket snabb. Därför måste PE-skummet skyddas från antändning och vidare spridning av branden. Nya riktlinjer för PE-skum har införts i Norge [33]. Där skiljer man på nybyggda och äldre tunnlar. För nybyggnation gäller:

- Riktlinjerna gäller för tunnlar längre än 500 m.
- I tunnelklass C, D och E tillåts inte PE-skum utan godkänt brandskydd.
- I tunnelklass A och B tillåts inte PE-skum utan godkänt brandskydd de första 75 m av tunneln (innkjöringssone).
- För övrigt tillåts PE-skum utan brandskydd om sektionerna inte överskrider 200 m² eller 20 lm. Minimum avstånd mellan sektionerna är 100 m.
- Oskyddat PE-skum ska vara svårantändligt med oxygenindex min. 25%.

För existerande tunnlar gäller följande:

- Riktlinjerna gäller för tunnlar som är längre än 500 m och med ÅDT trafik större än 1000 fordon.
- Om det finns mer än 200 m² obeskyddat PE-skum de första 75 m ska det skyddas med godkänt brandinklädningsmaterial.
- För tunnlar med längre sammanhängande sträckning av PE-skum finns behov av ytterligare brandskyddsåtgärder. Dessa tunnlar måste behandlas separat.

Det framkommer inte i dokumentet vad som är godkänt brandskydd av PE-skum. I [32] rekommenderar man 60 mm sprutbetong med stålfiberarmering eller alternativt stålfolie. Andra produkter som anses vara intressanta är Hensomasastic 5KS-TP, Alpha Maritex glasfiberduk eller lättbetong. Erfarenheten visar att sprut- och lättbetong tål högtryckstvättning bra. Erfarenheten visar också att det kan uppstå skador på betongen vid kollision med fordon. Andra problem är att tjockleken på betongen kan variera

beroende på om det finns rör, kanter eller upphängningar där betongen tenderar att torka snabbare. Det kan leda till sprickbildningar i betongen. Sprutbetong utan stålfiberarmering tenderar att spricka i större omfattning jämfört med sprutbetong med armering. Lättbetongen innehåller plastfiber i stället för stålfiber vilket är fördelaktigt i korrosiv miljö. Brandskyddsfärg har inte visat sig fungera speciellt bra. Färgen lossnar och branden kan lätt spridas. Stålfolie anses ge ett bra brandskydd. Aluminiumvalv fungerar inte speciellt bra. Aluminium smälter vid 660 °C. Sprinkler har visat sig hindra brandspridning i PE - skum. Nackdelarna med sprinklerskyddet anser man vara problem med frotskydd i ledningar och att sprinklerna försämrar sikten i tunnarna. Det finns tekniska lösningar framtagna i Sverige (Aspen Petroleum AB) när det gäller frotskydd av sprinkleranläggningar. Det stämmer att sprinklern tenderar att försämma sikten i röken när den startar. Man måste dock sätta det i relation till det faktum att om branden kan utvecklas obehindrat så kommer tunnelröret att rökfyllas ändå. Risken för en totalskada är då betydligt högre jämfört med utan sprinkler. Risken för sekundära explosioner på grund av vattenånga anser vi vara överdriven. Det viktigaste är att hindra att branden sprids mellan fordonen.

3.5 Brandgasventilation

I litteraturstudien från 1997 [1] redovisas hur olika ventilationssystem fungerar. Där redovisas både naturliga och mekaniska system.

SP Brandteknik har nyligen i samarbete med FOA genomfört modellförsök [34] med mekanisk längs- och frånluftsventilation. Försöken visar att längsventilationen tenderar att försämma frånluftsventilationens effektivitet. Högre längsgående ventilation betyder mindre rök genom frånluftsöppningarna. Försöken visar också att det krävs ett volymflöde på ungefär 500 m³/s för att hindra all rök från att passera ett schakt (eller öppning i tak) med tvärsnittsarea på 4.8 m x 4.8 m och längsventilation mellan 0-5.6 m/s. Accepterar man att röken stannar inom ett område som inte är längre än 100 m nedströms schaktet bör det dimensionerande ventilationsflödet ligga runt 350 m³/s med samma öppningsarea. Om man antar att vi har minst 2 schakt (eller öppningar i tak) inom det dimensionerande ventilationsområdet (sektion) så kan det dimensionerande flödet ligga runt 250 m³/s per schakt (öppning) och om vi antar att vi har minst 3 schakt (eller öppningar i tak) i tunnelsektionen så kan det dimensionerande flödet ligga runt 150 m³/s per schakt eller öppning i tak. Då får vi också acceptera att brandgaserna kommer att spridas inom ett större område i tunneln. Tvärventilation bygger på principen att det finns öppningar i taket där röken sugas ut i närområdet av branden (sektion). De frånluftskapaciteter som vi har erhållit i våra försök är högre än vad som dimensioneras för i vägtunnlar idag. Det innebär att man bör göra en ordentlig utredning kring vad som verkligen krävs vad gäller geometrisk utformning av dessa frånluftsöppningar i taket och vilka luftflöden som man bör dimensionera för när det gäller tvärventilation. Det brister i kunskapen kring detta.

När det gäller kritisk lufthastighet i tunnlar för att hindra rökfronten uppströms branden så gäller fortfarande det som har redovisats i referens [1,8]. Den kurva som visas i Tunnel 99 ger en bra bild över de dimensionerande lufthastigheterna även om den verkar ligga lite över den som presenteras i PIARCs [35] senaste dokument (sid 157).

Brandgaskontroll är ett mycket viktigt område att forska kring. Där finns väldigt lite gjort både när det gäller tider för att reversera flöden in tunnarna och vilken taktik man bör använda. Här bör VV rekommendera vissa grundprinciper när det gäller systemens kapacitet och taktik för styrning av systemen. Som det är skrivet i dag så är det lokala

brandförsvaret i samråd med konstruktören som bestämmer utformningen av systemen. Slutsatsen är att det finns behov av forskning kring styrning och aktivering av brandgaskontrollsystem vid räddningsinsats i tunnlar.

3.6 Brandbekämpning

Det finns väldigt lite redovisat i litteraturen när det gäller räddningsinsatser i tunnlar [8]. I Sverige har ett projekt påbörjats angående räddningsinsatser i tunnlar på uppdrag av Räddningsverket (SRV) och en förstudie har slutförts [36]. Målsättningen med det projekt som Räddningsverket nyligen har startat är att:

- utforska brandmiljön i olika tunnlar
- utrymningssituationen
- räddningstjänstens åtgärder vid räddningsinsatser vid bränder i tunnlar och gruvor.

Arbetsplanen är följande:

- inhämta underlag från utredningar, rapporter, inträffade bränder och övningar
- val av olycksscenarier; lämpligt att utgå ifrån en liten och en stor brand ("representativa" scenarier)
- brandförlopp, utrymningssituationen och räddningstjänstens åtgärder ska beskrivas parallellt på en tidsaxel
- beskriva miljön för dessa olika punkter som nämns ovan.

Räddningsinsatser vid bränder i tunnlar är insatser som skiljer sig från de mer vanliga insatserna som den kommunala räddningstjänsten normalt utför. Den problemställningen som räddningstjänsten ställs inför vid dessa bränder förekommer till viss del även vid andra olyckstyper. De problem som kan uppstå vid räddningsinsats i tunnlar är:

- Hantera en omfattande utrymnings/ livräddningssituation med mycket människor inblandade.
- Möjligheter för att styra brandgaserna i syfte att underlätta en utrymning, livräddning och en brandsläckningsinsats.
- Tunneln fylls av brandgaser, vilket gör att ett angrepp måste utföras med skyddsutrustning.
- Svårt att få överblick över olycksscenariot, då olycksplatsen är mycket svåröverskådlig.
- Stora och omfattande objekt med långa och komplicerade vägar att förflytta sig ifrån säker miljö utomhus till platsen för branden.
- Det är mycket svårt att bedöma riskerna som räddningspersonalen utsätter sig för om de skall göra en insats in i tunneln.
- Transportera av brandvatten in till platsen där brandsläckningen skall genomföras.
- Genomföra en brandsläckningsinsats som kan ge ett önskat släckresultat.
- Kommunikation mellan personalen som befinner sig i säker miljö och den del av insatspersonalen som genomför en invändig rökdykarinsats.

Resultaten från denna studie kommer att redovisas i en SRV rapport in början av nästa år. De som ingår i projekt är Anders Bergqvist på Brandförsvaret i Stockholm (BS), Håkan Frantzich på Brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola (LTH), Haukur Ingason på SP Sveriges Provnings och Forskningsinstitut och Kjell Hasselrot på BBm Fire Consultant. Sören Lundström vid SRV är ansvarig för projektet.

4 Allmän diskussion

4.1 Det krävs ett nytt säkerhetstänkande

De normer som finns i dag i Europa och övriga världen är väldigt fokuserade mot tekniska lösningar av problemet med brandsäkerhet i tunnlar. Det finns andra aspekter som bör vägas in i dagens normer. Det gäller krav på information till trafikanter, insatsplanering av tunnlar och krav på utbildning och träning av tunneloperatörer och räddningstjänst. För att få ett mer komplett säkerhetskoncept för vägtunnlar så bör man sträva efter förbättringar på följande områden:

- Organisation (insatsplaner, insatsvägar, planering av brandgaskontroll)
- Krav på träning av tunneloperatörer, tunnelpersonal, räddningstjänst, ambulanspersonal och polis
- Materialval i fordon (brandkrav på material för förvaring av gods (skåp, kapell), bussar osv)
- Utbildning av trafikanter (informera trafikanter om vilka tekniska system som finns), kan ingå som del i förarutbildningen.

4.2 Varför dessa tunnelkatastrofer?

Den diskussion som har uppstått här i Sverige efter brandkatastrofen i Österrike om nödutgångar är mycket viktig. Människor måste ha en rimlig chans och ta sig ut ur tunneln och räddningstjänsten måste kunna angripa branden via nödutgångar. Problemet är bara att människor inte alltid är medvetna om de utrymningsvägar som finns. De var inte med när tunneln projekterades. Av ren instinkt så springer de mot tunnelmynningsarna utan att ens leta efter en utrymningsväg. Man kan inte leta efter något man inte vet att det finns. Därför måste problemet angripas från fler håll än bara genom tekniska system i tunneln.

En bidragande orsak till de tunnelkatastrofer som inträffat på senare tid i Europa är den snabba brandspridningen i fordonen som trafikerar tunnelarna. Människor har överraskats av den snabba brandutvecklingen och inte hunnit komma undan de farliga brandgaserna. Det är fel att tro att ökad antal nödutgångar och bättre ventilationssystem löser problemet. Det grundläggande problemet är den höga brandbelastningen i tunnelarna och människors förmåga att reagera fel (eller inte reagera alls) i nödsituationer. Dessutom har det visat sig att ventilationen i tunneln har haft en avgörande betydelse för den fortsatta brandspridningen mellan fordonen. Därför krävs det ett nytt sätt att tänka. I stället för att fokusera allt på vad man kan göra med tunneln så borde man också börja tänka på vad man kan göra med de fordon som trafikerar tunnelarna. Det går att göra brandsäkrare fordon och därmed minska riskerna för den snabba brandutvecklingen.

Med vänlig hälsning

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut
Brandteknik, skydd

Magnus Arvidson
Stf sektionschef

Haukur Ingason
Teknisk handläggare

5 Referenser

- 1 Ingason, H., Förstudie avseende allmän teknisk beskrivning för brandsäkerhet i tunnlar, Teknisk rapport daterad 1997-06-27, R30820, SP Brandteknik
- 2 Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels, Swedish National Testing and Research Institute, SP-Report 1994:54
- 3 Fires in Transport Tunnels: Report on full-scale tests, EUREKA-Project EU499; Firetun, Studiengesellschaft Stahlanwendung eV. D-40213 Dusseldorf, 1995.
- 4 Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration, November 1995
- 5 Mangs, J.; Keski-Rahkonen, O. Characterization of the Fire Behaviour of a Burning Passenger Car. Part 1. Car Fire Experiments. VTT-Technical Research Center of Finland, Espoo Fire Safety Journal, Vol. 22, No. 3, 17-35, 1994.
- 6 Shipp, M. and Spearpoint, M., Measurements of the Severity of Fires Involving Private Motor Vehicles, Fire and Materials, Vol. 19, p.143-151, 1995.
- 7 Joyeux, D., Natural Fires in Closed Car Parks, Car fire tests, INC-96/294d-DJ/NB, 1997.
- 8 Ingason, H., Bengtsson, S., och Hjort, F., Brand och Brandskydd i undermarksanläggningar, SP Rapport 1997:41.
- 9 Stephens, J.N., Using sprinklers in bus garages, Fire Prevention 253 October.
- 10 Sprinkler tests in a bus garage; Video, ESO, Organisation of regional transport companies, P O Box 9300, 3506 GH Utrecht, Holland
- 11 Channel Tunnel Safety Authority, Inquiry into the Fire on Heavy Goods Vehicle Shuttle 7539 on 18 November 1996.

- 12 Duffé, P., and Marec, M., Report on the Technical Enquiry into the Fire on 24 March 1999 in the Mont Blanc Tunnel, 30 June 1999.
- 13 Anderberg, Y och Oredsson, J, "Varför utformas int tunnlar för att motstå" brand? Artikel BI-lagan 2/1997.
- 14 Bengtsson, O, Brandpåverkade betongbalkar med slanka tvärsnitt, SP Rapport 1997:35.
- 15 Thelandersson, S, "Brandsäkerhet för betongkonstruktioner i tunnlar för ringleden i Stockholm", sept 95.
- 16 Olika uppdragsprovningar vid SP.
- 17 Kumar S, Cox G, "Mathematical modelling of fires in road tunnels", BHRA 5th International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Lille , 20-22 May 1985, p. 61-76.
- 18 CFX-F3D, Version 4.1, User guide, AEA Technology, Harwell, United Kingdom, 1995.
- 19 Rubini, 5th International Conference on Fire Safety Science, Melbourne, March 1997.
- 20 FLUENT, Version 4.2, Reference Manual, Fluent Inc., 1993.
- 21 Magnussen, B F, " Field Modeling of Fires, Third Nordic Workshop on Use and Development of Numerical Fire Model", Helsinki, March 19-20, 1991.
- 22 Tuovinen, H, and Holmstedt, G, "Sensitivity Calculations of Tunnel Fires Using CFD", Fire Technology, Second Quarter 1996, Vol 32, nr 2.
- 23 Steinert, C., Smoke and Heat Production in Tunnel fires, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels held in October 10 - 11, 1994 at the Swedish National Testing and Research Institute (SP), Borås, Sweden, p 123-137.
- 24 Ingason, H., Design fires in Tunnels, Conference Proceedings ASIAFLAM 95, Hong Kong May 1995, Interscience Communications Limited, p77-85.
- 25 Charters, D A, "A Computer Model to Assess Fire Hazards in Tunnels" (FASIT), Fire Technology, First Quarter 1994, Vol 30, Nr 1.
- 26 Grayson, Van Hees, Vercellotti, Breulet, Green, FIPEC, Fire Performance of Electric Cables, New test methods and measurement techniques, InterScience Communication, Final Report of the European Commission SMT Programme Sponsored Research Protect, ISBN 0 9532312 5 9
- 27 Fardell, P., Colwell, R., Hoare D, Chitty, R., Full-scale BRE/FRS fire test of Local Area Network (LAN) data communication cables - A Partners in Technology study, Interflam 99, p 393-407.

- 28 Skarra, N., Bussbrannen i Ekebergstunnelen 21.8.1996 [The Bus Fire in the Ekeberg Tunnel on 21st August 1996], ISBN 82-994196-0-3, Statens Vegvesen, Oslo, Norway.
- 29 Simonson, M., Blomqvist, P., Hees , P. V., Study of Fire Behaviour and toxic gas production of cables in real-scale fire tests, SP -Fire Technology, Interflam 99, p 1393-1402.
- 30 Vegdirektoratet, Veglaboratoriet:fullska branntesting av vann- og frostsikringsmateriale for vegtunneler, Int.rap. nr 1370, mars 1988.
- 31 Statens Vegvesen, Branntesting av brannbeskyttede PE-plater, Intern rapport nr. 1632, nov 1993.
- 32 Statens Vegvesen, Metoder for vann- og frostsikring av vegtunneler. Delprosjekt H: Brannsikring av PE-skum. I: Alternative løsninger for brannsikring av PE-skum, Intern Rapport nr. 1657, Februar 1994.
- 33 Statens Vegvesen, Nye Retningslinjer for bruk av PE-skum i vegtunneler, NA-rundskriv nr 93/39- o.ing Eirik Øvstedal-22639623.
- 34 Ingason, H., och Werling, P., Experimental study of Smoke Evacuation in a Model Tunnel, FOA-R—99-01267-311—SE, Oct 1999.
- 35 PIARC, Fire and Smoke Control in Road Tunnels, 05.05. B. 1999.
- 36 Bergqvist, A., Räddningsinsatser i tunnlar och undermarksanläggningar, Förstudie avseende läget i Norden, FoU Rapport, Räddningsverket 1999.