LUND UNIVERSITY

Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik

Frantzich, Håkan; Nilsson, Daniel; Rød, Kjetil

2016

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Frantzich, H., Nilsson, D., & Rød, K. (2016). *Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik*. (Research report; Nr. 3199). Brandteknik, LTH.

Total number of authors:
3

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

Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik

Håkan Frantzich

Daniel Nilsson

Kjetil Rød

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet

Report 3199, Lund 2016

Rapporten har finansierats av Statens vegvesen, Region midt (Norge)

LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik

Håkan Frantzich

Daniel Nilsson

Kjetil Rød

Lund 2016

Evacuation and technical installations in single tube road tunnels

Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik

Håkan Frantzich

Daniel Nilsson

Kjetil Rød

Report 3199

ISSN: 1402-3504

ISRN: LUTVDG/TVBB-3199-SE

Number of pages: 73

Keywords: evacuation, road tunnel, fire safety, human behaviour, behaviour sequence

Sökord: utrymning, vägtunnel, brandsäkerhet, människors beteende, beteendesekvens

Abstract: The report provides an overview of human behaviour in tunnel fires in single tube road tunnels. The behaviour is linked to the concept of a behaviour sequences presented by Canter et al. (1980). The main focus has been to present relevant research and findings provided in accident investigation reports mainly for long and steep sub-sea tunnels designed according to the self-rescue principle. Research on technical installations in the tunnel related to assisting the decision making for road users in the case of fire is presented and put into the behaviour sequence context. The need for information and knowledge prior to an accident is highlighted as are the principles for communication during the accident. The report also discusses the benefit from current installations and suggests alternative installations that may be installed in new tunnels and when upgrading existing tunnels. An early detection of a fire is most important in order to provide information to road users in a tunnel. Installations providing guidance to road users shall be designed to meet the need of information for the users depending on their location. The need for further research and development is presented. Suggestions for improving the self-rescue capability of road users in the Ellingsøytunnelen and Valderøy-tunnelen in Ålesund, Norway, are presented.

© **Copyright:** Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 2016.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se

Telefon: 046 - 222 73 60

Department of Fire Safety Engineering
Lund University
P.O. Box 118

SE-221 00 Lund, Sweden

brand@brand.lth.se
http://www.brand.lth.se/english

Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Arbetet är utfört på uppdrag av Statens Vegvesen Region midt i Norge och är tänkt att fungera som ett underlag inför ett arbete med att uppgradera säkerheten i norska enkelrörsvägtunnlar samt att beskriva behovet av fortsatt forskning och utveckling avseende utrymning vid brand. Projektet är utfört under sommaren och hösten 2016 med uppdragstiteln 'Sammenheng mellom teknologi og menneskelig atferd for å legge tunnelene bedre til rette for selvredning' och med projektnummer 16/29906.

Projektet har genomförts i samråd och tillsammans med beställarens projektledare Senior rådgiver Kjetil Rød. Rapporten är skriven av Daniel Nilsson (projektledare) och Håkan Frantzich, båda vid Brandteknik, LTH samt av Kjetil Rød för de delar av rapporten som behandlar riskkommunikation och kriskommunikation. Rapporten är således skriven på svenska med inslag av norsk text.

Sammanfattning

Utrymning från en vägtunnel kan vara en mycket besvärlig och traumatisk upplevelse för dem som är berörda. Detta vittnar flera av bilisterna som var med om bränderna i Oslofjordtunneln 2011 och i Gudvangatunneln 2013. Deras främsta problem orsakades av att de tvingades att utrymma genom tät rök, vilket i sin tur bland annat beror på att de påbörjade sin utrymning alltför sent. En tidig start på utrymningen vid brand är en förutsättning för att personer inte ska komma till skada, vilket betyder att tunneln och omkringliggande infrastruktur måste vara utformad för att möta detta krav.

Föreliggande rapport ger en introduktion till hur människor beter sig i samband med en tunnelbrand som kräver utrymning. De tunnlar som är aktuella i detta sammanhang utgörs av långa (mer än 3 km) och branta (lutar mer än 5 %) tunnlar med dubbelriktad trafik. Anledningen till denna avgränsning är att dessa tunnlar är vanligt förekommande i det norska vägnätet och de utgör också de som uppfattas som mest riskfyllda. Långa tunnlar med dubbelriktad trafik samt branta tunnlar utgör ett speciellt problem vid utrymning. Dels innebär det att några personer ofrånkomligen kommer att exponeras för röken och att utrymningen kommer att vara både långvarig i tid och utgöra en tung arbetsbelastning för personerna som tvingas utrymma uppför lutningen.

Människors beteende beskrivs utifrån etablerade teorier för agerande vid brand och i huvudsak baseras förklaringen på beteendesekvensteorin av Canter, Breaux och Sime (1980). Även andra teorier är inkluderade för att förklara varför vissa beteenden kan observeras och hur tekniska installationer kan utformas för att tillgodose bilisters behov av information. I grunden handlar mycket av ett framtida förbättringsarbete om att skapa en tidig detektion av en brand och att se till att bilister informeras tidigt om vad som har hänt och om vad de förväntas göra. Med den informationen finns det förutsättningar att få en lyckad utrymning (självräddning) att fungera. Med information avses även sådan som förmedlas före olyckan inträffar. Utgångspunkten är således att bilisterna själva måste hantera situationen på platsen, med hjälp av personal från en vägtrafikcentral (VTS). Någon annan hjälp kan inte påräknas i det tidiga skedet.

Rapporten beskriver nyttan av en rad tekniska installationer och hur de bör vara utformade för att tillgodose kraven som ställs under en utrymning. Installationernas nytta är beskriven utifrån de skeden som förekommer i beteendesekvensen dvs upptäckt, tolkning och agerande.

Upptäcktsfasen fokuserar på system som syftar till att tidigt upptäcka branden och som kan signalera till bilisterna att något onormalt, dvs en brand, har uppstått. Informationen kommer främst att vara till nytta för dem som befinner sig långt från branden och därför inte ser denna. Exempel på nyttiga installationer är olika former av akustiska och visuella larm och digitala trafikinformationstavlor. Även information via mobiltelefoner diskuteras. I upptäcktsfasen är målet att ge en signal att situationen har övergått från normalt läge till ett läge med högre risk.

I nästa skede, tolkningsfasen som startar så snart bilisterna förstått att något onormalt inträffat, är syftet att få bilisterna att förstå att det inträffade är en brand och att de måste vidta åtgärder för att sätta sig i säkerhet. Återigen handlar det om att via olika informativa åtgärder få bilisterna att besluta sig att agera på ett sätt som kommer att minska konsekvensen på grund av branden. Installationer är exempelvis trafikinformationstavlor som informerar om vad bilisterna ska göra. En typisk åtgärd som är aktuell för enkelrörstunnlarna är att förmå bilisterna att köra ut ur tunneln innan de hindras av tät rök. Tolkningsfasen pågår fram tills att bilisterna fattar beslutat att vidta de konsekvensreducerande åtgärderna.

Agerandefasen inleds med beslutet att agera. Nu handlar det om att möjliggöra för bilisterna att vidta de åtgärder som de anser vara mest lämpliga. Personer nära branden beslutar sig kanske för att försöka genomföra en släckinsats och då bör det finnas möjligheter att göra en sådan med brandsläckare i tunneln. Andra åtgärder handlar om att möjliggöra en förflyttning till en säker plats. För dem som redan från början befinner sig i en rökfylld miljö blir åtgärderna kopplade till möjligheten att utrymma i tät rök. Typiska tekniska åtgärder är orienteringsassisterande

åtgärder och räddningskammare med jämna mellanrum. Vägledande markeringar, lokala utrymningslarm vid räddningskammare eller utrymningsvägar och ledbelysning kan vara åtgärder att överväga.

För samtliga skeden beskrivs rådande forskningsläge och författarnas bedömda nytta för respektive åtgärd. Även om rapporten till största delen fokuserar på tekniska installationer i relation till utrymmande personers beteende så kan andra åtgärder också vidtas då de visats vara viktiga t ex utbildning och information före en olycka. Forskning inom dessa områden berörs också i rapporten.

Slutligen genomförs också en analys av utrymningssäkerheten i två sammanhängande vägtunnlar i Ålesund. Förslag som förbättrar möjligheterna till självräddning presenteras. Det bör påpekas att utredningen endast utförts från ett självräddningsperspektiv och någon beredskapsplanering (eller liknande utredningar) har inte genomförts inom ramen för projektet.

De referenser som författarna av denna rapport anser vara de mest relevanta studierna för de aktuella norska tunnlarna markeras i texten med understrykning.

Summary

Evacuation from a road tunnel can be a very difficult and traumatic experience for those concerned. This is evident after reading the testimonies in the accident investigation reports after the fires in the Oslofjord Tunnel in 2011 and in the Gudvanga Tunnel in 2013. Their main problems were caused by the fact that they had to evacuate in dense smoke, which in turn is because they began their evacuation too late. An early start of the evacuation in case of fire is necessary in order not to be injured, which means that the tunnel and the surrounding infrastructure must be designed to meet this requirement.

This report provides an introduction to how people behave during a tunnel fire evacuation. The tunnels that are relevant in this context consist of long (more than 3 km) and steep (slopes more than 5%) tunnels with bidirectional traffic. The reason for this delimitation is that these tunnels are common in the Norwegian road network and they are also those perceived as being associated with highest risk. Long tunnels with bidirectional traffic and steep tunnels pose a special problem for evacuation. Firstly, it means that some people will inevitably be exposed to smoke and that the evacuation will be both prolonged in time and constitute a heavy workload for the people who have to evacuate the uphill slope.

Human behaviour is described based on established theories of observed activities in the case of a fire and essentially based on the behaviour sequence theory by Canter, Breaux and Sime (1980). Other theories are included to explain why certain behaviours can be observed and how technical installations can be designed to meet motorists' needs for information. Basically, much of future improvements are related to an early detection of a fire and to ensure that motorists are informed about what has happened and what they are expected to do. With this information, self-rescue activities may be successful. Included in the term information is also the type of information that is gained before the accident by for example education or information campaigns. The key conclusion is therefore that motorists must deal with the situation themselves, with the assistance of staff from a road traffic center (VTS). Assistance by other early responders shall not be assumed.

The report describes the benefit of a number of technical installations and how they should be designed to meet the requirements for an evacuation. The benefits of the installations are described for the stages in the behaviour sequence, i.e., detection, recognition and response.

The detection phase focuses on systems aimed to provide an early detection of the fire, which will indicate to the motorist that something unusual, in this case a fire, has occurred. The information will primarily be of use to those who are far from the fire and therefore cannot see the cause of the problem. Typical installations are different types of acoustic and visual alarms and digital traffic information signs. Also information via mobile phones is discussed. In the detection phase, the objective is to provide an indication, a cue, that the situation has shifted from the normal state to a state with higher risk.

In the next stage, the recognition phase which starts as soon the motorists have understood that something unusual has occurred, the aim is to get motorists to understand that a fire has occurred and that they must do something due to the situation, i.e., to eventually get to a safe location. Again, informative actions are the key component to get the motorists to decide to act in a way that will reduce the consequences due to the fire. Typically, installations like traffic information signs are used to inform motorists about what to do. A typical action that is beneficial in the case for single-tube tunnels is to encourage the people to drive out of the tunnel before being engulfed in thick smoke. The recognition phase continues until the motorists have decided to perform actions that will reduce the consequences due to the fire.

The response phase starts with the decision to act with the purpose to reduce the consequences. People close to the fire might decide to try to extinguish the fire, which indicate that extinguishers shall be located in the tunnel. Other measures are related to facilitate movement to a safe location. For those who already are within the smoke-filled environment relevant

measures are linked to the possibility to escape in a high density smoke environment. Example of measures are way guiding signs, local evacuation alarm systems and lights that helps with the orientation. Another installation may be rescue chambers located a certain distance in the tunnel.

The current state of research is presented for the three phases together with the authors' estimated benefits for each installation. Although the report mainly focuses on the technical installations in relation to the behaviour of the people evacuating, also other actions are shown to be important, for example, education and information before an accident. Research in these areas is also considered in the report.

Finally, suggestions aimed to improve evacuation safety in two consecutive road tunnels in Ålesund are presented. For this case, it is assumed that the self-rescue principle is used. It should be mentioned that the analysis has been performed from a self-rescue perspective and disaster management planning (or similar investigations) have not been performed as part of the project.

The references that the authors of this report believe are the most relevant studies for the current Norwegian tunnels are underlined in the text.

Innehållsförteckning

1 Inledning 13

1.1 Bakgrund 13

1.2 Mål och syfte 15

1.3 Metod 15

1.4 Avgränsningar 16

2 Teori 19

2.1 Inledning 19

2.2 Risiko- og krisekommunikasjon 19

2.3 ”Sense-making” og ”coorientation” teoriene som bærebjelker 19

2.4 Människors beteenden vid brand i tunnel 20

2.5 Tidslinjemodellen 22

2.6 Beteendesekvens - förklaringsmodell 24

2.6.1 Upptäckt, detektion och alarm 24

2.6.2 Tolkning 24

2.6.3 Agerande 25

2.7 Beteendesekvens - ingenjörsmodell 25

2.7.1 Varseblivning 26

2.7.2 Förberedelse 26

2.7.3 Förflyttning 26

2.8 Förklaringsmodell respektive ingenjörsmodell 26

2.9 Panik 27

3 Interaktion mellan människa och teknik 29

3.1 Före olyckan – Utbildning och information 29

3.1.1 Sosiale medier 29

3.1.2 Dataspill forbedrer læringsevnen 29

3.2 Upptäckt 30

3.3 Tolkning 31

3.4 Utrymningsagerande 36

3.5 Övriga undersökningar och erfarenheter 42

4 Relevanta studier för aktuella tunnlar 45

4.1 Övriga relevanta studier 45

5 Framtida forskning 47

5.1 Förflyttning i tunnlar med kraftig lutning 47

5.2 Utformning av räddningskammare 47

5.3 Information med enkla dynamiska vägskyltar 47

5.4 Kommunikation via VII 47

5.5 Vägledning genom tät rök 47

5.6 Utveckling av strategier för brand i tunnel 48

5.7 Information via smarta telefoner 48

5.8 Förhandsinformation och utbildning 48

5.9 Tunnelns utformning 48

5.10 Brandsläckning 48

5.11 Möjligheter att vända i tunneln 49

5.12 Egen bil som tillfällig säker plats 49

6 Case-studie Ålesundstunnlarna 51

6.1 Brand- och utrymningsscenario 51

6.2 Typer av trafikanter och analys 52

6.2.1 Trafikant i brandens omedelbara närhet – typ 1 52

6.2.2 Trafikant som kör eller står stilla i rök (nedströms) – typ 2 53

6.2.3 Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (nedströms) – typ 3 54

6.2.4 Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (nedströms) – typ 4 55

6.2.5 Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (uppströms) – typ 5 55

6.2.6 Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (uppströms) - typ 6 56

6.3 Sammanfattning av tekniska system för utrymning 57

6.4 Övriga synpunkter 58

7 Referenser och anknytande litteratur 59

8 Bilaga A Utrymningsanalys från vägtunnel. 69
8.1 Förutsättningar 69
8.2 Resultat 70
8.3 Slutsats 72

1 Inledning

1.1 Bakgrund

För att knyta ihop vägnätet i Norge på ett effektivt sätt och därmed för undvika långa omvägar, är det nödvändigt att många vägar passerar genom tunnlar. Ett flertal av dessa tunnlar löper under fjordar medan andra går genom höga bergsmassiv. Förutsättningarna för utrymning av dessa tunnlar varierar därför i stor utsträckning beroende på de geografiska förutsättningarna. Trafikarbetet är ganska litet i många av tunnlarna vilket inte kan motivera att tunnlar utförs med två tunnelrör med vardera enkelriktad trafik. Många tunnlar är därför utformade som ett enda tunnelrör med dubbelriktad trafik.

Det faktum att ett flertal av tunnlarna löper under fjordar och andra vattendrag innebär att de måste förläggas på ett avsevärt djup för att kunna passera under vattnet. Dessa tunnlar kännetecknas av att de vanligen både är långa och förhållandevis branta. En typisk tunnel kan vara flera kilometer lång, med först brant lutning nedåt till botten av tunneln för att sedan på motsvarande sätt därefter ha en lång kraftig stigning till marknivån på andra sidan.

Utformningen av tunneln innebär att en utrymning kommer att vara problematisk för de som är inblandade. När tunneln har trafik i båda riktningarna i ett och samma tunnelrör innebär det att det vid en brand finns bilister som är på väg mot branden från båda riktningarna. Vid en brand kommer röken att spridas i tunneln i någon riktning eller i båda riktningarna. Det betyder att några bilister ofrånkomligen kommer att möta röken såvida de inte hinner vända om i tid eller hindras från att börja inkörningen i tunneln. Rökens riktning styrs antingen av den rådande vindriktningen eller med hjälp av mekaniska fläktar. De bilister som är på väg ut från tunneln och har branden bakom sig kan oftast köra ut ur tunneln utan större problem. Dessa bilister utgör inte något större problem vid en brand annat än att de kan bli inblandade i följdolyckor om bilister på väg in i tunneln, som blivit informerade om den framförvarande branden, vänder sina fordon för att köra ut ur tunneln och orsakar nya olyckor.

Utrymningen från dessa långa och branta tunnlar medför alltså generellt stora svårigheter att utrymma, speciellt för de bilister som befinner sig i den del av tunneln dit vinden för röken. Utrymningsförloppen blir både långa tidsmässigt på grund av avstånden till säkra platser men utrymningen sker också uppför en lutande väg vilket medför en ytterligare ansträngning utöver den att tvingas förflytta sig i rök.

En av orsakerna till de uppkomna svårigheterna i sammanhanget är att de tunnlar som löper under vatten naturligtvis inte kan vara försedda med utrymningsvägar, t ex direkt till det fria eller till ett angränsande tunnelrör, om tunneln är utfört med endast ett tunnelrör. Mynningen blir i dessa fall den enda möjligheten att nå en säker plats. Problemet finns även för många av tunnlarna som löper genom berg där utrymningsvägar endast med stora svårigheter kan åstadkommas. Utrymningsvägar måste i sådana fall skapas som passager genom berget till det fria vilket sannolikt bara är möjligt i ett fåtal fall. Tillgång till utrymningsvägar inne i tunneln är därför bara praktiskt möjlig om dubbla tunnelrör förekommer, dvs när det parallella tunnelröret kan fungera som säker plats vid utrymning. Dubbla tunnelrör förekommer vanligen endast på platser där trafikflödet är högt.

I de allra flesta fallen utgör strategin för utrymningssäkerheten att personerna som vistas i tunnlarna på egen hand ska kunna sätta sig i säkerhet, genom så kallad självräddning eller självutrymning, vilket ställer krav på att utformningen av bland annat tekniska system är avpassade efter bilisternas behov för att kunna hantera en sådan situation. Eftersom svårigheterna att genomföra en utrymning under förutsättningar som föreligger i de långa och branta tunnlarna måste särskild vikt läggas vid att försöka undvika att utrymning sker genom rök och att förutsättningarna, om detta ändå sker, bör förflyttning i en rökfylld miljö underlättas.

Utformningen med ett tunnelrör och låga trafikflöden, som är fallet för många tunnlar i Norge, gör det svårt att motivera att alltför stora resurser läggs på åtgärder för att hantera

brandscenarier. Det kan vara rimligt att det finns en balans mellan konsekvensreducerande åtgärder och det trafikflöde som finns i tunneln, vilket gör att mer kostnadseffektiva lösningar prioriteras. Utrymningslösningarna i många av de norska tunnlarna baseras därför på dessa tankar om kostnadseffektivitet och den tekniska nivån på utrustningen är därför inte densamma som i dubbelrörstunnlar med högt trafikflöde.

Typiska installationer för hantering av en brandsituation i enkelrörstunnlar är:

- nödtelefon och handbrandsläckare
- radioinbrytning på NRK1
- vändplatser
- brandventilation längs med tunnelröret
- mobiltelefontäckning
- stoppsignaler utanför mynningarna (i vissa fall kompletterade med bommar)
- ledbelysning

Nivån på utrustningen baseras på tunneln längd och trafikflödet, regleras i föreskrifter från Statens vegvesen vilka redovisas i Håndbok N500 Vegtunneler (Vegdirektoratet, 2014).

Även om trafikflödet i många av enkelrörstunnlarna är litet så förekommer det att olyckor med bränder sker. I de flesta fall blir inte olyckorna så omfattande även om brand uppstår. Men det är ändå noterbart att i Oslofjordtunneln sker i storleksordningen en brand om året (SHT, 2013). Ett par större olyckor som resulterat i mer omfattande haveriutredningar har på sista tiden skett i bland annat Oslofjordtunneln 2011 (SHT, 2013) och i Gudvangatunneln 2013 (SHT, 2015). I båda fallen inträffade branden i en lastbil med omfattande rökspridning och stora svårigheter att utrymma tunnlarna. Lyckligtvis orsakade bränderna inga dödsfall, men ett stort antal personer drabbades av kraftiga rökskador. De som utrymde genom röken vittnar om att utrymningen sker under stora svårigheter och i flera fall sker den till fots i tunneln och i flera kilometer.

I Oslofjordtunneln tvingades även åtta personer att ta tillflykt i ett utrymme mellan tunnelväggen och bergväggen tills de fick hjälp av räddningstjänsten att utrymma (SHT, 2013). Detta utrymme var inte avsett för utrymning, dvs det var ingen säker plats, men personerna tog sin tillflykt dit eftersom förhållanden var bättre än i den rökfyllda tunneln. De fick vägledning till utrymmet av personalen på VTS.

År 2015 brann det åter i Gudvangatunneln men då blev konsekvensen lindrigare. I det fallet brann det i en buss som stannade ett par hundra meter in i tunneln. Den største forskjellen mellom håndteringen av de to brannene var at i 2015 reverserte brannmanskapet den automatiske ventilasjonen slik at den gikk ut den åpningen som var nærmest brannen, og best med tanke på selvredning. SHT anbefaler etter brannen i 2015 at det gjennomføres sikkerhetsinspeksjoner av kjøretøy før de kjører inn i tunnel; den automatiske ventilasjonen bør reverseres ved behov; VTS bør informere trafikantene øyeblikkelig ved brann; og VTS bør knyttes til Nødnett og dermed kommunisere direkte med nødetatene (FPST 2016).

Det som är typiskt för flera inträffade bränder är att många personer tvingades gå långt i röken och att de sent blev varse om att det uppstått en brand vilket i sig visade sig innebära svårigheter att utrymma. I båda tunnelbränderna i Gudvangatunneln 2013 och i Oslofjordtunneln 2011 orsakade de standardiserade insatsrutinerna stora svårigheter för personer som befann sig i tunneln då ventilationssystemet startades och förde snabbt röken i ena riktningen så att ett flertal personer exponerades för röken.

Ovanstående exempel illustrerar tydligt att brand utgör ett förhållandevis stort problem i långa enkelrörstunnlar även om dessa utrustats med flera tekniska system. Lyckligtvis har inte förekommit några dödsfall i tunnelbränder i Norge (oräknad de som omkommer vid själva trafikolyckan), men utrymningen sker under svåra förhållanden. Det konstateras också i haveriutredningen efter branden i Gudvangatunneln 2013 att "*Det er SHTs oppfatning at forholdene i Gudvangatunnelen var dårlig tilrettelagt for selvredning, og SHT mener at dette er den vesentligste læringen fra denne hendelsen.*" (SHT, 2015). Det finns därför anledning att

undersöka om alternativa tekniker och procedurer ska introduceras för att förbättra säkerheten inom de resursramar som finns. Detta framkommer även i den utredning som Riksrevisjonen (2016) levererat till Stortinget där det bland annat talas om att Vegdirektoratet ska arbeta mot en systematisk säkerhetsförvaltning av vägtunnlar. Man påpekar även att det är nödvändigt att öka kunskapen bland trafikanterna om principerna för självräddning och vilka säkerhetssystem som finns i vägtunnlar.

De huvudsakliga problem som identifieras vid de inträffade bränderna är att personer som utsätts för tunnelbranden under ganska lång tid (1) saknar information om vad som har hänt och vad som förväntas av dem. När det sedan finns indikationer på att något inte är som det ska vara så uppstår (2) svårigheter att tolka situationen eftersom signalerna kan vara otydliga och inte nödvändigtvis associerade till brand. När personerna slutligen inser att de är i fara och måste utrymma så finns problem med att konkret (3) sätta sig i säkerhet, antingen genom direkt förflyttning till det fria eller genom förflyttning till en annan säker plats t ex en räddningskammare. Samtliga av dessa problemtyper innebär att det dröjer innan en utrymning kan påbörjas och personerna hinner sätta sig i säkerhet. Detta betyder att tid är en kritisk faktor som måste ingå i en analys av tunnelsäkerhet.

Om utrymning kan inledas innan röken når personerna som finns i tunneln så har de klart bättre förutsättningar att sätta sig i säkerhet. Det finns därför anledning att undersöka vilka åtgärder som kan vidtas för att underlätta för personer i en tunnel att besluta sig för att utrymma vid en brand. En rad sådana åtgärder kan förmodligen identifieras såsom

- tekniska system i tunneln,
- organisatoriska sätt att hantera olyckor på olika nivåer inom samhället och
- åtgärder knutna till de enskilda bilisterna.

I Brandt m fl (2013) redovisas kunskapsläget kring utrymning av vägtunnlar men utifrån ett något bredare angreppssätt dvs även för tunnlar där det finns utrymningsvägar och där det kan förekomma enkelriktad trafik. Föreliggande arbete kommer dock att fokusera på kopplingen mellan tekniska system i en tunnel och möjligheter att utrymma vid brand för att förbättra möjligheterna till självräddning i enkelrörstunnlar med dubbelriktad trafik, samt att blicka framåt och ge vägledning till framtida tekniska system som underlättar en utrymning.

1.2 Mål och syfte

Syftet med arbetet är att sammanställa kunskap som kan öka förståelsen av sambandet mellan tekniska system i vägtunnlar och människors beteende vid utrymning, samt deras möjlighet till utrymning vid brand.

Målet är att presentera teorier som kan användas för att förklara varför människor agerar som de gör vid en tunnelbrand och att sammanställa information om forskningsläget avseende tekniska system med avsikten att förbättra möjligheten till självräddning (utrymning) från tunnlar med dubbelriktad trafik.

Ansatsen är att studera problemet utifrån ett brett perspektiv men att särskild vikt läggs vid utrymning från tunnlar med dubbelriktad trafik, dvs enkelrörstunnlar, som är flera kilometer långa (> 3000 m) och har en kraftig lutning (över 5%). I rapporten ska studier som är särskilt relevanta för dessa tunnlar lyftas fram (referenser markeras med understrykning i texten). Vidare är målet att ge förslag till säkerhetshöjande åtgärder för de två enkelrörstunnlarna Ellingsøytunnelen och Valderøytunnelen, vilka utgör ett gemensamt tunnelsystem utanför Ålesund.

1.3 Metod

Arbetet utfördes i huvudsak som en litteratursammanställning. Litteratursökning i ett flertal vetenskapliga databaser genomfördes med valda nyckelord. Dessutom valdes litteratur baserat på författarnas tidigare erfarenhet och kunskap, även om detta material inte finns publicerat i

databaserna. Litteraturen analyserades och sammanställdes så att sammanhanget klargörs. Förslaget till säkerhetshöjande åtgärder för Ellingsøytunnelen och Valderøytunnelen genomfördes som en kvalitativ bedömning baserat på effekten av åtgärder som framkommit från litteratursökningen. Några enklare utrymningsberäkningar görs också för att illustrera principerna för den konsekvens som uppstår vid ett brandscenario och att visa hur avstånd mellan räddningskammare kan beräknas. Under arbetets gång gjordes kontinuerliga avstämningar med projektledaren från Statens vegvesen.

Litteratursökning har genomförts i de databaser som är tillgängliga genom universitetets publikationsavtal. I detta ingår de mer betydelsefulla databaserna såsom Science Direct och Scopus. Sökning har även skett genom Google Scolar samt i proceedings från konferenser såsom IAFSS (International Association for Fire Safety Science), ISTSS (International Symposium on Tunnel Safety and Security), International Symposium on Human Behaviour in Fire. Dessutom har artiklar från Fire Technology och Fire Science and Technology inkluderats.

Typiska nyckelord som använts vid sökningen är: tunneln, evacuation, escape, movement, fire, behaviour, behavior, fatigue, pedestrian, road, upward, inclined, gait och walking. Nyckelorden har kombinerats i olika skeden och alla har inte använts samtidigt. Sammantaget har cirka 100 rapporter och vetenskapliga artiklar inkluderats i analysen och de som på något sätt bidragit till rapporten anges i referenslistan i slutet.

1.4 Avgränsningar

Arbetet har inriktats mot att söka rätt på underlag som i huvudsak berör möjlighet till utrymning och människors beteende knutet till de problemställningar som är aktuella för tunnlar med ett enda tunnelrör med dubbelriktad trafik och som är långa (> 3000 m) och som kan ha en kraftig lutning (> 5 %) vilket är typiskt för tunnlar som går under fjordar och andra vatten. Mycket av materialet kan dock tillämpas även i andra situationer.

Arbetet begränsas till att i första hand hantera situationen som benämns självräddning eller självutrymning då personer sannolikt inte kan förväntas bli räddade av externa organisationer förrän i ett senare skede av utrymningsförloppet. Assisterad räddning hanteras inte i någon större omfattning då det företrädesvis då handlar om aspekter kopplade till räddningstjänstens insats och deras taktiska överväganden.

Utgångspunkten för i rapporten diskuterade system är att det har uppstått ett behov att utrymma tunneln och att systemen har en gynnsam påverkan på möjligheten att besluta sig för och genomföra en utrymning. Det betyder att vissa tekniska system eller organisatoriska åtgärder som mer indirekt har en positiv effekt på utrymningsförloppet medvetet inte beaktas i någon större omfattning. Några tydliga sådana exempel är

- vattensprinkler påverkar brandförloppet i en gynnsam riktning då det förlänger den tid som är tillgänglig för utrymning,
- detektionssystem med syfte att upptäcka en brand eller varma fordonsdelar som monteras utanför tunneln som kan användas för att minska sannolikheten att ett utrymningsförlopp blir nödvändigt, samt
- inspektioner av tunga fordon som utförs innan de kör in i tunneln som också kan minska sannolikheten för brandolyckor.

På samma sätt ska man se behovet av beredskapsplaner och insatser som utförs av räddningstjänsten när de kommer på platsen. Rapporten diskuterar inte dessa utan rapporten ska snarare ses som ett underlag för utveckling av sådana planer och insatsstrategier.

Vidare har ingen analys gjort kring förutsättningarna för utrymning så som de regleras i gällande föreskrifter. Utgångspunkten är istället att betrakta vilka behov som bilister som ställs inför en utrymningssituation har för att på bästa sätt klara av att utrymma säkert.

Analysen av utrymningssäkerheten i de två sammanhängande vägtunnlar i Ålesund utfördes utifrån ett självräddningsperspektiv, dvs hur förutsättningarna för självutrymning kan förbättras.

Här är det åter främst principerna för ett sådant förbättringsarbete som varit fokus och inte de konkreta fysiska utformningarna i detalj. Någon beredskapsplanering (eller liknande) har inte genomförts för de två tunnlarna inom ramen för projektet.

2 Teori

2.1 Inledning

Generellt sett kan man utgå från att all dimensionering av tunnlars utrymningssäkerhet baseras på hur man tror eller vet att människor beter sig i en brandsituation som kräver utrymning. Denna kunskap kan vara olika utvecklad, dvs från direkt felaktiga antaganden om hur personer agerar till kunskap väl förankrad i forskning. Av den anledningen är det väsentligt att minska på den osäkerhet som finns kring personers agerande vid tunnelbränder och försöka förbättra identifierade brister i existerande och nya tunnlar när ny kunskap blir tillgänglig.

Huvuddelen av kunskapen om människors beteenden vid brand är framtagen för bränder i allmänhet, dvs främst kopplad till bränder i byggnader. Dessutom har kunskap insamlats i samband med olycksfallsutredningar efter inträffade incidenter, vilket utgör ett viktigt material att ta lärdom från. Utgångspunkten är att kunskap och erfarenheter återförs till projektering av nya tunnlar och till förbättring av existerande tunnlar.

Den förväntade konsekvensen av en brand i en tunnel har att göra med den information eller kunskap om brandsäkerhet och tunnlar som personerna har med sig in i situationen. Det betyder att kommunikation före en incident (riskkommunikation) samt under och efter själva förloppet (kriskommunikation) har en direkt påverkan och även dessa aspekter belyses nedan från ett teoretiskt perspektiv.

2.2 Risiko- og krisekommunikasjon

Risiko og krise innebærer stor usikkerhet der blant annet tilgang på informasjon ofte er begrenset (Alexander, 2002; Berger, 1987; Seeger, 2006). Publikum bestreber seg å redusere usikkerheten ved aktivt å søke informasjon fra ulike kilder (Brashers et al., 2000, Procopio & Procopio, 2007; Spence et al., 2005). En kritisk funksjon for all kommunikasjon er å imøtekomme behovene til et mangfold av publikum (Keselman, Slaughter & Patel, 2005) slik at de kan redusere usikkerheten og skape en tilfredsstillende forståelse av situasjonen. På den måten kan de engasjere seg i effektive responshandlinger (Maitlis, 2005).

2.3 ″Sense-making″ og ″coorientation″ teoriene som bærebjelker

”Sense-making”, eller det å ”gi mening”, er en sosial måte å konstruere virkeligheten på. Når man prøver å forstå, eller gi mening til en situasjon med høgt nivå av stress, forvirring og usikkerhet, forsøker mennesker å konstruere et bilde av virkeligheten basert på to ting: den lagrede kunnskapen og erfaringene, og tilgjengelig ny informasjon (Botan & Penchalapadu, 2009, Gilpin & Murphy, 2008). ”Sense-making” er således en delvis sosial funksjon og en funksjon som utvikles gjennom diskusjon og kommunikasjon.

Ifølge Botan & Penchalapadu (2009) hjelper ”Coorientation” teorien å utforske ”kløften” mellom risiko –og krisekommunikasjon og menneskers fortolkning ved å sørge for to konsepter: Nøyaktighet og enighet. I denne sammenhengen måler nøyaktighet hvor lik myndighetenes oppfattelse av (meningene som publikum knytter til) et risiko eller krisebudskap er med publikums oppfattelse. Enighet skjer når mennesker gjennom diskusjon og kommunikasjon deler en felles definisjon av en situasjon, uavhengig av deres evaluering av den. Altså, at myndighetene og publikum har samme definisjon om hva som skjer og hvilke steg som man må ta i en risiko –eller krisesituasjon, det vil si at man har oppnådd konsensus.

Disse teoriene danner bærebjelkene for kommunikasjon: Prinsippet om å skape konsensus før tunnelulykker skjer, fører til at forståelsen (i.e nøyaktighet og enighet) av tunnelsikkerhet er blitt mest mulig lik mellom vegmyndighetene og publikum.

Hensikten med risikokommunikasjon er å forhindre at potensielle trusler kan skje, og unngå å påvirke adferd og policyer på uheldige måter (Sellnow et al. & Littlefield, 2009). Krisekommunikasjon, derimot, har som siktemål å begrense skaden til en pågående hendelse, og

forsterke menneskets evne til restitusjon. Hovedforskjellen mellom de to er således kommunikasjon før en hendelse (risikokommunikasjon) og under og etter en hendelse (krisekommunikasjon). Risikokommunikasjon vil i denne rapporten fokusere på hvordan vegmyndighetene ved proaktiv kommunikasjon kan forebygge at tunnelulykker kan skje, men også minske konsekvensen av en tunnelulykke. Krisekommunikasjon omhandler hva trafikantene kan gjøre når uhellet er ute.

Et av dilemmaene som ledere ofte opplever i forbindelse med risikokommunikasjon er at de enten blir anklaget for å skape unødig uro om en potensiell fare, eller for ikke å ha gjort nok hvis en ulykke skjer (Heath 1994, 1995, Heath et al. 1995, 1996, Heath & Palenchar 2000). Ifølge IPCC (2012) skal risikokommunikasjon både engasjere publikum å identifisere mulige løsninger og informere om en potensiell fare. På den måten blir publikum i stand til å gjøre bevisste valg om å beskytte seg mot risikoer.

Emosjoner har ofte en sterkere innvirkning på publikums risikoforståelse, enn logikk og fakta (Slovic et al. 2004). Det indikerer at myndighetene, som har ansvaret for sikkerheten til publikum, må styrke kunnskapen om menneskelig atferd før teknologiske løsninger blir implementert.

Prosessen ”Recognitional pattern matching (Canon-Bowers & Bell, 1997, Klein 1998) viser at mental simulering har positiv effekt på beslutningstaking i krisesituasjoner. Deltakerne simulerer, dvs. ser for seg et scenario som utspiller seg i hodene om hva de forventer seg vil skje hvis de utfører en spesifikk handling. Hjernen gir beskjed om hva man skal gjøre, også i en evakueringssituasjon, ut i fra et mønster som innebærer å tilpasse handlingen til alt som har skjedd i fortiden. Hvis man har erfart noe relevant før, eller har simulert det, hjelper det å utvide hjernens kapsitet til å håndtere det uforutsette (Ripley 2009, Klein, 2003). En studie av Peacock et al. (2009) viste at tekniske utforminger av rømningsveger i en bygning forklarte bare 13% i forskjellene på tiden deltakerne brukte på evakuering. Resten kan knyttes til tilgjengelige mønstre (erfaring og simulering) hos deltakerne.

2.4 Människors beteenden vid brand i tunnel

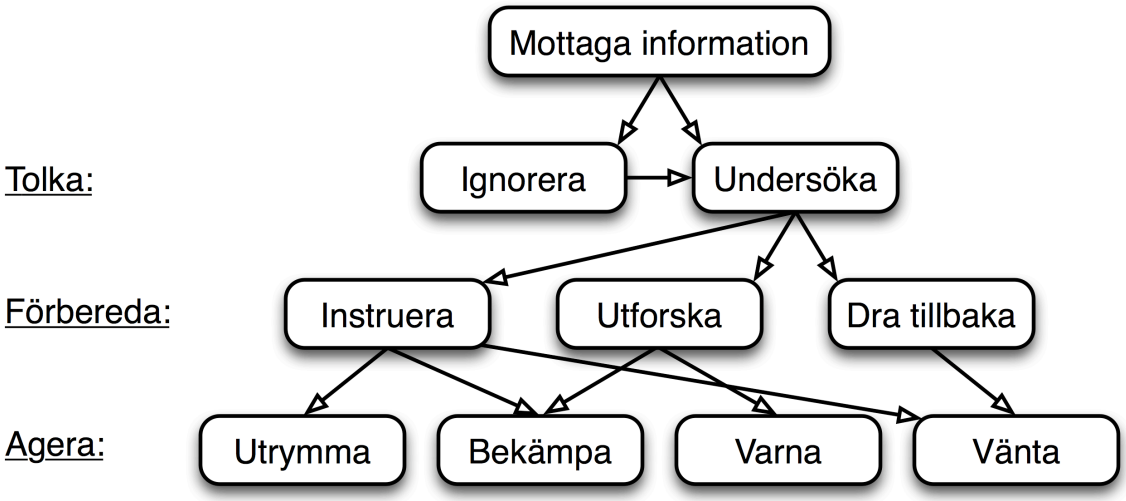
Människor som råkar ut för en brand måste hantera den nya situationen som uppstår. Utrymning är ett förlopp som är okänt för de flesta och som ska utföras under stor osäkerhet, vilket är särskilt påtagligt tidigt i förloppet. Det är dessutom något som ska genomföras under ökande grad av stress. Det innebär att en ny situation måste bedömas och nya beslut måste fattas i relation till de nya signalerna som uppstår, men också i ett redan befintligt sammanhang. Människors beteenden vid brand är inte isolerade företeelser, utan påverkas i hög grad av den normala aktiviteten som föregår brandincidenten. Ageranden är heller inte slumpartade, utan de följer ofta ett bestämt mönster vilket styrs av en rad olika förutsättningar för den aktuella situationen (Canter, Breaux och Sime, 1980).

För att förstå hur personer agerar är det lämpligt att beskriva detta på ett systematiskt sätt. Det har därför utvecklats ett antal teorier som antingen beskriver vad som sker under en utrymningssituation eller som förklarar varför olika händelser och beteenden uppstår. Den vanligaste förekommande teorin som används för att beskriva människors beteende i samband med utrymning är teorin om beteendesekvenser (Canter, Breaux och Sime, 1980). Denna har utvecklats efter undersökningar av inträffade bränder i hemmiljö och på sjukhus.

Teorin on beteendesekvenser baseras på att utrymmande personer går igenom tre steg i sitt beslutsfattande. Dessa steg, vilka kan upprepas flera gånger under ett utrymningsförlopp, är:

- tolka situationen
- förbereda
- agera

Under utrymningsfasen fattar personen en mängd beslut som alla passerar genom dessa tre stadier, figur 1. Vilka beslut och aktiviteter som tas av personen bestäms bland annat av var i förloppet personen befinner sig och de roller som personen har. Det gör att skilda beteendemönster kommer att visa sig vid olika tidpunkter och mellan olika verksamheter och lokaler.



Figur 1. Beteendesekvens efter Canter, Breaux och Sime (1980).

Undersökningar visar att det tidiga skedet i utrymningen ofta karakteriseras av osäkerhet, missförstånd och ineffektivitet. Vanliga åtgärder är att personerna försöker informera sig om vad som har hänt. Därefter kommer åtgärder som att vidare undersöka vad som hänt, försöka bekämpa branden, hjälpa eller varna andra, rädda materiella ting, ringa efter räddningstjänsten och utrymma. I vissa mer sällsynta fall beter sig personer på ett sätt som bedömdes öka faran för deras liv. Sammantaget innebär det att personer som utrymmer är förhållandevis förnuftiga och deras beteende är rationellt sett i sitt sammanhang.

Det som framkom vid en analys av de beteenden som Canter m fl (1980) undersökte var att personer i liknande situationer uppvisade ett likartat beteende. Patienter på ett sjukhus betedde sig på ett sätt i förhållande till personalen som hade ett annat agerande. Det konstaterades att den roll olika personer har påverkar det förväntade agerandet, vilket även senare påvisats t ex i Sime och Kimura (1988). Trenden är särskilt påtagligt i de fall där det förekommer auktoritetshierarkier, t ex en myndighetsperson i relation till besökare (Canter, 1990). Kopplingen mellan personers roller och deras beteende förklaras av den så kallade roll-regelmodellen (Tong och Canter, 1985). Enligt modellen styrs personers beteende av de regler som är kopplade till deras roll i den aktuella situationen.

Simes anknytningsteori (Sime, 1980) kan användas för att förklara varför vissa ageranden förekommer och bygger på att människor föredrar det välkända framför det mindre bekanta. Detta förklarar varför människor tenderar att utrymma i grupper, även med människor de tidigare inte känner, då det inger trygghet. Simes teori förklarar även varför människor hellre väljer utrymningsvägar som är välkända, t ex tunnelmynningen istället för en nödutgång, även om den kan vara närmare.

En annan teoribildning som kan vara värdefull vid utrymningsanalyser är den om social påverkan, se t ex Latané and Darley (1970) och Canter m fl (1980). Personer som agerar gör det gärna på ett sätt som personen uppfattar som socialt korrekt och det finns ett motstånd mot att ta det första steget i en situation eftersom detta kan senare visa sig vara ett felaktigt beslut. Man vill inte riskera att "tappa ansiktet" inför en grupp främmande individer och det måste finnas tydliga signaler som stärker en persons uppfattning om vad som är ett lämpligt och korrekt beteende. Vid ett flertal undersökningar efter bränder med efterföljande utrymning har det visat sig att personer i hög grad hjälper varandra vilket kan förklaras med att det är det naturliga

beteendet i situationen. Personer som inte sedan tidigare känner varandra tvekar en stund att vidta åtgärder, men därefter bildas mindre grupper där lämpliga åtgärder förankras i gruppen och gruppen agerar och utrymmer tillsammans. En fördröjning föregår ofta gruppbildningen på grund av att personer som inte känner varandra tvekar att ta första steget, med risk för att göra bort sig inför de andra. Denna form av social påverkan kan benämnas för normativ social påverkan (Deutsch & Gerard, 1955) och har att göra med att agerandet styrs av andra personers förväntade positiva tolkningar av agerandet.

En annan form av social påverkan benämns för informationell social påverkan och här är det information från andra som i viss utsträckning påverkar individens beteende. Hur andra personer agerar styr hur individen agerar i en situation av otillräcklig kunskap om läget. I det fallet blir andra personers agerande en bekräftelse på att detta utgör ett riktigt och rimligt beteende. Man kan i detta fall tala om en sk "Följa John"-effekt[1]. Båda formerna av social påverkan gynnar den gruppbildning som ofta förekommer då det handlar om att förankra uppfattningen av situationen innan agerandet sker.

En relevant och användbar teoribildning är också den sk "affordance"-teorin (Gibson, 1978 och Hartson, 2003). Detta är ingen teori som beskriver människors agerande vid en utrymning utan kan snarare ses som ett formellt verktyg för att undersöka hur väl exempelvis tekniska installationer kan tänkas erbjuda det avsedda syftet för personer som exponeras för installationen. Avsikten med en installation är att personer ska tolka dess budskap på det sätt som åsyftas. Affordanceteorin kan användas för att förklara såväl information (som t ex att budskapet i utrymningsskyltar uppfattas som vägledning till en säker plats) som fysiska företeelser (som t ex hur dörrhandtag ska användas för att dörren ska kunna öppnas). I utrymningssammanhang kan teorin vara användbar i samband med att nya installationer ska utvecklas och introduceras och har använts av bland annat Ronchi, Nilsson, Modig och Lindgren Walter (2015) för att utveckla så kallade VMS-meddelanden för vägtunnlar.

De olika teorierna kan användas för att förklara observerade beteenden, men också fungera som en grund för att prediktera vad som troligen kan förväntas hända i en framtida situation. Denna kunskap kan därför användas i samband med att nya tekniker ska introduceras i vägtunnlar. För att koppla ihop teorier för människors beteende med en praktisk dimensioneringssituation kan den så kallad tidslinjemodellen vara illustrativ. Denna introduceras i följande avsnitt och utgör grunden för resonemangen för beskrivningen av de tekniska installationernas koppling till människors beteenden.

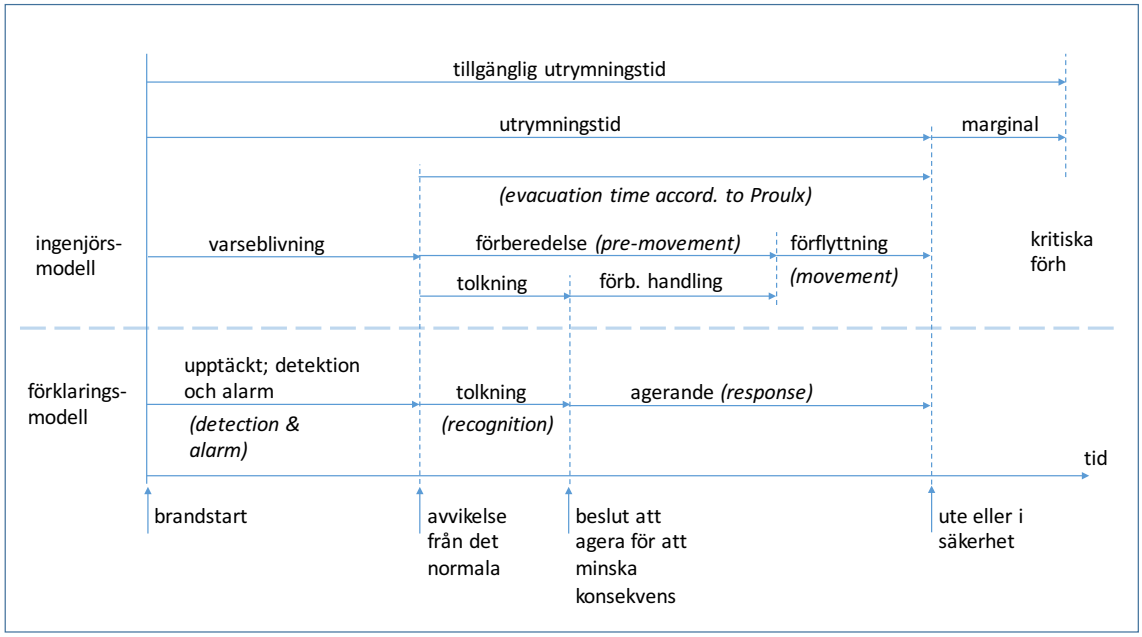
Beteendesekvensen enligt Canter m fl (1980) utgör grunden för det vidare resonemanget men det finns även andra sätt att beskriva hur människor agerar och fattar beslut t ex Rasmussen (1986) som introducerar beslut som "skill-based", "rule-based" eller "knowledge-based" beroende på situationen och personernas förutsättningar. Canters modell väljs då den utgår från en pragmatisk beskrivning av människors beteenden.

2.5 Tidslinjemodellen

I de flesta fall ska utrymning av en tunnel kunna ske innan kritiska förhållanden uppstår. Detta visar att en av de viktigaste parametrarna för att systematiskt beskriva ett utrymningsförlopp är tiden. Ju längre tiden går från det att branden startar desto värre blir förhållandena då branden oftast utvecklas så att effektutvecklingen ökar upp till en maximal nivå, för att sedan avta när bränslet förbrukats. Eftersom det inte är känt vad som brinner, förrän i efterhand, kan det vara rimligt att utgå från att konsekvensen av branden ständigt blir mer allvarlig, om inget görs.

[1] 'Följa John' handlar om att agera på samma sätt som någon annan redan gör. 'Följa John' är en barnlek där deltagarna ska göra på samma sätt som den som leder leken och som är utsedd att vara 'John'.

Det kan därför vara relevant att beskriva utrymningsförloppet i form av en tidslinje och ett flertal sådana har presenterats under åren (Proulx, 2008). Nedan presenteras en modell, figur 2, som utgör grunden för det vidare resonemanget och som har tydliga likheter med den modell som Proulx presenterar.



Figur 2. Tidslinje för utrymningsförlopp.

Tidslinjen i figuren är uppbyggd så att den både speglar utrymningen sedd från ett beteendeperspektiv genom att förklara och beskriva hur personer agerar i den nya situationen men också på det viset som en ingenjörsmodell av utrymning ofta representeras.

Anledningen till uppdelningen i en förklaringsmodell och en ingenjörsmodell är bland annat att de beräkningsmodeller som finns tillgängliga i huvudsak är avsedda att beskriva personers förflyttning och fokuserar på gånghastighet, flöden genom dörrar mm. Det gör att ingenjörsmodellen av utrymningsförloppet kan användas när utrymningstiden för en tunnel ska analyseras, men samtidigt är den modellen dålig för att beskriva hur utrymning sker.

Förklaringsmodellen bygger på teorin som presenteras av Canter m fl (1980) men med vissa mindre justeringar. Den kan även användas som grundmodell för att sätta andra teorier som förklarar vissa specifika beteenden i ett större sammanhang. Som exempel kan nämnas att Simes anknytningsteori mycket väl kan inkluderas i beteendesekvensen i förklaringsmodellen.

Modellen har använts i flera fall för att beskriva vad som sker under en utrymning kopplat till analyser av inträffade bränder, både i tunnlar och i byggnader. Ett flertal sådana analyser av inträffade bränder redovisas i bland annat Fridolf (2010), Shields & Proulx (1999), Kobes, Oberijé, Post, Weges (2010), Kobes, Helsloot, de Vries, Post (2010), Zhao m fl (2009), Fraser-Mitchell & Charters (2005), Shields & Boyce (2004), Marlair m fl (2004), PIARC (2008), Shields (2012) och Kuligowski (2013). Flera av artiklarna tar upp samma incidenter och förklarar beteende utifrån Canters modell vilket gör att den kan anses vara relativt vedertagen. Slutsatser från analyserna finns inarbetade i resonemang i kapitel 3.

Beskrivningen av människors beteende utifrån den så kallade ingenjörsmodellen bygger som framgår av figuren på samma delar av beteendesekvensen men har en lite annan uppdelning för att bättre anknyta till sättet som utrymning hanteras på ur ett beräknings- och analysperspektiv vid en dimensionering. Det innebär att mycket av resonemangen kring nyttan med olika tekniska system struktureras utifrån ingenjörsmodellen för att visa hur dessa system kan påverka de komponenter som vanligen ingår i en analys baserat på den modellen.

Tidslinjen kan appliceras på enskilda individer eller för en grupp individer som befinner sig på ungefär samma plats i tunneln. Varje person kommer att gå igenom samtliga faser i beteendesekvensen; upptäckt, tolkning och agerande. I ett mer övergripande perspektiv kan modellen fungera också för en normal trafiksituation, men i det sammanhanget presenteras den ofta på ett annorlunda sätt, som en kontinuerlig process med aktiviteterna; *perception*, *information processing, decision making* och *handling* (PIARC, 2016).

2.6 Beteendesekvens - förklaringsmodell

2.6.1 Upptäckt, detektion och alarm

Tidslinjen startar när branden initieras. Den första fasen kommer att fortgå olika långt beroende på var i tunneln bilisterna befinner sig. I många av de aktuella enkelrörstunnlarna kommer denna fas att fortgå tills personerna själva märker att det uppstått en *avvikelse från det normala*. I vissa fall kan detta skeende också initieras genom ett tekniskt system, t ex att tunneloperatören aktiverar ett varningssystem för brand. Det kan vara aktuellt för bilister som befinner sig långt från branden eller utanför tunneln. Ett exempel på sådant system kan vara röda varningsljus och bommar utanför tunneln som aktiveras. En bilist som befinner sig närmare branden kan notera avvikelsen genom att bilarna framför saktar in. I det skedet kan det anses att första fasen slutförts och bilisten går in i nästa skede, dvs *tolkning*.

2.6.2 Tolkning

Så snart en bilist kommit till insikt med *att något inte är som det borde vara* inträder nästa fas som innebär att den uppkomna situationen ska tolkas så att bilisten förstår vad som händer. I exemplet ovan med bilkön i tunneln kan anledningen att framförvarande bilar saktar in vara att det finns ett hinder på vägen vilket normalt inte behöver kopplas till brand. I de flesta fall är detta en situation som ofta förekommer och som har naturliga orsaker. Utgångspunkten är dock vidare att det uppstått en brand.

I den uppkomna situationen behöver bilisten få mer information om vad som hänt för att kunna bilda sig en uppfattning om läget. Omfattningen av tidsperioden för tolkning kan vara lång och det kan också hända att bilisten stannar bilen och går ut för att se vad som händer, dvs att söka mer information. I tolkningsfasen finns fortfarande finns inte tillräckligt med information för att övertyga bilisten om att det uppstått en brand, men personerna i scenariot samlar gradvis på sig mer information om situation.

Inom ramen för tolkningsfasen kan bilisten besluta sig för att vidta vissa aktiviteter, tex att lämna bilen eller att använda mobiltelefonen. Det innebär att denna del av utrymningsförloppet också kan innehålla aktiviteter, dvs att bilisten faktiskt agerar, vilket annars är kopplat till nästkommande fas. Det kan därför vara relevant att skilja på olika ageranden beroende på i vilket syfte ett agerande görs. För att förtydliga detta kommer fortsättningsvis de ageranden som sker efter personen fattat beslutet att vidta konsekvensreducerande åtgärder att benämnas *utrymningsagerande* till skillnad från ett mer så kallat *tolkningsagerande* som kan förekomma i tolkningsfasen. Dessa begrepp används mest för att förtydliga i vilket skede agerandet sker.

De ageranden som kan vara aktuella i tolkningsfasen är, förutom att söka efter mer information, att samtala med andra bilister i tunneln, att avvakta och inte göra något alls och att försöka förstå de signaler som kan förekomma. Från inträffade bränder har det rapporterats att mötande bilister blinkar med strålkastarna eller varningsblinkers för att varna (SHK, 2015). För att varningen ska fungera måste mottagaren förstå innebörden av signalen. Det ska påpekas att bilisten i detta skede fortfarande inte är medveten om anledningen till att normalsituationen upphört. Vanligen behöver det finnas flera signaler som samverkar för att budskapet ska nå igenom och troligen behöver signalerna vara så starka och tydliga att bilisten också uppfattar den annalkande situationen som hotfull. Försök med bilister i en vägtunnel i Nederländerna visar att trots att bilarna i tunnelförsöket stod stilla och rök var synlig så väntade många bilister

vid sina bilar innan de påbörjade utrymningen. Inte förrän ett utrymningsmeddelande hördes i tunneln började de att gå mot en utrymningsväg (Boer, 2002a).

Tolkningsfasen pågår fram tills dess att bilisten är övertygad om att en brand uppstått och beslutar sig för att vidta någon åtgärd som syftar till att minska konsekvensen.

2.6.3 Agerande

Efter att bilisten förstått att det inträffat en brand och *beslutat att vidta åtgärder för att minska konsekvensen* för sig själv eller annan person så har agerandeskedet inletts. Ageranden som kan finnas i detta skede handlar om att förstå vad som är lämpliga åtgärder och att utföra dessa. Som exempel på ageranden, vilka benämns utrymningsageranden, finns att varna och hjälpa andra personer, att hämta släckredskap och försöka bekämpa branden, att samla ihop värdefulla ägodelar i bilen, att sätta bilens ventilationssystem på recirkulation (om man beslutat att sitta kvar i bilen och att inte påbörja en förflyttning bort från branden och röken), att vända bilen och försöka köra ut och att utrymma till fots. Förflyttning kan ske till fots, men i många observerade fall försöker bilisterna att vända sina bilar och köra ut ur tunneln. Uppmaningar att göra så finns i många tunnlar och speciella vändplatser finns också (SHT, 2013).

Det är vanligt att personer gemensamt kommer fram till beslut vilket innebär att de samverkar. Detta avspeglas också i att personer är hjälpsamma gentemot varandra och uppvisar tydliga altruistiska beteenden under utrymningsförloppet.

De ageranden som inkluderas i agerandefasen är de som görs med intentionen att minska konsekvensen, se även avsnitt 2.6.2. Det kan innebära att vissa ageranden som efteråt visar sig vara kontraproduktiva eftersom de innebär ökad risk ändå ingår i agerandefasen. Eftersom avsikten är konsekvensreducering så är dock agerandet inkluderat även om resultatet inte blir det förväntade. Exempelvis kan nämnas att en släckinsats som misslyckas troligen innebär en sämre situation för en utrymmande person än om han/hon istället direkt lämnat platsen utan att försöka släcka branden. Medvetna konsekvensförsämrande åtgärder kan visserligen förekomma, men dessa anses vare mycket osannolika baserat på erfarenheter från tidigare incidenter. Då handlar det sannolikt snarare om brottsliga aktiviteter, vilka inte omfattas av modellen.

2.7 Beteendesekvens - ingenjörsmodell

Som tidigare nämnts kan utrymningsförloppet beskrivas på ett mer ingenjörsmässigt sätt genom en lite annan uppdelning än för förklaringsmodellen av beteendesekvensen. Uppdelningen sker för att underlätta en mer dimensioneringsinriktad beskrivning av förloppet och delar upp detta i tre liknande faser; varseblivning, förberedelse och förflyttning. Dessa faser har stora likheter med de som förekommer i förklaringsmodellen och övergångarna mellan den är också i flera fall identiska.

Ingenjörsmodellen fokuserar mycket starkt på tid för olika faser eftersom utrymningstiden för människorna i tunneln, vid en analys eller dimensionering, ska jämföras med den tid som finns tillgänglig för utrymning. Den tillgängliga tiden definieras av kriterier som anger förhållanden som beskriver en miljö där en person kan vistas utan att passera specificerade förhållanden för t ex medvetslöshet, dödliga förhållanden eller någon annan nivå. Dessa förhållanden brukar kallas för kritiska förhållanden för utrymning.

Den tillgängliga tiden bestäms av brandrelaterade faktorer som t ex brandkällans egenskaper, tunnelns tvärsnitt, tunnelns lutning och lufthastighet samt varierar med tid och plats. Flera av dessa egenskaper kan även påverkas av tunneloperatörens och räddningstjänstens ageranden. Det är därför nödvändigt att dessa organisationer är väl informerade om vilka krav som ställs på dem och att de har väl utvecklade rutiner för att hantera tunnelolyckor. Brister i rutiner och agerande har bland annat noterats av Svela, Njå och Berg (2016).

2.7.1 Varseblivning

Denna del överensstämmer helt med förklaringsmodellens första fas och handlar om tiden det tar att upptäcka att något inte är som det bör vara. Tiden kan vara olika för olika individer och måste bedömas utifrån aktuella förutsättningar på den aktuella platsen.

2.7.2 Förberedelse

Förberedelsefasen är tänkt att samla upp all tid som går åt för att genomföra aktiviteter som inte utgör förflyttning. Det kan handla om att larma räddningstjänst, försöks göra en släckinsats eller att hjälpa och varna andra bilister. Ibland kan det vara en fördel att dela upp förberedelsefasen i en tolkningsfas som främst behandlar informationssökning och som också är identisk med motsvarande fas i förklaringsmodellen och en fas kallad förberedande handling som ska täcka in övriga icke förflyttningsrelaterade beteenden. Denna uppdelning kan göras i en analys om man vill förtydliga hur sambanden mellan exempelvis en teknisk åtgärd och effekten på utrymningssekvensen ser ut. Men ofta finns inte kvantitativa data för att göra uppdelningen sett ur ett beräkningsperspektiv men för en kvalitativ bedömning kan den vara relevant.

2.7.3 Förflyttning

Förflyttningsfasen är tänkt att representera den tid det tar att fysiskt förflytta sig till en säker plats. Med säker plats avses ett ställe där personer kan vistas under en längre tid utan att utsättas för kritiska förhållanden. En plats utanför tunneln utgör en säker plats och även ett parallellt tunnelrör, i de fall det finns ett sådant, kan anses vara en säker plats. Även en räddningskammare eller flyktplatser inne i tunneln kan fungera som en säker plats, åtminstone under en viss tid.

Olika typer av förflyttning är aktuella för vägtunnlar och den vanligaste är att personer går till fots. Även möjligheten att köra med bilen ut ur tunneln kan övervägas, speciellt om utrymningen sker innan röken nått platsen för respektive person.

När bilister ska köra ut ur tunneln, ofta efter att ha vänt om fordonet, finns ytterligare risker. Om bilisten kör i en rökfri miljö är risken inte större än för normala situationer, annat än att andra fordon kan påbörja en vändningsmanöver. Detta kan oftast hanteras genom att hastigheten hålls låg. Om bilisten kör genom röken kommer sikten att vara minimal och det finns risk att bilen kör på andra personer som går till fot, kör in i andra fordon eller i tunnelväggen eller kör på personal från räddningstjänsten som är på väg in i tunneln (SHT, 2013; SHT, 2015). Fördelen med att köra med bilen är att det finns möjligheter att låta andra personer som påträffas i tunneln att åka med. Men risken för någon form av påkörning är stor.

2.8 Förklaringsmodell respektive ingenjörsmodell

Beskrivningen av utrymningsförloppet med förklaringsmodellen så som den anges i tidslinjemodellen är förhållandevis allmän. Det finns andra liknande modeller som avser att förklara hur personer beter sig vid bränder, t ex Sime (2001) och Kobes (2010). Fördelen med tidslinjemodellen är att den kan anpassas till en ingenjörsmässig beskrivning av utrymningsförloppet. Den ingenjörsmässiga beskrivningen av utrymningsförloppet har tidigare presenterats av bl a Proulx (2008) och redovisas också i (PIARC, 2016) som anger att utrymningsförloppet kan delas upp i tre faser:

- "a period for detecting the event and a period for sounding the alarm,
- a period during which the user prepares for moving in the tunnel (period during which the user analyses the situation and decides what action to take),
- the period during which the user heads towards the tunnel emergency exits on foot."

Det bör åter poängteras att syftet med förklaringsmodellen är att förklara hur personer agerar i situationen, medan syftet med ingenjörsmodellen är att fungera som en modell som kan integreras i beräkningsverktyg. Båda betraktningssätten har således olika infallsvinklar, men

beskriver ett och samma förlopp. Det som främst skiljer de två betraktningssätten åt är att ingenjörsmodellen bryter ut den fysiska förflyttningen från agerandefasen i förklaringsmodellens beteendesekvens. Det innebär att det som återstår av agerandefasen är aktiviteter som utförs, men som inte för personen närmare en säker plats.

2.9 Panik

Panik rapporteras ibland som orsak till att personer omkommer vid bränder. Bland forskare har bland annat Sime (1980) studerat fenomenet panik och han konstaterar att panik sällan inträffar. Anledningen till att forskarvärlden anser att panik är ett fenomen som i princip inte förekommer beror mycket på hur begreppet definieras. Det finns visserligen flera definitioner men några gemensamma komponenter i begreppet som vanligen noteras är att panik kan vara kopplat till icke-socialt beteende och att fenomenet är kortvarigt. Med icke-socialt avses att personen inte tar hänsyn till exempelvis sociala band med andra personer till skillnad från anti-socialt beteende som snarare har att göra med att vidta åtgärder som avviker från normalt beteende t ex att medvetet skada andra för att komma ut. Anti-socialt beteende har inte observerats vid utrymningar utan snarare är det motsatta beteenden, dvs hjälpande aktiviteter, som rapporteras efter undersökningar av vad personer faktiskt gör under en utrymning. Andra myter om panik är att panik smittar i stora folksamlingar, att personer odisciplinerat rusar mot utgångar eller att personer beter sig irrationellt. Några bevis för detta har inte kunnat hittas.

Trots detta rapporteras ändå att panik är något som förekommer och som är orsaken till att personer omkommer vid bränder. Den troliga förklaringen till förekomsten är att allmänheten nog har en mer generös tolkning av begreppet än forskarna inom området och att panik egentligen mer är en omskrivning för oro, ångest och stress i samband med en onormal situation.

En utrymning kan absolut vara förknippad med en stark oro, ångestkänsla eller skräck för att inte kunna ta sig ut, men det är tveksamt om det kan kategoriseras som panik. En bra sammanställning om forskningen kring panik finns i Fahy, Proulx och Aiman (2009).

3 Interaktion mellan människa och teknik

Enligt den tidigare nämnda förklaringsmodellen går personer igenom de tre faserna *upptäckt*, *tolkning* och *utrymningsagerande* vid brand i en vägtunnel. Ett snabbt utrymningsförlopp kan uppnås genom att en, två eller alla tre en av dessa faser förkortas. Exempelvis kan fasen *upptäckt* förkortas om branden snabbt detekteras i tunneln och information om händelsen förmedlas till trafikanterna. Enligt beteendesekvensmodellen (Canter m fl, 1980) kännetecknas inledningsfasen av en utrymning av osäkerhet och informationssökning, vilket innebär att en kombination av tydliga signaler om brand måste förmedlas till trafikanterna för att förkorta tolkningsfasen. Denna tvekan har även observerats vid utrymningsförsök i vägtunnlar (Boer, 2002a). Agerandefasen kan förkortas genom att t ex förbättra trafikanternas möjligheter att förflytta sig till säkerhet eller genom att minska avståndet till säker plats. Det är även möjligt att ge trafikanterna rätt förutsättningar för att bekämpa branden i agerandefasen, vilket kan förlänga den tillgängliga tiden innan förhållandena i tunneln blir farliga.

Ovanstående tankesätt, dvs att förkorta den tid som trafikanterna tillbringar i de olika faserna, anses vara en bra utgångspunkt vid val av tekniska system i tunneln. Genom att utgå från trafikanternas perspektiv, dvs fokusera på vad som behövs för att de ska tillbringa så kort tid som möjligt i de olika faserna, kan potentiellt en lämplig kombination av system tas fram för en specifik tunnel.

I nedanstående avsnitt sammanfattas projektets litteraturstudie utifrån de tre faserna *upptäckt*, *tolkning* och *agerande* vid brand i en vägtunnel. Mer specifikt behandlas forskning och utredningar om olika typer av lösningar (ofta tekniska system) som visat sig ha potential att minska tidsåtgången vid utrymning. Dessutom ges förslag på alternativa lösningar som ännu inte utforskats, men som anses ha potential baserat på studerad litteratur. Fokus i nedanstående avsnitt är på enkelrörstunnlar som är flera kilometer långa (>3000 m) och har en kraftig lutning (över 5%), men däremot behandlas forskning och utredningar för olika typer av vägtunnlar, dvs även t ex dubbelrörstunnlar. Beskrivningen inleds med ett avsnitt som behandlar aspekter som tar upp behovet och utformning av kommunicerad information till bilister före och under en incident.

För att på ett trovärdigt sätt kunna beskriva vad som sker under en utrymning är det viktigt att ta lärdom vad som skett i samband verkliga insatser eller vid experiment i realistiska miljöer. Därför läggs stor vikt vid information och slutsatser från dessa båda typer av undersökningar.

3.1 Före olyckan – Utbildning och information

3.1.1 Sosiale medier

Liu et al. (2015) undersøkte bl. a hvilke mediekanaler publikum bruker for å dele informasjonen under krisesituasjoner. Resultatene viste at telefonen spiller en viktig rolle; både til å ringe og tekste andre om det som har skjedd, i tillegg til å snakke ansikt til ansikt. Funnene viste også at deltakerne hadde stor vilje til å evakuere hvis sentrale myndighet krever det. Andre studier viser at Facebook gruppetrafikk øker betraktelig med fokus på kommunikasjon om løsningsorienterte tiltak, som f. eks hjelp til overnatting og transport. Det samme gjør twittermeldinger, men med temaer omkring personlige meninger (Dreyfuss, 2015). Slike funn indikerer at myndigheter kan ta i bruk sosiale medier og smarttelefonteknologi for å veilede og dirigere publikum som befinner seg i eller ved en tunnel, i sikkerhet. Trolig gjelder det først og fremst de yngste målgruppene som benytter slik smarttelefonteknologi mest (Feldman et al., 2016).

3.1.2 Dataspill forbedrer læringsevnen

Serious games for safety education (SGSE), er videospill brukt i opplæringsformål, mest med tanke på sikkerhet i fly, men også på veg (Li & Tay, 2014). Spillet kan gi opplevelser som engasjerer deltakerne mer til å lære enn det tradisjonelle medier gjør. Trafikanter kunne f. eks

ved hjelp av SGSE gjøre seg kjent med tunnelene de ferdes i, dvs. lære detaljer om evakueringsmuligheter, sikkerhetsutstyr etc. Chittario (2016) har demonstrert at SGSE gir signifikant bedre læring (mestringsevne og forståelse av anbefalinger ifm evakuering) enn tradisjonell instruksjon med bilder og tekst.

Virtual reality (VR), som er en videreføring av SGSE, er interaktiv og virtuell. I en studie av Kinateder et. al (2013) fikk de som øvet anbefalt selvredningsadferd i tunnel gjennom VR i tillegg til å lese en brosjyre om selvredning, raskere og bedre adferdsrespons enn de som bare leste brosjyren. Dårligst resultat var blant dem som ikke fikk noen form for informasjon. Selv etter ett år var trenden den samme; og resultatene indikerer at spesielt kvinner responderte best. Vatsvåg (2016) viste i sin masteroppgave at kunnskap om sikkerhetstiltak og utstyr ved avkuering fører til økt opplevd trygghet blant norske trafikanter som ferdes i vegtunneler. Og at kvinner føler seg mindre trygge i tunneler enn menn. På denne bakgrunn kan SGSE og VR vise seg å være et nyttig virkemiddel til opplæring, kanskje særlig for kvinner. Augmented Reality (AR, jfr. Pokémon Go) har også vist seg effektivt i evakueringssammenheng (Ahn & Han, 2012). AR kan bidra til å styrke validiteten til VR i evakueringsforskning ved f. eks å implementere 3D hologram i det "virkelige" miljøet.

Boer (2002a) konstaterar också från genomförda experiment att personer som redan innan olyckan inträffar vet vad som är ett lämpligt agerande innebär att utrymningen påskyndas och att fler använder utrymningsvägarna istället för att ta sig till tunnelmynningen.

3.2 Upptäckt

Både branden i Oslofjord- (SHT, 2013) och Gudvangatunneln (SHT, 2015) visar att många trafikanter blir varse om att något onormalt har inträffat, dvs kommer in i fasen *upptäckt*, genom att de kommer till en bilkö eller kommer fram till brandplatsen. I något fall kan de få en varning från mötande trafik, t ex mötande bilar som signalerar genom att blinka med ljuset (SHT, 2015). Däremot verkar det mindre vanligt att första signalen ges av någon av de tekniska system som finns i tunneln men detta beror på hur snabbt systemen kan aktiveras och hur lång tunneln är dvs om bilister befinner sig i tunneln men inte har hunnit komma nära brandplatsen. I Oslofjordtunneln (SHT, 2013) fanns system för övervakning av trafiken, dvs CCTV-kameror, men däremot aktiverades radioinbrytning först 9 minuter efter att branden upptäckts. System för övervakning av tunneln saknades i Gudvangatunneln och information om branden kom istället från trafikanter som ringde och informerade (SHT, 2015). Först därefter, dvs när många trafikanter redan hade lämnat fasen *upptäckt*, var det möjligt att aktivera tekniska system. Även i Gudvangatunnel fanns möjlighet till radioinbrytning, men detta tekniska system användes inte vid branden 2013.

Om fasen upptäckt, dvs tiden från det att branden startar tills trafikanterna får första signalen om den ännu okända branden, ska kunna förkortas krävs först och främst att branden eller olyckan detekteras i ett tidigt skede. I de fall inga brand- eller trafikövervakningssystem finns i tunneln, dvs när man förlitar sig på att trafikanterna ska rapportera branden, kommer det att ta lång tid innan tunnelns tekniska system kan aktiveras. För de flesta trafikanter som färdas i tunneln kommer första signalen då sannolikt att vara en kö eller att de ser själva branden. Dessutom innebär en sen aktivering av de tekniska systemen att trafikanter inte kan stoppas vid ingången i tid, utan att fordon fortsätter att köra in i tunneln trots att det brinner.

En förutsättning för att förkorta fasen *upptäckt* är därför någon form av detektionssystem används i tunneln. Ett möjligt system är trafikövervakning med CCTV som larmar vid stillastående trafik i tunneln, dvs den typ av system som fanns i Oslofjordtunneln (SHT, 2015). Denna typ av system har stor potential att snabbt identifiera stillastående fordon, vilket sedan kan undersökas av trafikledningen. En annan möjlighet kan vara att vidareutveckla system för kommunikation mellan fordon och infrastruktur (PIARC, 2016), dvs så kallad Vehicle Infrastructure Integration (VII), för att de även ska larma vid brand i tunnel (inte enbart vid trafikolycka). Denna typ av system har stor potential att ge en snabb detektering, men baserat på

litteraturstudien verkar forskning om denna typ av system för tunnelbränder hittills mycket sparsam.

Ytterligare en förutsättning för att förkorta fasen *upptäckt* är att information om branden också snabbt förmedlas till trafikanterna via tunnelns tekniska system. I Oslofjordtunneln tog det hela 9 minuter från det att branden upptäckts tills dess att radioinbrytning aktiverades (SHT, 2013). Detta innebar att radioinbrytningsmeddelandet sannolikt var den första signalen för ytterst få (eller inga) av trafikanterna. Visserligen måste tiden från detektering till aktivering av de tekniska systemen vara mycket kort för att den första signalen ska vara just ett tekniskt system, eftersom trafikanter färdas 1 km i tunnel på 45 sekunder om hastigheten är 80 km/h (vanlig hastighet i Norska tunnlar). För en sträcka på 3 km måste således de tekniska systemen aktiveras inom de 2,5 minuter det tar för trafikanterna att nå olyckan. Den största vinsten med en snabb detektering är dock att signaler utanför tunnel kan aktiveras och förhindra ytterligare trafikanter från att köra in tunneln om det brinner eller finns överhängande risk för brand.

3.3 Tolkning

När trafikanterna har blivit varse att något är annorlunda i tunneln, dvs erhållit första indikationen på att situationen inte är normal, inleds fasen *tolkning*. Denna fas kännetecknas av osäkerhet och trafikanterna försöker kontinuerligt samla mer information om situationen (Canter m fl, 1980). Denna insamling kan ske aktivt, t ex genom personer lämnar sina fordon för att undersöka vad som händer, eller passivt, t ex genom att personer sitter kvar i fordonet i väntan på en bekräftelse eller mer information (Canter et al, 1980). När trafikanterna har fått tillräckligt mycket information för att förstå att situationen kräver agerande, t ex förstår att det är en brand i tunneln som kräver utrymning, kommer de att inleda fasen *agerande*. Betydelsen av många signaler eller indikationer har påpekats av Proulx och Sime (1991), vilka visade att fler och tydligare signaler i en järnvägsstation under mark leder till att utrymning inleds tidigare. Samtidigt har tidigare bränder i vägtunnlar, t ex branden i Mont Blanc-tunneln (Duffé och Marec, 1999), visat att enbart brandrök inte alltid är tillräckligt för att motivera trafikanterna att utrymma. Det är därför extremt viktigt att tekniska system används som ett komplement till de signaler som direkt genereras av branden, t ex brandrök, kö i tunneln, etc., för att informera trafikanterna om situationen. I det ideala fallet kommer en del trafikanter i tunneln inte ens att utsättas för t ex brandrök, utan reagerar enbart baserat på de tekniska systemen i tunneln. En effektiv kombination av tekniska system, t ex akustiska larm, dynamiska skyltar, etc, anses dessutom kunna förkorta den tid som trafikanterna tillbringar i fasen *tolkning* och därmed leda till säkrare utrymning.

Tidigare forskning har tydligt visat att akustiska signaler i tunnlar, t ex sirener eller talade meddelanden, har en mycket viktigt funktion vid utrymning (Nilsson, Johansson and Frantzich, 2009; Boer, 2002a; Boer, 2002b). Signalerna uppfattas av trafikanterna som börjar undersöka situationen, dvs kan få trafikanter att övergå från att passivt vänta till att aktivt söka ytterligare information. Detta illustreras av utrymningsförsök som genomfördes i Götatunneln i Göteborg, där ett talat meddelande användes (Nilsson m fl, 2009). På grund av den utmanande akustiska miljön i Götatunneln var meddelandet svårt att uppfatta både i och utanför fordonet, men många försökspersoner nämnde ändå att det faktum att de hörde något fick dem all leta efter ytterligare information om vad som hade inträffat.

Forskning kopplad till utrymning i byggnader har visat att talade meddelanden är ett effektivt sätt att förkorta tolkningsfasen vid utrymning (Proulx och Sime, 1980). Det finns även en stor mängd forskning som utrett vilken typ av information talade meddelanden bör innehålla (Nilsson, 2014). Ett stort problem i vägtunnlar är dock att den akustiska miljön är utmanande. Det kan t ex vara svårt att höra vad som sägs i talade meddelanden på grund av fläktljud eller eko i tunneln. Dessutom kan det vara svårt för vissa signaler att nå in i fordon eftersom ljud dämpas effektivt av kaross och rutor inom (Ungar, 1988).

En del forskning har genomförts om möjliga metoder att förbättra uppfattbarhet av talade meddelanden i tunnlar, men problemet med många föreslagna lösningar är att de är dyra att

implementera. En föreslagen metod, vilken också installerats i några vägtunnlar, bygger på att riktade högtalare placeras med jämna mellanrum i tunneln, ca var 50:e meter (Start, 2012). Ljudet från högtalarna förskjuts tidsmässigt i syfte att minska effekten av eko och det faktum att ljudet färdas i tunneln. Dessutom kan ljudet anpassas något för att minska problem med den svåra akustiska miljön (Start, 2012). Även om detta system kan ge ökad uppfattbarhet, så är det ett dyrt system på grund av de många högtalare som måste installeras i tunneln.

Ett alternativt och mer kostnadseffektivt angreppssätt kan därför vara att anpassa det talade meddelandet så att det dämpas mer effektivt i tunneln, dvs inte färdas så långt eller genererar lika mycket eko, samt hörs trots starkt bakgrundsljus, t ex fläktar. Detta kan sannolikt åstadkommas genom att framhäva de höga frekvenser som innehåller mycket av talets information, vilket innebär att det blir lättare att uppfatta innebörden trots lågfrekvent bakgrundsbuller, dvs fläktar. Dessutom är det möjligt att undersöka om vissa ljud, t ex vokalljud, kan undertryckas i utrymningsmeddelanden i syfte att minska problem med eko i tunneln. På detta sätt kan ett konstgjort talat meddelande konstrueras som är anpassat till den akustiska miljön i vägtunnlar. Forskning om ovanstående angreppssätt, dvs anpassade talade meddelanden, anses ha stor potential, men litteraturstudien har inte kunnat identifiera forskning inom detta område. Ett arbete har påbörjats via svenska Trafikverket för att undersöka möjligheten till talade utrymningslarm i vägtunnlar (Nilsson, 2016).

Ett alternativ eller komplement till externa utrymningslarm är att försöka förmedla larm och information till bilisterna via bilradion (inkl RDS), telefonen eller i framtiden via bilens inbyggda kommunikationssystem. I dagsläget används radioinbrytning och detta kan för flera bilister vara den tydligaste källan som bekräftar att det uppstått en brand och som kan förmedla lämpliga instruktioner. Detsamma gäller för framtida intelligenta IT-lösningar som byggs in i bilar där det kan finnas en kommunikation mellan bil och infrastruktur, men också mellan bilar. För att denna form av information ska vara verksam krävs att branden upptäcks i ett tidigt skede och att VTS kan agera på kort tid. De som har nytta av denna informationskälla är främst de som är på väg in i tunneln eller på väg i tunneln mot branden. Beroende på gällande hastighetsbegränsning handlar det om några minuter för att aktivera systemet om det ska ge någon nytta.

Den mest lovande tillämpningen i närtid bör vara att utnyttja det faktum att väldigt många har tillgång till en smartphone. Med en så kallad "tunnelapp", figur 3, kan både information om vad som har hänt och instruktioner förmedlas på samma sätt som via bilradion via radioinbrytning. För dem med en mer traditionell mobiltelefon kan meddelanden skickas som SMS.

Figur 3. Information via mobiltelefonen.

Tunnelappen kan användas till mer och även för personer som befinner sig i röken då den kan ge information om exempelvis avstånd och plats för närmaste räddningskammare eller tunnelportal, lämplig gångriktning och annat. Till skillnad från bilradion kan tunnelappen användas utanför bilen när personerna utrymmer till fots. Nyttan finns således både för tolkningsfasen som i agerandefasen. I dagsläget finns inte mycket forskning kring användningen av mobiltelefonen för personsäkerhet, men teknikutvecklingen går fort och nyttan bedöms vara stor eftersom den bygger på normativ social påverkan. Det finns dock svårigheter med att informera bilister om att använda appen och kanske främst för bilister som inte kommer från Norge.

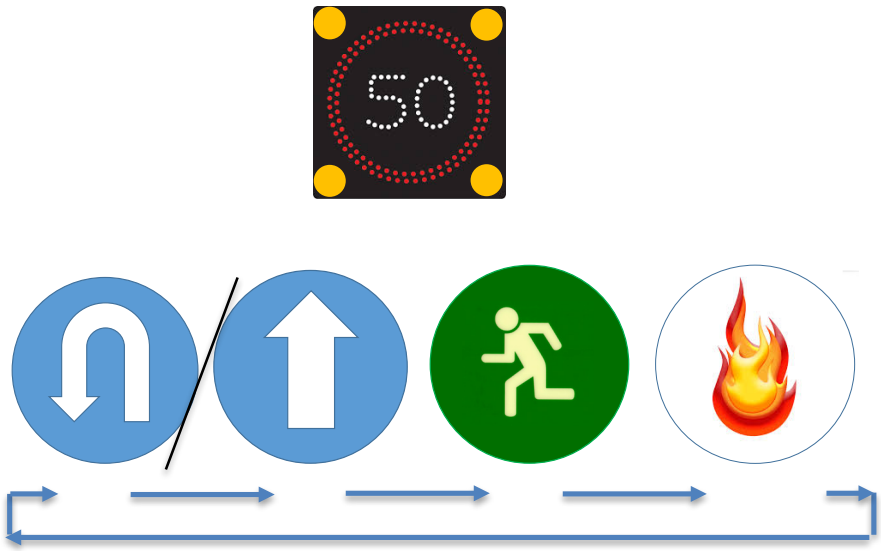
Många tunnlar, kanske främst de i mer trafikerade regioner, är försedda med dynamiska skyltar (Trafikinformationsskyltar - TIS eller Variable Message Sign - VMS) som är placerade över vägbanan. Dessa kan användas för att förmedla information till bilisterna, främst om dagliga trafikförhållanden. De kan också användas för att informera bilister om en annalkande olycka och brand vilket kan vara den första informationen en bilist får om branden. Men den innebär samtidigt att den bekräftar för bilisten att det brinner i tunneln och den kan ge information om lämpligt agerande, vilket gör att den är betydelsefull även i nästkommande fas. Forskning (Ronchi, Nilsson, Kojic, Eriksson, Lovreglio, Modig and Lindgren Walter, 2016) har visat att de meddelanden som ges måste anpassas efter hur bilisterna tolkar informationen och omsätter denna i ett handlande. Dessa försök är genomförda med hjälp av en miljö i Virtual Reality (VR), vilket visat sig vara en lämplig metod, och undersökte en rad olika utformningar, figur 4. I många av de norska tunnlarna är kanske inte VMS den mest kostnadseffektiva lösningen, men erfarenheterna från dessa kan användas också i andra tillämpningar.

Figur 4. Exempel på VMS-skylt som ingick i undersökningen (Ronchi m fl, 2016).

Flera av de aktuella tunnlarna har någon form av dynamiska skyltar som i första hand används för att förändra den gällande hastighetsbegränsningen. VTS kan vid behov sänka hastighetsgränsen om omfattande köer uppstår. Detta kan vara en signal till bilisten att något har hänt.

En mer utvecklad form av dynamiska hastighetsskyltar kan användas ungefär som VMS, dvs de kan förmedla mer information än bara hastighetsgräns, figur 5. Dessa system finns inte idag, men kan utgöra en potentiellt användbar lösning för att informera trafikanter i tunnlar där enklare system är nödvändiga. Dessa skyltar kan då kombinera hastighetsinformation med till exempel information om att det brinner och att bilisten bör att vända fordonet och köra ut ur tunneln. På det viset informeras bilisten både om vad som har hänt och om vad den ska göra, vilket är grundtanken med ett utrymningslarm.

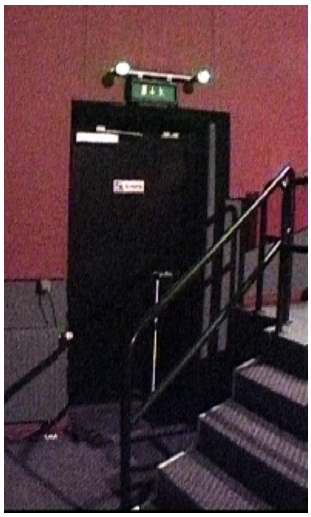
För övrigt finns idag skyltar, som VTS kan tända upp, med informationen om att vänta om och köra ut. Om denna strategi är lämplig bör dessa skyltar finnas i den omfattning att alla bilister som ännu inte nått platsen för brand eller rök omgående kan nås av informationen.



Figur 5. Exempel på information som kan förmedlas via enklare trafikskyltar. Skyltarna med pilsymboler är alternativa och beror på körriktningen. Trafikskyltar förses även med blinkande varselljus (tex orange växelvis lysande uppe och nere).

Även enklare former av ljussignaler har visat sig vara effektiva i en utrymningssituation. Flera av dem har syftet att informera och underlätta i samband med att personer ska välja en utrymningsväg, dvs att välja en okänd men nära belägen utrymningsväg istället för den normala in- och utgången från exempelvis en byggnad. Forskning har dock visat att dessa enkla signaler i form av gröna blinkande lampor också är betydelsefulla för att personer ska förstå att något allvarligt som associeras med utrymning har hänt.

Med utrymningsskyltar försedda med gröna blinkande lampor kan tolkningsfasen i det närmaste helt elimineras för vissa situationer (Nilsson & Frantzich, 2007) eller kraftigt reduceras, figur 6. Grönt blixtljus användes även vid utrymningsförsök i Götatunneln i Göteborg (Frantzich, Nilsson, Kecklund, Anderzén och Petterson, 2007) och försökspersonerna angav i sina svar att nyttan främst associerades till själva agerandefasen men sannolikt finns möjligheten att även tolkningsfasen påverkas då beslutat att agera fattas efter det att personen nås av flera samstämmiga indikationer.



Figur 6. Gröna blinkande ljus vid nödutgång.

Om ljussignaler ska användas för att indikera ett önskat utrymningsbeteende bör dessa ge ett grönt sken. Anledningen är att färgen grön traditionellt associeras med säkerhet, gå och kör medan rött associeras till stopp och fara (Wickens & Hollands, 2000). Avsikten med blinkande ljus är att förstärka effekten av andra indikatorer genom att ljuset exempelvis är placerat intill en utrymningsskylt. Det betyder att den gröna färgen ska associeras med utrymning och bör därför inte användas generellt för att påkalla ökad uppmärksamhet i allmänhet. I figur 4 används exempelvis orange blinkande belysningspunkter för att öka uppmärksamheten vid den del av VMS som förmedlar textinformationen och inte vid utrymningsskylten. Den konkreta utformningen av sådana indikatorer (dynamiska skyltar) behöver undersökas för anpassning till förutsättningarna i enkelrörstunnlar.

Under tolkningsfasen söker personerna efter mer information om vad som hänt och om de måste agera på något sätt. I en vardagssituation behöver de normalt bara bli informerade om vad som har hänt eftersom det inte handlar om brand i de flesta annorlunda situationerna som uppstår. Det innebär å andra sidan att ett agerande som innebär att personen måste lämna bilen för att eventuellt tala med andra personer, som också stannat i tunneln, om vad som har hänt är en väldigt ovanlig situation. Det betyder att social påverkan är mycket betydelsefull och det är lättare att agera om någon annan redan lämnat sin bil. Kinateder m fl (2014) har bland annat undersökt hur andra personers agerande i en tunnel påverkar en försöksperson i en tunnelmiljö. Försöken genomfördes i en VR-miljö med så kallade virtuella agenter eller avatarer (datoranimerade personer) som agerade på olika sätt, bland annat i konflikt med vad som kan vara ett önskvärt beteende. Det visade sig att försökspersonerna var benägna att följa de beteenden som avatarerna gjorde t ex att gå mot en nödutgång eller att inte gå mot nödutgången beroende på avatarens beteende. Utfallet är inte 100 % lika i försökspersonens beteende och avatarens beteende, men experimenten visar på styrkan i social påverkan och att det är viktigt att tidigt förmå någon eller några personer att ta första steget att agera för att skaffa information om läget och senare att agera för att minska konsekvensen.

Det spekuleras också i att personer med olika kulturell bakgrund agerar olika i en given situation. Troncoso, Nilsson and Ronchi (2015) visade att färgens betydelse för att markera utrymningsvägar inte är kulturellt betingad. De spekulerar kring att kulturella effekter inte är så betydelsefulla. Det finns inte mycket forskning in området, men sannolikt kan social påverkan spela en roll om eventuella kulturella skillnader finns. I det sammanhanget kan skillnader i språk utgöra en minst lika stor källa till osäkerhet som den kulturella bakgrunden. Detta bör beaktas i samband med utformning av system för information till bilister.

I huvudsak är det mest tekniska system för att underlätta för bilisterna att tolka situationen som behandlats ovan, men även närvaron av rök kan bidra till att övertyga bilister om behovet av utrymning. Dock är rök i tunneln i sig inte tillräckligt för att säkert övertyga en bilist att utrymma, vilket visats t ex vid branden i Mont Blanc, se ovan. Röken kommer på sikt att tolkas som brand med ett efterföljande behov att utrymma, men problemet är att det kan ta lång tid. Tillsammans med andra indikatorer och informationskällor är röken dock effektiv på att informera bilister om vad som har hänt och vad de bör göra. I vissa fall kan tydliga signaler erhållas från andra säkerhetssystem i tunnel, dvs system som inte är utformade med det huvudsakliga syfte att meddela trafikanterna. Exempelvis var aktiveringen av sprinklersystemet en viktig signal vid branden i Burnleytunneln (Kissane, 2007; Johnson & Barber, 2007).

Flera av tunnelns tekniska system kan var för sig bidra till att personerna förstår att en brand uppstått. Enskilt behöver de inte ha den effekten, men sammantaget kan det leda till en korrekt tolkning och övertygelse om att agera. Flertalet av tunnelns tekniska system kräver en aktiv handling av VTS, vilket innebär att VTS-funktionen är mycket betydelsefull för att bilisterna ska få information och för att minska osäkerheten som råden i en inledningssituation (Canter f fl, 1980). Vid utformningen av rutiner för VTS ska dessa i första hand baseras på bilistens behov av stöd eftersom detta är mest akut. Det behov som exempelvis räddningstjänsten har att hantera olyckan är sekundär då möjligheten att utrymma vid en brand i en tunnel alltid bygger på självräddningsprincipen.

3.4 Utrymningsagerande

Så snart som personen förstått att det uppstått en brand i tunneln handlar resterande aktiviteter om att på olika sätt hantera situationen genom att försöka minska konsekvensen och sätta sig och andra personer i säkerhet. Även i detta fall bör målsättningen vara att utforma utrymningsstrategin för tunneln så att tiden för agerandet minimeras.

Från flera av olycksutredningarna från inträffade bränder och experiment kan det konstateras att personer kan agera både snabbt och effektivt, Kinateder (2012) och SHT (2011), men också att de kan välja att inte göra mycket annat än att observera händelseförloppet (Boer, 2002a). I de experiment som Boer redovisar uppstår tydliga avvaktande beteenden och personer tvekar ganska länge, upp till flera minuter. Inledningsvis går de ur sina bilar men stannar sedan kvar för att se vad andra gör innan de agerar. När personerna får besked om vad de ska göra börjar de att agera, dvs att gå mot utgången.

Personerna kan välja olika strategier för att sätta sig i en bättre situation t ex genom att försöka bekämpa branden, förbereda sig för att lämna platsen, utrymma till fots eller med bilen och att stanna kvar i bilen då den kan utgöra en bättre miljö jämfört med tunneln. Grundstrategin är att personerna på egen hand måste bedöma situationen, baserat på tillgänglig information och tidigare kunskap, och sedan besluta sig för lämpliga åtgärder, dvs det är självräddningsprincipen som gäller.

Vid en tunnelbrand finns det inga möjligheter till extern assistans annat än den som vägtrafikcentralen (VTS) kan bistå med. Rutiner för VTS är därför ytterst viktiga också i agerandefasen och påverkar hur personerna i tunneln agerar. Som exempel kan nämnas att personer som utrymmer till största delen gör det för att undkomma röken. Den rådande vindriktningen kan då fungera som en del i beslutsunderlaget och då är det olyckligt om VTS vänder rökriktningen i ett tidigt skede, vilket var fallet vid olyckorna både i Gudvangatunneln 2013 och i Oslofjordtunneln 2011. Detta exempel avslöjar ett typiskt problem med just enkelrörstunnlar, dvs att det alltid är någon som blir drabbad av röken. Men det problematiska är om förutsättningarna ändras under förloppets gång då människorna tagit besluten baserat på de förutsättningar som gällde då beslutet fattades.

Vilka aktiviteter som sker påverkas alltså sannolikt av en rad faktorer såsom anstånd till branden, vindriktning, avståndet till den säkra platsen, närvaron av andra personer, tidpunkten under förloppet och hur miljön ser ut på platsen.

Med hjälp av olika former av tekniska installationer kan personerna påverkas att vidta de aktiviteter som är önskvärda. Detta kan bland annat åstadkommas ger olika former av information som presenteras för bilisterna i tunneln eller genom information de redan har skaffat sig genom tidigare utbildning och informationsinsatser. I det förra avsnittet introducerades flera system som syftar till att få bilisterna att förstå att det utbrutit en brand. Dessa system kan därför även användas för att förmedla information om vad personerna förväntas göra för att undkomma branden eller agera på ett sätt som minskar konsekvensen av den inträffade händelsen. De närvarande bilisterna har ett informationsbehov att fylla och genom att förse dem med instruktioner kan tiden det tar innan de vidtar lämpliga åtgärder minskas.

Det önskvärda är att personer ges möjlighet att lämna platsen så snabbt som möjligt för att undvika att i ett senare skede tvingas utrymma genom rök. Erfarenheterna från flera tunnelbränder visar att utrymning i en rökfylld miljö är ytterst besvärlig och farlig. Personer som befinner sig i direkt anslutning till branden kommer sannolikt att försöka bekämpa branden med i första hand egen utrustning, men bör kunna lämna platsen om detta inte lyckas.

Två kategorier av personer kan därför identifieras, nämligen de som är långt från branden och som har goda möjligheter att utrymma i en rökfri miljö, samt de som är nära branden eller de som upptäcker faran genom den annalkande röken och därför redan från början befinner sig i rök.

Utrymning för personer som inte ser brand eller rök

De som inte ser branden eller röken bör förmås att vända fordonen och köra ut ur tunneln. För att detta ska vara möjligt måste det dels finnas plats att göra detta på och bilisterna måste informeras om detta. En väl fungerande Vägtrafikcentral (VTS) är därför väsentlig liksom att bilisterna uppfattar informationen på ett tydligt sätt. Olika tekniker för att förmedla information till bilisterna kan övervägas, t ex talade larm i tunneln, informationstavlor som ger visuell information (t ex vänd om och kör ut), radioinbrytning inkl DAB-information och mer högteknologiska metoder som mobilappar och Vehicle Infrastructure Integration (VII). Traditionell teknik med informationstavlor är relativt väl undersökta och det finns rekommendationer om hur meddelandet bör formuleras eller hur man kan bestämma detta (Ronchi och Nilsson, 2013; Ronchi, Nilsson, Modig and Lindgren Walter, 2015). Innebörden av meddelandena bör ge vägledning om vad som har hänt och vad personerna förväntas göra, se även avsnitt 3.3.

Utrymning för personer som befinner sig i rök

Personerna som redan från början befinner sig i röken eller de som uppmärksammar branden genom att de möter röken har svårare att utrymma. De förstår säkert att de är i en allvarlig situation, men även dessa personer behöver få information om vad som kan vara lämpligt agerande för att agerandefasen ska bli så kort som möjligt. Systemen som redovisas ovan kan i viss utsträckning vara behjälpliga även för dem i röken.

I flera fall har det observerats att bilister försöker att vända bilen i den rökfyllda miljön och köra ut (SHT, 2015). Från utredningar efter inträffade bränder kan det konstateras att detta sker och att det är svårt att genomföra. Det är dessutom stora risker förenade med att köra med bilen ut. Dels kan bilen krocka med tunneln och andra fordon och dels kan andra personer som utrymmer till fots bli påkörda. Sikten i dessa fall är i praktiken obefintlig. Det bör utredas om detta är ett beteende som bör uppmuntras och i så fall under vilka förutsättningar.

Människors förflyttning

Som alternativ till att köra med bil ut ur tunneln kan personerna försöka utrymma till fots, vilket också sker. Möjligheten att komma till en säker plats beror då på individernas fysiska förutsättningar att förflytta sig och att orientera sig i röken. Möjligheterna att förflytta sig i rök har studerats och det finns kunskap om förflyttningsbeteenden. Gånghastigheten i tät och irriterande rök ligger i storleksordningen 0,2 - 0,9 m/s beroende på siktsträcka (Frantzich & Nilsson, 2003). Dessa hastigheter ska jämföras med gånghastigheten utan rök som kan variera mellan 0,65 m/s och 1,9 m/s (Fruin, 1971) för en ordinär population.

Fridolf, Andrée, Nilsson och Frantzich (2014) redovisar också data för förflyttning i rök och konstaterar att det främst är siktnedsättningen som utgör begränsningen av gånghastigheten. Inga signifikanta skillnader konstateras baserat på underlagets lutning, typ av underlag (jämnt eller makadam), ålder, kön eller personlängd för aktuella försökspersoner. Tidigare erfarenhet från brand eller övning påverkar inte gånghastigheten (Frantzich & Nilsson, 2003). De låga gånghastigheterna resulterar i extremt långa utrymningstider för långa tunnlar. Redovisade gånghastigheter avser en västerländsk population och Ryu m fl (2006) konstaterar att personer från Korea har en normal gånghastighet som är 14-42% lägre jämfört med västerländska personer.

Personer som förflyttar sig i tät rök förflyttar sig oftast genom att känna sig för med händerna mot tunnelväggen (Frantzich & Nilsson, 2003; Fridolf, Ronchi, Nilsson, Frantzich, 2013), figur 7. Anledningen är att de dels kan orienteras sig i tunneln på det viset och också för att känna sig för så de inte går in i föremål som sticker ut från väggen eller taket. Vid olyckan i Gudvangatunneln (SHT, 2015) fick en person hjärnskakning på grund av att han slog i huvudet i ett utstickande föremål, vilket inte kan anses vara acceptabelt. I försök uppger personer att de är rädda att skada sig på föremål i tunneln (Fridolf, 2013). För att underlätta för dessa personer kan tunneln förses med handledare, som hjälper personerna att orientera sig, samt gångutrymmet

göras fritt från hinder som personerna kan skada sig på. Nyttan av handledare längs med utrymningsgångar har också påvisats vid försök av Boer (2002a) i vägtunnlar.

Figur 7. Person som förflyttar sig i tät rök genom att följa väggen med en hand.

Andra aspekter som är relevanta i det sammanhanget är att många tunnlar har en hög lutning, vilket ytterligare ökar belastningen för individerna. Kunskapen om hur lutningen påverkar möjligheten att förflytta sig längre sträckor är inte så stor. Det är känt att arbetsbelastningen ökar med ökad lutning. Med en lutning på 5 % ökar kroppens effektutveckling med 50 % och med en lutning på 10 % är arbetsbelastningen tre gånger så stor som för gång på horisontell yta (Jeffers, Auyang och Grabowski, 2015). Det innebär att uttröttning måste vara en faktor att beakta för att bestämma avstånd mellan räddningskammare. Det finns alltså flera faktorer som samtliga bidrar till ett förmodat behov av räddningskammare i långa tunnlar med kraftig lutning. Utgångspunkten är att personer ska försöka ta sig hela vägen ut till det fria men räddningskammaren kan fungera som ett alternativ när den första strategin inte fungerar.

Thompson, Nilsson, Boyce och McGrath (2015) argumenterar för att existerande data till stor del inte längre kan användas för att beskriva personers förflyttning. Anledningen är att befolkningen idag består av en ökad andel som är äldre, som är kraftigt överviktiga och att det finns fler personer med funktionsnedsättning som är aktiva i samhället. Det är känt att bland annat äldre och personer med funktionsnedsättning idag tar större del av samhällslivet än tidigare. Mycket av den information som är känd baseras på undersökningar som är framtagna med början på 1960-talet.

Sammantaget ger detta lägre förväntade gånghastigheter i genomsnitt. Den långsammare förmågan att förflytta sig måste beaktas i samband med analys och även andra aspekter såsom användning av t ex rullstol eller permobil, vilket kan innebära att personen upptar en större yta, bör inkluderas. Möjligheten att utrymma för personer med vissa rörelsenedsättningar har studerats av t ex Boyce, Shields och Silcock (1999), Rubadiri (1997) och Brand och Sörqvist (2000). Denna förändring av befolkningen kan påverka gånghastighet vid utrymning, uthålligheten vid utrymning uppför en brant lutande tunnel och förutsättningarna för att vistas i räddningskammare.

Underlagets betydelse för förflyttning

Att förflytta sig i tunneln bör ske på ett underlag som är jämt att gå på. Forskning visar dock att även vid ett ojämnt underlag så anpassar människorna sig till underlaget och går lika fort på grovt underlag (t ex makadam) som på slät yta (Fridolf m fl, 2013). Men för personer i rullstol, barnvagnar, äldre personer och barn kan underlagets utförande påverka gånghastigheten. Detta är dock inte undersökt men slutsatsen kan verka rimlig och bör gälla hela tunnelns markplan.

I de försök som Boer (2002a) genomförde utrymde personerna uppför lutande delar i tunneln (cirka 4,5 % lutning i båda riktningarna) men det gick inte att se någon skillnad mellan hastighet uppför eller nedför en tunnel (Norén & Winér, 2003) utan båda låg kring 1,4 m/s i en rökfri miljö. I dessa försök var gångvägen till en säker plats inte så lång (ca 100 meter) så någon uttröttningseffekt bör inte ha varit aktuell.

Utrymningsmarkeringar

Utrymningsmarkeringar bör finas och utformas på ett liknande sätt som för byggnader. Skyltar bör vara genomlysta. Från försök i tät rök kan det konstateras att genomlysta (emitterande) utrymningsskyltar syns genom röken om tunnelbelysningen är släckt (Frantzich och Nilsson, 2003).

För att personerna ska kunna hålla ut och förmås att fortsätta mot en säker plats bör de bli informerade om avstånd till en säker plats. Regelbundet återkommande utrymningsskyltar med avståndsinformation bör finnas vilket visat sig ha en positiv inverkan. Från de inträffade bränderna i Norge konstateras att personer gått långa sträckor, ibland flera kilometer. Det kan då hävdas att avståndet bör anges till tunnelmynningen baserat på dessa erfarenheter. Men möjligheten att sätta sig i säkerhet påverkas också av storleken och varaktigheten på branden. Vid utdragna förlopp måste det finnas säkra platser på fler ställen i tunneln men traditionella utrymningsvägar är vanligen inte ett alternativ. I det sammanhanget kan räddningskammare fungera som en tillfällig säker plats och avståndet anges till närmaste räddningskammare.

Informationsskyltar som anger riktning och avstånd till säker plats bör finnas på tunnelns båda sidor, figur 8. Denna information är främst relevant för individer som utrymmer genom tät rök och det kan på förhand inte konstateras på vilken sida tunneln de väljer att gå. Från försök har det också visat sig vara viktigt att informera om en säker plats (i de aktuella tunnlarna är detta räddningskammare) på den sida tunneln där räddningskammaren inte är belägen. På det viset undviks att personer som utrymmer passerar en räddningskammare. Skylten kan vara utformad på ett enkelt sätt och deltagare i försök med sådana skyltar anger att de uppskattas (Fridolf och Frantzich, 2015), figur 9.

Figur 8. Utrymningsskylt för tunnel

Figur 9. Utrymningsskylt i vägtunnel.

Utformningen av installationer i tunneln bör utformas så att de underlättar för bilisterna att besluta sig om önskade ageranden. Exempelvis bör utrymningsskyltar utformas på ett sätt så de känns igen, de bör placeras så att de är tydliga i jämförelse med bakgrunden (Sixsmith, Sixsmith och Canter, 1988 och Kobes, 2010) och meddelandet bör utformas så att innebörden är tydlig (Ronchi m fl, 2015). Detta gäller alla de system som man avser att bilisterna ska interagera med dvs traditionella utrymningsmarkeringar, VMS-skyltar och enklare dynamiska vägmarkeringar, se avsnitt 3.3. Som stöd för sådan utformning kan Gibsons affordance-teori användas, se avsnitt 2.4. Eftersom bilisterna sannolikt använder flera av landets tunnlar finns det en fördel om system i tunnlar har ett likartat utseende och funktion för att öka igenkänningseffekten.

Punktbelysning

Orientering i rök underlättas också av regelbundet återkommande belysningspunkter (Fridolf, 2013). Försök har visat att när avståndet mellan dessa är kort, i storleksordningen 10 meter, så förflyttar sig personerna med hjälp av dessa då de syns tydligare genom den täta röken i förhållande till andra ytor som belyses. Ljus som emitteras direkt från en ljuskälla uppfattas betydligt effektivare än ytor som belyses och ger ett reflekterat ljus (Jin, 1978). Det är samma effekt som ligger bakom rekommendationen att utrymningsskyltar bör vara genomlysta eller i sig själva emitterande istället för att vara belysta.

Markering av utgång med belysning

Det kan nämnas att även blinkande lampor vid räddningskammaren eller eventuella utrymningsvägar kan ha en positiv effekt för att de ska uppmärksammas avbilister som utrymmer. Försök har visat att dessa underlättar inte bara tolkningen av att händelsen är associerad med brand utan även ökar sannolikheten att personer går till dörren till räddningskammaren, se Nilsson, Frantzich och Saunders (2005), Nilsson och Frantzich (2007) och Frantzich m fl (2007). Grön färg på dessa lampor associeras med säkerhet, vilket är gynnsamt. Orange ljus syns bättre genom röken men har inte samma koppling till säkerhet (Frantzich och Nilsson, 2003). Systemen, vilka beskrivs utförligt i föregående avsnitt, har alltså även en effekt under agerandefasen.

Lokalt utrymningslarm vid utgång

Möjligheten att hitta en eventuell utrymningsväg eller ingång till en räddningskammare förbättras om denna förses med ett enkelt lokalt utrymningslarm, se Boer (2002b). Från experiment i olika tunnlar, Fridolf m fl (2013) och Fridolf och Frantzich (2014) samt Ronchi och Nilsson (2013), uppfattar personer som utrymmer genom tät rök en utrymningsväg tidigare om de samtidigt hör ett lokalt talat utrymningslarm. I de aktuella experimenten hördes larmet enbart i närheten, i storleksordningen 30 meter, från utgången och innebar att många försökspersoner valde utgången baserat på bland annat att det fanns ett ljudmeddelandet. I aktuella fallet användes ett enkelt talat meddelande, nämligen "Ljudet kommer från en utgång, följ ljudet för att komma ut". I enkelrörstunnlar kan samma teknik användas för att markera ingångarna till räddningskammare.

Orienteringsassistans

Förutom fasta installationer i tunneln kan hjälp med att orientera sig skapas med mobila lösningar. Idag har i princip alla tillgång till en smartphone som kan hantera mobilapplikationer. En sådan "Tunnelapp" skulle kunna användas för att förmedla information om lämplig förflyttningsriktning och även information om lämpligt agerande för de som befinner sig i röken, se figur 3. Det finns även möjligheter idag att ganska detaljerat lokalisera en mobiltelefon, vilket kan hjälpa både VTS att identifiera antalet individer i en tunnel men också att förmedla denna information till övriga personer i tunneln så de i viss utsträckning kan "se" varandra genom röken. Detta kan hjälpa dem som kör med bilen genom röken att undvika att köra på andra personer som utrymmer och de som utrymmer genom röken till fots att undvika att bli påkörda. Ett sådant system kräver en god beständighet mot brandpåverkan. Detta område kan på sikt utvecklas och idag finns bara tankar och idéer.

Utrymning vs. stanna i bilen

Från utredningar efter inträffade bränder i tunnlar kan det också konstateras att vissa personer väljer att inte lämna sina fordon. Orsaken till att bilisterna väljer att inte lämna sina fordon kan vara flera. Detta kan bero på att man inte vill lämna sin bil eftersom den utgör ett betydande värde men också att det normala beteendet i en tunnelmiljö är inte att gå ut i tunneln och lämna bilen. Detta är ett tydligt exempel på beteende som kan förklaras med informationell social påverkan. Det innebär att bilisten verkligen måste vara övertygad om att ett lämpligt beslut är att lämna fordonet och utrymma till fots, en så kallad "övertygandetröskel" måste övervinnas.

Det finns både fördelar och nackdelar med att stanna kvar i bilen. Fördelen är att luften sannolikt är bättre inne i bilen om bilen stannat i den rökfyllda delen. Med bilens luftcirkulation satt i recirkuleringsläge kan bilisterna stanna där en tid. Nackdelen är att förhållandena i tunneln kan förvärras så att den egna bilen inte förblir en säkrare miljö. Detta beror på hur brandförloppet utvecklas och var bilen är placerad i förhållande till branden. Om bilisterna i ett senare läge tvingas lämna bilen är förhållandena ute i tunneln sannolikt mycket värre jämfört vid tidpunkten då de beslutade sig för att stanna kvar i bilen. Vid branden i Mont Blanc 1999 omkom flera bilister sittandes i sina bilar då de upptäckte branden alltför sent (Duffé & Marec, 1999). I haveriutredningen efter branden i Gudvangatunneln (SHT, 2015) anger utredaren att bilradion kan användas för att uppmana bilisterna att stanna kvar i sina bilar vilket tyder på att detta är en godtagbar procedur. Det finns liten kunskap om hur länge en bil kan betraktas som en säker tillflyktsplats och under vilka förutsättningar som detta kan betraktas som ett lämpligt råd att förmedla till bilisterna.

Räddningskammare

Räddningskammare eller liknande kan fungera som en tillfällig säker plats för dem som av någon anledning inte kan ta sig hela vägen till det fria t ex om utrymningen sker uppför en brant lutande tunnel i tät rök, figur 10. En sådan utrymningssituation kan vara mycket ansträngande för många personer också om utrymningen sker i en rökfri miljö. Alternativet till förflyttning till en räddningskammare kan vara att behöva gå till fots i flera kilometer i tät rök vilket var fallet vid bränderna i Gudvangatunneln 2013 och Oslofjordstunneln 2011.

Figur 10. Exempel på räddningskammare, samt dess interiör.

Erfarenheter från tunnelbränder har visat att personer söker sig till mer säkra platser om de inte kan ta sig hela vägen ut till det fria. Vid branden i Oslofjordtunneln (SHT, 2013) kunde utrymmet mellan tunnelkonstruktionen och bergväggen används som tillfälligt väntplats eftersom luften var bättre där än i själva tunneln. Vid branden i Mont Blanc använde flera av bilisterna de räddningskammare som fanns i den tunneln (Duffé & Marec, 1999). I det fall omkom några personer som väntade i en räddningskammare vilket indikerar att utformningen och tiden som den ska kunna användas måste anpassas efter förväntade brandförlopp och brandplatser.

Erfarenheter från användning av räddningskammare finns främst från gruvindustrin och bland företag som bygger tunnlar (Ingason m fl, 2010). Utformningen av räddningskammare för ovana bilister måste därför beakta denna skillnad så att bilisterna uppfattar miljön inne i kammaren som säker och godtagbar. Om räddningskammaren inte uppfattas som säker och godtagbar är risken stor att bilisterna inte stannar. Några inledande försök för att undersöka personers uppfattning situationen baserat på räddningskammares utformning redovisas i Andrée m fl (2013). De resultat som författarna kommer fram till handlar mer om att räddnings-kammaren ska vara trevlig och inbjudande att vistas i även om rena tekniska aspekter såsom tillräckligt med frisk luft, tillgång till vatten och toalett samt möjligheter till kommunikation också är väsentliga.

3.5 Övriga undersökningar och erfarenheter

En del av den forskning som genomförts anknyter inte direkt till den använda uppdelningen i utrymningssekvensen i avsnitten ovan. Det gäller till exempel aspekter som är kopplade till brandrisken dvs som inkluderar frekvensaspekten i olyckan eller då arbetena är av mer generell karaktär. I detta avsnitt redovisas en del sådan forskning som bedömts som väsentlig för att få en bredare förståelse för utrymningsproblematiken.

I ett av de större EU-projekten som genomförts, UPTUN (Papaioannou och Georgiou, 2003), redovisas huvudsakligen generella slutsatser kring människors beteende vid brand. Mest fokus ligger på människors beteende i samband med normal situation vilket är väsentligt eftersom det leder till en minskad frekvens för olyckor totalt sett och därför också rimligen påverkar frekvensen för brandolyckor i positiv riktning. Man poängterar att tunnelns fysiska miljö är betydelsefull för att skapa en så kallad "comfortable" körning. Verktyg som kan användas är belysning, vägskyltar som anger avstånd och ljus målning på väggar och tak. En annan aspekt som påverkar den uppfattade körmiljön är anpassning av ljusförhållandena utanför och inne i tunneln, vilken bör ändras stegvis. Även i Martens & Jenssen (2012) poängteras att en attraktiv och väl utformad tunnelmiljö för normala förhållanden har en gynnsam effekt för att hålla olyckor med brand på en lägre nivå. Författarna tar också upp andra aspekter i insatsarbetet, sådana som föreliggande rapport egentligen inte beaktar, såsom ledningsfunktioner och procedurer för en vägtrafikcentral och berörda myndigheter som ingår i olyckshanteringen liksom insatser som bör göras mot yrkesförare.

Colombo (2001) ger i det sk Nedies project, Lessons learnt from tunnel accidents en översikt från utredningar efter några stora inträffade tunnelbränder. Han redovisar slutsatser man dragit från dessa incidenter, bland andra

- att tunga fordon ska inspekteras innan de kör in i tunneln,
- att information till bilister i tunneln är nödvändig (kommunikationssystem),
- att trafik utanför tunneln måste stoppas vid brand,
- att nödtelefoner och brandsläckare ska finnas i tunnlar,
- att ventilationsflödet inte ska ändras vid brandtillfället och
- att det måste finnas en trafikövervakning som kan agera vid brand.

Han anger vidare att det förekommer flera dödsfall i eller nära bilarna vilket indikerar att fördröjning att utrymma förekommer. Problem förekommer främst om branden är stor och en liten brand innebär sällan stora problem med omkomna personer. Men slutsats är att utrymningslarm som kan initiera en utrymning samt instruktioner om vad som är lämpligt agerande är viktig.

Fraser-Michell och Charters (2005) presenterar en bra sammanställning kring inträffade tunnelolyckor (vägtunnlar och järnvägstunnlar) och kopplar de observerade agerandena till utrymningsförloppet. De utgår från ingenjörsmodellen enligt kapitel 2 för att strukturera förloppet. Beskriver i generella termer vad som sker under de tre förloppen; recognition, response och movement. De poängterar att under recognition-fasen är det viktigt med tydliga informationsvägar för att undvika fördröjning; mellan nivåer inom myndigheter, mellan myndighet och allmänheten samt mellan individer inom allmänheten.

Response-delen beskriver de genom att anknyta till exempel på beteenden från inträffade olyckor. De ageranden som redovisas förekommer i flera av de granskade olyckorna;

- non-egress behaviour (brandsläckning, larma brandkåren, rädda andra personer, rädda egna föremål),
- gruppbildning (aktiviteter som sker tillsammans med andra individer),
- oviljan att lämna sitt eget fordon (vanligt är att försöka vända sitt fordon och köra ut, egna fordonet uppfattas som en trygg plats, i flera fall går personen ur fordonet men stannar kvar och ser vad som händer, personer försöker köra förbi branden, busspassagerare noteras vilja ta med sitt bagage).

För själva förflyttningen konstaterar de att personer helst vill gå mot en känd och trygg utgång och i sammanhanget är tunnelportalen den kända utgången vilket förklarar att många går dit. Tvärförbindelser används främst om någon tar första initiativet (man gör som andra gör). Förflyttningen sker bort från branden vilket kan innebära att personerna går i samma riktning som röken sprids, vilket fick en enorm konsekvens vid branden i Kaprun år 2000 där många gick uppåt i rökens riktning och omkom. En reflektion kring detta (inte av Fraser-Mitchell & Charters) är att detta förlopp med rökspridning uppåt i tunnlar även kan förekomma i flera norska tunnlar med kraftig lutning.

4 Relevanta studier för aktuella tunnlar

Ett av målen med arbetet är att presentera studier som genomförts vilka kan anses vara särskilt relevanta för långa tunnlar och tunnlar som har en kraftig lutning. Med långa tunnlar avses de som är längre än 3 km och branta tunnlar har en lutning som överstiget 5 %.

Även om litteraturgenomgången varit omfattande har den inte resulterat i några studier som särskilt inriktats mot att undersöka förutsättningarna för utrymning just för dessa aktuella tunnlar. Därmed inte sagt att det inte finns information, kunskap och forskning som kan vara applicerbara för dessa. Mycket av den forskning som redovisas i rapporten kan anses vara relevant även för de mycket långa eller branta tunnlarna. Det handlar mer om att identifiera de typiska problemet för tunnlar som är långa och branta och dessutom som är utförda för dubbelriktad trafik.

De mest relevanta skrifterna som direkt anknyter till aktuella tunnlar är de olycksutredningar som genomförts efter inträffade bränder vilka i rapporten representeras av utredningarna efter bränderna i Oslofjordtunneln 2011 (SHT, 2013) och Gudvangatunneln 2013 (SHT, 2015). Branden i Oslofjordtunneln behandlas också i en artikel av Njå (2016) som intervjuat inblandade. Njå (2016) konstaterar att det finns skillnader mellan vilka säkerhetsrelaterade installationer, avsedda för att underlätta självräddning, som bilisterna förväntar sig ska finnas i tunneln och hur denna faktiskt är utformad. Utredningarna går igenom förloppen och värderar konsekvenserna av dessa utifrån möjligheten till självräddning. Vissa brister kan också identifieras, nämligen både administrativa och sådana som gäller tunnlarnas fysiska utformning. SHT rekommenderar vidare generella åtgärder för att förbättra säkerhetsarbetet.

Sett utifrån ett utrymningsperspektiv handlar mycket av problemställningarna vid en tunnelbrand om att tidigt detektera en brand och att därefter underlätta för personer att utrymma. Det som kännetecknar förutsättningarna för bilisternas möjlighet till utrymning är

- att de saknar information om vad som har hänt och vad som förväntas av dem.
- att de har svårigheter att tolka situationen eftersom signalerna kan vara otydliga och inte nödvändigtvis associerade till brand.
- att det finns svårigheter för dem att sätta sig i säkerhet, antingen genom direkt förflyttning till det fria eller genom förflyttning till en annan säker plats t ex en räddningskammare.

Utifrån dessa tre huvudproblem kan relevanta studier identifieras och utgöra ett vidare material som underlag för ett framtida förbättringsarbete. Mycket av redovisningen i kapitel 3 beskriver den forskning som anknyter till dessa tre problemställningar. De arbeten som författarna av denna rapport anser vara de mest relevanta och som anknyter till de tre punkterna ovan markeras i texten med understrykning. Det ska åter noteras att den forskning som genomförts inte direkt kan appliceras på de långa och branta tunnlarna, men resultaten kan ändå användas som underlag för vidare analyser gällande säkerhet vid brand.

Eftersom arbetet identifierat en rad områden där kunskapsläget är svagare föreslås en rad kommande forskningsaktiviteter. Dessa redovisas som kortfattade idébeskrivningar i kapitel 5.

4.1 Övriga relevanta studier

I övrigt citeras övriga arbeten som bedöms vara relevanta i texten ovan. Utöver dessa citerade referenser finns ytterligare dokumentation i referenslistan som, i förekommande fall, anses fungera som bakgrundsmaterial som ger en bredare förståelse för aspekter kring utrymning vid brand i tunnlar.

5 Framtida forskning

Litteraturstudien om tidigare forskning och slutsatser från flera av de olycksutredningar som granskats visar att det finns osäkerheter kopplade till (1) i vilken mån dagens tunnlar kan anses vara tillräckligt anpassade för att möjliggöra självräddning och (2) på vilket sätt som ett förbättringsarbete bör genomföras för att tillgodose det behovet. Uppenbart är att det finns ett behov av vidare forskning för att säkerställa att tunnlar blir tillräckligt säkra, med beaktande av kostnader för åtgärderna, genom att minska den osäkerhet i kunskap som trots allt finns. Inom ramen för projektet föreslås nedanstående forsknings- och utvecklingsinsatser. Fokuseringen för projekten bör vara mot långa enkelrörstunnlar med kraftig lutning som passerar under vatten. Vissa av förslagen är redan idag relativt väl utforskade, medan kunskapsläget för andra områden är i det närmaste obefintligt. En systematisk inventering och översiktlig sammanställning av forskningsaktiviteter bör ske och finnas allmänt tillgänglig. Det bör beaktas att flera av projektförslagen kan integreras, t ex kan arbeten om information till bilister med dynamiska system integreras med vägledning genom rök.

5.1 Förflyttning i tunnlar med kraftig lutning

Kunskapen om människors möjligheter till förflyttning uppför lutande vägar är liten. Speciellt gäller detta uttröttningseffekter för långa uppförslutningar. Undersökningar bör göras för att studera gånghastighet, kapacitet mm för en representativ population och för olika lutningar, upp till cirka 10 %. Om möjligt kan även aspekter som påverkar förflyttningen, till exempel närvaron av irriterande ämnen och dålig sikt, inkluderas. Försök bör göras i en tunnelliknande miljö för att erhålla en hög grad av realism.

5.2 Utformning av räddningskammare

Användning av räddningskammare utpekas som en möjlighet för att säkerställa personskyddet i långa enkelrörstunnlar. Utformningen av dessa bör vara sådana att det är troligt att de uppfattas som en säker plats för de som befinner sig i en tunnel vid brand. Det innebär att både tekniska och förtroendeskapande egenskaper ska beaktas. Forskning bör utföras för att klargöra vilka aspekter som är väsentliga i utformningen. Drifttiden för en räddningskammare bör också utredas, både ur ett tekniskt perspektiv och ur ett emotionellt perspektiv.

5.3 Information med enkla dynamiska vägskyltar

I flera större tunnlar finns möjlighet att kommunicera med bilister via så kallade VMS och TIS. Sådana är kanske inte alltid möjliga att montera i många befintliga tunnlar utan enklare system som kombinerar dynamiska hastighetsskyltar med möjligheter till annan information bör undersökas. Forskning bör inriktas på vilken typ av meddelanden som är lämplig att förmedla till trafikanter, hur denna bör utformas och hur mycket information bilisterna kan tillgodogöra sig. Arbetet bör även inkludera systemutformningen, dvs hur de ska användas i en tillämpbar situation, vilket sannolikt inkluderar någon form av system för detektion av brand.

5.4 Kommunikation via VII

Användningen av Vehicle Infrastructure Integration (VII) kan komma att underlätta för samtliga aktörer vid en tunnelbrand. En pilotstudie bör genomföras för att kartlägga framtida möjligheter att förmedla information till och från en bil som befinner sig i en tunnel. Kartläggningen bör utföras brett eftersom olika system utvecklas och det är idag inte möjligt att definiera hur tekniken kommer att utvecklas.

5.5 Vägledning genom tät rök

Många av de system som idag används för information vid utrymning utgår från att de ska användas i rökfri miljö. Men om utrymningen måste ske genom tät rök så behöver de utrymmande personerna få besked om exempelvis avstånd till en säker plats, vägledning för att

kunna orientera sig och få en miljö som är tillrättalagd för förflyttning. Arbetet inriktas på att utvärdera behovet de utrymmande har och utveckla system för att informera och vägleda personer till det fria. I arbetet bör det ingå att studera nyttan med vägledande markeringar, ledbelysning, handledare, ljudsignaler, tillfälliga väntplatser för kortvariga uppehåll under utrymningen och möjligheter till kommunikation med VTS.

5.6 Utveckling av strategier för brand i tunnel

Rutiner och andra procedurer bör utvecklas så att de överensstämmer med de förväntningar som bilisterna har vad gäller självräddningsprincipen. Idag finns en princip att tunnelns brandventilation aktiveras så snart en brand detekterats vilket inte alltid stämmer överens med önskemål från bilister som försöker utrymma. En integrerad strategi bör undersökas för att på sikt eventuellt genomföras. Denna strategi bör inkludera räddningstjänstens insats.

5.7 Information via smarta telefoner

Bilister som kör i en tunnel där brand utbrutit är eller kommer att vara i behov av information om vad som händer och vad de förväntas göra. En kommunikationsväg är via en applikation i mobiltelefonen som kan aktiveras av VTS vid brand eller annan olycka. En pilotstudie bör inledas för att undersöka behoven av en sådan tunnelapp och ge rekommendationer för hur den bör utformas och integreras med andra system, en så kallad feasability study. Möjligheten att kombinera information med positioneringsfunktioner bör undersökas för att relevant information ska kunna presenteras beroende på var i tunneln personen befinner sig, vilket påverkar behovet och utformningen av den specifika informationen. Systemet med dedikerad information för olika platser finns under utveckling vid vissa större varuhusföretag, men forskning i en tunnelmiljö saknas ännu.

5.8 Förhandsinformation och utbildning

Rapporten tar upp forskning som indikerar att utbildning och information till bilister innan en olycka inträffar är betydelsefull för agerandet den gång branden uppstår. Däremot är det inte väl utvecklat hur denna utbildning och information ska kunna förmedlas till bilister eftersom det finns en rad olika typer av bilister som kan ha olika behov och förutsättningar att ta emot ny kunskap, t ex yrkesförare, bilister som redan har körkort, utländska bilister (turister), personer som håller på med sin körutbildning, etc. Frågan är hur dessa ska informeras om agerande vid brand i tunnel och vad de kan förvänta sig i den situationen. I uppgiften kan det ingå att utreda möjligheterna att använda körsimulatorer i samband med körskoleutbildning. Dessa synpunkter delas även av Riksrevisjonens (2016) utredning som pekar på behovet av ökad kunskap bland bilister i allmänhet.

5.9 Tunnelns utformning

De flesta vägtunnlar är förhållandevis mörka och endast försedda med takmonterad belysning. Detta innebär att tunneln uppfattas som en främmande miljö som inte inbjuder till närvaro. Arbete bör genomföras för att undersöka vilka faktorer som är väsentliga för bilisternas uppfattning av tunnelmiljön och som kan vara väsentliga i samband med en utrymningssituation. Exempel på faktorer som skulle kunna vara viktiga är belysningsnivå, kulör på väggar och tak, ljudmiljö, materialval och tvärsnittets utformning. Sannolikt har utformningen också en påverkan på den normala trafiken i tunneln och normaldriften bör inkluderas i arbetet. Sannolikt finns forskning inom området, men utveckling bör ske för att anpassa till befintliga tunnlar.

5.10 Brandsläckning

Flertalet av de som är nära en brand gör försök att släcka branden med egen eller tunnelns brandsläckare. Utgångspunkten är att brandsläckare i tunneln placeras på speciella räddningsstationer med regelbundet intervall. Behovet av sådana släckare bör undersökas för att

utreda om de ska finnas kvar och om de ska vara fler eller ersättas med mer anpassade släcksystem. Användningen av brandsläckningsutrustning bör undersökas utifrån bilisternas uppfattning av situationen och hur en släckinsats stämmer med övriga förväntade beteenden vid en brand. I första hand är det brandsläckningsutrustning som den enskilde använder i enlighet med självräddningsprincipen som ska undersökas. Ett utvidgat arbete kan även inkludera fasta släcksystem.

5.11 Möjligheter att vända i tunneln

En bärande princip för möjligheten att utrymma är att bilister kan vända bilen och köra ut innan röken når dem. Förutsättningarna för hur detta ska kunna ske på ett säkert sätt bör undersökas och speciellt för fallen där trafikflödet inte är ringa. Behovet av vändplatser och utformningen av dessa bör utredas liksom kopplingen till information som ges till bilisterna i händelse av brand. Arbetet bör inkludera information till bilister beroende på vilken typ av fordon de kör.

5.12 Egen bil som tillfällig säker plats

En strategi som används för utrymning är att bilisterna försöker köra ut till det fria, även om utrymningen sker genom röken. Det innebär att röken gradvis kommer in i bilens passagerarutrymme. I litteraturgenomgången har det inte framkommit några undersökningar som studerat hur länge bilens miljö kan vara godtagbar. En sådan undersökning bör även inkludera övriga aspekter med att köra i den täta röken, då detta i sig är ett riskfullt agerande. Arbetet bör inkludera aspekter som har med bilens förmåga att motstå rökinträngning och även en viss grad av termisk påverkan. Enligt haverikommissionens utredning (SHT, 2015) efter branden i Gudvangatunneln 2013 antyds att VTS ska kunna uppmana personer att stanna kvar i sina bilar vid en brand, även om de inte kör mot tunnelmynningen. Denna strategi bygger på att brandförloppet inte är så allvarligt och att bilisten inte befinner sig nära branden eftersom det inträffat fall då personer omkommit sittandes i sina bilar. Det bör utredas i vilken omfattning detta råd ska ges.

6 Case-studie Ålesundstunnlarna

Ett av studiens mål är ge förslag till säkerhetshöjande åtgärder för de två enkelrörstunnlarna Ellingsøytunnelen och Valderøytunnelen. Dessa två tunnlar utgör tillsammans ett gemensamt tunnelsystem utanför Ålesund. Förslagen baseras på de tidigare resonemangen som anknyter till människors beteende och förutsättningar för deras beslutsfattande och följande utrymning givet de aktuella förhållandena. Detta kan innebära att utformningen kan avvika från de krav som ställs på tunneln utifrån föreskrifterna från Statens vegvesen. Förslagen måste i nästa steg utvecklas till praktisk tillämning, vilken inte omfattas av rapporten.

För att kunna föreslå genomtänkta säkerhetshöjande åtgärder genomfördes en behovsanalys för olika trafikantgrupper vid brandutrymning i de två tunnlarna. Analysen, vilken inspirerats av en studie genomförd av Groner (2009), bygger på att brand- och utrymningsscenariot först tydligt definieras. Scenariot behöver inte kvantifieras, utan det är tillräckligt att kvalitativt beskriva branden och utrymningsförutsättningarna i tunneln. Därefter identifieras olika typer av trafikanter baserat på vilka utrymningsförhållanden de utsätts för, t ex om de måste utrymma genom rök eller kan gå/köra i en rökfri miljö, etc. Därefter bestäms det önskade utrymningsbeteendet för varje typ av trafikant, dvs det beteende som de lämpligen följer för att snabbt komma till en säker plats. Avslutningsvis identifieras det behov, t ex informationsbehov eller behov av vägledning, som respektive typ av trafikant har för att de ska agera enligt det önskade beteendet, och förslag ges på vilka tekniska system som kan tillgodose trafikanternas behov.

I nedanstående avsnitt beskrivs först brand- och utrymningsscenariot för Ellingsøytunnelen och Valderøytunnelen. Detta innefattar även förslag på ändringar av den befintliga säkerhetsstrategin in tunnlarna, nämligen styrningen av brandgasventilationen. Därefter beskrivs de olika typerna av trafikanter, deras önskade beteende och behov, samt förslag på tekniska system som kan tillgodose trafikanternas behov.

Generellt bör systemen utformas på ett robust sätt så att otydligheter för bilisterna minimeras och att personalen i VTS inte ska behöva stå inför tvetydiga beslutsalternativ.

Resonemangen nedan utgår från att en olycka uppstått. Tekniska system för att detektera exempelvis varma bromsar eller inspektioner av tunga fordon som görs innan de kör in i tunneln bör övervägas och värderas med avseende på nytta och besvär (kostnad). Analysen utgår från att det finns ett utrymningsbehov. Mest fördelaktigt är naturligtvis om en brand och utrymning kan undvikas helt och hållet.

6.1 Brand- och utrymningsscenario

Det scenario som används vid analysen utgörs av en medelstor brand, dvs en buss eller en lastbil med lite last (ca 30 MW), i en av de två tunnlarna. Brandens placering ansätts inledningsvis till att vara nära mitten av tunneln då det leder till allvarliga utrymningsförhållanden. I tunneln finns ett naturligt vinddrag på ca 1,5 m/s i riktning mot Ålesund.

Den normala säkerhetsstrategin i detta scenario hade varit att, när branden rapporteras/detekteras, starta fläktarna i riktning från Ålesund för att underlätta räddningstjänstens insats. Dock har inträffade incidenter, t ex branden i Gudvangatunneln, visat att situationen för utrymmande personer kan drastiskt försämras om brandgaserna först rör sig i en riktning pga det naturlig vinddraget och sedan omvänds med mekanisk ventilation. I detta fall fattar personer sitt vägvalsbeslut baserat på en vindriktning och en stund senare överrumplas de av röken bakifrån. Det rekommenderas därför att den mekaniska ventilationen används för att bibehålla den naturliga ventilationsriktningen i tunneln, vilket också utgör en del av det valda scenariot.

Vid brand stängs båda tunnlarna med bommar. För att förhindra köbildningen precis framför tunnlarna på Ellingsøy kan bommar även placeras en bit innan tunnelmynningen (vid avfartsvägen ut till Ellingsøyvägen) tillsammans med hänvisning ut på Ellingsøyvägen.

Nuvarande strategin att stänga båda tunnlarna även om det bara brinner i en av dem bibehålls, men det bör i framtiden undersökas vad motivet till detta beslut är eftersom det kan finnas skäl att bara stänga den tunneln där det brinner för att minska konsekvensen för samhället.

Vid rapportering/detektion av brand ska samtliga säkerhetssystem aktivera, dvs tunnlarna stängas med bommar och alla utrymningssystem startas. Enligt tidigare ska även den mekaniska ventilationen aktiveras för att bibehålla den naturliga ventilationsriktningen. Ett lågt flöde bör eftersträvas i syfte att sprida röken långsamt och inte erhålla höga bullernivåer i den brandutsatta tunneln.

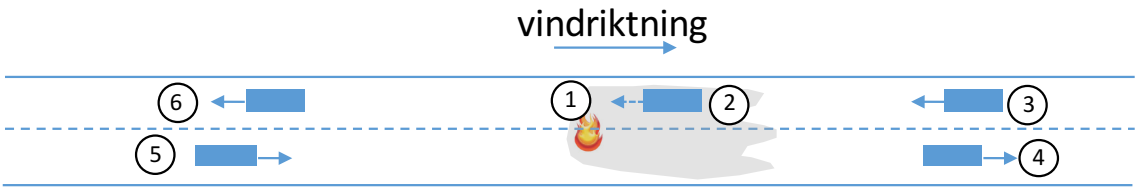
Enligt tidigare ansattes brandens placering nära mitten av tunneln. Ovanstående scenario är visserligen ett specialfall, men många av slutsatserna nedan anses vara relevanta även för andra scenarier.

6.2 Typer av trafikanter och analys

Trafikanter kan potentiellt delas in i många olika typer beroende på deras roll och egenskaper, t ex bilister, bussförare eller lastbilschaufförer. Samtliga av dessa roller har olika erfarenheter som sannolikt påverkar deras beteende vid utrymning. I följande analys görs dock en uppdelning baserat på de utrymningsförhållanden som personerna utsätts för. Denna indelning görs eftersom förhållandena påverkar hur personerna agerar och vilken information de behöver. Totalt kan sex olika typer av trafikanter identifieras (se figur 11):

1. Trafikant som befinner sig i brandens omedelbara närhet
2. Trafikant som kör eller står stilla i rök (nedströms)
3. Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (nedströms)
4. Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (nedströms)
5. Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (uppströms)
6. Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (uppströms)

I nedanstående avsnitt beskrivs de olika typerna av trafikanter tillsammans med deras önskade utrymningsbeteende, behov och förslag på tekniska system som tillgodoser behoven. Dessutom görs noteringar om hur hänsyn bör tas till kraftig lutning i tunneln.



Figur 11. Identifierade kategorier med bilister som befinner sig i en vägtunnel med dubbelriktad trafik i samband med en brand.

6.2.1 Trafikant i brandens omedelbara närhet – typ 1

Trafikant typ 1 ser branden (eller en olycka) i ett tidigt skede, men kan även avgöra vilket håll röken förflyttas, dvs det naturliga vinddraget. Utifrån denna information kan trafikanten avgöra åt vilket håll han/hon ska utrymma och förhoppningsvis besluta sig för att utrymma bort från röken. Detta innebär att större delen av utrymningen kan ske i rökfri miljö om scenariot följs, dvs om det naturliga vinddraget upprätthålls.

Önskat utrymningsagerande: Trafikanterna kan om möjligt göra en första släck- och räddningsinsats i de fall det är möjligt. Därefter ska de utrymma i rökfri miljö till en tunnelportal.

Behov: Trafikanterna behöver veta var brandsläckare och nödtelefon finns, dvs nödstationernas placering i tunneln. De anses inte behöva ytterligare information för att hitta vägen ut i den rökfria miljön, men kan fortfarande ha nytta av information som i huvudsak är avsett för andra typer av trafikanter, t ex avstånd till säker plats.

Tekniska system (utrymning): I syfte att tillgodose behovet behövs tydligt markerade nödstationer i tunneln.

6.2.2 Trafikant som kör eller står stilla i rök (nedströms) – typ 2

Trafikant typ 2 hinner köra så långt att de tvingas stanna i den del av tunneln som är rökfylld. Detta kan bero på att de antingen står nära branden och överraskas av att vara omslutna av röken eller så kör de in i röken eftersom de inte hinner stanna. Alternativt är det trafikanter som är mycket nära branden och inte kan eller vill passera förbi branden i tunneln och därför utrymmer i samma ritning som röken. Trafikant typ 2 kan även inledningsvis vara en trafikant typ 3 som försöker vända sitt fordon i en rökfri miljö, men som tar lång tid på sig för att utföra manövern (eller tvingas avsluta vändningen).

Önskat utrymningsagerande: Trafikanterna måste sakta ner och stanna om de omsluts av röken medan de kör. I normala fall rekommenderas det inte att de vänder sitt fordon och kör ut ur tunneln, eftersom risken att köra på någon som utrymmer till fots är stor. De bör istället lämna bilen och till fots bege sig till en säker plats. Säker plats kan antingen vara en räddningskammare eller tunnelmynningen.

Behov: Trafikanterna är medvetna om att de befinner sig i en rökfylld miljö och behöver få information att dels påbörja förflyttningen och dels att gå i rätt riktning. Behovet av information måste tillgodoses via system som inte enbart är beroende av att bilisten ser informationssystemet eftersom sikten i den rökfyllda delen kan förväntas vara minimal. Trafikanterna har således behov av taktila, akustiska och visuella system. Under förflyttningen måste trafikanterna ha vägledning för att kunna orientera sig i röken och att hitta till säker plats. Sannolikt behövs räddningskammare för att möjliggöra för trafikanterna att stanna där under en längre tid eller för att temporärt vila (se separat beräkning i bilaga A som exemplifierar vissa av principerna för en sådan behovsanalys).

Tekniska system (utrymning): Snabb och tydlig information (flera signaler samtidigt) behövs för att få bilisterna att lämna sina fordon och bege sig mot en säker plats. Detta ställer krav på tidig detektering, varför det rekommenderas att någon typ av detektionssystem installeras, t ex detektion av stillastående fordon med CCTV (prio 1) eller branddetektorer (prio 2). Vid misstänkt brand ska samtliga relevanta system aktiveras.

Det bör undersökas om akustiska signaler, t ex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, kan användas i syfte att fånga uppmärksamheten. Även användningen av radioinbrytning förespråkas av samma anledning. Om möjligt bör de akustiska signalerna, t ex radioinbrytning och talade meddelanden, också informera trafikanterna om branden och eventuellt vad de ska göra, dvs att de bör lämna sina fordon och utrymma till fots eftersom risken är stor att de kör på andra bilister om de försöker köra ut med bilen. Denna information är ett komplement till röken, och behövs för att trafikanterna snabbt ska lämna sina fordon.

Vägledande markeringar och ledbelysning bör monteras längs med båda tunnelväggarna och vid position för räddningskammare ska information om att en kammare finns på motstående sida. Lämpligen ska den vägledande markeringen innehålla information om avstånd till säker plats i respektive riktning. Någon form av handledare längs med väggen underlättar förflyttningen.

Räddningskammare bör förses med lokalt utrymningslarm som hörs på ca 30 meters avstånd, dvs en ljudfyr. Dessutom bör man undersöka hur räddningskammare ska inredas för att trafikanterna ska känna sig trygga och vilja vistas där. Idag är forskningen inom detta område begränsad, men initiala resultat tyder på att det åtminstone måste finnas ett tvåvägskommunikationssystem (kommunikation med bemannad plats) i räddningskammaren.

I framtida tunnlar kan även tunnelappar användas för att skicka meddelanden och ge instruktioner. Denna typ av teknologi måste dock utvecklas och strategi för information och utbildning måste tas fram.

Notering: Utrymning kommer sannolikt att ske uppför en brant lutande väg. Detta medför att utmattning bör beaktas. Gånghastigheten kommer troligen inte att påverkas av annat än dålig sikt och brandrökens toxiska effekt på förflyttningsförmågan.

6.2.3 Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (nedströms) – typ 3

Trafikant typ 3 är initialt inte medvetna om att något har hänt. Miljön som de kör i är rökfri och från deras perspektiv är situationen inledningsvis normal. Trafikanterna kan eventuellt få signaler från mötande bilister, t ex helljusblink. Förutsättningarna liknar de som gäller för trafikant typ 5, men situationen är avsevärt mycket allvarligare för trafikant typ 3 eftersom de kör mot branden och röken. De kommer således att möta röken om de inte agerar tidigt.

Önskat utrymningsagerande: Det är önskvärt att trafikanterna saktar ner, vänder sitt fordon och kör ut i en rökfri miljö. Detta måste hinnas med innan de nås av röken. Stora fordon kan om möjligt använda en vändnisch (snunisje), men om detta inte är möjligt måste de överge sitt fordon och gå eller ”lifta” ut ur tunneln.

Behov: Trafikanterna måste snabbt bli varse och informeras om branden för att kunna fatta beslut om att utrymma. Denna information måste vara mycket tydlig och övertygade eftersom de i de flesta fall inte ser någon rök. Därefter måste de informeras om att de ska vända och förare till stora fordon att de ska parkera och utrymma på annat sätt. Stora fordon omfattar buss, lastbil och personbil med släp. Det finns ett behov av att sänka hastigheten för att inte köra på trafikanter eller krocka med andra fordon, t ex trafikant typ 4.

Tekniska system (utrymning):

Trafikant typ 3 är stort behov av snabb information för att inte utsättas för farliga förhållanden. Precis som för trafikant typ 2 ställer detta krav på tidig detektering, varför det rekommenderas att någon typ av detektionssystem installeras, t ex detektion av stillastående fordon med CCTV (prio 1) eller branddetektorer (prio 2). Vid misstänkt brand ska samtliga relevanta system aktiveras.

För att trafikanterna ska påbörja utrymning och för att säkerställa säker vändning av fordon i tunneln bör följande system finnas:

- Dynamiska hastighetsskyltar som sänker hastigheten[2] till 30 km/h
- Dynamiska skyltar med information om att trafikanterna ska vända om.
- Dynamiska skyltar om att brand har utbrutit och eventuellt instruktion om utrymning.

Dessa skyltar ska vara försedda med orangefärgade blinkande lampor som fångar uppmärksamheten. Det bör undersökas om det även går att förmedla information om vem som ska vända om respektive stoppa sitt fordon med visuella system, eller om denna kunskap kan uppnås med utbildning istället.

[2] Motivet att välja 30 km/h som rekommenderad hastighet baseras på konsekvensen av en eventuell påkörning av gångtrafikanter. Hastighetsskyltningen kommer att vara synlig i hela tunneln dvs även i den del där trafikanter av typ 2 finns. Om dessa bilister väljer att vända fordonet och försöka köra ut ur tunneln kan det finnas risk att de kör på gående i röken. Sannolikheten att dessa påkörda gångtrafikanter omkommer vid kollisionen minskar avsevärt om hastigheten är 30 km/h jämfört med 40 km/h eller 50 km/h (Lindberg, 2012). Hastigheten bör vara tillräcklig för att inte hinnas upp av röken för bilist typ 4. Nivån för hastighetsbegränsningen har dock inte analyserats mer utförligt och ska främst ses som en indikation på att hastigheten måste sänkas för att inte risken för tillkommande kollisioner ska öka.

I syfte fånga uppmärksamheten och, om möjligt, informera om brand bör akustiska signaler, t ex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, användas. Även användningen av radioinbrytning förespråkas av samma anledning.

I framtida tunnlar kan även tunnelappar användas för att skicka meddelanden och ge instruktioner. Denna typ av teknologi måste dock utvecklas och strategi för information och utbildning måste tas fram.

Notering: Trafikant typ 3 som inte kör ut utan går lite långsammare pga lutning på tunneln kan då bli upphunnen av röken. De blir då typ 2.

6.2.4 Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (nedströms) – typ 4

Trafikant typ 4 är ofta inte medvetna om att något har hänt, men kan ha passerat en liten brand och är i så fall medvetna. Miljön som de kör i är rökfri och från deras perspektiv upplevs situationen oftast som normal.

Önskat utrymningsagerande: Trafikanterna ska fortsätta att köra ut till det fria in en rökfri miljö, men ska undvika att köra på vändande bilister och utrymmande i tunneln (trafikant typ 3). Om möjligt bör de plocka upp gående på vägen ut, t ex buss- och lastbilstrafikanter som inte lyckats vända sitt fordon (trafikant typ 3).

Behov: Trafikanterna bör bli varse och informeras om branden, för att öka sannolikheten att de plockar upp gående (trafikant typ 3). Information om brand medför dock att de också måste informeras om lämpligt körbeteende, dvs att de ska köra rakt fram (inte vända) och att de ska sänka hasigheten. Syftet med den sänka hastigheten är att inte köra på trafikanter eller krocka med vändande fordon.

Tekniska system (utrymning):

Baserat på trafikanternas behov bör följande system finnas:

- Dynamiska hastighetsskyltar som sänker hastigheten[2] till 30 km/h
- Dynamiska skyltar med information om att trafikanterna sa fortsätta rakt fram.
- Dynamiska skyltar om att brand har utbrutit.

Dessa skyltar ska vara försedda med orangefärgade blinkande lampor som fångar uppmärksamheten.

Radioinbrytning förespråkas i syfte att informera trafikanterna om branden. Eventuellt kan akustiska signaler också användas, tex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, men dessa kan vara svåra att höra i ett fordon som kör i tunneln.

6.2.5 Trafikant som kör mot röken i en rökfri miljö (uppströms) – typ 5

Trafikant typ 5 är initialt inte medvetna om att något har hänt. Miljön som de kör i är rökfri och från deras perspektiv är situationen inledningsvis normal. Trafikanterna kan eventuellt få signaler från mötande bilister, t ex helljusblink. Förutsättningarna liknar dem som gäller för trafikant typ 3, men situationen är inte lika allvarlig för trafikant typ 5 då de kör i den delen av tunneln som är tänkt att förbli rökfri.

Önskat utrymningsagerande: Det är önskvärt att trafikanterna saktar ner, vänder sitt fordon och kör ut i en rökfri miljö. Detta måste hinnas med innan de nås av rökens backlayeringeffekt som sker uppströms från branden. Stora fordon kan om möjligt använda en vändnisch (snunisje), men om detta inte är möjligt kan de överge sitt fordon och gå eller lifta (haike) ut ur tunneln.

Behov: Trafikanterna måste bli varse och informeras om branden för att kunna fatta beslut om att utrymma. Därefter måste bilisterna informeras om att de ska vända och förare till stora fordon att de ska parkera och utrymma på annat sätt. Stora fordon omfattar buss, lastbil och

personbil med släp. Det finns ett behov av att sänka hastigheten för att inte köra på trafikanter eller krocka med andra fordon.

Tekniska system (utrymning):

Denna grupp är i stort behov av snabb information för att inte komma nära branden. Precis som för trafikant typ 2 och 3 ställer detta krav på tidig detektering, varför det rekommenderas att någon typ av detektionssystem installeras, t ex detektion av stillastående fordon med CCTV (prio 1) eller branddetektorer (prio 2). Vid misstänkt brand ska samtliga relevanta system aktiveras.

För att trafikanterna ska påbörja utrymning och för att säkerställa säker vändning av fordon i tunneln bör följande system finnas:

- Dynamiska hastighetsskyltar som sänker hastigheten[2] till 30 km/h
- Dynamiska skyltar med information om att trafikanterna ska vända om.
- Dynamiska skyltar om att brand har utbrutit och eventuellt instruktion om utrymning.

Dessa skyltar ska vara försedda med orangefärgade blinkande lampor som fångar uppmärksamheten. Det bör undersökas om det även går att förmedla information om vem som ska vända om respektive stoppa sitt fordon, eller om denna kunskap kan uppnås med utbildning istället.

I syfte att informera om brand och fånga uppmärksamheten, bör det undersökas om akustiska signaler, t ex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, kan användas. Även användningen av radioinbrytning förespråkas av samma anledning.

I framtida tunnlar kan även tunnelappar användas för att skicka meddelanden och ge instruktioner. Denna typ av teknologi måste dock utvecklas och strategi för information och utbildning måste tas fram.

6.2.6 Trafikant som kör från röken i en rökfri miljö (uppströms) - typ 6

Trafikant typ 6 är ofta inte medvetna om att något har hänt, men kan ha passerat en liten brand och är då medvetna. Miljön som de kör i är rökfri och från deras perspektiv upplevs situationen oftast som normal.

Önskat utrymningsagerande: Trafikanterna ska fortsätta att köra ut till det fria in en rökfri miljö, men ska undvika att köra på vändande bilister och utrymmande i tunneln (trafikant typ 5).

Behov: Trafikanterna bör bli varse och informeras om branden, för att öka sannolikheten att de plockar upp gående (trafikant typ 5). Information om brand medför dock att de också måste informeras om lämpligt körbeteende, dvs att de ska köra rakt fram (inte vända) och att de ska sänka hasigheten. Syftet med den sänka hastigheten är att inte köra på trafikanter eller krocka med vändande fordon.

Tekniska system (utrymning):

Baserat på trafikanternas behov bör följande system finnas:

- Dynamiska hastighetsskyltar som sänker hastigheten[2] till 30 km/h
- Dynamiska skyltar med information om att trafikanterna sa fortsätta rakt fram.
- Dynamiska skyltar om att brand har utbrutit.

Dessa skyltar ska vara försedda med orangefärgade blinkande lampor som fångar uppmärksamheten.

Radioinbrytning förespråkas i syfte att informera trafikanterna om branden. Eventuellt kan akustiska signaler också användas, tex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, men dessa kan vara svåra att höra i ett fordon som kör i tunneln.

6.3 Sammanfattning av tekniska system för utrymning

Enligt analysen ovan måste branden detekteras tidigt på grund av behoven för trafikant typ 2, 3 och 5. Detta ställer krav på att någon typ av detektionssystem installeras, t ex detektion av stillastående fordon med CCTV (prio 1) eller branddetektorer (prio 2). Detektionssystemet måste även kunna avgöra var branden brutit ut, eftersom de olika typerna av trafikanter ska utsätts för olika tekniska system. Vid misstänkt brand ska samtliga relevanta system aktiveras, vilket inkludera både brandgasventilation och utrymningssystem. Avsikten med aktiveringen av brandgasventilationen är i princip att den ska säkerställa att rådande luftflöden bibehålls och inte förändras, varken vad gäller hastighet eller riktning. Bilisterna fattar sina beslut utifrån de förutsättningar som är aktuella och baserade på en princip som ska minimera den egna risken. Då är det inte lämpligt att enbart ha en generell princip för aktiveringen som inte beaktar den rådande situationen.

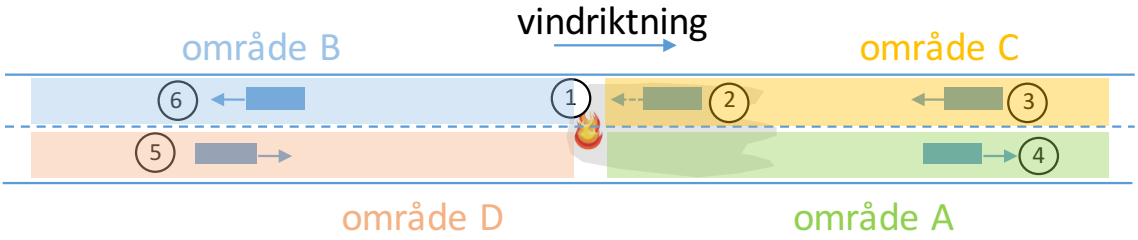
Samtliga trafikanttyper behöver tillräcklig belysning i tunneln, dvs allmänbelysningen måste vara tillräcklig för att gå eller köra ut ur tunneln samt så tunneln upplevs som väl upplyst. Dessutom behöver trafikant typ 1 tydligt markerade nödstationer för att de snabbt ska kunna inleda en första släck- eller räddningsinsats.

I tunneln förespråkas följande dynamiska system:

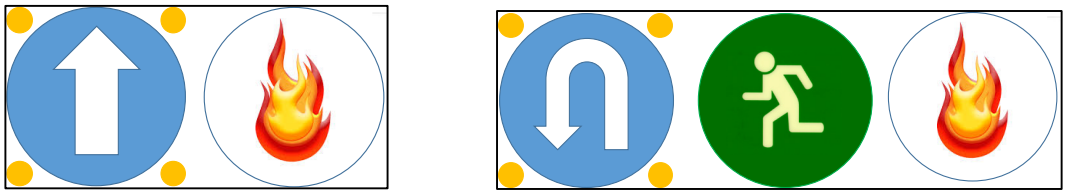
- Dynamiska hastighetsskyltar som sänker hastigheten[2] till 30 km/h
- Dynamiska skyltar med information om att trafikanterna ska fortsätta rakt fram (område A och B i figur 12) eller dynamiska skyltar med information om att trafikanterna ska vända om (område C och D i figur 12).
- Dynamiska skyltar om att brand har utbrutit och i vissa fall instruktion om utrymning.

I figur 12 anges de olika regionerna i tunneln och i figur 13 ges några förslag på konceptuella utformningar av de dynamiska skyltarna. Utformningarna i figur 13 har inte testats, vilket måste göras innan de implementeras i tunnlarna.

Enligt vad som ses i figur 13 ska vissa skyltarna vara försedda med orangefärgade blinkande lampor som fångar uppmärksamheten. Det bör undersökas om det även går att förmedla information om vem som ska vända om respektive stoppa sitt fordon, eller om denna kunskap kan uppnås med utbildning istället.



Figur 12. Olika områden i tunneln.



Figur 13. Förslag på dynamiska skyltar för område A och B (vänster bild) respektive område C och D (höger bild). De cirkelformade figurerna visas i sekvens efter varandra. Symbolerna illustrerar principerna för den information som kan behöva förmedlas och utgör inte en färdig utformning.

Det rekommenderas att akustiska signaler, t ex traditionella larmsignaler eller talade meddelanden, används i tunneln med huvudsyftet att fånga trafikanters uppmärksamhet och förstärka övriga signaler. Om möjligt bör talade meddelanden användas, vilka i så fall även ska innehålla information om att det brinner. Även användningen av radioinbrytning förespråkas för att påkalla uppmärksamhet och informera om branden. Det kan övervägas att informera bilister som befinner sig i röken (typ 2) att de bör lämna sina fordon och utrymma till fots eftersom risken är stor att de kör på andra bilister om de försöker köra ut med bilen. Denna information behövs eftersom att de dynamiska skyltarna faktiskt uppmanar bilisten att vända om, vilket olyckligtvis innebär att motstridande information i viss utsträckning förmedlas. Denna konflikt kan behöva utredas ytterligare.

Räddningskammare med lokalt utrymningslarm som hörs på ca 30 meters avstånd, dvs en ljudfyr, bör efter verifiering finnas i tunneln för att förbättra förutsättningarna för trafikant typ 2. Det måste dock undersökas hur räddningskammarna ska inredas och utrustas för att trafikanterna ska känna sig trygga och vilja vistas där. Ett minimikrav är att det i räddningskammaren finns tvåvägskommunikationssystem med bemannad plats.

För att hjälpa främst trafikant typ 2 förespråkas taktil handledare, vägledande markeringar och ledbelysning längs med båda tunnelväggarna i hela tunneln. Vid positioner för räddningskammare ska information om att det finns en kammare på motstående sida finnas. Lämpligen ska den vägledande markeringen innehålla information om avstånd till säker plats i respektive riktning.

I framtiden kan även tunnelappar användas för att skicka specifika meddelanden och ge instruktioner till olika typer av trafikanter. Denna typ av teknologi måste dock utvecklas och strategi för information och utbildning måste tas fram.

6.4 Övriga synpunkter

Ytterligare aspekter som underlättar en utrymning bör beaktas när en tunnels sammanlagda system för säkerhet ska definieras. Sådana kan vara aktuella vid arbetet med tunnelns riskanalys eller när beredskapsplanen ska utformas. Det kan t ex handla om tekniska system eller andra åtgärder som är relevanta, t ex utbildning och kommunikation till bilister innan en olycka (se även Riksrevisjonens kommentar, avsnitt 1.1), närvaron av tekniska system som påverkar brandförloppet (vattensprinkler) och system som påverkar sannolikheten för att olyckan ska inträffa (detektion av varma fordonsdetaljer innan tunneln). Det bör dock åter poängteras att föreliggande rapport, vilken fokuserar på utrymning, ska fungera som ett underlag för kommande förbättringsarbeten, riskanalyser och beredskapsplaner.

7 Referenser och anknytande litteratur

Ahn, J., Han R., "*An indoor augmented-reality evacuation system for the Smartphone using personalized Pedometry*," Human-Centric Computing and Information Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 1–23, 2012.

Alexander, D. (2002). *Principles of emergency planning and management*. New York: Oxford University Press.

Almand K (2008). Safety &security in roadway tunnels. Requested by: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standing Committee on Highways. Fire Protection Research Foundation, Quincy, Massachusetts

Amundsen F.H, (1994). Studies of Driver Behaviour in Norwegian Road Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 9, No 1, pp9-17.

Amundsen F.H, Ranes G (2000). Studies on Traffic Accidents in Norwegian Road Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 15, No 1, pp3-11.

Berger, C. R. (1987). *Communicating under uncertainty*. In M. E. Roloff & G. R. Miller (Eds.), Interpersonal processes: New directions in communication research (pp. 39–62). Newbury Park, CA: Sage.

Boer LC (2002a). Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. TM-02-C034. TNO Human Factors, Soesterberg.

Boer LC (2002b). Directional Sound Evacuation: Human Factors evaluation of a new concept. TM-02-A059. TNO Human Factors, Soesterberg.

Boer LC, Veldhuijzen van Zanten DW (not publ). Behaviour on tunnel fire. TNO Human Factors, Soesterberg.

Botan, Carl, and Paul Penchalapadu (2009). *Using sense-making and co-orientation to rank strategic public communication in State Emergency Operations Plans (EOPs)*. International Journal of Strategic Communication 3(3): 199-216. doi: 10.1080/15531180902984216

Boyce, K. E., Shields, T. J., Silcock, G. W. H. (1999). Toward the Characterization of Building Occupancies for Fire Safety Engineering: Prevalence, Type, and Mobility of Disabled People, Fire Technology Volume 35, Issue 1, pp 35–50

Brand A och Sörqvist (2000). Utrymningssäkerhet för rörelsehindrade. Rapport 5071, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Brandt R, Høj NP, Martens M, Appel K (2013). NordFoU: "Evakuering i vegtunneler", Forskningsrapport DP1. NordFoU projekt 2011/052970-016. HBI Haerter, Zürich.

Brashers, D. E., Neidig, J. L., Haas, S. M., Dobbs, L. K., Cardillo, L. W., & Russell, J. (2000). *Communication in the management of uncertainty: The case of persons living with HIV or AIDS*. Communication Monographs, 67(1), 63–84.

Caliendo, C, Ciambelli, P, De Guglielmo, M, Meo, M, Russo, P. (2012). Simulation of People Evacuation in the Event of a Road Tunnel Fire. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 53, 3 October 2012, Pages 178-188.

Cannon-Bowers, J.A. and Bell, H.H. (1997), '*Training Decision Makers for Complex Environments: Implications of the Naturalistic Decision Making Perspective'*, in Zsambok, C.E. and Klein, G.A. (Eds.), Naturalistic Decision Making, pp. 99–110, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Canter, D., Breaux, J., Sime, J. (1980). Domestic, Multiple Occupancy, and Hospital Fires. In Fires and Human Behaviour 1st ed., Ed. Canter, D. John Wiley & Sons.

Canter, D. (1990). An Overview of Human Behaviour in Fires. In D. Canter (Ed.), *Fires & Human Behaviour,* pp. 215-234. London: David Fulton Publishers Ltd.

CETU (2010). Signalling and support measures for self-evacuation of users from road tunnels. www.cetu.developpement-durable.gouv.fr

Chittaro L. (2016). *Designing Serious Games for Safety Education: Learn to Brace vs. Traditional Pictorials for Aircraft Passengers*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, in press

Colombo A (2001). Nedies project, Lessons Learnt from Tunnel Accidents. JRC - ISIS, Nedies meeting in Ispra 13-14 november 2000.

Deutsch, M., & Gerard, H. B. (1955). A study of normative and informational social influence upon individual judgement. *The Journal of Abnormal and Social Psychology, 51*, 629-636.

Dreyfuss, I. (2015) *How Members of the Public Have Used Facebook and Twitter in Response to a Disaster: A Comparative Case Study*. A Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Arts at George Mason University

Duffé, P., & Marec, M. (1999). Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel. (No. Report of 30 June 1999): Minister of the Interior - Ministry of Equipment, Transportation and Housing.

Fahy R, Proulx G, Aiman L. (2009). 'Panic' and human behaviour in fire. Human behaviour in fire, Proceedings of the 4th International Symposium, Robinson College, Cambridge, pp387-398, 13-15 July.

Feldman, D., Contreras, S., Karlin, B., Basolo, V., Matthew, R., Sanders, B., Houston, D., Cheung, W., Goodrich, K., Reyes, A., Serrano, K., Schubert, J., Luke, A. (2016) *Communicating flood risk: Looking back and forward at traditional and social media outlets*. International Journal of Disaster Risk Reduction 15, 43-51

FIT (2001). Fire in tunnels. General report. Thematic Network FIT 'Fire in Tunnels' is supported by the European Community under the fifth Framework Programme 'Competitive and Sustainable Growth' Contract n° G1RT-CT-2001-05017.

Flø M, Jenssen G (2007). Drivers' perception of long tunnels: Studies from the Quinling Shongnan Tunnel in China as well as the Lærdal tunnel and the World longest sub sea tunnel (Rogfast) in Norway. 4th International Conference – Traffic and Safety in Road Tunnels – 25-27 April 2007 in Hamburg.

FPST (Fire Protection and Safety in Tunnels, Sept. 7, 2016). *Providing a brief presentation of the second fire in the Gudvanga tunnel*, by Marius H. Raddum, Accident Investigation Board Norway, Statens Havarikommisjon for Transport.

Frantzich, H., & Nilsson, D. (2003). Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning. Rapport 3126, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Frantzich H, (2004). Val av utrymningsväg i tunnel - Resultat från en experimentell undersökning. Rapport 3128, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Frantzich H, Nilsson D, Kecklund L, Anderzén I och Petterson S (2007). Utrymningsförsök i Götatunneln. Rapport 3140, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Fraser-Mitchell, J.N. and Charters, D.A., (2005). Human Behaviour In Tunnel Fire Incidents. Fire Safety Science 8: 543-554. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-543

Fridolf K (2013). Evacuation of a Smoke Filled Tunnel: Human Behaviour, Movement Speed and Exit Choice. Report 3172, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Fridolf K, Nilsson D, Frantzich H (2013). Fire Evacuation in Underground Transportation Systems: A Review of Accidents and Empirical Research. Fire Technology, 49, 451–475. DOI: 10.1007/s10694-011-0217-x

Fridolf K, Ronchi E, Nilsson D, Frantzich H (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. Fire Safety Journal 59 (2013), pp 8–21. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.007

Fridolf K, Andrée K, Nilsson D, Frantzich H (2014) The impact of smoke on walking speed. Fire Mater. 2014; 38:744–759. DOI: 10.1002/fam.2217

Fridolf, K., Frantzich, H. (2015) Test av vägledande system i en tunnel - slutrapport. Rapport 3189, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund.

Fridolf K, (2010). Fire evacuation in underground transportation systems: a review of accidents and empirical research. Report 3151. The Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University, Lund.

Fridolf, K., Nilsson, D. & Frantzich, H. (2016). Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice. Fire Technol (2016) 52: 1481. doi:10.1007/s10694-015-0471-4

Fruin J (1971). Pedestrian planning and design. Metropolitan association of urban designers and environmental planners. New York.

Galea E, Deere S, Sharp G, Filippidis L, Hulse L (2010). Investigating the impact of culture on evacuation behaviour. Interflam 2010, Interscience Communications Ltd, London.

Gandit, M, Kouabenan, D, Caroly S. (2009). Road-tunnel fires: Risk perception and management strategies among users. Safety Science, Volume 47, Issue 1, January 2009, Pages 105-114

Gibson, J. J., (1978). The Ecological Approach to Visual Perception, Houghton Mifflin Company, Boston.

Gilpin, D and Murphy, P (2008) *Crisis Management in a Complex World*. New York: Oxford University Press.

Gossard W (1984/85). Some Major Accident Investigations of Fires in Underground Rail Rapid Transit Systems. Fire Safety J, Vol 8, pp9-14.

Gwynne S (2012). Representing egress data. Fire Mater. 36, pp 441-457.

Hartson, H.R. (2003) Cognitive, Physical, Sensory and Functional Affordances in Interaction design, Behaviour & Information Technology 22(5): 315-338, doi:10.1080/01449290310001592587

Heath, R. L. (1994). *Management of corporate communication: From interpersonal contacts to external affairs*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Heath, R. L. (1995). *Corporate environmental risk communication: Cases and practices along the Texas Gulf Coast.* In B. R. Burleson (Ed.), Communication yearbook 18 (pp. 255–277). Thousand Oaks, CA: Sage.

Heath, R. L., & Abel, D. D. (1996). *Proactive response to citizen risk concerns: Increasing citizens' knowledge of emergency response practices*. Journal of Public Relations Research, 8, 151–171.

Heath, R. L., Liao, S., & Douglas, W. (1995). *Effects of perceived economic harms and benefits on issue involvement, use of information sources, and actions: A study in risk communication.* Journal of Public Relations Research, 7, 89–109.

Heath, R. L., & Palenchar, M. (2000). *Community relations and risk communication: A longitudinal study of the impact of emergency response messages*. Journal of Public Relations Research, 12, 131–161.

Hokstad P, Jenssen G, Aamnes Mostue B, Foss T (2012). E-39 Rogfast. ROS-analyse, tunnel. Rapport A22149/RAP_201 Åpen. SINTEF Sikkerhet.

Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnermark, A., Frantzich, H. & Hasselrot, K. (2005) Räddningsinsatser i vägtunnlar. SRV Rapport P21-459/05, Räddningsverket, Karlstad.

Ingason, H., Lönnermark, A., Frantzich, H. & Kumm, M. (2010). *Fire incidents during construction work of tunnels.* SP Report 2010:83, Borås: SP Technical Research Institute of Sweden.

Ingason, H, Lönnermark, A (2012). Heat release rates in tunnel fires: a summary. In Handbook of tunnel Fire Safety 2nd ed. Ed. by Beard, A. and Carvel, R. ICE Publishing, London.

IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA doi:http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139177245.

ITA COSUF (2013). Publications series 2013, Report R01/2013, Engineering guidance for performance-based fire safety design of underground rail systems.

Jeffers J, Auyang A, Grabowski A (2015). The correlation between metabolic and individual leg mechanical power dureing walking at different slopes and velocities. J. of Biomechanics 48, pp 2919-2924.

Johnson P, & Barber D (2007) Burnley tunnel fire—the Arup view. Retrieved 2 July, 2010, from http://www.fpaa.com.au/docs/burnley.pdf

Keselman, A., Slaughter, L., & Patel, V. L. (2005). *Toward a framework for understanding lay public's comprehension of disaster and bioterrorism information.* Journal of Biomedical Informatics, 38, 331–344.

Kholshevnikov V.V, Shields, T.J, Boyce K.E. Samoshin D.A. (2008). Recent developments in pedestrian flow theory and research in Russia. Fire Safety Journal. Volume 43, Issue 2, February 2008, Pages 108–118. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.05.005

Kinateder, M., Pauli, P., Müller, M., Krieger, J., Heimbecher, F., Rönnau, I., Bergerhausen, U., Vollmann, G., Vogt, P. & Mühlberger, A. (2013). *Human behaviour in severe tunnel accidents: Effects of information and behavioural training*. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 17, 20-32. http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2012.09.001

Kinateder, M, Müller, M, Jost, M, Mühlberger, A, Pauli, P (2014). Social influence in a virtual tunnel fire – Influence of conflicting information on evacuation behavior. Applied Ergonomics, Volume 45, Issue 6, November 2014, Pages 1649–1659. http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2014.05.014

Kinateder M, Gromer, D, Gast, P, Buld, S, Müller, M, Jost, M, Nehfischer, M, Mühlberger, A, Pauli, P (2015). The effect of dangerous goods transporters on hazard perception and evacuation behavior – A virtual reality experiment on tunnel emergencies. Fire Safety Journal Volume 78, November 2015, Pages 24–30. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.07.002

Kissane K (2007) Eyewitness accounts of how a broken down truck led to tragedy in the tunnel. The Age, Saturday, March 24, 2007, 4.

Klein, G. (2003). *The power of intuition*. New York: Doubleday

Klein, G. (1998). *Sources of power: How people make decisions.* Cambridge, MA: MIT Press

Kobes, M, Oberijé, N, Post, J, Weges J. (2010). Fire response performance model for a systematic analysis of evacuation safety in buildings – a case study of a fire in a football stadium. Interflam 2010, Interscience Communications Ltd, London.

Kobes, M, Helsloot, I, de Vries, B, Post, J. (2010). Building safety and human behaviour in fire: A literature review Fire Safety Journal, Volume 45, Issue 1, January 2010, Pages 1-11

Kuligowski, E. (2013). Predicting Human Behavior During Fires. Fire Technol (2013) 49: 101. doi:10.1007/s10694-011-0245-6

Larsson P, Dekker S, Tingvall C (2010). The need for a systems theory approach to road safety. Safety Science Vol 48, pp 1167-1174.

Latané, B., & Darley, J. M. (1970). *The unresponsive bystander: Why doesn't he help?* Prentice Hall.

Lindberg J (2012). Nya krockvåldskurvor för fotgängares risker vid påkörning av bil. PM; TRV 2012/69993, Trafikverket, .

Liu, Brooke, Julia Daisy Fraustino, and Yan Jin. (2015). Social Media Use During Disasters: How Information Form and Source Influence Intended Behavioral Responses. Pp 1-21 in Communication Research.

Li, Q and Tay, R (2014). "*Improving drivers' knowledge of road rules using digital games*," Accident. Anal. Prev., vol. 65, pp. 8–10.

Lovreglio, R, Ronchi, E, Nilsson D. (2015). A model of the decision-making process during pre-evacuation. Fire Safety Journal, Volume 78, November 2015, Pages 168-179. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.07.001

Maitlis, S. (2005). *The social processes of organizational sense making*. Academy of Management Journal, 48(1), 21–49

Marlair G Et al. (2004). Human behaviour as a key factor in tunnel fire safety issues. 6 Asia-Oceania Symposium on fire science & technology, Mar 2004 Daegu, pp 658-668.

Martens M, Jenssen G,D. (2012). Human Behaviour in Tunnels: What further steps to take?. Proc. of 5th Int. Sym. on Tunnel Safety and Security, New York, March 14-16, pp69-85.

Mashimo H (2002). State of the road tunnel safety technology in Japan. Tunnelling and Underground Space Technology Volume 17, Issue 2, April 2002, Pages 145–152.

Nilsson, D., Frantzich, H. and Saunders, W.L., (2005). Coloured Flashing Lights To Mark Emergency Exits - Experiences From Evacuation Experiments. Fire Safety Science 8: 569-579. doi:10.3801/IAFSS.FSS.8-569

Nilsson D och Frantzich H (2007) Vägval vid utrymning - utrymningsförsök med gröna lampor vid nödutgångar. Report 3141, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Nilsson D, Frantzich H (2010). Design of Voice Alarms—the Benefit of Mentioning Fire and the Use of a Synthetic Voice. W.W.F. Klingsch et al. (eds.), Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, DOI 10.1007/978-3-642-04504-2 10, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010

Nilsson, Johansson and Frantzich (2009). Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. Fire Safety Journal 44(4), pp 458-468. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.09.009

Nilsson, D., Frantzich, H., & Saunders, W. (2008). Influencing exit choice in the event of a fire evacuation. *Fire Safety Science – Proceedings of the 9th International Symposium*, Karlsruhe, Germany, pp. 341-352.

Nilsson D (2014). Design of fire alarms: Selecting appropriate sounds and messages to promote fast evacuation. Proc. of an interdisciplinary symposium the 28th april 2014 arranged by The

Sound Environment Center - Ljudmiljöcentrum - in collaboration with Centre for Societal Resilience at Lund University.

Nilsson D. (2016). Akustiska utrymningslarm och ljudfyrar för vägtunnlar. Forskningsprojekt för Trafikverket 2016-2018, Brandteknik, Lunds Universitet, Lund.

Njå O (2016). Self Evacuation from Fires in Long Subsea Road Tunnels: The Case of the Oslofjord Tunnel Fire in 2011. Seventh International Symposium on Tunnel Safety and Security, Montréal, Canada, March 16-18, 2016, pp93-101.

Norconsult (2012). OSLOFJORDFORBINDELSEN Oslofjordtunnelen Evakueringsrom. Oppdragsnr.: 512 1830, Sandvika.

Norén A, Winér J (2003). Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations. Report 5127, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Papaioannou P, Georiou G (2003). Human Behaviour in Tunnel Accidents and Incidents: End-users, Operators and Response teams. Work package 3 Human response. UPTUN.

Passini R (1996). Wayfinding design: logic, application and some thoughts on universality. Design Studies 17, pp 319-331.

Pauls, J., Groner, N., Gwynne, S., Kuligowski, E., Meacham, B., Ripley, A., and Proulx, G. (2009) *Informed emergency responses through improved situation awareness*: Discussion panel. 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire: Conference Proceedings, London: Interscience Communications, pp. 531-542.

Peacock, RD, Averill, JD & Kuligowski, ED. (2009), *Stairwell evacuation from buildings: what we know we don't know*, NIST Technical Note 1624, National Bureau of Standards and Technology, Gaithersburg, MD

PIARC (2007). Integrated approach to road tunnel safety. Report 2007R07, PIARC Technical Committee C3.3 Road tunnel operation.

PIARC (2008). Risk analysis for road tunnels. Report 2008R02. Tech comm. C3.3 Road Tunnel Operations. Word Road Association (PIARC)

PIARC (2008), Human factors and road tunnel safety regarding users. Report 2008R17. Tech comm. C3.3 Road Tunnel Operations. Word Road Association (PIARC)

PIARC (2011). Recommendations regarding road tunnel drivers' training and information. Report 2011R04. PIARC Technical Committee C4 - Road Tunnel Operation.

PIARC (2012). Current practice for risk evaluation for road tunneln. Report 2012R23EN, PIARC Technical Committee C4 - Road Tunnel Operation

PIARC (2012). Assessing and improving safety in existing road tunnels. Report 2012R20EN. PIARC Technical Committee C4 - Road Tunnel Operation.

PIARC (2012). Social acceptance of risks and their perception. Report 2012R30EN. Technical Committee C.3 Managing Operational Risk in Road Operation.

PIARC (2016) Improving safety in road tunnels through real-time communication with users. 2016R06EN, *La Défense cedex*: Word Road Association (PIARC).

Procopio, C. H., & Procopio, S. T. (2007). *Do you know what it means to miss New Orleans? Internet communication, geographic community, and social capital in crisis*. Journal of Applied Communication Research, 35(1), 67–87.

Proulx G and Sime J (1991). To Prevent 'Panic' in an Underground Emergency: Why Not Tell People the Truth? In Proc. of the 3rd Int. Symp. on Fire safety Science. 8-12 July 1991. Elsevier.

Proulx G (2008). Evacuation Time. In The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th ed. Ed. DiNenno, P.J. pp 3-355 – 3-372, National Fire Protection Association, Quincy.

Purser, D.A. (1995). Toxicity assessment of combustion products. In the SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (Ed. P.J. DiNenno), National Fire Protection Association, Quincy.

Purser, D.A, Bensilum M (2001). Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations. Safety Science, Volume 38, Issue 2, July 2001, Pages 157-182

Rasmussen J (1986). Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering. Elsevier.

Riksrevisjonen (2016). Riksrevisjonens undersøking av arbeidet til styresmaktene med å styrkje tryggleiken i vegtunnelar. Dokument 3:16, 2015-2016. Oslo.

Ronchi E, Alvear D, Berloco N, Capote J, Colonna P, Cuesta A. (2010). Human behavior in road tunnel fires: comparison between egress models (FDS+Evac, Steps, Pathfinder). Interflam 2010, Interscience Communications Ltd, London. pp 837-848.

Ronchi E and Nilsson D (2013). Traffic Information Signs, Colour Scheme of Emergency Exit Portals and Acoustic Systems for Road Tunnel Emergency Evacuations. Rapport 3173, Brandteknik, Lunds universitet, Lund.

Ronchi E, Nilsson D, Kojic S, Eriksson J, Lovreglio R, Modig H and Lindgren Walter A (2016). A Virtual Reality Experiment on Flashing Lights at Tunnel Emergency Exit Portals for Road Tunnel Evacuation. Fire Technology 52, pp 623-647. DOI: 10.1007/s10694-015-0462-5

Ronchi E, Nilsson D, Modig H, Lindgren Walter A (2016). Variable Message Signs for road tunnel emergency evacuations. Applied Ergonomics 52 (2016) 253-264. http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2015.07.025

Rosmuller N, Beer G, Gomez R, (2005). Evacuation and intervention management. SafeT Work package 3, Task 3.1, 3.2 and 3.3.

Rubadiri, L., Ndumu, D.T. & Roberts, J.P. Predicting the Evacuation Capability of Mobility-Impaired Occupants. (1997) Fire Technology 33: 32. doi:10.1023/A:1015318311881

Ryu T, Choi H, Choi, H, Chung M (2006). A comparison of gait characteristics between Korean and Westrn people for establishing Korean gait reference data. Int. J. of Industrial Ergonomics 36, pp 1023-1030.

Schadschneider A, Klingsch W, Klüpfel H, Kretz T, Rogsch C, Seyfried A (2009). Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications. In Encyclopedia of Complexity and Systems Science, Ed. Robert A. Meyers, pp 3142-3176. Springer, New York.

Seeger, M. W. (2006). *Best practices in crisis communication: An expert panel process*. Journal of Applied Communication Research, 34(3), 232–244.

Sellnow, T.L., Ulmer, R.R., Seeger, M.W., & Littlefield, R.S. (2009). *Effective risk communication: A message-centered approach*. New York: Springer Science.

Shields, T.J. (2012). Human behaviour during tunnel fires. In Handbook of tunnel Fire Safety 2nd ed. Ed. by Beard, A. and Carvel, R. ICE Publishing, London.

Shields, T.J. and Proulx, G., (2000). The Science Of Human Behaviour: Past Research Endeavours, Current Developments And Fashioning A Research Agenda. Fire Safety Science 6: 95-113. doi:10.3801/IAFSS.FSS.6-95

Shields TJ and Boyce K (2004). Towards developing an understanding of human behaviour in fires in tunnels. Proc. of 3rd Int. Symp. on Human Behaviour in Fire, 1-3 Sept 2004, Europa Hotel, Belfast.

Shields TJ and Proulx G (1999). The Science of Human Behaviour: Past Research Endeavours, Current Developments and Fashioning a Research Agenda. Proc of 6th Int Conf. on Fire Safety Science, Poitiers, 5-9 July 1999.

SHT (2013). Rapport om brann i vogntog på RV23, Olsofjordtunnelen, 23 juni 2011, Vei 2013/05. Statens Haverikommisjon for Transport.

SHT (2015). Report on fire in a heavy goods vehicle in the Gudvanga tunnel on the E16 road in Aurland on 5 August 2013, Road 2015/02. Statens Haverikommisjon for Transport.

Sime J., (1980). The Concept of Panic. Fires and Human Behaviour Ed D Canter, J Wiley & Sons Chichester.

Sime J., Kimura M., (1988). The timing of escape: Exit choice behaviour in fires and building evacuation. Safety in the Built Environment, Ed J Sime, E & F.N Spon, London.

Sime J (1995). Crowd psychology and engineering. Safety Science Vol 21, pp 1-14.

Sime J (2001). An occupant response shelter escape time (ORSET) model. Safety Science, Volume 38, Issue 2, July 2001, Pages 109-125. http://dx.doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00062-X

Sixsmith, A., Sixsmith, J., & Canter, D. (1988). When is a door not a door? A study of evacuation route identification in a large shopping mall. In J. D. Sime (Ed.), *Safety in the built environment*. Cambridge: University Press.

Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., & MacGregor, D. G. (2004). *Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality*. Risk Analysis, 24, 1–12

Spence, P. R., Westerman, D., Skalski, P. D., Seeger, M., Ulmer, R. R, Venette, S., & Sellnow, T. L. (2005). *Proxemic effects on information seeking after the September 11 attacks.* Communication Research Reports, 22(1), 39–46

Start, E. (2012) design of voice alarm systems for traffic tunnels: optimisation of speech intelligibility, Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, USA, March 14-16, 2012, 645-654.

Svela M, Njå O och Berg H (2016). A review of competencies in tunnel fire response seen from the first responders' perspectives. Proc. of 7th Int. Sym. on Tunnel Safety and Security, Montreal, March 16-18, pp127-138.

Thompson, P, Nilsson, D, Boyce, K, McGrath, D. (2015). Evacuation models are running out of time. Fire Safety Journal Volume 78, November 2015, Pages 251–261. http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.09.004

Tong, D., & Canter, D. (1985). The decision to evacuate: a study of the motivations which contribute to evacuation in the event of fire. *Fire Safety Journal, 9*(3), 257-265.

Transportation Research Board of the National Academies (2006). Transportation security, Volume 12: Making Transportation Tunnels Safe and Secure. TCRP REPORT 86/NCHRP REPORT 525. TRB, Washington.

Troncoso J, Nilsson D & Ronchi E (2015). Response to emergency way-finding systems by people from different cultures. Proceedings of the 6th International Symposium on Human Behaviour in Fire 2015 held at the Downing, Cambridge, UK 28-30 September 2015. pp 361-372.

Ungar, E. E. (1988) Damping of Panels, Chapter in Noise and Vibration Control, Ed. Beranek, L., Washington.

Vegdirektoratet (2014). Håndbok N500 Vegtunneler. Statens vegvesen.

Vatsvåg, N. (2016). *En undersøkelse av ulike faktorers betydning i forhold ti lopplevd trygghet ved tunnelkjøring – en studie basert på fokusgruppeintervju og en spørreundersøkelse blant norske trafikanter*. Masteroppgave i samfunnssikkerhet, Universitetet i Stavanger.

Vermuyten H, Beliën J, De Boeck L, Reniers G, Wauters T. (2016) A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems. Safety Science 87, pp167-178.

Wickens, C., D. and Hollands, J., G. (2000). Engineering Psychology and Human Performance. 3rd ed. Prentice-Hall Inc.

Ye J, Chen X, Jian N (2012). Impact analysis of human factors on pedestrian traffic characteristrics. Fire Safety J 52, pp 46-54.

Zhao, C.M., Lo, S.M., Zhang, S.P. et al. (2009) A Post-fire Survey on the Pre-evacuation Human Behavior. Fire Technol 45: 71. doi:10.1007/s10694-007-0040-6

8 Bilaga A Utrymningsanalys från vägtunnel.

8.1 Förutsättningar

Som en del i verifieringen av föreslagna åtgärder för att uppgradera personsäkerheten i Ellingsøytunnelen och Valderøy¬tunnelen i Ålesund har en preliminär utrymningsanalys genomförts. Metoden som använts baseras på den utrymningsmodell som presenteras i Ingason m fl (2005) och som bygger på en en-dimensionell beskrivning av brandgasflödet i tunneln. Temperatur, sikt och andra förhållanden som orsakas av branden beräknas för den plats som utrymmande personer vistas på som funktion av tiden och de utrymmande påverkas av dessa förhållanden. Eftersom modellen är endimensionell blir alla brandinducerade variabler endast beroende på avståndet från branden och som en variation av tiden. Förhållandena är således lika över tunnelns tvärsnitt. Förhållandena från branden definieras av en given brandeffekt vilket i aktuellt fall ska illustrera en bussbrand som har en maximal brandeffekt på 30 MW. Olika brandförlopp ingår i beräkningen men tillväxten är generellt sett snabb och baseras på Ingason och Lönnermark (2012). Tunnelns tvärsnitt antas vara 70 m^2 och det antas att normala lufthastigheten är 1,5 m/s.

Utrymmande bilister befinner sig från början nära branden dvs de har kört nästan ända fram till den brinnande bussen och står stilla där. Efter en fördröjningstid påbörjar de sin förflyttning mot tunnelns mynning. I analysen nedan finns tre bilister som har parkerat sina bilar 10, 20 och 30 meter från branden på den sidan dit röken blåser. Dessa bilister har en respektive fördröjningstid på 30, 60 respektive 90 sekunder.

Bilisterna kan gå med 1,3 m/s om sikten är god och lägst med 0,5 m/s om sikten är dålig. Gränsen mellan god och dålig sikt är vid ungefär 5 meter sikt. Bilisterna som utrymmer kommer att inandas giftiga ämnen som finns i röken och kommer antingen att nå fram till mynningen eller så blir de medvetslösa på vägen mot det fria. Beräkningen av den tillgängliga tiden för utrymning görs via en uppskattning av den sk fraktionsdosen FED för respektive bilist och inkluderar gaserna CO, CO_2 och O_2. När personerna går genom röken andas de in dessa ämnen och bygger upp en dos av toxisk påverkan som kan leda till medvetslöshet och sedan död. Beräkningen av FED görs för den kombinerade effekten av alla gaserna där CO_2 används för att öka upptaget av CO och effekten av den reducerade O_2-halten. Även den toxiska effekten av att andas in CO_2 beräknas. FED-analysen baseras på arbete av Purser (1995). Gångsträckan är maximalt 1500 meter från branden till mynningen.

Analysen genomförs för att visa på möjligheten med liknande analyser och för att få en uppfattning om vilka förutsättningar som gäller för en utrymning som sker i rök.

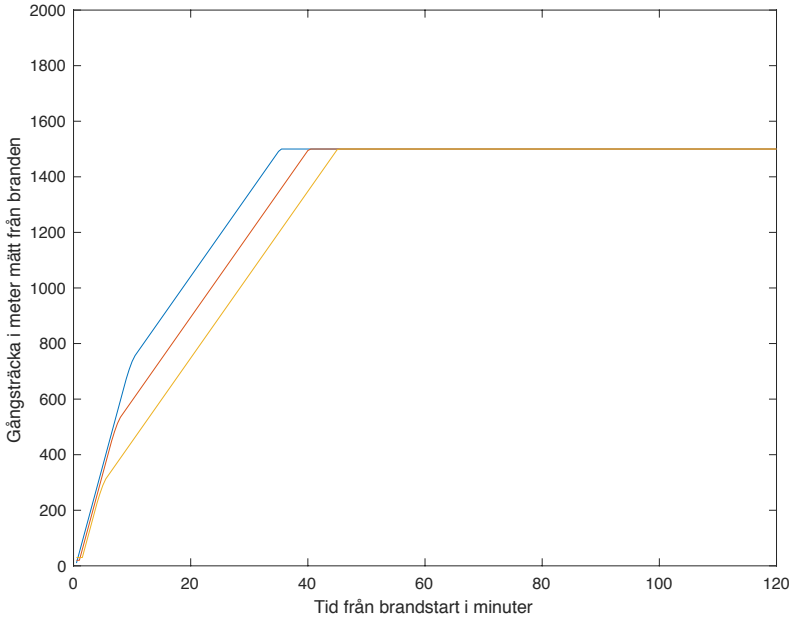
Två olika brandförlopp analyseras; α = 0,13 kW/s^2 (8 minuter till maximal effekt) respektive 0,17 kW/s^2 (7 minuter till maximal effekt) vilket baseras på genomförda experiment (Ingason och Lönnermark (2012). Bränderna växer som $\alpha*t^2$ dvs exponentiellt. I några fall sätts lägsta gånghastigheten till 0,2 m/s istället för 0,5 m/s vilket är ett mer konservativt antagande. En lufthastighet på 2 m/s används i några scenarier.

8.2 Resultat

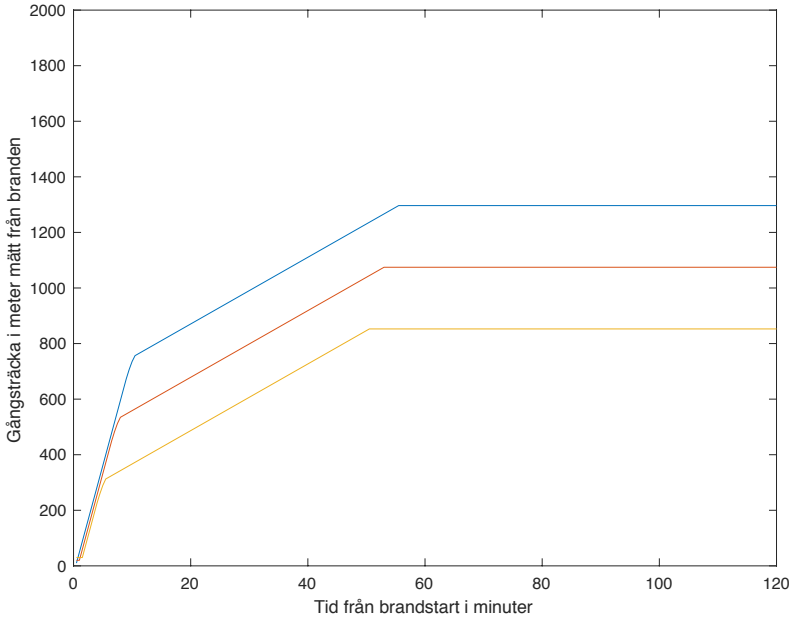
Några grundläggande resultat redovisas i tabellen nedan. I samtliga fall där personerna inte kommer hela vägen till tunnelns mynning är det på grund av att de andats in för mycket toxiska gaser. Det är beräkningen av FED som vid en given tidpunkt leder till medvetslöshet.

Scen	Brand, kW/s^2	Lägsta gånghastighet, m/s	Vindhastighet, m/s	Resultat
1	0,13	0,5	1,5	Utrymning i rök efter 250-750 meter Alla kommer ut Totaltid cirka 40 minuter
2	0,13	0,2	1,5	Utrymning i rök efter 300-800 meter Ingen kommer ut, stannar vid 850-1300 meter Stopptid cirka 50 minuter
3	0,17	0,5	1,5	Utrymning i rök efter 200-600 meter Alla kommer ut Totaltid cirka 40 minuter
4	0,17	0,5	2	Utrymning i rök efter 200-300 meter Alla kommer ut Totaltid cirka 45 minuter
5	0,17	0,2	2	Utrymning i rök efter 200-300 meter Ingen kommer ut, stannar vid 1000 meter Stopptid cirka 70 minuter
6	0,17	0,2	1,5	Utrymning i rök efter 150-600 meter Ingen kommer ut, stannar vid 700-1100 meter Stopptid cirka 50 minuter
7	0,13	0,5	2	Utrymning i rök efter 250-400 meter Alla kommer ut Totaltid cirka 45 minuter

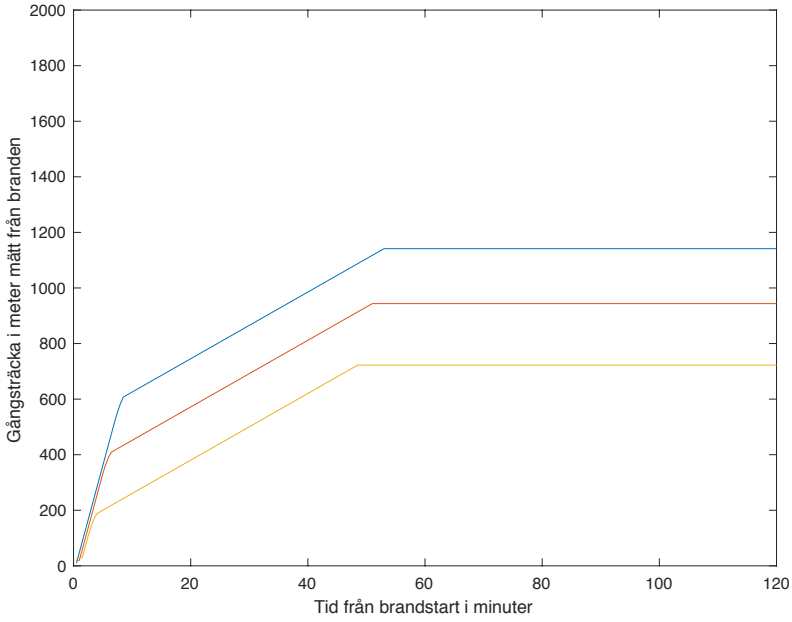
Figurerna A1 och A2 visar hur långt de tre bilisterna kommer när de utrymmer genom röken. De visar resulterande gångsträcka för scenarierna 1 och 2 som utgör situationer där alla kommer ut respektive där bilisterna inte kommer hela vägen ut. En figur för scenarion 6 presenteras också då den utgör analysens "worst case", figur A3. Blå linje visar positionen för bilist närmast branden och gul linje den bilist som är längst från branden då den startar. På grund av fördröjningstiden kommer blå bilist att vara den som hinner längst och går först.



Figur A1. Gångsträcka i tunneln för bilister i scenario 1.



Figur A2. Gångsträcka i tunneln för bilister i scenario 2.



Figur A3. Gångsträcka i tunneln för bilister i scenario 6.

8.3 Slutsats

Det är tydligt att för aktuella fall så betyder gånghastigheten ganska mycket för resultatet. Om personerna kan gå hyfsat fort även när sikten är dålig så finns det möjligheter att gå hela vägen ut. Nu är beräkningarna förhållandevis generella och individuella aspekter som utmattning inte inkluderade. Det innebär att förutsättningarna för utrymning ligger på gränsen vad tunneln klarar av att hantera för den aktuella branden.

Eftersom de utrymmande efter ett tag tvingas utrymma i tät rök och vindhastigheten är högre än gånghastigheten kommer förutsättningarna inte att bli bättre under förloppet. Anledningen till att gånghastigheten är högre i början är att röktätheten inte är så hög att gånghastigheten påverkas. Men efter en tid in i brandförloppet ökar branden i omfattning och producerar tätare rök. Denna kommer ikapp de utrymmande bilisterna och försämrar sikten.

För de fall där man kan förvänta sig att personer kan gå långsamt i den täta röken kan det finnas ett behov av räddningskammare. Om behovet av räddningskammare skulle grundas på ovanstående analys så kan det vara rimligt att placera en sådan kammare med cirka 700 m mellanrum baserat på de sämsta förutsättningarna (scenario 6). Gångavståndet till en säker plats blir då aldrig längre. Det ska dock påpekas att den presenterade analysen enbart är avsedd för att illustrera metodiken att ta fram ett beslutsunderlag och en mer noggrant genomförd analys rekommenderas.