



## Brannsikkerhet i jernbanetunnel – Dimensjonerende brannscenario og forventninger til redningsinnsats

Christoph Meraner, Ragni F. Mikalsen, Tian Li, Håkan Frantzich (Lunds universitet), Karl Fridolf (WSP Sverige AB)

# Brannsikkerhet i jernbanetunnel – Dimensjonerende brannscenario og forventninger til redningsinnsats

Christoph Meraner, Ragni F. Mikalsen, Tian Li, Håkan  
Frantzich (Lunds universitet), Karl Fridolf (WSP  
Sverige AB)

Keywords: Jernbanetunnel, brannscenario, dimensjonering, redningsinnsats, brann

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE-rapport 2020:58

ISBN: 978-91-89167-43-8

Prosjektnummer: 20505

Kvalitetssikring: Christian Sesseng

Prosjektleder: Karolina Storesund

Oppdragsgiver: Arbeidsgruppe (Bane NOR og Brannvesen) – Tunnelsikkerhet og redningsinnsats

Forsidebilde: Jernbaneskiner. Bildet er tatt av Hin und wieder gibts mal was, fra Pixabay.  
Trondheim 2020

# Innhold

<b>Innhold .....</b>	<b>2</b>
<b>Sammendrag.....</b>	<b>4</b>
<b>1 Innledning .....</b>	<b>5</b>
1.1 Bakgrunn .....	5
1.2 Målsetting.....	5
1.3 Metode.....	6
1.4 Begrensninger .....	6
1.5 Oppbygging av rapporten.....	6
<b>Del 1.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Relevante forskningsprosjekt og annen relevant dokumentasjon .....</b>	<b>7</b>
2.1 Småskala- vs. storskala eksperimenter og overføring av læringspunkter .....	7
2.2 Relevans av forskningsprosjekter som ikke omhandler brann i tog i tunneler.....	8
2.3 De mest sentrale forskningsprosjektene .....	8
<b>3 Dimensjonerende brannscenarier og røykkontroll .....</b>	<b>11</b>
3.1 Dimensjonerende brannscenarier .....	11
3.1.1 Forutsetninger for togbrann i tunnel.....	12
3.1.2 Potensielle antennelseskilder .....	16
3.1.3 Forutsetninger for brannutvikling inne i en kupé.....	17
3.1.4 Dimensjonerende brannkurve.....	19
3.2 Røykspredning .....	23
3.2.1 Naturlig ventilerte vs. mekanisk ventilerte tunneler.....	23
3.2.2 Modellering av røyk oppstrøms for brannen ( <i>backlayering</i> ) .....	29
3.2.3 Observasjoner fra branner i tunnel .....	37
3.3 Temperaturutvikling.....	40
3.4 Eksisterende metoder/løsninger for å skape røykkontroll i tunneler.....	43
3.5 Sammenfatning av del 1 og forslag til veien videre .....	44
Referanser del 1 .....	47
<b>Del 2.....</b>	<b>49</b>
<b>4 Kartlegging kunnskap om menneskelig atferd ifm. tunnelbrann.....</b>	<b>49</b>
4.1 Introduksjon.....	49
4.1.1 Syfte .....	50
4.1.2 Metod .....	51
4.2 Inträffade olyckor.....	51
4.2.1 Zürich 1991 .....	52
4.2.2 Baku 1995 .....	53
4.2.3 King's Cross 1987.....	53

4.2.4	Bränder i norska tåg .....	54
4.2.5	Bränder i norska vägtunnlar .....	55
4.2.6	Sammanfattande reflektioner .....	56
4.3	Människors beteende - teorier och modeller .....	58
4.3.1	Beteendesequenser och betydelsen av människors roller.....	59
4.3.2	Betydelsen av roller.....	60
4.3.3	Anknytning.....	61
4.3.4	Social påverkan .....	62
4.3.5	Panik.....	63
4.3.6	Från teoretiska modeller till praktisk tillämpning .....	64
4.4	Utrymningen av tåg och tunnel .....	65
4.4.1	Utrymning av tåg.....	66
4.4.2	Utrymning av tunnlar .....	73
4.4.3	Räddningstjänstens förmåga att assistera .....	81
4.5	Sammanfattning av erfarenheter och förslag till åtgärder fra del 2.....	88
	Referenser del 2.....	92
<b>Vedlegg A – Backlayering modell</b>		

# Sammendrag

Denne studien belyser ulike aspekter ved personsikkerheten ved brann i tunnel og svarer ut konkrete spørsmål omkring temaet.

Oppdragsgiver er Bane NOR. Prosjektet har fått innspill fra en arbeidsgruppe som er koordinert og ledet av hhv. KS Bedrift og Bane NOR – med fagressurser fra Vestfold Interkommunale Brannvesen IKS (VIB), Bergen brannvesen (BB), Oslo brann- og redningsetat (OBRE), Bane NOR, operatørselskaper (Vy og Flytoget), Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) og Statens havarikommisjon for transport (SHT).

Rapporten er delt inn i to hoveddeler. Del 1 omhandler kartlegging av relevante forskningsprosjekt, dimensjonerende brannscenarier og røykkontroll, se sammendrag og forslag til veien videre i underkapittel 3.5. Del 2 omhandler kartlegging av kunnskap om menneskelig atferd i forbindelse med tunnelbrann, se sammendrag og forslag til veien videre i underkapittel 4.5. Denne delen er utarbeidet av Lunds Tekniska Högskola og WSP Sverige, og er følgelig på svensk.

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

En arbeidsgruppe koordinert og ledet av hhv. KS Bedrift og Bane NOR – med fagressurser fra hhv. brannvesen (VIB, BB og OBRE), Bane NOR, operatørselskap (Vy og Flytoget), DSB og SHT – har gjennomført en rekke arbeidsmøter med formål å komme frem til en omforent forståelse av ulike temaer knyttet til tunnelsikkerhet og tilrettelegging for redningsinnsats i jernbanetunneler.

Arbeidsgruppen har p.t. ikke klart å oppnå en omforent forståelse av bl.a. dimensjonerende brannscenario og forventninger om hvilken redningsinnsats som skal ytes av brannvesenet. Det er derfor enighet om at arbeidsgruppen skal knytte til seg brannteknisk ekspertise fra en ekstern og uavhengig aktør som kan bidra til å øke deres felles kunnskap rundt disse problemstillingene. I den sammenheng er RISE Fire Research bedt om å svare ut ni hovedspørsmål, presentert nedenfor.

## 1.2 Målsetting

Målet med denne studien er å belyse ulike aspekter ved personsikkerheten ved brann i tunnel og svare ut oppdragsgivers konkrete hovedspørsmål omkring temaet som følger:

1. Kan RISE vurdere hvorvidt, og eventuelt i hvilken grad, resultater fra andre forskningsprosjekt, som f.eks. METRO-prosjektet, kan benyttes? Det bør i så fall gis en begrunnet beskrivelse av hvilke resultater RISE mener kan brukes, og hvordan de bør brukes som grunnlag for arbeidsgruppens videre arbeid.
2. Hva er det som kan skape et dimensjonerende brannscenario som kan legges til grunn for å vurdere hvilken aktiv innsats som kan/bør gjøres av redningstjenester i de ulike fasene av en tunnelbrann? Med andre ord, hva kan initiere brannen, hva skal til for at den skal vedlikeholdes, og eventuelt utvikle seg?
3. Hvordan vil en slik brann utvikle seg med tanke på røyk og temperatur, og hvilken betydning kan dette ha for selvredning?
4. Finnes det anerkjent kunnskap om adferdsmønster for involverte i en tunnelbrann? Hvordan kan i så fall slik kunnskap benyttes av arbeidsgruppen i det videre arbeidet?
5. Forutsatt at brannvesenet har god kunnskap om tunnelbrann og taktikk, hva sier forskning og/eller erfaring om hvordan, og i hvilken grad, røykkontroll kan bedre innsatsmulighetene for nødetater? Og hvordan vurderer forskningsmiljøet at røykkontroll kan forbedre, eventuelt forverre, sikkerhetsnivået i tunnelen?
6. Hva sier forskning og/eller erfaringer om utviklingen av røyksjikt ved en større brann uten påslått ventilasjon? Hvor lange avstander inne i tunnelen vil det være røyksjikt, og hvor lenge (i tid) vil røyksjiktet opprettholdes før hele tverrsnittet blir fylt med røyk?
7. Finnes det forskning og/eller erfaring som tilsier at størrelsen på tunnelens tverrsnitt kan benyttes som argument for røykkontroll? (Eksempelvis som erstatning for mekanisk ventilasjon.)
8. Hvilke alternative løsninger finnes i dag for å skape røykkontroll i tunnel?
9. Hva sier forskning og/eller erfaringer om forflytningshastighet i røykfylt miljø i tunnel for:
  - a. Evakuerende (passasjerer) uten vernebekledning?

- b. Evakuerende med funksjonsnedsettelse?
- c. Redningsmannskaper med røykdykkerutstyr?

## 1.3 Metode

Studien er basert på innhentet informasjon ved søk i databaser for vitenskapelige tidsskrift og innhenting av annen dokumentasjon ved direkte kontakt med aktører som er ansett som relevante for prosjektet (RISE Safety og oppdragsgiver - herunder arbeidsgruppen). Blant annet er informasjon om passasjerantall, bagasje og tunnelutforming tilsendt fra representanter i arbeidsgruppen.

Brannscenarioene er betraktet i en *worst credible case*-tilnærming<sup>1</sup> og er ikke basert på en kvantitativ risikoanalyse (QRA).

En empirisk modell, hovedsakelig basert på arbeidet fra Ingason et al. [1] er brukt for å modellere backlayering av røyken i en tunnel. For detaljer omkring modellen, se underkapittel 3.2.2 og Vedlegg A.

For metoder brukt i del 2 av rapporten, se underkapittel 4.1.2.

## 1.4 Begrensninger

Forutsetninger for prosjektet var som følger:

- Spørsmålene (gitt i delkapittel 1.2) begrenses til kun å gjelde nye tunneler bygget i henhold til krav angitt i kap. 4 i TSI SRT [2].
- Tunnelverrsnitt, hhv. enkelt- og dobbeltsporede tunneler: 60 m<sup>2</sup> og 90 m<sup>2</sup>.
- Scenarier med passasjertog legges til grunn.
- Rullende materiell i kategori B og bygget i henhold til EN 45545.
- Konsekvenser kun for mennesker legges til grunn, ikke tap av materielle verdier.

## 1.5 Oppbygging av rapporten

Denne rapporten er delt inn i to hoveddeler. Del 1 omhandler kartlegging av relevante forskningsprosjekt og dimensjonerende brannscenarier og røykkontroll. Del 2 omhandler kartlegging av kunnskap om menneskelig atferd i forbindelse med tunnelbrann.

---

<sup>1</sup> *Worst credible case* betyr at det brukes scenarier hvor det forventes de største konsekvensene, selv om sannsynligheten for scenarioene kan være lav. Det er derimot ikke tilsvarende *worst case* (det finnes alltid et scenario som er verre).



# Del 1

## 2 Relevante forskningsprosjekt og annen relevant dokumentasjon

Underlaget for arbeidet som presenteres i rapportens kapittel 3 er forskningsprosjekter og annen relevant dokumentasjon. For hver studie som omhandler branner i andre typer tunneler eller togtyper enn det som er fokus for denne studien er det gjort en individuell vurdering av hvilke deler av resultatene som likevel er relevante for denne studien. De konkrete resultatene fra disse studiene vil bli nærmere introdusert der hvor resultatene brukes. Målet for dette kapittelet er å svare ut følgende hovedspørsmål:

*1. Kan RISE vurdere hvorvidt, og eventuelt i hvilken grad, resultater fra andre forskningsprosjekt, som f.eks. METRO-prosjektet, kan benyttes? Det bør i så fall gis en begrunnet beskrivelse av hvilke resultater RISE mener kan brukes, og hvordan de bør brukes som grunnlag for arbeidsgruppens videre arbeid.*

Kortfattet svar på hovedspørsmål:

*1. Resultater fra andre forskningsprosjekt kan benyttes, men ikke all informasjon fra forskningsprosjekter på veitunneler, trikk, metro og gamle tog kan benyttes. Det er et begrenset antallet studier som inkluderer branntester og parametere som er relevante, noe som gjør at det ikke finnes nok kunnskapsgrunnlag for å gi et komplett svar på alle hovedspørsmål.*

### 2.1 Småskala- vs. storskala eksperimenter og overføring av læringspunkter

Generelt for branneeksperimenter, også de som er relevante for tunnelbranner, gjennomføres det erfaringsmessig et relativt stort antall små- og mellomskala eksperimenter, samt modelleringsstudier, for hvert storskala- eller fullskalaeksperiment som utføres. Dette medfører at det er et relativt lite antall storskala- eller fullskalaeksperimenter å hente informasjon fra. For å dekke de mange kunnskapshull som finnes er det nødvendig å trekke læring fra studier gjennomført på andre tema eller med andre parametere enn de man er mest interessert i. I dette prosjektet gjelder dette studier som er gjort på andre typer tunneler, eller med eldre togsett, eller studier som ikke inkluderer fullskala branntester.

En utfordring med dette er at skalering av testdata kan være utfordrende, ettersom det er mange faktorer som ikke er lineært skalerbare. En annen utfordring er å vurdere hvorvidt resultater som er gyldige for ett testoppsett er overførbare til andre testoppsett, herunder ulike utforminger på tunneler, ulike typer brensel etc. Her vil det ikke nødvendigvis være ett fasitsvar, men det må vurderes fra tilfelle til tilfelle.

## 2.2 Relevans av forskningsprosjekter som ikke omhandler brann i tog i tunneler

Generelt gjelder følgende:

### **Modellering:**

De numeriske modellene som er brukt er ikke spesielt utviklet for jernbanetunneler. Disse er hovedsakelig utviklet basert på grunnleggende fluidmekanikkprinsipper, og bør derfor være anvendbare også for forhold gjeldende for denne rapporten. Modellene har i tillegg blitt grundig validert mot eksperimentelle data hentet fra forskjellige typer tunneler.

### **Veitunneler:**

Veitunnelene har typisk ikke samme tverrsnitt som nye togtunneler. Videre har veitunnelene mindre begrensninger i maksimal stigning enn togtunneler. Stigningen har en viktig effekt på røykspredningen, på grunn av oppdriften som brannen skaper. *Blockage ratio*, det vil si hvor mye av tunneltversnittet er fylt av et kjøretøy, vil også være annerledes for veitunneler. Likevel gir, spesielt storskalatester av veitunneler innsyn i strømningsdynamikken i tunneler som også er relevant for togtunneler.

### **Trikk, metro og gamle tog:**

Trikker og metro (herunder undergrunnsbane og undergrunnsvogner) bygges ikke etter samme standard som persontog. Dette vil påvirke hvilket brannforløp som kan forventes og hvor høy den maksimale varmeavgivelseshastigheten (eng: heat release rate, HRR) kan bli. Faktorer som påvirker dette, blir diskutert i underkapittel 3.1.4. En viktig faktor er for eksempel antall og størrelse på vinduene. Metro og trikker har ofte en større vindusoverflate per tog lengde, som kan føre til bedre ventilerte branner og dermed større maksimal HRR. Videre kan energiinnholdet i en trikk eller metro være større og brannegenskapene til interiøret dårligere enn i moderne tog. Dette gjelder også for gamle persontog som ikke er bygget i henhold til de nyeste standardene. På grunn av få storskalatester av nye tog bygget i henhold til EN 45545 [3,4] er det nødvendig å basere vurderingene på andre studier. Om resultatene fra disse studiene vil være konservative eller ikke, i forhold til moderne tog, vurderes derfor for hver studie individuelt.

## 2.3 De mest sentrale forskningsprosjektene

I arbeidet med denne rapporten er følgende forskningsprosjekter funnet å være mest sentrale for å svare ut hovedspørsmålene. Her gis en kort introduksjon til prosjektene og hvorfor data fra disse er ansett som relevante. Som nevnt ovenfor blir detaljene fra disse som er ansett som relevant for denne studien beskrevet nærmere der disse er brukt i kapittel 3.

**METRO-prosjektet:** METRO prosjektet er et stort forskningsprosjekt som omhandler infrastruktur på skinner og i metrosystemer. Flere fullskalatester ble utført i Brunsberg-tunnelen i Sverige, som er 276 meter lang. Tverrsnittet i tunnelen varierer langs tunnelens lengde, men gjennomsnittlig er bredden 6,4 m og gjennomsnittlig høyde 6,9 meter. Maks HRR i branntestene var 77 MW. Både gamle og rehabiliterte/oppgraderte metro-togsett ble brukt (oppgradert til å ligne togsett iht. EN 45545 [3,4]). [5,6]

*METRO-prosjektets relevans for denne rapporten:* METRO-prosjektet er ett av få veldokumenterte fullskala branntester i tog tunnel. De rehabiliterte/oppgraderte metro-togsettene var utført etter ny standard. Brannen utviklet seg annerledes i de gamle togsettene sammenlignet med de nyere, men maks HRR for de to var veldig like. I tillegg, når brannen først var i gang, var røykens utvikling og branndynamikken lignende. Det vil kunne være forskjeller mellom rehabiliterte/oppgraderte metro-togsett og nye togsett bygd iht. EN 45545 [3,4] og TSI SRT [2], men det foreligger ikke data for å dokumentere denne forskjellen. Det må også nevne at METRO-testene ble gjennomført med tre åpne dører på en side som hjelper ventilasjonen av brannen.

**EUREKA-prosjektet:** I dette prosjektet ble 21 branntester utført (inkludert IC, ICE) i Reppar tunnel nær Hammerfest i Norge. Flere aspekter av tunnelbranner ble studert, inkludert brann som fenomen, rømning, redning, brannsløkking og påvirkning på tunnelkonstruksjonen. Tunnelen er 2,3 km lang, 5-6 m høy, 6-7 m bred (ru vegger som gjør at dette varierer med opptil en halv meter). [7-9]

*Eureka-prosjektets relevans for denne rapporten:* Togsettene som ble brukt var ikke i henhold til nyere standarder, og informasjon om HRR fra disse testene er derfor brukt som bakgrunnsinformasjon, men ikke som underlag for dimensjonerende brannkurver (se detaljer i underkapittel 3.1).

**Memorial-prosjektet:** Memorial-testprogrammet ble utført i Memorial-tunnelen, som er en 850 m lang toveis veitunnel med 3,2 % stigning. Det ble gjennomført ca. 100 branntester med ulike brannstørrelser for å undersøke relevante parametere slik som tunnelventilasjon, luftstrøm, temperatur og gasskonsentrasjoner. [9,10]

*Memorial-prosjektets relevans for denne rapporten:* Detaljnivået og omfanget på datasettet som er rapportert fra dette prosjektet er omfattende. Det er detaljerte datasett for temperaturfordeling og synlighet i røyk for ulike brannstørrelser. Selv om dette er en veitunnel med større stigning enn tog tunnel vil ha, kan det likevel dras nytte av generell informasjon om røykutvikling og branndynamikk. I tillegg omfatter studien informasjon om mekanisk ventilasjon i form av takmonterte jet-vifter, og effekten av disse på branndynamikk og røyk forventes å være lignende for vei- og tog tunneler.

**Runehamar-branntester:** RISE har gjennom en årrekke gjennomført mange branntester i Runehamar testtunnel i Åndalsnes i Norge, som er en ca. 1600 m lang vegtunnel med et tverrsnitt på ca. 47-55 m<sup>2</sup> (ca. 6 m høy og 9 m bred, avhengig av hvor det måles). Noe av datagrunnlaget fra testene er tilgjengelig i åpne forskningsrapporter, annet er utført for kommersielle aktører, og er ikke åpnet tilgjengelig. I en av de åpne rapportene fra branntester i tunnelen ble en mock-up-trailer med ulik brannenergi testet, med brannstart 1037 m fra østre inngang, med en maks HRR for de ulike testene i området 66-202 MW [11].

*Runehamar-prosjektens relevans for denne rapporten:* Gode, detaljerte datasett fra fullskalaforsøk er alltid relevante for å se på røykutvikling og branndynamikk. I tillegg, er dette en veitunnel med et tverrsnitt som er i samme størrelsesorden som det angitt for en ett-spors

togtunnel (60 m<sup>2</sup>). En mock-up-trailer opptar en vesentlig andel av tunnelens tverrsnitt, lignende det som et togsett gjør. Resultater fra slike brannforsøk vil dermed dels være relevante også for denne studien.

## 3 Dimensjonerende brannscenarier og røykkontroll

### 3.1 Dimensjonerende brannscenarier

I dette kapittelet vil forutsetninger for brannutvikling bli beskrevet, for å komme frem til mulig dimensjonerende brannscenarier og potensielle konsekvenser for redning, for å svare ut følgende hovedspørsmål:

*2. Hva er det som kan skape et dimensjonerende brannscenario som kan legges til grunn for å vurdere hvilken aktiv innsats som kan/bør gjøres av redningstjenester i de ulike fasene av en tunnelbrann? Med andre ord, hva kan initiere brannen, hva skal til for at den skal vedlikeholdes, og eventuelt utvikle seg?*

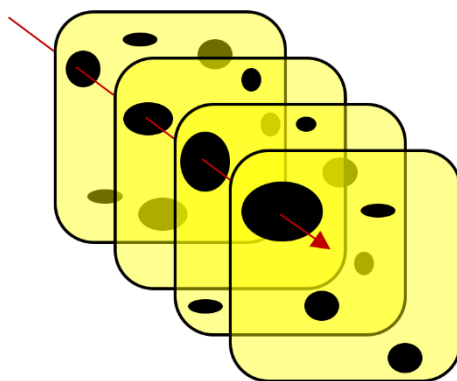
*3. Hvordan vil en slik brann utvikle seg med tanke på røyk og temperatur, og hvilken betydning kan dette ha for selvredning?*

Kortfattet svar på hovedspørsmål:

*2. Branner av type 2 og type 3, definert etter EN 50553 [12] og branner som følge av en primærhendelse kan føre til togstopp og brann i en tunnel. På grunn av «strenge» krav til materialene i interiøret, i henhold til EN 45545 [3], spiller bagasjen en viktig rolle for at brannen kan vedlikeholdes og utvikle seg og vokse. Alvorlig brannstiftelse med tilstrekkelig bagasje på toget anses som et mulig «credible worst case» scenario.*

*3. På grunn av manglende vitenskapelig underlag og antall faktorer som påvirker brannforløpet finnes det ikke et fasitsvar på brannforløpet i et «nytt» tog. Basert på data som er tilgjengelig, først og fremst METRO-prosjektet, konkluderes det at den dimensjonerende brannkurven vil ligge mellom en 20 MW brann med «medium» vekstrate og i verste fall en 60 MW brann med en «fast» (rask) vekstrate. Den store spredning mellom den nedre og øvre grensen begrunnes med at resultatene fra tester med trikk, metro eller gamle tog ikke direkte kan anvendes på nyere tog.*

Sikkerhetsbarrierer brukes for å forhindre at uønskede hendelser inntreffer, og for å forhindre at små hendelser blir store. En vanlig tilnærming til barrieretankegang er Sveitserostmodellen (Figur 3-1), som viser at selv om det i utgangspunktet er på plass mange barrierer for å forhindre en uønsket hendelse, kan likevel disse inntreffe, noe som bekreftes av evalueringer av historiske hendelser [13]. Barrierebrudd kan ha vært der hele tiden, eller de kan ha oppstått som følge av en annen uønsket hendelse. For jernbanetunneler og togsett som brukes i Norge i dag, er det barrierer på plass for å hindre antennelse, og for å hindre at kupeens interiør skal bidra mye til brannen. Selv om branner vil være et lav-frekvensfenomen, vil barrierebrudd kunne gjøre at det oppstår branner, og noen av disse vil kunne eskalere til større hendelser. De påfølgende underkapitlene vil se på hva som kan skape et dimensjonerende brannscenario basert på «worst credible case».



Figur 3-1: Illustrasjon av sveitserostmodellen, hvor en uønsket hendelse (rød pil) kan inntreffe, selv om det er flere barrierer på plass (gule osteskiver), ettersom det kan være brudd i barrierene (hull i osteskivene). Barrierebrudd kan ha vært der hele tiden («latent conditions»), eller ha kommet på grunn av andre uønskede hendelser («active failures»). Figuren er laget basert på [13].

### 3.1.1 Forutsetninger for togbrann i tunnel

Betraktningene i denne studien er basert på tunnel og togsett som er bygget etter henholdsvis TSI SRT [2] og EN 45545 *Railway applications - Fire protection on railway vehicles* [3]. EN 45545 stiller funksjonskrav til togets kjøreevne under en brannhendelse, slik at toget klarer å komme seg fram til et *safe area*. [3]. Hvordan disse kravene oppnås er definert i EN 50553 *Railway applications - Requirements for running capability in case of fire on board of rolling stock* [12] klassifiserer branner i tre forskjellige typer:

#### Type 1-brann

Branner som ikke representerer en signifikant risiko for alvorlige skader eller tap av liv. Type 1-branner tilsvarer en typisk brannenergi som er beskrevet i antennelsesmodeller 1 – 4 i EN 45545, vedlegg A. Per definisjon representerer type 1-branner ingen signifikant risiko og det stilles derfor ingen krav til togets kjøreevne ved slike branner.

#### Type 2-brann

Type 2-branner representerer en signifikant risiko for alvorlig skader og/eller tap av liv samtidig er de så «små» at det er rimelig («*reasonably practicable*») å stille krav til togets kjøreevne. Brannenergien definert i antennelsesmodell 5, som beskrevet i EN 45545, vedlegg A, anses som en referansebrann for type 2-branner.

#### Type 3-brann

Type 3-branner representerer en signifikant risiko for alvorlige skader og/eller tap av liv, men som det **ikke** er praktisk mulig («*reasonably practicable*») å stille krav til togets kjøreevne. Eksempel på Type 3-branner, etter EN 50553, er alvorlig brannstiftelse eller katastrofale feil på drivstoffsystemet.

## Branner som ikke er klassifisert

EN 50553 tar ikke hensyn til situasjoner hvor en primær hendelse, som ikke er en brannhendelse, fører til sannsynlig stopp av toget. Branner som oppstår direkte eller indirekte som konsekvens av en slik hendelse er dermed ikke dekket av standarden. Eksempler på slike branner kan være en brann som oppstår på grunn av friksjonsvarme ved en alvorlig mekanisk feil som fører til avsporing.

Siden det ikke stilles krav til togets kjøreevne ved en type 1-brann, er det ikke gitt at en slik brann ikke fører til togstopp i en tunnel. Likevel er type 1-branner ikke relevante i en *credible worst case*-sammenheng, da disse brannene ikke er forbundet med en signifikant risiko for alvorlig skader eller tap av liv.

EN 50553 stiller heller ikke krav til togets kjøreevne ved type 3-branner, som begrunnes med at disse brannene er så store at det ikke er praktisk mulig å designe toget slik at kjøreevnen kan opprettholdes. Det er derimot viktig å skille mellom kravene som stilles til togets kjøreevne og kravene som stilles til evakuering, selvredning og redningsarbeid i henhold til § 3-5, *Tunneler og broer m.m.* i forskrift om nasjonale tekniske krav m.m. for jernbaneinfrastruktur på det nasjonale jernbanenettet (jernbaneinfrastrukturforskriften): «Tunneler og broer skal utformes og utstyres slik at det gir muligheter for evakuering og selvredning i tilfelle av brann og andre ulykker. Det skal legges til rette for at redningspersonell kan drive effektivt redningsarbeid, herunder av orienterings- og bevegelseshemmede. [...]». Det vil si at EN 50553 kategoriserer branner kun ut i fra togets utforming, uten å ta hensyn til tunnelens utforming. Konsekvensen av en type 3-brann kan derfor være at et tog stopper i en tunnel.

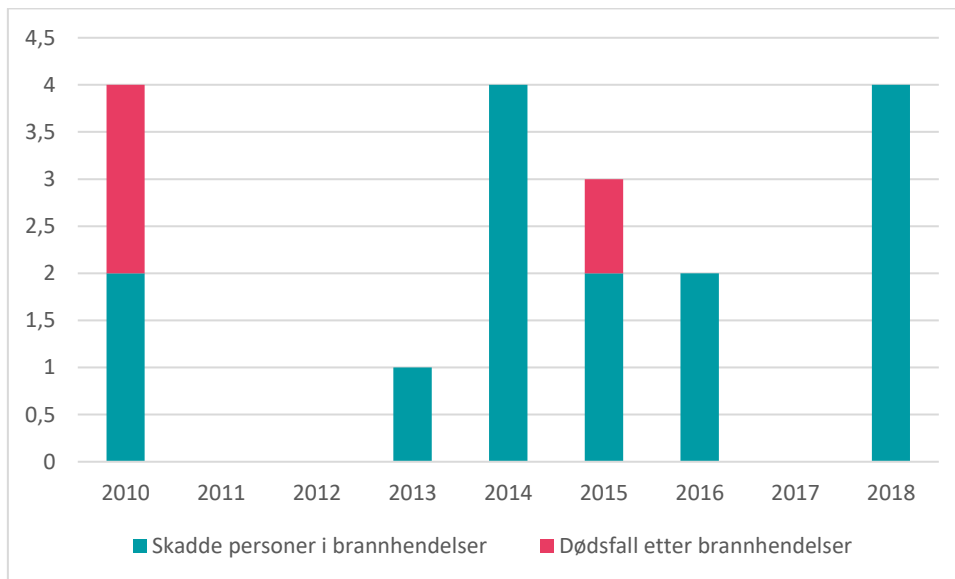
Et annet scenario som kan føre til togbrann i en tunnel er branner som oppstår på grunn av en primærhendelse, som selv ikke er en brannhendelse. Disse scenarioene er ikke klassifisert i EN 50553. Selv om slike hendelser ikke er primære brannhendelser, er de fortsatt relevante for selvredning og innsatsen av brannvesenet. Sannsynligheten av slike hendelser er ikke blitt kvantifisert i denne rapporten, men det må tas hensyn til at ikke alle hendelser som fører til at tog stopper eller mister kjøreevne fører også til en brann. Derfor er frekvensen for slike brannhendelser lavere enn frekvensen for primærhendelsene.

Det antas at frekvensen av type 2-branner er større enn frekvensen av type 3-branner. Tog bygd etter EN 45545 og TSI SRT skal ha tilstrekkelig kjøreevne til å kunne kjøre ut fra kortere tunneler, med en lengde under 1 km, eller kunne ta seg fram til et sikkert område (*safe area*) i lange tunneler, med en lengde over 1 km. Dette er minimumskrav og det kan tenkes at toget vil ha bedre kjøreevne og dermed også ha muligheten til å kjøre ut også av lengre tunneler.

Scenarioer hvor en type 2-brann oppstår og toget stopper ved et sikkert område i tunnelen er likevel relevant for dette studie. I disse tilfellene er det tilrettelagt for selvredning ut fra tunnelen, siden toget stopper ved et sikkert område. Imidlertid vil brannvesenet fortsatt gjennomføre redningsinnsats, siden det ikke kan garanteres at alle personer har klart å evakuere toget. Brannvesenet må unngå å hindre evakuering av passasjerer ved å blokkere rømningsveiene. Det medfører at selv om en type 2-brann ikke fører til umiddelbar togstans, kan det oppstå en situasjon hvor brannvesenet skal utøve innsats i en tunnel hvor et tog brenner. Når man betrakter hele risikobildet, for eksempel i en kvantitativ risikoanalyse (QRA), må det tas hensyn til at toget i mange tilfeller sannsynligvis vil ha muligheten å forlate tunnelen før det stopper opp. Dette er avhengig av scenario (tunnellengde, togets posisjon i tunnelen ved brannstart, m.m.).

Branner som starter i eksempelvis tekniske rom i tunnelen eller i andre deler av tunnelen enn i toget, er ikke vurdert i denne studien.

For å sette brannhendelser og deres frekvens i sammenheng med andre hendelser henvises det til Eurostat-statistikk<sup>2</sup>. I 2018 ble for eksempel 120 kollisjoner og 75 avsporinger registrert i de 28 EU-landene<sup>3</sup> som bidrar til Eurostat-statistikk. I samme år ble 36 brannhendelser registrert. Generelt er frekvensen av branner som fører til skade eller død lav i forhold til skader og dødsfall på grunn av andre hendelser på tog. Figur 3-2 viser antall skadde og døde på grunn av brann på tog i de 28 EU-landene som er inkludert i Eurostat-statistikken. Dersom en QRA skal gjennomføres, må man studere disse brannhendelsene i detalj og se på hvilken type brann det dreide seg om, og luke vekk irrelevante hendelser. Videre er antall tog som kjører vurdert opp mot antall hendelser eksempel på en viktig faktor.



Figur 3-2 Antall skadde og døde på grunn av brann på tog i de 28 EU-landene som er inkludert i Eurostat-statistikk (data fra Eurostat<sup>2</sup>).

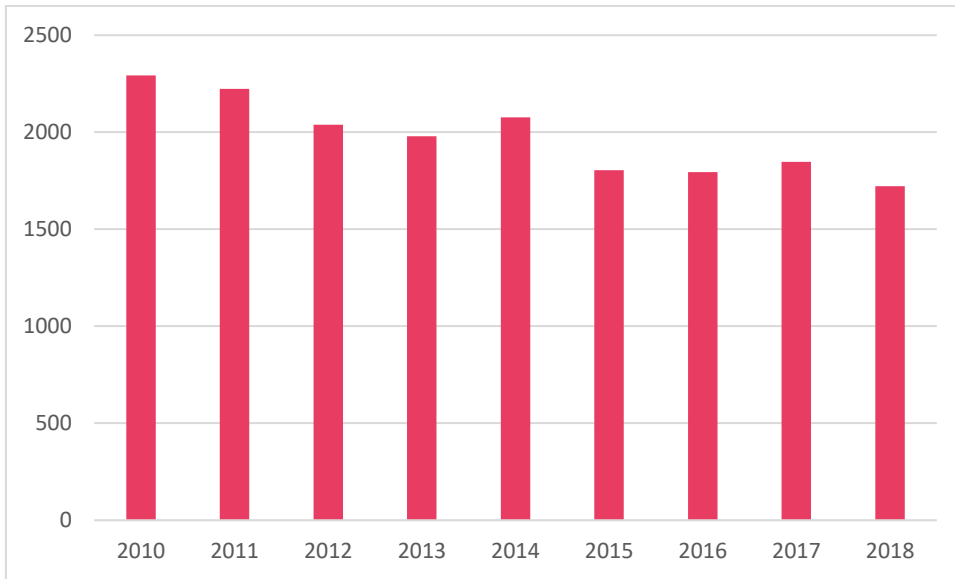
Generelt sett synker antall togulykker<sup>4</sup> i Europa (se Figur 3-3). Antall branner på tog følger derimot ikke samme trend, her er det indikasjoner på en økning (se Figur 3-4).

<sup>2</sup> [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran\\_sf\\_railac&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=tran_sf_railac&lang=en)

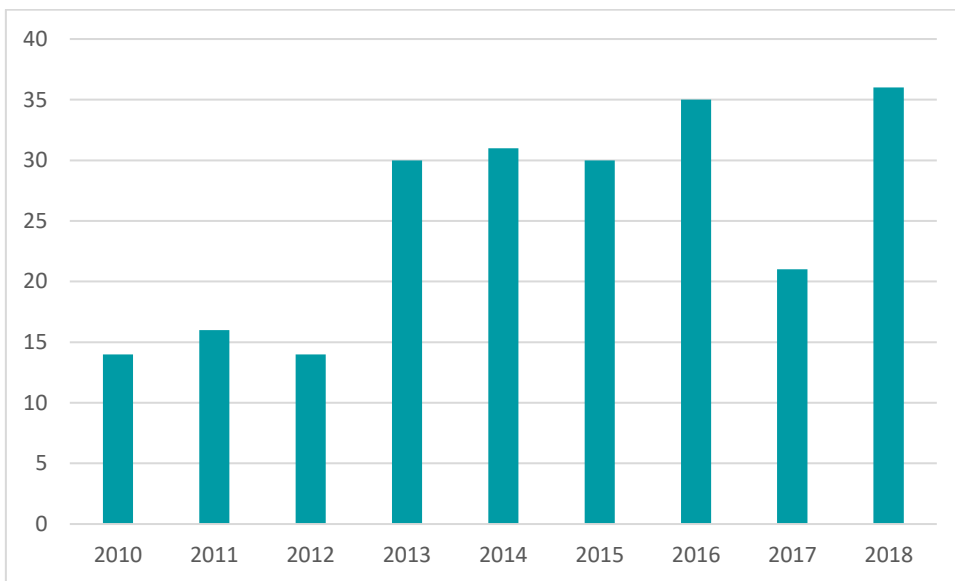
<sup>3</sup> Alle EU landene per 1. juli 2013.

<sup>4</sup> Inkluderer: *Collisions of trains, including collisions with obstacles within the clearance gauge; Derailments of trains; Level crossing accidents; Accidents to persons caused by rolling stock in motion; Fires in rolling stock; Others; Unknown.*





Figur 3-3 Antall togulykker i de 28 EU-landene som er inkludert i Eurostat-statistikk. (data fra Eurostat<sup>2</sup>).



Figur 3-4 Antall branner på tog i de 28 EU-landene som er inkludert i Eurostat-statistikk (data fra Eurostat<sup>2</sup>).

Oppsummert, så kan alle branner, som klassifisert i henhold til EN 50553 (type 1, 2 og 3), føre til at et tog som brenner stopper i en tunnel. Imidlertid ser vi bort fra type 1-branner, siden konsekvensene vil være små. I tillegg kan et tog brenne i en tunnel som konsekvens av en primærhendelse. I en *worst credible case*-tilnærming er type 3-branner og branner som oppstår som konsekvens av en primærhendelse mest relevant. Selv om disse scenarioene trolig har lav frekvens, kan det ikke ses bort fra muligheten for at et slikt scenario kan inntreffe. For en nærmere frekvensanalyse av slike hendelser bør det gjennomføres en QRA.

### 3.1.2 Potensielle antennelseskilder

I en tidlig fase av en brann, som oppstår i et togsett, er brannspredningshastigheten i hovedsak avhengig av antennelseskilder, tilgjengelig brensel (herunder bagasje) og lufttilførsel [14]. Dette underkapittelet omhandler potensielle antennelseskilder og brensel som er tilgjengelig i den initiale brannfasen.

Kravene i EN 45545 er basert på fem forskjellige såkalte antennelsesmodeller som er oppsummert i EN 45545-1, vedlegg A [3]. Antennelsesmodeller er i denne sammenheng definert av forskjellige varmekulser i kombinasjon med varigheter som skal representere potensielle antennelseskilder i virkeligheten. Antennelseskildenes størrelse varierer fra 7 kW i 3 minutter til 150 kW i 8 minutter og har en gjennomsnittlig varmekulstetthet på 20 – 30 kW/m<sup>2</sup>. Den mest utfordrende modellen er modell 5, som skal representere brann i bagasje eller brannstiftelse. Modell 5 beskriver en brannkilde med flammer som genererer en nominell varmekulstetthet på 20 kW/m<sup>2</sup> – 25 kW/m<sup>2</sup> (som gir i snitt 75 kW på en overflate av 0,7 m<sup>2</sup>, som er definert i standarden), i en periode på 2 minutter. Etter 2 minutter økes varmekulstettheten umiddelbart til 40 kW/m<sup>2</sup> – 50 kW/m<sup>2</sup> (som tilsvarer 150 kW på den samme overflate av 0,7 m<sup>2</sup>), og opprettholdes i 8 minutter. Branner fra en antennelseskilde tilsvarende modell 5 kategoriseres som en type 2-brann i EN 50553 (se forrige underkapittel).

Varmekulstettheten (*incident radiation*) som legges til grunn for de fleste materialtester som det henvises til i EN 45545-2 [4] er enten 25 kW/m<sup>2</sup> eller 50 kW/m<sup>2</sup>. Disse varmekulstetthetene representerer for det meste antennelseskilder som brennende aviser eller flammer med noen desimeters høyde. EN 45545 tar også hensyn til antennelseskilder fra lysbuer og unormale temperaturer. Brennbare væsker og gasser er behandlet i del 7 av EN 45545, men ikke som antennelseskilder.

Intensjonen med tiltakene som er spesifisert i EN 45545 er blant annet å minimere sannsynligheten til antennelse av materialene (i togets interiør) på grunn av uhell eller brannstiftelse. I og med at det settes slike krav til materialene i toget anses derfor medbragt bagasje som en viktig faktor for brannrisikoen. Bagasjen kan i denne sammenheng representere både antennelseskilder og brannenergi som kan forsyne brannen med brensel i tidligfasen, slik at brannen blir større enn hva som er lagt til grunn i EN 45545.

EN 50553 beskriver at: «*Any volume used for the placement of luggage in accordance with the operational protocol which is less than 0.55 m x 0.35 m x 0.25 m in any orientation shall not be considered as a possible source of a Type 2 fire.*» I en *worst credible case*-sammenheng antas at det at dette bagasjekravet ikke nødvendigvis er etterlevd i like stor grad som det for eksempel gjøres i flybransjen.

FIRESTARR-prosjektet konkluderte at de mest sannsynlige antennelseskildene var brannstiftelse i setene eller på toalettene, samt elektrisk feil. På grunn av de branntekniske kravene som stilles til setene og innredningen med hensyn til antennelighet, anses brannstiftelse, i kombinasjon med brannenergien i medbragt bagasje, som en sannsynlig kilde for større branner. Videre er disse faktorer også vanskeligere å kontrollere enn for eksempel tekniske installasjoner på toget.

Antennelseskilder som fører til branner utenfor kupéen, som for eksempel fullt utviklede dieselbranner (type 3, eller på grunn av en annen primærhendelse) er ikke nærmere analysert. Det kan antas at primærhendelser som fører til at for eksempel toget stopper også tilfører nok

antenneseenergi (for eksempel avsporing som fører til lekkasje av brensel kan også fører til tilstrekkelig friksjonsvarme eller gnist for å antenne brensel).

Basert på statistikk fra Trafikverket i Sverige i perioden fra januar 2002 til juli 2012 har 36 % (11 branner) av branner som er for store til å kunne slokkes med brannslukningsapparat utgangspunkt i understell, under golvet eller ved hjulene. 16 % (5 branner) av de registrerte brannene startet i kupé og like mange i andre områder, som for eksempel tekniske skap. [14]

### 3.1.3 Forutsetninger for brannutvikling inne i en kupé

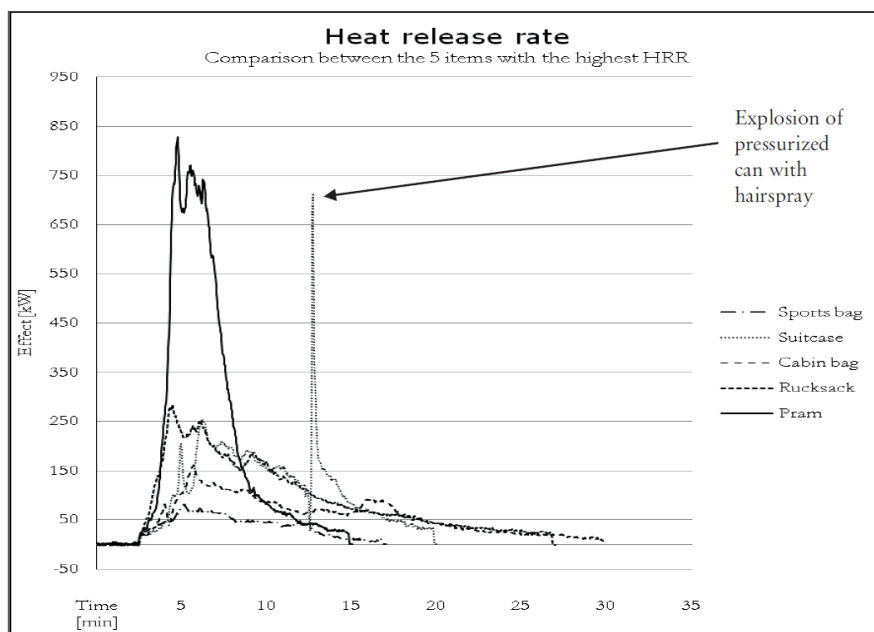
I dette underkapittelet vil det bli beskrevet hvordan interiøret i en kupé og bagasje kan bidra til at en brann utvikler og sprer seg. Som tidligere nevnt er tilgjengelig brensel, herunder bagasje, sentralt for brannspredningshastigheten i tidlig fase av brannen [14].

Materialene som brukes i interiøret i en togkupé skal være i samsvar med EN 45545-2:2013 «Jernbane, Brannsikring av jernbanevogner, Del 2: Krav til materialers og komponenters virkemåte ved brann». Denne angir branntekniske krav til materialer for de ulike farenivå (*hazard levels*) som er nevnt i EN 45515-1:2013 og den inneholder en rekke krav for ulike bruksområder. Ett eksempel er innvendige overflater. Disse skal testes og oppfylle kriterier med tanke på flammespredningshastighet, røykproduksjon og varmeavgivelse ved brann. Materialene som oppfyller disse kriteriene trenger ikke å være ubrennbare, men under testene skal materialene motstå en brannpåvirkning som skal dokumentere at de er vanskelige å antenne og at de i liten grad vil bidra til en brannutvikling dersom de først antenner. Det meste i en togkupé, med unntak av bagasje og passasjerens klær, er med andre ord spesifisert i standardene.

I METRO-prosjektet var ett av funnene at bagasje kan stå for opptil 50 % av brannenergien i et fullt tog, og etterlatt bagasje må hensyntas når mengde brannenergi i en kupé skal vurderes [5]. Kumm [15] viste at etterlatt bagasje også kan bidra til brannspredning og føre til overtenning («flash-over»), i tillegg til at den ekstra brannenergien kan gi brannen økt varighet, påvirke konstruksjonen og redningsinnsatsen. Forbrenningsvarme for bagasje generelt ble funnet å være rundt 20 MJ/kg, og at HRR i en brenselkontrollert brann vil være cirka 5,5 MW.

En annen studie rapporterer varmeavgivelse fra fem typiske bagasjetyper: sportsbag, koffert, liten bag, ryggsekk og barnevogn [15], se Figur 3-5. Eksempelvis kan en antent barnevogn alene forårsake en lokal overtenning, ettersom den i løpet av kort tid kan utvikle 831 kW [16].

Studiene viser tydelig at bagasje kan føre til varmelaster som overstiger spesifikasjonen fra EN 45545 og at det er nødvendig å hensynta bagasje i risikovurderinger og når innsatstaktikken skal utformes.



Figur 3-5 HRR kurve for forskjellige stykk bagasje [15].

Modellskalatestene i METRO-prosjektet [17] viser hvor viktig bagasjen er for å oppnå rask brannspredning og høye HRR, selv for branner som er stort sett brenselkontrollerte. I testene ble bagasje simulert ved bruk av trekrybber som brensel. I storskalatestene i METRO-prosjektet ble bagasje valgt basert på en studie utført av Mälardalens universitetet [15]. Studien analyserte 323 stykk bagasje [17] viser hvor viktig bagasjen er for å oppnå rask brannspredning og høye varmeavgivelseshastigheter, selv for branner som er stort sett brenselkontrollerte. I testene ble bagasje simulert ved bruk av trekrybber som brensel. I storskala-testene i METRO-prosjektet ble bagasjen valgt basert på en studie utført av Mälardalens universitetet [15]. Studien analyserte 323 stykk bagasje på metro og 299 stykk bagasje på pendlertog i Stockholm. På pendlertoget var gjennomsnittsvekten av bagasjen på 4,65 kg (4,4 kg på ukedager, 4,9 kg på ferie dager og helg). Det antas at vekten på regiontog vil være høyere. Begrensninger flyselskapene gir for bagasjen kan for eksempel brukes for å estimere grovt hvor mye bagasje en ferie- og fritidsreisende kan ha med seg. Flyselskapene SAS og Norwegian har for eksempel en maksimal vekt for innsjekkert bagasje på 23 kg. Vektgrensen for håndbagasje er henholdsvis 8 kg og 10 kg. Legger man til grunn ett innsjekkert kulli samt ett kulli håndbagasje per passasjer er det nesten syv ganger mer enn i studien fra Mälardalens universitetet [15]. Dette er et grovt estimat siden det ikke finns samme vektbegrensninger på tog som på fly. Samtidig vil en del av passasjerene reise med mindre bagasje. Imidlertid vil det være mest relevant på helger og feriehøytider, siden det antas at flere passasjerer vil ha større mengde bagasje med på disse tidene, og tallene er et estimat og ikke basert på en feltstudie. På sommeren kjører Vy også tog som fører én ekstra vogn for sykler<sup>5</sup>. Sykler bidrar ikke mye til økningen av brannenergi [15].

Passasjerkapasiteten varierer avhengig av tog type. Tog av type 74, som eksempelvis brukes av Vy, har 240 sitteplasser og opp til 268 ståplasser (ved 4 personer/m<sup>2</sup>). Vy oppgir et realistisk maksimalt belegg for en type 74-tog på rundt 450 passasjerer per togsett, det vil si ca. 900 passasjerer i et dobbeltsett. Tog av type 75 har 295 sitteplasser og opp til 264 ståplasser (ved 4 personer/m<sup>2</sup>). Vy oppgir et realistisk maksimalt belegg for et type 75-tog på rundt 500

<sup>5</sup> E-post fra kontaktperson i prosjektet fra Vy (2020-06-02).

passasjerer per togsett, det vil si ca. 1000 passasjerer i et dobbeltsett. Flytoget oppgir at togene med mest belegg i ekstreme situasjoner kan ha 400 – 450 passasjerer fordelt på 8 vogner med 500 seter.<sup>6</sup>

Studien fra Mälardalens universitetet [15] konkluderer med at brannenergien fra bagasjen i en metro-tog er 85 GJ. Dette er basert på 1200 passasjerer, hvorav 82 % medfører har 4,2 kg bagasje. Bruker man samme bagasjemengde og materialsammensetning som Kumm [15] for 500 passasjerer (1000 passasjerer på et dobbeltsett) med en gjennomsnittsvekt på 4,65 kg er brannenergien av bagasjen 39 GJ (79 GJ på et dobbeltsett). Tabell 3-1 gir en oversikt over energiinnholdet for forskjellige storskalabranntester av tog og metro, som gir en forståelse av hvor mye 39/79 GJ er i forhold til det totale brannenergiinnholdet. Videre vil en stor del av energiinnholdet av et tog ikke være direkte eksponert for en brann, mens bagasjen vil være det.

Tabell 3-1 Oversikt over energiinnhold, maksimal HRR og tid til maksimal HRR for forskjellige storskalaeksperimenter. Tabellen er gjengitt fra [16].

Test	Brannenergiinnhold (GJ)	Maksimal HRR (MW)	Tid til maksimal HRR (min)	Referanse
<b>Tog</b>				
<i>EUREKA 499, test 11 (joined railway car; one half steel one half aluminum)</i>	55	43	53	[18]
<i>EUREKA 499, test 12 (ICE)</i>	63	19	80	[8]
<i>EUREKA 499, test 13 (IC)</i>	77	13	25	[8]
<i>British Rail 415, passenger railway*</i>	Ukjent	16	Ukjent	[19]
<i>British Rail Sprinter, passenger railway, fire retardant upholsteres seatings*</i>	Ukjent	7	Ukjent	[19]
<i>Carleton intercity train</i>	50	32	18	[20]
<b>Metro</b>				
<i>German subway car, EUREKA 499</i>	41	35	5	[8]
<i>METRO, test 2 (X1)</i>	60	76,7	12,7	[6]
<i>METRO Test 3 (refurbished X1, simulating C20)</i>	60	77,4	118	[6]
<i>Carleton subway car</i>	23	52,5	9	[20]

\*) Testrapportene er konfidensielle.

### 3.1.4 Dimensjonerende brannkurve

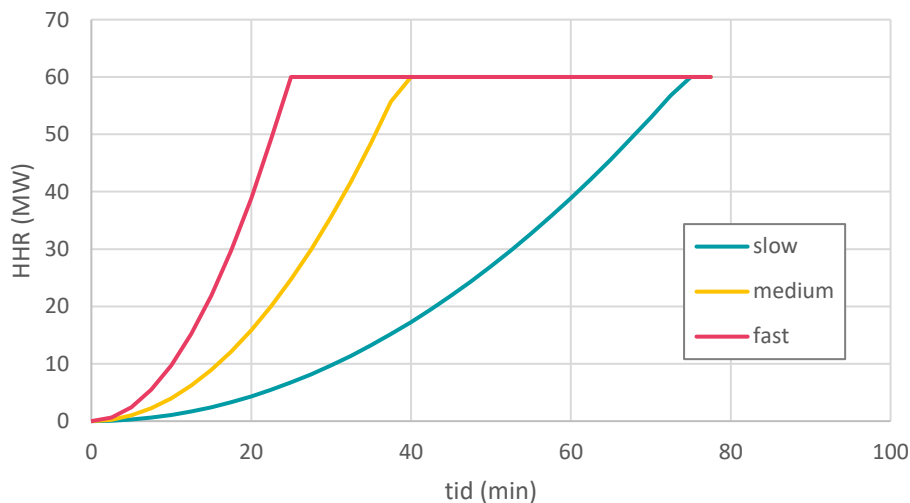
Modeller for dimensjonerende brannkurver kan hovedsakelig deles inn i tre kategorier:

- Lineære kurver
- Kvadratiske kurver

<sup>6</sup> E-post fra kontaktperson i prosjektet fra Flytoget (2020-05-19)

- Eksponentielle kurver

Den mest brukte tilnærmingen er kvadratiske kurver. For disse kurvene beskrives først en brannvekstfase hvor brannen vokser proporsjonal med kvadratet av tiden ( $\dot{Q} = \alpha t^2$ ), deretter en fase med konstant HRR og til slutt en fase hvor brannen avtar eksponentielt. Den første brannvekstfasen er mest avhengig av overflatematerialer, antennelseskilde, lufttilførsel og mengde bagasje [14]. Figur 3-6 viser et eksempel for tre brannkurver med forskjellige vekstrater,  $\alpha$  etter NFPA 72 [21].



Figur 3-6 Eksempel på kvadratisk HRR kurve for tre forskjellige vekstrater *fast* ( $\alpha = 0,027 \text{ kW/s}^2$ ), *medium* ( $\alpha = 0,011 \text{ kW/s}^2$ ) og *slow* ( $\alpha = 0,003 \text{ kW/s}^2$ ), begrenset til en maksimal HRR på 60 MW [14].

For å etablere en brannkurve er forskjellige tilnærminger mulige. En kurve kan etableres ved et grovt estimat basert på togtype, brannbarrierer, type togkarosseri, overflatematerialer og gjeldene brannstandarder. Siden dette er en grov tilnærming, bør estimatet være konservativt. Alternativt kan en brannforløpsanalyse gjennomføres. En slik tilnærming analyserer blant annet hvilke materialer det finnes i toget og etablerer brannforløpskurvene for disse og estimerer når de forskjellige materialer vil antennes. Den største nøyaktigheten oppnår man hvis en brannforløpsanalyse kombineres med brannforsøk. I denne studien etableres brannkurven basert på et grovt estimat som skal reflektere at togene er bygd etter EN 45545.

Parametere som påvirker brannens forløp, og dermed dimensjonerende kurve, er [22]:

- Overflatematerialenes brannegenskaper (tak, vegger og golv).
- Antall seter, seteplassering og setenes brannegenskaper.
- Vindusglassenes brannegenskaper og montering av vinduene.
- Vognkonstruksjon (stål eller aluminium).
- Døråpninger og eventuelle åpninger i taket.
- Størrelse og plassering av antennelseskilden.

- Bagasje<sup>7</sup> (mengde, brannegenskaper og plassering).
- Fuktinhold i materialene.

Noen av disse parameterne vil kunne variere fra tog til tog, selv om de er bygd etter de samme standardene. Forskjellen er enda større når man sammenligner gamle og nyere tog eller persontog og metroer, som for eksempel ofte har et større vindusareal. Utfordringen med å etablere en brannkurve uten å gjennomføre en brannforløpsanalyse er at nesten alle brannforsøkene er blitt utført med eldre togtyper som ikke lenger er representative for dagens tog. Forsøket som kommer nærmest et moderne tog, bygget etter EN 45545 er C20-modellen (modifisert X1) i METRO-prosjektet. Eureka-prosjektet ble gjennomført med tog som ble utrustet med seter i henhold til DIN 5510-2, som er sammenlignbar med EN 45545. Resten av interiøret tilsvarte brannbeskyttelsesnivået fra tiden da toget ble produsert (1965-1980) [23].

Åhneberg et al. [14] foreslår to mulige brannkurver basert på brannegenskapene til vegger og tak, samt krav i gjeldene brannstandarder (se Tabell 3-2). De foreslåtte brannkurvene i Tabell 3-2, med en maks HRR på henholdsvis 20 MW og 60 MW, er basert på modellskalatester (skala 1:3) utført i forbindelse med METRO-prosjektet [17]. Storskalatestene utført i METRO-prosjektet (test 2 og test 3) oppnådde imidlertid enda høyere varmeavgivelsehastigheter (opptil 77 MW), men konkluderte med at 60 MW burde brukes som et representativt *worst case*-scenario. Anbefalingen på 20 MW er basert på modellskalatester (skala 1:3) utført i forbindelse med METRO-prosjektet [17]. Storskalatestene utført i METRO-prosjektet (test 2 og test 3) oppnådde imidlertid enda høyere varmeavgivelsehastigheter (opptil 77 MW), men konkluderte med at 60 MW burde brukes som et representativt *worst case*-scenario. Anbefalingen på 20 kW er ikke støttet av storskalatestene i METRO-prosjektet, men på 1:3-modellen og andre studier. METRO-prosjektet konkluderer:

*If the fire resistance of the interior lining material, seats **and** windows are proven to be of high quality the designer **can consider** to use a lower value, such as 20 MW.»*

Prosjektet definerer derimot ikke kravene for å oppnå «høy kvalitet» og henviser til myndighetene for denne definisjonen.

---

<sup>7</sup>) METRO-prosjektet viste at bagasjen er spesielt viktig parameter i den tidlige fasen av brannen.

Tabell 3-2 Foreslåtte branneffektkurver for brann i tog der ytterdører antas å være åpne.

Scenario	Ubrennbare vegger og tak og innredning i henhold til EN 45545-2 HL 2	Overflater og innredning i henhold til EN 45545-2 HL 2	Overflater med lavere kvalitet
Brann med mindre antenneskilder (inkl. elektriske feil og mindre brannstiftelse)	<i>slow</i> opptil 1 MW	<i>slow</i> opptil 1 MW	<i>slow</i> opptil 1 MW
Brann i kupé med kraftig vandalisert sete eller antenneskilde på 10 – 200 kW	<i>slow</i> opptil 15 MW	<i>medium</i> opptil 20 MW	<i>medium</i> opptil 1 MW, og deretter <i>fast</i> opptil 60 MW
Brann i kupé med antenneskilde over 200 kW og stor mengde etterlatt bagasje	<i>medium</i> opptil 15 MW	<i>fast</i> opptil 20 MW	<i>fast</i> opptil 60 MW
Betydelig brann i understell/ førerhus med spredning til passasjerplass	<i>slow</i> opptil 15 MW	<i>slow</i> opptil 2 MW, og deretter <i>medium</i> opptil 20 MW	<i>slow</i> opptil 2 MW, og deretter <i>fast</i> opptil 60 MW

I en *worst credible case*-tilnærming ser man bort fra mindre og selvslukkende branner. Større branner kan enten være ventilasjonskontrollerte, som når dørene er lukket og vinduetne klarer å motstå brannpåvirkningen, eller brenselskontrollert, som når det tilstrekkelig ventilasjon, men at brannen begrenses av mengde brannenergi i toget. Viktige faktorer for å skille mellom de to sistnevnte brannscenarioene er åpninger i toget (vinder og dører). Åpne dører eller knuste vinduer tillater at mer oksygen kan trekkes til brannsonen.

Storskalatestene i METRO-prosjektet ble for eksempel gjennomført med tre åpne dører på én side av kupeen. I tillegg ble tunnelen mekanisk ventilert. Vindhastigheten i tunnelen var 1,5 m/s – 2,5 m/s. [6] I et tog bygd etter EN 45545, med stålkarosseri, lukkede dører og vinduer som klarer å motstå brannen lenge uten å knuse, vil brannkurven trolig ligge nærmere 20 MW. Hvis dører blir åpnet, som for eksempel under evakueringen, og vinduene knuser tidligere så vil storskalatestene fra METRO-prosjektet være mer representative og kurven ligge nærmere 60 MW. En *slow*-kurve med maks 20 MW anses dermed som nedre grense for en dimensjonerende brann for tog bygd i henhold til EN 45545 og en *fast*-kurve med maks 60 MW anses som en øvre grense for slike tog.

På grunn av manglende tester av nyere tog finnes det dermed ikke en fasit med hensyn til hvor den dimensjonerende brannkurven bør ligge mellom disse to grensene. En mulighet for å etablere mer nøyaktige scenarier er å gjennomføre en brannforløpsanalyse hvor energiinnholdet i spesifikke tog-typer analyseres nøyaktig for å etablere en brannkurve. Videre er det viktig at det dokumenteres hvordan vinduer reagerer på stor brannpåvirkning for å kunne ta hensyn til at vinduene er intakte lenge og dermed begrenser ventilasjonen til brannen. Røykspredning, som omhandles i neste kapittel, diskuteres derfor for både 60 og 20 MW.



## 3.2 Røykspredning

Dette underkapittelet omhandler hvordan røyk sprer seg i tunneler, for å svare ut følgende hovedspørsmål:

3. *Hvordan vil en slik brann utvikle seg med tanke på røyk og temperatur, og hvilken betydning kan dette ha for selvredning?*
5. *Forutsatt at brannvesenet har god kunnskap om tunnelbrann og taktikk, hva sier forskning og/eller erfaring om hvordan, og i hvilken grad, røykkontroll kan bedre innsatsmulighetene for nødetater? Og hvordan vurderer forskningsmiljøet at røykkontroll kan forbedre, eventuelt forverre, sikkerhetsnivået i tunnelen?*
6. *Hva sier forskning og/eller erfaringer om utviklingen av røyksjikt ved en større brann uten påslått ventilasjon? Hvor lange avstander inne i tunnelen vil det være røyksjikt, og hvor lenge (i tid) vil røyksjiktet opprettholdes før hele tverrsnittet blir fylt med røyk?*
7. *Finnes det forskning og/eller erfaring som tilsier at størrelsen på tunnelens tverrsnitt kan benyttes som argument for røykkontroll? (Eksempelvis som erstatning for mekanisk ventilasjon.)*

Kortfattede svar på hovedspørsmål:

3. *På grunn av generelt lave stigninger i tog tunneler har røyk en tendens å spre seg i begge retninger i tunnelen. Etter en viss lengde (erfaringsvis 100 – 150 m) bryter røyksjiktningen sammen, som vil ha en negativ effekt for både selvredning og innsatsen av nødetatene i tunnelen.*
5. *Den generelt lave stigning i tog tunneler gir relativt gode muligheter for å kontrollere hovedretningen av røykspredningen og dermed skape en trygg side i tunnelen med lavere temperaturer og bedre sikt. Samtidig kan mekanisk ventilasjon føre til at eksisterende røyksjiktning brytes ned. Videre kan plutselige retningsendringer av røykspredningen påvirke selvredningen og nødetatenes innsats negativt. Nødetatene må ta hensyn til at drift av vifter kan gjøre kommunikasjonen i tunnelen vanskeligere.*
6. *Røyksjiktning kan ikke opprettholdes over lange distanser (erfaringsvis maks kun 100 – 150 m) da røyken avkjøles og dermed ødelegger den termiske stratifisering. Hvor lenge (i tid) og nøyaktige tall vil være sterkt avhenge av lokale forhold og kan derfor ikke generaliseres. Røyksjiktning-fenomenet er ikke fullt ut forstått enda og det forskes aktivt på dette fenomenet.*
7. *Vi kjenner ikke til forskning som undersøker forskjellige tunneltversnitt for å oppnå tilsvarende effekt som mekanisk ventilasjon tilbyr. Røykspredningsanalysen tyder på at røyken vil, uten mekanisk ventilasjon, spre seg i begge retninger i tunnelen. Røyksjiktning kan ikke opprettholdes over lange distanser på grunn av avkjølingen av røyken. Dette vil også være tilfelle for tunneler med større tverrsnitt.*

### 3.2.1 Naturlig ventilerte vs. mekanisk ventilerte tunneler

Forbrenningsprodukter fra en brann er varmere enn omgivelsene og stiger derfor oppover. En brann i en tunnel fører derfor til at røyk samler seg oppunder tunneltaket. Røyken vil i begynnelsen spre seg i begge tunnelretningene. Samtidig som røyk sprer seg i den øvre delen av tunnelens tverrsnitt mot utgangene, trekkes det frisk luft mot brannen i den nedre delen av tverrsnittet. Røyken vil spre seg mer til en av retningene, avhengig av faktorer som for eksempel

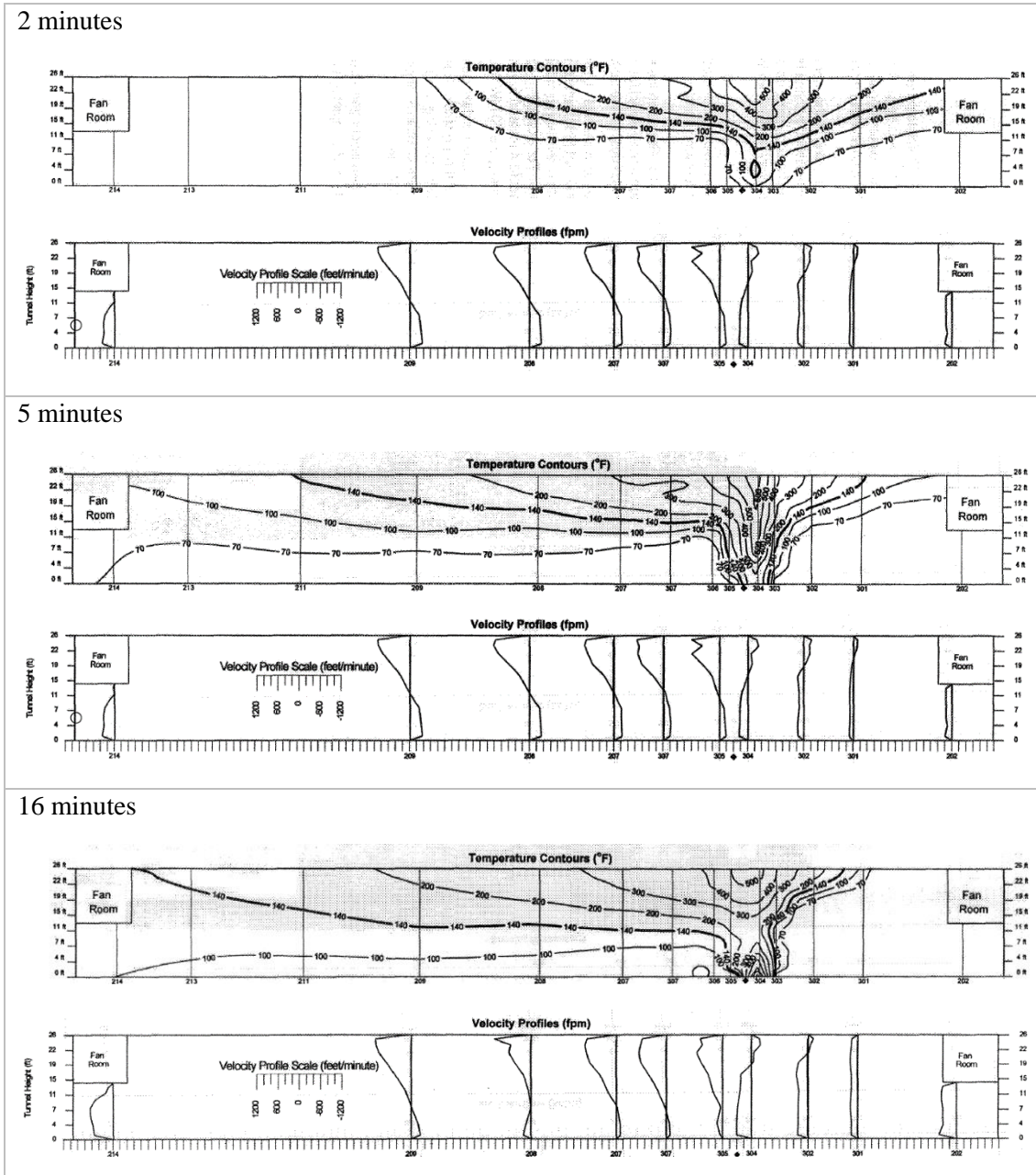
tunnelhellingen, brannens posisjon i tunnelen, vind- og trekkforholdene, osv. Memorial tunnelstudien [10] er valgt for å diskutere noen prinsipielle forskjeller mellom branner i naturlig ventilerte tunneler og branner i tunneler hvor det er installert aksialvifter. Testene undersøkte blant annet en 20 MW og en 50 MW brann. Dette er brannstørrelser som også er relevante for denne studien (se kapittel 3.1.4).

Memorial-tunnelen er ikke en togtunnel, men en 854 m lang veitunnel i Vest-Virginia, USA. Tunnelens tverrsnitt er 36,2 m<sup>2</sup>, som er mindre enn tverrsnittet for enkeltsporet tunnel (60 m<sup>2</sup>). En annen forskjell mellom Memorial-tunnelen og togtunneler er stigningen på 32 ‰, som er større enn maksimalstigningen på 12,5 ‰ for togtunneler.

Å se på en tunnel som har et mindre tverrsnitt enn togtunneler, vil gi et konservativt bilde, gitt at man legger samme brannstørrelse og mengde røyk produsert til grunn. Fysikken som fører til at brannen etablerer et eget hastighetsfelt i tunnelen, som for store branner uten mekanisk ventilasjon domineres av brannens oppdrift, vil være den samme. Jo større stigning tunnelen har, jo mer vil røyken trekke oppover i tunnellopet. Veitunneler kan ha mer variasjon i stigningen (de kan være brattere enn togtunneler) og effekten av stigningen for enkelte veitunneler er derfor mye større enn for togtunneler. Dette må tas hensyn til når man for eksempel bruker modeller som er utviklet for veitunneler i beregninger for togtunneler.

Ser man på de naturlig ventilerte testene i Memorial-tunnelen må man derfor anta at overgangen fra initialfasen, hvor røyk strømmer nesten like mye til begge retningene, til fasen hvor en retning dominerer, vil ta lengre tid i en togtunnel. Det er fordi brannens oppdrift, i kombinasjon med stigningen, er drivkraften for røykspredningen. Røyken vil dermed i større grad spre seg til en retning om stigningen er stor. Samtidig kan det tenkes at andre faktorer, som for eksempel vind fra utsiden (værforholdene), også kan føre til at røyk drives mer i en bestemt retning. Effekten fra vinden kan virke i samme retning som oppdriftskreftene fra brannen eller i motsatt retning.

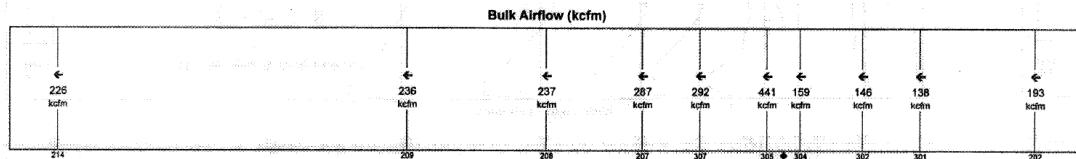
Figur 3-7 viser temperatur- og hastighetsfordelingen i Memorial-tunnelen ved en 20 MW brann. Brannens lokasjon er nærmere sørsiden av tunnelen (sør = høyre, nord = venstre i figuren). Nordsiden (venstre) er høyere oppe enn sørsiden (høyre). Temperaturen viser at den varme røyken i starten sprer seg bidireksjonalt. Etter fem minutter ble det observert at røyken fylte hele tverrsnittet i den nordlige delen, slik at det var ingen sikt på denne siden av brannen. Etter 14 – 16 minutter nådde ventilasjonshastigheten en stasjonær tilstand, slik at sørsiden ble røykfri. [10]



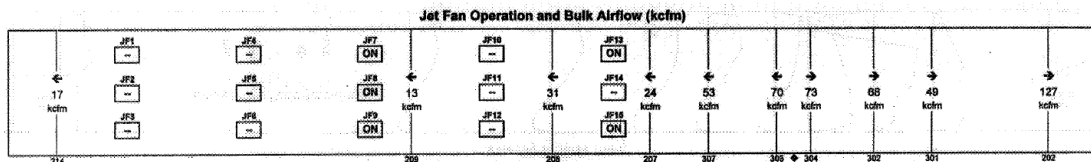
Figur 3-7 Temperatur- og hastighetsfordeling i Memorial-tunnelen ved en 20 MW brann. Figuren er hentet fra rapport, test 501 [10].

I Memorial tunnel-prosjektet ble forskjellige ventilasjonskonfigurasjoner undersøkt. Figur 3-8 viser to konfigurasjoner som ble testet for aksialvifter montert oppunder tunneltaket, og Figur 3-9 viser resulterende hastighetsfordeling tre minutter etter brannstart. I det som refereres som test 611 i figuren, ble kun viftene sør for brannen brukt, mens i test 624B ble kun viftene nord for brannen brukt. Forsøkernes mål var å snu røykretningen, fra sør-nord uten vifter til nord-sør med vifter. Alle tre tester (502, 611 og 624B) ble gjennomført med en brann på 50 MW.

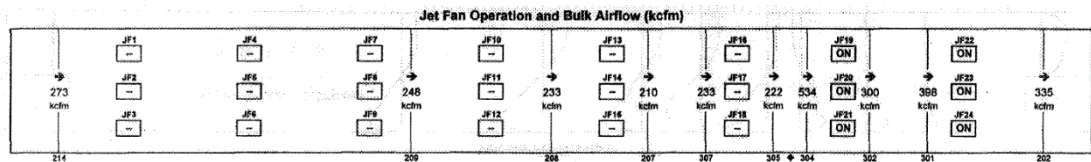
Ingen mekanisk ventilasjon (502)



Vifter oppstrøms\* av brannen (611)

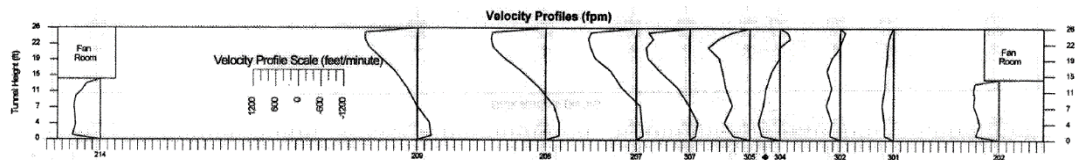


Vifter nedstrøms\* av brannen (624B)

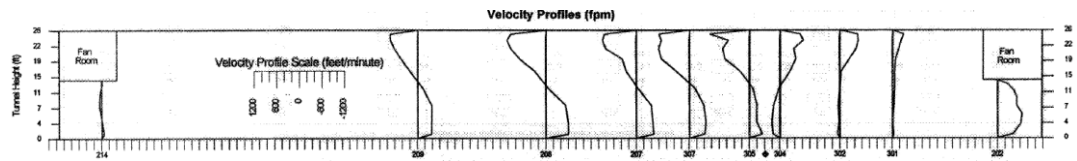


Figur 3-8 Ventilasjonskonfigurasjon for Memorial tunnel-testene ved en 50 MW brann. \*Strømningsretning relativ til vifteretningen. Figuren er hentet fra rapporten [10].

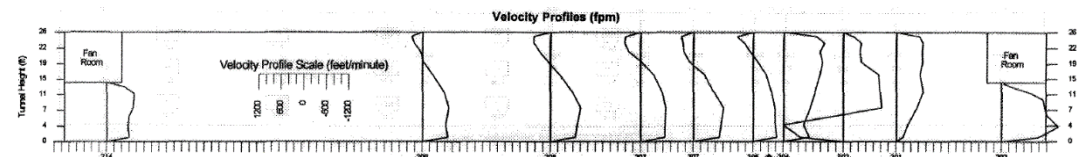
Ingen mekanisk ventilasjon (502)



Vifter oppstrøms\* av brannen (611)

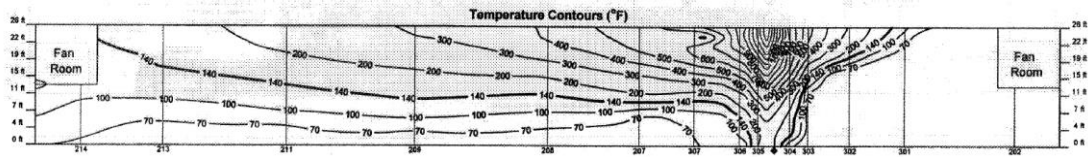


Vifter nedstrøms\* av brannen (624B)

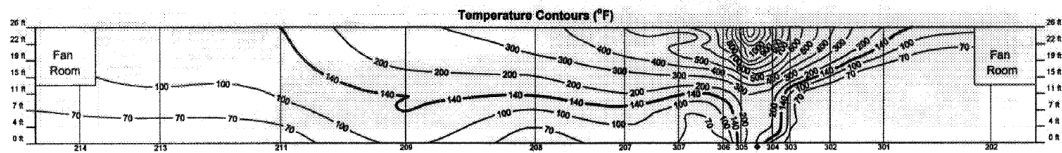


Figur 3-9 Hastighetsfordeling i Memorial-tunnelen tre minutter etter brannstart ved en 50 MW brann. \*Strømningsretning relativ til vifteretningen. Figuren er hentet fra rapport [10].

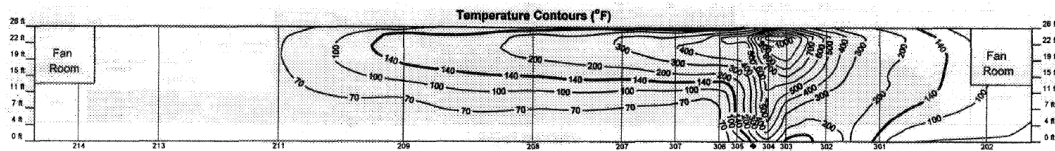
## Ingen mekanisk ventilasjon (502)



## Vifter oppstrøms\* av brannen (611)



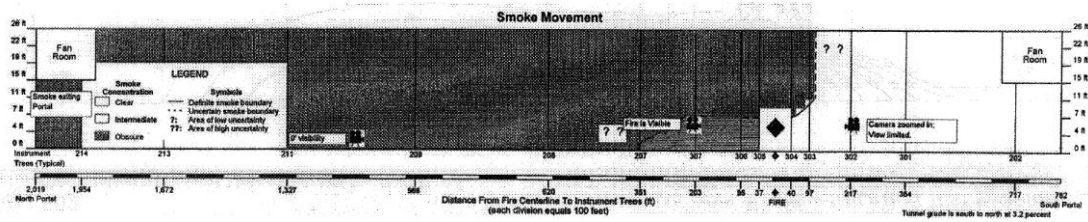
## Vifter nedstrøms\* av brannen (624B)



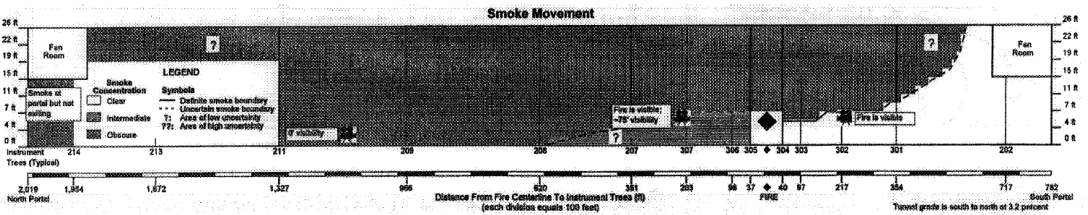
Figur 3-10 Temperaturfordeling i Memorial tunnelen 3 minutter etter brannstart ved en 50 MW brann. \* Strømningsretning relativ til viftens retningen. Figuren er hentet fra offentlig tilgjengelig rapport [10].

Figur 3-10 viser at viftene klarer, uavhengig av konfigurasjonen, å redusere temperaturen på nordsiden av brannen. Imidlertid viste testene at viftene nedstrøms av brannen hadde bedre effekt, enn viftene oppstrøms. Viftene oppstrøms av brannen befant seg i et område med høy temperatur, som førte til ytelsesreduksjon på grunn av den lavere lufttettheten. En viktig effekt for selvredning og brannvesenets innsats er at viftene oppstrøms for brannen forstyrret den termiske stratifisering (sjiktingen) av røyken. Denne effekten ble redusert ved å bruke vifter på nedstrøms-siden av brannen (test 624B). Figur 3-11 viser at sikten på oppstrøms-siden av brannen var best ved bruk av viftene nedstrøms av brannen. Det anmerkes, at den mekaniske ventilasjonen i noen tester (for eksempel test 615B, en 100 MW brann som er større enn det som forventes for nye tog) førte til en røykfri nordside av tunnelen. [10]

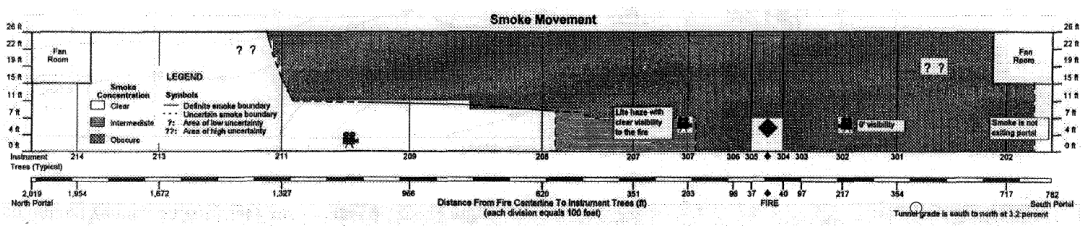
## Ingen mekanisk ventilasjon (502)



## Vifter oppstrøms\* av brannen (611)



## Vifter nedstrøms\* av brannen (624B)



Figur 3-11 Røykfordeling i Memorial-tunnelen tre minutter etter brannstart ved en 50 MW brann. \* Strømningsretning relativ til vifteredretningen. Figuren er hentet fra rapport [10].

En nyere studie som ser på endring av røykspredningsretning ble publisert i 2019 [24]. Denne studien fokuserer spesielt på arbeidsbetingelser for brannvesenet ved en tunnelbrann. Overførbarheten av resultatene til tog tunneler er imidlertid begrenset på grunn av relativt stor stigning i modellforsøkene, som ble gjennomført med minst 5° (87,5 %) stigning. Beregningene derimot, ble også gjennomført for mindre stigninger og viste at det trengs overtrykk. En nyere studie som ser på endring av røykspredningsretning ble publisert i 2019 [24]. Denne studien fokuserer spesielt på arbeidsbetingelser for brannvesenet ved en tunnelbrann. Overførbarheten av resultatene til tog tunneler er imidlertid begrenset på grunn av relativt stor stigningene i modellforsøkene, som ble gjennomført med minst 5° (87,5 %) stigning. Beregningene derimot, ble også gjennomført for mindre stigninger og viste at det trengs positive trykk på nedsiden av brannen (vifter eller vind) for at brannen blir helt ensrettet (*unidirectional*) ved en stigning under 4° (69,9 %). Videre fant Zhao et al. [24] at røykspredningsretningen var veldig sensitiv for endringer i HRR eller termisk trykk. Økning i HRR kan føre til at røyken plutselig endrer retning. Det gjelder spesielt når det brukes vifter slik at røyken i begynnelsen sprer seg nedover langs tunnelen. Strømningsretningen var mest sensitiv for endringer i HRR i tunneler med størst stigning. Det er derfor uklart om, og i hvilken grad, det også kan gjelde for tog tunneler, og det kreves mer forskning for å avklare dette.

Når det gjelder mekanisk ventilasjon og hvordan denne kan påvirke selvredningen og innsatsmulighetene for nødetatene må det nevnes at ventilasjon øker støynivået i tunnelen. Under



storskalatestene i METRO-prosjektet førte støyen fra viftene til at brannmannskapet hadde problemer å kommunisere og måtte bytte til halsmikrofoner. Brannvesen som bruker mobile vifter, bør derfor sørge for at kommunikasjonsmidlene er tilpasset en slik innsats.

### 3.2.2 Modelling av røyk oppstrøms for brannen (*backlayering*)

Backlayering er bevegelse av røyk eller varme gasser i motsatt retning ventilasjonsretningen. Når ventilasjon brukes for røykkontroll i en tunnelbrann, og det er lav ventilasjonshastighet, kan røyken som produseres også bevege seg oppstrøms, i motsatt retning av ventilasjonsretningen. Denne strømmingen kalles *backlayering*. [9].

Modellen som er brukt i denne studien for å studere backlayering er i hovedsak basert på arbeidet fra Ingason et al. [1]. Det er en relativt enkel modell som er basert på flere antagelser. Blant annet tas det ikke hensyn til tredimensjonale strømminger. Det vil si at tunnelen representeres i én dimensjon, som er tunnellengden. Videre er modellen basert på stasjonære ventilasjonsforhold. Det innebærer at modellnøyaktigheten minker når forholdene i tunnelen (for eksempel HRR) endrer seg veldig raskt. En mer detaljert modellbeskrivelse er gitt i Vedlegg A.

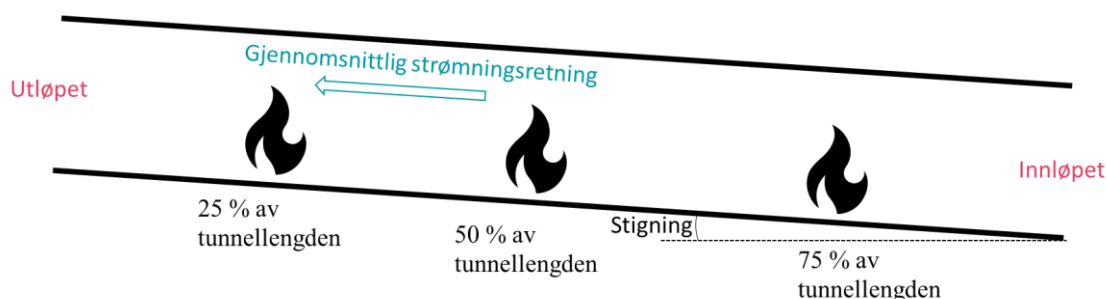
To typer tunneler er modellert: enkeltspørtunnel og dobbeltspørtunnel. Hovedparameterne som er brukt i modellen er gitt i Tabell 3-3. En parameterstudie ble gjennomført som inkluderer tunnelens lengde og stigning, brannens størrelse og posisjon, og ventilasjonskonfigurasjon. Som *base case* i parameterstudien ble en tunnellengde på 10 km brukt. I tillegg ble tre andre tunnellengder undersøkt i modellen. Den maksimale stigningen er 12,5 %. En verdi på 10,0 % er valgt som grunnverdi for parameterstudien. Høyde, tverrsnittsareal, og omkrets av tunnel er basert på Bane NORs tekniske regelverk [25].

Basert på diskusjonen i kapittel 3.1.4, er den dimensjonerende brannenergien definert å ligge mellom 20 MW og 60 MW. Når brannen er naturlig ventilert, og man kan se bort fra vind fra utsiden av tunnelen, er det brannen som driver luftstrømmingen i tunnelen. De enkle modellene som brukes i denne studien er mindre egnet for veldig lave ventilasjonshastigheter. Derfor brukes en brannenergi på 60 MW for alle sensitivitetsberegninger som gjelder uten mekanisk ventilasjon. Beregningene som viser effekten av vifter henholdsvis utenfor og inni tunnelen er gjennomført for både 20 MW og 60 MW (representativt for brannens maksimale størrelse) i tillegg til 5 MW og 10 MW (representativt for brannens størrelse etter 10 minutter).

Brannens posisjon er også undersøkt. Baseline-eksemplet går ut fra at brannen er midt i tunnelen. To andre scenarier er testet for brann som oppstår henholdsvis 25 % og 75 % av tunnellengden. Det vil si for en tunnel med stigning er brannen på 25 % av tunnellengden høyere posisjonert enn brannen på 75 % (se Figur 3-12).

Tabell 3-3 Hovedparametere brukt i modellen.

	Simulering enkeltspørtunnel	Simulering dobbeltspørtunnel
Tunnellengde (km)	Baseline: 10; variasjoner: 1, 5, 10, 30	
Tunnelstigning (‰)	Baseline: 10; variasjoner: 5 – 12.5	
Tunnelhøyde(m)	7,85	8,4
Tunneltversnitt, areal (m <sup>2</sup> )	60	90
Tunnelomkrets (m)	27	37
Brannens størrelse (MW)	5, 10, 20, 60	
Brannens posisjon (avstand fra utløpet av tunnel)	Baseline: halvparten av tunnellengden (50 %); variasjon: 25 % av tunnellengden og 75 % av tunnellengden, ved samme tunnelstigning.	
Dimensjoner Type 74/75-tog (m)	Bredde: 3,2 m; høyde: 4,38 m; gulvhøyde 0,76 m; lengde: 105,5 m	



Figur 3-12 Illustrasjon av brannlokasjonen i tunnelen. Strømningsretning basert på naturlig ventilert tunnel.

Før resultatene presenteres er det viktig å presisere at modellen gir også resultater når man beveger seg langt fra gyldighetsområde. Det er derfor viktig at resultatene tolkes med forsiktighet. Typisk har modellen høy sikkerhet når den predikerte lengden på backlayering er mindre enn ti ganger av tunnelhøyden. Når lengden på backlayering er større, kan det hende at stratifiseringen av røyken ikke opprettholdes, som resulterer i en relativt høy usikkerhet. Her kan erfaringsverdier, som diskuteres i avsnitt 3.2.3 anvendes, som sier at den termiske stratifiseringen av røyken brytes ned etter 100 – 150 m. En stor del av beregningene ble gjennomført for scenarioer uten mekanisk ventilasjon og derfor lang backlayering, som fører til at usikkerhetene i modellen øker. I disse tilfellene er det anbefalt å anta at røyken vil sannsynligvis dekke hele tunneltversnitt.

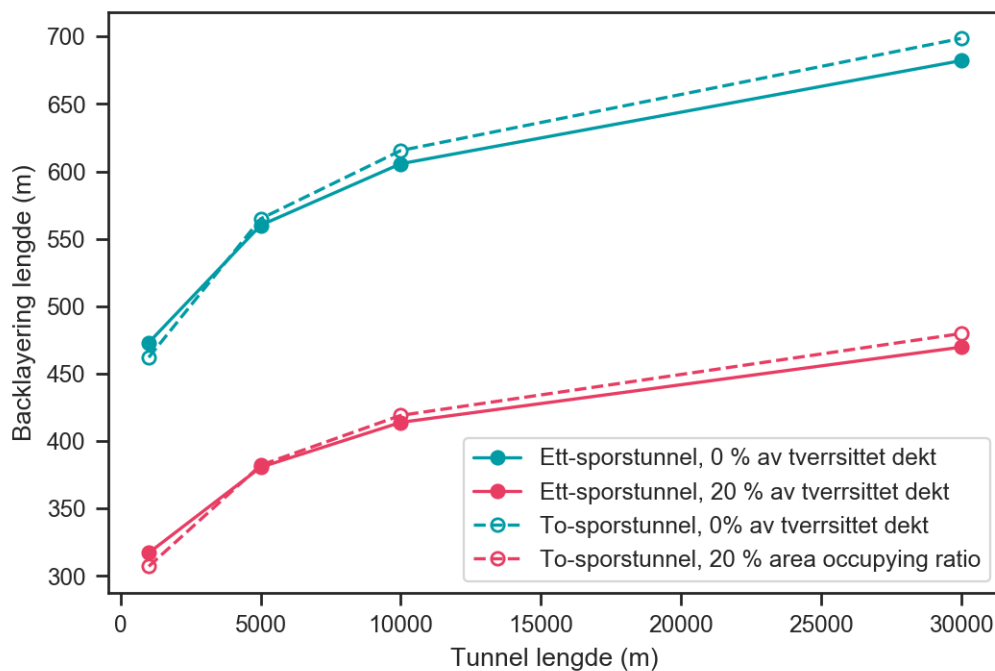
Det er også viktig å forstå konseptet fyllingsgrad (*blockage ratio*) for å tolke resultatene riktig. Fyllingsgrad henviser i denne sammenheng til hvor mye av tunneltversnittet okkuperes av toget. I modellen brukes det 20 % som forenkling både for enkelt- og dobbeltspørtunneler (mer detaljer om denne antagelsen beskrives i Vedlegg A). Fyllingsgrad før og etter toget, altså i de delene av tunnelen hvor det ikke er tog, er 0 %. Modellen som brukes i denne studien er basert på en gjennomsnittshastighet (*bulk velocity*) som gjelder for hele tunnelen. Det betyr at modellen ikke kan ta hensyn til forskjeller av fyllingsgrad avhengig av posisjonen i tunnelen. Derfor ble beregningene alltid gjennomført for begge fyllingsgrader (henholdsvis 0 % og 20 %). Den «virkelige» backlayering-lengden vil ligge mellom disse to ekstrempunktene. For backlayering-lengder nært toget er dermed resultatene for 20 % mer representative.



For å transportere den samme massen (luft og røyk) forbi toget som det transporteres i den tomme delen av tunnelen trengs det en høyere hastighet forbi toget (kontinuumligning). Desto større strømningshastighet i tunnelen desto vanskeligere er det for røyk å spre seg oppstrøms (backlayering). Det betyr dermed også at en høyere fyllingsgrad gir kortere backlayering lengder i modellen. For lave strømningshastigheter, som for eksempel i naturlig ventilerte tog tunneler er denne modellbaserte forskjellen ofte større enn forskjellen på grunn av de virkelige fysiske endringene (parameter endringer for tunnelen, tog eller brannen), og derfor usikkerheten stor.

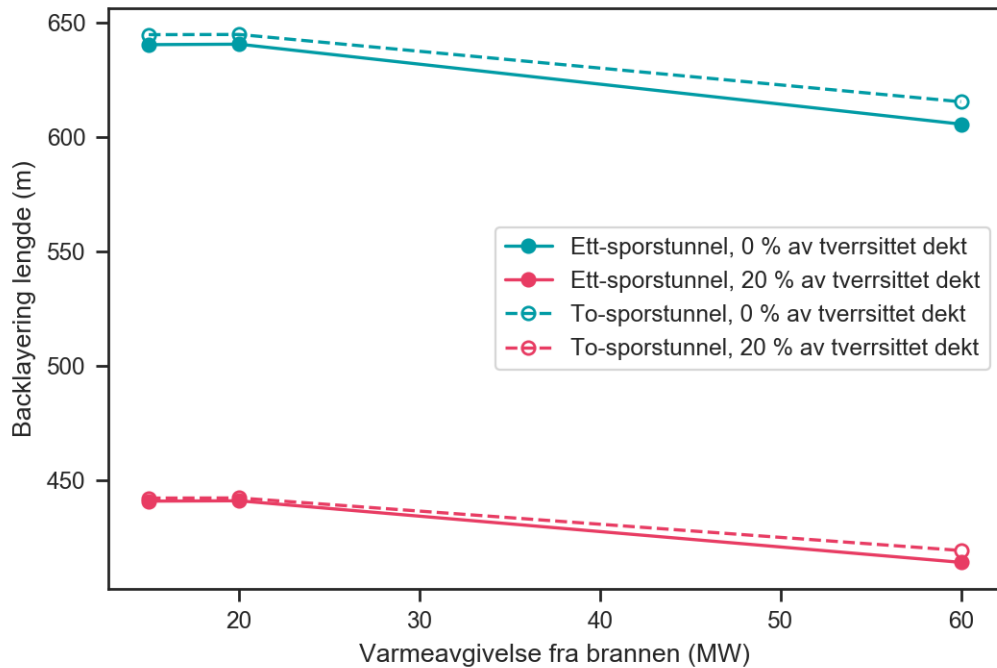
Figur 3-13 viser backlayering-lengder for naturlig ventilerte tunneler med forskjellige lengder. Det er veldig tydelig at når andre forhold holdes like, øker backlayering med tunnellengden. Hovedårsaken er trykktapene på grunn av friksjon. En lengre tunnel har høyere trykktap, og dermed oppnås en lavere gjennomsnittlig ventilasjonshastighet. Det vises liten forskjell mellom enkeltsporstunnelen og dobbeltsporstunnelen når det gjelder backlayering ved samme forhold.

Modellen reflekterer ikke vertikale endringene av røykforholdene (er det sjikting eller er hele tverrsnitt fylt med røyk). For alle tunnellengder resulterer modellen i lange backlayering-lengder. Imidlertid vet man fra erfaring og forskningsarbeid at røyksjikting ikke kan opprettholdes over så lange distanser, siden røyken avkjøles etter hvert. Derfor kan det ikke antas at røyksjikting opprettholdes langs hele tunnelen oppstrøms av brannen, selv om modellen referer til backlayering.



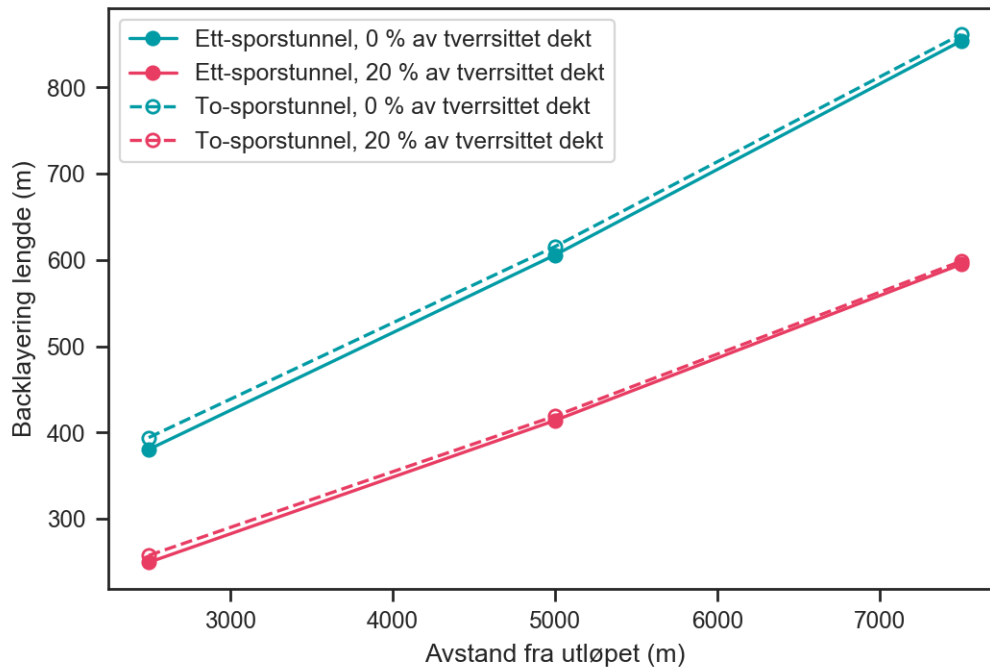
Figur 3-13 Tunnellengde vs. Backlayering-lengde (brannen på 60 MW er midt i tunnelen, tunnelen er naturlig ventilert og har 10% stigning).

Figur 3-14 viser effekten av brannens størrelse (med hensyn til varmeavgivelse) på lengden av backlayering. Denne kan virke kontraintuitiv. En større brann produserer røyk med kortere backlayering. Det er fordi strømming som utvikles i tunnelen utelukkende er avhengig av oppdrift av brannen. Jo større brannen er, jo høyere er volumstrømningshastigheten som utvikles i tunnelen, noe som også betyr en kortere backlayering. Forskjellen er imidlertid ikke betydelig.



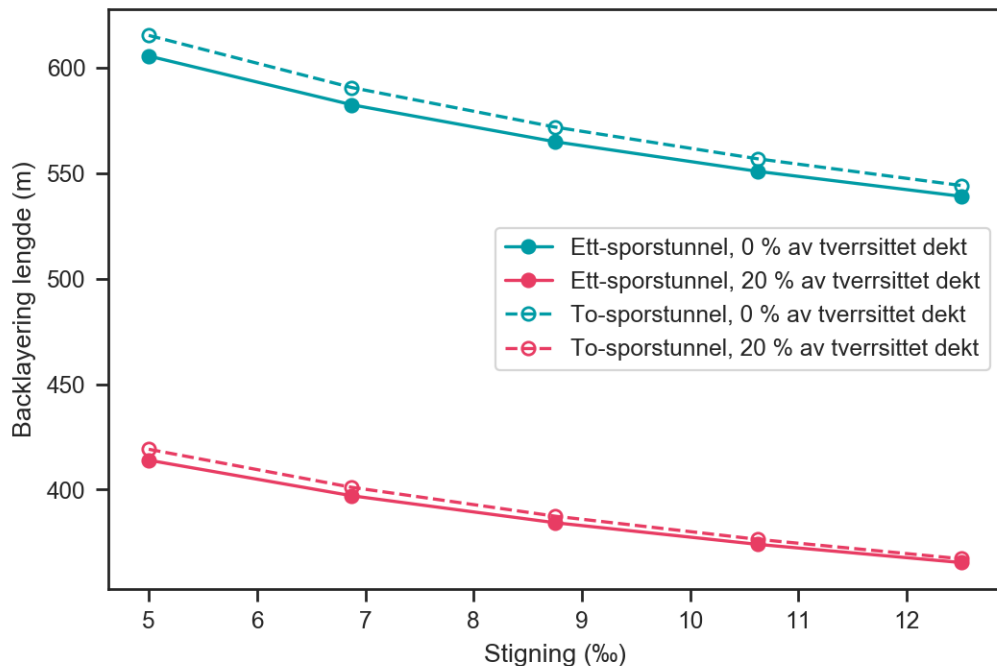
Figur 3-14 Varmeravgivelse fra brannen vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, tunnallengde 10 000 m, naturlig ventilert, 10 % stigning).

Figur 3-15 viser effekten av brannens plassering på backlayering-lengden. Utløpet fra tunnelen er på toppen av stigningen, hvor strømmingen kommer ut av tunnelen (se Figur 3-12). Figur 3-15 viser at når brannen er nær utgangen, observeres en mye kortere backlayering-lengde enn når brannen er nært tunnel-inngangen (lavere). Dette er fordi røyken har mindre tid å avkjøles før den strømmer ut av tunnelen, når brannen er nærmere utløpet. Derfor er temperaturen som driver den termiske trykkforskjellen og dermed strømningshastigheten i tunnelen høyere. Allikevel er backlayering-lengder for naturlig ventilerte branner lange og dermed er det ikke garantert at sjikting opprettholdes.



Figur 3-15 Brannens posisjon i forhold til tunnelutløpet vs. backlayering-lengde (60 MW, tunnallengde 10 000 m, naturlig ventilert, 10 % stigning).

Figur 3-16 viser effekten av tunnelstigningen, som er mindre enn effekten av brannens posisjon. En grunn for at effekten av stigningen er relativt liten er at det ikke tillates store stigninger i tog tunneler. For eksempel vis veitunneler, hvor stigningen kan være større, vil også effekten være større. Det bemerkes at modellen baserer stigningen rent på høydeforskjellen mellom inn- og utløpet. Det tas dermed ikke hensyn til lokale stigningsforskjeller i tunnelen.



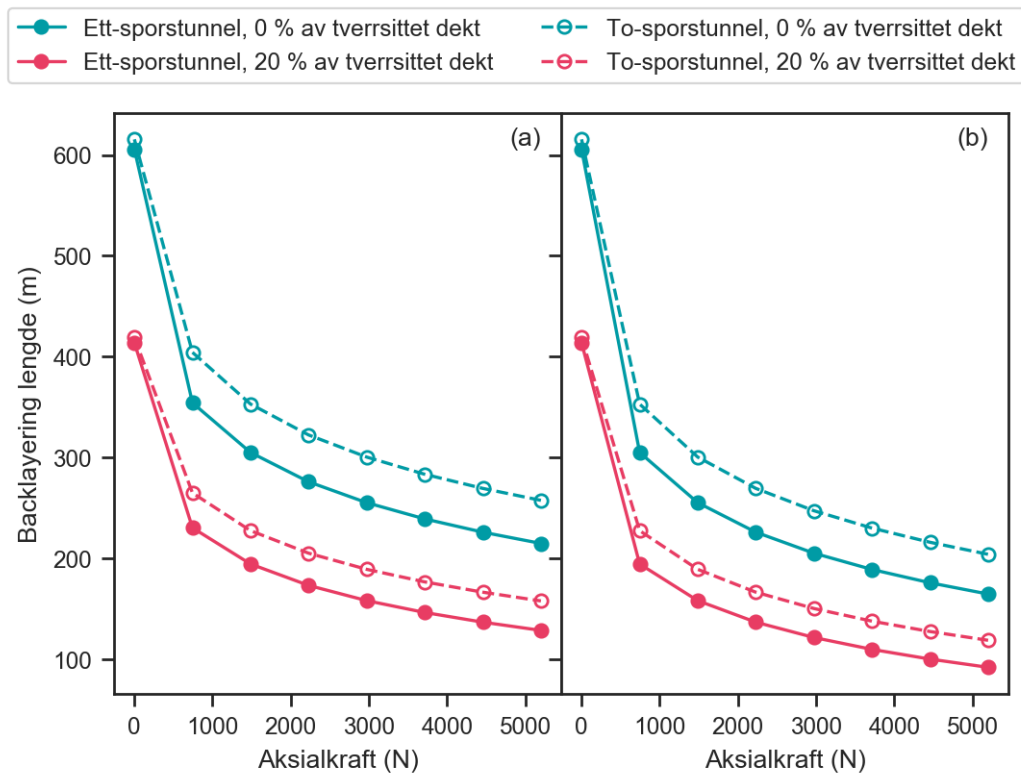
Figur 3-16 Stigning vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, 60 MW, tunnallengde 10 000 m, naturlig ventilert).

Mekanisk ventilasjon er en effektiv metode for å kontrollere røyk. Imidlertid er permanent monterte vifter, som det brukes i veitunneler, ikke standard for jernbanetunneler. Et alternativ er for eksempel å bruke mobile vifter. Bruken av mobile vifter er også diskutert i avsnitt 3.4. I dette avsnittet vil bare effektiviteten til røykkontroll ved bruk av mobile vifter under forhold som er oppført i Tabell 3-3 bli diskutert.

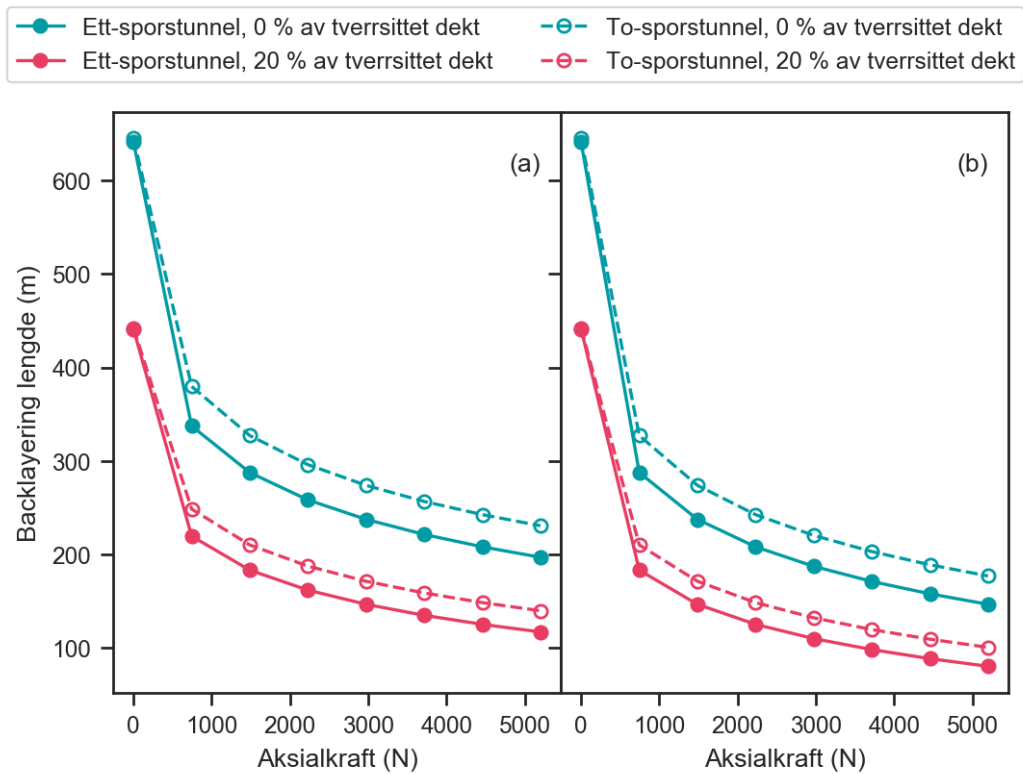
Ulike viftepådrag ble modellert. Det maksimale kraften som er undersøkt er 5000 N, som tilsvarer effekten av to store mobile vifter (Rosenbauer, FANERGY XL63S). Viftediameteren er også estimert fra Rosenbauer-viften, som er 1,6 m. Denne viftetyper er valgt for å representere typiske vifter. Plasseringen av viften spiller en viktig rolle. Det er funnet at effektiviteten for en vifte plassert henholdsvis inne i tunnelen og utenfor tunnelen kan estimeres til 73 % og 37 % [1].

Figur 3-17 til Figur 3-20 viser effekten av aksialkraft på backlayering når viften er plassert enten utenfor eller inni tunnelen. Branner med størrelse på henholdsvis 20 MW og 60 MW (se Figur 3-17 og Figur 3-18) representerer den maksimale HRR i brannforløpet. For selvredning og for brannvesenets innsats er det viktig også å se på den tidlige brannfasen. Basert på en medium og en rask vekstrate (se avsnitt 3.1.4) finner man at brannen har en størrelse på henholdsvis 4 MW og 10 MW etter 10 minutter. Backlayering-lengde ved dette tidspunktet vises i Figur 3-19 og Figur 3-20. Viften er plassert i den nedre enden av tunnelen. Dette betyr at strømningsretningen er den samme som ved naturlig ventilasjon. Trykkendringen fra viften er mye større enn den termiske trykkforskjellen i tog-tunneler og vil i de fleste tilfelle dominere strømningsforholdene. Derfor kan det forventes relativt lik backlayering-lengde hvis viften er plassert i den øvre eller nedre enden av tunnelen.

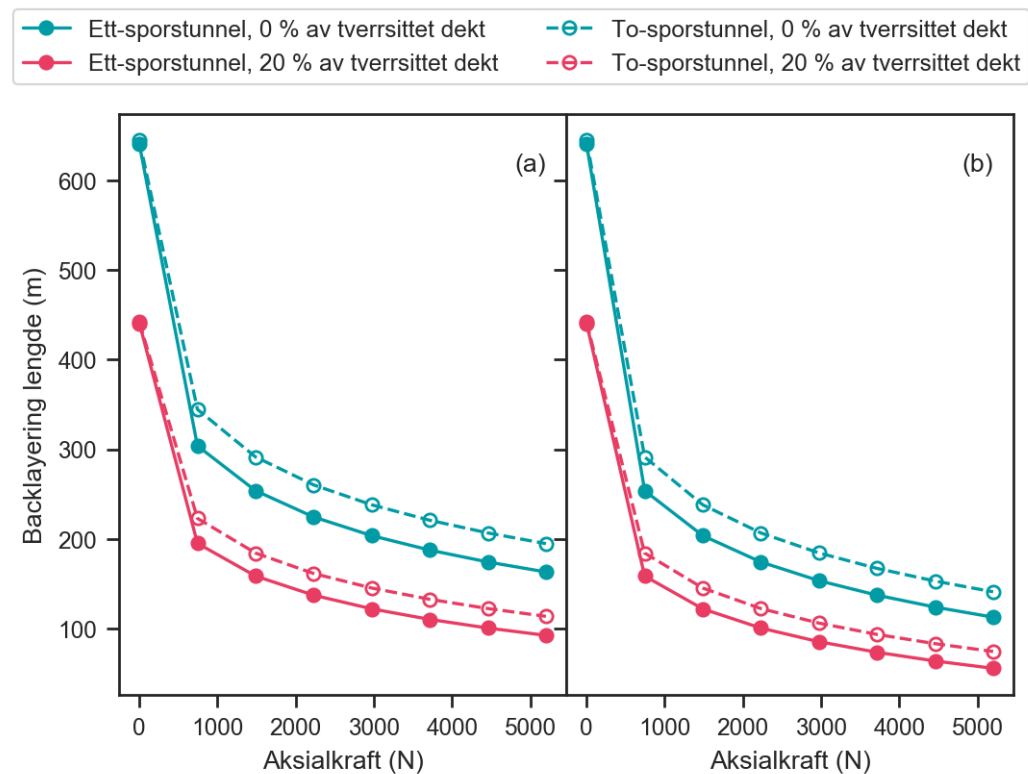
Fra beregningene kan man se at mekanisk ventilasjon generelt sett er veldig effektiv for å kontrollere røyk. Selv om det er relativt lav aksialkraft (rundt 1000 N), kan man se en klar reduksjon av backlayering-lengden. Backlayering-lengden er redusert med ca. 50 % sammenlignet med naturlig ventilasjon. Den mobile viften virker mer effektiv for enkeltsporstunnelen under de forhold som ble modellert, ettersom tverrsnittsarealet til enkeltsporstunnelen er mindre enn for dobbeltsporstunnelen. Figur 3-18 reflekterer at viftene er mer effektive når de plasseres inni tunnelen. Imidlertid eksisterer fortsatt backlayering i alle beregningene, selv med viftekraften som tilsvarer to store mobile vifter.



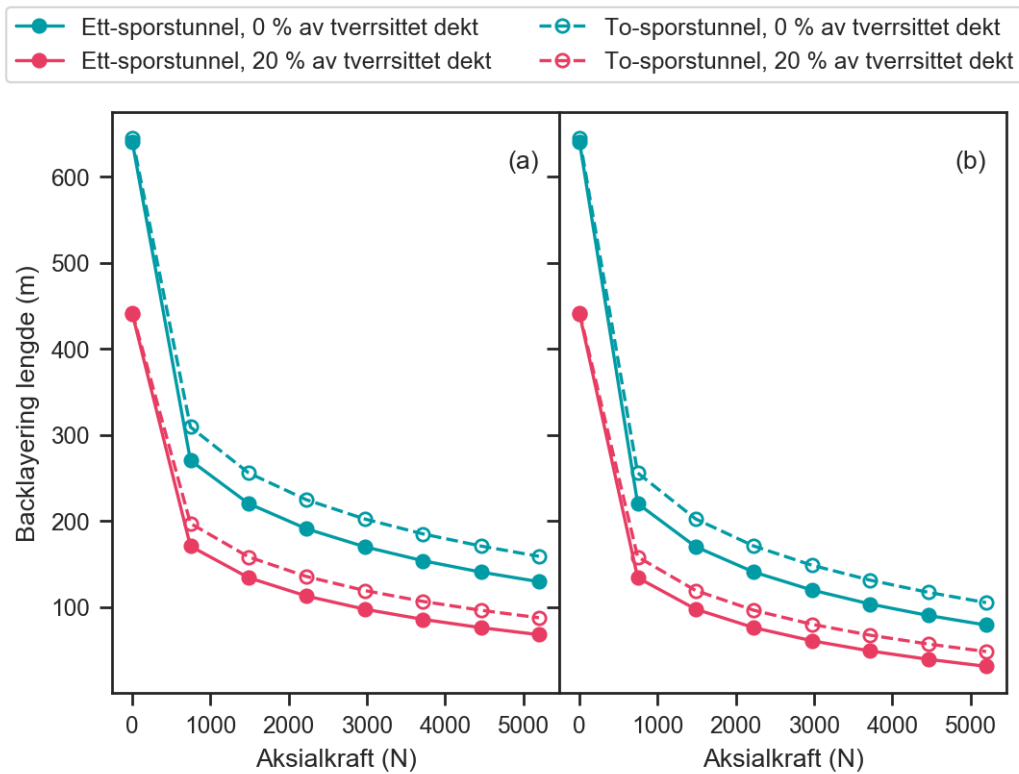
Figur 3-17 Aksialkraft vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, 60 MW, tunnallengde 10 000 m, 10 ‰ stigning). (a) vifte er plassert utenfor utløp, (b) vifte er plassert innenfor utløp.



Figur 3-18 Aksialkraft vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, 20 MW, tunnelengde 10 000 m, 10 ‰ stigning). (a) vifte er plassert utenfor utløp, (b) vifte er plassert innenfor utløp.



Figur 3-19 Aksialkraft vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, 10 MW, tunnelengde 10 000 m, 10 ‰ stigning). (a) vifte er plassert utenfor utløp, (b) vifte er plassert innenfor utløp.



Figur 3-20 Aksialkraft vs. backlayering-lengde (brannen er midt i tunnelen, 5 MW, tunnallengde 10 000 m, 10 ‰ stigning). (a) vifte er plassert utenfor utløp, (b) vifte er plassert innenfor utløp.

Oppsummert ser man at backlayering-lengden for naturlig ventilerte togtunneler enkelt overstiger flere hundre meter. Dette gjelder alle simulerte HRR. For mekanisk ventilerte tunneler må det derfor antas at modellen kommer inn i et område den er ikke validert for og basert på erfaringsverdier kan man gå ut fra at røyken kan spre seg bidireksjonal (altså i begge retningene i tunnelen) og vil fordele seg over hele tunneltversnittet. Dette skyldes den lave stigningen av togtunneler, i tillegg til at eksternt vind (værforholdene) er neglisjert i beregningene. Uten noen form for mekanisk ventilasjon representerer dette en utfordring for selvredning og innsatsen av nødetatene. Samtidig gir dette også mulighetene å lettere kontrollere retningen av røykspredningen, hvis mekanisk ventilasjon brukes. Beregningene viser at én eller flere mobile vifter på utsiden av tunnelen (ideelt sett inne i tunnelen) kan utgjøre en stor forskjell.

### 3.2.3 Observasjoner fra branner i tunnel

Observasjoner fra reelle branner og branntester i tunnel gir viktig, komplementerende informasjon til studier basert modeller og beregninger når røykens utbredelse beskrives. I dette avsnittet sammenfattes noen av de observasjoner som er gjort i forbindelse med reelle tunnelbranner basert på RISEs erfaring og rapporter fra Statens havarikommisjon for transport.

RISE Fire Research har gjennom tester og forskningsprosjekt i Runehamar testtunnel ved Åndalsnes opparbeidet en del erfaringer knyttet til røykutvikling ved branner i tunnel. En del av denne informasjonen er tilgjengelig i åpne rapporter, noe er å finne i konfidensielle rapporter og

annet er erfaringsbaserte observasjoner<sup>8</sup>. Tunnelen er noe høyere på midten enn ved utløpene, men er i praksis flat. Det er installert et par vifter i tak, og 5-7 vifter på bakken, som til sammen har nok kraft til å sette i gang ca. 3-5 m/s luftstrøm inne i tunnelen, avhengig av utendørs vindforhold. Når det kjøres brannforsøk inni tunnelen, har brenselet vanligvis vært plassert ca. midtveis inni tunnelen, og målinger har vært utført ca. 600-800 meter nedstrøms, dvs. ca. 100-200 meter fra tunnelens utløp. Det har også vært plassert måleutstyr og videokamera nær brannen. Brannene har typisk vært i størrelsesorden 40 – 200 MW, og det har vært brukt enten trepaller eller væskedamsbranner av diesel som brensel. Under forsøk har det blitt kjørt langsgående ventilasjon i tunnelen, vi kjenner ikke til forsøk i Runehamar-tunnelen hvor viftene *ikke* har vært påslått.

Observasjoner når det gjelder røyksjikting fra brannforsøkene viser at dette er et lokalt fenomen. Det er observert en tydelig røyksjikting noen meter nedstrøms fra brannen (observert lengde varierer, 50-150 meter eller 100-150 meter er nevnt). Den nøyaktige lengden på området med røyksjikting avhenger av mange ulike faktorer, som ventilasjon, lufthastighet, brannens størrelse m.m. Etter dette brytes røyksjiktningen ned, ettersom forskjellen på røykens temperatur og lufttemperaturen minker. Hvordan røyken oppfører seg mellom brannområdet og målepunkt som ligger 600-800 meter nedstrøms er ikke dokumentert, men når røyken kommer til målepunktene nedstrøms for brannen, er røyken tett, uten sjikting. Oppstrøms for brannen er det observert backlayering i stort sett alle forsøkene som har blitt gjennomført. I de store dieselbrannene er en backlayering-lengde på ca. 100 meter typisk. Det er også observert i noen av de største dieselbrannene, med ca. 100 MW dieselbrann uten slokkesystem, at selv om viftene gikk gjorde brannens størrelse at viftene ikke klarte forflytte nok luft, slik at pulseringer oppstod, som flyttet røyk i begge retninger ut fra brannen. Det var ikke røyk ut fra utløpet oppstrøms i tunnelen i dette tilfellet, men det antas at dersom brannvesenet hadde gått inn oppstrøms ville de møtt en vegg av røyk også der. Observasjonene fra Runehamar-tunnelen er altså gjort i en tilnærmet flat veggtunnel. Disse vil likevel være relevante for tog tunneler ettersom at det med et mindre tverrsnitt på tunnelen nok ikke vil kreves riktig så store branner for å få samme røyktetthet og oppførsel på røyken inne i tunnelen.

I METRO-prosjektet ble det også gjort observasjoner av røykspredning [6]. I METRO-prosjektets test 2 og 3, med HRR på hhv. 76,7 og 77,4 MW ble det observert følgende: Etter ca. 7 minutter etter antennelse ble backlayering observert i test 2, se Figur 3-21 (venstre). Ca. 9 minutter etter antennelse, traff røyken bakkenivå og fronten av toget var ikke lengre synlig. I test 3, ble backlayering observert ca. 115 minutter etter antennelse. Kun ca. to minutter etter dette kom røyken ned mot bakken (tidspunkt vist i Figur 3-21 (høyre)). Det ble konkludert med at de mobile viftene som ble brukt ga gode arbeidsforhold for brannvesenet oppstrøms, med god sikt og liten varmeeksponering. Uten denne ekstra ventilasjonen, ville røyken ha fylt hele tunnelens tverrsnitt, selv om det ble observert backlayering i testene. I tillegg ble det observert sterke pulseringer, slik som det også ble observert i Runehamar-tunnelen, som beskrevet ovenfor. Rapporten angir at mange ulike faktorer kan påvirke pulseringene, som HRR, påvirkning av ventilasjon, samt egenskapene og lengden på tunnelen. Pulseringene var så sterke at selv utenfor utløpet av tunnelen ble små objekter flyttet frem og tilbake med ca. 20 meter.

---

<sup>8</sup> Reidar Stølen, forsker ved RISE Fire Research har utført tunnelbranntesting i Runehamar testtunnel over en tiårsperiode, og informasjonen i dette avsnittet er hentet fra hans erfaringer og observasjoner fra disse testene.





Figur 3-21 Bilder fra branntest i METRO prosjektet. Venstre: Backlayering observert 7 minutter etter antennelse i test 2. To minutter etter dette var ikke lengre toget synlig i røyken. Høyre: 117 minutter etter antennelse i test 3. Foto: Per Rohlén. [6]

Det er få, større hendelser i norske togtunneler å lære fra, så læringspunkter fra reelle hendelser i veitunneler bør også være av interesse. I en brann i Oslofjordtunnelen i 2011 ble røyk og ventilasjonsluft ledet flere kilometer mot en av tunnelåpningene, slik at røyken fylte tunnelen med en hastighet på 2-3 m/s. I en senere brann i samme tunnel (2017) meldes det at tunnelen ble ventilert slik at røyken forflyttet seg med en hastighet på 5-6 m/s. Også fra brannene i Gudvangatunnelen ble det meldt at ventilasjonen bidro til at røyken fylte tunnelen med røyk, her med en hastighet på 2 m/s. Det beskrives at dette kan være problematisk i en rømningssituasjon avhengig av evakueringsretning og ventilasjonsretning siden det er flere eksempler på hvordan kjøretøy og evakuerende personer blir tatt igjen av røyken. I flere av rapportene beskrives også at man møter en «røykpropp» inne i tunnelen, hvor røyken plutselig er tett og svart og med manglende sikt, slik at det er vanskelig eller umulig å orientere seg. Røyksjiktning er imidlertid illustrert i rapporten om brannen i Oslofjordtunnelen i 2017, se Figur 3-22. [26–31]

Relevansen for nyere togtunneler er at dersom en brann først har utviklet seg til en viss størrelse, vil ikke ideell røyksjiktning i tunnelen være relevant. Et annet læringspunkt er at det er ikke alltid at forhåndsdefinerte brannstrategier gir de mest optimale evakueringsforholdene. Mer informasjon om hvordan røykutvikling og andre forhold i tunnelen påvirker rømning er å finne i rapportens del 2.



Figur 3-22 Bilde fra brannen i Oslofjordtunnelen i 2017, for å illustrere hvordan røyksjiktning i veitunnel kan se ut, før hele tunnelens tverrsnitt fylles med røyk. Bildet er hentet fra [31].

### 3.3 Temperaturutvikling

Dette underkapittelet omhandler hvordan temperaturfordelingen i tunnelen endrer seg langs tunnelen, for å svare ut følgende hovedspørsmål:

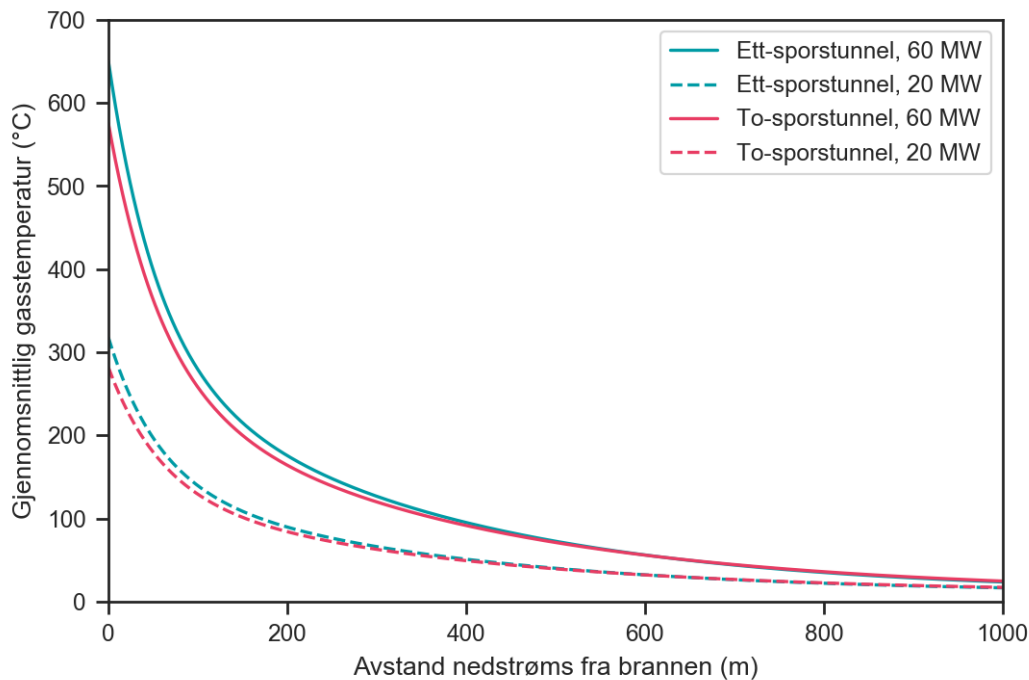
3. Hvordan vil en slik brann utvikle seg med tanke på røyk og **temperatur**, og hvilken betydning kan dette ha for selvredning?

Kortfattet svar på hovedspørsmål:

3. Temperaturen nedstrøm av brannen kan godt predikeres, også med enkle modeller. For selvredning er temperaturen oppstrøms for brannen mer relevant, siden den vil være lavere. Imidlertid kreves det mer avanserte modeller (som for eksempel CFD) eller storskala tester for å undersøke temperaturfordelingen på denne siden av brannen. De mest relevante testene som oppgir oppstrøms temperaturmålinger inkluderer mekanisk ventilasjon og er derfor ikke representativ for naturlig ventilerte tunneler.

Både små- og storskala tester viser at temperaturfall nedstrøms for brannen påvirkes lite av ventilasjonsforhold og temperaturfall i forhold til avstanden til brannen kan predikeres med relativt enkle modeller [32]. I Figur 3-23 viser de beregnede gjennomsnittlige gasstemperaturer nedstrøms for brannen for tilfellene med henholdsvis 60 MW og 20 MW branner, for både enkel-

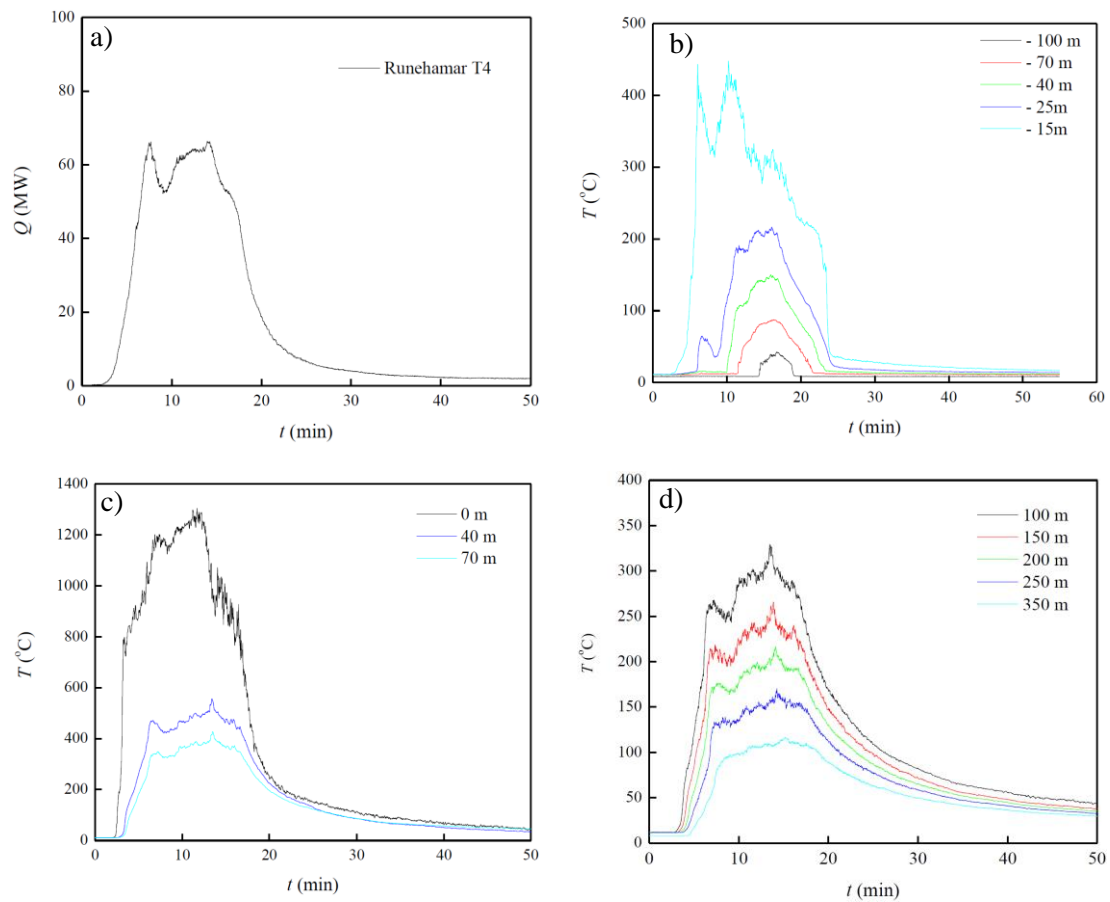
og dobbelsportunnel. Siden det brukes et forenklet endimensjonale modell, kan man ikke beregne den vertikale temperaturfordelingen.



Figur 3-23 Gjennomsnittlig gasstemperatur nedstrøms fra brannen (brannen er midt i tunnelen, 60 MW, tunnallengde 10 000 m, 10 ‰ stigning, naturlig ventilasjon).

Temperaturen i nærheten og nedstrøms av brannen spiller blant annet en viktig rolle for tunnelstrukturen. For selvredning og brannvesenets innsats ved en stor brann er temperaturen oppstrøms av brannen derimot viktigere. Temperaturen oppstrøms for brannen reduseres også eksponentielt med økende avstand til brannen, men reduksjonen oppstrøms er mye raskere og ikke minst mer sensitiv for ventilasjonsforhold. Selv om det finnes noen modeller for å forutsi gasstemperaturer oppstrøms kan det forventes store avvik for naturlig ventilerte tunneler på grunn av den lave ventilasjonshastigheten. For slike beregningene burde CFD-simuleringer (*computational fluid dynamic*) brukes istedenfor enkle endimensjonale modeller. Derfor inkluderes det ingen beregninger i denne studien. I stedet presenteres utvalgte resultater fra storskalatesting i Runehamar-tunnelen [11].

Figur 3-24 viser taktemperaturer på forskjellige steder, målt både oppstrøms og nedstrøms for brannen i branntester utført i Runehamar-tunnelen [11]. Temperaturen på bakkenivå vil være noe lavere. Resultatene fra test T4 er vist her, hvor en maksimal HRR på 66 MW ble oppnådd, med en langsgående strømning skapt ved bruk av to mobile vifteenheter (hver utstyrt med en 75 kW motor). Det fremgår tydelig av figurene at temperaturen synker mye raskere oppstrøms enn nedstrøms, på grunn av raskere innblanding av kald friskluft. Temperaturen oppstrøms korrelerer med backlayering av røyken.



Figur 3-24 Temperaturer målt oppunder tunneltaket under forsøk utført i Runehamar-tunnelen. (a) HRR, (b) oppstrøms for brannen, (c, d) nedstrøms for brannen [11]. I testen ble to mobile vifter (en innenfor en utenfor tunnelen). Ventilasjonshastigheten i tunnelen før brannstarten var 2,8 – 3,4 m/s.

Oppsummert kan enkle modeller gi informasjon om nedstrøms-temperaturen, mens vurderinger angående selvredningen og brannvesenets innsats må støttes på tilgjengelige resultater fra storskallatester som for eksempel vist i Figur 3-24 og Figur 3-10. I begge tilfeller var det relativt høy strømningshastighet i tunnelen, enten på grunn av mekanisk ventilasjon eller forholdsmessig stor tunnelstigning. For naturlig ventilerte tog tunneler kan det forventes at brannen har en større tendens å utvikle bidireksjonale røykspredning som vil føre til høyere temperatur også oppstrøms for brannen.

## 3.4 Eksisterende metoder/løsninger for å skape røykkontroll i tunneler.

Dette underkapittel gir en oversikt over eksisterende metoder og løsninger for røykkontroll og evaluerer fordeler og ulemper knyttet til dem, for å svare ut følgende hovedspørsmål:

8. Hvilke alternative løsninger finnes i dag for å skape røykkontroll i tunnel?

Kortfattet svar på hovedspørsmål:

8. For tunneler finnes det ulike alternativer for røykkontroll:

- *Naturlig ventilasjon*
- *Fastmonterte vifter i tak*
- *Mobile vifter*
- *Sjaktvifter*
- *Mobile vanntåketurbiner*

Naturlig ventilasjon innebærer ingen mekanisk styring av røyken i tunnel, og innebærer ingen røykkontroll i tilfelle brann.

Fastmonterte vifter i tak i jernbanetunneler er omdiskutert. For veitunneler er disse nødvendige også under normal drift av tunnelen, og kan dimensjoneres for bruk i brann uten at det er kostnadsdrivende. I tog tunneler derimot, er ikke disse nødvendig under normal drift, og en installering vil være kostnadsdrivende ettersom det vil kreve en økning av tunnelens tverrsnitt, i tillegg til utstyrs-, installasjons- og driftskostnader.

Mobile vifter er et alternativ til fastmonterte vifter, men erfaringsmessig er det ofte tynn dokumentasjon på funksjonen mht. røykkontroll i tilfelle brann. I en fersk studie har RISE Fire Research evaluert om mobile vifter kan fungere tilstrekkelig i tilfelle brann, spesifikt for en norsk to-sporstunnel<sup>9</sup>. Tunnelen som ble studert er Løvstakkentunnelen in Bergen, som er 3000 m lang, har en høydeforskjell på utløpene på 40 meter (ca. 1,3 % stigning), er 9,1 m bred og har 50 m<sup>2</sup> tverrsnitt. En forenklet numerisk modell basert på [1], en HRR på 15 MW etter 10 minutter og en maksimal HRR på 54 MW ble brukt. Det ble tatt utgangspunkt i en 1,6 m diameter vifte med 2500 N drivkraft. Basert på funnene ble det konkludert med at ved bruk av to vifter, en utenfor og en innenfor tunnelåpningen, er det sannsynlig at backlayering holdes på et nivå som gir akseptable arbeidsforhold (*working limits*) for brannvesenet. Lengden på backlayering ble funnet å påvirkes av plassering, antall vifter og deres drivkraft. Det presiseres at disse funnene kun gjelder for den aktuelle tunnelen, og er ikke ment som en generell evaluering for brannprosjektering eller viftebruk. I tillegg til mobile vifter for å forflytte luft, finnes det mobile vifter som også har mulighet til å koble på vann, såkalte «vanntåketurbiner», som kan både blåse luft og kjøle med vann.

<sup>9</sup> Informasjon i dette avsnittet er basert på denne evalueringen, men kilden er ikke presentert i sin helhet, da dette er en konfidensiell RISE-rapport, informasjon er gjengitt med tillatelse.

Sjaktvifter er vifter som sitter i sjakter tilknyttet tunnelen (som et «tredje utløp» på tunnelen), og fyller hele tverrsnittet i sjakta. Her vil det kunne være mulig å trekke ut eller blåse inn luft, og den effektive lengden på tunnelen reduseres mhp. luftforflytning. Dette er en effektiv måte å flytte mye luft på, siden det er mulig å holde en større lufthastighet i sjakta enn det man får til i hovedtunnelen. Sjaktvifter vil være et alternativ for å skape røykkontroll i tilfelle brann.

Et femte alternativ, som ikke er vitenskapelig utredet enda, er overtrykksventilasjon. Dette kan være en potensiell mulighet i ett-sporstunneler, hvor togsettet tar opp en betydelig andel av tunnelens tverrsnitt, og det dermed kan være mulig å bygge opp nok trykk på evakueringsiden. Her vil det være nødvendig med vifter som er dimensjonert for å skape overtrykksventilasjon, og det er nødvendig med fullskala testing av hvorvidt prinsippet fungerer i praksis.

## 3.5 Sammenfatning av del 1 og forslag til veien videre

I hvert underkapittel i del 1 er det spesifisert hvilket hovedspørsmål som besvares i det underkapittelet, og det er gitt kortfattede svar på spørsmålene, der det er mulig. Disse vil inngå i det faglige grunnlaget for arbeidsgruppens videre arbeid, sammen med sammenfatningen av del 1 som gis nedenfor.

Ut fra informasjonen som er presentert i de foregående avsnittene kan følgende konkluderende punkter dras:

- Alle branner som klassifisert etter EN 50553 (type 1, 2 og 3) kan føre til at et tog som brenner stopper i en tunnel. I tillegg kan et tog brenne i en tunnel som konsekvens av en primærhendelse. I en *worst credible case*-tilnærming er type 3-branner og branner som oppstår som konsekvens av en primærhendelse mest relevant. Barrierebrudd vil kunne gjøre at det oppstår branner, og noen av disse vil kunne eskalere til større hendelser. Selv om disse scenarioene trolig har lav frekvens kan det ikke ses bort fra muligheten for at et slikt scenario kan inntreffe, ettersom denne studien ikke inkluderer en detaljert frekvensanalyse.
- Bagasjen og de objekter som folk har med seg om bord i toget er sentrale for brannens utvikling i tidlig fase. Studier viser tydelig at bagasje kan representere høy brannenergi, som overstiger spesifikasjonene gitt i EN 45545, og at det er nødvendig å hensynte bagasje i risikovurderinger og når innsatstaktikken skal utformes.
- Når det gjelder materialene i interiøret i en kupé, er det ikke krav på at de skal være ubrennbare. Med stor nok antennelseskilde vil de derfor kunne brenne og bidra til en brannutvikling, men det vil variere i hvilken grad de vil bidra.
- Det anbefales en *worst case*-dimensjonerende brannkurve på 60 MW (*fast/ rask*) i henhold til METRO-prosjektets anbefalinger. Det finnes ikke tilstrekkelig vitenskapelig underlag for å kunne evaluere hvorvidt også nye togsett kan oppnå en brannstørrelse som tilsvarer storskalatestene i METRO-prosjektet, som går opp til 77 MW.
- Det anerkjennes at det har skjedd mange forbedringer i togdesign, spesielt med tanke på interiørets og overflatematerialenes brannegenskaper i kupé. Det kan derfor forventes at

- nye togsett *kan* oppnå lavere HRR, men dette er ikke dokumentert i tilgjengelige brannforsøk. Som nedre grense anbefales 20 MW (*medium*).
- For å bruke en kurve som er nærmere den nedre grensen (20 MW) kreves ytterligere dokumentasjon, for eksempel av kvaliteten på vinduene og deres evne å motstå en brann og dermed begrense oksygentilførsel.
  - Den virkelige brannkurven forventes å ligge mellom disse to ekstrempunktene (20 MW - 60 MW). For å etablere en mer nøyaktig brannkurve anbefales å gjennomføre en brannforløpsanalyse for spesifikke togtyper.
  - Observasjoner fra reelle hendelser viser at dersom en brann først har utviklet seg til en viss størrelse, vil ikke ideell røyksjiktning i tunnelen være relevant, spesielt ikke med aktivert røykventilasjon.
  - På grunn av den lave stigningen i tog tunneler sprer røyken seg lettere i to retninger (bidireksjonalt) enn for eksempel i brattere veitunneler. Uten noen form for mekanisk ventilasjon representerer dette en utfordring for selvredning og innsatsen av nødetatene. Samtidig gir dette også mulighetene til å lettere kontrollere retningen (overstyre brannens oppdrift) av røykspredningen, hvis det velges å bruke en form av mekanisk ventilasjon.
  - Beregningene viser at én eller flere mobile vifter på utsiden av tunnelen (ideelt sett inne i tunnelen) kan utgjøre en stor forskjell.

Når det gjelder adferdsmønster for involverte i en tunnelbrann, og hvordan denne kunnskapen kan benyttes av arbeidsgruppen i det videre arbeidet, er dette nærmere beskrevet i del 2, avsnitt 4.5.

Kunnskapsgrunnlaget som ligger til grunn for å evaluere brannsikkerhet i nye jernbanetunneler og med nye togsett er begrenset, og det er behov for videre arbeid på området. Forslag til videre arbeid:

- Statistikken viser at frekvensen for store togbranner i tunneler er lave. Dette betyr også at det er vanskelig å etablere godt statistisk grunnlag basert på frekvenser. En tilsvarende utfordring er for eksempel kjent fra olje- og gassindustrien, hvor det finnes en omfattende database for lekkasjefrekvenser (mindre ulykker) mens det finnes ingen god modell for store hendelser som *blowouts*. Derfor anbefales å gir mer vekt til konsekvenssiden av risikoen, innenfor rimelighets grensene.
- Ventilasjonsforholdene, som er avhengig av vinduene tilstand (intakt eller knust), på toget spiller en sentral rolle for brannforløpet av større branner. Branntester av vinduer (montering og glasstype) anbefales derfor for å skape et grunnlag for å argumentere for lavere dimensjonerende brannkurver.
- Bagasje på tog har vist seg å spille en viktig rolle i initial fasen av branner. Samtidig er det stor usikkerhet i hvor mye bagasje det transporteres på norske tog og det vil være stor variasjon. Det foreslås derfor å gjennomføre en tilsvarende studie som Kumm [15] for norske tog, inkludert fjerntog.
- Tog- og tunnelindustrien har investert mye ressurser i å forbedre brannsikkerhet på tog og i tunnel. På grunn av manglende storskalatester reflekteres dette ikke i underlaget som brukes til evaluering av brannrisikoen. Det betyr at industrien ikke får fullt nytte av investeringene. Samtidig risikerer man at risikoen blir overestimert som kan føre til at risikoen andre steder blir oversett. For å endre disse begrensningene anbefales at det

investeres i mer nøyaktige analyser av brannforløpet i nye togsett. Ideelt sett burde slike brannforløpsanalyser kombineres med brannforsøk.

- Beregningene viser at det er et potensial for å erstatte konvensjonelle, takmonterte vifter, som brukes i veituneller, med for eksempel mobile vifter. Beregningene er basert på enkle empiriske modeller. Effektiviteten av mobile vifter, og andre innovative løsninger som for eksempel vanntåketurbiner eller trykkbasert røykkontroll, bør undersøkes ved bruk av CFD-modeller og valideres med brannforsøk.



## Referanser del 1

- [1] H. Ingason, A. Lönnermark, og Y. Z. Li, «Model of ventilation flows during large tunnel fires», *Tunnelling and Underground Space Technology*, bd. 30, s. 64–73, 2012.
- [2] European Union Agency for Railways, «SRT TSI, version 2.0. Consolidated version based on the Annex V of Commission implementing Regulation (EU) 2019/7761». European Union Agency for Railways, 28 jun. 2019.
- [3] CEN/CENELEC, «EN 45545-1 Railway applications - Fire protection on railway vehicles - Part 1: General». CEN/CENELEC, mar. 2013.
- [4] CEN/CENELEC, «NS-EN 45545-2 Railway applications - Fire protection on railway vehicles - Part 2: Requirements for fire behaviour of materials and components». CEN/CENELEC, 2013.
- [5] H. Ingason *mfl.*, «The METRO project, final report», Mälardalen University, Västerås, Sweden, Mälardalen University Research Report 2012:8, 2012.
- [6] A. Lönnermark, A. Claesson, J. Lindström, Y. Z. Li, M. Kumm, og I. Haukur, «Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel», SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 2012:05, 2012.
- [7] A. Haack, «Fire protection in traffic tunnels: General aspects and results of the EUREKA project», *Tunnelling and Underground Space Technology*, bd. 13, nr. 4, s. 377–381, okt. 1998.
- [8] H. Ingason, S. Gustavsson, og M. Dahlberg, «Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires», SP Report 1994:08, 1994.
- [9] Y. Wu og M. Z. A. Bakar, «Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems – a study of the critical velocity», *Fire Safety Journal*, bd. 35, nr. 4, s. 363–390, nov. 2000.
- [10] «Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Test Report», Massachusetts Highway Department, Fedral Highway Administration, nov. 1995.
- [11] H. Ingason, A. Lönnermark, og Y. Z. Li, «Runehamar tunnel fire tests», SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, SP Report 2011:55, 2011.
- [12] CENELEC, «EN 50553 Railway applications - Requirements for running capability in case of fire on board of rolling stock». CENELEC, feb. 2012.
- [13] P. Underwood og P. Waterson, «Systems thinking, the Swiss Cheese Model and accident analysis: A comparative systemic analysis of the Grayrigg train derailment using the ATSB, AcciMap and STAMP models», *Accident Analysis & Prevention*, bd. 68, s. 75–94, jul. 2014.
- [14] N. Åhnberg, J. Häggström, B. Wahlström, Sverige, og Trafikverket, «Tunnelsäkerhet dimensionerande brandeffektkurvor i persontåg», Trafikverket, Borlänge, Trafikverket publ. nr. 2014:057, ISBN 978-91-7467-582-5, 2014.
- [15] M. Kumm, «Carried Fire Load in Mass Transport Systems a Study of Occurrence, Allocation and Fire Behaviour of Bags and Luggage in Metro and Commuter Trains in Stockholm», Mälardalens University, 2010:4, 2011.
- [16] Y. Z. Li og H. Ingason, «Design fires and time-temperature curves for Bergen trams», 6P10129, mai. 2017.
- [17] A. Lönnermark, J. Lindström, og Y. Z. Li, «Model-scale metro car fire tests», 2011.
- [18] C. Steinert, «Smoke and heat production in tunnel fires», presentert på The international conference on fires in tunnels, Borås, Sweden, 1994.

- [19] C. Barber, A. Gardiner, og M. Law, «Structural fire design of the Øresund tunnel», presentert på Proceedings of the international conference on fires in tunnels, 1994, s. 313–332.
- [20] G. Hadjisophocleous, D. H. Lee, og W. H. Park, «Full-scale experiments for heat release rate measurements of railcar fires», presentert på Fifth international symposium on tunnel safety and security, New York, USA, 2012, s. 14–16.
- [21] «NFPA 72 National Fire Alarm and Signaling Code 2019». National Fire Protection Association, 03 sep. 2018.
- [22] H. Ingason og Anders, Lönnemark, «Brandbelastning och brandscenarier för järnvägstunnlar», SP Arbetsrapport 2002:30, 2002.
- [23] Jörg Schreyer, «Räumung und Entrauchung unterirdischer Haltestellen im firefall - Erfahrungen bei praktischen Projekten», i *STUVA-Tagung*, 2005, bd. 21, s. 133–138.
- [24] S. Zhao, Y. Z. Li, M. Kumm, H. Ingason, og F. Liu, «Re-direction of smoke flow in inclined tunnel fires», *Tunnelling and Underground Space Technology*, bd. 86, s. 113–127, apr. 2019.
- [25] Bane NOR, «Bane NORs tekniske regelverk», *Teknisk regelverk*. [Online]. Tilgjengelig på: <https://trv.banenor.no/wiki/Forside>. [Åpnet: 23 jun. 2020].
- [26] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i vogntog på Rv 23, Oslofjordtunnelen, 23. juni 2011», Vei 2013/05, Oktober. 2013.
- [27] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i tanktilghenger i Skatestraumtunnelen, 15. juli 2015», Vei 2016/05, nov. 2016.
- [28] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i kjøretøy på Rv. 5, Fjærlandstunnelen, 17. april 2017», Veg 2019/05, jul. 2019.
- [29] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen, 5. august 2013», Vei 2015/02, mar. 2015.
- [30] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland, 11. august 2015», Vei 2016/03, jul. 2016.
- [31] Statens havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i vogntog på Rv. 23, Oslofjordtunnelen 5. mai 2017», Vei 2018/04, nov. 2018.
- [32] H. Ingason, Y. Z. Li, og A. Lönnemark, *Tunnel Fire Dynamics*, 1. utg. Springer New York, 2014.
- [33] Y. Z. Li og H. Ingason, «New models for calculating maximum gas temperatures in large tunnel fires», SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 2016:95, 2016.
- [34] S. Zhao, F. Liu, F. Wang, og M. Weng, «Experimental studies on fire-induced temperature distribution below ceiling in a longitudinal ventilated metro tunnel», *Tunnelling and Underground Space Technology*, bd. 72, s. 281–293, feb. 2018.
- [35] J. S. Newman, «Experimental evaluation of fire-induced stratification», *Combustion and Flame*, bd. 57, nr. 1, s. 33–39, jul. 1984.
- [36] Y. Z. Li, B. Lei, og H. Ingason, «The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires», *Fire Safety Journal*, bd. 46, nr. 4, s. 204–210, mai. 2011.
- [37] Y. Z. Li, B. Lei, og H. Ingason, «Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel fires», *Fire Safety Journal*, bd. 45, nr. 6–8, s. 361–370, nov. 2010.
- [38] «Norske tog, Type 75», *Norske tog*. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.norsketog.no/tog/type75/bma75>. [Åpnet: 23 jun. 2020].

## Del 2

# 4 Kartlegging kunnskap om menneskelig atferd ifm. tunnelbrann

Denne delen av rapporten omhandler kartlegging av kunnskap om menneskelig adferd ved tunnelbrann, for å svare ut følgende hovedspørsmål:

*4. Finnes det anerkjent kunnskap om adferdsmønster for involverte i en tunnelbrann? Hvordan kan i så fall slik kunnskap benyttes av arbeidsgruppen i det videre arbeidet?*

*9. Hva sier forskning og/eller erfaringer om forflytningshastighet i røykfyllt miljø i tunnel for:*

*a. Evakuerende (passasjerer) uten vernebekledning?*

*b. Evakuerende med funksjonsnedsettelse?*

*c. Redningsmannskaper med røykdykkerutstyr?*

Forfattere av del 2 av rapporten: Håkan Frantzich, Lunds universitet og Karl Fridolf, WSP Sverige AB

## 4.1 Introduksjon

Bränder i jernvægstunlar sker dessbättre inte ofta men kommer att vara ett allvarligt problem den dagen det inträffar för dem som är involverade i olyckan. Därför är det nödvändigt att tunneln utformats på ett sätt som tillgodoser det behov som de utrymmande personerna har vilket också inkluderar utformning av vissa aspekter på tåget. Den viktigaste aspekten är sannolikt att strategin vid brand är att så långt det är möjligt fortsätta att köra tåget ut ur tunneln. Av den anledningen kan exempelvis inte passagerare nödstoppa tåget utan det kan endast föraren göra. Dock kan det finnas situationer som gör att det inte går att köra ut ur tunneln, då återstår endast att utrymma tunneln till fots.

Utrymning av tåg som stannat i en tunnel skiljer sig på flera sätt från motsvarande situation i en vägtunnel men det finns ändå likheter som gör att erfarenheter kan överföras. I båda fallen kommer det att uppstå svårigheter att orientera sig och förflytta sig i tunneln om den rökfylles vilket är sannolikt. Men ur ett beteendeperspektiv skiljer förutsättningarna sig åt. I fallen med brand i en tågtunnel är passagerarna en del av en större grupp i samma situation vilket gör att graden av ansvar sannolikt är lägre för den enskilde passageraren jämfört med bilister i en vägtunnel. Gruppens storlek och förutsättningar i övrigt kommer att vara betydelsefulla för det förväntade beteendet vilket gör att utrymningsförutsättningarna kommer att vara beroende av vad som sker på tåget.

Det kan dessutom förväntas vara skillnader i förmåga till utrymning och förväntat beteende mellan personer som utrymmer från väg- och jernvægstunlar å ena sidan och dem som utrymmer från byggnader. Dessa skillnader är aktuella att beakta i samband med dimensionering av nya tunnlar men även för att kunna applicera kunnskap som erhållits från bränder i byggnader till en liknande situation i tunnlar.

För järnvägstunnlar kan det därför finnas skäl att betrakta tre skeden:

- innan olyckan sker
- utrymning av tåg samt
- utrymning av tunnel

Eftersom beteendemönster på tåget kommer att ha en avgörande roll är det värt att poängtera att personalen ombord på tåget kommer att vara betydelsefull för dels att utrymningen inleds när tåget stannat i tunneln, dels för att leda utrymningen utanför tåget i tunneln.

En annan aspekt som är specifik för järnvägstunnlar är att det finns ett stort antal personer ombord på tåget som ska utrymma samtidigt. Det kan dock finnas fördelar med detta eftersom passagerare kan hjälpa varandra vilket sannolikt är en förutsättning för att utrymning av tåg ska fungera. Hela utrymningskonceptet måste baseras på den så kallade självräddningsprincipen. Självräddningsprincipen omfattar samtliga passagerare på tåget det vill säga även de med olika former av funktionsnedsättningar. Därför fyller tågpersonalen en viktig funktion genom att de kan förse passagerare med information om vad som hänt och att ge instruktioner. Principen är vedertagen i samhället både nationellt och internationellt, även för väg- och järnvägstunnlar (Kecklund et al., 2006).

Det finns ingen anledning att utrymningen ska förlita sig på att räddningspersonal ska assistera, ofta är tunnlar belägna så långt från räddningsstyrkor att de inte är framme i tid för att hjälpa vid utrymningen. Däremot kan de ha en uppgift att ta hand om personer som utrymmer eller att bekämpa branden, men detta är i ett senare skede.

För att kunna beskriva en utrymningssituation kan komma att utvecklas i en järnvägstunnel är det nödvändigt att förstå interaktionen mellan tunnelns fysiska förutsättningar, inklusive organisatoriska aspekter såsom personalens agerande, och människornas förväntade beteende i situationen.

### 4.1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att synliggöra delar av den kunskap som finns angående utrymning av passagerare på tåg som tvingats stanna i en tunnel på grund av brand. Utöver utrymningsaspekter kommer även räddningstjänstens förutsättningar att belysas.

Den här delen av rapporten vill

- beskriva olyckor i tunnlar med fokus på passagerarsäkerhet och skillnaderna mellan väg- och järnvägstunnlar.
- presentera kunskap om hur människor beter sig i en utrymningssituation t.ex. genom att redogöra för beteendesevenser som är möjliga
- redovisa resultat från experiment som är relevanta i sammanhanget samt i förekommande fall diskutera de osäkerheter som råder
- beskriva effekten av olika tekniska system (i tunnel och tåg) på evakuering
- redogöra för hur säkerhet för personer med funktionsnedsättningar kan tillgodoses
- redogöra kunskapsläget kring förflyttning i rök.
- diskutera åtgärder för att mildra skador, nyttan med information, personalutbildning samt hur ny teknik som t.ex. Virtual Reality kan användas samt

- diskutera hur kunskapen praktiskt ska kunna tillämpas.

## 4.1.2 Metod

Arbetet utfördes i huvudsak som en litteratursammanställning. Litteraturen valdes i huvudsak utifrån författarnas tidigare erfarenhet och kunskap. En mindre litteratursökning i databaser har kompletterat ovan nämnda litteratur. Den litteratur som använts inkluderar material från några av de senare genomförda forskningsinsatserna såsom exempelvis METRO (Ingason et al. (2012).

### 4.1.2.1 Avgränsningar

Arbetet har inriktats mot att kartlägga forskning och i viss utsträckning tillämpning som i huvudsak berör möjlighet till utrymning och människors beteende knutet till tunnlar med tågtrafik.

Arbetet begränsas till förutsättningar för 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. Däremot redovisas kortfattat förutsättningarna för räddningstjänsten att genomföra en insats.

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.

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

Vidare har ingen analys gjorts kring förutsättningarna för utrymning så som de regleras i gällande föreskrifter. Detta gör att rapporten exempelvis inte beaktar möjligheten för tåget att köra till en så kallad evakuerings- och räddningspunkt där förutsättningarna är bättre för att hantera olyckan. Utgångspunkten är istället att betrakta vilka behov som passagerare som ställs inför en utrymningsituation har för att på bästa sätt klara av att utrymma säkert.

## 4.2 Inträffade olyckor

Bränder i tunnlar är en typ av olyckor som inte sker speciellt ofta. Vanligast är dock brandolyckor i vägtunnlar vilket kan förklaras med att trafikmängden är större, det finns fler ovana trafikanter och typen av fordon är mer varierande. I en järnvägstunnel är det alltid professionella aktörer som framför fordon och mängden oväntade händelser är avsevärt färre. Vidare finns en tydligare reglering i form av

accepterade standarder såsom EN45545 (2013) och europeiska förordningar såsom TSI-SRT (2014) och TSI-LOC&PAS (2014) med efterföljande revideringar. Kravnivå på tunnel och fordon är tydligare och mer kontrollerad vilket sannolikt leder till en lägre brandfrekvens. Trots detta sker en del bränder i olika typer av tunnlar och det finns erfarenheter från dessa bränder som kan användas för att undvika att framtida olyckor får stora konsekvenser eller sker oftare än förväntat. Det ska noteras att en skillnad är att ett tåg innehåller ett större antal personer vilket kan innebära stora konsekvenser vid en brand.

Nedan redovisas utrymningsrelaterade synpunkter från några tunnelbränder som är förknippade med spårbunden trafik samt några tunnelbränder som skett i norska vägtunnlar. Det finns naturligtvis omfattande bränder i andra tunnlar och stationer såsom de bränderna i tunneln under engelska kanalen 1996, 2006 och 2008 samt branden i Daegu 2003. I Handbook of Tunnel Fire Safety (Beard & Carvel, 2012) beskrivs flera tunnelbränder förhållandevis utförligt. Det kan också nämnas att Gossard (1984) redovisar några äldre incidenter med tunnelbanetåg med fokus på brandförloppet. Han redovisar dock att passagerare i ett par fall försökte utrymma tågen genom att slå sönder fönster när det var inledande problem att öppna dörrarna. Han nämner också att utrymningen av tunneln (för de fall där tåget stannat i tunneln) skedde i en rökfylld miljö till närmaste station ett par hundra meter bort.

Från flera av de inträffade bränderna finns det möjligheter att se likheter i människors beteende vilket utvecklas vidare i kapitel 3 där olika beteendevetenskapliga teorier presenteras och förklaras ur ett tunnelperspektiv.

### 4.2.1 Zürich 1991

Den 16 april 1991 inträffade en brand i ett tunnelbanetåg i Zürich Metro (Fermaud et al., 1995). Branden, som sannolikt var anlagd, inträffade i den bakre delen av tåget observerades av personal på stationen just som tåget körde in i tunneln från Zürich Main Station. Personalen försökte komma i kontakt med föraren men detta misslyckades. En passagerare som upptäckte branden drog i nödbromsen och tåget stannade inne i en tunnel. Ett andra tåg som färdades i riktning mot Zürich Main Station var också inblandad i händelsen och var också inblandade i utrymningen.

Passagerarna i det första tåget, det där branden uppstått, noterade till en början inte att tåget nödbromsats utan satt kvar på sina platser. Efter en stund började rök att spridas i tunneln och tågpersonal uppmanade passagerarna att inte utrymma tåget. Cirka 2 till 3 minuter senare kommer dock ett besked att tåget skulle utrymmas. Passagerarna klev då först ner på den gångbana som fanns bredvid spåren för att sedan fortsätta ut i det fria. Under tiden fylldes tunneln med mer rök och hela tunnelns tvärsnitt fylldes ganska snabbt.

De äldre och mer svårörliga passagerarna hjälptes ner på marken av andra passagerare. Ett större problem var att avståndet mellan tågets golv och marknivån utanför var cirka en meter. Belysningen i detta skede var ganska dålig. Många upplevde röken som ett stort problem eftersom den gjorde att belysningen i tunneln och från tåget hade dålig verkan och det blev mörkt.

Eftersom underlaget som personerna gick på var plant och förberett som gångbana var det inte många personer som snubblade eller föll. Vissa försökte gå ner mellan rälsen men återvände upp på gångbanan eftersom det var lättare att gå där. Många passagerare gick genom rök hela tiden. Flertalet av personerna gick mot den station som tågen var på väg till det vill säga i riktning från branden. Den längsta gångsträckan ut till det fria var 700 m. Uppskattningsvis 140 personer var inblandad i olyckan och deltog i utrymningen och ingen rapporteras ha blivit skadad.

Efter incidenten intervjuades cirka 20 av passagerarna som var inblandade i olyckan. De uppgav att de uppfattade det märkligt att tågpersonalen gav olika besked och att de inte skulle utrymma tåget till en början, även om det fanns rök i tunneln. De ansåg vidare att skyltar som angav avståndet till tunnelmynningen var viktiga. Däremot ifrågasattes nyttan av vanliga utrymningsskyltar eftersom några uppfattade det som att det då skulle finnas en nödutgång i närheten av denna. De skyltar som används måste vara monterade i direkt anslutning till belysningsarmaturer eftersom röken gör det svårt att se några längre sträckor.

Eftersom branden upptäcktes på ett tidigt stadium och att olyckan inträffade i en större stad kunde räddningsarbetet påbörjas snabbt. Räddningspersonal gick in i tunneln och hjälpte personer ut. Flera passagerare uppgav att de inte trodde att de skulle ha kunnat ta sig ut helt utan denna hjälp. Den efterföljande undersökningen visade att kommunikationen till passagerarna i inledningen av utrymningen var mycket viktig. Passagerarna påbörjade i princip inte utrymningen innan de blev tillsagda att göra så.

## 4.2.2 Baku 1995

Den 28 oktober 1995 inträffade en allvarlig brand i tunnelbanan i Baku i Azerbajjan (Rohlén & Wahlström, 1996). Vid olyckan omkom 289 personer och ungefär lika många skadades. Den utlösande händelsen var ett elfel i en av vagnarna vilket gjorde att tåget stannade inne i tunneln. När väl branden kommit igång försvårades utrymningen av att dörrarna inte kunde manövreras då funktionen satts ur spel av branden. Utrymningen skedde genom fönster som krossades, genom dörrar i tågets ändar samt genom några sidodörrar som ändå kunde öppnas manuellt.

Spårområdet var inte speciellt förberett att gå på och under utrymmet mellan rälsen löpte en dräneringsränna för att ta hand om inläckande vatten. Den enda ytan att gå på var således vid sidan av spåret. Passagerarna följde tunnelväggen och de kablar som fanns där. Man gick efter varandra och höll varandra i kläderna för att på det viset orientera sig i tunneln. Röken fyllde tunneln ganska tidigt vilket försvårade sikten. Den högt placerade belysningen täcktes snart av tät rök. Dessutom felmanövrerades fläktar i tunneln så att röken vändes mot de som försökte evakuera så att röken kom igen bakifrån. Många utrymmande gick i riktning mot den station som tåget var på väg mot. Avståndet till den stationen var cirka 2 km. Flertalet av dem som omkom hittades på tunnelbanetåget, de hade inte lyckats ta sig ut i tunneln.

## 4.2.3 King's Cross 1987

En av de mer väldokumenterade olyckorna i anslutning till tunnelbanor är den som inträffade i stationen vid King's Cross i London i november 1987 (Fennell, 1988; Donald & Canter, 1990). Branden inträffade visserligen inte i ett tåg eller på spårområdet utan i en rulltrappa men är intressant av olika skäl. Framst eftersom flera olika undersökningar har gjorts för att kunna beskriva vad som egentligen skedde. Det gäller till exempel brandförloppet, spridningen av brand och brandgaser samt hur personerna som var i anläggningen reagerade och vad de gjorde.

Branden inträffade på kvällen den 18 november och startade i en rulltrappa. Troligen har fett och smuts antänts av en tappad tändsticka. Branden utvecklade sig snabbt och flammor kom upp i den ovanliggande biljetthallen. Totalt miste 31 människor livet i händelsen och många fler skadades.

Undersökningen av Donald & Canter (1990) är speciellt intressant eftersom den i detalj beskriver hur flera av de omkomna betedde sig innan de mötte branden. Detta kunde göras för 24 av de 31 omkomna och bygger på vittnesuppgifter. En tydlig slutsats av arbetet är att de roller, med det följande beteendet, som personerna hade innan branden behöll de under hela brandens förlopp.

I flera fall tvingades personerna fatta beslut om vad som är en riktig åtgärd baserat på delvis motsägelsefulla signaler. Personer som stod och väntade på sitt tåg blev plötsligt uppmanade av poliser att utrymma stationen vilket då var motstridigt mot det som föreföll vara naturligt det vill säga att stå kvar och vänta på tåget. Personerna var då inte medvetna om att det brann i stationen och insåg inte själva den uppenbara faran. En person som befinner sig i en tunnelbanestation är där i egenskap av resenär och agerar därför enligt denna roll. Om det inträffar en störning i situationen som till exempel att det skulle brinna krävs det tydliga indikationer för att personen skall bryta sitt invanda mönster, definierat av rollen. Beteendet kan därför sägas bero på i vilken roll personen befinner sig i och kanske inte så mycket vem personen egentligen är.

Den första personen som upptäckte på branden var en biljettkontrollant. Efter att flera passagerare hade larmat gick han för att undersöka branden i enlighet med sin instruktion. Men han arbetade normalt inte på stationen och han hade inte fått någon information om hur han borde agera vid en brand. Därför informerade han varken stationschefen eller sin närmaste kollega om att det uppstått en brand. Han agerade ändå utifrån de varningssignaler han fått från passagerarna och agerade utifrån sin roll som anställd. Beteendet baseras alltså på de regler som rollen som biljettkontrollant innebar men gjorde inget ytterligare för att varna andra, begränsa branden eller lindra konsekvensen av branden.

På samma sätt agerade polisen i tunnelbanan utifrån deras roll och uppgift och försökte ordna upp det problem som uppstått. Polisen hade en möjlighet att få passagerarna i stationen att bryta sitt normala agerande på grund av sin auktoritära roll. Personal från tunnelbaneföretaget hade inte samma auktoritet och kunde därför inte heller bryta många av passagerarnas beteendemönster. Men även ett auktoritärt beteende kan få fatala konsekvenser om tillräcklig information saknas. En polis visade sig på grund av otillräcklig information leda några passagerare till den biljetthall som senare nåddes av branden från rulltrappan vilket ledde till att de omkom. Organisatoriska faktorer spelar således en viktig roll vid utrymningen av anläggningar av denna typ.

#### 4.2.4 Bränder i norska tåg

Statens havarikommisjon for transport (SHT) utreder olyckor i bland annat tåg och vägtrafikfordon. Ett tjugotal tågbränder som skett i tunnlar har utretts under de senaste tjugo åren och flertalet av dessa handlar om mindre bränder och i ett fåtal fall har tågen evakuerats. De flesta evakueringar har kunnat ske vid stationer men det finns fall där tågen evakuerats ute på banan dock oftast i närheten av en station. Inte i något fall finns rapporterade personskador men det nämns i vissa fall att passagerare har transporterats iväg för läkarkontroll. De fall där tåget stannat i en tunnel har inträffat i tunnelbanan i Oslo. Det är inte helt klarlagt om utrymning i tunnelbanan skett genom tunneln eller om det alltid skett vid stationen.

Vid de tillfällen då tågen utrymts har detta skett efter instruktion från ombordpersonalen. Det finns inga rapporterade fall där spontanutrymning skett men det kan inte uteslutas att så ändå har skett. Beskrivningen av utrymningsförutsättningarna är inte alltid helt tydliga.



Det som också konstateras i några fall är att räddningsinsatsen kan dröja innan den inleds och att den kan ta lång tid och vara förenad med svårigheter. Det är i praktiken endast vid bränder i närheten av större städer som räddningstjänsten är på plats tidigt. Som exempel kan nämnas att vid en brand och explosion i Askertunneln 2004 (HSLB, 2005) så dröjde det tre timmar innan räddningstjänsten kunde påbörja en insats. Tåget stod då ca 50 in i tunneln från en mynning och var vid tillfället lastat med farligt gods. Det framgår dock inte orsaken till den långa insatstiden.

SHT har också skrivit s.k. temarapporter för särskilda händelser. En sådan temarapport behandlar tunnelbanebränder mellan 2005 och 2007 (SHT, 2009). Där konstaterar man att utrymning i tunnelbanan är förenat med stora svårigheter främst pga. strömförande delar och att det är viktigt att nå passagerare med information. Man pekar också på behovet av väl utbildad och tränad personal för att kunna hantera dessa olyckor. De konstaterar också att det inte skett några personskador men man anser ändå att risken är hög då en stor del av sträckningen sker i tunnlar.

## 4.2.5 Bränder i norska vägtunnlar

Det är inte ovanligt med bränder i norska vägtunnlar. Detta beror till viss del på att Norge har ett stort antal tunnlar även på platser där trafikmängderna är små. Som tidigare poängterats är det skillnader i förutsättningarna att utrymma en vägtunnel jämfört med en järnvägstunnel. Men det finns ändå vissa erfarenheter som kan överföras från de inträffade vägtunnelbränderna. Nedan redogörs kort för några av de senast inträffade tunnelbränderna i norska vägtunnlar. Samtliga dessa olyckor är utredda av SHT och det finns således detaljerade olycksutredningar från dessa.

### 4.2.5.1 Gudvangatunneln 5 augusti 2013

En brand uppstod i en lastbil som körde utan last (SHT, 2015). Branden startade ungefär kl 12:00 och räddningstjänst och vägtrafikcentralen larmades tidigt. Tunneln är ca 11,4 km och branden inträffade ca 8 km från den västra mynningen (Gudvanga). Vid tillfället var den naturliga vindriktningen från väster mot öster (mot Aurland). Totalt var det 67 personer som behövde evakueras från tunneln och av dessa fick 28 akuta rökskador varav fem med allvarliga skador. Av de 67 bilisterna var det 20 som evakuerades ut på Gudvangasidan och 47 på Aurlandsidan. De 20 som valde den västra mynningen gick alltså cirka 8 km i tunneln.

Vid brand i tunneln är den normala rutinen att aktivera fläktar för att underlätta för räddningspersonalen att köra in i tunneln. Kl 12:05 startades därför fläktarna och vände luftströmmen och rökes så den istället riktades mot Gudvanga. Detta innebar att de som utrymde den vägen tvingades att förflytta sig i mycket tät brandrök. När branden startade var luftriktningen östlig och det finns en möjlighet att de som tidigt påbörjade sin utrymning valde att gå mot luftströmmen dvs åt väster. Detta kan ses som ett naturligt val speciellt om det inte finns någon annan information tillgänglig om vilken riktning som är den bästa. Därför är det speciellt olyckligt att riktningen efter ett tag ändras vilket gör att miljön försämras och det som inledningsvis är ett bra beslut visar sig vara förenat med fara. Det kan förefalla som ett rimligt beslut från räddningstjänstens perspektiv att skapa en bra insatsmöjlighet men samtidigt utsätter de andra personer i fara genom att vända röken i andra riktningen.

### 4.2.5.2 Gudvangatunneln 11 augusti 2015

Ungefär två år efter den förra branden uppstod en ny brand i Gudvangatunneln, denna gång nära mynningen vid Aurlandsidan (SHT, 2016). Branden uppstod i en buss och flertalet av bussens

passagerare kunde räddas ut via andra bilar som var i närheten. Även i detta fall aktiverades brandgasventilationen i riktning mot Gudvanga vilket innebär att de bilister som befann sig mellan branden och Gudvangamynningen, på en sträcka av ungefär 11 km, drabbades av röken. De flesta han att vända sina bilar men fem bilister kunde inte vända om i tid utan stannade i röken. I detta fall stannade de kvar i bilarna och utrymde inte och hittades efter 1,5 timmar. Vegtrafikksentralen (VTS) hade kontakt med dessa via mobiltelefon. Även i detta fall kan det konstateras att flera bilister blir överraskade av att röken kommer mot dem med hög hastighet eftersom rökfläktarna aktiverats. Ytterligare en konsekvens av hur rökfläktarna används är att det inte finns information om vad konsekvensen kan vara om de aktiveras. Många personer som befinner sig nedströms en brand riskerar därför att hinnas upp av röken, speciellt eftersom den ofta färdas snabbare än personerna kan förflytta sig. Dimensionerande lufthastighet anges vara mellan 2–3 m/s vilket kan jämföras med en person som går i rask takt förflyttar sig under 2 m/s i en rökfri miljö.

#### 4.2.5.3 Oslofjordtunneln 23 juni 2011

Ytterligare ett exempel på brand i tunnel som kräver evakuering är lastbilsbranden i Oslofjordtunneln 2011 som är mycket lik bränderna som senare inträffade i Gudvangatunneln 2013 och 2015 (SHT, 2013). Den inträffade cirka 1,7 km från närmaste mynning (Dröbak i öster). Räddningstjänsten aktiverade rökfläktarna och spred röken med 2–3 m/s i västlig riktning och mot de bilister som var på väg in i tunneln. Bilisterna som observerade röken kunde i några fall vända och köra ut. En bil vände för sent och försökte först köra genom den täta röken. Bilisten kunde plocka upp fem passagerare på vägen som men efter ett tag tvingades alla att lämna bilen och fortsätta till fots. De utrymde tillsammans även om de sannolikt inte kände varandra innan olyckan. Gruppen sökte efter ett tag gemensamt skydd i utrymmet mellan tunnelkonstruktionen och bergväggen. De fann en öppning i närheten av en nödtelefon, möjligen på uppmaning från personal från VTS som de hade kontakt med, och stannade i utrymmet tills de blev räddade.

#### 4.2.5.4 Fjaerlandstunneln 17 april 2017

Branden uppstod sent på kvällen i ett underhållsfordon som rengjorde tunneln (SHT, 2019). Eftersom det skedde underhållsarbete färdades bilar i kolon i tunneln ledda av en ledarbil. Vid det aktuella tillfället hade inte ledar bilen någon kommunikation med arbetsledningen och fick inte reda på att det brann förrän de såg röken komma mot dem. Några av bilisterna som då lämnade sina bilar tappade orienteringen i den täta röken och började efter ett tag att gå i fel riktning. I tunneln fanns vid tillfället inget vägledningssystem för bilister som utrymmer.

### 4.2.6 Sammanfattande reflektioner

De inträffade incidenterna är mycket olika men speglar olika aspekter som har med utrymning att göra. Händelserna ska främst ses som exempel på olyckor där utrymningsrelaterade aspekter förekommer i den utsträckning de ens finns beskrivna. De flesta av olycksbeskrivningarna är relativt detaljerade vad avser branden, dess uppkomst och förlopp. Vad de drabbade personerna gör eller hur de agerar ensamt eller gemensamt finns inte så detaljerat beskrivet vilket är olyckligt. Olyckan i Zürich är dock relativt väldokumenterad då det skedde en uppföljande studie. Detsamma gäller en del inträffade tunnelbränder i Norge t.ex. efter branden i Gudvangatunneln (Njå, 2016).

Branden i Zürich exemplifierar behovet av att informera och kommunicera med passagerare på ett tåg för att inleda en utrymning. Sannolikt hade utrymningen kommit igång förr eller senare men tiden som är tillgänglig för utrymning är ofta kort och då kan en tidigt initierad utrymning vara avgörande för utgången. Men vid stora personantal kan utrymningstiden bli mycket lång vilket branden i New Yorks tunnelbana 2017 vittnar om med en utrymningstid på över en timma för cirka 800 passagerare (NYT, 2017).

Branden i Baku är en av de mer tragiska tunnelbränderna i modern tid men den visar på utrymningsbeteenden bland personer som förflyttar sig i en mörk tunnel på ett underlag som inte är anpassat för förflyttning till fots. Personer hjälper varandra genom att de går i en lång rad och håller i varandra, något som också noterats i samband med genomförda utrymningsförsök (se avsnitt 4.4.2.2).

Branden i Baku illustrerar även behovet av ett förstå konsekvensen av att hantera en befintlig brandgasventilation. Samverkan mellan människors beteende och tekniska installationer är sannolikt viktiga aspekter för att förstå varför personer agerar som de gör i vissa situationer. Att tekniska installationer fungerar som de ska belyses även av Bakubranden där tågagnarnas dörrar inte gick att öppna då funktionen sattes ur spel av branden.

Branden i King's Cross i London är väl dokumenterad vad avser personers agerande och hur olika roller påverkar beteenden eller uteblivna beteenden. Det är också i detta fall påtagligt hur informationsbehovet påverkar personers agerande. I Londons tunnelbana var det också till stor del organisatoriska fel som ledde till den katastrofen. Tåg fortsatte att anlända till stationen fastän det var känt att brand uppstått.

I Norge finns ett antal inträffade bränder både i väg och järnvägstunnlar. Lyckligtvis har det ännu inte skett några dödsfall orsakade av brand men i flera fall har många personer blivit allvarligt skadade. I några fall är det ren tur att ingen omkommit som vid branden i Seljestadstunneln 2000 (DBE, 2000) och vid branden i Gudvangatunneln 2013 där det sannolikt var när att dödsfall hade kunnat inträffa.

När det gäller utrymning från tåg och tåg i tunnlar så finns det få rapporterade fall. Det konstateras i utredningarna att utrymning ofta initieras vid meddelande från personal och att utrymningen sedan fungerar tillfredsställande. SHT skriver dock i en temarapport att utrymning från tunnelbanetåg (SHT, 2009) kan vara problematiskt på grund av att strömförande delar finns i spårnivå och att det krävs utbildad och tränad personal för att kunna hantera situationen.

Bränderna i vägtunnelnarna visar på möjligheten att personer faktiskt kan utrymma mycket långa sträckor och att de förflyttar sig ganska fort. Detta förutsätter dock att de inträffade bränderna inte är alltför allvarliga. Men även i mycket tät rök kan bilister utrymma snabbt och långt. De som utrymmer gör ofta detta i grupper. Det uppstår grupper bland dem som är inblandade i utrymningen även om de inte känner varandra innan.

I de fall det finns vägledande markeringar är dessa sannolikt till nytta även om det inte alltid nämns. Vid en av olyckorna tappade bilisterna i tunneln orienteringen i den täta röken och det fanns inget som kunde vägleda dem rätt.

Ett problem som kan uppstå är om räddningstjänsten behöver göra en insats i en tunnel är om insatstiden är lång. Nyttan av insatsen begränsas till att hantera branden och att hjälpa personer som utrymt. I nästan samtliga fall bygger utrymningen på att personer som är inblandade själva kan sätta sig i säkerhet. Ett annat problem är att räddningstjänsten eller Vegtrafikksentralen (VTS) aktiverar fläktar som ska evakuera röken. I flera fall har det inneburit att utrymnande personer exponeras för rök under sin utrymning även om miljön varig god innan. Men röken transporteras snabbare än de utrymnande kan förflytta sig så förutsättningarna för en lyckad utrymning försämras avsevärt när fläktarna startas.

Fläktarna används för att skapa en god insatsmiljö vilket är en fördel men det drabbar de personer som redan är utsatta genom att deras utrymningsmöjligheter försämras. Problemet har på senare tid lett till förändrade strategier för hur fläktar ska användas vid bränder. I Sound Transit i Seattle är utgångspunkten att röken ska riktas bort från utrymmande passagerare även om det är ogynnsamt ur andra aspekter (Bilson et al., 2018). Problemet är dock att veta var de utrymmande personerna befinner sig vilket inte alltid är möjligt att identifiera med befintliga tekniska installationer som CCTV så sikten skymms av röken.

## 4.3 Människors beteende - teorier och modeller

Möjlighet till utrymning vid brand kan i största allmänhet beskrivas som en funktion av egenskaper kopplade till (Kobes et al., 2010):

1. branden (perceptuella funktioner såsom synlighet, hörbarhet och luktbarhet, tillväxthastighet, rökpotential, toxicitet, värme, etc.),
2. människan (demografi, personlighet, kunskap och erfarenhet, tillhörighet, sociala relationer, kontextuell roll och ansvar, medvetenhet, uppmärksamhet, etc.), och
3. byggnadsverket (geometri, orienterbarhet, brand- och utrymningstekniska installationer, etc.).

Människors beteende i bränder, såväl i byggnader som i tunnlar, beskrivs idag vanligen som en beteendeprocess som i mer eller mindre utsträckning påverkas av ovan aspekter. I denna process tar varje individ del av den information som finns tillgänglig om branden och sin omgivning (vilken kan vara både bristfällig och oklar), och uppdaterar kontinuerligt sitt beslut om vad han eller hon ska göra baserat på denna.

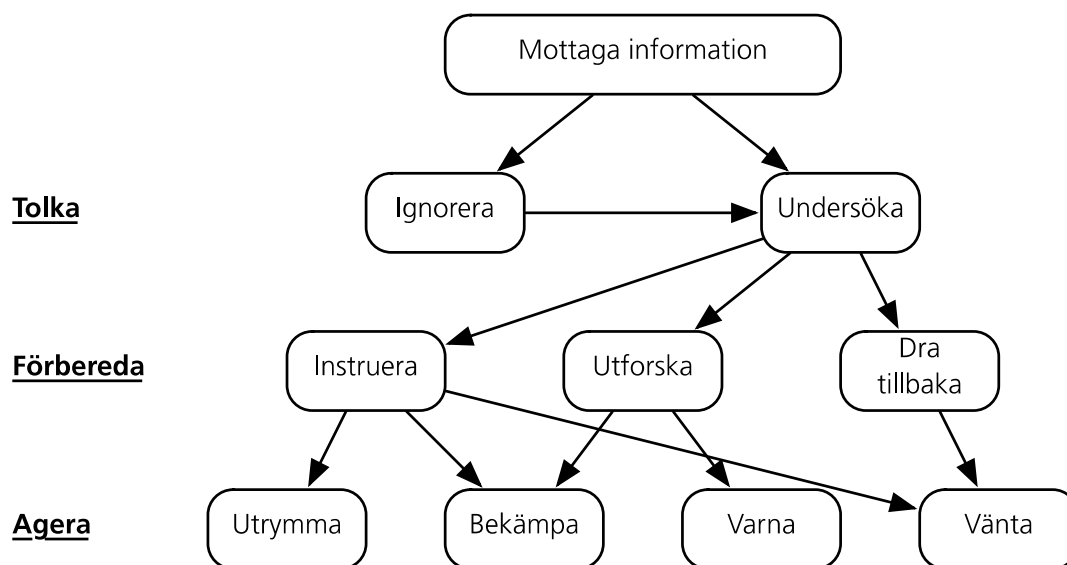
Det finns idag ett antal allmängiltiga och mer eller mindre verifierade och validerade teorier och modeller om människors beteende vid bränder som kan användas för att beskriva, förstå och till och med förutsäga ovan nämnd beteendeprocess. Några av dessa har dessutom visats tillämpliga för att beskriva människors beteende vid bränder i tunnlar för både väg- och järnvägstrafik (Fridolf, 2015). Det finns naturligtvis flera grundläggande skillnader mellan dessa typer av tunnlar. Till exempel kan de inledande skedena av en brand förväntas vara och upplevas annorlunda mellan personer i en vägtunnel och i en järnvägstunnel. I en vägtunnel vistas människor i allmänhet i en personbil som de också själva ansvarar för/äger. I en järnvägstunnel vistas människor däremot ombord på ett tåg, sannolikt med många andra för dem okända människor. Detta är aspekter som kan förväntas påverka berörda personer översikt över situationen, tillgång till information, trängsel vid utrymning, etc. Det bör samtidigt konstateras att det även kan finnas grundläggande skillnader mellan olika tunnlar för ett och samma transportslag. Vissa tunnlar för spårbunden trafik kan till exempel tillhöra ett stort nätverk av mer eller mindre komplexa tunnlar och undermarkstationer (såsom tunnelbanor), andra kan utgöras av en enkel och kort tunnel med endast ett spår. Det är troligt att dessa skillnader såväl mellan som inom olika transportslag kommer att påverka människors beteende och beslutsfattande i händelse av en brand. Det innebär dock inte att ovan nämnd beteendeprocess inte skulle kunna beskrivas med utgångspunkt i samma grundläggande teorier och modeller om människors beteende i bränder. Nedan beskrivs några av de viktigaste, vilka i sammanhanget kan betraktas utgöra ett grundläggande teoretiskt ramverk för att beskriva, förstå och förutsäga människors beteende vid bränder, även i tunnlar för spårbunden trafik.

### 4.3.1 Beteendesekvenser och betydelsen av människors roller

Inledningsskedet av en brand präglas oftast av stora osäkerheter för majoriteten av de personer som vistas i en byggnad (eller en tunnel). Information som tyder på att det brinner kan vara bristfällig, och i många fall kan olika informationssignaler vara motstridiga. Inledningsvis ägnar därför ofta en stor andel människor sig åt att söka mer information om vad det är som händer innan de agerar och påbörjar en utrymning. Detta fenomen har bland annat påvisats i studier som presenterats av Canter et al. (1980).

Canter's studier syftade till att öka förståelsen för hur människor beter sig i bränder, samlades information in om hur utrymmande människor agerat i bland annat lägenhets- och sjukhusbränder. Totalt intervjuades 198 personer från 28 olika bränder om vad som hade hänt från det att de blivit varse att något inte stämde. Enskilda individers beteenden bröts därefter ner i steg, det vill säga sekvenser, och samtidigt dokumenterades dessa sekvenser i en kronologisk ordning tillsammans med en beskrivning av respektive individs lokalisering i byggnaden under branden.

Baserat på en statistisk analys av dataunderlaget skapade Canter et al. (1980) så kallade *decomposition diagrams*, för respektive byggnads- och verksamhetstyp. Diagrammen beskriver sambanden mellan två eller flera steg i individernas sekvenser av beteenden under branden, och därtill korrelationen mellan dessa (det vill säga sambandets styrka). De kunde då konstatera att även om det förekom variationer mellan de olika byggnads- och verksamhetstyperna så går det med utgångspunkt i diagrammen att urskönja vissa karaktäristiska och återkommande sekvenser av beteenden, oberoende av vilken byggnads- eller verksamhetstyp som det rör sig om. Arbetet resulterade i en mer generell modell som, något förenklat, sammanfattar ett antal av de vanligast återkommande beteendena som hade identifierats i studierna: den så kallade beteendesekvensmodellen, se Figur 4-1. Den här modellen kan användas för att, något förenklat och generaliserat, beskriva människors beteende vid bränder.



Figur 4-1 Beteendesekvensmodellen återskapad från Canter, Breaux och Sime (1980).

Som kan ses i Figur 4-1 kan människors beteende i bränder brytas ner i tre så kallade sekvenskategorier:

1. tolka/tyda,
2. förbereda, och
3. agera.

Varje sekvenskategori utgör en beteendesevens, det vill säga en sekvens av beteenden som människor kan förväntas utföra när det brinner. Beteendesevenserna sker inte nödvändigtvis i den ordning de redovisas i Figur 4-1, och de kan dessutom upprepas beroende på vilken information som når en person, samt när. Avseende utrymning är vissa efterföljande beteendelalternativ mer effektiva än andra. En konsekvens är således att uttalanden och beskrivningar av vad som kan förväntas ske i de inledande skedena av en brand är lättare att göra i förhållande till vad som kan förväntas ske i de senare skedena. Det bör i sammanhanget noteras att alla beteenden i bränder inte nödvändigtvis är effektiva eller verkningsfulla. Beteendesevensmodellen kan dock användas för att beskriva människors beteende i händelse av brand, utan att behöva använda sig av termer som till exempel ”panik” (en term som idag helt förkastats av ledande forskare inom området, se avsnitt 4.3.5).

Beteendesevensmodellen kan användas för att förklara varför människor i en järnvägstunnel inte nödvändigtvis inleder en utrymning vid första brandsignalen om att något inte står rätt till. Som konstaterats ovan är information om vad som händer ofta bristfällig och osäker i inledningsskedet av en brand. Det första tecknet på att det faktiskt brinner kan till exempel utgöras av att det lutkar rök. En så vag signal är helt enkelt inte tillräcklig för att initierat spontanutrymning av ett tåg i en tunnel. Tvärtom kan en sådan signal många gånger förväntas ignoreras, särskilt av passagerare ombord på ett tåg (se nedan angående en persons roll och dess betydelse för beteendesevenser). Allteftersom mer information branden görs tillgänglig minskar dock osäkerheten kopplat till de beslut som fattas, och det är först när osäkerheten om att det brinner är tillräckligt liten (och risken bedöms som tillräckligt stor för en skäl eller andra) som en person kan förväntas fatta beslutet att, till exempel, utrymma (Kuligowski, 2008; 2009).

### 4.3.2 Betydelsen av roller

Det har visat sig att människors roll i en viss kontext har stor betydelse för hur sekvensen av beteenden i utvecklas i brandsammanhang (Canter et al., 1980; Donald & Canter, 1990; Tong & Canter, 1985; Sime, 1984; Sime & Kimura, 1988; Kimura & Sime, 1989). I det analysarbete som ledde fram till beteendesevensmodellen kunde det konstateras att människor i grupp betedde sig ungefär likadant. I hotell och vårdanläggningar agerade till exempel personalen i allmänhet annorlunda än gästerna och vårdtagarna. Vårdpersonal fortsatte exempelvis i stor utsträckning att vårda patienter även vid brand. Därtill kunde det konstateras att föräldrar i samband med bränder i hemmet vidtog åtgärder för att trygga sina barns säkerhet. Motsvarande beteenden har även observerats i samband med genomförda utrymningsövningar (bland annat vid ett engelskt universitet) samt inträffade bränder (bland annat i nattklubbar).

Med andra ord, den sekvens av beteenden som människor ägnar sig åt i händelse av en brand kan förväntas bero på människors vardagsroller, till exempel om en person är anställd eller besökare i en byggnad (Canter et al., 1980; Donald & Canter, 1990; Tong & Canter, 1985). Dessa vardagsroller behålls i stor utsträckning även i en brandsituation. Det kan beskrivas som att olika roller är förknippade med ett antal olika beteenderegler, regler som kan ses som vägledande principer som kommer att påverka de beslut som tas i händelse av en brand.

Som ett exempel kan nämnas resande människor i tunnelbanan. De flesta av dessa människor anammar sannolikt en roll som passagerare, med det primära målet att resa från en station till en annan. I inledningsskedet av en brand, eller när information inte tyder på en direkt livshotande situation, kommer dessa människor att vara ovilliga att inleda en utrymning eftersom det går emot de beteenderegler som

är kopplade till deras roll som passagerare (att resa ohindrat från en plats till en annan). De kan därför förväntas att, i mycket större utsträckning än till exempel en speditör, ignorera den information de får som tyder på en brand. Exempel på detta går att hitta i utredningar som gjorts i efterdyningarna av bränderna på King's Cross tunnelbanestation (Fennell, 1988; Canter et al., 1992) och i Zürichs tunnelbana (Fermaud et al., 1995; Fraser-Mitchell & Charters, 2005; Martens & Jenssen, 2012).

### 4.3.3 Anknytning

En annan idag välkänd och allmänt accepterad teori om människors beteende i bränder som kan användas för att beskriva, förstå och förutsäga utrymningsbeteenden även i tunnlar för spårbunden trafik är Simes (1983; 1984; 1985) så kallade anknytningsteori. Teorin formades på 1980-talet, då som ett direkt svar (och i kontrast) till den allmänt rådande uppfattningen om att människor alltid väljer att utrymma via den närmaste utgången i händelse av brand (och att panik ofta uppstår i sådana situationer, se nedan). Med utgångspunkt i en psykologiskt grundad uppfattning om att människor föredrar det välkända framför det mindre bekanta, och att denna tendens ökar i stressade situationer, argumenterade Sime för att människor i en brand-/utrymningsituation dras dels till platser, dels till andra personer som är mer eller mindre kända för dem sedan tidigare.

Simes (1983; 1984; 1985) anknytningsteori kan således användas för att förklara varför människor tenderar att utrymma via välkända utrymningsvägar, såsom huvudingångar eller välkända entréer, i händelse av brand<sup>10</sup>. Det även om de är placerade längre bort i förhållanden till okända utrymningsvägar, såsom nödutgångar som aldrig används under normala omständigheter. Betydelsen av människors roller i en viss situation (se kapitel 4.3.2) bör dock beaktas i detta sammanhang eftersom en känd utrymningsväg inte nödvändigtvis, för samtliga personer i en byggnad, måste utgöras av huvudingången. Personal som till vardags använder en nödutgång eller ett trapphus (tillika utrymningsväg) kommer till exempel sannolikt att välja denna väg ut i händelse av brand, till skillnad från andra som inte känner till nödutgången/trapphuset.

Simes (1983; 1984; 1985) anknytningsteori kan också användas för att förklara varför människor ofta väljer att utrymma i grupper med andra individer, både med sådana de känner sedan tidigare, men också med för dem (innan branden) okända personer – detta inger en viss trygghet. Särskilt påtaglig är önskan att utrymma med andra personer när till exempel flera medlemmar i en familj vistas i samma brandutsatta byggnad (eller tunnel). Det har därtill påvisats att människor som är separerade från sina familjemedlemmar är benägna att agera snabbt, även på inledningsvis få, osäkra och i vissa fall motstridiga brandsignaler (med referens till föregående kapitel). Människor som däremot är tillsammans med sina familjemedlemmar (eller andra personer de känner) avvaktar gärna med att vidta motsvarande åtgärder, kanske på grund av den trygghet som inges av att möta den osäkra situationen tillsammans.

Att anknytningsteorin faktiskt stämmer överens med verkliga beteenden i samband med bränder har vid upprepade tillfällen kunnat påvisas både i tidigare inträffade bränder och i utrymningsförsök (Best & Demers, 1982; Bryan, 1983; Clark County Fire Department, 1981; Kimura & Sime, 1989; Njå, 2016), och den kan användas även i tunnelsammanhang. Eftersom tunnlar för spårbunden trafik är okända för de flesta människor (även om de använder dem för att transportera sig själva så gör de ju detta ombord tåg) kan anknytningsteorin användas för att till viss del förklara och förstå varför människor i stor

<sup>10</sup> Analogt kan anknytningsteorin användas för att förklara varför människor inte väljer att utrymma via andra utrymningsvägar, även om de faktiskt noteras av utrymnande personer i händelse av en brand (Dix, 2010). Dessa andra utrymningsvägar är helt enkelt okända, och det kan därför råda en stor osäkerhet om var de leder.

utsträckning är obenägna att utrymma ett tåg i en tunnel. Anknytningsteorin kan därtill användas för att förstå varför människor, när de väl fattat ett beslut om att utrymma tåget i tunneln, är mer benägna att utrymma till endera av tunnelns mynningar/portaler snarare än de nödutgångar som normalt finns tillgängliga (till exempel i form av tvärtunnlar till anslutande tunnelrör, servicetunnlar eller så kallade räddningskammare), vilket bland annat observerats i en vägtunnelbrand i Australien (Dix, 2010; Johnson et al., 2012) och diskuterats i ett vidare sammanhang av Martens & Jensen (2012). Avslutningsvis kan anknytningsteorin användas för att förklara varför människor i dessa situationer gärna utrymmer tillsammans med andra både kända och okända personer, vilket till exempel var fallet vid tunnelbränderna i Zürich och Baku, där de utrymmande i många fall höll ihop och höll tag i varandra på grund av de rådande omständigheterna (Carvel & Marlair, 2011; Fermaud et al., 1995; Frantzych, 2000; Fraser-Mitchell & Charters, 2005; Martens & Jenssen, 2012; Rohlén & Wahlström, 1996; Shields & Boyce, 2004). Ett liknande beteende observerades även i en norsk vägtunnelbrand i Oslofjordtunneln år 2011, och har av Njå (2016) benämnts road-user solidarity.

### 4.3.4 Social påverkan

Under normala omständigheter påverkar människor varandra och varandras beteenden hela tiden. Att närvaron av andra personer även kan ha betydelse för människors beteende i en brand- och utrymningsituation nämndes kort i föregående kapitel. Detta fenomen brukar kallas för social påverkan och kan ha både positiv och negativ påverkan på ett utrymningsförlopp, i synnerhet i de inledande skedena (i förberedelsefasen).

Grunden till den teori som idag kallas social påverkan (i händelse av brand) grundlades av forskarna Latané och Darley (1968) på 1960-talet. I förhållandevis enkla men innovativa empiriska försök<sup>11</sup> kunde de bland annat konstatera att ensamma personer är mer benägna än personer i grupper att agera på brandsignaler (såsom brandrök). Latané och Darley (1968) kunde också konstatera att enskilda individer inte sällan tar snabba beslut om hur de ska agera på sådana signaler.

Social påverkan kan grovt delas in i två kategorier (Deutsch & Gerard, 1955):

1. normativ social påverkan, och
2. informationell social påverkan.

Normativ social påverkan handlar, som namnet antyder, om normer och rädslan att bryta mot dessa. Generellt vill inte människor agera på ett sätt som betraktas som fel, och personer är ofta rädda att göra bort sig inför andra vilket kan göra det svårt att ta initiativ till utrymning i händelse av brand (särskilt när situationen är otydlig och det till exempel inte är säkert att det brinner). Normativ social påverkan kan till exempel förklara varför människor ibland inte agerar och initierar en utrymning, trots att de mottagit en eller flera signaler om att det brinner (till exempel sett rök eller hört ett utrymningslarm).

Informationell social påverkan handlar istället om hur människor tolkar situationer baserat på andra personers beteende och agerande. I sällskap med andra människor tittar vi på varandras beteende för att få ledtrådar om vad som händer och hur vi själva ska agera, inte minst i otydliga situationer. Om ingen

<sup>11</sup> I försöket deltog studenter vid Columbia University som rekryterats i tron om att de skulle delta i en stor studie om stadsliv. Försökspersonerna kallades till en intervju, men vid ankomsten placerades de i ett mindre väntrum och ombads under tiden att fylla i en enkät. Efter några minuter började dock rummet att rökfyllas, och efter ungefär fyra minuter hade tillräckligt mycket rök trängt in i rummet för att sikten skulle vara kraftigt nedsatt och påverka andningsorganen negativt.



väljer att agera i en utrymningsituation sprids en känsla av att det inte är så allvarligt; det är ju ingen annan som agerar, varför ska jag? På motsvarande sätt kan människor snabbt uppfatta en fara om andra personer börjar röra sig mot utgångarna i en brandsituation.

Som konstaterats ovan kan social påverkan ha både positiv och negativ betydelse för ett utrymningsförlopp, även i vid en brand i en tunnel för spårbunden trafik. Normativ social påverkan kan till exempel fördröja människors agerande, och således förlänga utrymningstiden. I föregående kapitel kommenterades till exempel människor förväntade ovilja att utrymma ett tåg i en tunnel. Denna ovilja, som till viss del kan förklaras av anknytningsteorin, kan även förväntas förstärkas av det faktum att det inte är allmänt accepterat att trycka på en knapp till ett passagerarlarm, dra i ett handtag som uppfattas som en nödbroms eller ett nödöppningshandtag till en tågdörr, eller för den delen att beträda en spårtunnel (med i många fall samma typ av elektriska utrustning som förekommer i driftrum dit endast personer med behörighet har tillträde). Å andra sidan kan informationell social påverkan ha en positiv effekt på människors beteende i en utrymningsituation. Om en person ser att andra personer i dennes närhet förbereder sig eller redan har påbörjat en utrymning så utgör detta en stark och tydlig signal (i tillägg till andra brandsignaler om att något inte står rätt till) om att de själva borde agera. Sådan information kan förväntas bidra till att minska den osäkerhet som är förknippade med de inledande skedena av ett utrymningsförlopp (med referens till vad som beskrivits om beteendesequenser ovan).

### 4.3.5 Panik

Inte sällan beskrivs och förklaras orsaken till att personer skadas och omkommer i bränder och andra olyckssammanhang med termen ”panik”<sup>12</sup>, trots att omfattande forskningsinsatser vid upprepade tillfällen konstaterat att panik nästan aldrig inträffar i dessa sammanhang (Fahy, Proulx, & Aiman, 2009; Proulx & Sime, 1991; Quarantelli, 1954, 1975, 1979; Rogsch et al., 2008; Sime, 1980, 1984). Troliga förklaringar till detta är att allmänheten nog ofta har en mer generös tolkning av begreppet än forskare inom psykologi, och att ”panik” ibland används för att beskriva oro, ångest och stress i samband med onormala och ovanliga situationer. Denna typ av känslouttryckningar kan naturligtvis förväntas i samband med den typ av händelser som bränder symboliserar, men det är tveksamt om detta bör klassificeras som ”panik”. Termen används med andra ord som en förklaring till ett beteende sett från någon annans perspektiv, inte från personen som själv är eller var involverad i händelsen (vars beteende snarare kan beskrivas med hjälp av ovan nämnda teorier).

I akademiska sammanhang används termen ”panik” för att symbolisera akuta och kortvariga sinnestillstånd som präglas av icke- eller antisociala samt icke-/antirationella beteenden. Under vissa omständigheter kan det förväntas att en del personer tillfälligt slutar ta hänsyn till sociala band med andra personer i händelse av en brand, men det har till exempel aldrig observerats att människor medvetet skadat andra personer under ett utrymningsförlopp i samband med en brand. Tvärtom har det vid inträffade bränder snarare det motsatta kunnat påvisas, det vill säga att människor hjälps åt för att ta sig ut i samband med en brand. Det finns heller inga bevis för att människor i samband med bränder okontrollerat och odisciplinerat rusar mot närmaste utgång eller betar sig irrationellt<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Det kan noteras att termen ”panik” tagits bort i den senaste versionen av TSI-SRT (2014), med motiveringen att det inte är en tydlig och faktabaserad term för att beskriva människors beteende.

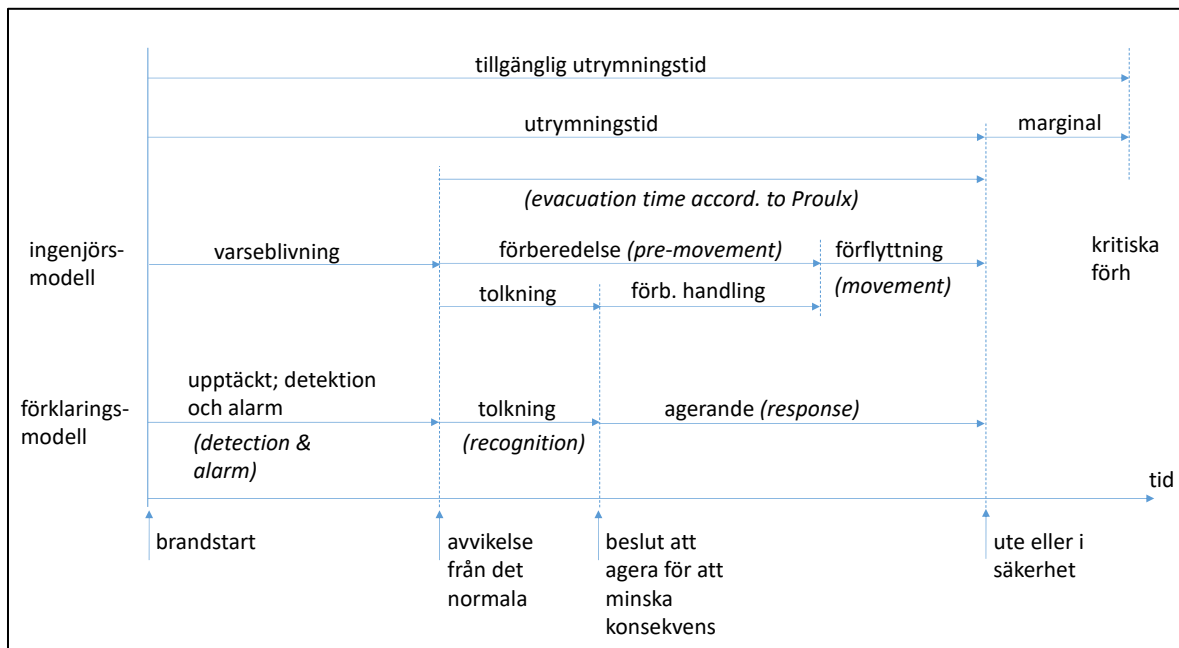
<sup>13</sup> Termen irrationell är i detta sammanhang något olycklig och missvisande eftersom ett beteende kan framstå som irrationellt när det studeras utifrån utan tillgång till samma information som den irrationellt agerande personen hade tillgång till i samband med sitt agerande i den aktuella situationen.

### 4.3.6 Från teoretiska modeller till praktisk tillämpning

Det finns flera fördelar med att tillämpa ovan nämnda teorier och modeller om människors beteende i bränder. De skulle till exempel kunna användas av en olycksutredare av en tunnelbrand för att på ett strukturerat sätt identifiera sekvenser av beteenden under branden/utrymningen för att kunna dra tillförlitliga och valida slutsatser om vad som faktiskt hände. Tillämpningen av dessa teorier och modeller möjliggör med andra ord att en mer nyanserad beskrivning av utrymningsförloppet kan ges, och för den delen utan att termen ”panik” behöver användas i sådana beskrivningar. I förlängningen kan detta förväntas bidra till att minska risken för liknande händelser i framtiden (Beale, 2002), bland annat eftersom nya organisatoriska åtgärder kan implementeras, men också för att kunskapen om vad som hänt i tidigare olyckor kan användas för att påverka utformningen och projekteringen av till exempel brand- och utrymningstekniska installationer vid nybyggnad och andra ändringar av tunnlar.

Tillämpningen av ovan nämnda teorier och modeller kan också på ett mer direkt sätt förväntas underlätta brandskyddsprojektörers arbete med att utforma och verifiera brandsäkerheten i tunnlar. I samband med de utrymningsanalyser som normalt görs för den här typen av anläggningar i syfte att verifiera människors möjlighet att självutrymma tillämpas till exempel vanligen enklare tidslinjemodeller (Proulx, 2008; Frantzich et al., 2016), såsom den i Figur 4-2.

. Med hjälp av dessa modeller jämförs tiden till dess att kritiska förhållanden uppstår till följd av branden (baserat på godtagbara nivåer för kritisk påverkan vid brand kopplat till siktsträcka, temperatur, toxicitet, etc.) med tiden det tar att utrymma för ett antal identifierade brand- och utrymningsförloppsscenarier. För att möjlighet till utrymning av/i en tunnel ska kunna anses vara verifierad måste utrymning kunna ske innan kritiska förhållanden uppstår.



Figur 4-2 Tidslinjemodellen reproducerad från Frantzich et al. (2016).

Som kan ses i Figur 4-2 är ett vanligt sätt att beskriva utrymningsförloppet att dela upp tiden från det att en brand startar till det att alla personer tagit sig till en tillfällig eller permanent säker plats i tre delar:

varseblivningstid (*detection och alarm time* i Figur 4-2), förberedelsetid (*premovement time* i Figur 4-2) och förflyttningstid (*movement time* i Figur 4-2).

Tidslinjen i Figur 4-2 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 ingenjörmodell av utrymning ofta representeras. Anledningen till uppdelningen i en förklarings- och en ingenjörmodell är bland annat att de beräkningsmodeller och simuleringsprogram som idag finns tillgängliga i huvudsak är avsedda att beskriva personers förflyttning och fokuserar på gånghastighet, personflöden genom dörrar, etc. Det gör att ingenjörmodellen av utrymningsförloppet kan användas när utrymningstiden för en tunnel ska analyseras. Samtidigt är den modellen dålig för att beskriva hur utrymning sker. Förklaringsmodellen bygger bland annat på teorin som presenteras av Canter et al. (1980), dock 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 ett exempel kan nämnas att Simes (1983; 1984; 1985) anknytningsteori mycket väl kan inkluderas i beteendesekvansen i förklaringsmodellen.

Beskrivningen av människors beteende utifrån den så kallade ingenjörmodellen bygger alltså på samma delar av beteendesekvansen men har en lite annan uppdelning för att bättre anknyta till sättet som utrymning hanteras på ur ett beräknings- och analysperspektiv vid brandteknisk dimensionering. Det innebär att mycket av resonemangen kring nyttan med olika tekniska system struktureras utifrån ingenjörmodellen för att visa hur dessa system kan påverka de komponenter som vanligen ingår i en analys baserat på den modellen. Tidslinjen i Figur 4-2 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 beteendesekvansen; upptäckt, tolkning och agerande.

## 4.4 Utrymningen av tåg och tunnel

För att utrymningen av en järnvägstunnel ska få en lyckad utgång krävs det att det finns ett samspel mellan den teknik som tunneln och tåget är utrustad med samt de förutsättningar som passagerarna har att kunna hantera en utrymning.

För järnvägstunnlar kommer detta till uttryck i de krav som ställs på tunneln och på de tåg som utnyttjar tunneln. Inom Europa finns således idag ett omfattande regelverk som beskriver kraven för en mängd olika delar av systemet. Detta utgör underlag för en praktisk dimensionering och stora delar av de krav som finns baseras på erfarenheter från inträffade bränder och på den forskning som genomförts på olika håll. De främsta regelverken avser den fysiska utformningen av tunneln men även regelverk för tågens utformning samt hantering av exempelvis personer med funktionsnedsättning är relevanta.

I princip kan tre skeden för utrymning vara av intresse

1. förutsättningar före olyckan
2. utrymning av tåget samt
3. utrymning av tunneln

Till den första kategorin hör exempelvis information till och utbildning av passagerare. I praktiken är detta svårt att hantera då utbildningsinsatserna kan vara svåra att genomföra och påvisa effekt. Inom flyget tillämpas däremot säkerhetsgenomgångar innan avfärd. Andra sätt att informera kan vara med broschyrer i stolsfickan samt information via smartphones exempelvis genom särskilda tågappar.

Utbildning av personal är däremot en väsentlig komponent vilket konstateras i bland annat Kinatader et al. (2013). I Frantzich et al. (2016) ges en kort sammanfattning kring utbildning och kommunikation till personer i en situation liknande den som gäller för tågpassagerare.

Den forskning som presenteras baseras i huvudsak på genomförda fysiska försök. På senare tid har även försök i Virtual Reality (VR) kommit att bli ett viktigt verktyg. För vägtunnlar har en rad olika försök genomförts för att undersöka exempelvis människors beteende och utformning av tekniska system (Kinatader et al, 2014; Kinatader et al., 2015 samt Jensen et al. 2018). Användningen av VR som forskningsverktyg kräver sannolikt ytterligare validering vilket är än mer påtagligt när VR ska användas som ett utbildningsverktyg vilket annars kan vara aktuellt för exempelvis tågpersonal.

## 4.4.1 Utrymning av tåg

Utrymningsstrategin i tunnlar för spårbunden trafik baseras normalt på att tåg, i händelse av brand, antingen ska köras ut ur tunneln eller till närmaste utrymnings- och räddningsplats (till exempel en station) och utrymmas där istället för i tunneln (TSI-SRT, 2014). Det innebär att brand- och utrymningstekniska installationer, liksom styr- och övervaknings samt signalsystem, för att tillgodose möjlighet till utrymning i dessa anläggningar utformas med detta som utgångspunkt. Däremot illustrerar tidigare inträffade tunnelbränder att det inte alltid är möjligt att köra tåget ut ur tunneln eller till den närmaste stationen (se kapitel 4.2 ovan). Därtill kan mer eller mindre riskbaserade analysmetoder användas för att härleda brand- och utrymningsförloppsscenarioer som kan anses representativa och nödvändiga att analysera i vilka utrymning måste ske i tunnelmiljön. En distinktion kan således göras mellan två olika typer av utrymningsscenarioer:

1. Utrymning av tåg i tunnel (alternativt utanför tunnel)
2. Utrymning av tåg på utrymnings- och räddningsplats (till exempel en station) i direkt anslutning till tunnel

Orsaken till behovet av att utrymma ett tåg kan till exempel vara en brand i tågets passagerarutrymme eller i tågets underrede, alternativt en brand i ett annat tåg som också trafikerar tunneln. En annan orsak kan vara att det uppstått en brand i själva tunneln, till exempel i en teknisk installation, upplag eller skräp, alternativt i ett till tunneln anslutande teknikrum, såsom ett driftrum.

### 4.4.1.1 Information och utrymningsmeddelanden

Som konstaterats i föregående avsnitt (se kapitel 4.3 ovan) präglas inledningsskedet av en brand normalt av stora osäkerheter. I den mån information om att det faktiskt är tillgänglig för de som påverkas av branden kan den, i synnerhet på ett tåg i en tunnel, förväntas vara både bristfällig och motstridig. Majoriteten av personerna ombord ett tåg kan förväntas sakna visuell kontakt med en brand i det fall det brinner i tåget, och i andra fall kanske ingen faktiskt ser branden som uppstått. En person som känner röklukt ombord ett tåg som fortfarande kör (eller tillfälligt har stannat) kopplas sannolikt inte direkt till en brand som utgör en direkt fara för ens egen eller andras säkerhet, hälsa eller liv, utan misstas kanske istället för något annat (såsom lukten av varma bromsar). Därför är det också osannolikt att människor på egen hand kommer att fatta snabba och korrekta beslut om åtgärder som är lämpliga att vidta i sådana situationer. Kombinationen av ovan och de unika omständigheter som präglar tunnelbränder (till exempel att brandrök snabbt kan förväntas fylla en tunnel) är informationsbehovet inledningsvis stort. Men hur kan och bör information om vad som hänt kommuniceras för att underlätta människors möjligheter att fatta rätt beslut i dessa situationer?

Forskning om utrymningslarm och meddelanden i händelse av brand har bland annat visat att traditionella larm, såsom larmklockor eller sirener, inte alltid tas på allvar om de inte kompletteras med informativa, talade meddelanden eller instruktioner från personal (Proulx, 2003; Proulx & Sime, 1991). Någon större risk för att den här typen av utrymningsmeddelanden skulle orsaka ”panik” föreligger inte (se avsnitt 4.3.5 ovan). Flertalet studier har genomförts i syfte att studera hur aspekter såsom meddelandelängd, användningen av förkortningar, specificitet, formuleringar och talformat påverkar människors förmåga att tillgodogöra sig informationen i dessa meddelanden. Som ett exempel kan nämnas att Nilsson (2006) konstaterat att utrymningsmeddelanden inte bör innehålla för mycket information, och att 5–7 meningar eller fraser är lämpligt för de flesta situationer. Utrymningsmeddelanden bör innehålla tre olika delar:

1. Begäran av uppmärksamhet
2. Information om vad som inträffat
3. Instruktioner om vilka åtgärder som ska vidtas

I ett tunnelbrandsammanhang bör det som minst framgå vad det är som har hänt (att en brand inträffat) och vad som förväntas av de som påverkas av händelsen (i form av instruktioner om att till exempel påbörja utrymning) (Fridolf et al., 2013).

För att ytterligare öka sannolikheten för att den förmedlade informationen om vad det är som har hänt, och vad som förväntas av de som befinner sig ombord ett tåg i händelse av en brand, måste informationen vara tydlig, men också sammanhängande (även när helheten betraktas). Det är inte säkert att instruktioner i ett utrymningsmeddelande efterlevs om det samtidigt kommuniceras motstridig information på till exempel trafikinformationsskyltar på ett tåg. Om utrymningsmeddelandet instruerar personer ombord ett tåg att utrymma tåget på grund av brand samtidigt som det via andra tekniska system informeras om att tåget kommer att anlända till nästa station om 2 minuter skapas motstridiga budskap som kan ha en negativ effekt på utrymningsförloppet. Ett annat vanligen förekommande exempel på detta är nödutgångar som är markerade som utrymningsvägar samtidigt som en informationsskylt informerar om att dörren är larmad och inte får användas. Den här typen av motstridig information som riskerar att påverka utrymningsförloppet negativt kan förebyggas genom att utformningen av utrymnings- och andra tekniska installationer som kan förväntas ha en påverkan på utrymningsförloppet utvärderas genom tillämpning av *affordance*-teorin (Gibson, 1978; Hartson, 2003). Exempel på hur detta gjorts i tunnelsammanhang beskrivs nedan (se kapitel 4.4.2.4).

#### 4.4.1.2 Förflyttning från tåg till tunnel

Tidigare forskning i form av i huvudsak empiriska försök kan utnyttjas för att skapa en bild av och förståelse för de förhållande som kommer att prägla utrymningen av ett tåg i en tunnel (utöver nedan beskrivning sammanfattas uppmätta personflöden i avsnitt 4.4.1.8). Speciella omständigheter, utöver branden och dess påverkan på utrymningsförloppet, är framförallt den ofta förekommande vertikala höjdskillnaden mellan tågets golv och tunnelgolvet (om inte en upphöjd gångbana anordnats<sup>14</sup>) och den smala passage som uppstår mellan tåg och tunnelvägg. Detta har bland annat uppmärksamats av Frantzich (2000) i samband med genomförandet av ett utrymningsförsök i Stockholms tunnelbana som involverade 143 försökspersoner. Försökspersonerna fick i försöket utrymma ett tunnelbanetåg i en tunnel, och i samband med detta ta sig ner på tunnelgolvet/makadamen cirka 1,4 m nedanför tågets golv. Passagen var därtill i storleksordningen 1 m bred. Två olika scenarier studerades, och personflödena i respektive tågdörr som användes under utrymningen uppgick till cirka 0,1–0,2 p/s i det första och 0,4–

<sup>14</sup> I TSI-SRT (2014) anges att gångbanan ska vara i jämnhöjd med eller högre än rälsnederkanten.

0,6 p/s i det andra scenariot (med samma försökspersoner). De lägre observerade personflödena i båda scenarierna förklarades av att de utrymmande placerade en stege i vissa dörrar för att underlätta utrymningen. En sådan stege kan vara värdefull för personer med nedsatt rörelseförmåga, men kan alltså samtidigt konstateras påverka personflödeskapaciteten i den dörr den anordnas (och även i spårtunneln på grund av den smala passagen som uppstår mellan tåg och tunnelvägg).

Försök i liknande miljöer har även genomförts av Fridolf (2015), både i laboratoriemiljö och i en riktig tunnel (Fridolf et al., 2014a; Fridolf et al., 2015). I laboratoriemiljön uppmättes förhållandevis höga personflöden, motsvarande cirka 0,5 p/s, mer eller mindre oberoende av variationer av försöksmiljön kopplade till ytbeläggningen i försökstunneln (makadam eller betong), den vertikala höjdskillnaden mellan tågets och tunnelns golv (1,4 eller 0,7 m), förekomsten av en stege i tågdörren, ljusförhållanden (allmänbelysning, nödbelysning eller helt släckt) och särskilda handledare/handtag. Något lägre personflöden kunde, i likhet med Frantzych (2000), observeras när en stege användes för att förbättra de utrymmande personernas möjlighet att ta sig ut ur tåget. I sammanhanget bör nämnas att försökspersonerna bestod av en förhållandevis ung och frisk försöksgrupp som fick upprepa utrymningen flera gånger samt att tågdörren var 1,7 m bred. Dessa siffror bör därför sättas i relation till de som uppmättes i den riktiga tunnelmiljön, med en mer nyanserad försöksgrupp bestående av totalt 135 personer i åldrarna 19–69 år. Då uppmättes personflödena till i genomsnitt 0,17–0,21 p/s. När försökspersonerna i enkätform tillfrågades om upplevda svårigheter omnämnde de bland annat den vertikala höjdskillnaden mellan tåg och tunnelgolv och trängsel i passagen utanför tåget (mellan tåg och tunnelvägg).

#### 4.4.1.3 Påverkan av trängsel utanför tåget

Ovan nämnd köbildning och trängsel har även konstaterats ha påverkan på utrymningsförloppet i andra studier. Att det uppstår trängsel och köbildning beror helt enkelt att personflödeskapaciteten i passagen är lägre än den totala i de anslutande tågdörrarna. Det vill säga, tillströmningen av utrymmande personer till passagen (från tåget) är större än vad utströmningen är (från passagen). Särskilt stort blir problemet när majoriteten eller alla ombord tåget påbörjar sin utrymning mer eller mindre samtidigt. Konsekvenserna av detta har bland annat uppmärksammats av Oswald et al. (2005; 2008; 2011). I samband med ett utrymningsförsök, som visserligen genomfördes utomhus, fick 450 försökspersoner utrymma ett tåg ned till en 0,75 m bred passage 1,15 m nedanför tågets golv. De observerade personflödena uppgick till cirka 0,3 p/s, och Oswald et al. (2005; 2008; 2011) kunde bland annat notera att personer som redan utrymt tåget ned till passagen i större utsträckning gav personer fortfarande ombord tåget företräde på de platser de möttes. Den praktiska konsekvensen av detta beteende var att tåget utrymdes i sekvenser, där tågvaggen närmast tågets front och passagens mynning tömdes först (och den längst bak sist).

#### 4.4.1.4 Upphöjda gångbanor

Utrymningsförsök har även genomförts i tunnelliknande miljöer med upphöjda gångbanor (Ahlfont & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014; Carlson et al., 2017; Carlson et al., 2019). Carlson et al. (2017; 2019) genomförde till exempel ett utrymningsförsök på en tunnelbanestation i Stockholm där de anordnade en konstgjord korridor tänkt att efterlikna en upphöjda gångbana parallell med spåret i en tunnel. I försöket medverkade cirka 110 personer i åldrarna 18–71 år, och personflödeskapaciteten i en tågdörr mättes samtidigt som det befann och förflyttade sig personer i den korridor som anordnats utanför. Personflödet uppmättes till 0,62 p/s när korridoren utanför var 1,05 m bred, och 1,00 p/s när den var 1,2 m bred. Det saknas detaljerade information om hur tätt personerna

gick på gångbanan utanför tåget, men baserat på bilder från försöket framstår det som att den varit lägre än i ovan nämnda försök.

#### 4.4.1.5 Förflyttning från tåg till plattform

Baserat på erfarenheterna som dragits i tidigare genomförda försök kan det konstateras att utformningen av den passage till vilka utrymmande personer utrymmer från ett tåg kan förväntas ha stor betydelse för hur snabbt det går att utrymma ett tåg i en tunnel. Ovan angivna personflödeskapaciteter kan i detta sammanhang sättas i relation till motsvarande siffror när utrymning sker till en plattform utan begränsad bredd. Capote et al. (2011; 2012a; 2012b) uppmätte till exempel genomsnittliga personflöden motsvarande 0,57 p/s när utrymning skedde av ett tåg till en plattform i en undermarksstation. Möjligen skulle det finnas en skillnad mellan att utrymma i en tunnel och vid en station givet att plattformen har ungefär samma utformning.

Här begränsades alltså inte personflödet av passagens smala bredd och personer i passagen. Andra liknande försök har genomförts av Galea et al. (2013; 2014) i modellvaliderande syfte och observerade då personflöden i storleksordningen 0,86–0,87 p/s. Ingen större skillnad kunde konstateras mellan scenarier då allmän- respektive endast nödbelysning användes. I tillägg till detta bör nämnas den fallstudie som Norén och Winér (2003) genomfört i vilken de observerade personer som gick av och på tåg på olika tågstationer. En sammanfattning av resultatet från deras studie, utöver ovan nämnda, presenteras i avsnitt 4.4.1.8.

#### 4.4.1.6 Ursparning

I sammanhanget ska även nämnas att det gjorts försök på utrymning av välta tåg. Galea et al. (2000) genomförde till exempel ett utrymningsförsök i vilket försökspersoner fick utrymma ett välvt tåg som låg på sidan. Försöken genomfördes både med och utan konstgjord rök. Personflödet genom dörren (som mätte 0,8 x 1,96 m<sup>2</sup>) uppmätte still 0,08 p/s med rök, respektive 0,15 p/s utan rök.

#### 4.4.1.7 Personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga

Mycket av den genomförda forskningen om utrymning av tåg har inriktats på utrymning av människor i största allmänhet, och inte så mycket på vilka möjligheter personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga, äldre, barn, etc., har att utrymma under motsvarande förhållanden. Samtidigt kan det, mot bakgrund av de prognoser som gjorts av FN, WHO och OECD, antas att andelen personer med någon form av rörelse- eller orienteringsförmåga, äldre och kraftigt överviktiga personer i största allmänhet kommer att öka i framtiden (UN, 2019a; 2019b; 2019c; WHO, 2011a; 2011b; OECD, 2017). Det vidtas därtill åtgärder i andra anläggningsdelar, till exempel på stationer, för att göra dem mer tillgängliga (bland annat mot bakgrund av ratificeringen av FN:s konvention om rättigheter för personer med funktionsnedsättning (United Nations, 2006)). Sammantaget innebär detta utmaningar för möjligheten till utrymning i allmänhet, och av tåg i tunnlar i synnerhet. Om tågutrymning måste ske i en tunnel kan den vertikala höjdskillnaden förväntas utgöra en sådan utmaning (Fridolf et al., 2012). I en intervjustudie med äldre personer samt personer med någon form av funktionsnedsättning angavs förekomsten av en steg som en förutsättning för att överhuvudtaget kunna komma ut ur tåget utan hjälp från medpassagerare om inte en upphöjd gångbana var anordnad i tunneln. Andra typer av installationer, såsom handtag i anslutning till dörren föreföll också som en viktig typ av installation för att öka möjligheterna till tågutrymning för dessa personer.

En grundläggande fråga är alltså hur den så kallade självutrymningsprincipen ska kunna uppfyllas för samtliga personer, även de med kraftigt nedsatt rörelseförmåga (till exempel rullstolsburna). Det framstår som särskilt svårt att tillgodose denna princip för samtliga personer om inte en upphöjd gångbana anordnas i spårtunnelns trafikutrymme. Samtidigt är en sådan installation förknippad med andra egenskaper som, i vissa fall, har påvisats ha negativ effekt för ett utrymningsförlopp sett till helheten. Det har till exempel argumenterats för att utrymmande personer genom att utrymma på en upphöjd gångbana kommer närmare ett eventuellt brandgaslager, och på så vis exponeras för kritiska förhållanden tidigare än om de istället utrymt längre ner i tunneltvärsnittet (Åhnberg et al., 2016). I sammanhanget bör det dock noteras att den typen av tvåzonsskiktning som normalt uppstår i samband med till exempel lägenhetsbränder inte kan förväntas i samma utsträckning i en lång tunnel eftersom brandgaserna ganska snabbt kommer att kylas mot den omslutande konstruktionen (som funktion av ett ökat avstånd från brandkällan) (Ingason et al., 2015).

En möjlig lösning är att samhället helt enkelt får acceptera att det inte är rimligt att i samtliga fall ställa samma krav på frångänglighet som på tillgänglighet, bland annat med hänsyn till de stora konsekvenser detta skulle få för byggnads- och tunnelutformningen i största allmänhet och de stora kostnadsökningar som det skulle innebära. Ett sådant ställningstagande gjordes till exempel i samband med revideringen av de svenska byggreglerna år 2011 (Boverket, 2011). Motsvarande ställningstagande skulle i ett tunnelutrymningssammanhang kunna innebära att möjligheten till utrymning vid brand för personer med nedsatt rörelse- eller orienteringsförmåga anordnas från tåget till närmaste utrymningsväg (och därifrån vidare till det fria) i den byggda miljön. Assistans från medpassagerare skulle således vara en förutsättning för möjlighet till utrymning av vissa personer med i synnerhet nedsatt rörelseförmåga. I praktiken innebär utformningen av brandskyddet i så fall att självutrymningsprincipen (som vanligt) uppfylls för alla på stationer, och för alla som på egen hand kan utrymma ett tåg i spårtunnlar. Ett ställningstagande som ligger i linje med vad som anges i TSI-LOC&PAS (2014): Det är tillåtet att beakta att funktionshindrade passagerare får hjälp av andra passagerare eller personal. Men det är dessutom fullt tillåtet enligt regelverket att rullstolsburna utryms utan sina rullstolar.



#### 4.4.1.8 Sammanfattning av dokumenterade personflöden i empiriska studier

I Tabell 4-1 sammanfattas den forskning som genomförts om i huvudsak människors möjligheter att utrymma ett tåg i en tunnel.

Tabell 4-1. Sammanfattning av genomförda utrymningsförsök och fallstudier kopplat till tågutrymning. Reproducerad från Fridolf (2015) med anpassningar och tillägg baserat på senare genomförd forskning.

Referens	Passagens bredd [m]	Tågdörrens bredd [m]	Vertikalt avstånd [m]	Personflöde [p/s]	Kommentar
Frantzich (2000)	~1	1,2	1,4	0,1-0,2	Utrymningsscenario 1
	~1	1,2	1,4	0,4-0,6	Utrymningsscenario 2 (med samma försökspersoner)
Fridolf et al. (2014a)	0,85	1,7	1,4	0,33	Betong, 1,4 m, stege, allmänbelysning
	0,8	1,7	1,4	0,49	Betong, 1,4 m, allmänbelysning
	0,85	1,7	1,4	0,50	Betong, 1,4 m, förstärkt belysning
	0,85	1,7	1,4	0,49	Betong, 1,4 m, allmänbelysning, handtag
	0,85	1,7	0,7	0,52	Betong, 0,7 m, allmänbelysning, handtag
	0,85	1,7	0,7	0,50	Betong, 0,7 m, allmänbelysning
	0,85	1,7	0,7	0,49	Betong, 0,7 m, förstärkt belysning
	0,85	1,7	1,4	0,46	Betong, 1,4 m, allmänbelysning
	0,85	1,7	1,4	0,39	Betong, 1,4 m, fallerande belysning
	0,85	1,7	1,4	0,45	Makadam, 1,4 m, stege, allmänbelysning
	0,85	1,7	1,4	0,51	Makadam, 1,4 m, allmänbelysning
	0,85	1,7	1,4	0,50	Makadam, 1,4 m, förstärkt belysning
	0,85	1,7	1,4	0,47	Makadam, 1,4 m, allmänbelysning, handtag
	0,85	1,7	0,7	0,52	Makadam, 0,7 m, allmänbelysning, handtag
	0,85	1,7	0,7	0,54	Makadam, 0,7 m, allmänbelysning
	0,85	1,7	0,7	0,53	Makadam, 0,7 m, förstärkt belysning
	0,85	1,7	1,4	0,50	Makadam, 1,4 m, allmänbelysning
0,85	1,7	1,4	0,50	Makadam, 1,4 m, fallerande belysning	
Fridolf (2015); Fridolf et al. (2015)	~1	1,4	1,4	0,18	Tågdörr 1
	~1	1,4	1,4	0,17	Tågdörr 2
	~1	1,4	1,4	0,21	Tågdörr 3

Referens	Passagens bredd [m]	Tågdörrens bredd [m]	Vertikalt avstånd [m]	Personflöde [p/s]	Kommentar
Oswald et al. (2005; 2008; 2011)	0,75 m	1,3	1,15	0,25	-
	Obegränsad	1,3	0,65-1	0,9	-
Carlson et al. (2017; 2019)	1,05	1,4	0	0,62	-
	1,20	1,4	0	1,00	-
Capote et al. (2011; 2012a; 2012b)	Obegränsad	0,81	0	0,57	-
Galea et al. (2013; 2014)	Obegränsad	-	0	0,86	Allmänbelysning, medelvärde baserat på 4 försök med samma försökspersoner
	Obegränsad	-	0	0,87	Nödbelysning, medelvärde baserat på 4 försök med samma försökspersoner
Norén och Winér (2003)	Obegränsad	1,07	0,30	1,00	Intercity-tåg (en våning)
		1,07	0,30	0,68	
		1,37	0,50	0,95	
		1,27	0,30	0,79	Intercity-tåg (två våningar)
		1,40	0,30	1,14	
		1,27	0,30	1,07	
		1,27	0,70	0,73	
		0,88	0,30	0,76	
		0,77	0,30	0,74	Lokaltåg
		0,73	0,30	0,48	
		1,27	0,30 / 0	0,72	
		1,27	0,30	0,44	
0,90	0,30	0,54	Fjärrtåg		
1,20	0	1,59	Tunnelbanetåg		
Galea och Gwynne (2000)	N/A	-	0	0,08	Vält tåg, konstgjord rök
		-	0	0,15	Vält tåg, ingen rök

## 4.4.2 Utrymning av tunnlar

När personer som befinner sig ombord ett tåg i en tunnel väl tagit beslutet att utrymma tåget, och lyckats göra det trots de svårigheter som omnämndes i föregående kapitel (se ovan), måste inledningsvis ett beslut fattas om åt vilket håll de ska gå. I princip finns bara två val att göra: att utrymma upp- eller nedströms branden, men även om antalet alternativ är få kan det förväntas uppstå meningsskiljaktigheter och diskussioner om vad som utgör det lämpligaste valet (Frantzich, 2000). Det kan också antas att det här beslutet kommer att tas av de första utrymmande, och att efterföljande sedan måste följa det personflöde som uppstår i passagen eller på gångbanan utanför tåget (på grund av den förväntat begränsade bredden). Faktorer såsom brandens placering och rådande vindförhållanden kan antas påverka detta val. Det kan även instruktioner från personal, såsom konduktörer eller tågförare. Här ligger dock en svårighet att på ett kort, koncist och tydligt sätt förmedla vad som utgör den lämpligaste utrymningsriktningen. En sådan instruktion skulle till exempel kunna relateras till tågets körriktning, men det är inte säkert att alla passagerare kommer ihåg åt vilket håll tåget körde när det väl tvingades stanna i tunneln. Avslutningsvis kan förekomsten av hänvisningsskyltar för tunneln, kompletterade med piktogram och avståndsangivelser till närmaste utrymningsväg, som vanligen förekommer i spårtunnlar (och som kravställs i TSI-SRT (2014)) bidra till underlag för beslut om vägval.

Den efterföljande förflyttningen till en utrymningsväg eller tillfällig säker plats kan därefter kan därefter delas in i två kategorier: förflyttningen i passagen eller på gångbanan utmed tåget, och förflyttningen i tunneln efter det att tåget passerats. Aspekter som i synnerhet kan förväntas påverka den sistnämnda delen är förekomsten av rök liksom brand- och utrymningstekniska installationer, såsom utrymningsbelysning och hänvisningsskyltar för utrymning. Slutligen kan utformningen av förekommande utrymningsvägar i tunnelmiljön förväntas ha påverkan för om en utrymmande person kommer att vilja använda utrymningsvägen.

### 4.4.2.1 Förflyttning utmed tåget

I tidigare nämnt försök som genomfördes av Oswald et al. (2005; 2008; 2011) fick försökspersonerna utrymma ett tåg till en gångbana 1,15 meter nedanför tåget. Gångbanans bredd uppgick till 0,75 meter, men i denna bredd inkräktade en ledstång 0,1 meter. Underlaget utgjordes av jämna betongplattor. I försöket dokumenterades ett specifikt personflöde vid tågets ena ände, närmare bestämt den de utrymmande försökspersonerna passerade, motsvarande 0,62–0,72 p/s i genomsnitt. En begränsning med försöket är att det genomfördes i en simulerad tunnelmiljö utomhus, men scenariot har trots det så många likheter med den situation som kommer att uppstå om människor tvingas utrymma ett tåg i en tunnel att den anses tillämpbar.

Resultatet kan jämföras med det försök som Fridolf et al. (2015) genomförde i Stockholms tunnelbana. I försöket, som genomfördes nattetid mellan stationerna Rinkeby och Tensta, utrymde försökspersonerna ett tunnelbanetåg ner på en smal yta mellan tunnelvägg och tåg motsvarande ca. 0,6–1 meter (avståndet varierade längs med tåget), varefter de tog sig till en säker plats ca 200 meter från tåget. På motsvarande sätt som Oswald et al. (2008, 2005, 2011) dokumenterades personflödet vid tågets ena ände och dokumenterades till i genomsnitt cirka 0,6 p/s. Det något lägre personflödet (i förhållande till försöket som genomfördes av Oswald et al. (2008, 2005, 2011)) skulle möjligen kunna förklaras av att färre personer deltog i försöket (vilket resulterade i en lägre persontäthet) och att försökspersonerna förflyttade sig på makadam istället för en hårdgjord betongyta.

Högre personflöden har rapporterats från försök genomförda på utmed tåg på upphöjda gångbanor (Carlson et al., 2017; 2019), och då i relation till gångbanans bredd, se Tabell 4-2. Det är inte klarlagt vad detta beror på, men det skulle möjligen kunna ha att göra med skillnader i försöksupplägg. I förhållande till ovan nämnda försök genomfördes det senare på en tunnelbanestation med bra belysningsförhållanden, en bra och jämn ytbeläggning på golvet (som utgjordes av plattformen) och utan förekomsten av rök. Det är faktorer som möjligen skulle kunna bidra till förbättrade förflyttningshastigheter i största allmänhet, och således också högre personflöden.

Tabell 4-2. Dokumenterade personflöden i samband med ett utrymningsförsök i Stockholms tunnelbana (Carlson et al., 2017; 2019).

Gångbanans bredd [m]	Personflöde [p/s]	
	Medelvärde	Spridning
1,2	1,58	1,00–2,00
1,05	1,36	1,00–2,00
0,9	1,06	0,80–1,40

I tidigare genomförda studier har i huvudsak personflöden studerats och mätts. Ett undantag utgörs av Frantzich (2000) försök i Stockholms tunnelbana där även de utrymnande försökspersonernas gånghastigheter dokumenterades. Längs med tåget uppmättes gånghastigheter i intervallet 0,9–1,1 m/s vid förekomsten av lätt rök, och 0,8–0,9 m/s vid förekomsten av tät rök och belysning endast från tågets lampor i vagnen.

I brist på empiriska studier kan ett annat alternativ vara att jämföra scenariot med utrymning utmed ett tåg vid utrymningen av en vanlig korridor. Liknelsen är naturligtvis haltande på flera punkter, men det scenariot har gemensamt med en vanlig korridor är att utrymnande individer behöver förflytta sig genom ett område med fysiska hinder/avgränsningar på båda sidor av utrymningsvägen. I fallet med passagen/gångbanan i en tunnel utgörs dessa hinder på ena sidan av tunnelväggen och på andra sidan av tunnelbanetåget. Givet denna liknelse kan till exempel den hydrauliska modell som redovisas i SFPE-handboken användas för att uppskatta ett maximalt personflöde (Gwynne & Rosenbaum, 2016). Med ett antagande om att en eventuell ledstångs ytterkant inte sticker ut mer än drygt 10 cm från tunnelväggen kan det maximala personflödet då beräknas till ca. 0,5 och 1 p/s för en gångbana med 0,8 respektive 1,2 m bredd. I sammanhanget är det då viktigt att komma ihåg att dessa uppskattningar baseras på forskning om människors förflyttning i vanliga byggnader, på jämna underlag och under normala belysningsförhållanden (det vill säga, inte i tunnlar).

#### 4.4.2.2 Förflyttning i rökfri tunnel

Människors förflyttning i tunnelns trafikutrymme när tåget väl har passerats kan i stor utsträckning förväntas påverkas av i vilken utsträckning rök förekommer. Andra aspekter, såsom rådande belysnings- och ljusförhållanden och förekomsten av tekniska installationer (till exempel handledare) är andra exempel som kan förväntas påverka människors möjligheter att både orientera och förflytta sig i tunneln. I nedan delar blandas rapporterade erfarenheter från både väg- och järnvägstunnlar. Anledningen till detta är att miljön är och framförallt kan förväntas upplevas på ungefär samma sätt. De huvudsakliga skillnaderna mellan dessa trafikslag består i huvudsak i förväntade beteenden innan utrymningen påbörjas.

I det försök som genomfördes av Frantzich (2000) uppmättes försökspersonernas gånghastighet till i storleksordningen 0,7–1,4 m/s (genomsnittliga värden beroende på belysningsförhållanden).

Något högre gånghastigheter verkar ha noterats på de platser där nödbelysning var anordnad, men i övrigt kan inga större skillnader noteras som en funktion av varierande siktsträcka (tunn/tät rök). Vid sämre till obefintliga belysningsförhållanden kunde det konstateras att flera försökspersoner snubblade på det ojämna underlaget (makadamen) och att flera valde att hålla varandras händer, se Figur 4-3. Utrymmande personers förmåga att förflytta sig snabbt påverkades alltså både av möjligheterna de hade att orientera sig i tunneln, och av underlaget som de gick på. Frantzich (2000) kunde också notera att gånghastigheten tenderade att öka i takt med att utrymningen fortgick, kanske för att de utrymmande försökspersonerna vände sig vid miljön, och att många anpassade sin egen gånghastighet till den långsammaste personens.



Figur 4-3. Bilder från utrymningsförsök i tunnelbanan i Stockholm med släckt belysning.

Uppmätta gånghastigheter i Frantzichs (2000) försök kan jämföras med de som rapporterades av Kynaston (1997) efter genomförda utrymningsförsök i Hong Kongs tunnelbana, närmare bestämt 0,8 m/s. De kan också jämföras med de mätningar som gjordes av Fridolf et al. (2015) i samband med det senare försöket i Stockholms tunnelbana. Då uppgick gånghastigheten till 1,1–1,2 m/s, och föreföll snarare öka med ökad förflyttningssträcka i tunneln. Även här förekom dock vissa upplevda svårigheter under förflyttningen, bland annat på grund av att underlaget utgjordes av ojämn makadam. En del av försökspersonerna valde därför helt sonika att gå på de betongslipers som anordnas mellan rälsen.

Förflyttningshastigheter på upphöjda gångbanor har i huvudsak uppmätts i två olika försök. I ett laborieförsök ingick bland annat detta som en delmängd av undersökningen, och i Tabell 4-3 redovisas såväl uppmätta gånghastigheter som personflöden på en upphöjd gångbana som funktion av dess bredd (Ahlfont & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014). Som kan ses ökade den genomsnittliga gånghastigheten ökade med gångbanans bredd, men det bör noteras att försökspersonerna deltog/upprepade försöket flera gånger, varför inläringseffekten kan ha påverkat resultatet. Siffrorna kan jämföras med den ovan nämnda och liknande studien som senare genomfördes i Stockholms tunnelbana (Carlson et al., 2017; 2019). I den senare uppmättes lägre förflyttningshastigheter, något som kan ha att göra med en bättre demografisk spridning bland försökspersonerna, att rullstolsburna ingick i samma försök och att ”störande” moment, såsom utrymmande personer från ett tåg, påverkade förflyttningen på gångbanan.

Att förflytta sig på en upphöjd gångbana i en tunnel kan upplevas som obehagligt och/eller osäkert på grund av höjdskillnaden mellan gångbanans golv och spårtunnelns golv. Svar som lämnades i en enkätundersökning av försökspersonerna i ovan nämnt laborieförsök antyder att det upplevda obehaget avtog med ökande gångbanabredd (Ahlfont & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014). Vid bredden 0,75 m uppgav 56 % av de som deltog i enkätstudien att de inte upplevde något obehag på grund av höjdskillnaden, vid 0,9 m bredd

uppgav 83 % att de inte upplevde något obehag och vid 1,35 m bredd svara 98 % att de inte upplevde obehag till följd av höjdskillnaden. Enkätsvaren avseende osäkerhet följer samma trend. Vid 0,75 m gångbanabredd uppgav 85 % av de som deltog i enkätstudien att gångbanan var fullt tillräcklig att gå på. Försökspersonerna angav också att de för samtliga gångbanabredder förflyttade sig försiktigare än i normala fall p.g.a. höjdskillnaden ner till marken, dock med ett linjärt avtagande samband med ökande gångbredd. I samma försök undersöktes även effekterna av olika tekniska hjälpmedel, såsom en handledare och en kilformad kantlist fäst utmed gångbanans ytterkant (mot spårområdet). Det kunde konstateras att gånghastigheter och personflöden var relativt oberoende av förekomsten av dessa installationer, däremot upplevdes de som positiva av de utrymmande försökspersonerna:

- 11 personer uttryckte att närvaron av en handledare var positiv, 8 personer tyckte inte att den gjorde någon skillnad och 2 personer angav att den hade en negativ inverkan, eftersom den inkräktade på gångbanans bredd.
- 13 personer tyckte att det kändes säkrare då gångbanan försågs med kantlist, 5 personer märkte ingen skillnad och 2 personer tyckte att gångbanan upplevdes bredare med kantlist. 2 personer angav att det kanske inte var kantlisten i sig som gjorde att det kändes säkrare, utan det faktum att kanten syntes bättre.

Tabell 4-3. Uppmätta gånghastigheter och personflöden i samband med försök på upphöjda gångbanor (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014; Carlson et al., 2017; Carlson et al., 2019).

Gångbanans bredd [m]	Gånghastighet [m/s]	Personflöde [p/s]	Kommentar
0,60	1,40	0,93	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
0,75	1,34	1,02	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
0,8	-	0,84	Fältförsök (Carlson et al., 2017; 2019)
0,90	1,40	1,16	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
1,05	1,53	1,36	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
1,05	-	1,00	Fältförsök (Carlson et al., 2017; 2019)
1,20	1,61	1,63	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
1,2	-	1,22	Fältförsök (Carlson et al., 2017; 2019)
1,35	1,62	1,82	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)
1,35 <sup>15</sup>	1,16	1,87	Laboratorieförsök (Ahlfon & Vermina Lundström, 2012; Vermina Lundström et al., 2014)

<sup>15</sup> I detta försök ingick två rullstolsburna försökspersoner.

### 4.4.2.3 Förflyttning i rökfylld tunnel

En stor skillnad mellan att utrymma i en rökfylld tunnel i förhållande till i en rökfylld är brandröken kan förväntas påverka både möjligheterna till orientering och förflyttning. Irriterande brandrök kan till exempel förväntas påverka såväl luftvägar som ögon negativt, vilket i sin tur kan leda till svårigheter att se och att röra sig med samma ohindrade gånghastighet som annars (Purser & McAllister, 2016). Därtill kan en nedsatt siktsträcka förväntas medföra att personer rör sig försiktigare och i förlängningen långsammare än i rökfri miljö (Fridolf et al., 2016; 2019). Forskning på människors förflyttning i rökfyllda miljöer har historiskt sett varit förhållandevis begränsad men på senare år kompletterats med nyare studier och också stöd rörande hur den empiriskt framställda datamängden kan beskrivas och representeras i praktiska sammanhang, till exempel vid verifieringar av möjligheten till utrymning. Av skäl kopplade till forskningsetik och risker för försökspersoner har de senare dock fått utföras i miljöer med milt irriterande eller inte alls irriterande konstgjord rök.

De första försöken som studerade människors förflyttning i rökfyllda miljöer genomfördes i Japan (Jin, 1978; Jin, 1981; Jin et al., 1989). Analysen av dessa identifierade en korrelation mellan människors gånghastighet och siktsträcka i rökfyllda miljöer, vilket i korthet innebär att människors gånghastighet minskar med minskande siktsträcka. Detta har också kunnat påvisas i efterföljande studier, både med irriterande och icke-irriterande rök (Akizuki et al., 2007; Frantzich & Nilsson, 2003; Fridolf et al., 2013; Fridolf & Frantzich, 2015; Fuji et al., 2015; Seike et al., 2016). Tillsammans med resultaten från senare genomförda försök, varav många i tunnelsemiljöer, kan följande huvudsakliga slutsatser dras<sup>16</sup> (Jin, 1976; Jin, 1978; Jin, 1997; Boyce, 1985; Jensen, 1993a; Jensen, 1993b; Heskestad & Schmidt Pedersen, 1998; Heskestad, 1999; Frantzich, 2000; Frantzich & Nilsson, 2003; Frantzich & Nilsson, 2004; Norén & Winér, 2003; Boer & Withington, 2004; Fridolf, 2013; Fridolf, 2015; Fridolf et al., 2013; Fridolf et al., 2014b):

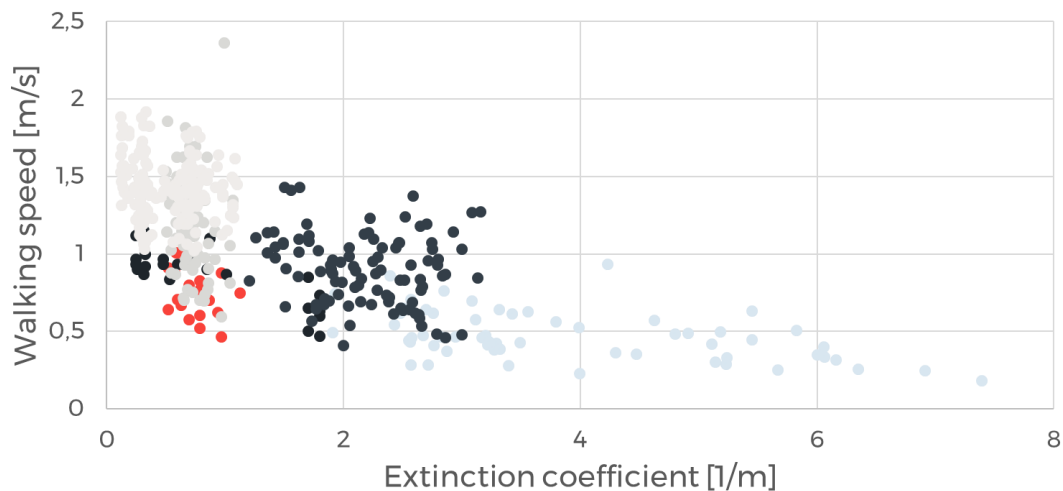
- Människors förflyttningshastighet i miljöer med mycket rök är jämförbar med förflyttningshastigheten i totalt mörker (utan rök).
- I rök rör sig människor långsamt och försiktigt, inte sällan med armar och händer utsträckta framför sig som skydd, för att identifiera hinder framför dem och/eller för att använda väggen om vägledning.
- Lokalkännedom har marginell betydelse på gånghastigheten i mörka (rökfria) lokaler. Förflyttningshastigheten verkar dock påverkas i positiv riktning av en längre exponering i miljön, till exempel vid längre förflyttning i tunnel.
- Ett ojämnt underlag eller en lutning upp till 10 % påverkar inte människors gånghastighet i rökfyllda miljöer. Inte heller i rökfri miljö har tunnelltutningen haft någon påverkan på människors gånghastighet.
- Variationer i belysningsnivå påverkar inte människors förflyttningshastighet i rökfyllda miljöer, åtminstone inte över 3 lux; mellan 0,3–3 lux har ett svagt linjärt positivt samband påvisats. Belysningens förekomst är viktigare än styrkan på ljuset. Nivån på belysningen är dock av sekundär betydelse. Det viktigaste är att det åtminstone finns något (till exempel ljuspunkter) att kunna orientera sig efter.
- Människors gånghastighet i rökfyllda miljöer påverkas sannolikt i stor utsträckning av väggarnas utformning; skillnader i utformningen har möjligen större betydelse än skillnader i röktätheten när siktsträckan alltfjämt är dålig.

<sup>16</sup> Huvudsakligen reproducerade från Fridolf et al. (2016).

- Vid utrymning av många människor i en tunnelmiljö påverkar långsamtgående övrigas förflyttningshastighet.

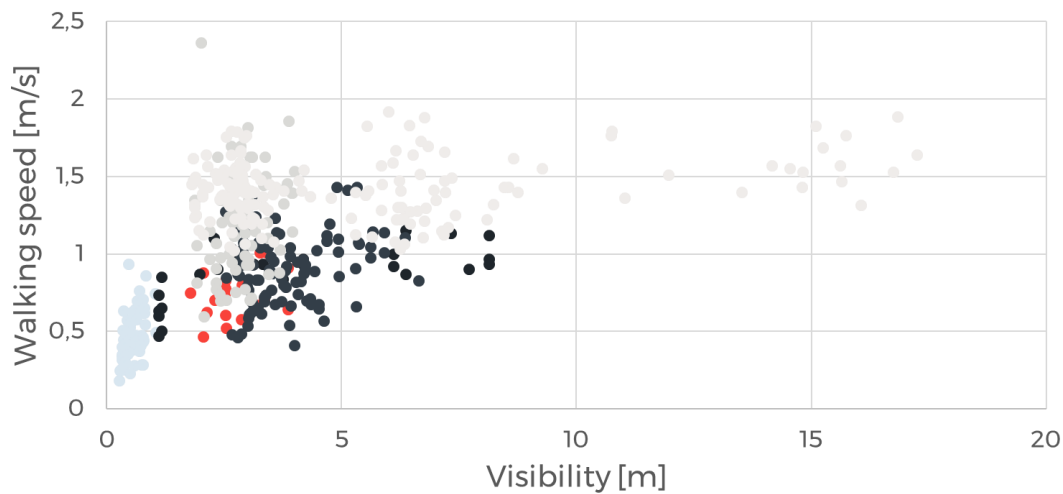
Empiriska försök som genomförts i rökfyllda tunnlar, alternativt rökfyllda tunnelmiljöer, antyder att människors gånghastighet i allmänhet kan förväntas ligga i intervallet 0,2–2 m/s (Fridolf et al. 2016; 2019). Intervallet kan jämföras med rapporterade förflyttningshastigheter i samband med inträffade tunnelbränder, såsom den i Gudvanga i Norge år 2013 i vilken en brand inträffade i en lastbil med omfattande rökspridning som följd (SHT, 2015). Vittnesmål från både utrymmande och räddningstjänstens personal gör gällande att sikten var väldigt dålig, och att siktsträckan på vissa platser varierade mellan 0–2 meter. Samtidigt visar olycksutredningen att de utrymmande, som i vissa fall utrymt i mellan 30 till 90 minuter, gjort det med en genomsnittlig gånghastighet motsvarande 5 km/h, alltså 1,4 m/s.

I Figur 4-4 redovisas en sammanställning av den data som samlats in vid flera olika försök redovisat som en funktion av en så kallad dämpningskoefficient. Genom en ett enklare matematiskt samband kan den senare storheten översättas till en siktsträcka till reflekterande föremål, och då ser sambandet ut såsom redovisas i Figur 4-5. Rekommendationer om hur denna datamängd kan användas för att beskriva och representera människors förflyttning i rökfyllda miljöer redovisas av Fridolf et al. (2016) och kommenteras inte ytterligare i denna rapport.



Figur 4-4 Sammanställning av människors uppmätta gånghastigheter som funktion av rådande dämpningskoefficient. Reproducerad från Fridolf et al. (2016).





Figur 4-5 Sammanställning av människors uppmätta gånghastigheter som funktion av rådande siktsträcka (omräknad från dämpningskoefficient). Reproducerad från Fridolf et al. (2016).

#### 4.4.2.4 Utrymningsstödjande tunnelinstallationer

Hänvisningsskyltar för utrymning i form av belysta eller genomlysta piktogram kombinerade med avståndsangivelser till närmaste utrymningsväg har visat sig ha positiv påverkan på människors möjligheter till utrymning i såväl rökfria som rökfyllda tunnlar (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013; 2015). I de inledande skedena av en utrymning kan de förväntas bidra med värdefull information om åt vilket håll utrymningen ska ske. I senare skeden kan den bidra till att utrymmande personer inte av misstag passerar en utrymningsväg, till exempel i rökfyllda miljöer, eller att den faktiskt används. I tunnlar där utrymning kan ske på båda sidor av tunneln bör sådana skyltar anordnas på båda sidorna<sup>17</sup> (Fridolf et al., 2013; Fridolf & Frantzich, 2015). På den sida där utrymningsvägarna inte är anordnade bör därtill särskilda skyltar anordnas mittemot utrymningsvägarna för att uppmärksamma utrymmande personer på att de måste korsas trafikutrymnet för att nå till utrymningsvägen.

Ledstänger är ett annat exempel på en särskilt uppskattad anordning som kan förväntas underlätta framförallt förflyttning men även orientering vid utrymning av tunnlar (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013) och som också krävs i TSI-SRT (2014). Som nämnts ovan kan utrymmande personer förväntas följa väggar eller motsvarande med sina händer i mörka eller rökfyllda miljöer. Anordnandet av en ledstång kan i detta sammanhang bidra till en minskad osäkerhet och en ökad förflyttningshastighet eftersom de (i förhållande till miljöer utan ledstång) får en kontinuerlig handledare att följa. Utformas den därtill med tydliga avbrott eller motsvarande, till exempel i närheten av utrymningsvägar, kan den bidra till ökade möjligheter till orientering.

Belysning är ett tredje exempel på en viktig tunnelinstallation som kan förväntas bidra till ökade möjligheter till utrymning, i synnerhet i rökfyllda miljöer (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013; Fridolf & Frantzich, 2017). Återkommande belysningspunkter har till exempel påvisats underlätta människors förflyttning i rökfyllda tunnelmiljöer. Lämpligen placeras tätt (med cirka 10 m inbördes avstånd) och anordnas återkommande. De kan med fördel utgöra en del av ovan nämnda

<sup>17</sup> Det kan konstateras att det i TSI-SRT (2014) endast ställs krav på hänvisningsskyltar för utrymning på sidoväggarna längs med utrymningsvägarna.

hänvisningsskyltar för utrymning, det vill säga integreras i dessa. I en specifik utvärdering av utrymningsbelysning i vägtunnlars trafikutrymme, så kallade vägledande utrymningsljus, har det vidare konstaterats den här typen av utrymningsbelysning bör uppfylla två funktioner (Fridolf & Frantzich, 2017):

1. en orienterande funktion (för de utrymmande), och,
2. en belysande funktion (av vägen till en utrymningsväg).

Tillämpningen av förekommande standarder på området (såsom SS-EN 16276:2013) kan dock inte i alla situationer förväntas tillgodose dessa funktioner på grund av de låga krav som ställs på ljus- och belysningsstyrka.

#### 4.4.2.5 Utformning av utrymningsvägar

Bara för att en utrymmande person faktiskt uppmärksammar eller ser en utrymningsväg betyder det inte nödvändigtvis att den kommer att användas (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013). En utrymningsväg måste nämligen också göras attraktiv för att den ska användas i en utrymningsituation (Benthorn & Frantzich, 1999). Utformningen är särskilt viktig i tunnelmiljöer bland annat på grund av att det dels kan vara svårt att överhuvudtaget hitta befintliga utrymningsvägar (i synnerhet i rökfyllda miljöer), dels då alternativet att fortsätta längs tunneln inte sällan kan framstå som mer tilltalande för en utrymmande individ i det fall de faktiskt hittas (Frantzich & Nilsson, 2003).

Olika studier har därför genomförts i syfte att undersöka hur utrymningsvägar och dörrpartier i tunnlar bör utföras. Kunskap om utformning av utrymningskyltar i största allmänhet har i viss utsträckning nyttjats i dessa sammanhang, och kan sägas gälla även i tunnelmiljöer, till exempel:

- Ju större, ljusstarkare och mer kontrasterande en hänvisningsskylt för utrymning är i förhållande till den omgivande miljön, desto mer sannolikt är det att den upptäcks (Fransson, 2008; Jin et al., 1991; McClintock et al., 2001).
- Blinkande lampor i anslutning till hänvisningsskyltar för utrymning kan förväntas öka sannolikheten för att de upptäcks (McClintock et al., 2001; Nilsson et al., 2005; Nilsson, 2009).

Forskning om utformning av utrymningsvägar i tunnlar, bland annat fallstudier i form av tillämpningar av ovan nämnd affordance-teori, bidrar därtill med specifika rekommendationer om hur utrymningsvägar, eller snarare dörrpartierna till dessa, bör utformas:

- Färgsättningen av en utrymningsväg har kunnat konstateras påverka hur den uppfattas av utrymmande individer (Ronchi & Nilsson, 2013). Rekommendationen är att ett område runt de dörrar som utgör utrymningsväg målas i en grön färg, och att själva dörrarna målas i en kontrasterande mörkgrön färg.
- Dörrarna i dörrpartiet bör i första hand utformas med ett fönster (för att utrymmande individer ska kunna se vad som finns bakom), i andra hand med en ”springande gubbe” i vitt över hela dörren (Ronchi & Nilsson, 2015). Det förstnämnda kan antas bidra till en minskad osäkerhet och ett minskat tvekande eftersom utrymmande individer då har möjlighet att se att utrymnet är utformat som en förhållandevis ren yta och faktiskt leder vidare någonstans.
- Ljus och belysning, både fast och blinkande, har konstaterats öka både sannolikheten för att en utrymningsväg uppmärksammas och används i förhållande till en dörr utan dessa tekniska installationer.

- Blinkande ljus intill en utrymningsväg (både ovanför och bredvid) har påvisats ha en viss effekt på användandet både i vanliga byggnader och i tunnlar, och lämpliga frekvenser för det blinkande ljuset har konstaterats ligga inom intervallet 1–4 Hz i tunnelmiljöer (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013; Frantzich & Nilsson, 2003; Nilsson, 2009; McClintock et al., 2001; Fridolf & Frantzich, 2015). Samtidigt har det konstaterats att utrymmande individer kan ha svårigheter att förstå innebörden av sådana installationer, och blinkande ljus kan uppfattas som något obekant och förknippas inte nödvändigtvis med en utgång (Frantzich & Nilsson, 2003; Nilsson et al., 2009). I genomförda försök i rökfyllda järnvägstunnelliknande miljöer har blinkande ljusinstallationer i ett dörrparti även missuppfattats som trafik- eller vägsignaler av medverkande försökspersoner (Fridolf, 2013; Fridolf et al., 2013; Fridolf, 2015). Således bör blinkande ljus nog snarast betraktas som ett hjälpmedel för att fånga utrymmande individers uppmärksamhet och att en utrymningsväg noteras, men samtidigt som ett hjälpmedel som, om det används, behöver kompletteras i form av till exempel vägledande markeringar och hänvisningsskyltar.
- I förekommande fall är grönt ljus att rekommendera eftersom det i allmänhet förknippas med positiva saker i en utrymningsituation, till exempel säkerhet och utrymningsväg (Nilsson, 2009). Ljus- och belysningstekniska installationer bör utformas i närheten eller belysande av dörrpartiets övriga vägledande markeringar och hänvisningsskyltar då det bidrar till att öka såväl synligheten av som förståelsen för utrymningsvägen
- En typ av installation som kunnat konstateras ha särskilt god effekt både med avseende på att uppmärksamma utrymmande individer, och med avseende på att få dem att använda en utrymningsväg i en rökfylld tunnelmiljö, är en lokalt placerad högtalare. Genom en kombination av en larmsignal och ett talat utrymningsmeddelande har högtalarinstallationen påvisats prestera bättre än olika kombinationer av ljus tekniska installationer både i väg- och järnvägstunnelliknande miljöer när den utgjort en del av ett dörrparti (Boer & Withington, 2004; Fridolf, 2013; Fridolf, 2015; Fridolf et al., 2013; Fridolf & Frantzich, 2015). En sannolik förklaring är att människor i rökfyllda miljöer i större utsträckning än i rökfria utnyttjar och lutar på andra sinnen än sin syn, såsom hörsel och känsel. Högtalarinstallationen har en positiv påverkan på att utrymningsvägar upptäcks och används i största allmänhet, men också att de på att de upptäcks i god tid och att personer som förflyttar sig på motsatt tunnelsida genom att påverka sitt vägval enkelt kan orientera sig i riktning mot dem.

#### 4.4.3 Räddningstjänstens förmåga att assistera

Det kan konstateras att det är förenat med stora svårigheter att genomföra en räddningsinsats i tunnlar, både vägtunnlar och järnvägstunnlar. Bergqvist (1999) beskriver problematiken som att olyckor i tunnlar är ovanliga, svåröverskådliga och ofta komplicerade med tanke på att det ofta är frågan om stora sammanbyggda undermarkskonstruktioner. Det senare är främst kopplat till undermarksanläggningar i en storstadsmiljö. Tunnlar utanför tätbebyggda områden är ofta enklare och består av ett eller två parallella tunnelrör, ofta förbundna med varandra med tvärförbindelser i det senare fallet. Men i viss utsträckning kan en insats ändå bli komplicerad i dessa enklare tunnlar på grund av tunnelns längd och att det kan vara svårt med tillträdet till tunneln.

Problematiken innehåller även svårigheter att i realtid fatta beslut för en insats som omfattar en svåröverskådlig plats med en komplex olyckssituation. Bergqvist skriver vidare att en förutsättning för att kunna genomföra en insats är tillgång till ett bra informationsmaterial i form

av förberedda insatsplaner och förberedda larmplaner som kan stödja en uppbyggnad av en tänkt insats.

Eftersom bränder i tunnlar är ovanliga kan det också antas att räddningsinsatsen kommer att vara förenad med stora osäkerheter, vilket är fullt naturligt. Det finns en rad frågeställningar som måste hanteras i ett tidigt skede och även under en betydande stress bland personalen. Exempel på frågeställningar redovisas bland annat i Bergqvist et al. (2001) som fokuserar på problematiken för spårtunnlar:

- hur lång är tunneln?
- var i tunneln befinner sig tåget och var brinner det på tåget?
- hur mycket brinner det?
- finns det fler tåg i tunneln och vilken typ av tåg och var finns de?
- hur många personer finns på tåget?
- har utrymningen påbörjats och var i tunneln finns personerna?
- hur påverkar luftflödet brandförloppet och utrymningsförloppet?
- vilka angreppsvägar finns till tunneln?
- vilken utrustning och personal finns till förfogande?

En god planering är nödvändig för att insatsen ska kunna genomföras på ett effektivt sätt. Vid branden i Mont Blanc 1999 (vägtunnel) påbörjades insatsen av räddningstjänsterna på båda sidorna (franska och italienska sidan) i ett tidigt skede genom att personal gick in i tunneln utan tillräcklig information om branden (Voeltzel, 2002). På båda sidorna tvingades personalen söka skydd i flyktkammare och räddades senare av den egna personalen. Detta tar resurser från den ordinarie insatsen och pekar på nödvändigheten av att ha en god planering och framförhållning.

#### 4.4.3.1 Förutsättningar för en räddningsinsats i en tunnel

De första åtgärderna som krävs vid en insats är att definiera målet med insatsen. Två primära mål kan identifieras; rädda eller undsätta personer som är i tunneln samt genomföra en släckande insats. Ytterligare mål kan vara aktuella t.ex. att undsätta personer som på egen hand utrymt från tunneln.

I de första fallen betyder det att räddningstjänsten ska genomföra en insats i tunneln. I flera fall har det konstaterats att detta bör genomföras med vindriktningen in mot branden i tunneln. Denna strategi har använts vid några av de insatser som beskrivs i kapitel 2. Fördelen är att insatsmiljön är förhållandevis fri från rök även om en viss påverkan kan bli på grund av s.k. backlayering när röken sprids mot luftriktningen. Detta kan ske vid låga flödes hastigheter och främst nära branden. Nackdelen med denna strategi är att om riktningen på röken måste ändras kan personer som inledningsvis i tunneln utrymmer i en rökfri miljö plötsligt exponeras för den rök som nu har en annan riktning.

En annan strategi kan vara att genomföra insatsen i den rökfyllda delen. Detta alternativ kan vara nödvändigt om målet är att rädda personer som befinner sig i den rökfyllda delen eller om alternativ insatsväg saknas. Beroende på förutsättningarna i det aktuella landet har räddningstjänsten olika förmåga att genomföra en insats i en rökfylld tunnel exempelvis baserat på krav i arbetsmiljölagstiftningen. Insats i en rökfylld tunnel är förenat med risker för

insatspersonalen och det kan krävas tillgång till släckvatten för skydd av personalen och särskilda skyddsgrupper.

I det fall insatsen sker i en förhållandevis rökfri miljö kan insatsen ske med god förflyttningshastighet, i flera fall med fordon som anpassats för att kunna köra på räls och väg. Riskmiljön är relativt låg så länge avståndet fram till branden är lång. Nära branden kommer värmestrålningen att vara påtaglig, främst för större bränder. I en analys av räddningstjänstens möjligheter att bekämpa en tunnelbrand (Ingason et al., 2005) antogs att personalen kan utsättas för värmestrålning upp till 5 kW/m<sup>2</sup>, dock under en begränsad tid. Persson (1990) anger att tiden kan vara upp till sju minuter. För en större brand, motsvarande en långtradare i en vägtunnel uppstår denna strålningsintensitet vid ca 15 meter från branden. Från försök med kastlängd för en vattenstråle i en tunnel med 4,5 m takhöjd redovisade i Ingason et al. (2005) konstateras att den maximala längden varierar mellan 20 - 35 meter beroende på strålrör. Förutsättningen för dessa försök är att strålröret monterades på 38 mm slang med längden 25 meter direkt på ett räddningsfordon. De konstaterar också att mängden vatten som når branden avtar med avståndet. I rapporten resonerar författarna att det endast är en mindre del av vattnet som kommer att göra någon större nytta.

Ingason et al. (2005) konstaterar vidare att brandpersonalen måste komma närmare branden för att kunna bekämpa branden. Luftströmmen i tunneln i kombination med någon form av skydd mot värmestrålningen är nödvändig. De resonerar vidare kring att det dessutom måste finnas en god tillgång till släckvatten vilket gör att en normalt utrustad kommunal räddningstjänst kommer att få stora svårigheter att kontrollera en fullt utvecklad brand i en tunnel.

Palm et al. (2014) redovisar brandsläckningsförsök i en rökfylld tunnel med sex olika släckningstaktiker. Försöket genomfördes i en gruva med cirka 150 meters insatsväg och därefter släckning av en brand som skulle representera brand i en tåg- eller tunnelbanevagn. En stålcontainer med öppningar som motsvarande fönsteröppningarna fylldes med träpallar för att skapa en större brand. Effektmätningar från försöken visade en maximal brandeffekt på cirka 18–20 MW efter 20 minuter i de flesta försöken. Något försök resulterade i en högre brandeffekt och kortare varaktighet. I försöket deltog räddningspersonal som av säkerhetsskäl var väl förberedda på vad de skulle utsättas för och hur de skulle agera och genomföra insatsen. Avsikten var att genomföra en släckinsats och utnyttja den inövade taktiken som respektive släckmetod innebar. Varje insats genomfördes av ett team bestående av tre grupper med två personer i varje. Dessutom fanns en fjärde grupp för att öka säkerheten under försöken. De tre grupperna hjälptes alltså åt med att genomföra insatsen.

Varje försök genomfördes med vindriktningen in mot branden dvs röken strömmade bort från insatspersonalen. Däremot placerades ett antal rökgeneratorer ut för att skapa en insatsmiljö med dålig sikt. Sikten var mindre än 0,5–1 meter under försöken. De sex olika insatsstrategierna byggde på följande förutsättningar:

1. Traditionell slangutläggning med slang i slangkorgar och med trycksatta slangar som läggs ut efter hand.
2. Motsvarande försök ett men där en annan utläggningsteknik användes
3. Traditionell slangutläggning med slang i slangkorgar som läggs ut efter hand men att utan trycksatta slangarna.
4. Insats med en CAFS-utrustning (compressed air foam system) med 38 mm slang

5. Insats med ett system för släckning med vatten med högt tryck (normalt 200–300 bar)
6. Insats med en handdragen transportvagn för utrustning. Vagnen innehöll även extra luftflaskor.

Snabbast av de jämförbara försöken var det med traditionell slangutläggning men där slangarna inte trycksattes kontinuerligt dvs försök 3. Detta förklaras med att arbetsinsatsen var mycket lindrigare när personalen inte behövde hantera tunga vattenfyllda slangar.

Den dåliga sikten visade sig vara problematisk och koordinationen mellan personerna som samarbetade i grupperna var förhållandevis dålig eftersom de inte kunde se varandra. En erfarenhet som drogs var att det kunde underlätta om samtliga i personalen hade tillgång till IR-kameror, nu var det endast en person i varje grupp som använde en IR-kamera.

Försöket med transportvagnen var det som tog längst tid att genomföra. Det konstaterades att det som såg enkelt ut i dagsljus visade sig vara svårt att utföra i den rökfyllda miljön. Detta försök tog lite under 30 minuter insatspersonelen de 150 metrarna i tunneln. Försök 3 som genomfördes snabbast tog ungefär 12 minuter för personalen att genomföra samma sträcka. Men väl på plats lyckades alla insatserna med att släcka branden.

Insatsen försvårades alltså av att sikten i röken var dålig. I flera fall kan insatsen ske i en mer rökfri miljö men försöket ger en indikation på hur snabbt en räddningsinsats i en rökfylld miljö kan genomföras.

Bergqvist et al. (2001) redovisar försök med slangutläggning i olika miljöer. Totalt tre olika övningar genomfördes. Försöken genomfördes i en tunnel med rökdykarinsatser med olika förutsättningar. Samtliga tre fall gäller insats i tunnel, tabell 4.

- Övning 1: Rökdykning i konströk med slang som inte vattenfylldes
- Övning 2: Insats utan rök men med slang som vattenfylldes efter utläggning
- Övning 3: Insats utan rök och utan slangutläggning

I övning 1 observerades en genomsnittshastighet på under 0,1 m/s men där den sista sträckan tar väldigt lång tid. Då hade räddningspersonalen avancerat 180 meter in i tunneln. Den genomsnittliga gånghastigheten för räddningspersonalen ligger mellan 0,1–0,2 m/s vilket inkluderar tiden det tar att koppla ihop slangar under insatsen. Den hastigheten inkluderar tider för att koppla ihop och förbereda slangutläggningen.

Troligen var siktsträckan ganska kort. Konströkens nivå sjönk ju längre in i tunneln rökdykarna gick och vid ca 100 m var den nere vid golvet. Gånghastigheten verkar dock inte ha sjunkit efter 100 m utan ökade snarare, om än marginellt. Som längst kom rökdykarna, flera par, ca 180 m in i tunneln. Därefter avbröts övningen.

Övning 2 genomfördes utan konströk och gånghastigheten låg då kring 1 m/s när räddningspersonalen la ut slang med vatten och förflyttade sig i tunneln. Sikten var god och begränsningen låg i att slangen var fylld med vatten vilket försvårade förflyttningen. Den genomsnittliga förflyttningshastigheten som även inkluderade tid att koppla ihop nya slangar var lägre och i den aktuella övningen uppmättes en genomsnittshastighet på 0,3 m/s.

I övning 3 gick rökdykarna utan slang i rökfri miljö och gånghastigheten låg kring 1,3 m/s.

I Tabell 4-1 redovisas även ett försök (försök A) som genomförts av Lennmalm (1998) i en industrimiljö där räddningspersonalen sökte av en yta utan hjälp av synen (rökskyddets visir var täckt).

Tabell 4-4 Sammanfattning av genomsnittlig förflyttningshastighet och beräknad teoretisk maximal gångsträcka med rökdykargrupper i tunnelmiljö.

Försök	Testupplägg	Genomsnittlig förflyttningshastighet (m/s)	Teoretisk maximal inträngningssträcka (m) <sup>a</sup>
1	Rökfylld tunnel. Ej vattenfylld slang	0,1 - 0,2	58
2	Rökfri tunnel. Slangdragning med vattenfylld slang	1,0 (0,3 <sup>c</sup> )	243
3	Rökfri tunnel. Ingen slangdragning	1,3	1080
A	Försök genomförda i industrimiljö	0,1 <sup>d</sup>	80

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

<sup>b</sup> Genomsnitt för hela övningen.

<sup>c</sup> Genomsnitt för hela övningen och inkluderar även tiden att koppla ihop slangar.

<sup>d</sup> Slangkopplingsmoment genomfördes ej.

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

Att genomföra en räddningsinsats i en rökfylld miljö är således mycket krävande och går långsamt eftersom det finns svårigheter med orienteringen i tunneln, det är svårt att samarbeta på grund av dålig sikt och arbetet är tungt om även en vattenfylld slang ska hanteras.

I Ingason et al. (2005) presenteras en modell för räddningsinsats i en rökfylld tunnel som även beaktar brandens påverkan på personalens förutsättningar att genomföra insatsen. En rad beräkningar genomförs för olika brandscenarier och avstånd mellan räddningsstyrkans startplats och positionen för branden. Avståndet varierades mellan 150 meter till 500 meter för att undersöka fallen med olika avstånd mellan tvärförbindelser i fallet där det finns parallella tunneltör där det ena kan användas som startplats för insatsen. I samtliga fall förutsätts att insatsen sker nedströms branden dvs i en rökfylld tunnel. Endast för de mindre bränderna (upp till 25 MW) finns det en möjlighet att genomföra insatsen oavsett avstånd till branden. Det är dock tveksamt om det i praktiken går att genomföra insatsen om avståndet är 500 meter och branden är 25 MW som mest. Marginalen i beräkningen är liten och sannolikt beror det lyckade resultatet på att brandeffekten avtar mot slutet av insatsen.

Beräkningar genomfördes även vid insatser uppströms branden dvs i en mer rökfri miljö. För personalens säkerhet är det då främst den kritiska värmestrålningen som avgör hur nära de kan komma. När bränderna blir lite större är det sannolikt vattenbehovet som kommer att styra hur lyckad insatsen kan vara. Ingason et al. (2001) redovisar ett teoretiskt släckvattenbehov för olika

bränder i fordon. Analysen bygger på att det vatten som används verkligen träffar branden och gör nytta, något som kan vara svårare ju högre brandeffekten blir. Anledningen är att värmestrålningen ökar vilket för att insatsen måste ske från ett längre avstånd om inte särskilda skyddsåtgärder vidtas för att kunna komma nära branden. Tabell 4-5 redovisar det minsta släckvattenbehovet för några vägfordon (Ingason et al., 2005).

Tabell 4-5 Minsta släckvattenflöde för att hantera en fordonsbrand (Ingason et al., 2001)

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

Det har också visat sig att mängden andningsluft som personalen har med sig utgör en begränsande faktor. Räddningspersonal som ska göra långa insatser i rökfyllda tunnlar kommer att få brist på andningsluft efter mindre än en halvtimme. Vid hårt arbete ökar dessutom förbrukningen av luft. I de försök som redovisas i Palm et al. (2014) användes en transportvagn i det sista av de sex försöken. Avsikten var att transportera även extra luftflaskor till personalen för att öka deras räckvidd. En aspekt det sammanhanget är att även med extra luft kommer personalen att nå en punkt där de inte längre kan fortsätta insatsen, främst på grund av fysisk utmattning men också på grund av att kroppen värms upp snabbare än den kan kylas av.

#### 4.4.3.2 Hjälpa utrymmande personer

Ett av målen med att genomföra räddningsinsatsen är att rädda liv dvs att hjälpa personer som finns i tunneln. Förutsättningarna för detta beror på hur intensiv branden är dvs. hur hög brandeffekten är. Vid måttligt stora bränder finns det goda möjligheter att rädda personer som evakuerar vilket ett flertal bränder i norska vägtunnlar vittnat om. Men detta bygger främst på att passagerarna i stor utsträckning själva kan ta sig ut från tunneln om de befinner sig i den rökfyllda delen. Uppströms branden finns det flera fall där räddningsstyrkan vid norska vägtunnelbränder kunna undsätta bilister som flyr från branden.

Nedströms branden befinner sig de utrymmande i rök och räddningsinsatsen inriktas vanligen på att ta hand om personer som själva lyckats ta sig ut. Vid branden i Gudvangatunneln 2015 gjorde räddningstjänsten först en insats från västra sidan (från Gudvangen) men tvingades att retirera när de mötte rök. Det är alltså i praktiken förenat med stora svårigheter att rädda personer som befinner sig i en rökfylld tunnel.

Både utrymning och räddningsinsats underlättas av om det finns vägar in till tunneln från flera platser. När tunneln är utformad med två parallella tunnelrör används tvärförbindelserna som utrymningsväg och insatsväg. Strategin är då att genomföra insatsen från uppströmssidan och försöka samla upp utrymmande personer nedströms branden och leda ut dessa genom närmaste nedströms tvärförbindelse. Utformningen av systemen som ska underlätta utrymning, t.ex. vägledande markeringar och kontinuerliga handledare, är gjorda så att utrymmande personer själva ska kunna hitta ut.



Ett alternativ som diskuteras för tunnlar som saknar utrymningsvägar är att bygga räddningskammare som personer kan söka skydd i. Denna strategi har använts sedan lång tid men förutsätter att dessa räddningskammare är säkra att uppehålla sig i och att de medger bland annat kommunikation med omvärlden. Strategin är främst tänkt för vägtunnlar och kan sannolik inte utgöra ett alternativ för järnvägstunnlar med tanke på antalet passagerare på tågen.

#### 4.4.3.3 Rasrisk

En aspekt som måste beaktas är risken att tunneln rasar när den exponeras för branden. Detta har observerats vid flera inträffade bränder t.ex. vid Gudvangatunneln 2015. Normalt påförs dock brandskyddande sprutbetong i de anläggningsdelar av en tunnel där det föreligger risk för kollaps eller fortskridande ras eller brott med omfattande bergutfall i händelse av brand.

#### 4.4.3.4 Vattentillgång

Många tunnlar är lokaliserade långt från bebyggda trakter och tillgången till släckvatten kan vara svår att hantera. Behovet av vatten är stort för att kunna släcka större bränder och tillgången till tankbilar kan vara avgörande. I flera nya tunnlar installeras rör för brandvattenförsörjning, antingen konstant fyllda eller enbart tomma rör som räddningstjänsten använder (Magnusson & Rohlén, 2013). Den sista strategin löser inte bristen på tillgänglig vatten men kan underlätta insatsen. I fall med parallella tunnelrör kan tomma rör installeras i tvärförbindelserna som gör att vatten kan transporteras från ett tunnelrör till det andra utan att behöva passera öppna dörrar. Dock har ofta räddningstjänsten en stor påverkansmöjlighet i en praktisk situation vilket gör att andra lösningar kan förekomma.

#### 4.4.3.5 Kommunikation

Ingason et al. (2005) poängterar att kommunikation mellan olika enheter måste vara tryggad. För att detta ska fungera menar man att kommunikationen måste vara välplanerad och förberedd.

#### 4.4.3.6 Tillgänglighet

En av de stora utmaningarna med tunnlar utanför tätbebyggda områden är att det kan vara svårt att förflytta personer och materiel från en mynning till den andra. Det krävs i princip en räddningsstyrka på vardera sidan för att kunna genomföra insatsen på båda platserna. I flera fall i norska vägtunnlar finns en huvudsaklig angreppsväg och om den är rökfylld är tanken att vända röken så att insatsen kan ske från en sida oavsett yttre förutsättningar. Detta kräver dock tillgång till brandgasfläktar som är vanligare i vägtunnlar jämfört med järnvägstunnlar. Ytterligare nackdelar finns för personer som utrymmer vilket beskrivs i kapitel 2.

## 4.5 Sammanfattning av erfarenheter och förslag till åtgärder fra del 2

Utgången av en utrymning kommer att vara beroende på interaktionen mellan tunnelns fysiska förutsättningar och de förutsättningar som kopplas till passagerarna.

Passagerares beteende kommer att vara beroende på vad de vet om situationen och vilken information de får av personalen samt i vilken mån de har tilltro till denna information. På det viset finns det alltså möjligheter att i viss utsträckning styra utrymningen och hur den kommer att gestaltas. Finns inte denna information uppstår ett informationsunderskott bland passagerarna och spontanutrymning kan inledas.

Passagerare kommer att agera utifrån den mängd information de har till förfogande och hur de interagerar med varandra. Detta agerande är i princip inte annorlunda än för en motsvarande situation i byggnader där utrymning blir nödvändig. Bränder i byggnader är betydligt vanligare och därmed mer undersökta vilket innebär att det finns teorier kring hur människor beter sig vilka kan appliceras även för bränder på tåg i tunnlar. Dessa teorier kommer att presenteras i rapporten och hur de kan tillämpas i det aktuella fallet.

När personerna blivit medvetna om att de ska lämna tåget, spontant eller via instruktion från tågpersonalen, ska de ta sig ut till tunneln. Avståndet mellan tågets golv och tunnelns botten kan vara högt och saknas gångvägar i höjd med tågets golv kommer det att vara svårt att förflytta sig i vertikal led nedåt. Försök från experiment visar på svårigheter att hoppa ner till marknivå vilket beskrivs mer utförligt i kapitel 3. Svårigheterna blir mer påtagliga för äldre personer, personer med funktionsnedsättningar och föräldrar som har små barn eller barnvagnar. De flesta försök som genomförts redovisar resultat från förhållandevis friska personer och specifika data från försök med äldre eller andra personer som svårtligen kan ta sig ned till spårnivån är ovanliga. Detta är skälet till att nya tunnlar utformas så att dessa svårigheter ska undvikas. Utan upphöjda gångvägar är självutrymningsprincipen i praktiken omöjlig att uppnå för personer som använder rullstol eller som har andra svårigheter att förflytta sig.

Väl ute i tunneln ska förflyttningen ske i någon riktning. Vanligen är utrymnet för egna initiativ litet och det blir de första personerna som utrymmer som bestämmer vilken riktning övriga ska gå i. Information i tunneln eller från tågpersonalen blir här avgörande. När de utrymmande kommit förbi tågets sista vagn är fördelen med de upphöjda gångvägarna plötsligt ett problem eftersom fallrisken ner till spåret är aktuell. Gångvägen måste därför vara anpassad så att det mest naturliga är att stanna på den t.ex. genom att handledare underlättar för personer att följa gångvägen och inte förflytta sig i sidled. Handledaren underlättar ytterligare om utrymningen måste ske i en rökfylld miljö.

En fördel med järnvägstunnlar i jämförelse med vägtunnlar är att de oftast är i praktiken horisontella. Detta kan underlätta vid en utrymningssituation eftersom utmattning inte behöver bli ett lika stort problem.

Järnvägstunnlar kan vara utformade med ett eller två tunnelrör. Parallella rör förekommer där trafikmängden motiverar detta. Det är ur ett utrymningsperspektiv en fördel om utrymning kan ske från ett tunnelrör till ett parallellt rör via tvärförbindelser. Avståndet till en säker plats blir då rimligt. Mynningen, eller i de fall undermarksstationer förekommer i anslutning till tunneln, blir annars den enda möjligheten att nå en säker plats. Tillgång till utrymningsvägar inne i tunneln är

sällan möjlig för enkelrörstunnlar om det saknas undermarksstationer eftersom avståndet till det fria är långt, tunneln går ju genom ett berg.

För att underlätta utrymningen finns olika tekniska system som komplement till ombordpersonalens agerande. Typiska installationer för hantering av en brandsituation i järnvägstunnlar är:

- hårdgjorda gångvägar på ena eller båda sidorna om spåret
- system för brandgasventilation eller trycksättning längs med tunnelröret
- mobiltelefonäckning och kommunikationssystem för räddningstjänsten (såsom RAKEL)
- nödbromsblockering på tåget
- utrymningsbelysning och hänvisningsskyltar för utrymning i form av vägledande markeringar
- handledare utmed gångvägar
- ledbelysning och belysta dörrar till utrymningsvägar om sådana finns

Även om olyckor är ovanliga så förekommer de trots allt. I Norge är de flesta tågolyckor förknippade med tunnelbanetraffik. Internationellt finns ett antal dokumenterade olyckor och en av dem som beaktar utrymningsaspekter är branden i tunnelbanan i Zürich 1991, se avsnitt 2.1. Däremot sker det oftare bränder i norska vägtunnlar och erfarenheter från dessa kan i viss utsträckning appliceras på järnvägstunnlar.

I de flesta fall blir inte olyckorna så omfattande även om brand uppstår. Men det är ändå noterbart att i Oslofjordtunneln (vägtunnel) 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 tunnlar. Lyckligtvis orsakade bränderna inga dödsfall, men ett stort antal personer drabbades av kraftiga rökskador. De som utrymde genom röken vittnar om att utrymningen skedde under stora svårigheter och i flera fall skedde den till fots i flera kilometer i tunneln.

De huvudsakliga problem som identifieras vid de inträffade bränderna i vägtunnlarna 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.

Dessa erfarenheter visar bland annat på behovet av att personal på tåg i järnvägstunnlar har en betydande roll under en utrymning. Detta för att undvika oklarheter och att utrymningen kan ske till en säker plats tidigt under förloppet. Brandförloppet är vanligen tilltagande och förutsättningarna för en säker utrymning minskar när tiden ökar. 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 förstå 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 som underlättar utrymning,
- tekniska system på tåg och i tunnel som minskar brandens sannolikhet och konsekvens
- organisatoriska sätt att hantera olyckor på olika nivåer inom samhället

Rapporten redogör för kunskapsläget angående utrymning vid brand i järnvägstunnlar. Mycket av fokus läggs vid att beskriva förutsättningarna för att passagerare ska kunna hantera en utrymning och vad som påverkar utfallet av en utrymning. I rapporten redovisas hur människor kan förväntas bete sig och hur detta kan omsättas i en modell för en ingenjörstillämpning för design av tågtunnlar.

Den så kallade tidslinjmodellen som presenteras i kapitel 3 kopplar ihop teoretiska beskrivningar och modeller till en grov förenkling av vad som faktiskt kan förväntas ske vid en utrymning. Men den är samtidigt nödvändig att göra för att på ett strukturerat sätt kunna analysera ett många gånger stort antal brand- och utrymningsförloppsscenarioer och dra slutsatser om brandsäkerheten baserat på dessa. Det gör att modellen kan kombinera beskrivningar av beteende och andra ageranden med en analysmetodik för design av utrymningssystemet i järnvägstunnlar.

Det betyder dock inte att den kunskap vi har om människors beteende i bränder inte kan användas i dessa sammanhang eller ersätts av modellen. Tvärtom kan till exempel beteendesekvensmodellen och kunskap om människors roller och hur detta påverkar en persons agerande i en brand användas för att inledningsvis beskriva förväntade beteenden i de inledande skedena av olika utrymningsförloppsscenarioer. Då som en funktion av andra antaganden om föreslagna brand- och utrymningstekniska installationer, utformningen av den byggda miljön, etc. Med andra ord kan teorierna och modellerna användas för att kvalitativt motivera valet av kvantitativa mått som indata till utrymningsanalyser, såsom uppskattningar av den tid som går åt för att en person ska förstå att det brinner, lyssna på utrymningslarm, hjälpa andra att utrymma, förbereda sig, försöka bekämpa branden, m.m. (det vill säga det som ingår i den så kallade förberedelsetiden).

Sammanfattningsvis kan den presenterade kunskapssammanställningen av genomförd forskning summeras i följande punkter:

- Utgå från förväntat beteende vid design. Människor försöker sätta sig i säkerhet även om det innebär utrymning genom rök.
- Människor agerar utifrån den kunskap och information de har om (hur de tolkat) situationen.
- Design bör anpassas så att personer med funktionsnedsättning, äldre personer, familjer med barn också kan utrymma på ett säkert sätt.
- Personer drabbas inte av panik vid en utrymning, informera om vad som hänt och vad personerna förväntas göra.
- Utrymning från järnvägstunnlar kan inte förutsätta yttre assistans utan självräddningsprincipen måste råda.
- Räddningsinsatsen bör inte leda till kraftigt förändrade förutsättningar för personer som redan påbörjat sin utrymning.

- Basera nya designlösningar på teorier om hur de kan fungera för vanliga människor och inte hur ingenjörer uppfattar situationen. Testa ny teknik i full skala innan den introduceras. Ofta upptäcks fel och oväntade effekter som ingen tänkte på innan.

Detta kan föranleda en rekommendation att ta fram '*best practice*' för hur en norsk järnvägstunnel ska utformas.

## Referenser del 2

- Ahlfont, J., & Vermina Lundström, F. (2012). *Tunnelutrymning: Effekten av gångbanans bredd på förflyttningshastighet vid utrymning i en spårtunnel*. Lunds universitet.
- Akizuki, Y., Yamao, K., & Tanaka, T. (2007). Experimental Study On Walking Speed In Escape Route Considering Luminous Condition, Smoke Density And Evacuee's Visual Acuity. In *seventh Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. International Association for Fire Safety Science.
- Beale, C. (2002). Recent Railway Industry Accidents: Learning Points for the Process Industries. *Trans IChemE*, 80(Part B), 25–32.
- Beard A. Carvel R (2012) Handbook of Tunnel Fire Safety, 2nd ed. ICE Publishing, London.
- Benthorn, L., & Frantzich, H. (1999). Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose an evacuation exit? *Fire and Materials*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1018\(199911/12\)23:6<311::AID-FAM704>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1018(199911/12)23:6<311::AID-FAM704>3.0.CO;2-J)
- Bergqvist A (1999). Räddningsinsatser i tunnlar och undermarksanläggningar. Förstudie avseende läget i Norden. Rapport P21-283/99. Räddningsverket, Karlstad.
- Bergqvist A., Frantzich H., Hasselrot K. och Ingason, H. (2001). Räddningsinsatser vid tunnelbränder. Probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i spårtunnel. Rapport P21-391/01, Räddningsverket, Karlstad.
- Best, R., & Demers, D. (1982). *Investigation report on the MGM Grand Hotel fire, Las Vegas, Nevada, November 21, 1980*. National Fire Protection Association.
- Bilson M, Purchase A, Liu L, Nishimura N, Li S and Rim Seo B (2018). Rail System Ventilation Rehabilitation. Eighth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Borås, Sweden, March 14-16, 2018.
- Boer, L. C., & Withingtong, D. J. (2004). Auditory guidance in a smoke-filled tunnel. *Ergonomics*, 47(10), 1131–1140.
- Boverket. (2011). *Konsekvensutredning - för revidering (BFS 2011:26) av avsnitt 5 Brandskydd i Boverkets byggregler, BBR (BFS 2011:6) och för allmänt råd om analytisk dimensionering av byggnaders brandskydd (BFS 2011:27)*.
- Boyce, P. R. (1985). Movement under emergency lighting: the effect of illuminance. *Lighting Research and Technology*, 17(2), 51–71. <https://doi.org/10.1177/14771535850170020401>
- Bryan, J. (1983). A Review of the Examination and Analysis of the Dynamics of Human-Behavior in the Fire at the Mgm-Grand-Hotel, Clark County, Nevada, as Determined from a Selected Questionnaire Population. *Fire Safety Journal*, 5(3–4), 233–240.
- Canter, D., Breaux, J., & Sime, J. (1980). Domestic, Multiple Occupancy, and Hospital Fires. In David Canter (Ed.), *Fires and Human Behaviour* (pp. 117–136). John Wiley & Sons Ltd.
- Canter, D., Donald, I., & Chalk, J. (1992). Pedestrian Behaviour during Emergencies Underground: The Psychology of Crowd Control under Life Threatening Circumstances. In A.

- Vardy (Ed.), *Safety in Road and Rail Tunnels* (pp. 135–150). Independent Technical Conferences Ltd.
- Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., Cuesta, A., & Alonso, V. (2011). Human Behaviour during Train Evacuations: Data Collection and Egress Modelling. In *Symposium on Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations EVAC11*.
- Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., & Cuesta, A. (2012). Analysis of evacuation procedures in high speed trains fires. *Fire Safety Journal*, 49, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.12.008>
- Capote, J., Alvear, D., Abreu, O., Cuesta, A., & Alonso, V. (2012). A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains. *Fire Technology*, 48(4), 911–925. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0251-3>
- Carlson, E., Kumm, M., Dederichs, A., & Zakirov, A. (2017). *Upphöjda gångbanor i spårtunnlar Upphöjda gångbanor i spårtunnlar*. SP Rapport 2017:11, Borås.
- Carlson, E., Kumm, M., Zakirov, A., & Dederichs, A. (2019). Evacuation tests with elevated platforms in railway tunnels. *Fire Safety Journal*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102840>
- Carvel, R., & Marlair, G. (2011). A history of fire incidents in tunnels. In A. Beard & R. Carvel (Eds.), *Handbook of Tunnel Fire Safety* (Second, pp. 3–23). Thomas Telford.
- Clark County Fire Department. (1981). *MGM Report*. Clark County Fire Department.
- DBE (2000). Vehicle Fire in the Seljestad Road Tunnel on E134 in Odda Municipality 14 July 2000. Investigation report Direktoratet for brann- og eksplosjonsvern.
- Deutsch, M., & Gerard, H. B. (1955). A Study of Normative and Informational Social Influences upon Individual Judgement. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 51(3), 629–636.
- Dix, A. (2010). Tunnel Fire Safety in Australasia. In A. Lönnermark & H. Ingason (Eds.), *Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010* (pp. 69–79). SP Technical Research Institute of Sweden.
- Donald, I., & Canter, D. (1990). Behavioural Aspects of the King's Cross Disaster. In I. Donald (Ed.), *Fires and Human Behaviour* (2nd ed., pp. 15–30). David Fulton.
- EN 45545-1:2013. Railway applications – Fire protection on railway vehicles – Part 1: General
- Fahy, R., Proulx, G., & Aiman, L. (2009). “Panic” and Human Behaviour in Fire. In *Fourth International Symposium on Human Behaviour in Fire* (pp. 387–398). Interscience communications.
- Fennell, D. (1988). *Investigation into the King's Cross Underground Fire*. The Department of Transport.
- Fermaud, C., Jenne, P., & Müller, W. (1995). Fire in a Commuter Train - Rescue Procedures as Perceived by Passengers. In A. Vardy (Ed.), *second International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels* (pp. 181–188). Independent Technical Conferences.
- Fransson, E. (2008). *Utrymningsskyltar – Vilka faktorer påverkar om en utrymningsskylt är lätt att uppfatta eller ej?* Lunds universitet.

- Frantzich, H. (2000). *Utrymning av tunnelbanetåg: Experimentell utvärdering av möjligheten att utrymma i spårtunnel*. Statens räddningsverk.
- Frantzich, H., & Nilsson, D. (2003). *Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning*. Lunds universitet.
- Frantzich, H., & Nilsson, D. (2004). Evacuation Experiments in a Smoke Filled Tunnel. In *Third International Symposium on Human Behaviour in Fire* (pp. 229–238). Interscience communications.
- Frantzich, H., Nilsson, D., & Röd, K. (2016). *Utrymning och tekniska installationer i vägtunnlar med dubbelriktad trafik*. Report 3199, Lunds universitet, Lund.
- Fraser-Mitchell, J., & Charters, D. (2005). Human Behaviour in Tunnel Fire Incidents. *Fire Safety Science*, 8, 543–554. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.8-543>
- Fridolf, K. (2013). *Evacuation of a Smoke Filled Tunnel: Human Behaviour, Movement Speed and Exit Choice*. Lund University.
- Fridolf, K. (2015). *Rail Tunnel Evacuation*. Lund University.
- Fridolf, K., André, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2014b). The impact of smoke on walking speed. *Fire and Materials*, 38(7), 744–759. <https://doi.org/10.1002/Fam.2217>
- Fridolf, K., & Frantzich, H. (2015). *Test av vägledande system i en tunnel*. Lunds universitet.
- Fridolf, K., & Frantzich, H. (2017). *Utvärdering av utrymningsbelysning i vägtunnlar*.
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2012). Train evacuation inside a tunnel: An interview study with senior citizens and people with disabilities. In *fifth International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Interscience Communications.
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2014a). The flow rate of people during train evacuation in rail tunnels: Effects of different train exit configurations. *Safety Science*, 62(C), 515–529. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.10.008>
- Fridolf, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2015). Evacuation of a Metro Train in an Underground Rail Transportation System: Flow Rate Capacity of Train Exits, Tunnel Walking Speeds and Exit Choice. *Fire Technology*, 1–38. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0471-4>
- Fridolf, K., Nilsson, D., Frantzich, H., Ronchi, E., & Arias, S. (2016). *Människors gånghastighet i rök: Förslag till representation vid brandteknisk projektering*.
- Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2013). Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal*, 59, 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.007>
- Fridolf, K., Ronchi, E., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2019). The representation of evacuation movement in smoke-filled underground transportation systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 90(April), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.04.016>
- Fujii, K., Sano, T., & Ohmiya, Y. (2015). Effect of Emergency Sign and Illumination on Walking Speed in Smoke-Filled Corridor. *6th International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 561–571.



- Galea, E. R., & Gwynne, S. (2000). Estimating the Flow Rate Capacity of an Overturned Rail Carriage End Exit in the Presence of Smoke. *Fire and Materials*, 24(6), 291–302.
- Galea, E., Blackshields, D., Lawrence, P., Finney, K., & Cooney, D. (2013). The Development and Validation of a Rail Car Evacuation Model. In *thirteenth International Fire Science and Engineering Conference* (pp. 1023–1034). Interscience Communications.
- Galea, E., Blackshields, D., Finney, K., Cooney, D., & U.S. Department of Transportation Office of Research and Development, F. R. A. (2014). *Passenger Train Emergency Systems: Development of Prototype railEXODUS Software for U.S. Passenger Rail Car Egress*. U.S. Department of Transportation.
- Gibson, J. J. (1978). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin Company.
- 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., & Rosenbaum, E. (2016). Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement. In M. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2115–2151). Society of Fire Protection Engineers.
- Hartson, H. R. (2003). Cognitive, physical, sensory, and functional affordances in interaction design. *Behaviour & Information Technology*, 22(5), 315-338.
- Heskestad, A. W. (1999). Performance in Smoke of Wayguidance Systems. *Fire and Materials*, 23(6), 375–381.
- Heskestad, A. W., & Schmidt Pedersen, K. (1998). Escape Through Smoke: Assessment of Human Behaviour and Performance of Wayguidance Systems. In J. Shields (Ed.), *the First International Symposium on Human Behaviour in Fire* (pp. 631–638).
- HSLB (2005). Rapport 2005/03. Havarikommissionen for Sivil Luftfart og Jernbane. Lilleström.
- Ingason, H., Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. och Lundström, S. (2001). “Planning for manual firefighting and rescue in tunnels”, Proceedings of the fourth international conference on Safety in rail and in road tunnels, Madrid 2-6/11, 2001.
- Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnermark, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. (2005). Räddningsinsatser i vägtunnlar. Rapport P21-459/05. Räddningsverket, Karlstad.
- Ingason, H., Kumm, M., Nilsson, D., Lönnermark, A., Claesson, A., Li, Y. Z., Fridolf, K., Åkerstedt, R., Nyman, H., Dittmer, T., Forsén, R., Janzon, B., Meyer, G., Bryntse, A., Carlberg, T., Newlove-Eriksson, L., Palm, A. (2012). The Metro project, final report. Rapport 2012:8. Mälardalens högskola, Västerås.
- Ingason, H., Li, Y., & Lönnermark, A. (2015). *Tunnel Fire Dynamics*. Springer.
- Jensen, G. (1993a). *Römming i røyk: Fullskala test av ledesystemer, personlig røykvern og atferd*. IGP AS.
- Jensen, G. (1993b). *Evacuating in Smoke: Full Scale Tests on Emergency Egress Information Systems and Human Behaviour in Smoky Conditions*. IGP AS.

- Jenssen G.D., Skjermo J., Snilstveit Hoem Å., Arnesen P., Frantzich H., Nilsson D. (2018). Simulering av evakuering i tunnel. Rapport 2018:01000. Sintef, Trondheim.
- Johnson, P., Barber, D., & Henderson, L. (2012). Decision Making and Evacuation in Road and Rail Tunnels. *Fifth International Symposium on Human Behaviour in Fire*.
- Jin, T. (1976). *Visibility through Fire Smoke* (pp. 12–18). Report of Fire Research Institute of Japan.
- Jin, T. (1978). Visibility through Fire Smoke. *Journal of Fire & Flammability*, 9(2), 135–155.
- Jin, T. (1981). Studies of Emotional Instability in Smoke from Fires. *Journal of Fire & Flammability*, 12, 130–142.
- Jin, T., Tokiyoshi, Y., Kuwai, S., & Takahashi, S. (1991). Evaluation of the Conspicuousness of Emergency Exit Signs. In *Fire Safety Science - Proceedings of the third International Symposium* (pp. 835–841). Elsevier Applied Science.
- Jin, T. (1997). Studies on Human Behavior and Tenability in Fire Smoke. *Fire Safety Science*, 5, 3–21. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.5-3>
- Jin, T., & Yamada, T. (1989). Experimental Study of Human Behavior in Smoke Filled Corridors. *Fire Safety Science*, 2, 511–519. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.2-511>
- Kecklund, L., Anderzén, I., Häggström, J., Wahlström, B. (2006). Evakuering från tåg, Människan – Tekniken – Organisationen. Brandskyddslaget och MTO Psykologi AB, Stockholm.
- 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>
- Kimura, M., & Sime, J. (1989). Exit Choice Behaviour during the Evacuation of Two lecture Theatres. In T. Wakamatsu, Y. Hasemi, A. Sekizawa, P. Seeger, P. Pagni, & C. Grant (Eds.), *second International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 541–550). Hemisphere Publishing Corporation. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.2-541>
- Kobes, M., Helsloot, I., de Vries, B., & Post, J. G. (2010). Building safety and human behaviour in fire: A literature review. *Fire Safety Journal*, 45(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.08.005>
- Kuligowski, E. (2008). *Modeling Human Behavior during Building Fires*. National Institute of Standards and Technology.

- Kuligowski, E. (2009). *The Process of Human Behaviour in Fires*. National Institute of Standards and Technology.
- Kynaston, R. (1997). Tunnel detrainment in action - Hong Kong's practical experience. In *two day seminar on Escape from Trains*.
- Lenmalm B, Räddningstjänstinsatser i industribränder - Rökdykarstudier, Brandforsk projekt nr 419-924, 1998.
- Martens, M., & Jenssen, G. (2012). Human Behaviour in Tunnels What further steps to take? In A. Lönnemark & H. Ingason (Eds.), *fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security* (pp. 69–85). SP Technical Research Institute of Sweden.
- Magnusson K, Rohlén P (2013). Tunnelsäkerhet - Släckvattensystem i järnvägstunnlar. Publikation 2013:181, Trafikverket.
- Martens, M., & Jenssen, G. (2012). Human Behaviour in Tunnels What further steps to take? In A. Lönnemark & H. Ingason (Eds.), *fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security* (pp. 69–85). SP Technical Research Institute of Sweden.
- McClintock, T., Shields, T., Reinhardt-Rutland, A., & Leslie, J. (2001). A Behavioural Solution to the Learned Irrelevance of Emergency Exit Signage. In *Second International Symposium on Human Behaviour in Fire* (pp. 23–33). Interscience communications.
- Nilsson, D. (2006). *Utformning av talade utrymningsmeddelanden - erfarenheter från en enkätundersökning och oannonserade utrymningsförsök*. Lund University.
- Nilsson, D. (2009). Exit Choice in Fire Emergencies - Influencing Choice of Exit With Flashing Lights. In *Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety*. Lund University.
- Nilsson, D., Frantzich, H., & Saunder, W. (2005). Coloured Flashing Lights to Mark Emergency Exits - Experiences From Evacuation Experiments. In D. Gottuk & B. Lattimer (Eds.), *Fire Safety Science - Proceedings of the eighth International Symposium* (pp. 569–579). International Association of Fire Safety Science.
- Nilsson, D., Johansson, M., & Frantzich, H. (2009). Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. *Fire Safety Journal*, 44(4), 458–468. <https://doi.org/Doi 10.1016/J.Firesaf.2008.09.009>
- 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*, 94–101.
- Norén, A., & Winér, J. (2003). *Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations*. Lund University.
- NYT, Subway Derailment in Manhattan Injuries Dozens, New York Times, June 27, 2017.
- OECD. (2017). Obesity Update 2017. OECD.
- Oswald, M., Lebeda, C., Schneider, U., & Kirchberger, H. (2005). Full-Scale Evacuation Experiments in a smoke filled Rail Carriage - a detailed study of passenger behaviour under reduced visibility. In N. Waldau, P. Gatterman, H. Knoflacher, & M. Schreckenberg (Eds.), *third International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, PED 2005* (pp. 41–55). Springer.

- Oswald, M., Kirchberger, H., & Lebeda, C. (2008). Evacuation of a High Floor Metro Train in a Tunnel Situation: Experimental Findings. In W. W. F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, & M. Schreckenberg (Eds.), *fourth International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics, PED 2008* (pp. 67–81). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_5)
- Oswald, M., Schjerve, N., & Lebeda, C. (2011). Carriage Evacuation in local, public rail transportation systems in case of fire Experiments, Findings and Human Behavior. *Advanced Research Workshop on Evacuation and Human Behavior in Emergency Situations*.
- Palm, A., Kumm, M., Ingason, H. (2014). Full-scale tests of alternative methods for fire fighting in underground structures. Proceedings from the Sixth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Marseille, France March 12-14, 2014.
- Persson, H., “Basic equipment for the use of foam as an extinguishing medium; Experimental results and recommendations as a basis determinations of design capacity and performance”, SP report 1990:36, Swedish National Testing and Research Institute, 1990.
- Purser, D., & McAllister, J. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed., pp. 2308–2428). Society of Fire Protection Engineers.
- Proulx, G. (2003). Playing with fire: understanding human behavior in burning buildings. *ASHRAE Journal*, 45(7), 33–35.
- Proulx, G., & Sime, J. (1991). To Prevent “Panic” in an Underground Emergency: Why Not Tell People the Truth? In G. Cox & B. Langford (Eds.), *third International Symposium on Fire Safety Science* (pp. 843–852). Elsevier Applied Science.
- Quarantelli, E. L. (1954). The nature and conditions of panic. *American Journal of Sociology*, 60(3), 267–275.
- Quarantelli, E. (1975). Panic Behavior: Some Empirical Observations. In *American Institute of Architects Conference on Human Response to Tall Buildings*.
- Quarantelli, E. (1979). Panic Behavior in Fire Situations: Findings and a Model from the English Language Research Literature. In *Fourth Joint Panel Meeting of the United States- Japan Panel on Fire Research*.
- Rogsch, C., Schreckenberg, M., Tribble, E., Klingsch, W., & Kretz, T. (2008). Was It Panic? An Overview About Mass-Emergencies and Their Origins All Over the World for Recent Years. In W. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, & M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008* (pp. 743–755). Springer.
- Rohlén, P., & Wahlström, B. (1996). *Tunnelbaneolyckan i Baku, Azerbaijan 28 oktober 1995*. Statens räddningsverk.
- Ronchi, E., & Nilsson, D. (2013). *Traffic Information Signs, Colour Scheme of Emergency Exit Portals and Acoustic Systems for Road Tunnel Emergency Evacuations*. Lund University.
- Ronchi, E., & Nilsson, D. (2015). *A Virtual Reality Experiment on Flashing Lights at Emergency Exit Portals for Road Tunnel Evacuation*.

- Seike, M., Kawabata, N., & Hasegawa, M. (2016). Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 53, 61–67. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.01.003>
- Shields, J., & Boyce, K. (2004). Towards Developing an Understanding of Human Behaviour in Fire in Tunnels. In *third International Symposium on Human Behaviour in Fire*. Interscience Communications.
- SHT (2009). Temarapport om brann/røykutvikling på Oslo T-bane 2005-2007. Rapport JB 2009/01. Statens Haverikommisjon for Transport.
- 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.
- SHT (2016). Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland 11. August 2015. Rapport Vei 2016/03. Statens Haverikommisjon for Transport.
- SHT (2019). Rapport om brann i køyretøy på Rv. 5, Fjærlandstunnelen, 17. April 2017. Rapport Veg 2019/05. Statens Haverikommisjon for Transport.
- Sime, J. (1980). The Concept of “Panic.” In D. Canter (Ed.), *Fires and Human Behaviour* (pp. 63–81). John Wiley & Sons Ltd.
- Sime, J. (1983). Affiliative Behaviour During Escape to Building Exits. *Journal of Environmental Psychology*, 3(1), 21–41.
- Sime, J. (1984). *Escape behaviour in fires: “Panic” or affiliation?* University of Surrey.
- Sime, J. (1985). Movement toward the Familiar - Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting. *Environment and Behaviour*, 17(6), 697–724.
- Sime, J., & Kimura, M. (1988). The Timing of Escape: Exit choice behaviour in fires and building evacuations. In J. D. Sime (Ed.), *Safety in the Built Environment* (pp. 48–61). E. & F.N. Spon Ltd.
- 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.
- TSI-SRT (2014). Commission Regulation (EU) 1303/2014 on technical specification for interoperability relating to ‘safety in railway tunnels’ of the rail system of the European Union.
- TSI-LOC&PAS (2014). Commission Regulation (EU) No 1302/2014 concerning a technical specification for interoperability relating to the ‘rolling stock — locomotives and passenger rolling stock’ subsystem of the rail system in the European Union
- UN. (2006). Convention on the Rights of Persons with Disabilities (Treaty Series, vol. 2515). UN General Assembly, New York.
- UN. (2019a). World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

- UN. (2019b). World Population Prospects 2019, Volume I: Comprehensive Tables (ST/ESA/SER.A/426). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- UN. (2019c). World Population Prospects 2019, Volume II: Demographic Profiles (ST/ESA/SER.A/427). United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Vermina Lundström, F., Ahlfont, J., & Nilsson, D. (2014). The Effect of Raised Walkway Design on Evacuation Behaviour in Rail Tunnels. In *eleventh International Symposium on Fire Safety Science*. International Association for Fire Safety Science.
- WHO. (2011a). World Report on Disability: Summary (WHO/NMH/VIP/11.01). World Health Organization.
- WHO. (2011b). World Report on Disability. World Health Organization.
- Voeltzel A (2002). Compared analysis of the Mont Blanc Tunnel and the Tauern Tunnel fires. PIARC WG6 working document, Lessons learnt from past disasters.
- Åhnberg, N., Harrysson, K., & Elias, A. (2017). *Tunnelsäkerhet: Utrymningsdimensionering vid upphöjda gångbanor*.

# Vedlegg A – Backlayering modell

Modellen som er brukt i denne studien for å studere backlayering er i hovedsak basert på arbeidet fra Ingason et al. [1]. Den stasjonære ventilasjonshastigheten beregnes i henhold til teorier om endimensjonale turbulente kanalstrømninger. En viktig parameter i denne modellen er gjennomsnittstemperaturen, som en representativ temperatur for området mellom brannkilden og tunnelutgangen nedstrøms. Gjennomsnittstemperaturen er estimert ved å bruke metoden rapportert i [24].

I modellen beregnes først den maksimale temperaturen under tunneltaket, basert på modellen foreslått av Li og Ingason [33]. Deretter beregnes avviket mellom den overskytende gasstemperaturen («*excess gas temperature*»), målt under taket i midtpunktet mellom brannkilden og utgangen nedstrøms, ved bruk av den langsgående temperaturfordelingsmodellen gitt av Ingason et al. [32], og omgivelsestemperaturen utenfor tunnelen.

Gjennomsnittstemperaturen beregnes ved å dele den overskytende gasstemperaturen med en faktor 1,6, som basert på tidligere studier [34,35]. Denne metoden brukes også for å estimere den langsgående fordelingen av den gjennomsnittlige gasstemperaturen i en tunnel. Når stasjonær tilstand er oppnådd, kan *backlayering*-lengden estimeres ved å bruke metoden som ble foreslått av Li et al. [36].

Brannkildens radius er en modellparameter som brukes til å beregne røyktemperatur og er definert i en tidligere studie [35]. Denne tilsvarer radiusen av en sirkulær brann med samme areal som brannen i toget. Radiusen beregnes ut fra brannkildens tilsvarende projiserte område. Siden det er type 74/75-tog [37] som blir vurdert i denne studien, estimeres den geometriske størrelsen på brannen i henhold til togets størrelse. Den definerte brannenergien på 60 MW tilsvarer verdien som ble observert i fullskala-testene i METRO-prosjektet, der hele vognen var i brann. Derfor er det anslåtte arealet til brannkilden ved 60 MW i denne studien også estimert til å være området for hele vognen. Vi antar også at området med brannkilden er proporsjonalt med størrelsen på brannen. Grunnverdien for brannens radius er satt til 3,3 m, som tilsvarer en brann i halve vognen, mens verdien på 4,6 m tilsvarer en brann i hele vognen.

Den effektive tunnelhøyden er en modellparameter, som brukes til å beregne røyktemperatur [35], og er definert som den vertikale avstanden mellom bunnen av brannkilden og tunneltaket. Tatt i betraktning at høyden på kupéens gulv er 0,76 m, og at brannen forenklet sett er på gulvnivået, er den effektive tunnelhøyde (avstand fra brannens lokasjon til tunneltaket) for enkeltspørtunnel og dobbeltspor henholdsvis 7,09 og 7,64 m.

Lengden på backlayering er estimert på grunnlag av en tidligere studie [36], der det ble funnet korrelasjoner mellom en dimensjonsløs backlayering-lengde og dimensjonsløs inneslutningshastighet (*dimensionless confinement velocity*). Det skal bemerkes at slike korrelasjoner er tett knyttet til hvor mye av tunnelens tverrsnittsareal som dekkes av toget (fyllingsgrad). I denne studien er hindringen som dekker tverrsnittet et type 74/75-tog med fyllingsgrad på henholdsvis 23,4 % for enkeltspørtunneler og 15,6 % for dobbeltspørtunneler. Korrelasjonene er utviklet for en fyllingsgrad mellom 0 % og 20 %. Modellen er basert på gjennomsnittshastighet i tunnelen, dermed tas det ikke hensyn til at fyllingsgraden er forskjellig i den delen av tunnelen hvor toget står og resten av tunnelen. Derfor ble alle beregningene

gjennomført for både 0 % og 20 %. Verdien som oppnås ved bruk av korrelasjonen på 0 % fyllingsgrad gir en øvre grense for lengden på backlayering.



Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,200 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

Gjennom internasjonalt samarbeid med akademi, næringsliv og offentlig sektor bidrar vi til et konkurransekraftig næringsliv og bærekraftig samfunn. RISEs 2 200 medarbeidere driver og støtter alle typer innovasjonsprosesser. Vi tilbyr et hundretalls test- og demonstrasjonsmiljø for framtidssikre produkter, teknikker og tjenester. RISE Research Institutes of Sweden eies av den svenske staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB  
Postboks 4767 Torgarden, 7465 TRONDHEIM  
Telefon: 464 18 000  
E-post: [post@risefr.no](mailto:post@risefr.no), Internett: [www.risefr.no](http://www.risefr.no)

RISE Fire Research  
RISE-rapport 2020:58  
ISBN: 978-91-89167-43-8